

残余应力基本知识

爱斯特应力技术有限公司 吕克茂

www.hdst.net

lvkema061015@163.com

QQ: 985252889



残余应力基本知识简介

- 残余应力概念界定
- 残余应力的产生
- 残余应力的作用
- 残余应力的测量方法



一、残余应力的基本概念

定义

- **内应力**：没有外力或外力矩作用而在物体内部存在并自身保持平衡的应力。

•历史回顾

1860年 Woehler 指出火车轴的断裂有内应力作用这个因素

1925年 Masing 首次提出将内应力分为三类。

1935年 Д а в и д е н к о в 依据各类内应力对晶体的X射线衍射现象具有不同的影响也将内应力分为三类。

1973年 Macher auch提出了新的内应力模型



内应力分类

Macherauch的定义

Macherauch模型的优点是：

- i) σ_r^I 、 σ_r^{II} 和 σ_r^{III} 之间的关系明确，是一个完整的体系。
- ii) 内应力与材料的组织结构有了紧密的联系。

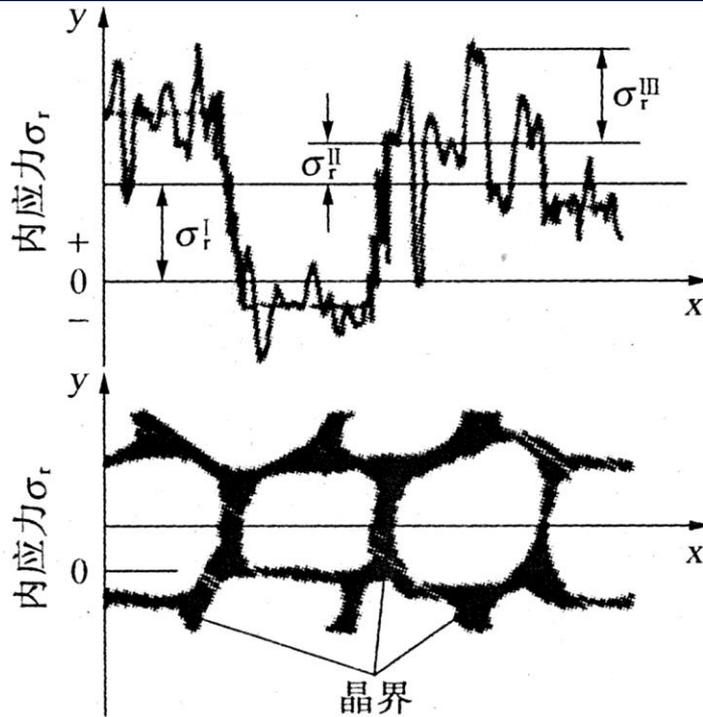


图1 内应力分类的示意图^[1]

Fig. 1 Definition of I, II and III kind internal stresses

示意图

什么是残余应力？

- ◆国内科技文献习惯将第一类内应力称为残余应力
- ◆一般英、美文献中把第一类内应力称为“宏观应力”（Macrostress）
- ◆把第二类和第三类内应力合称为“微观应力”（Microstress）
- ◆残余应力可以认为是第一类内应力的工程名称。

残余应力的产生

- ◆ 不均匀的弹性和塑性形变
- ◆ 不均匀的温度变化
- ◆ 不均匀的相变



◆ 不均匀塑性变形引起

残余应力



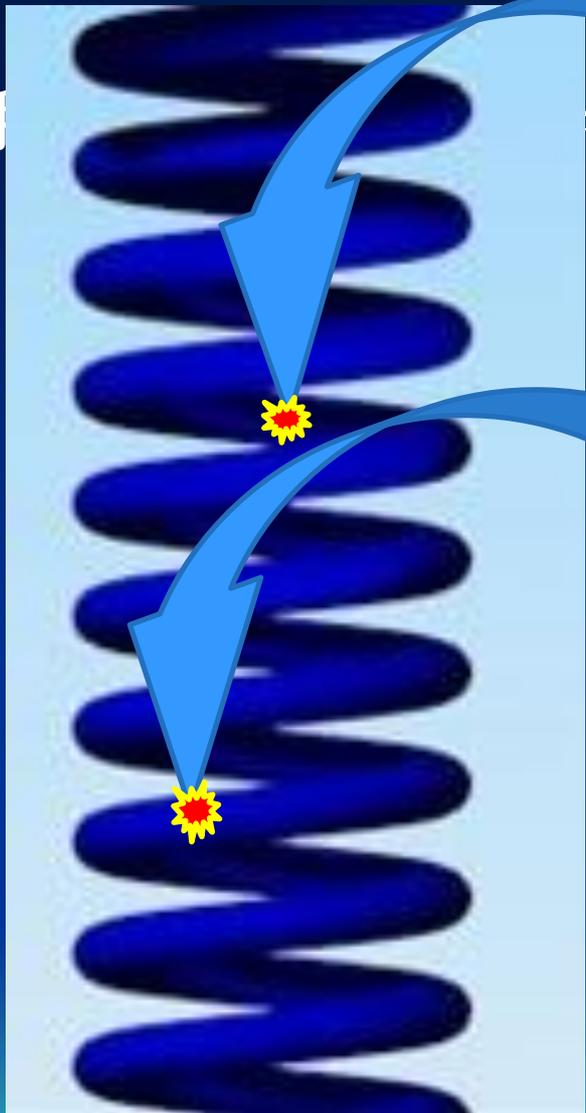
让我

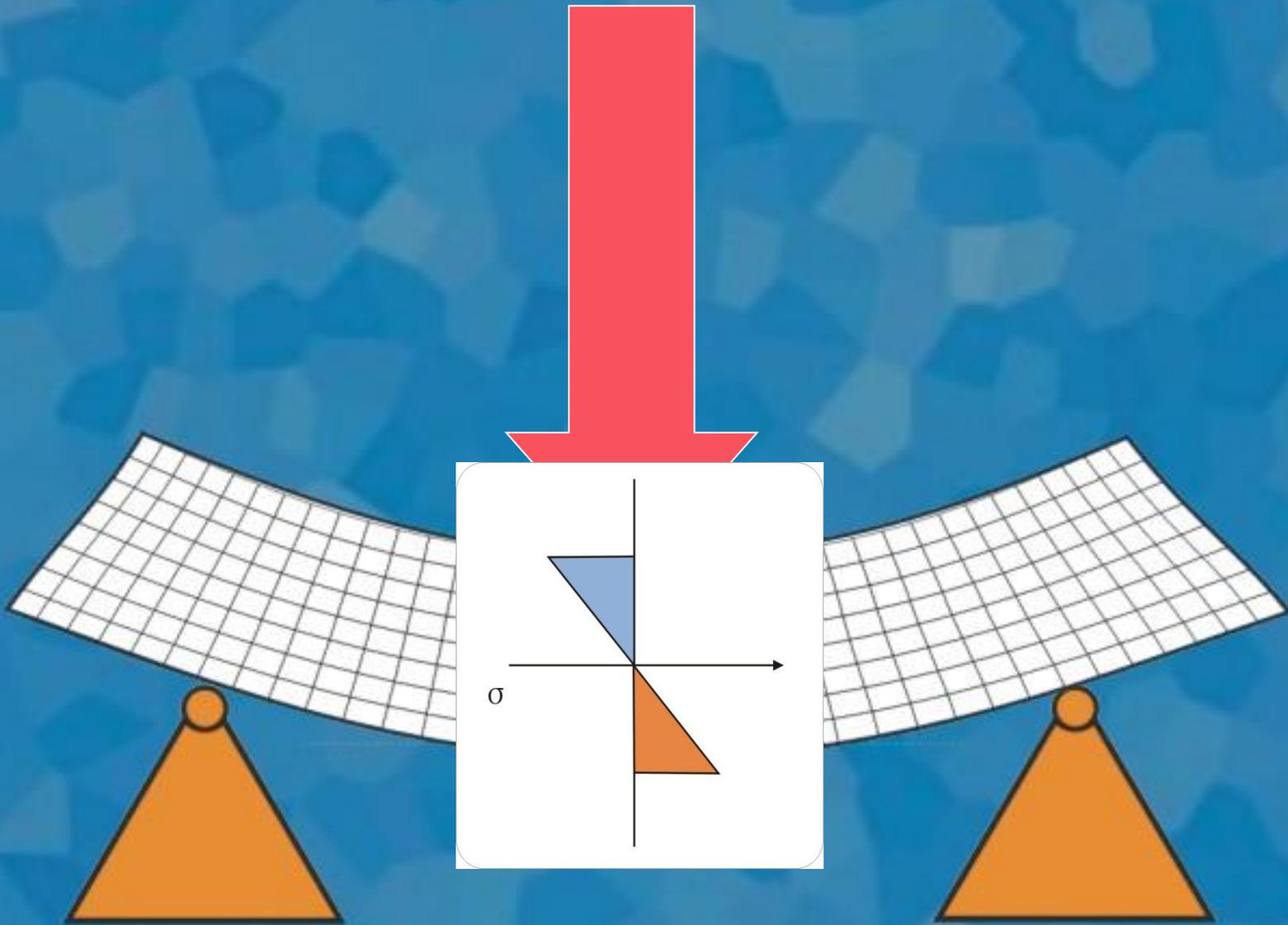
卷圆柱弹簧

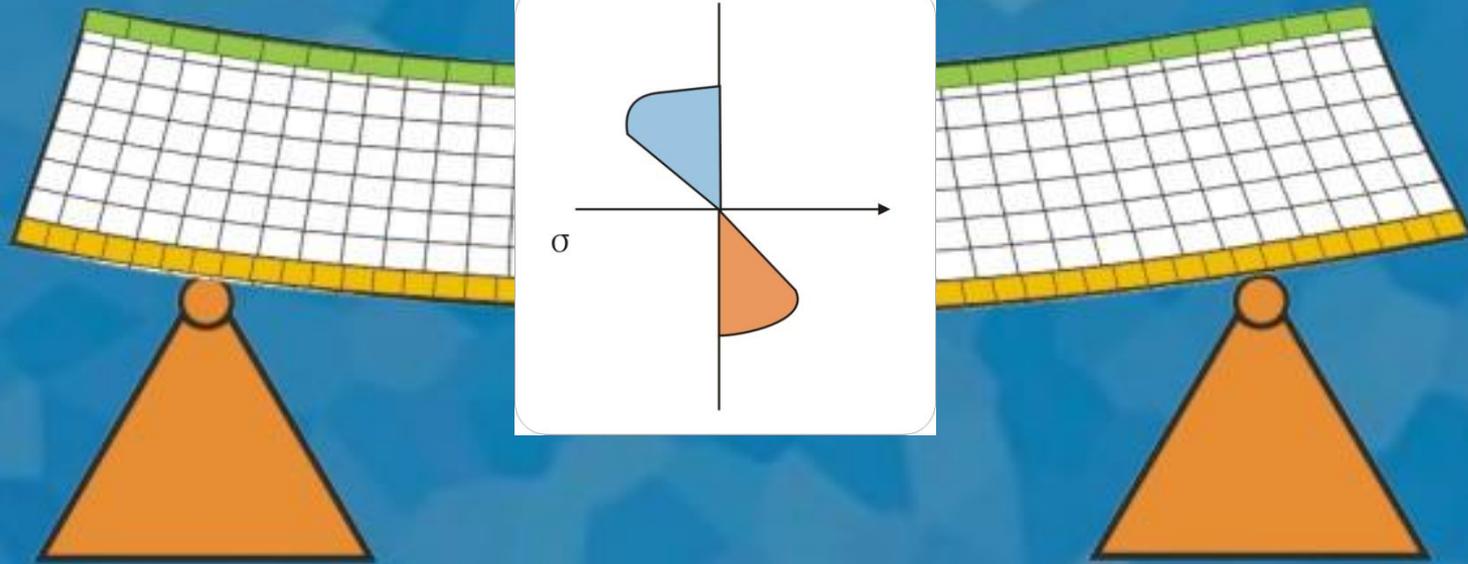
弹簧螺旋管的内壁

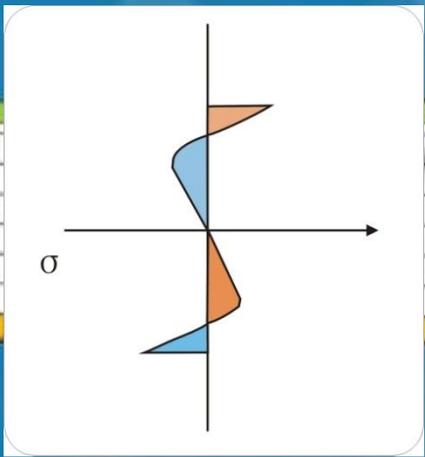
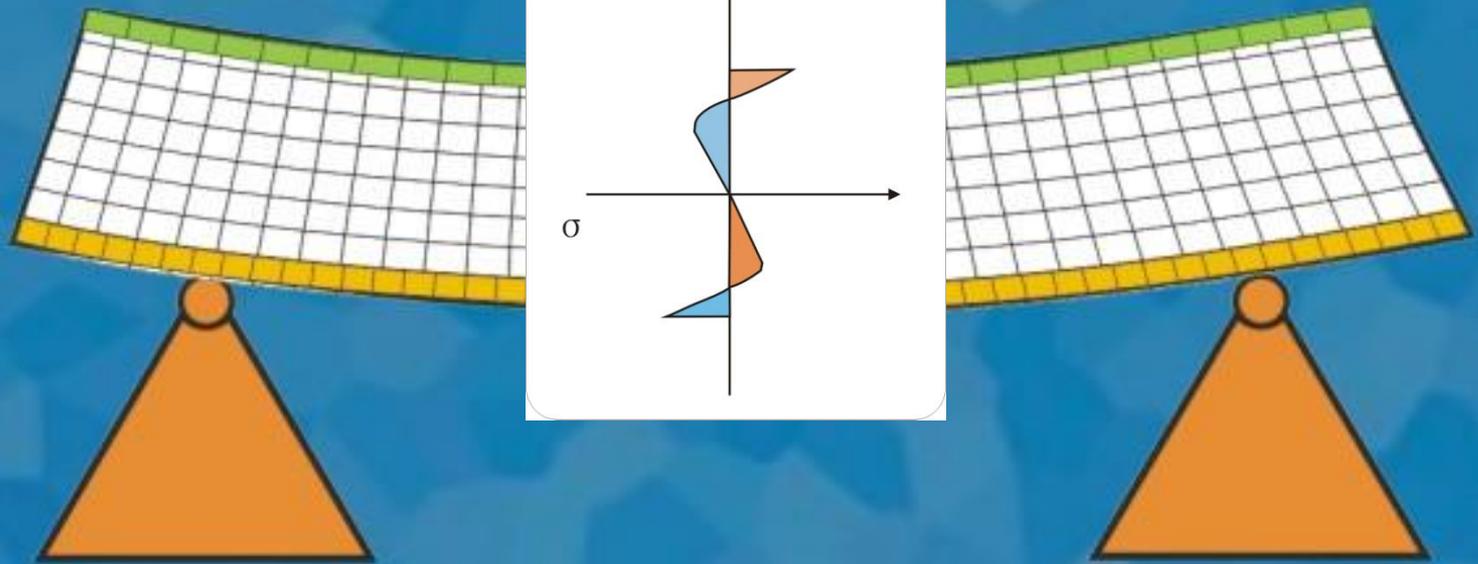
弹簧螺旋管的外壁

分别是什么残余应力状态？









- 在机械加工中，各种各样的冷弯、冷卷、冷拔、冷校直工艺，产生残余应力的情形都和上面的例子类似。
- 各种切削加工，都会在表层留下不同深度的塑性变形层，而且变形量沿层深变化梯度明显，所以都会产生残余应力。
- 喷丸强化工艺更是因不均匀塑性变形产生残余应力的典型实例。



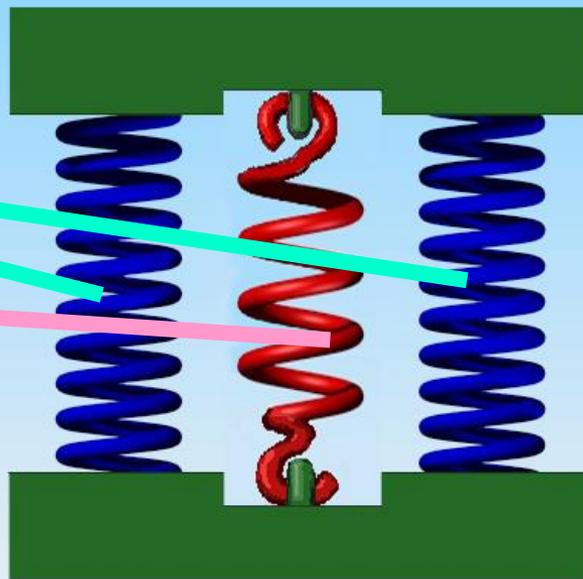


◆ 不均匀的弹性变形引起残余应力

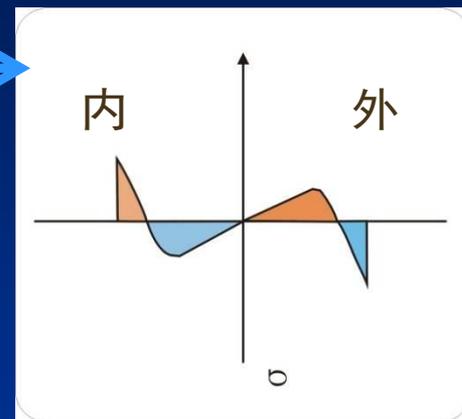
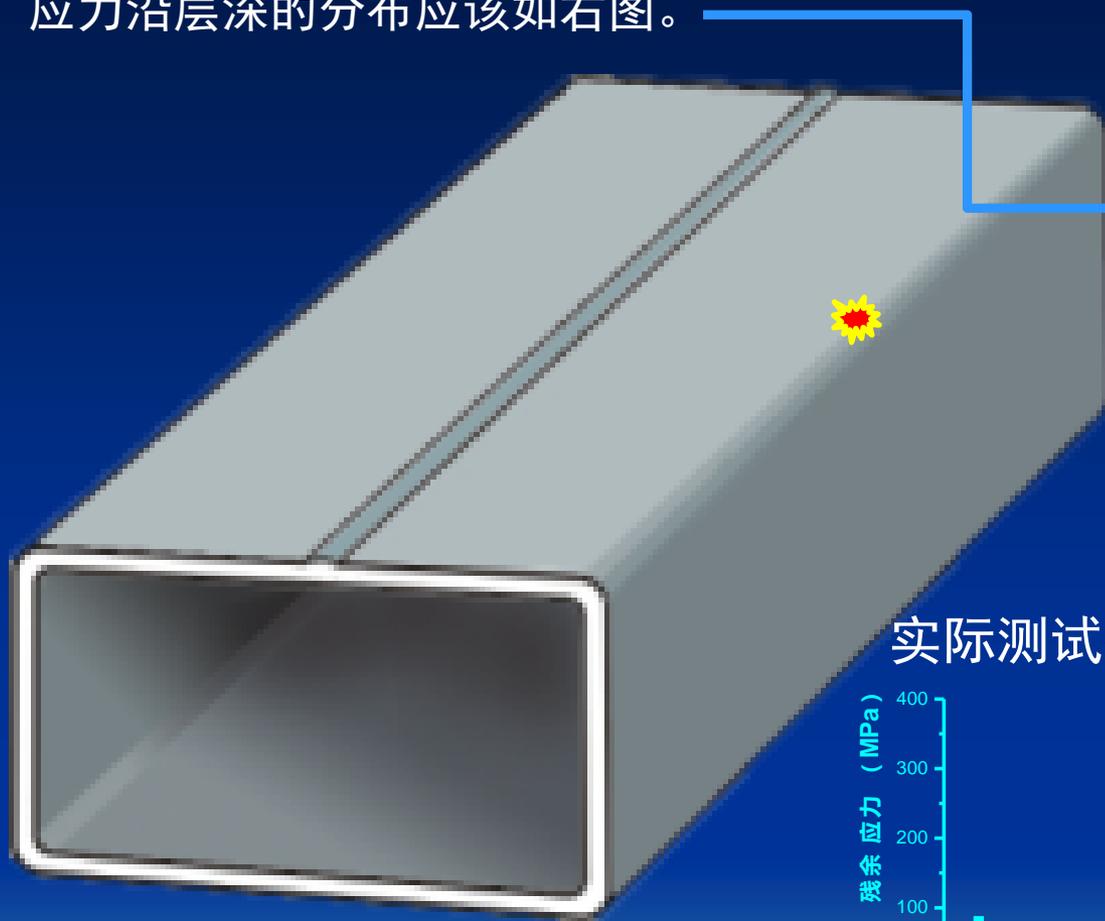
压簧

拉簧

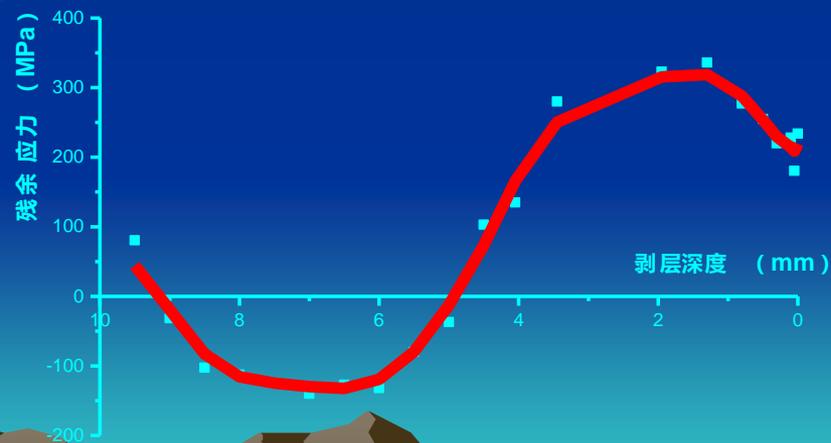
请看模型

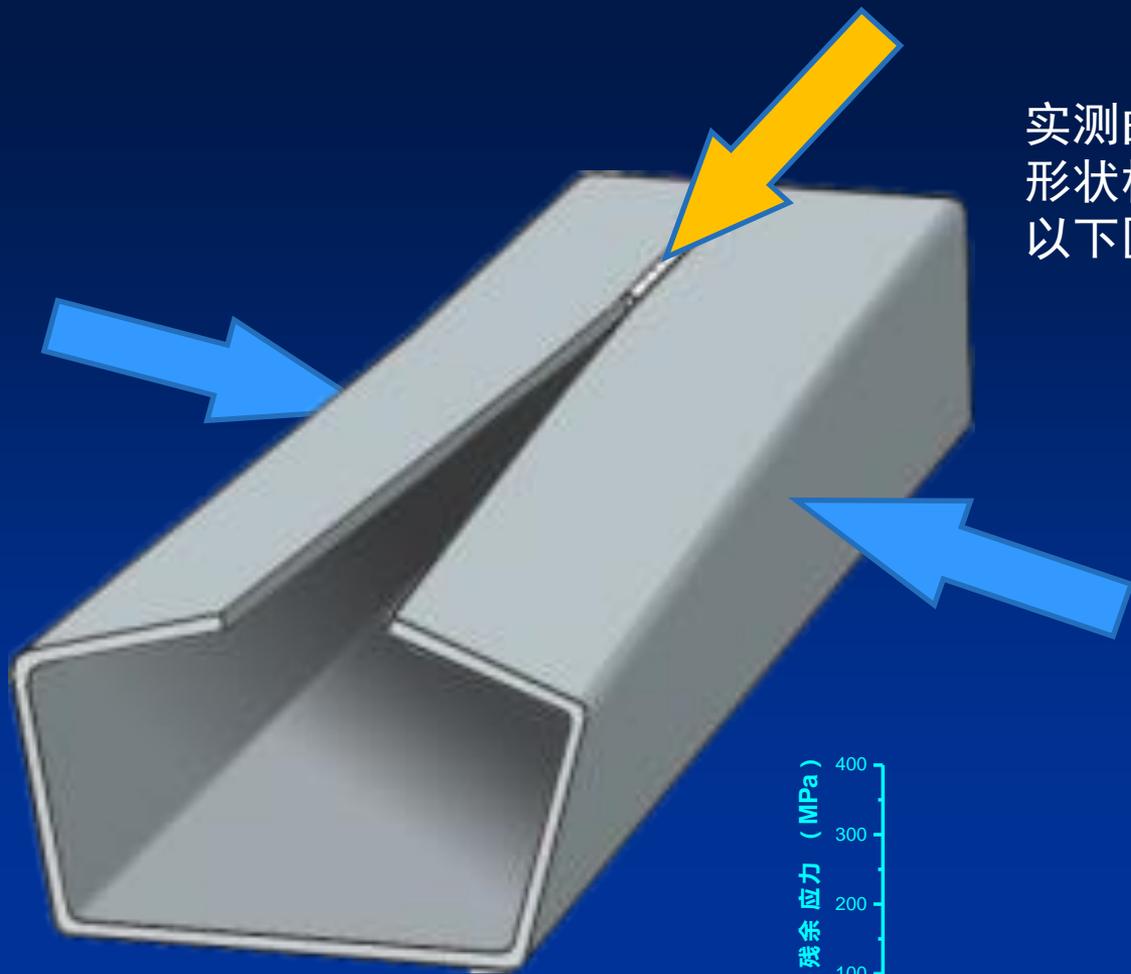


按照前面简支梁上下表面发生塑性变形形成残余应力的分析，方管圆角处残余应力沿层深的分布应该如右图。



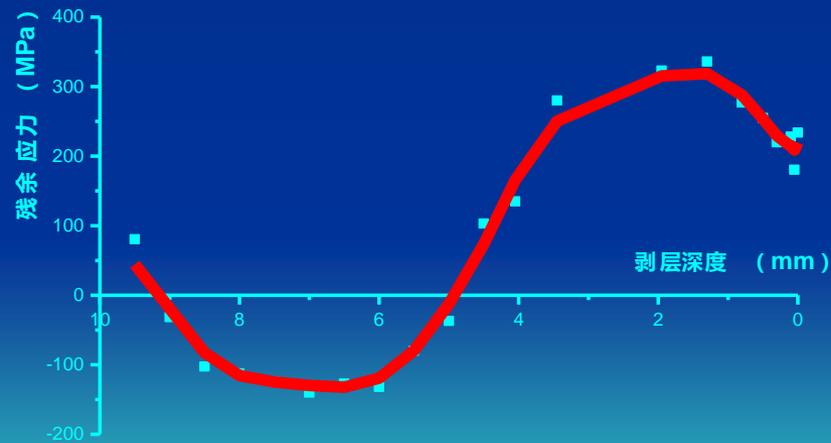
实际测试得到的分布曲线却是这样的





实测曲线与理论分析所得曲线形状相似，区别在于表层及其以下区间多了显著的拉应力。

实际情况是：钢板弯折并没有达到90度，焊接时施加外力，强制焊接成型，于是把弹性变形固定下来。



按层深来说，外层的拉应力既包括塑性变形的因素，也包括弹性变形的因素。表层拉应力下跌，与弯折后塑性变形层应有的压应力有关。



◆ 不均匀的温度变化引起残余应力

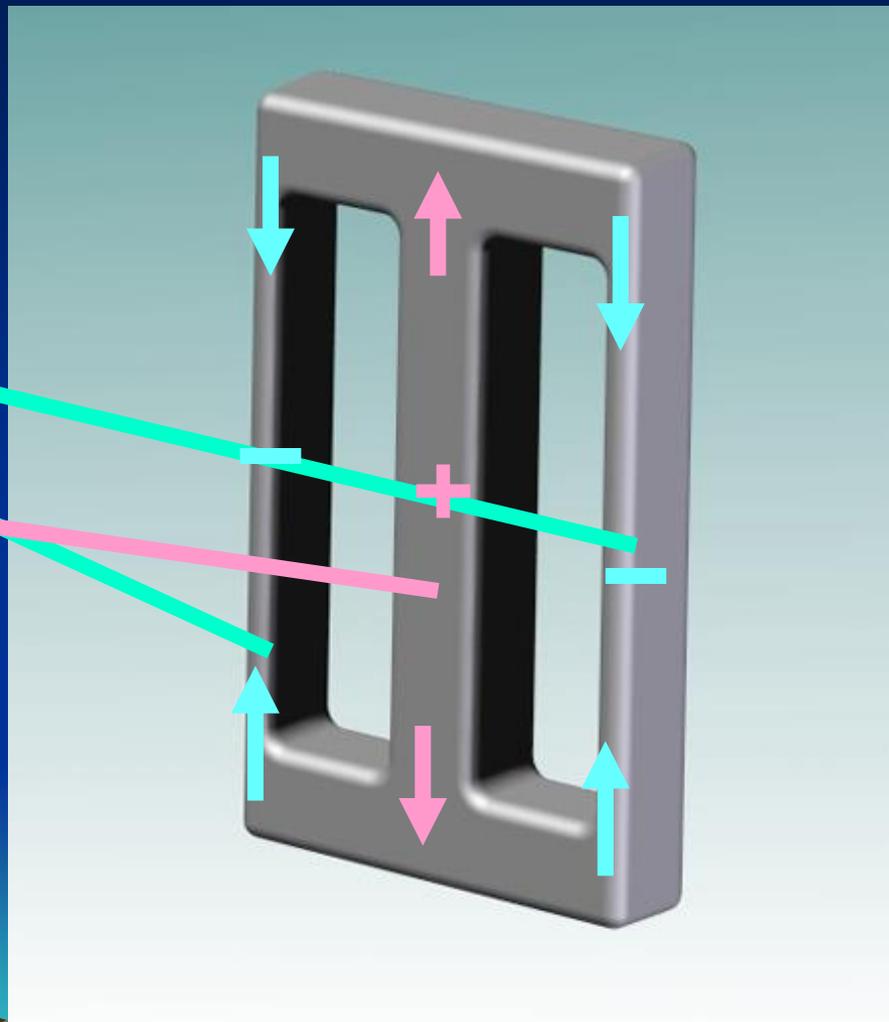
铸造应力框

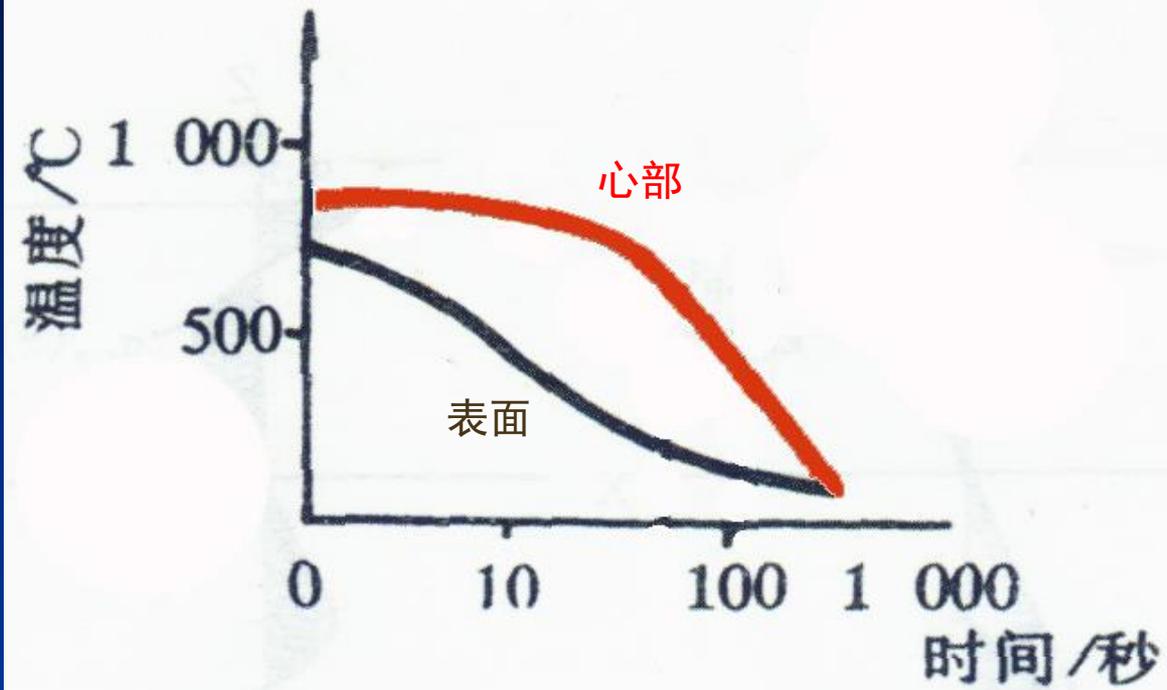
边杆 ← 截面积较小
先凝固，先冷却，先收缩

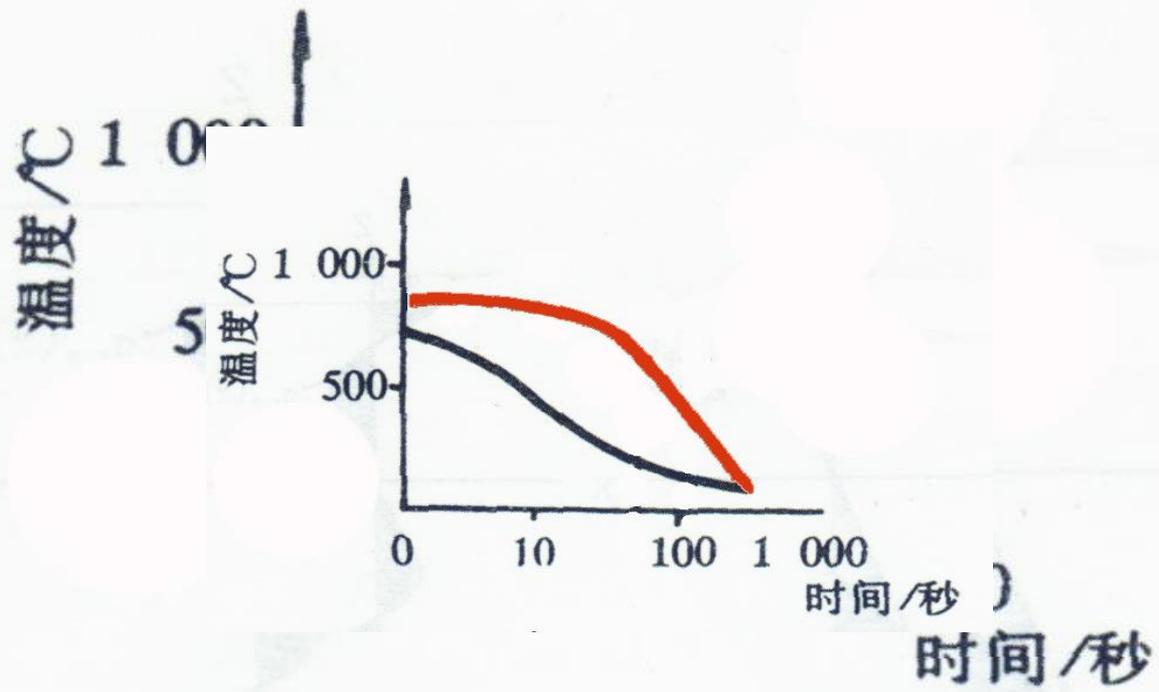
中杆 ← 截面积较大
后凝固，后冷却，后收缩

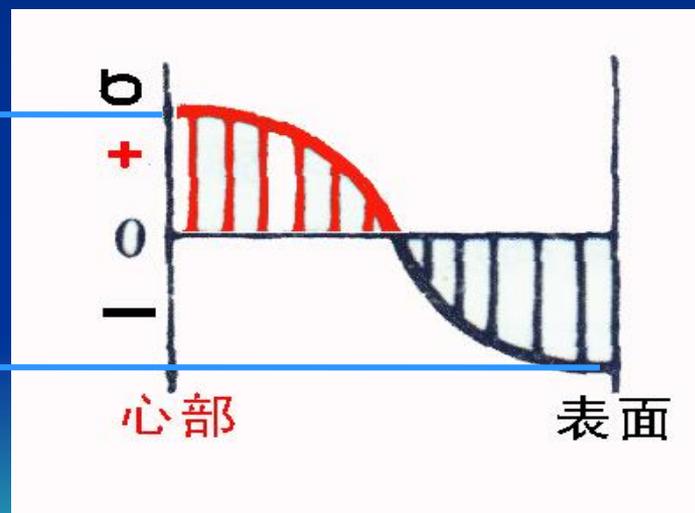
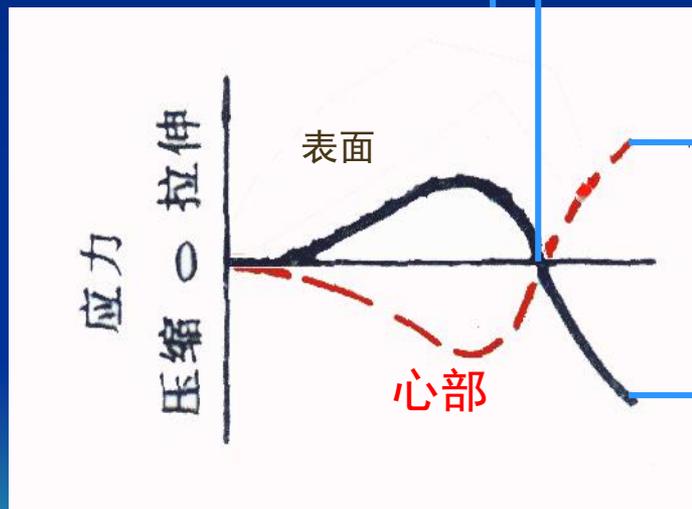
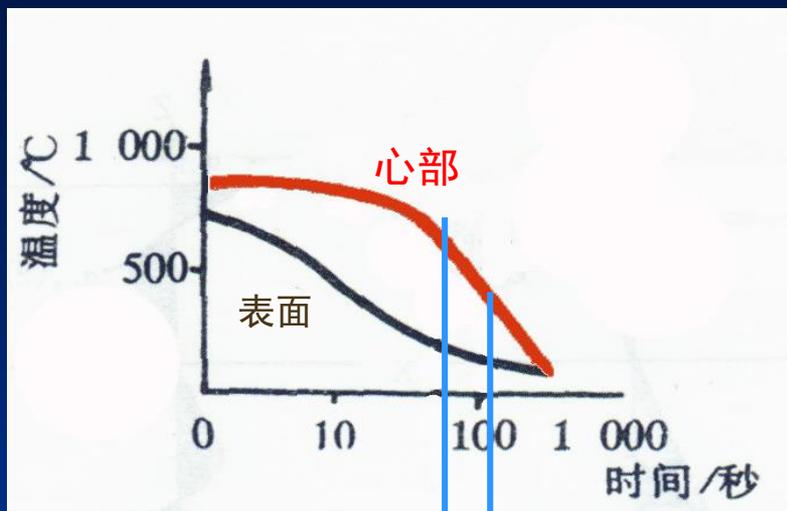
由于受到已经定型的边杆的支撑，
中杆不能充分收缩，便有拉应力残留下来。

相应地，边杆会承受残余压应力。



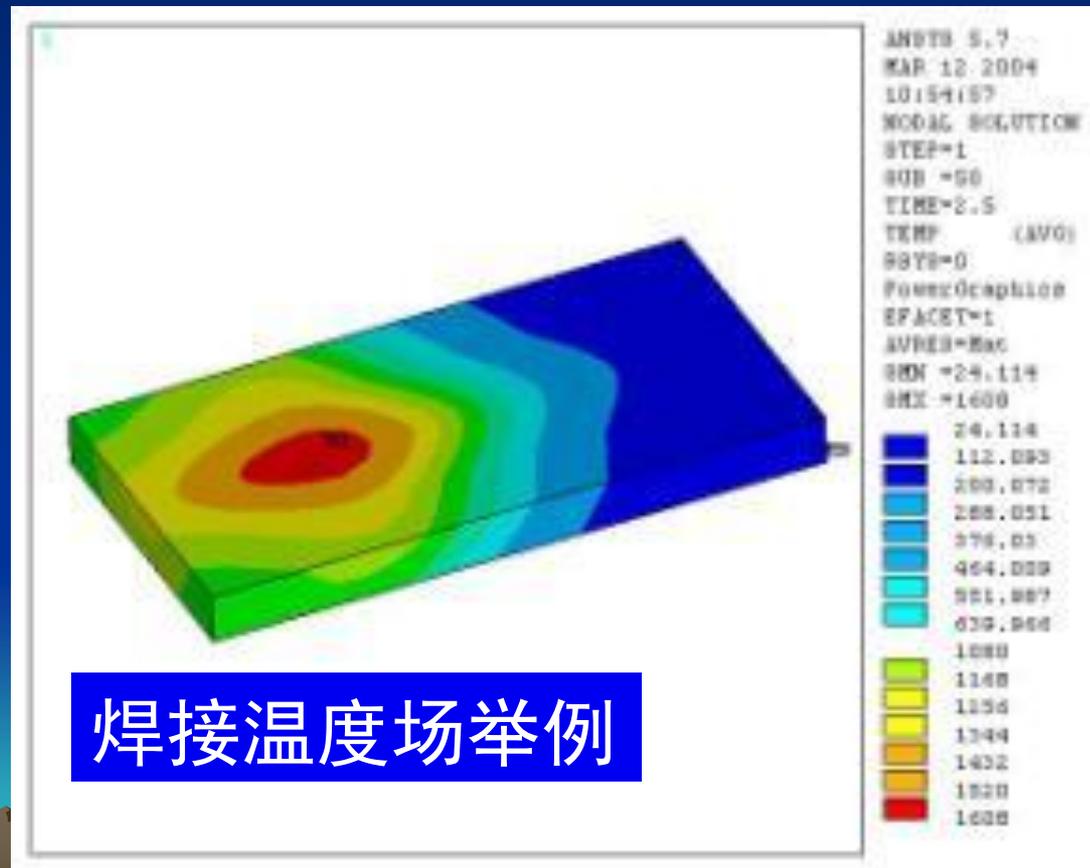




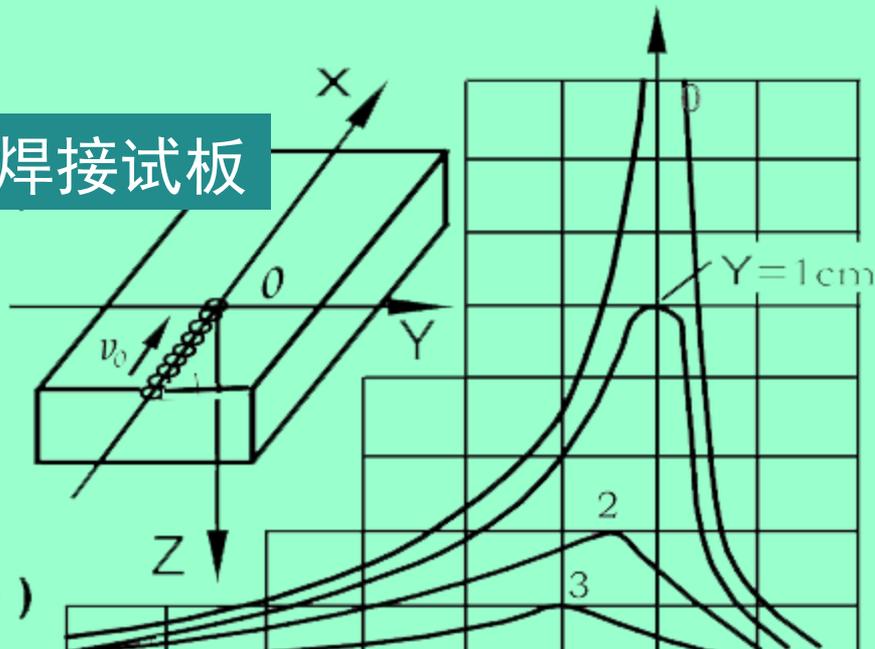


焊接残余应力的产生

焊接是一个局部熔化、局部高温、温度梯度极高、温度快速升高快速下降，并且发生结晶和相变的过程。典型的极端的非均匀温度变化，必然产生残余应力。

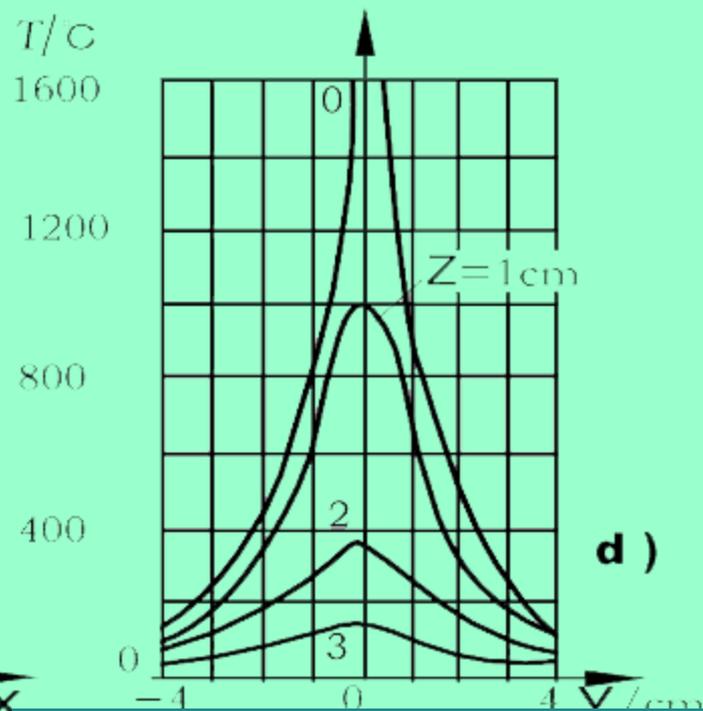


焊接试板



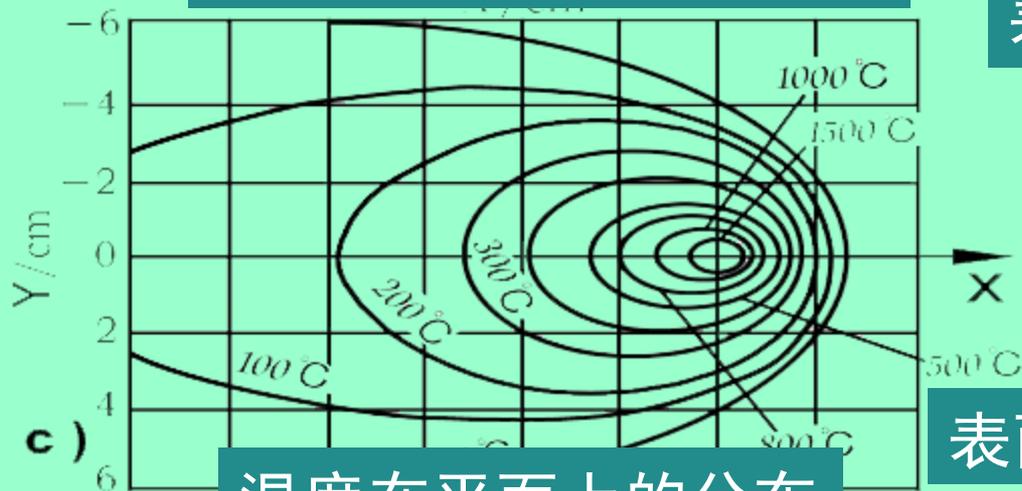
b)

表面温度沿X方向的分布



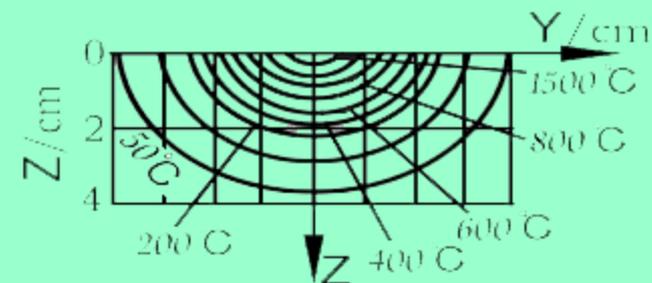
d)

表面温度沿Y方向的分布



c)

温度在平面上的分布

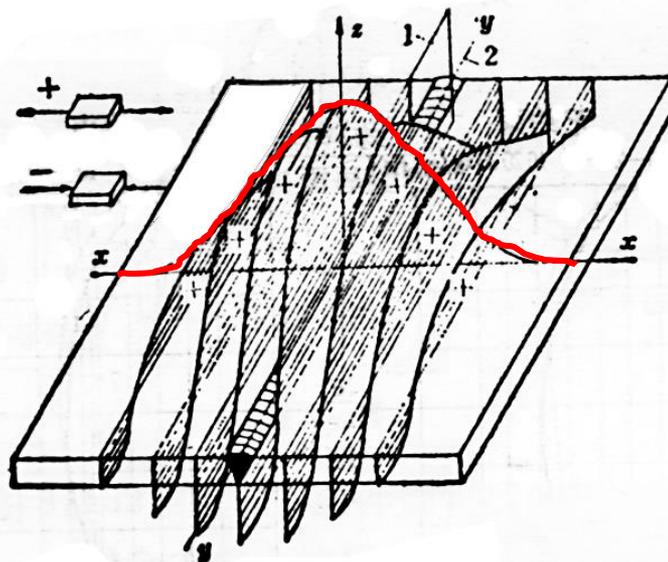
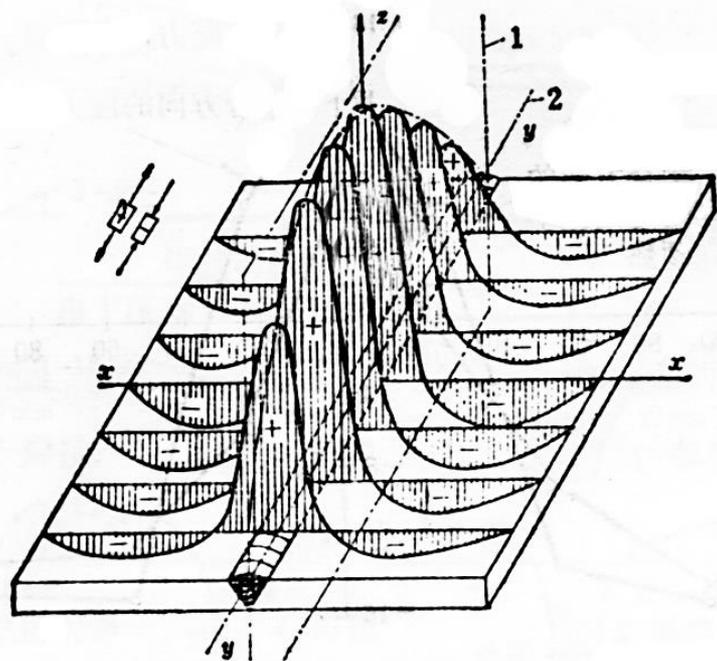


表面温度沿深度方向的分布

焊接试板残余应力典型分布

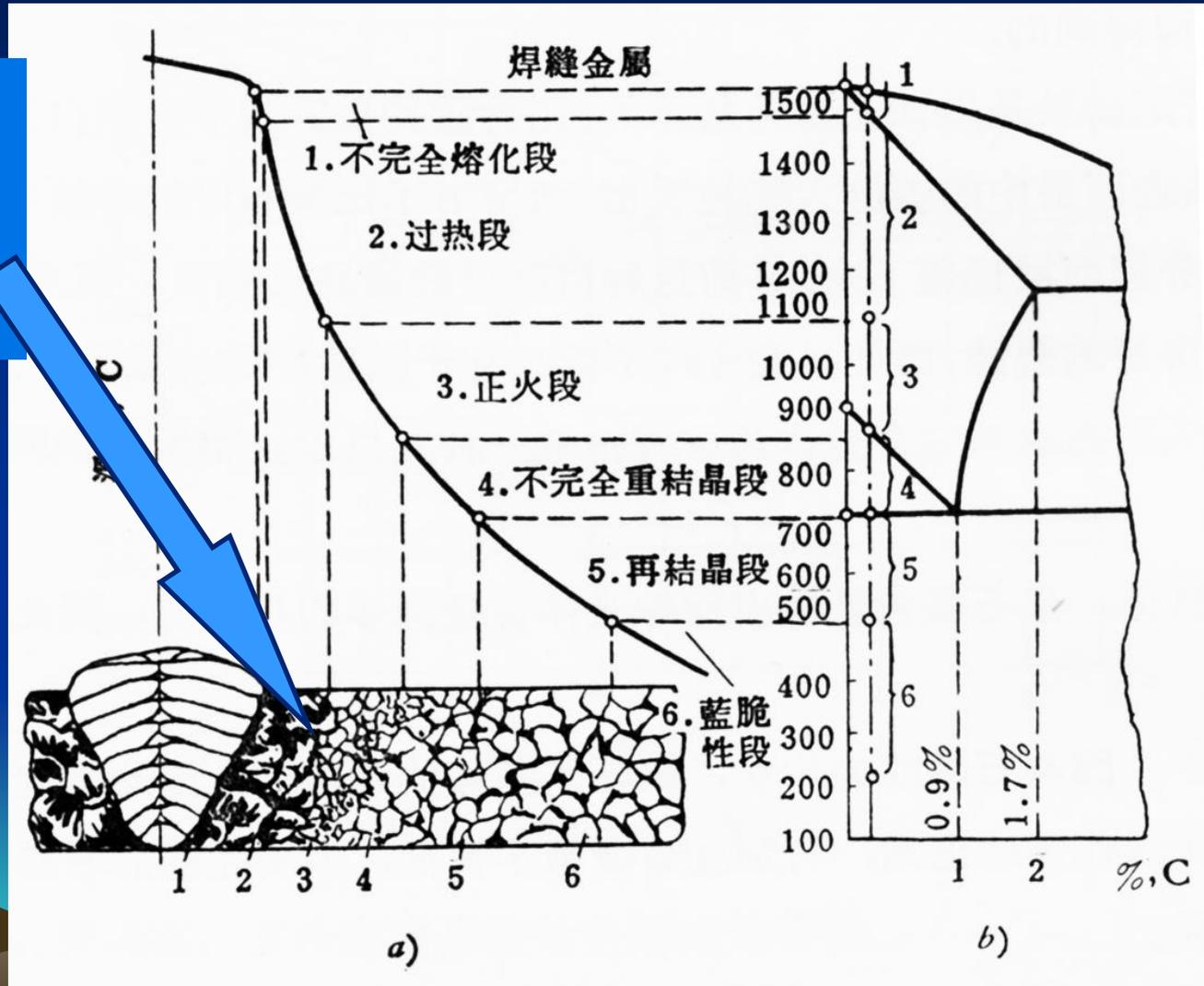
根据热应力分析得到的理论分布图

在实际测试中的得到比较好的验证



焊缝及热影响区组织结构分布示意图

过热产生的魏氏组织属于焊接冶金损伤

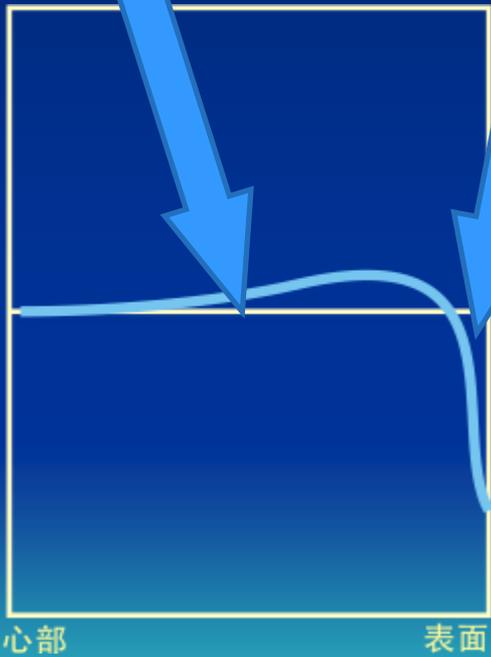


◆ 不均匀的相变引起残余应力

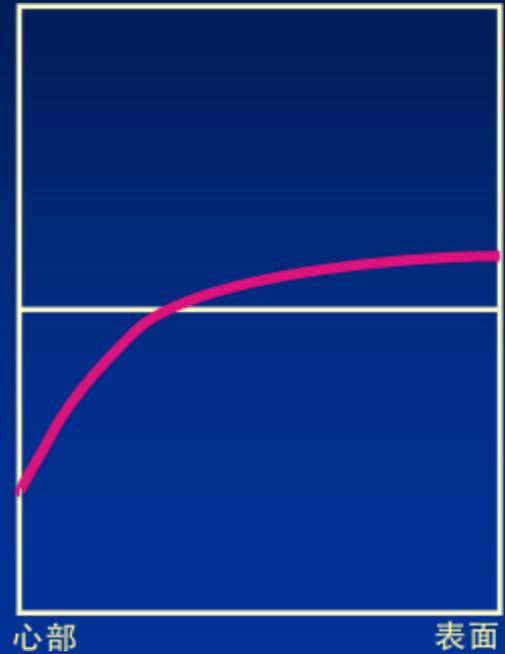
- 例如轧辊表面淬火

表面产生马氏体，而马氏体是过饱和固溶体，比容比较大，有膨胀的趋势，但是受到心部组织的牵制，不能充分膨胀，所以表面产生压应力。



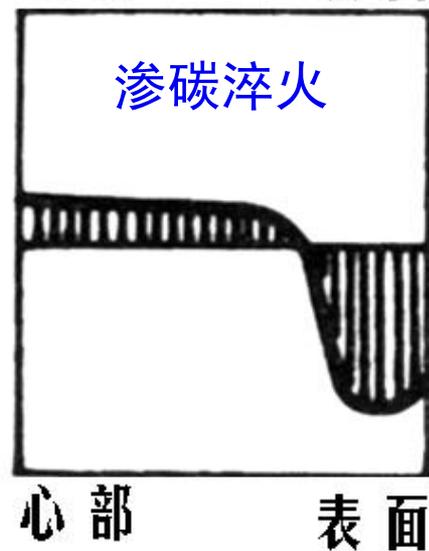
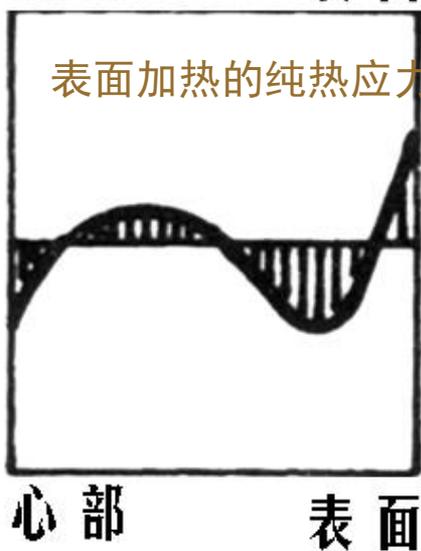
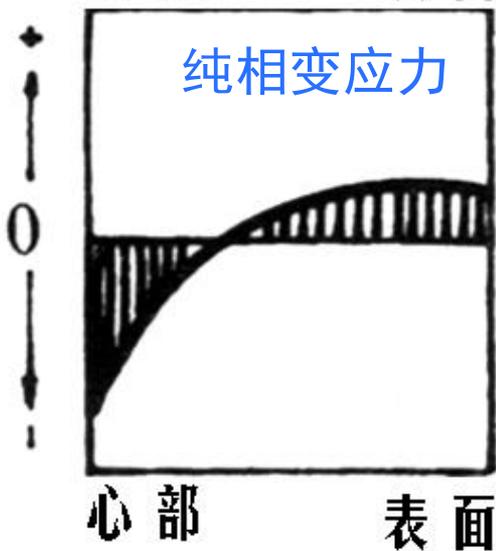
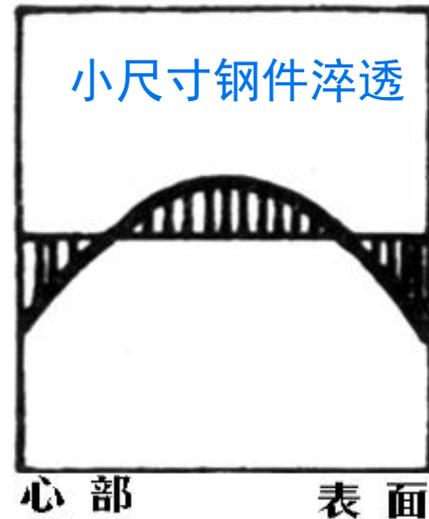
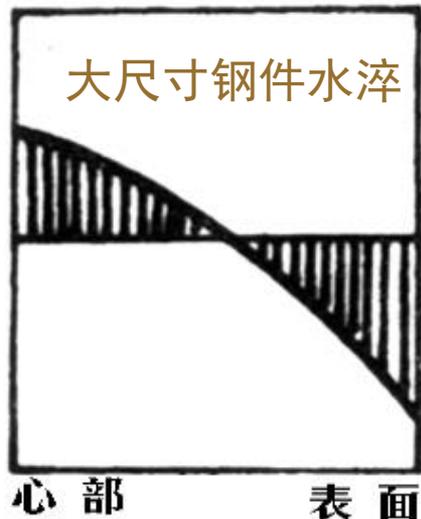
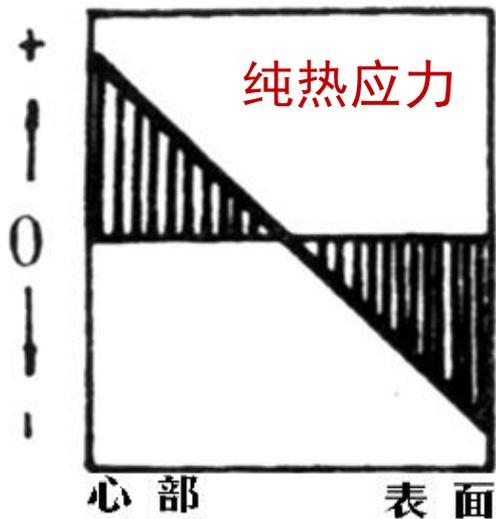


表面淬火的残余应力



整体淬火的残余应力
(设法排除热应力)

残余应力



- 不均匀的弹塑性形变
- 不均匀的温度变化
- 不均匀的相变

在许多情况下，残余应力的产生都是多种因素组合作用的结果。



以 **磨削应力** 为例

第一，塑性凸出效应——产生拉应力；

第二，挤光效应——产生压应力；

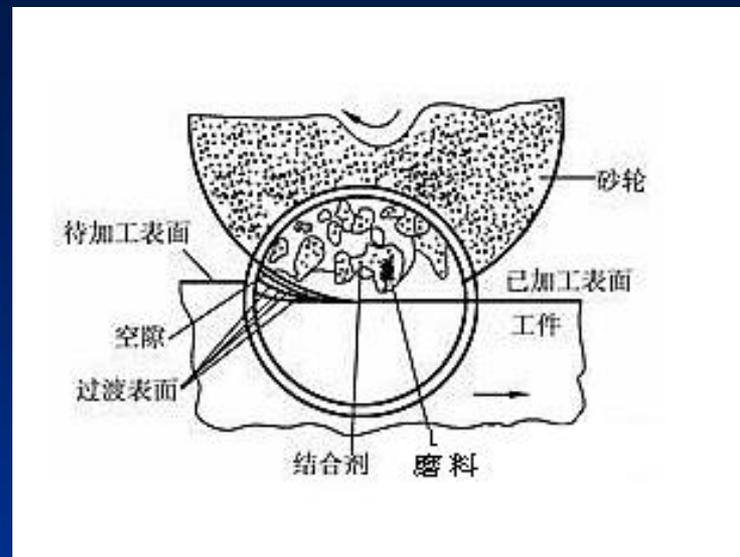
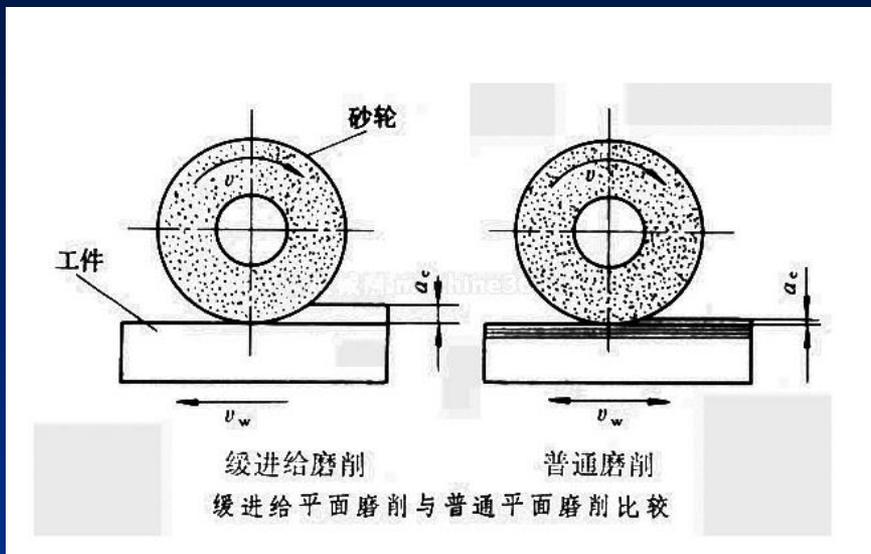
第三，热应力——产生拉应力；

第四，相变应力——

1、磨削热如果使马氏体回火，表层比容减小，产生拉应力；

2、如果进而发生再淬火，则会产生压应力。

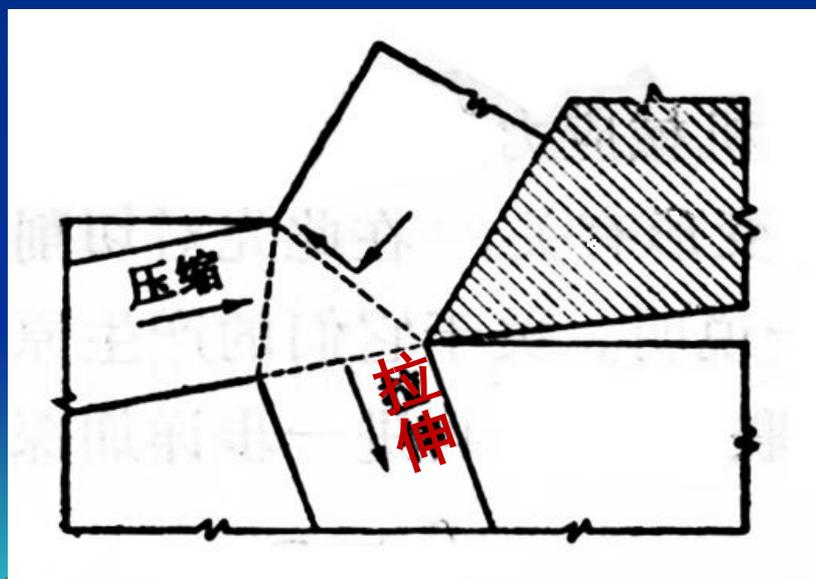




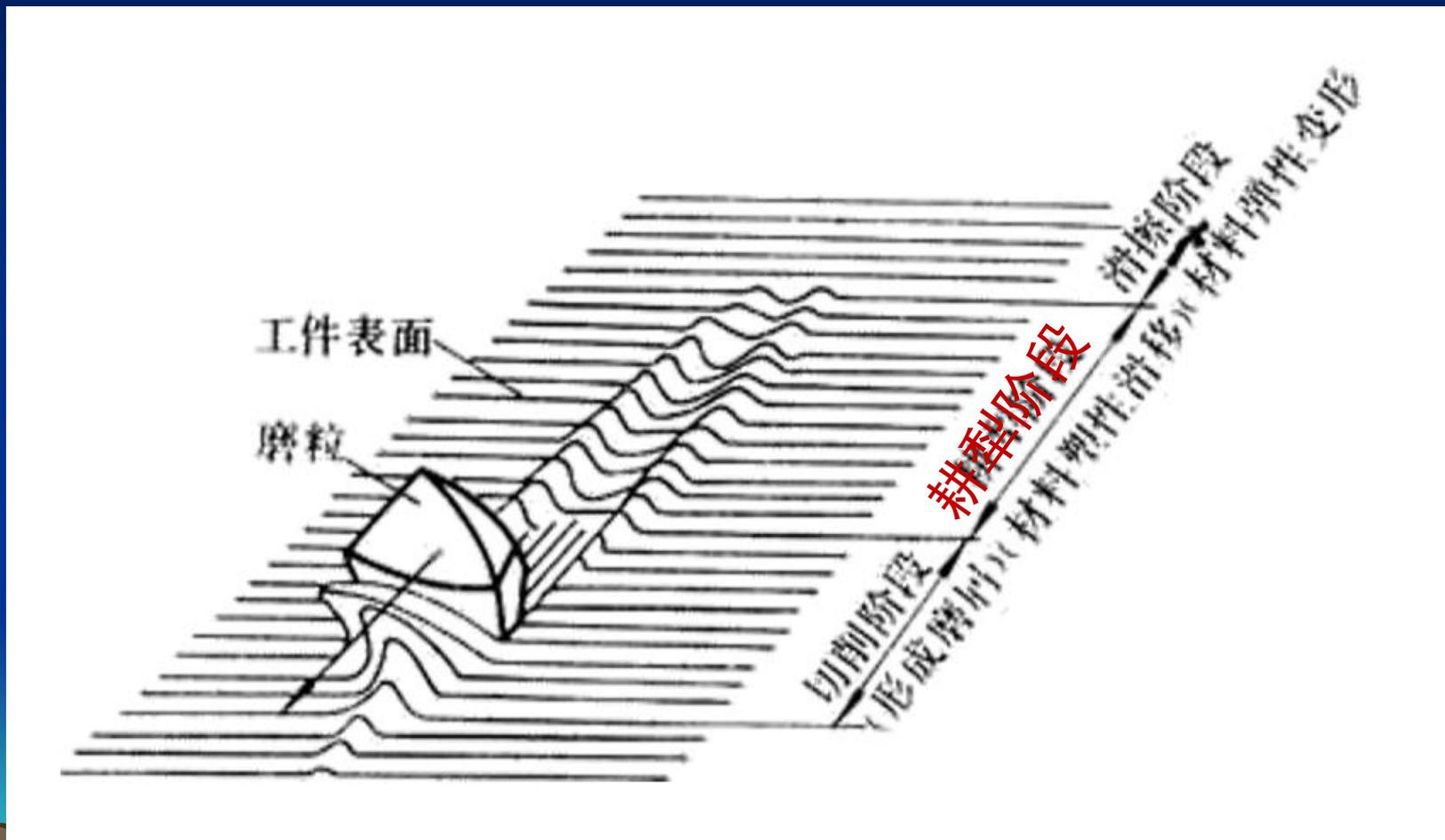
拉伸作用引起凸出效应

垂直于表面的塑性“凸出”，按照波松比关系，必然会产生平行于表面的塑性收缩，而表面之下未收缩，所以，

在被切削平面产生残余拉应力



耕犁阶段 → 材料塑性滑移阶段
即“塑性凸出”，表面塑性收缩阶段



磨削应力

塑性凸出效应
拉应力

挤光效应
压应力

热效应
拉应力

相变效应
拉应力或压应力

被磨削材料的材质、硬度
砂轮的材质和锋利程度
磨削进给量
砂轮旋转的线速度
工件行进速度
冷却液的组分和流量

残余应力的作用

1、对于钢和铝合金制作的结构，特别是大型拼焊构件，人们普遍考虑的是残余应力对结构安全和寿命的影响；过大的残余应力，或者过分不均匀的残余应力，可能导致构件变形或开裂，造成早期失效，甚至引发安全事故。究其机理，可以从如下两个方面考虑：



(1) 焊接宏观缺陷和焊接冶金损伤会导致焊缝和热影响区材料塑性和韧性下降，在此情况下，残余拉应力就可能触发低应力脆性破坏。

(2) 各处极不均匀的应力，在运行过程中自然会逐步松弛，但是必然以产生永久变形为代价。严重的变形本身就会导致构件失效；对于重要的运动部件而言，由变形而产生的动平衡失衡和附加振动，必然会导致构件早期疲劳破坏。



- 2、对于轧辊、齿轮、轴承、弹簧、曲轴之类的零部件，主要考虑如何通过调整残余应力状态来提高零件的疲劳寿命。
- 3、对于在具有腐蚀性环境或介质里工作的零部件，还必须考虑应力腐蚀问题。残余拉应力，和外加载荷的拉应力一样，是促成应力腐蚀的因素之一。
- 4、对于精密零部件，则应当关注残余应力对零件形状尺寸稳定性的影响。宏观残余应力的释放必然会引起形状尺寸的变化。



换一种说法

残余应力的作用

分三种情况：

第一，希望消除残余应力；

第二，希望附加残余压应力；

第三，个别情况下，需要附加拉应力。



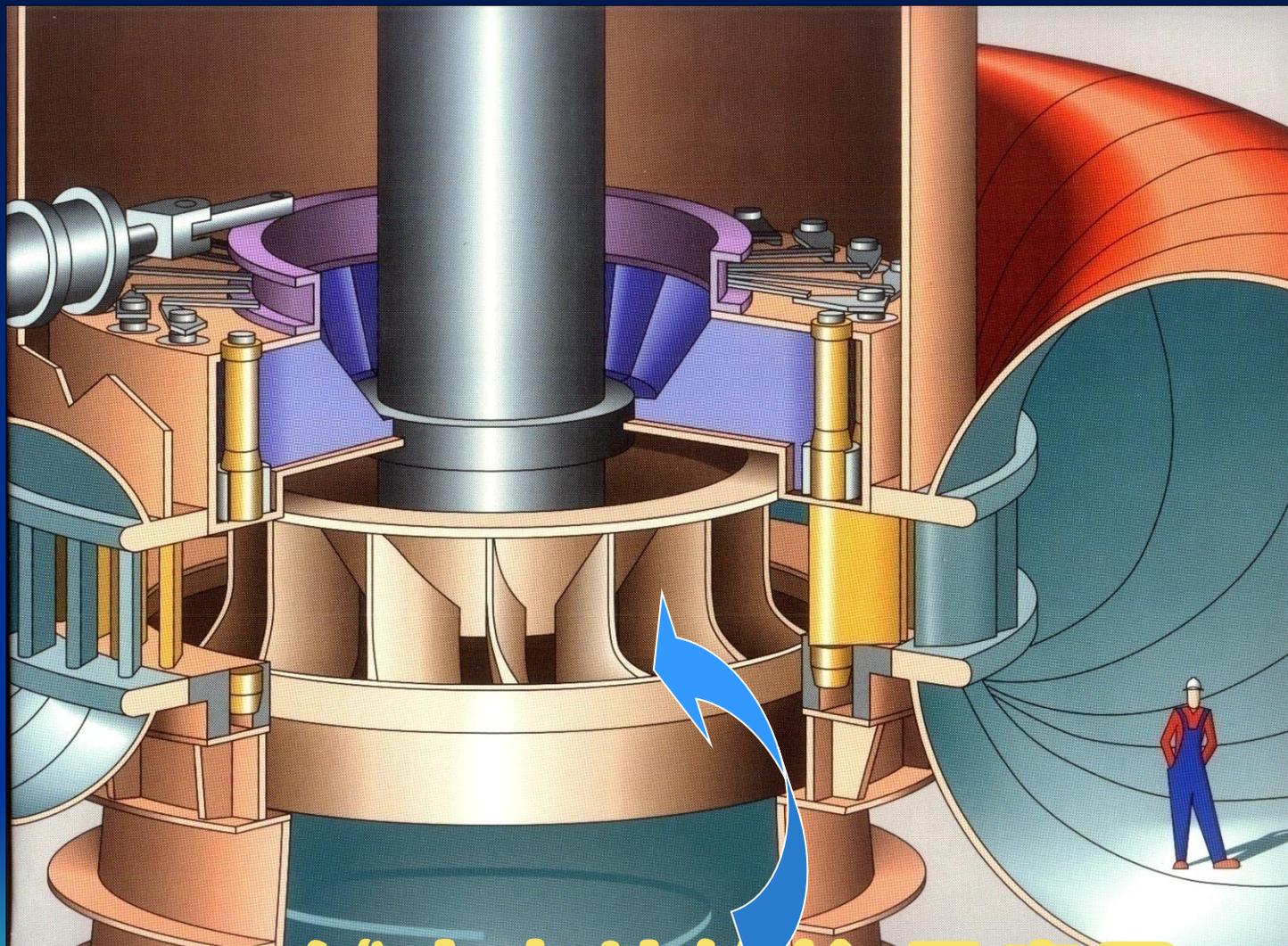
1、钢结构残余应力测试实例





1998年再次来到同一位置的时候，
已是大坝壁立，截断雅砻云雨，
高峡平湖展现眼前。

发电厂就建在对面大山的山肚子里面。



二滩水电站转轮示意图



转轮在工厂制造成两个1 / 2，然后到现场对焊成整体转轮。

显然焊接残余应力是不可忽略的。它关系到转轮乃至整个发电系统的质量、寿命和安全。

图为对焊缝进行电解抛光，为X射线应力测定作准备。

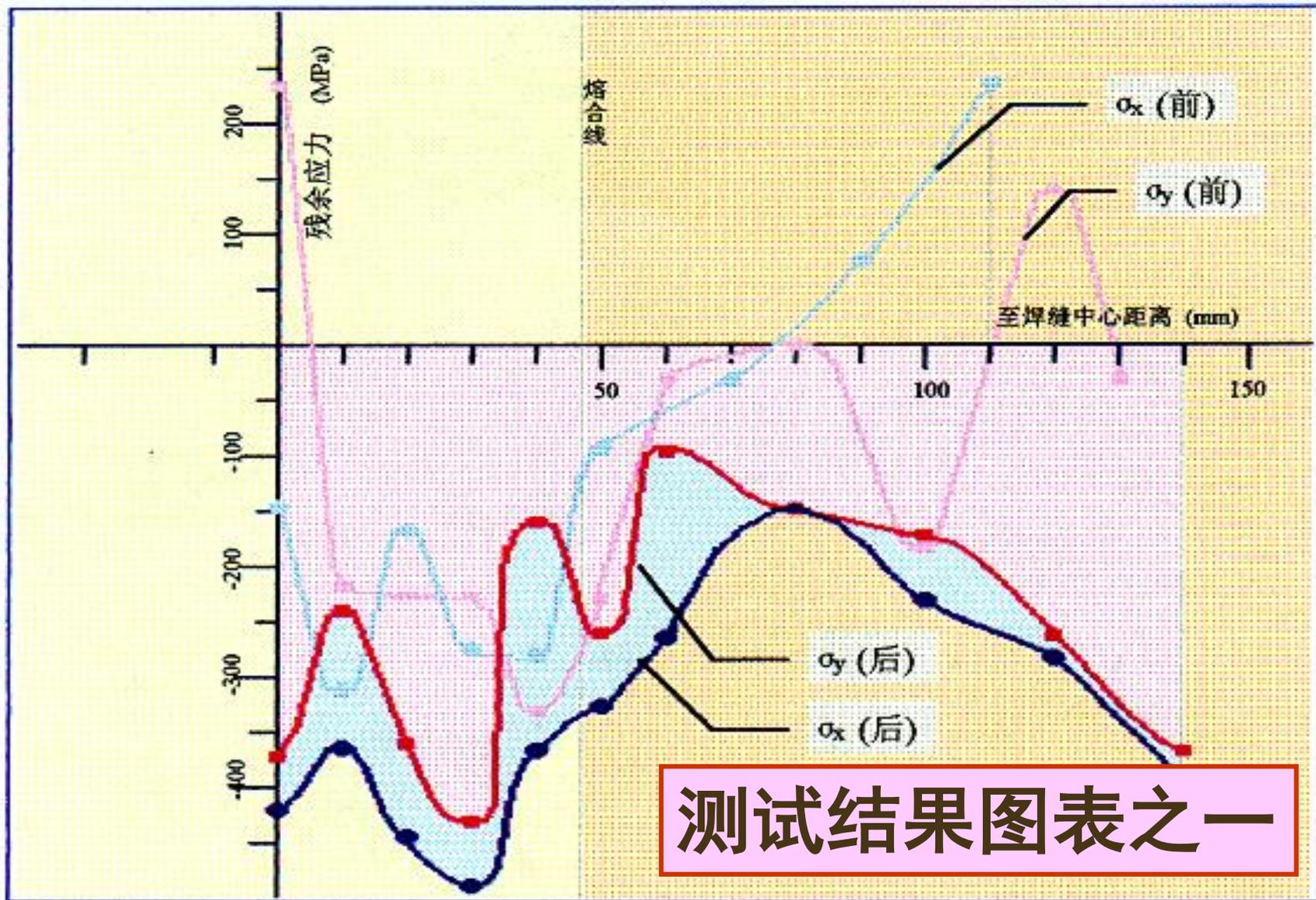


1998年我们携带X射线应力仪到二滩水电站，测定转轮现场焊缝的残余应力。

二滩水电站 5 号转轮
残余应力测定及分析报告

浙江大学固体力学研究所
郑爱斯特研究所
杭州清华工程技术公司
爱斯特研究所

一九九八年四月



测试结果图表之一

图 3. 7号叶片迎水面上部焊缝及热影响区残余应力分布

二滩水电站5# 转轮焊接应力测定 结果评述（简略）

- 叶片上中部垂直于焊缝方向检测到过大的压应力，这是特定的局部热处理方式和上冠热装卡栓共同作用的结果。

- 从提高疲劳强度的角度来说，叶片表面压应力似乎是有好处的。但是，必须意识到，本测试工作无法全面测试转轮各处，特别是叶片与上冠、下环结合处角焊缝的应力；叶片表面压应力，必有未知区域的拉应力与之相平衡。所以绝不可为测到的压应力盲目乐观。

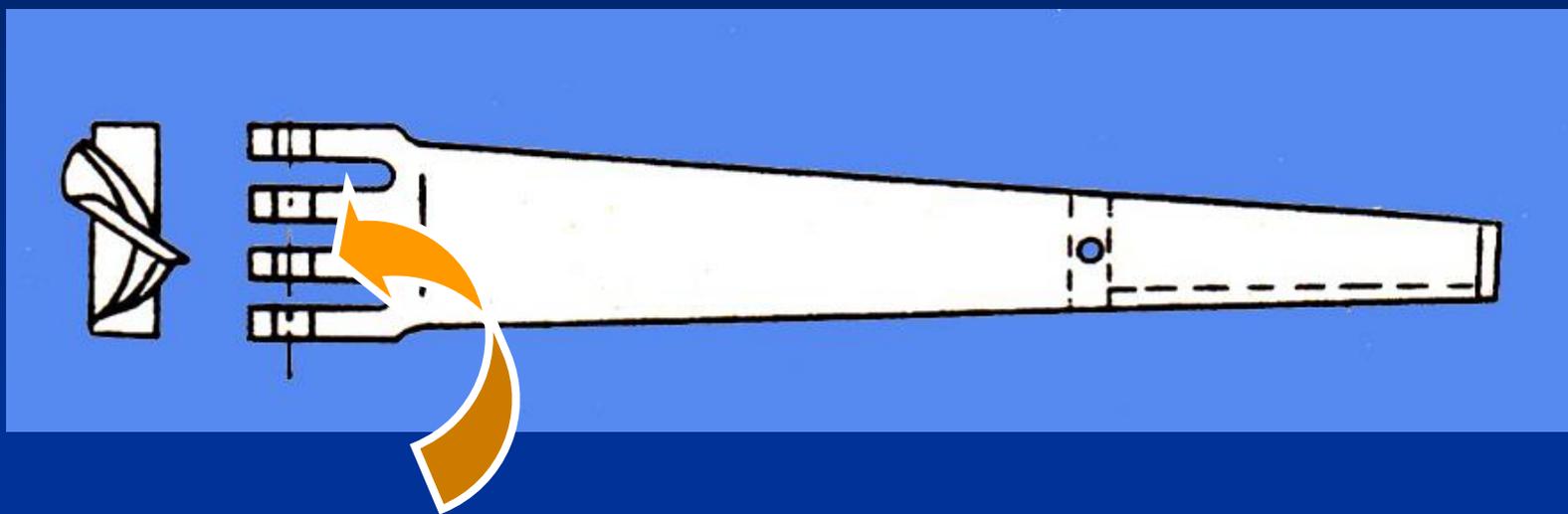


- 转轮各处极不均匀的应力，在运行过程中自然会逐步释放，但是必然以产生永久变形为代价。转轮的变形将破坏原有的动平衡状态，特别是叶片之间迷宫间隙的不均匀，会引起附加振动。显然，这些因素有损于转轮的寿命。



哈尔滨汽轮机厂

残余应力技术应用实例 之一



叶片 叉形叶根

发现的工艺缺陷： 琴键式变形 收档、开档变形

叶片残余应力的产生

叶片锻后要进行调质处理,以达到较好的综合力学性能。叶片锻后形成马氏体组织,其组织应力为较大的拉应力(见附表),而高温回火冷却时,叶片主要受热应力的作用,应力为压应力,这是叶片最终的应力表现形式。

附表 测试结果

工件 编号	淬火后残余 应力(MPa)	回火后残余 应力(MPa)	加工后变 形量(mm)	回火冷 却方式	试件放 置位置
1		-177	0.75		
2		-299	1.14		
3		-165	0.70		
4		-2.1	0.07		
5		-40	0.10		
6		-12	0.05		
7		-24	0.07		
8	215	-36	0.10	风冷	中间
9	214	-25	0.08	风冷	中间
10	230	-32	0.10	风冷	中间
11	200	-148	0.61	风冷	边缘
12	231	-250	1.01	风冷	边缘
13		-285	1.10	油冷	
14		-300	1.20	油冷	
15		-84		空冷	
16		-133		空冷	
17		-177		油冷	
18		-285		油冷	
19		-15		堆冷	
20		20		堆冷	
21		15		堆冷	

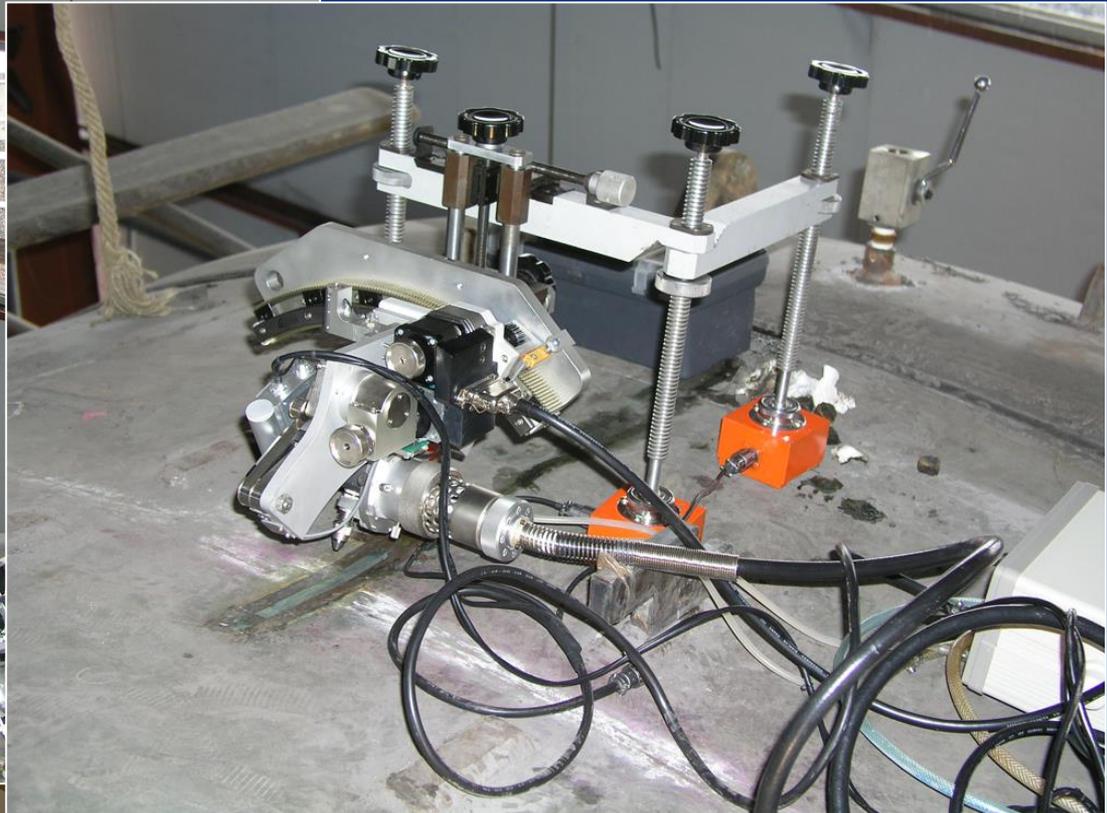


上海天然气管网 残余应力测试



水电站压力钢管 岔管

岔管焊接残余应力测试



2、残余应力与疲劳强度

航空材料研究院王仁智研究员，上世纪60年中期代开始研究喷丸强化，同时利用X射线衍射仪测定喷丸残余应力。1969年12月26日，根据当时的研究成果，正式把喷丸强化纳入国产歼5飞机叶片的制造工艺之中。



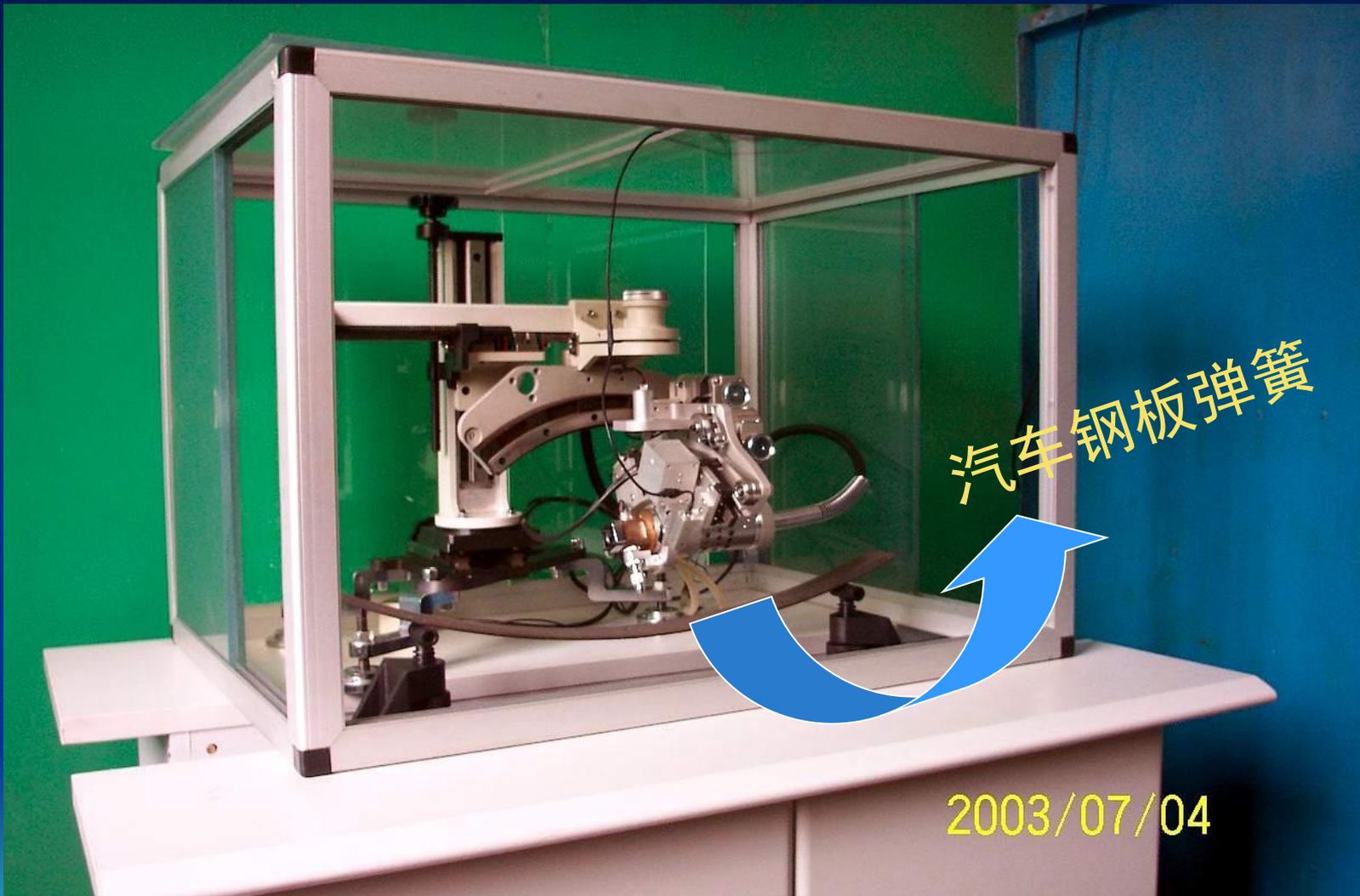
初期的推广应用示例

X射线残余应力测定

在生产实践中的应用及其效果

当年北京内燃机总厂张德长、梁中天工程师的应用实例，具体生动，效果显著，具有典型意义。对残余应力技术的推广起到示范作用。

在1969年珍宝岛战役中，我军战车曾经发生过多起严重的毁机事故，经调查发现都由于北内生产的内燃机连杆断裂造成的。事故分析表明，连杆的材质、工艺、硬度、金相组织都没有任何问题，仔细探伤也未发现宏观缺陷。后来接受621所王仁智的建议，对连杆进行残余应力分析，终于发现酸洗冷校直后的连杆表面存在较大的拉应力，这就是事故的根源所在。此后改变工艺，以喷丸强化代替酸洗，并规定喷丸后残余压应力不低于 $30\text{kg}/\text{mm}^2$ 。自此在未发生连杆断裂事故。



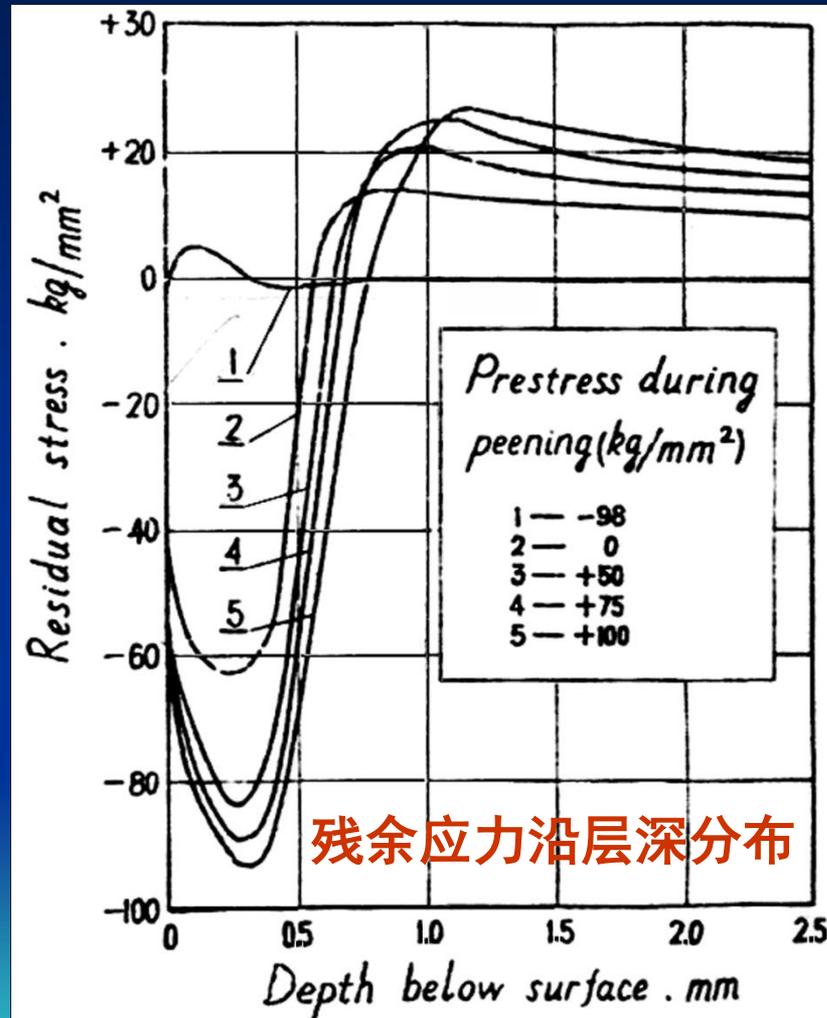
汽车钢板弹簧

2003/07/04



残余应力对钢板弹簧疲劳强度的影响

早在上世纪八十年代一开始的时候，西安交大张定铨与十堰二汽徐家炽等人合作，研究了喷丸残余应力对钢板弹簧疲劳强度的影响。



利用X射线应力分析技术测出的残余应力沿层深分布

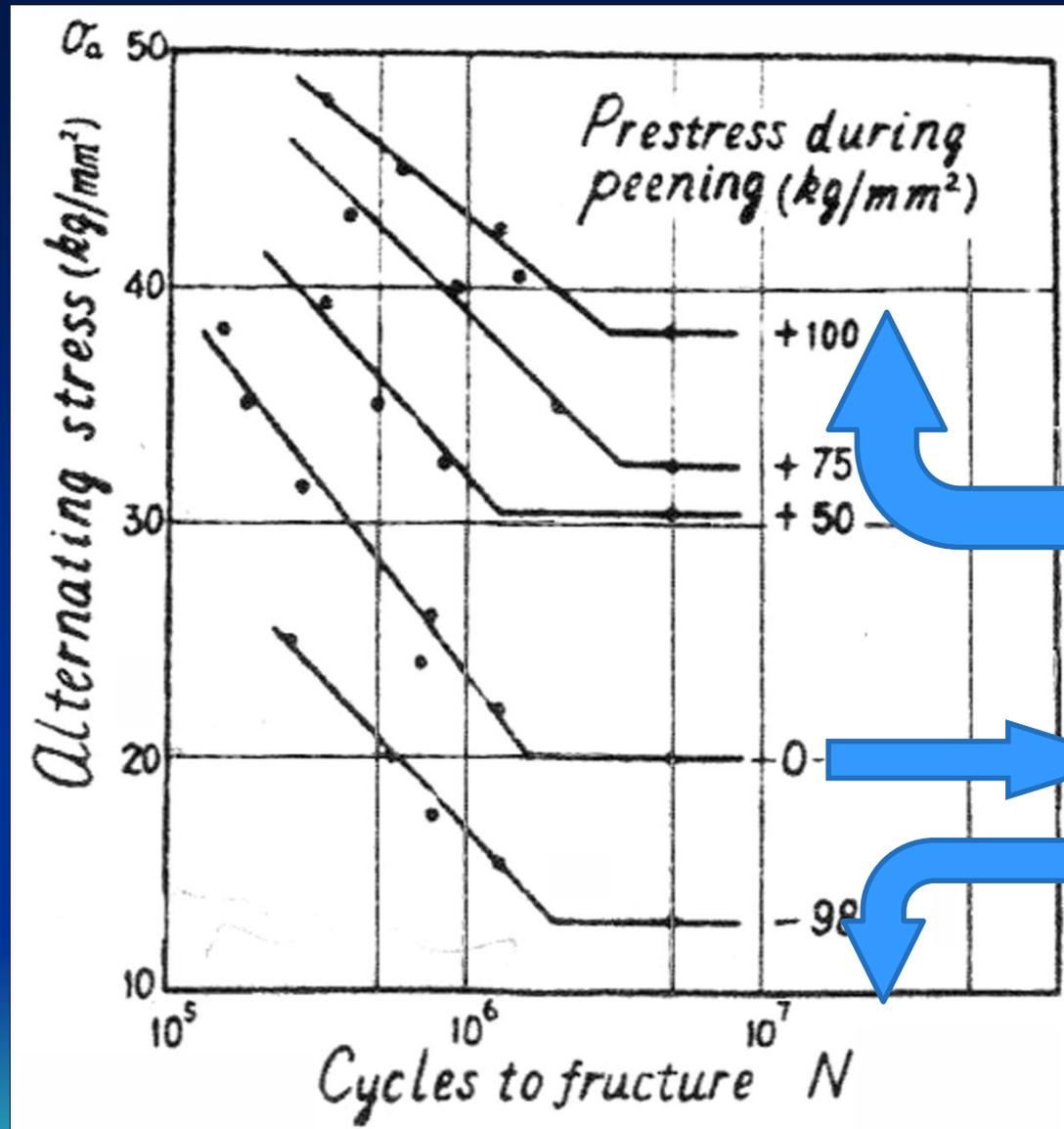
对钢板弹簧施加不同的预应力进行喷丸，可以得到峰值不同、分布深度不同的压应力。

表一 残余应力峰值与喷丸预应力的关系

σ_p (Kgf/mm ²)	+100	+75	+50	0	-98
σ_{rp} (Kgf/mm ²)	-91	-88	-83	-63	+5

$$\sigma_{rp} = -51.3 - 0.5\sigma_p \text{ (Kgf/mm}^2\text{)} \quad (1)$$

上式的线性回归相关系数为0.973。



丸，得到不
行疲劳试验，

预应力越大，喷丸残余
压应力峰值越大、深度
越大，则疲劳极限越高。

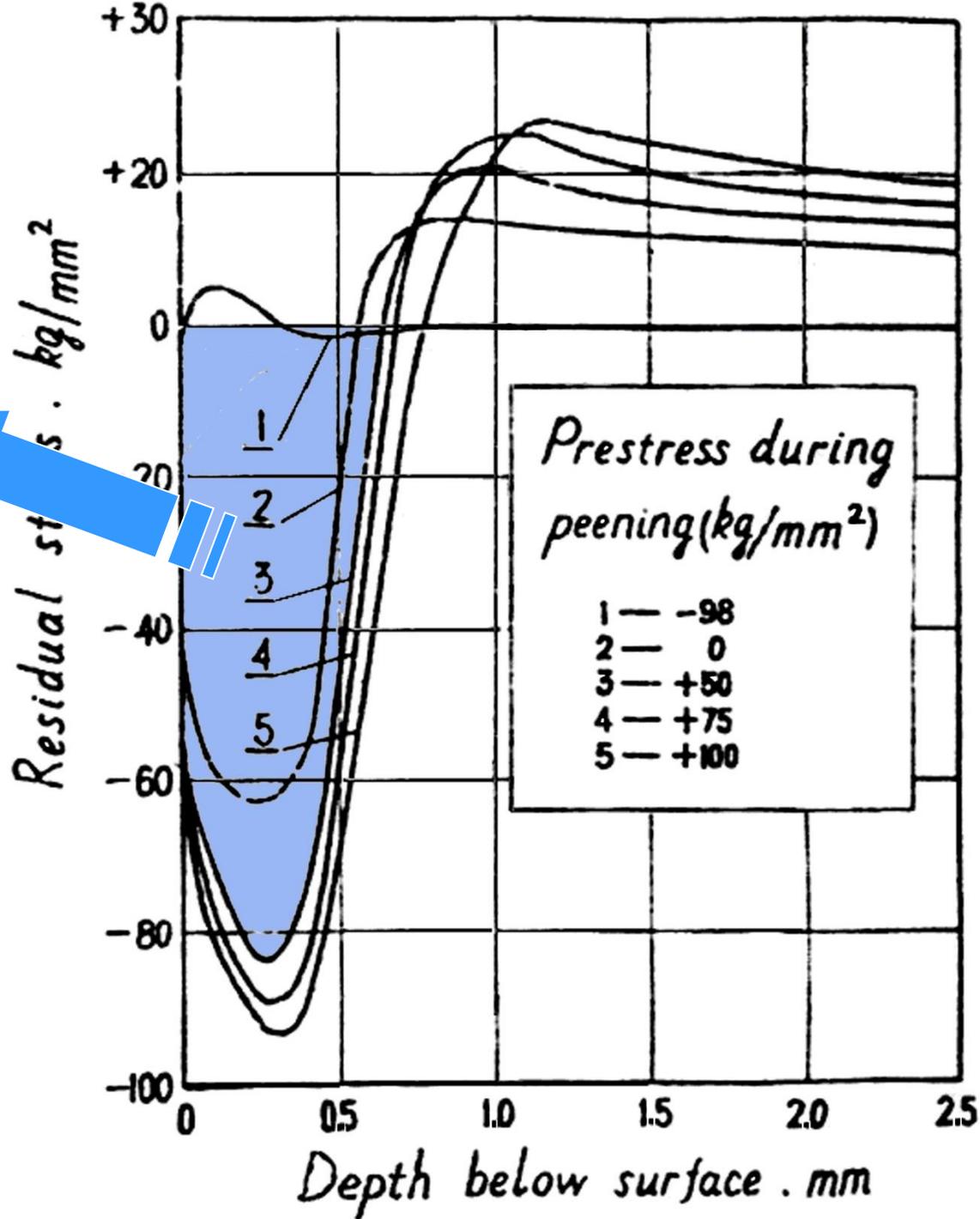
不加预应力喷丸板簧的
疲劳极限

如果预应力是负的，喷
丸后得到的残余应力是
拉应力，疲劳极限下降。

图2 在不同预应力下喷丸的55SiMnVB板簧试样的S-N曲线

A

实验于喷
深度横坐



取决力的
线与

表2 $\sigma_a - A$ 关系

喷丸预应力(Kgf/mm ²)	+100	+75	+50	0	-98
面积A (Kgf/mm)	-23.4	-21.4	-18.5	-12.1	+0.2
疲劳极限 σ_a (Kgf/mm ²)	38	33	31	20	13

$$\sigma_a = 11.3 - 1.04A$$

上式的线性回归相关系数为0.970

以何家文教授为首的西安交通大学学者们，在上世纪八、九十年代深入地、专注地研究了残余应力对疲劳强度的影响。





THE SCIENTIFIC AND
TECHNICAL REPORT

全国材料强度学术会议论文 (1991. 11. 昆明)

残余应力对疲劳寿命的影响

胡奈赛 何家文

西安交通大学

张定铨

绍兴高专

西安交通大学

科研处科技情报室

Published by the S&T Information Division
of

Science Research Department

他们认为，对于光滑试样，扼要地讲，可以把残余应力看作与疲劳过程中的平均应力等效。按照Goodman关系可以得出，由残余应力 σ_r 而引起的材料疲劳极限的变化为

$$\Delta\sigma_w^r = -m\sigma_r$$

式中 m 为平均应力敏感系数。这个公式非常明确地解释了为什么残余拉应力使材料的疲劳极限下降，反之，残余压应力使其提高；而且，只要求得了系数 m 就可以定量地评价残余应力的作用了。

至于敏感系数 m 值如何确定，残余应力 σ_r 如何选取，请研读他们的学术专著。

对于扭转疲劳、轴向加载疲劳，关于残余应力的作用，他们的工作都得到了明确的结论。

还针对缺口试样研究了残余应力对其疲劳强度的影响，得到极有价值的成果。



与此同时，北京航空材料研究院王仁智研究员也做了大量的理论联系实际的研究，取得卓著成果，并且在航空工业得到广泛推广应用，产生了巨大的社会效益和经济效益。



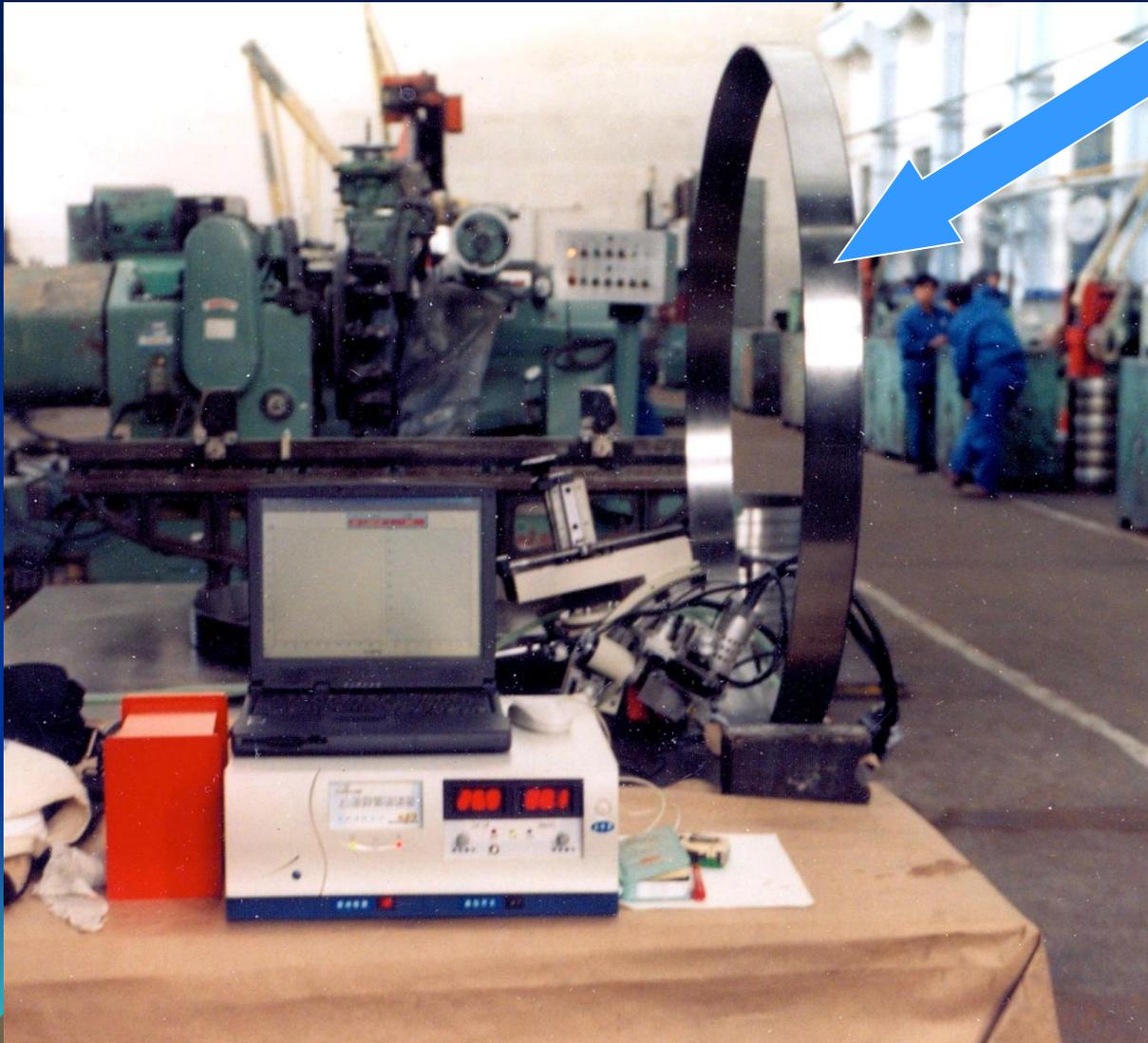
残余应力场在表面强化中的作用

王仁智

(北京航空材料研究所)

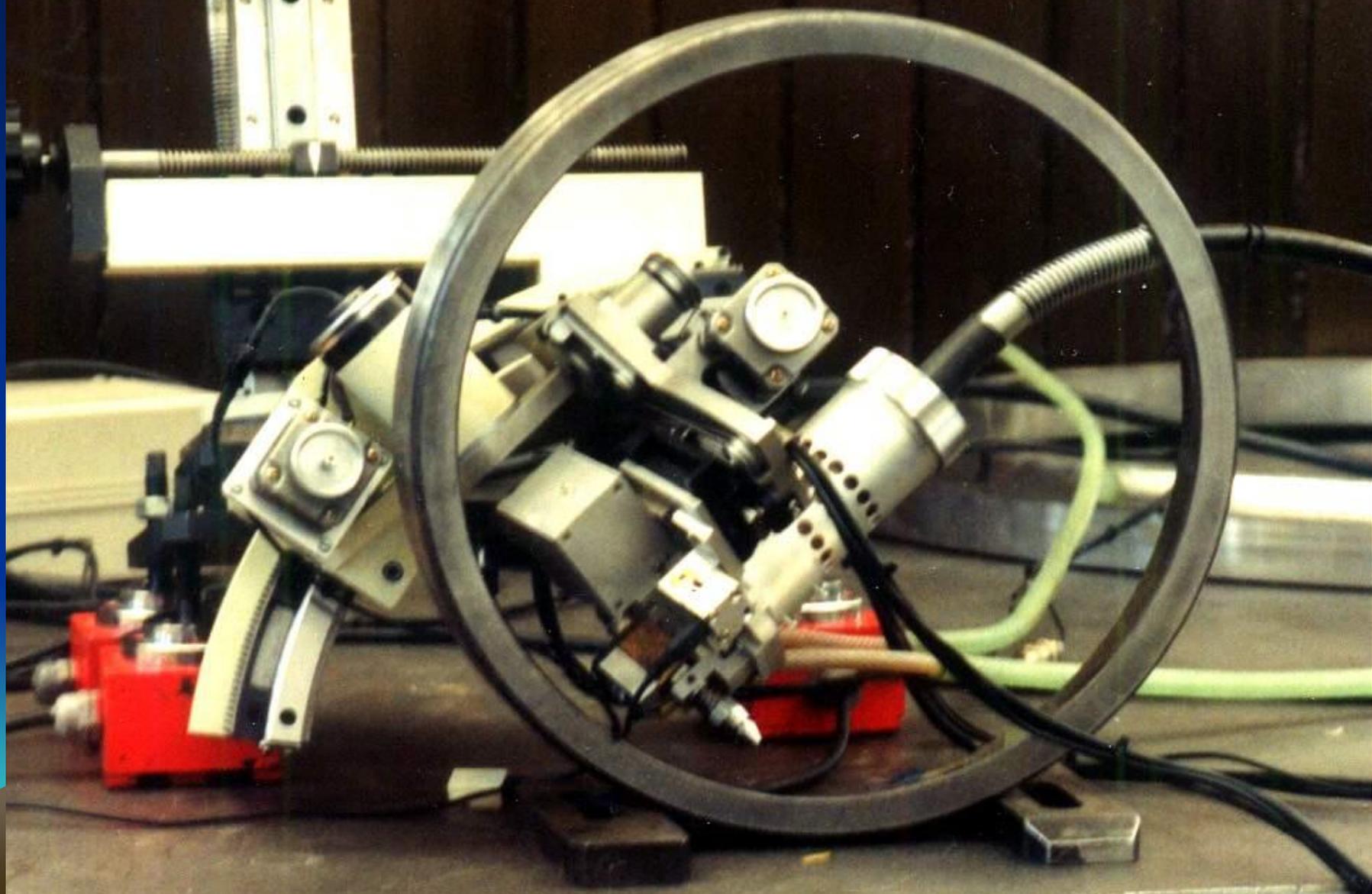
1987. 6. 20

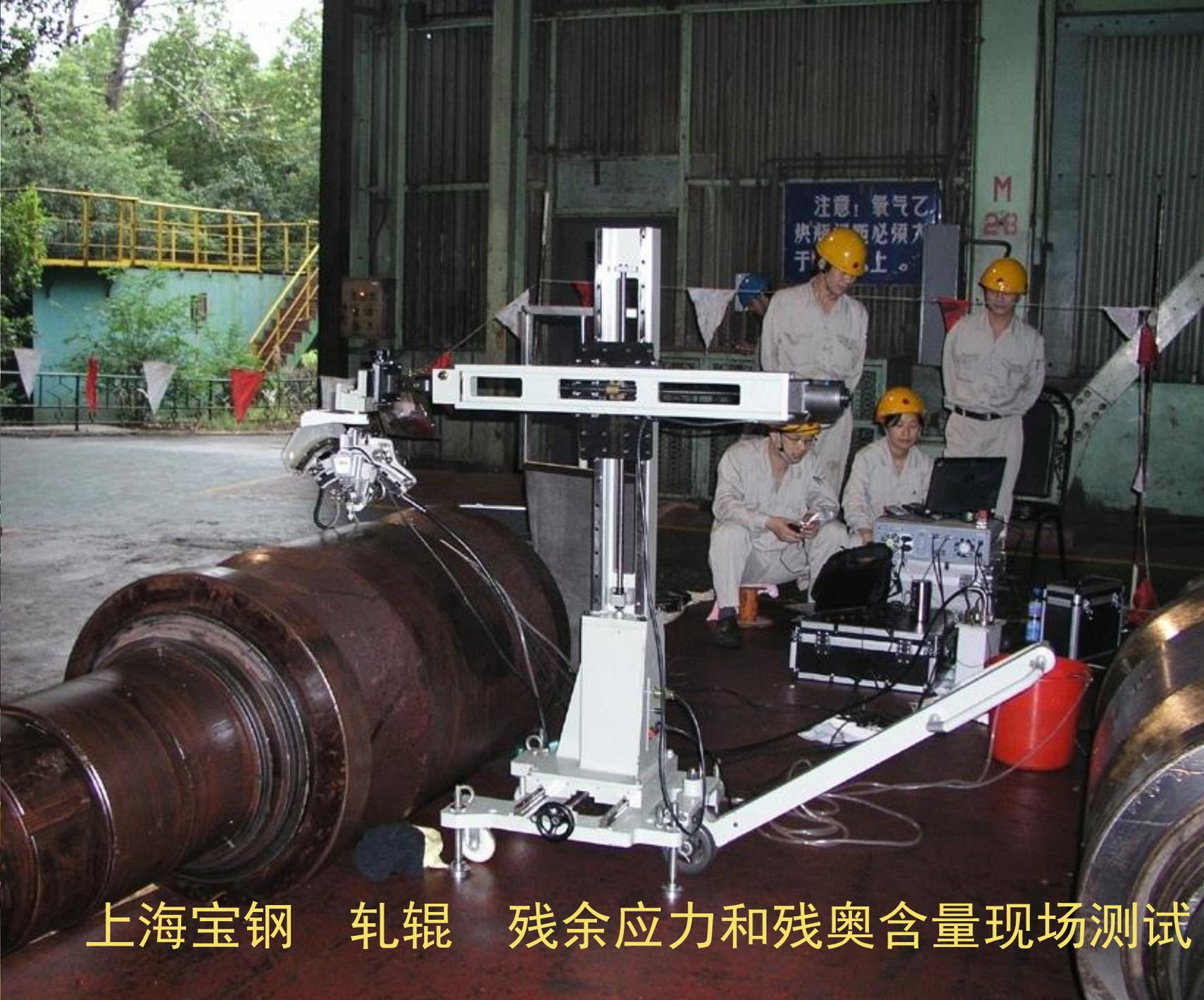
瓦轴生产的大型轴承套圈



2001年我们
携带仪器到
现场测试套
圈内滚道残
余应力和残
奥含量

瓦轴中型套圈 内滚道 残余应力和残奥含量测试

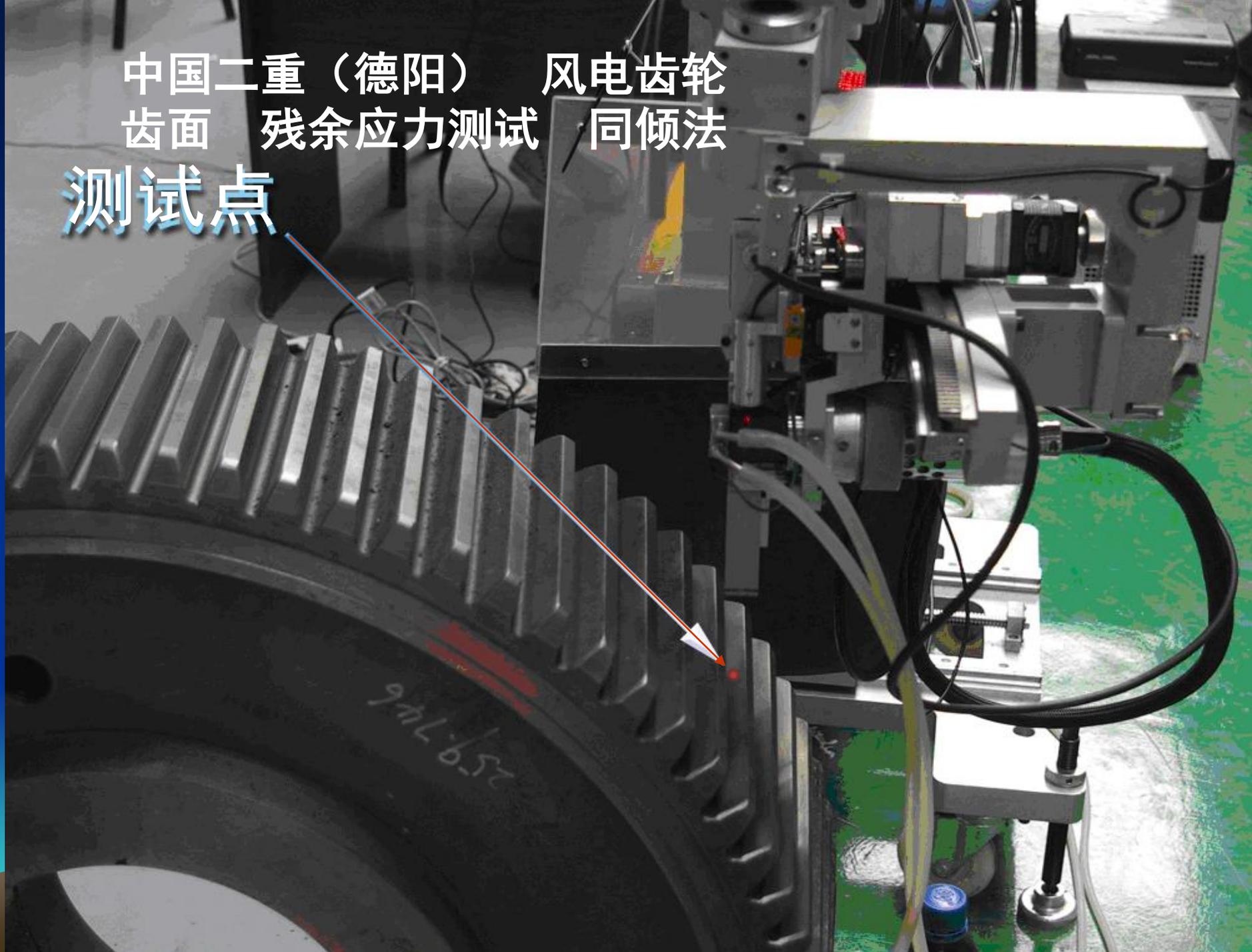




上海宝钢 轧辊 残余应力和残奥含量现场测试

中国二重（德阳） 风电齿轮
齿面 残余应力测试 同倾法

测试点





二重 风电大齿圈 齿根残余应力测试



上海东方明珠塔高467.9米。1994年竣工。

在即将开放的时候，发现有螺栓头掉落下来。为此工作人员捡起螺栓头找到上海材料研究所郑文龙教授咨询。郑教授问这螺栓是什么材质，工作人员不无自信地回答是高强度螺栓。郑教授说：那就是了，你们再回去寻找，这不是偶然的现象。

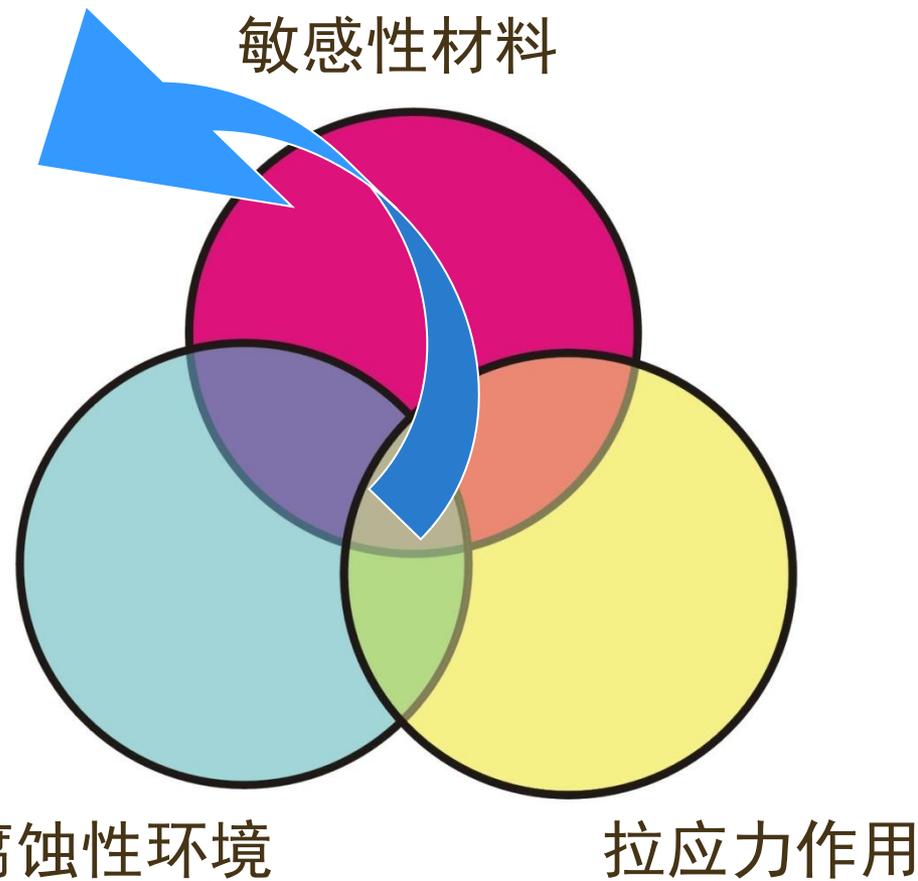
第二天工作人员果然发现了相当数量的断掉的螺栓头。再次请教郑教授。郑教授开出的药方是把所有高强度螺栓更换为普通螺栓。至此问题得到完满解决。

东方明珠开放的日期比预定的晚了10天。其内幕原因就在于此。

实质上这里发生的就是一个应力腐蚀现象。



发生应力腐蚀断裂



残余拉应力，和外加载荷的拉应力一样，是促成应力腐蚀的因素之一。



2011/ 9/30

中原油田普光气田开发建设指挥部的
汤总告诉我们：

提出检测输气管道焊接应力，主要出
于对应力腐蚀问题的关注。

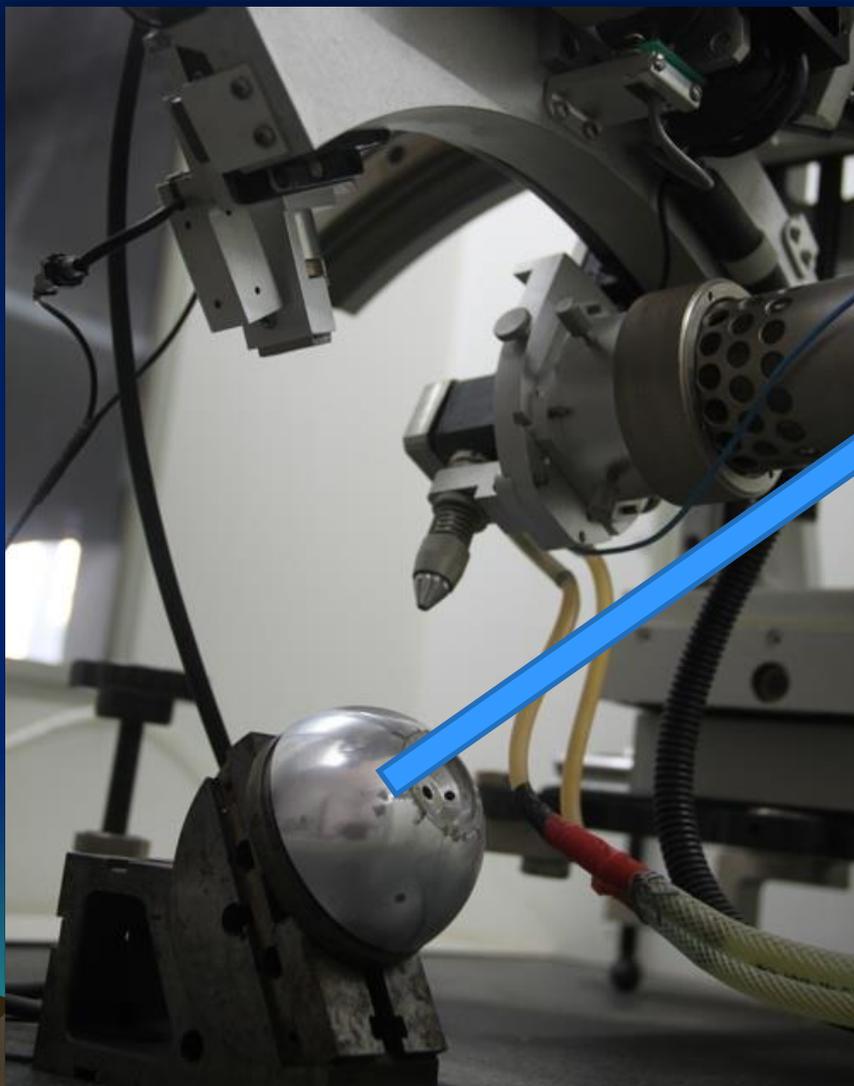






因为存在残余拉应力，经氨熏试验，发生严重的裂纹。这是典型的应力腐蚀现象。

4、残余应力与零件形状尺寸稳定性



放置在测角仪之下的是

陀螺

为了保证导航的精确度，必须彻底消除陀螺的残余应力，以防止微小变形带来的导航偏差。

差之毫厘.谬以千里。

为此上海航海仪器厂几十年来坚持使用X射线应力测定仪，用以控制产品质量。



大型涡轮盘



安装好的叶片

叶片与叶片匣



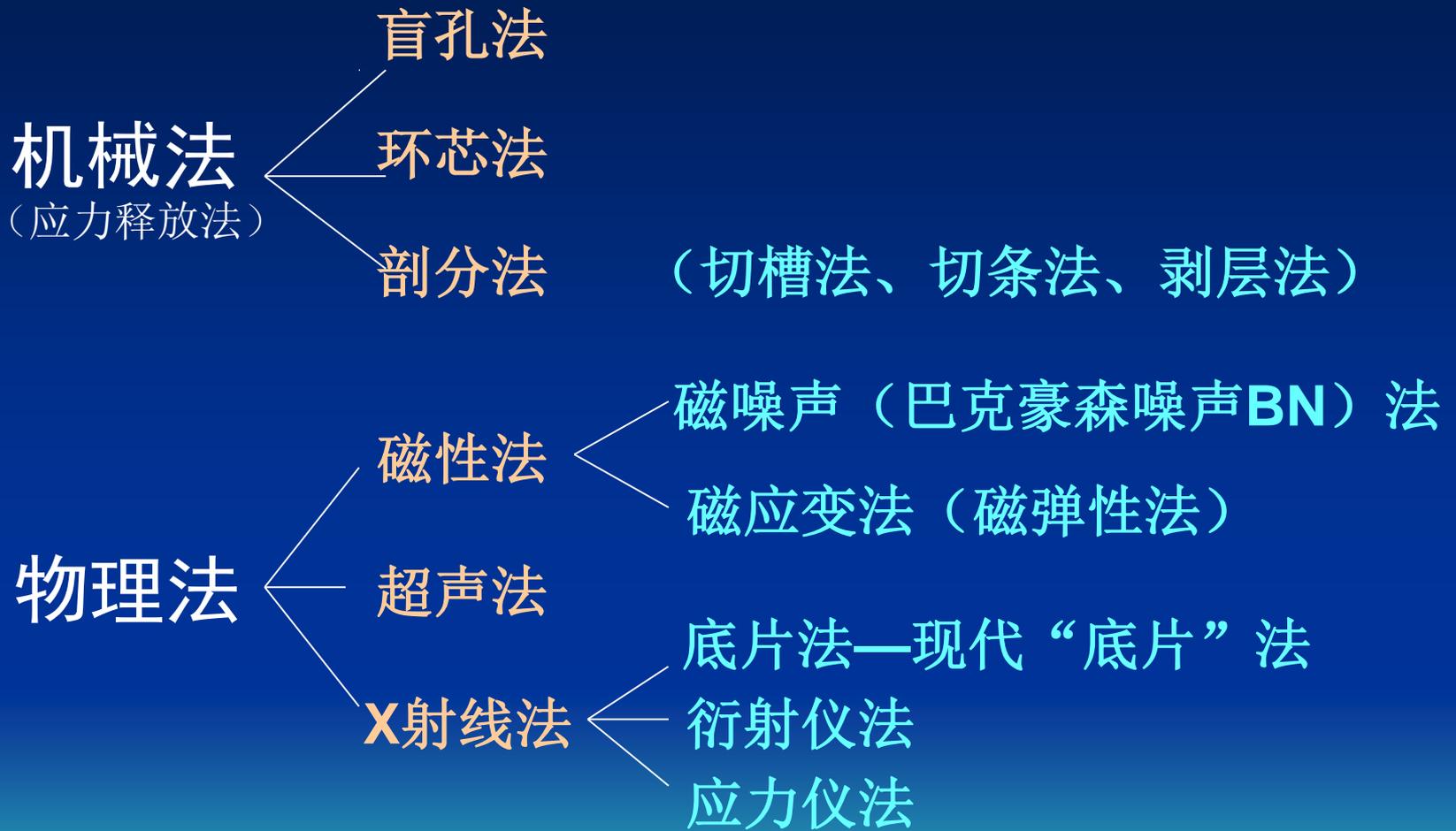
航空发动机钛合金铝合金“叶片匣”
(环状，直径900至1200mm)的残余应力备受关注，目标是严格控制变形。

叶片与叶片匣的间隙，越小越好，漏风少，效率高。美国做到最小3微米，而我国则达到10微米。

如果再小，一旦变形，叶片与叶片匣发生摩擦，就会出现严重事故。



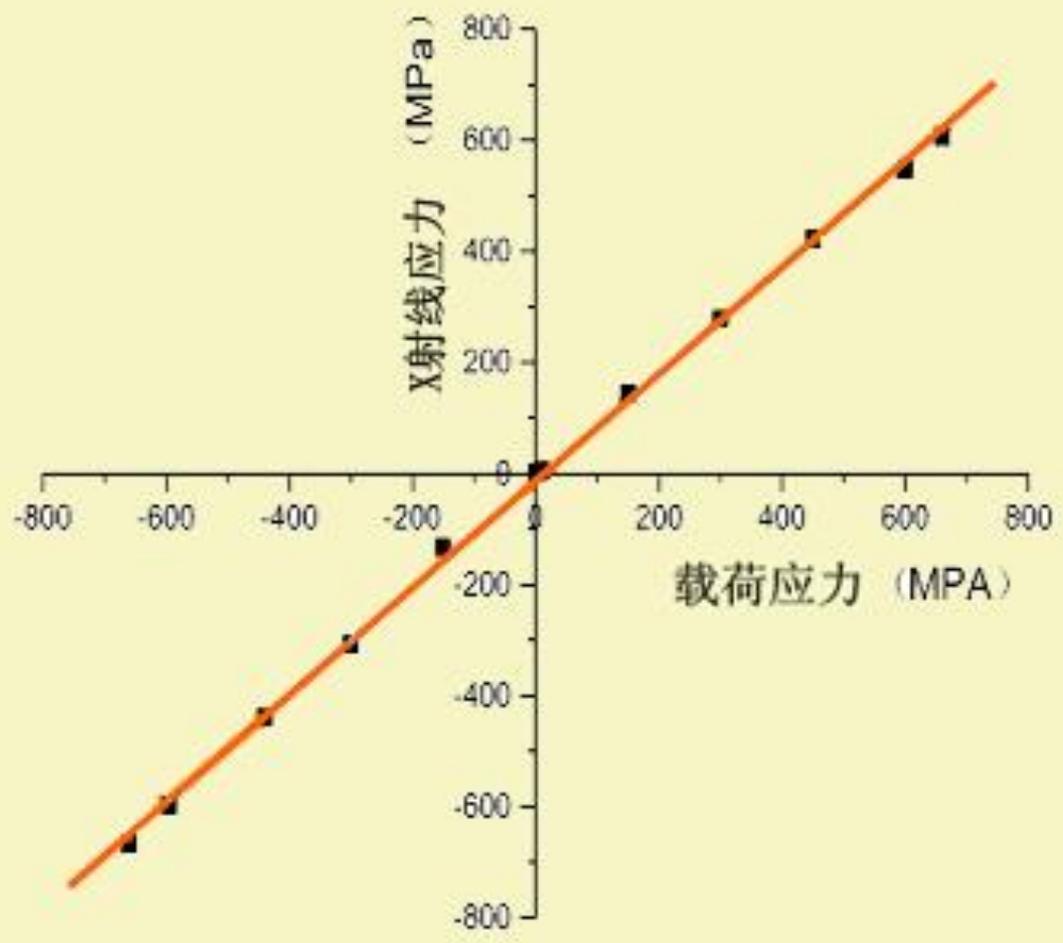
测试方法分类

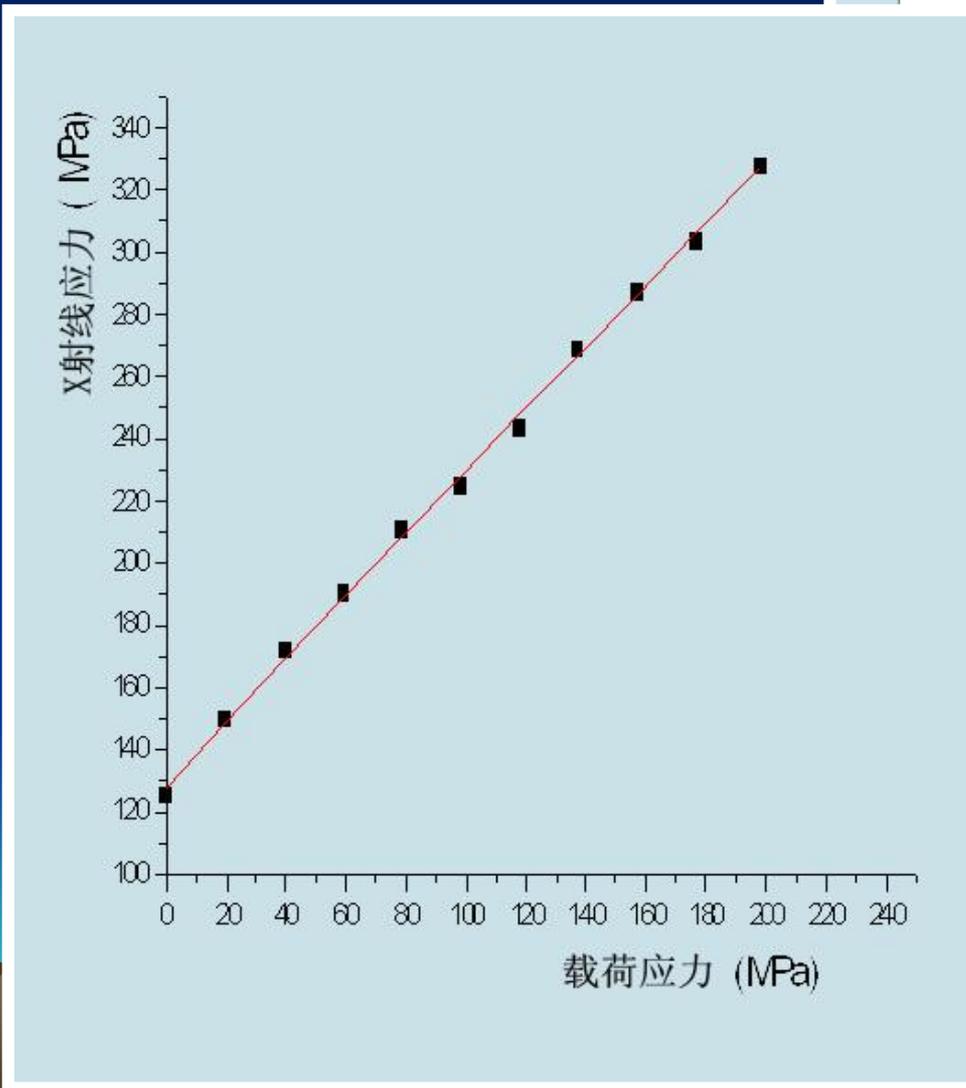
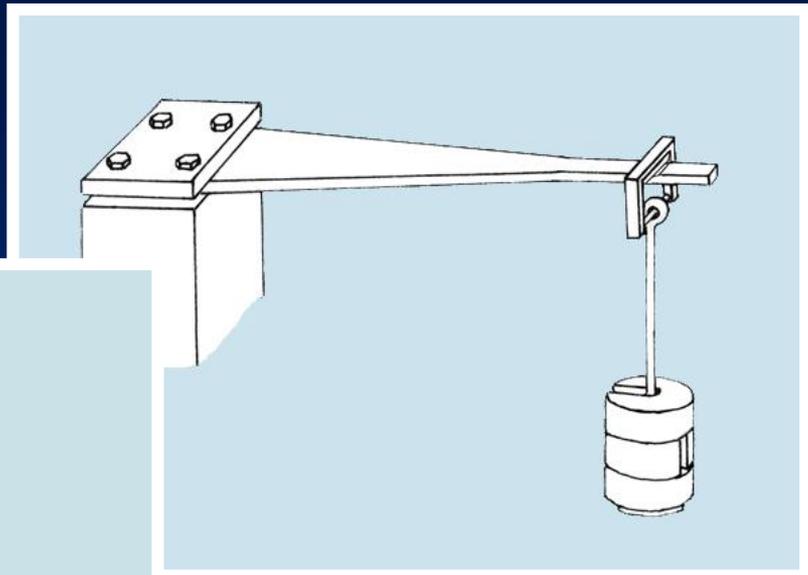


X射线衍射法的特点

- 由测量原理可知，X射线衍射法通过测定材料中晶面间距的应变来计算应力，因而从根本上讲是可靠的。在构件承载的情况下，测得的是载荷应力与残余应力之代数和。测定等强度梁在不同载荷下的应力，可以看到X射线应力与载荷应力有很好的 consistency，令人信服地表明X射线衍射法的准确与可靠。







- 以无接触的方式测定应力，所以是无损的测试方法，这对于实际工件是最可宝贵的特点之一。



- 因所使用的X射线有效穿透深度的限制，本方法测得的是试样表层几微米到几十微米深度内的加权平均应力。利用这个特点，借助于适当的手段(如电解抛光、化学抛光)对试样进行剥层，并逐层测试应力，便可测得应力沿层深的分布。正因为每次的测试深度比较小，才能比较客观地反映每一层的应力，才能在沿层深的分布中找到接近真实的应力极值。
- 测试点的大小(即X射线照射面积)可以很小，这样便于测定应力在表面各处的分布。X射线照射面积一般可以在 $5 \times 10 \text{ mm}$ 到 $2 \times 2 \text{ mm}$ 之间选择。如需更小，则只须适当改变测量条件；即便照射面直径小到 $\varphi 1 \text{ mm}$ 仍可达到足够的测量精度。
- 对于复相材料(例如铁素体或马氏体与奥氏体双相钢)，在某些情况下可以分别测定各相的应力。

日本理学MSF-3M X射线应力分析仪

- **MSF-3M**是一个十分熟悉的型号，因为**MSF-2M**型上个世纪七、八十年代在中国销售很多台。对比**3M**与**2M**不难发现仪器的主要技术指标和机械结构，包括外观没有实质性变化。
- 采用**PC**微电脑取代原来的单片机，界面友好，操作方便。
- **PSPC-MSF-3M**型采用了位敏探测器，省去机械扫描。



AST XSTRESS3000 X射线应力分析仪

- 在X射线管两侧分别装置MOS固态线阵探测器，实现“双无倾角侧倾法”。省去机械扫描，提高工作效率；减小测角仪的重量和尺寸，便于携带。



- 探测器接收通道共512个，每通道的 2θ 宽度为 0.029° ，所以探测器的一次 2θ 宽度为 14.8° 。探测器的中心可以移动的范围是 $125^\circ \sim 162^\circ$ 。

TEC4000 X射线衍射系统

- 在X射线管两侧分别装置位敏探测器，实现“双无倾角侧倾法”。省去机械扫描，提高工作效率；减小测角仪的重量和尺寸，便于携带。



- 探测器接收通道共512个，探测器的一次 2θ 宽度为 16° 。

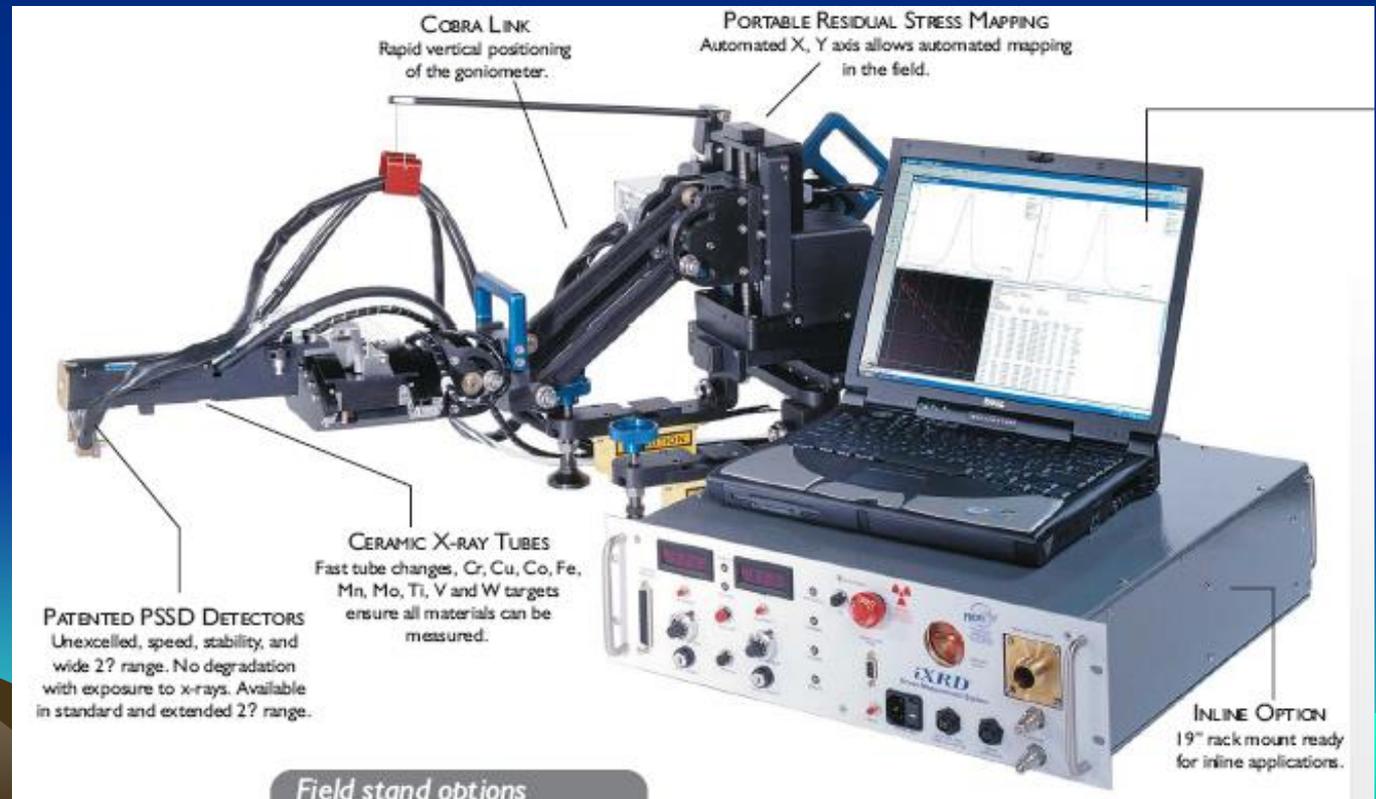


加拿大Proto X 射线衍射应力分析仪

特点

- 非暴露式PSSD光纤传输信号固态探测器
探测器非暴露，无衰减，长寿命，无需维护无需更换
- 三维应力分布图绘制系统

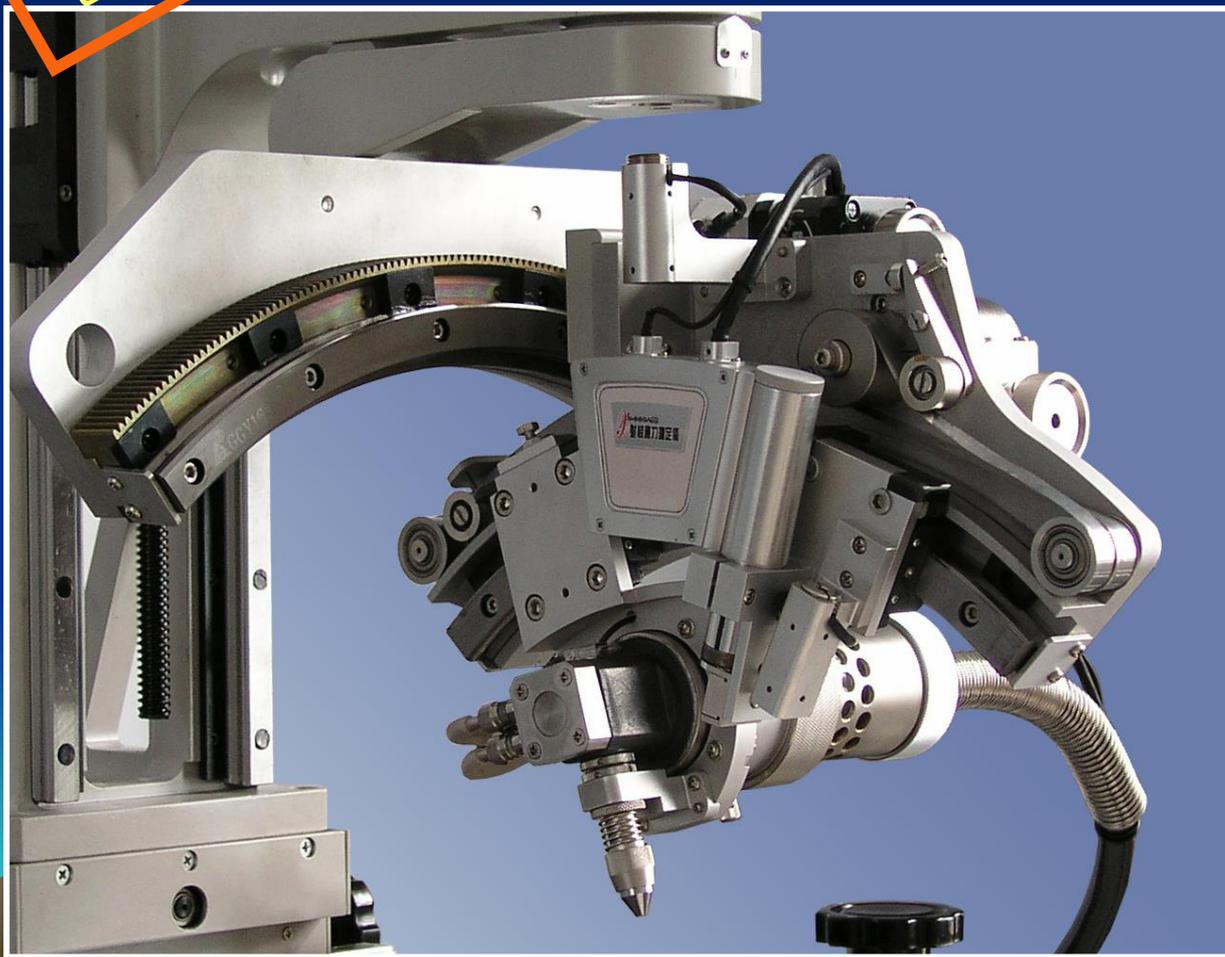
提供6种不同
支架。高精度
三坐标运动和
定位装置，可
以自动生成三
维应力分布图，
形象地展示应
力分布。



国产 X 射线应力测定仪

创新点

$\theta-\theta$ 扫描 ψ 测角仪 —— 实现最理想的测量方法



以国内专家多年的方法研究成果为基础，创造性地构思而成。将相对比较优越的侧倾法和固定 ψ 法结合在一起，实现侧倾固定 ψ 法——最理想的测量方法。吸收因子恒等于1，大幅度扩展了 2θ 扫描范围。

国产 适用于实际工件的 X 射线衍射分析仪

特点

θ - θ 扫描 ψ 测角仪

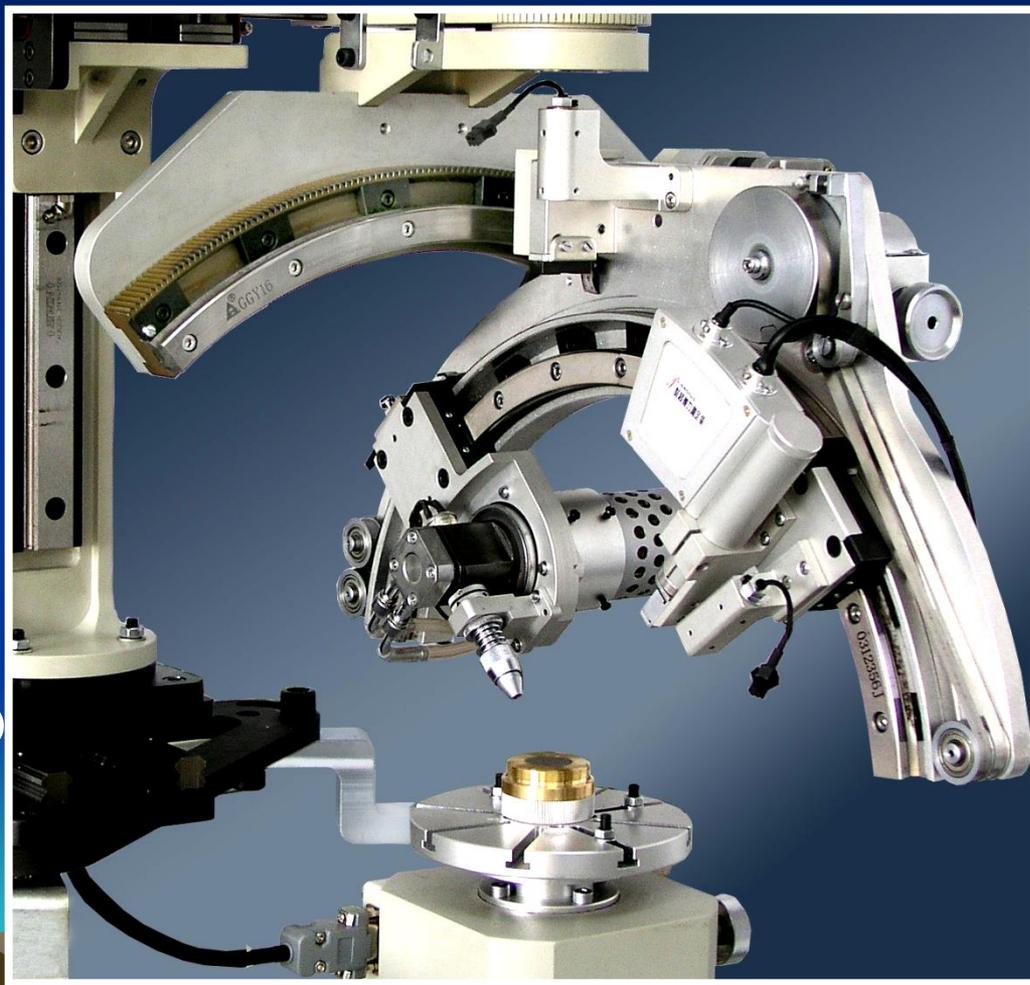
2 θ 扫描范围

$45^\circ \sim 170^\circ$

功能

针对各种实际工件

1. 测定应力
2. 测定残余
(利用4或5条衍射线)
3. 测定织构



盲孔法的进展 — 高速透平铣孔

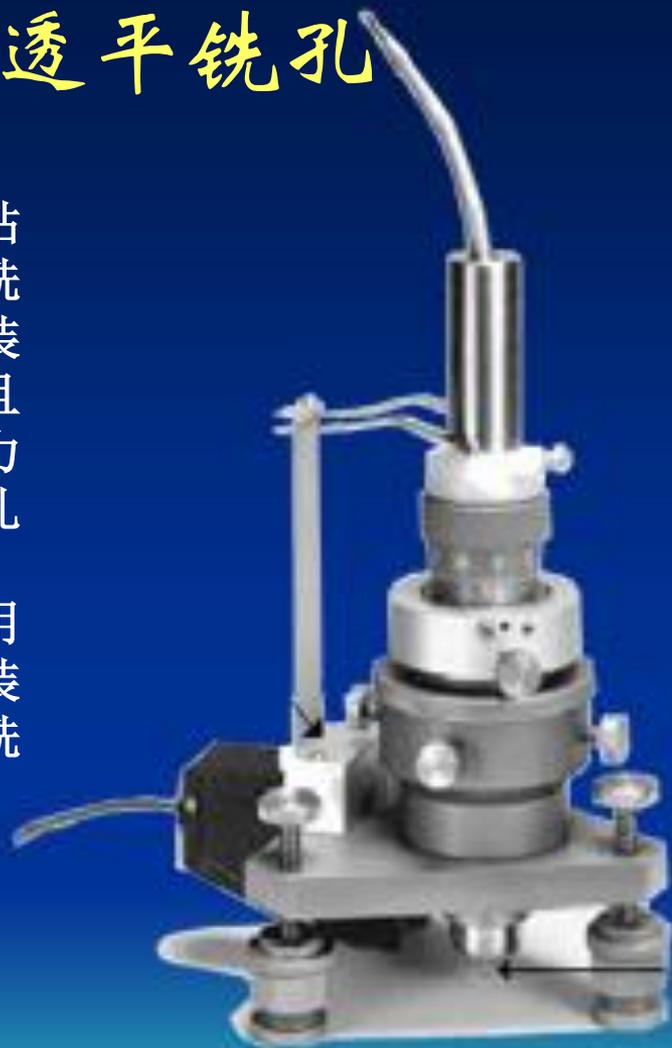
在盲孔法残余应力测量装置中，除了钻孔装置和喷砂打孔装置外，高速透平铣孔装置的优越性在于，不但能在钻孔装置不能钻孔的高硬度材料上铣孔，而且还具有喷砂打孔的优点，就是加工应力小、测量精度高，同时也不像喷砂打孔装置那样操作复杂，使用方便。因此，高速透平铣孔装置成为目前国内外应用最多的盲孔法残余应力测量装置。该装置高速透平部分采用美国进口机芯，铣孔精度高。

技术规格：

铣孔直径：1.5-2mm

对中精度：±0.025mm

转 速：30000rpm



X 射线基本知识

吕克茂



伦琴(W.C.Rontgen, 1845–1923)

德国物理学家

X射线又叫伦琴射线。

1895年秋，德国乌茨堡大学的物理学家伦琴Roentgen在其实验室研究阴极射线时，偶然发现了一种能穿过固体物质，使荧光质发光和胶片感光的射线，他称之为X射线。

伦琴夫人的手

——世界上第一张X射线透视片

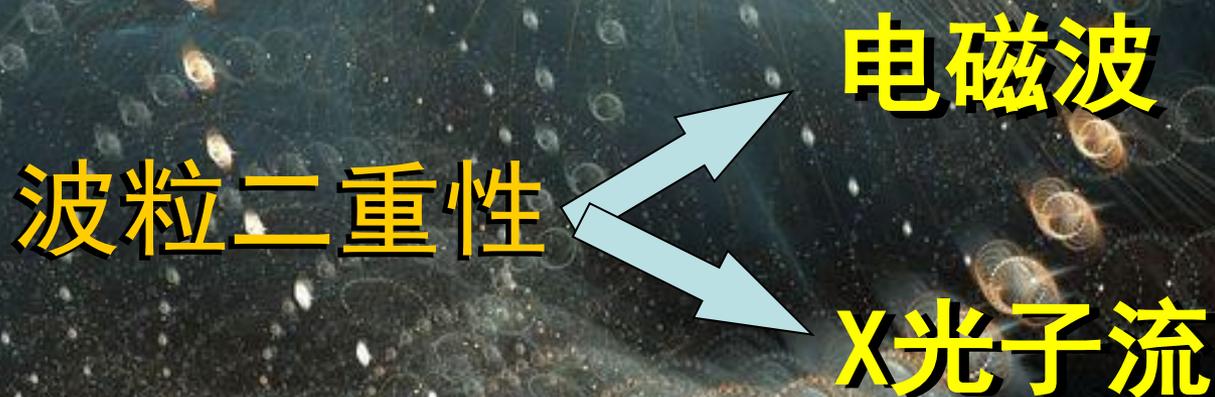


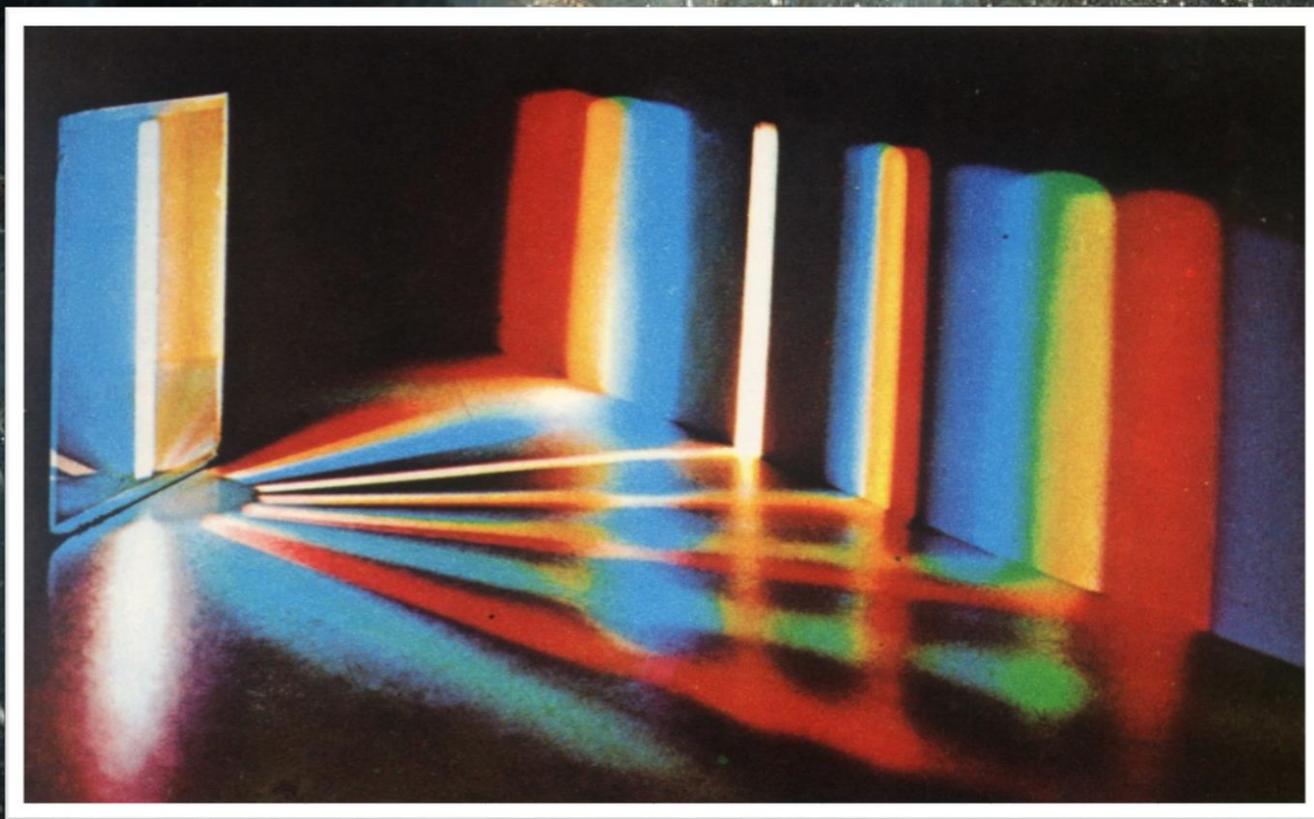
当年伦琴的实验室



获得了诺贝尔奖

X射线的本质



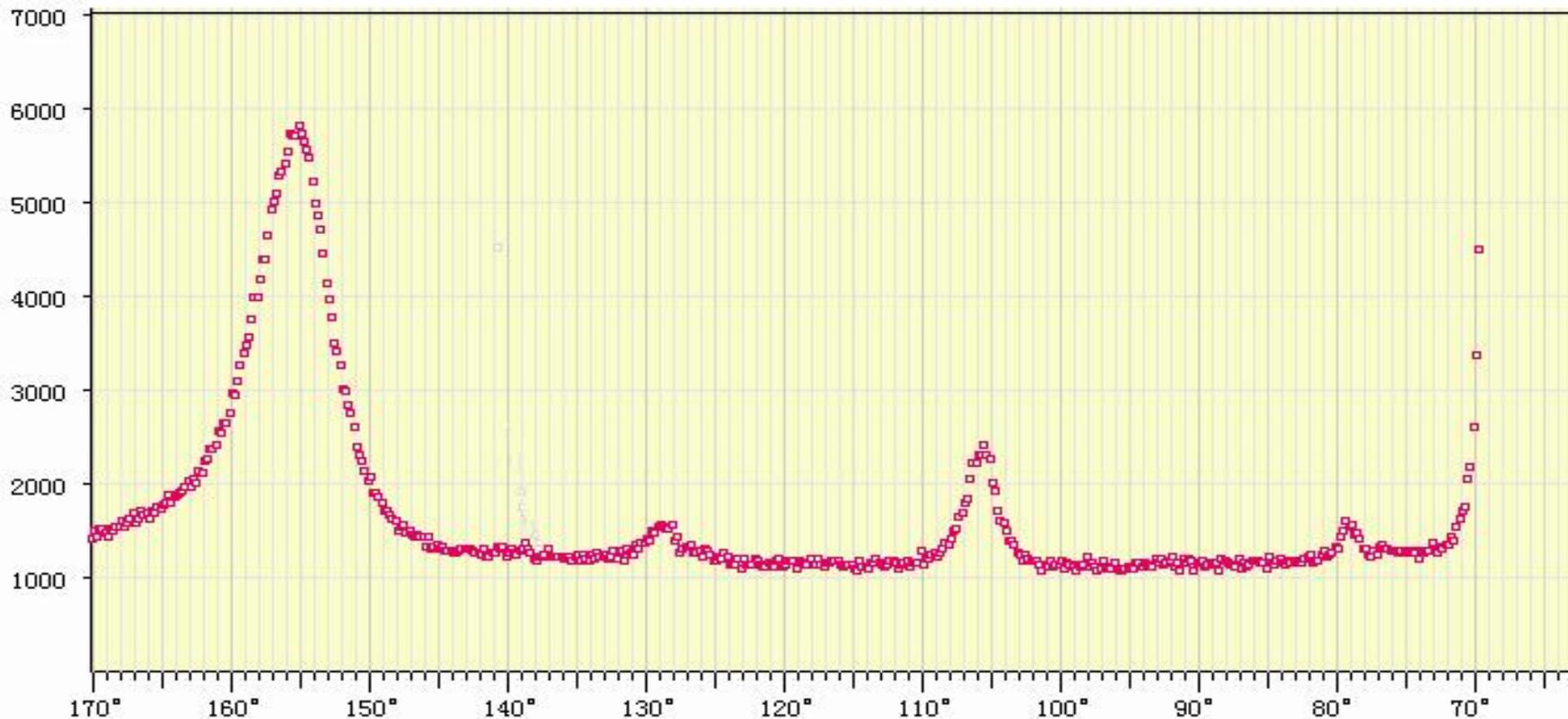


可见光衍射图

X射线在晶体上衍射现象

——X射线电磁波本质的证明

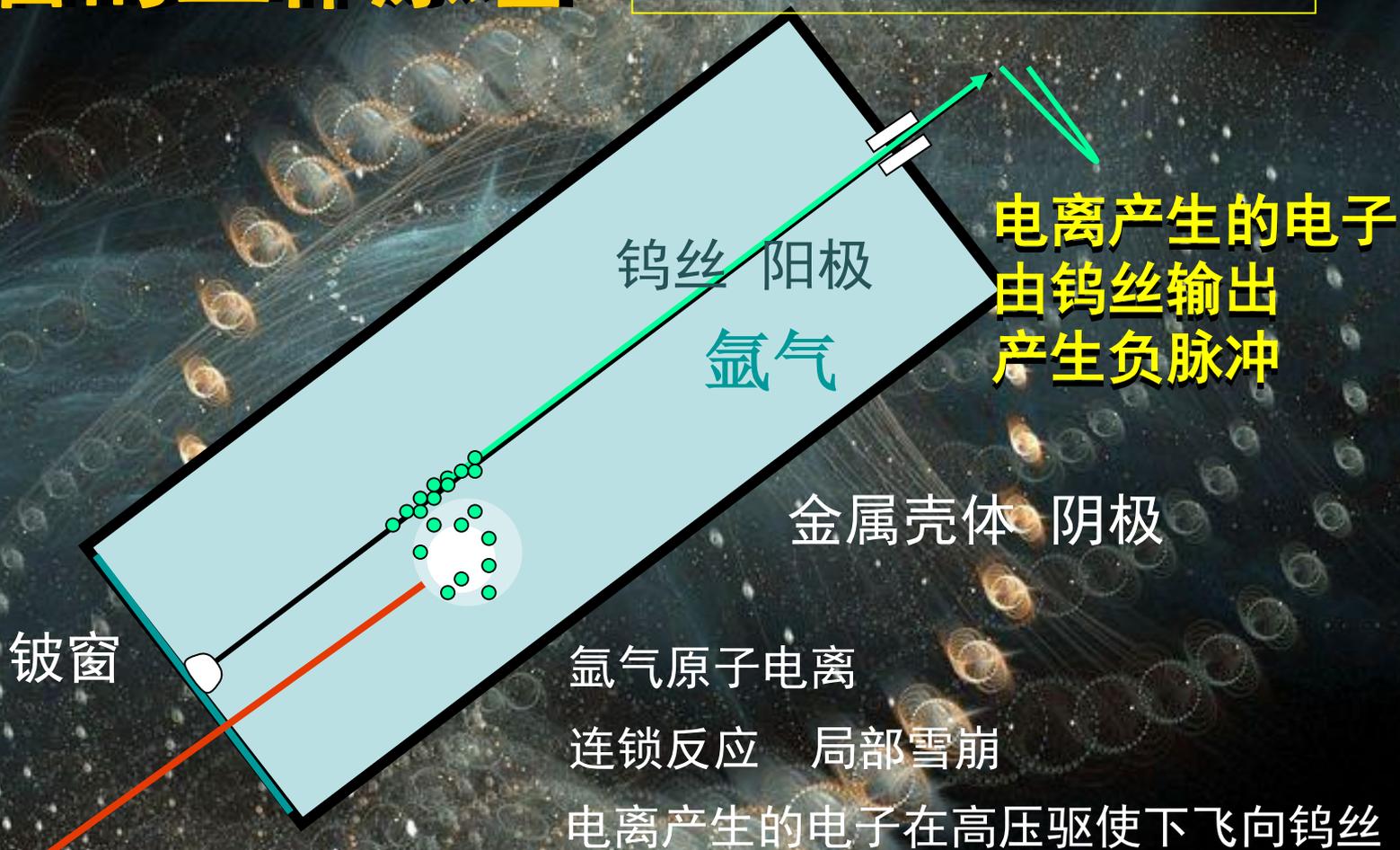
计数



2θ 扫描范围

计数管的工作原理

——X射线粒子性的证明



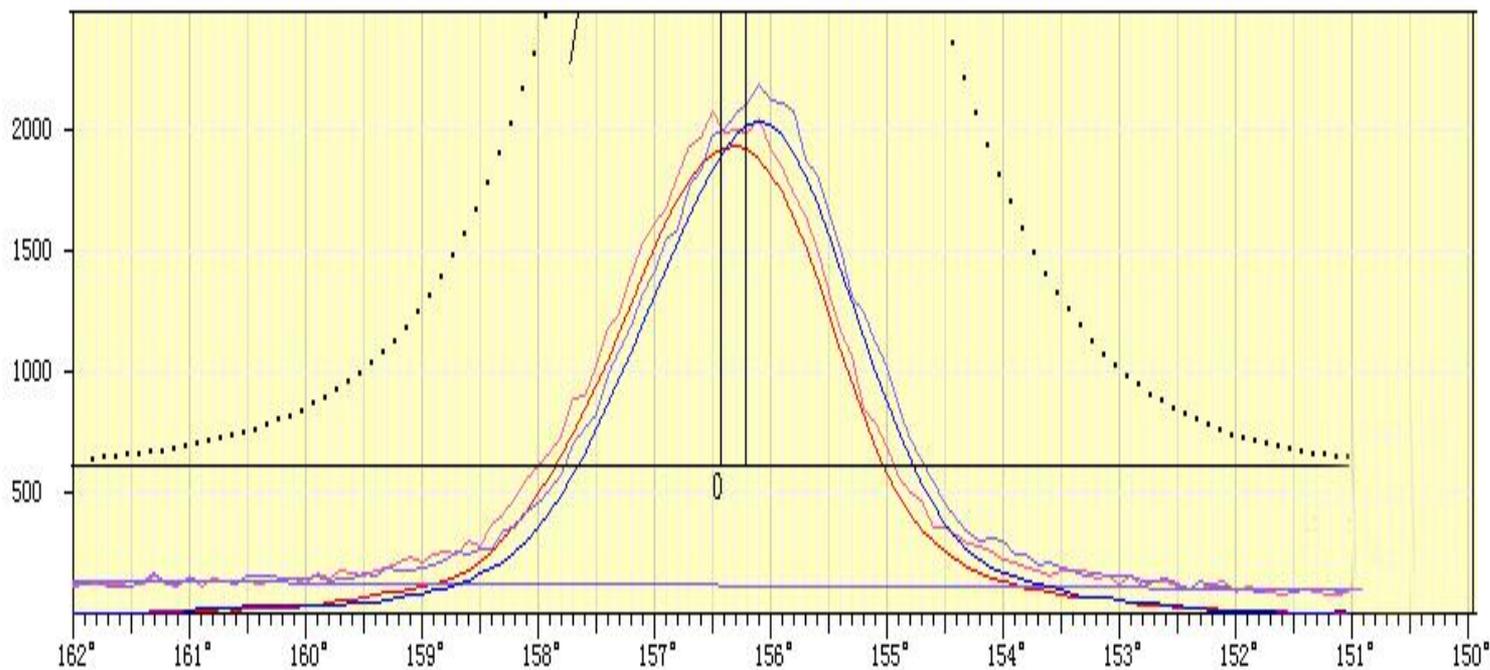
X光子

这样，一个X光子进入计数管，便产生一个脉冲。

计数

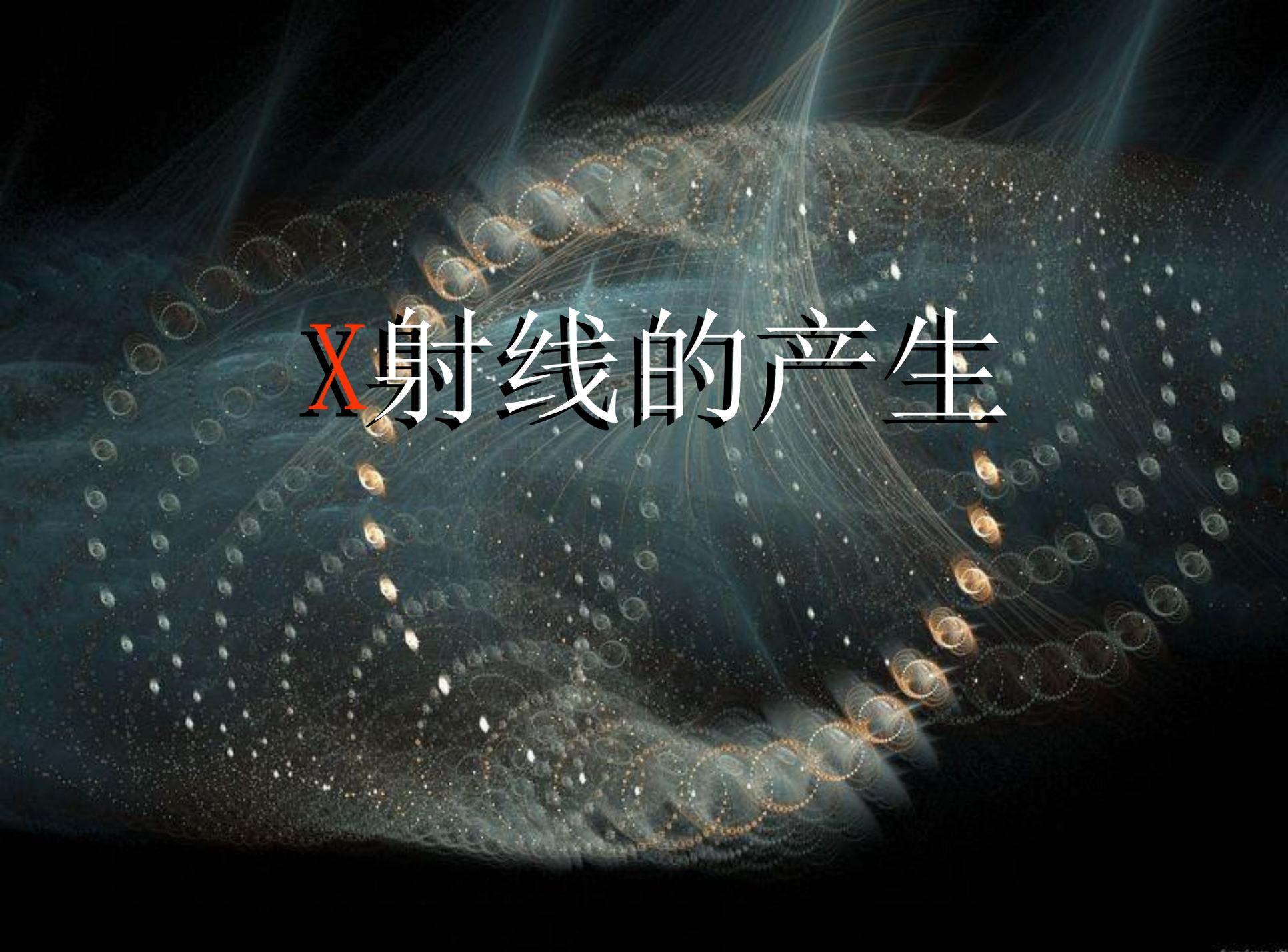
——规定时间内进入计数管的X光子数

计数

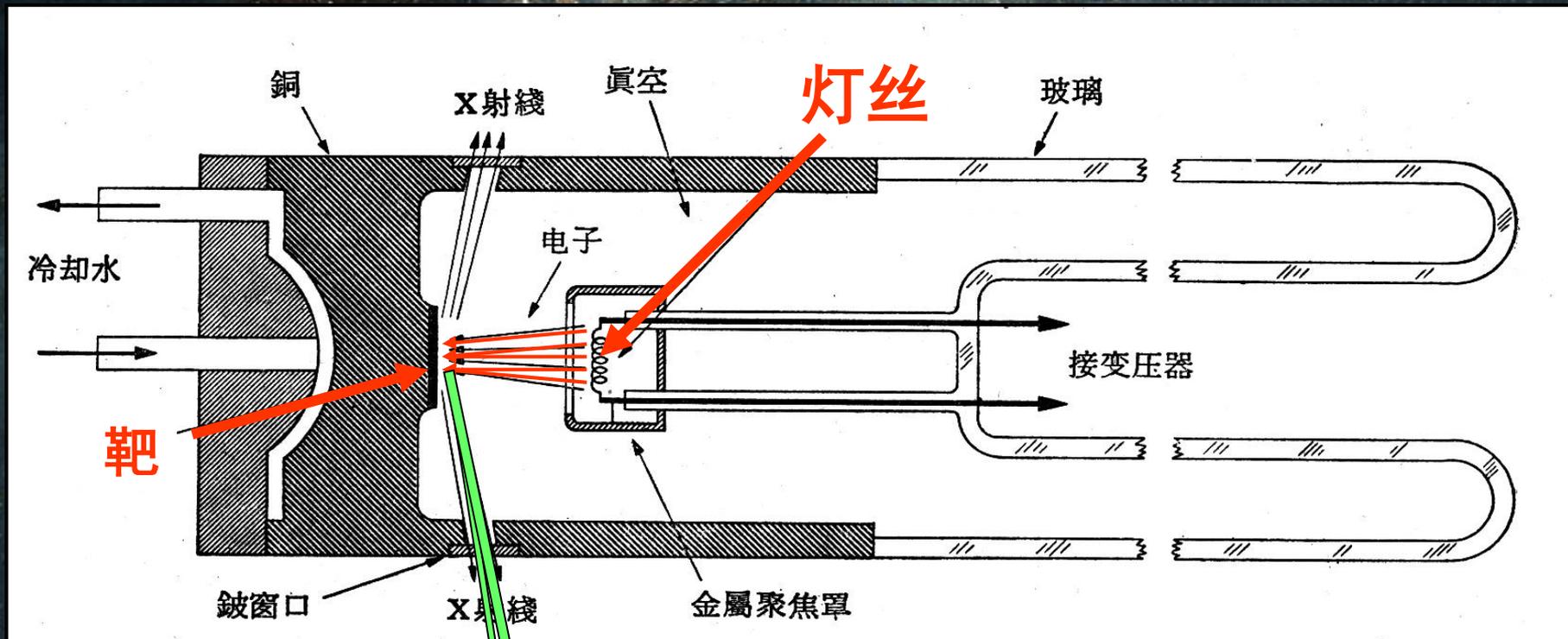


2θ 扫描范围

X射线的产生

The background features a dark, ethereal space filled with numerous glowing particles and light trails. The particles are primarily white and gold, appearing as small dots and larger, more complex structures. Light trails are thin, wispy lines of blue and white, creating a sense of movement and depth. The overall effect is reminiscent of a microscopic or cosmic scene, with a focus on light and energy.

我们这里讲的是**韧致辐射**，它是在X射线管里产生的。



X射线

X射线管结构示意图

X射线的光谱

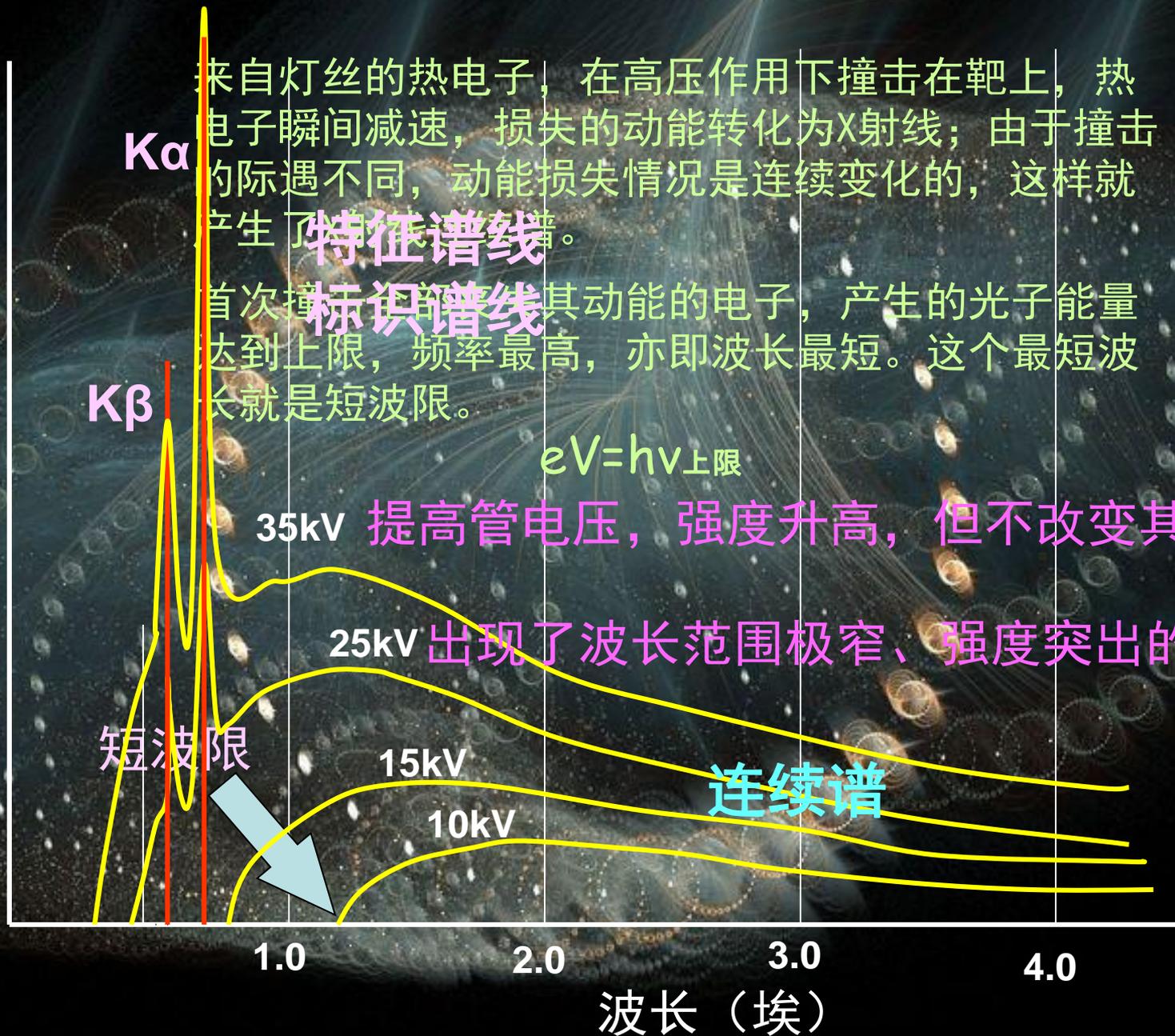
——强度沿波长的分布

X射线

连续谱线

特征谱线（标识谱线）

X射线的强度（相对单位）



35kV 提高管电压，强度升高，但不改变其波长

25kV 出现了波长范围极窄、强度突出的谱线

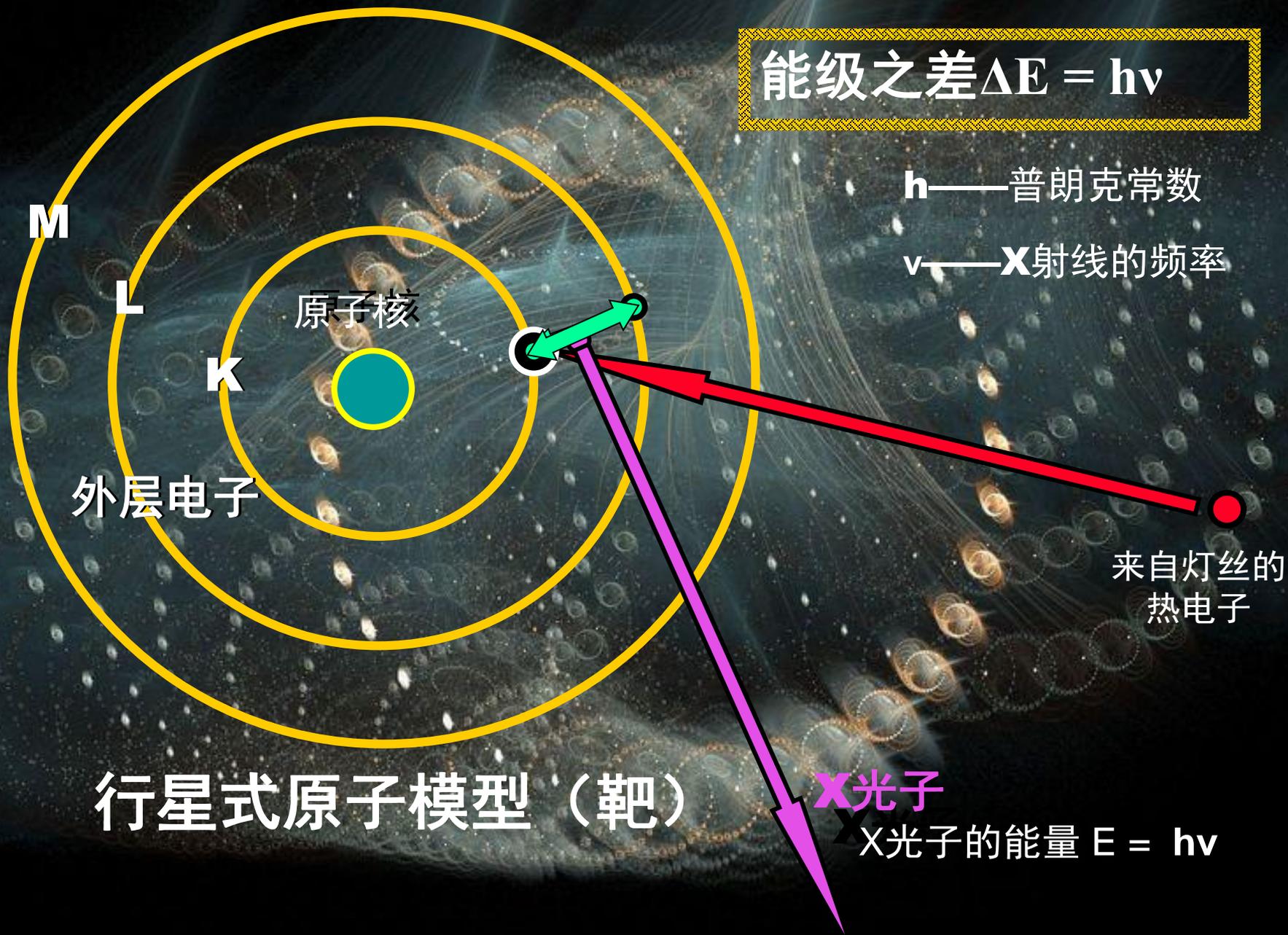
特征X射线的产生

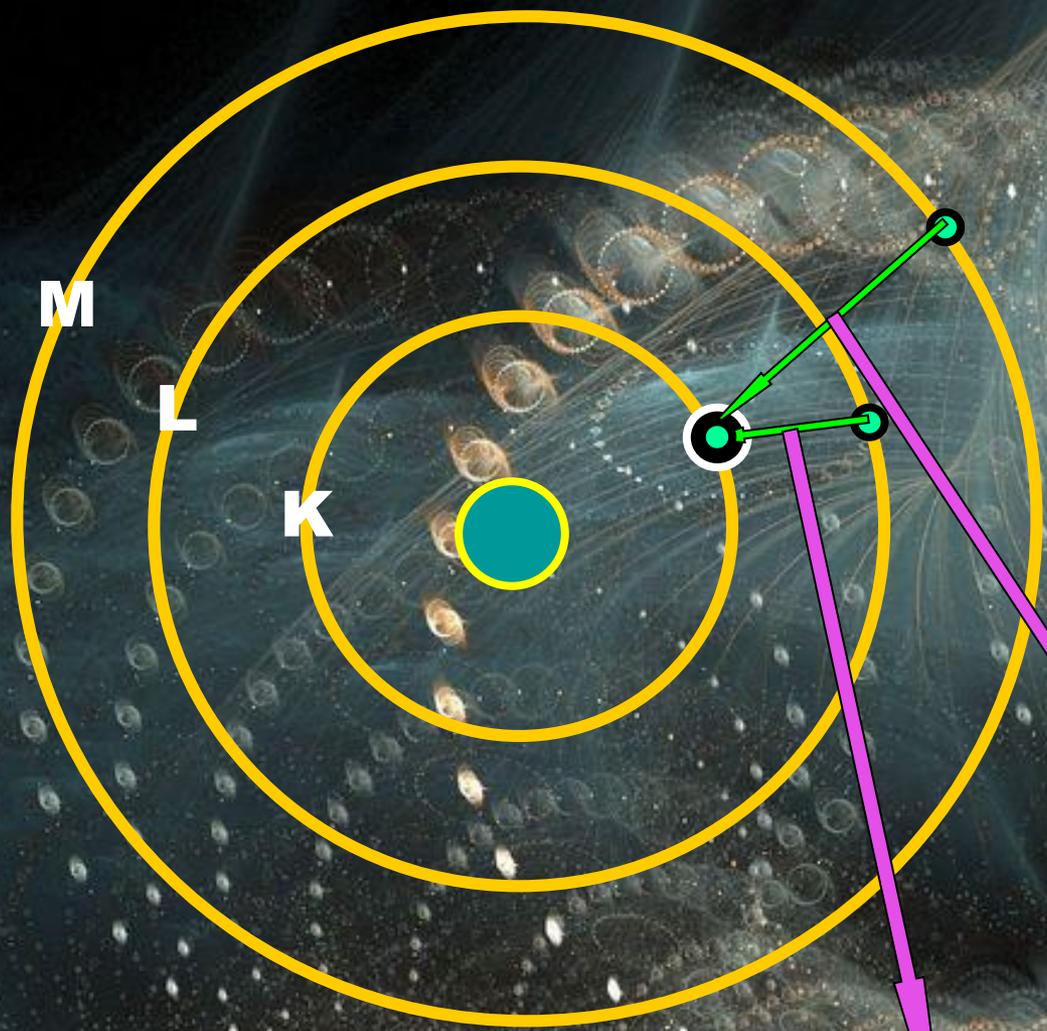
The background is a dark, abstract space filled with numerous glowing particles and light trails. The particles are primarily small, bright white and yellow dots, some of which are arranged in circular patterns. There are also larger, more complex structures that look like clusters of particles or small, glowing spheres. The overall effect is one of dynamic energy and light, suggesting a scientific or technological theme.

$$\text{能级之差 } \Delta E = h\nu$$

h ——普朗克常数

ν ——X射线的频率





M至K能级之差较大

**K β 辐射频率较高，
波长较短，光子能量较高**

**但是由于M至K产生跃迁的
几率较低，所以K β 辐射
强度较低。**

K β 辐射

K α 辐射

X射线的强度 (相对单位)

$K\alpha$

$K\beta$

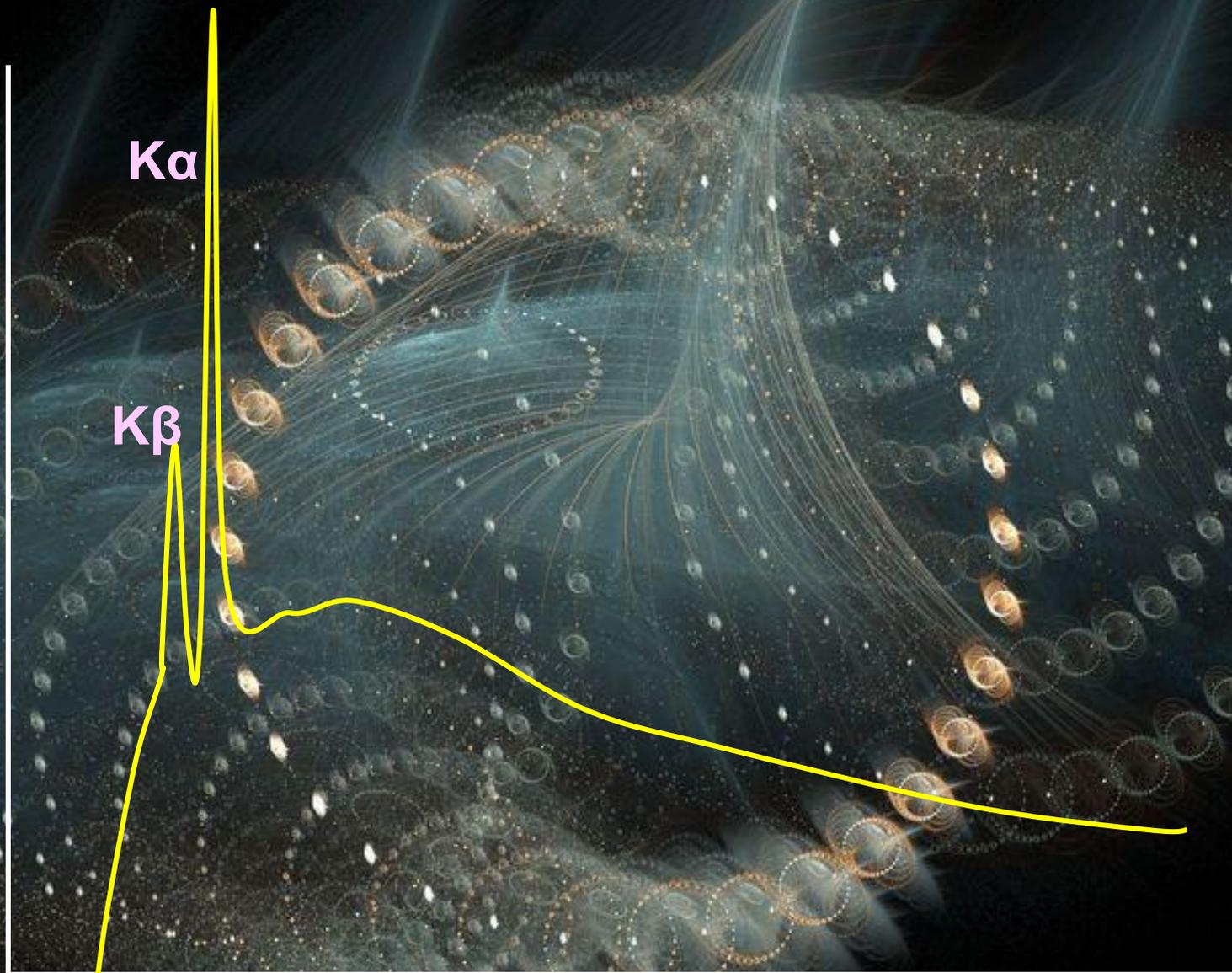
1.0

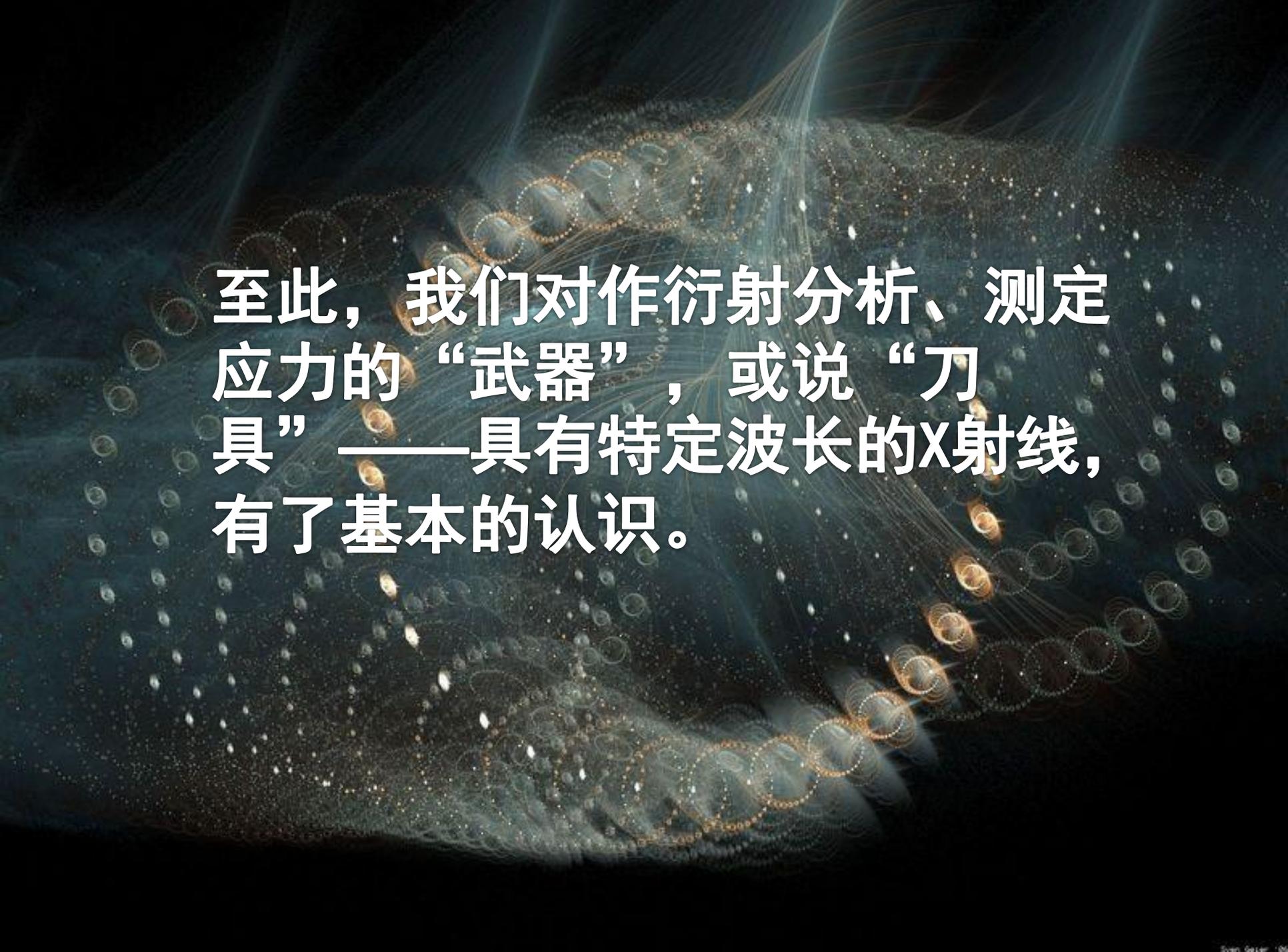
2.0

3.0

4.0

波长 (埃)



The background is a dark, abstract space filled with glowing particles and lines. There are numerous small, bright white and yellow dots scattered throughout. Overlaid on these are several larger, glowing orange and yellow circular patterns that resemble DNA double helices or complex molecular structures. Thin, wispy lines of light in shades of blue and white weave through the scene, creating a sense of depth and movement. The overall effect is that of a microscopic or quantum-scale environment.

至此，我们对作衍射分析、测定应力的“武器”，或说“刀具”——具有特定波长的X射线，有了基本的认识。

X 射线基本知识

吕克茂



伦琴(W.C.Rontgen, 1845–1923)

德国物理学家

X射线又叫伦琴射线。

1895年秋，德国乌茨堡大学的物理学家伦琴Roentgen在其实验室研究阴极射线时，偶然发现了一种能穿过固体物质，使荧光质发光和胶片感光的射线，他称之为X射线。

伦琴夫人的手

——世界上第一张X射线透视片

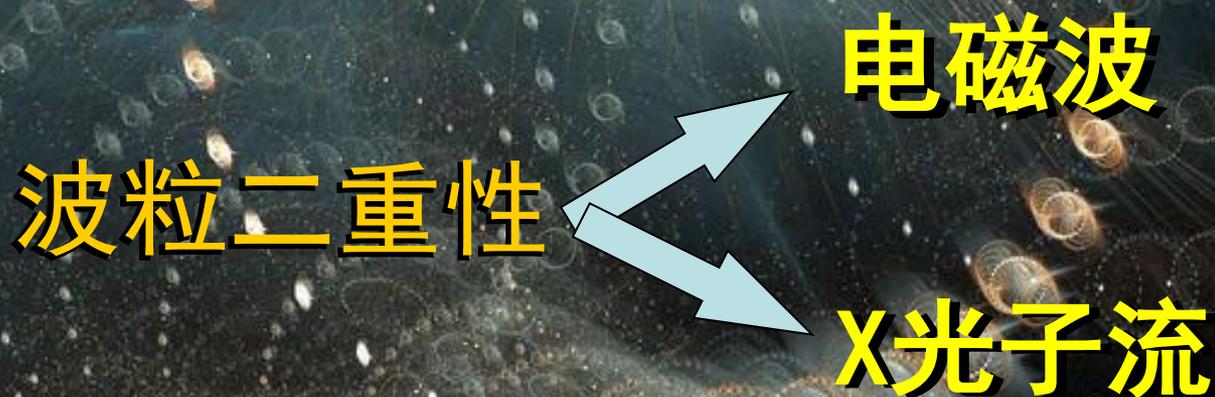


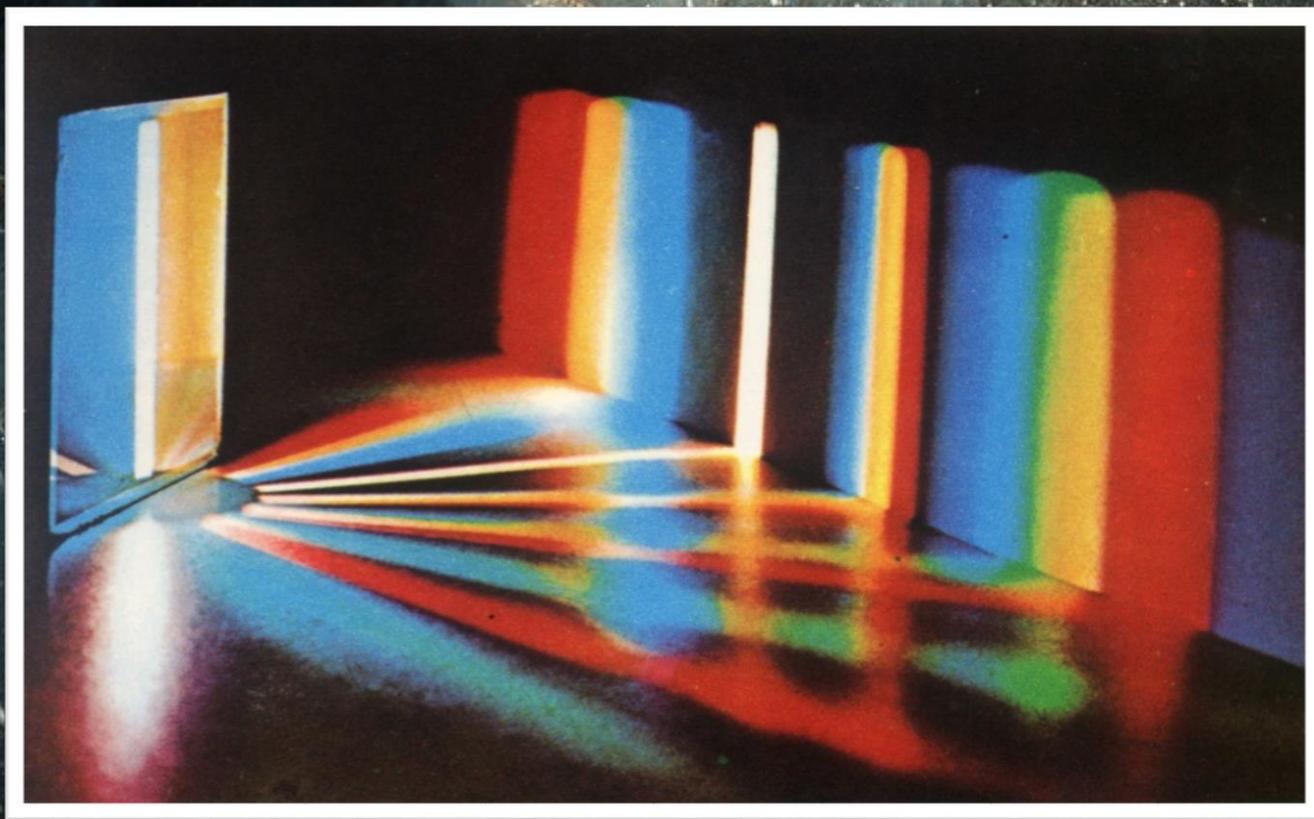
当年伦琴的实验室



获得了诺贝尔奖

X射线的本质



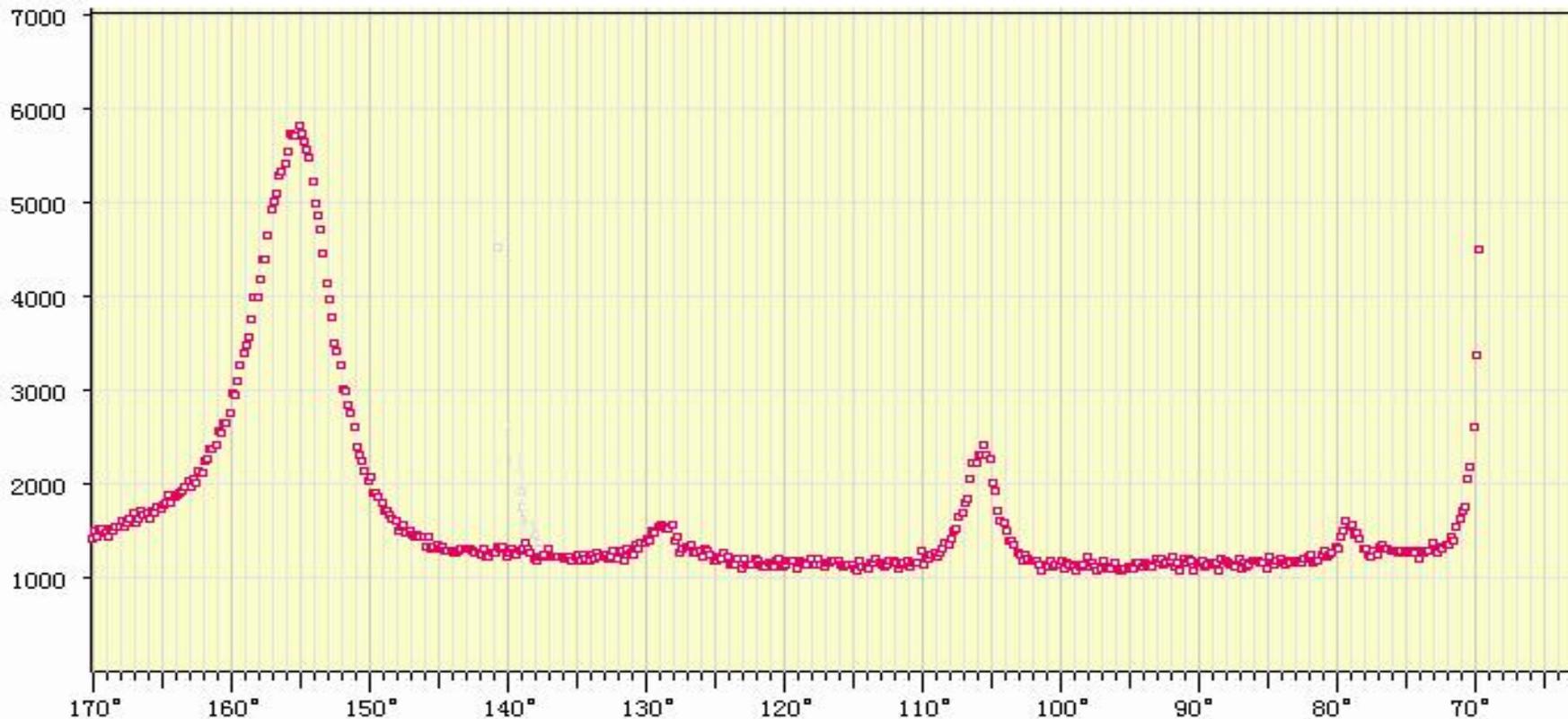


可见光衍射图

X射线在晶体上衍射现象

——X射线电磁波本质的证明

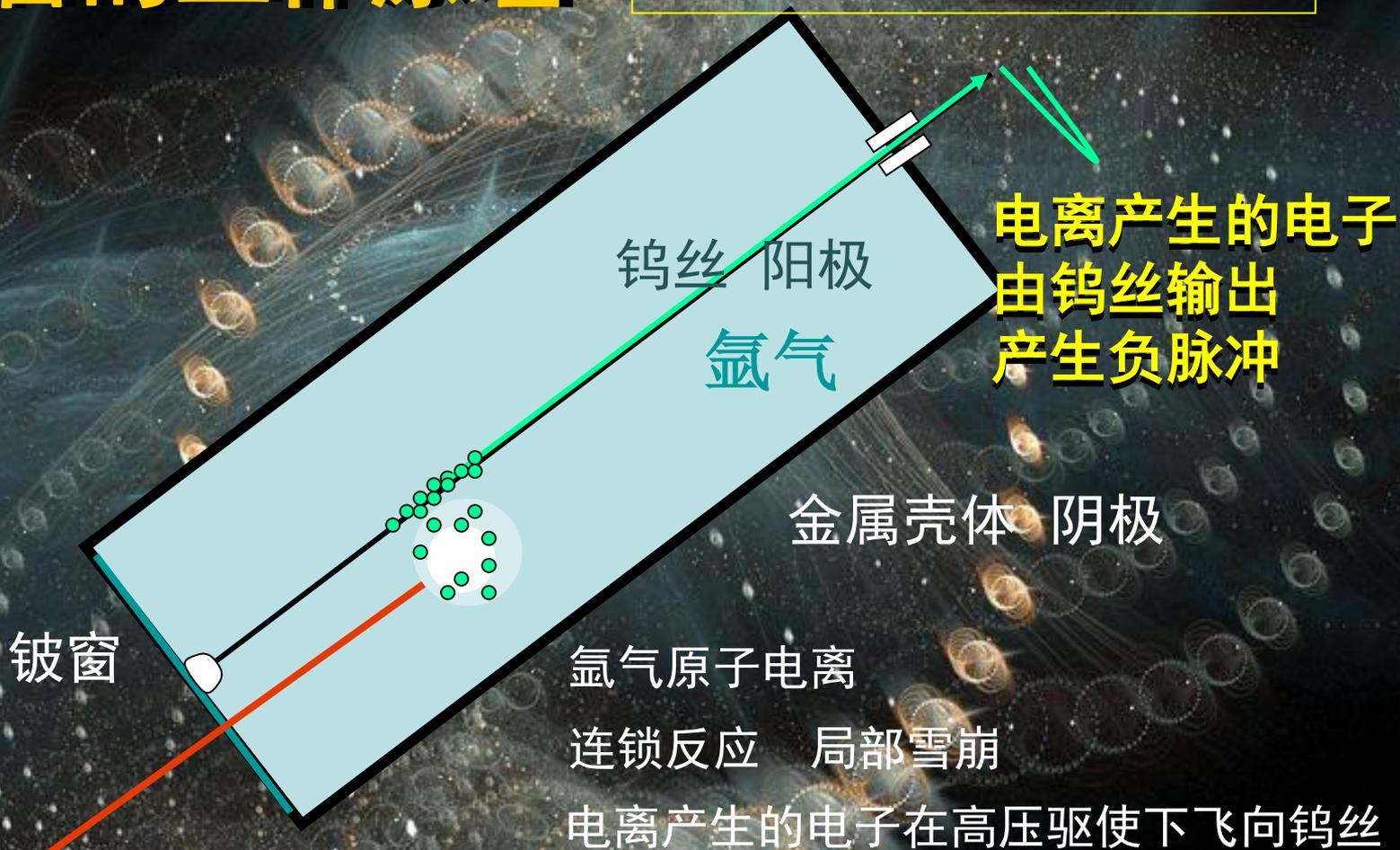
计数



2θ 扫描范围

计数管的工作原理

——X射线粒子性的证明



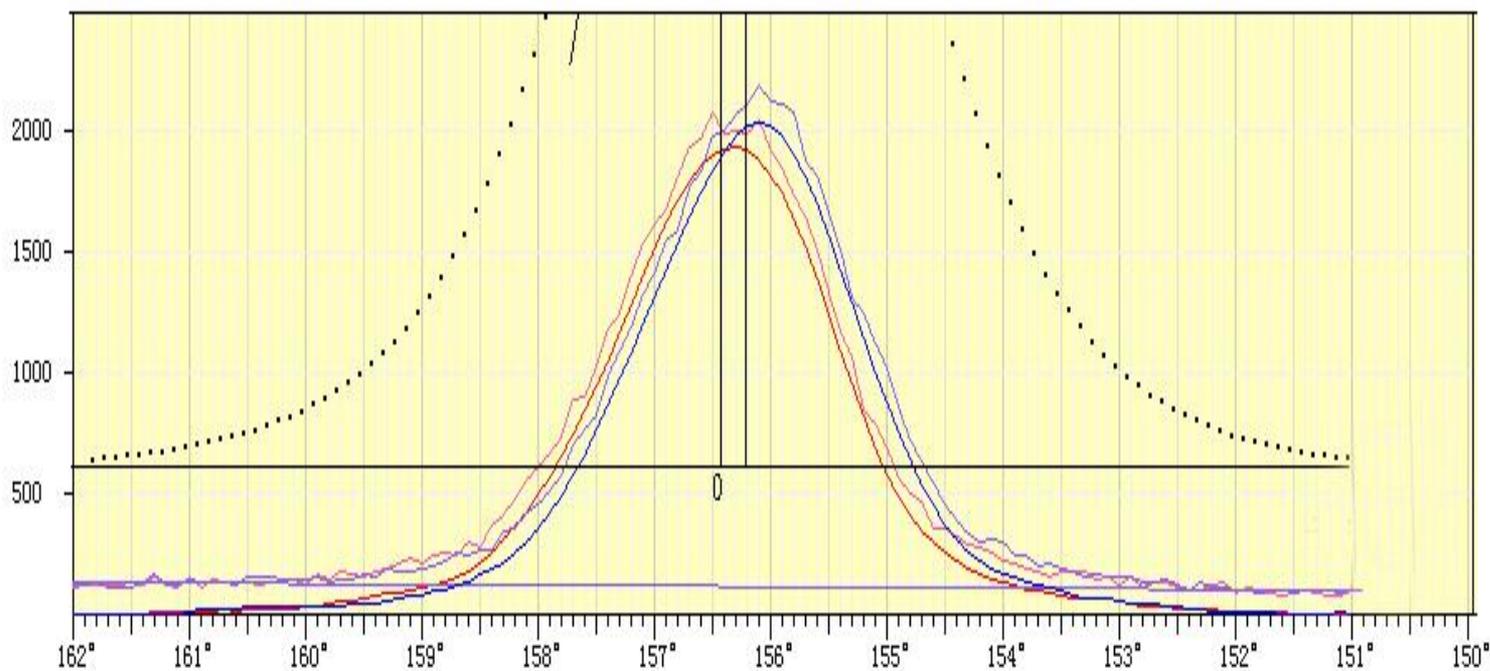
X光子

这样，一个X光子进入计数管，便产生一个脉冲。

计数

——规定时间内进入计数管的X光子数

计数

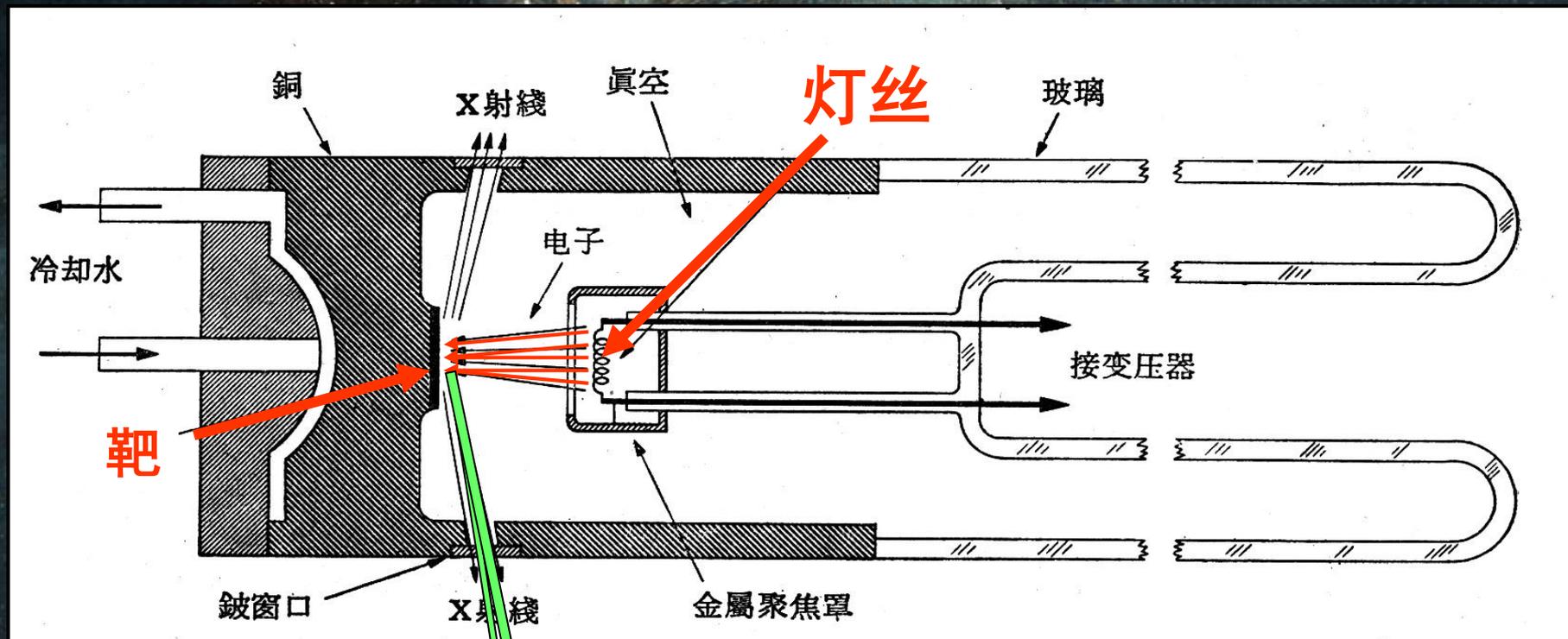


2θ 扫描范围

X射线的产生

The background is a dark, abstract space filled with glowing particles and light trails. There are several prominent, glowing, circular or ring-like structures that appear to be made of small, bright dots or particles. These structures are arranged in a somewhat circular pattern, with some appearing to be in motion or creating a sense of depth. The overall color palette is dark, with shades of blue, green, and yellow/gold, creating a futuristic and scientific atmosphere.

我们这里讲的是**韧致辐射**，它是在X射线管里产生的。



X射线

X射线管结构示意图

X射线的光谱

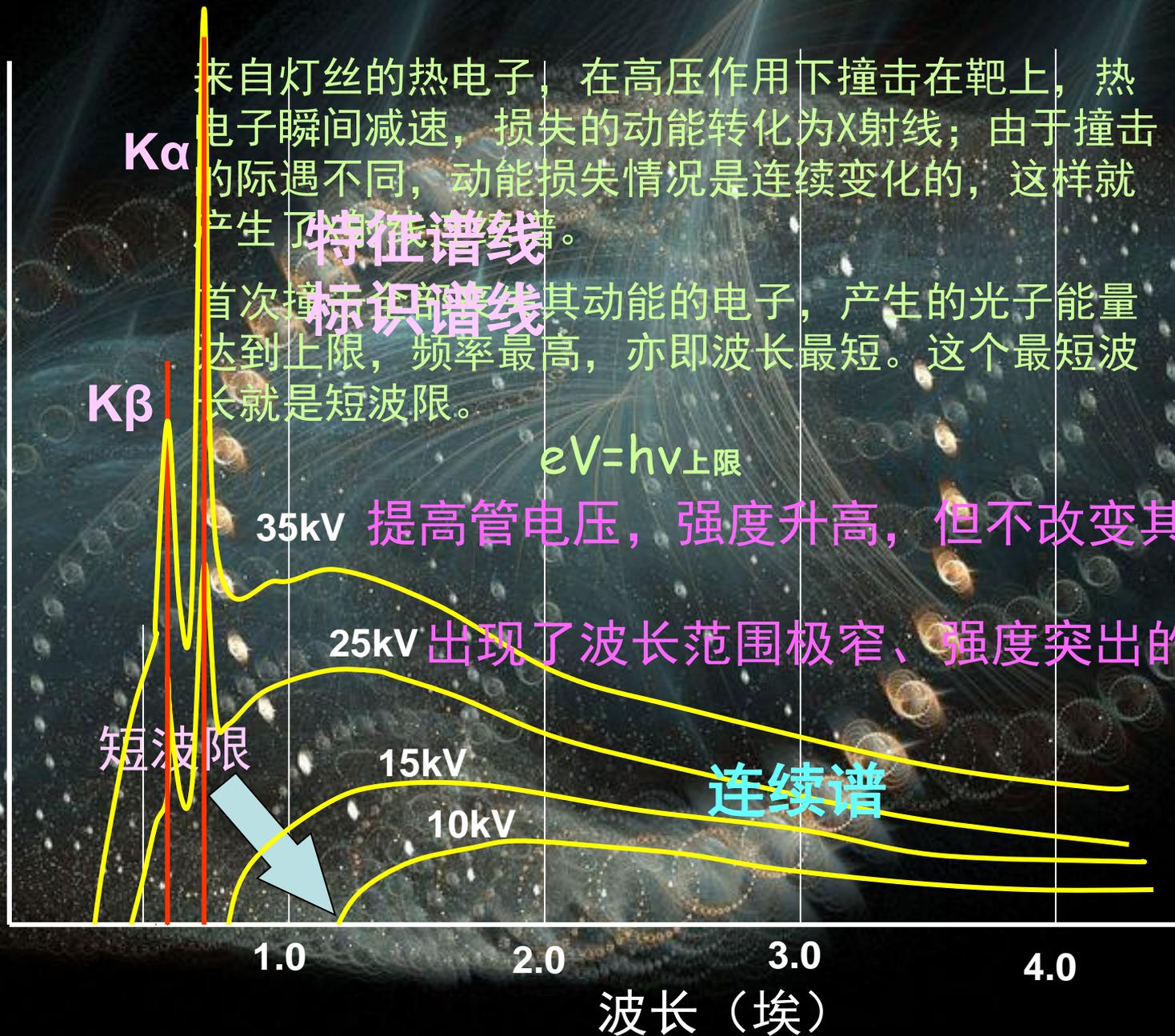
——强度沿波长的分布

X射线

连续谱线

特征谱线（标识谱线）

X射线的强度（相对单位）



K α

特征谱线

标识谱线

K β

$$eV = h\nu_{\text{上限}}$$

35kV 提高管电压，强度升高，但不改变其波长

25kV 出现了波长范围极窄、强度突出的谱线

短波限

15kV

10kV

连续谱

1.0

2.0

3.0

4.0

波长（埃）

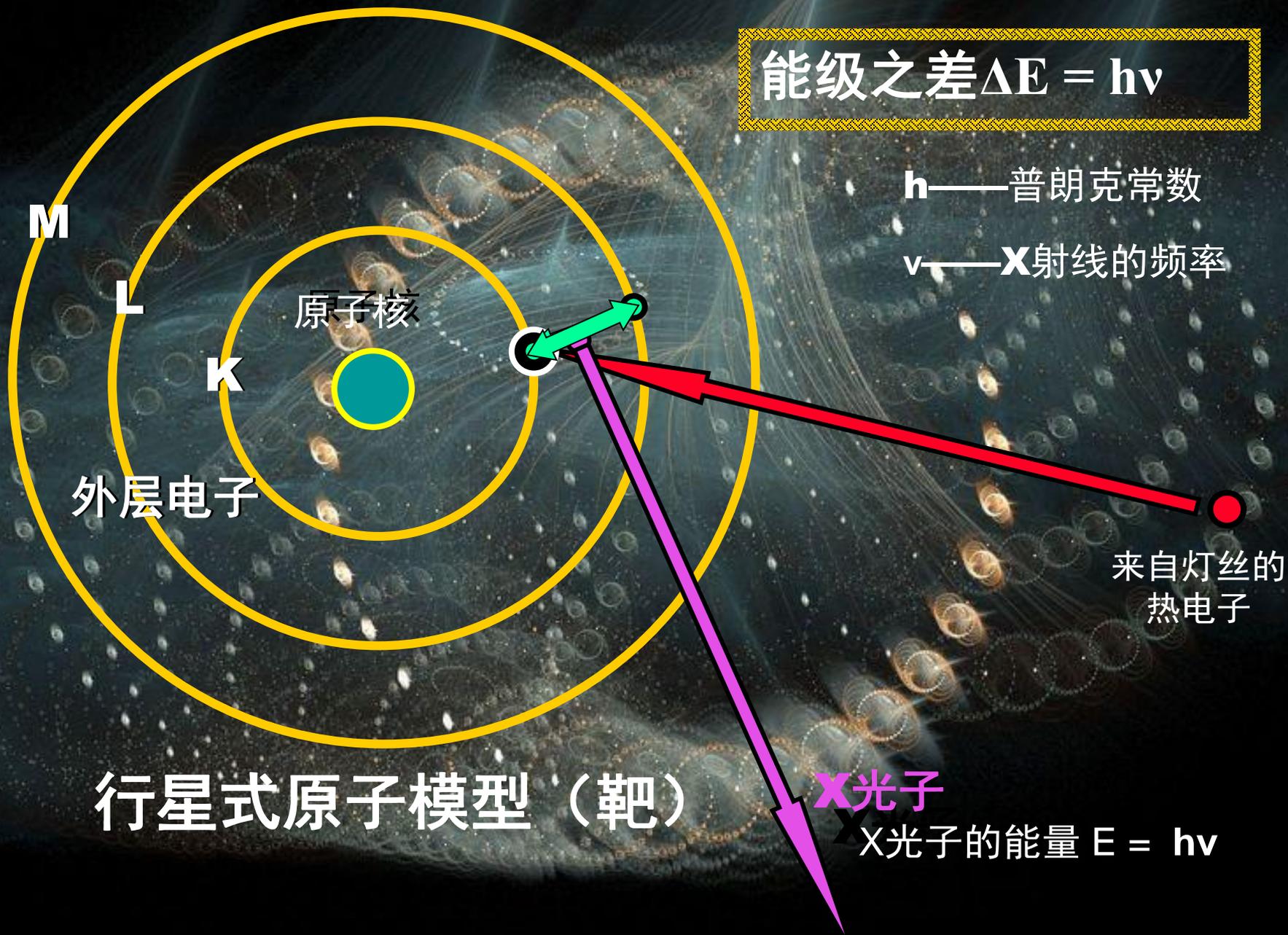
特征X射线的产生

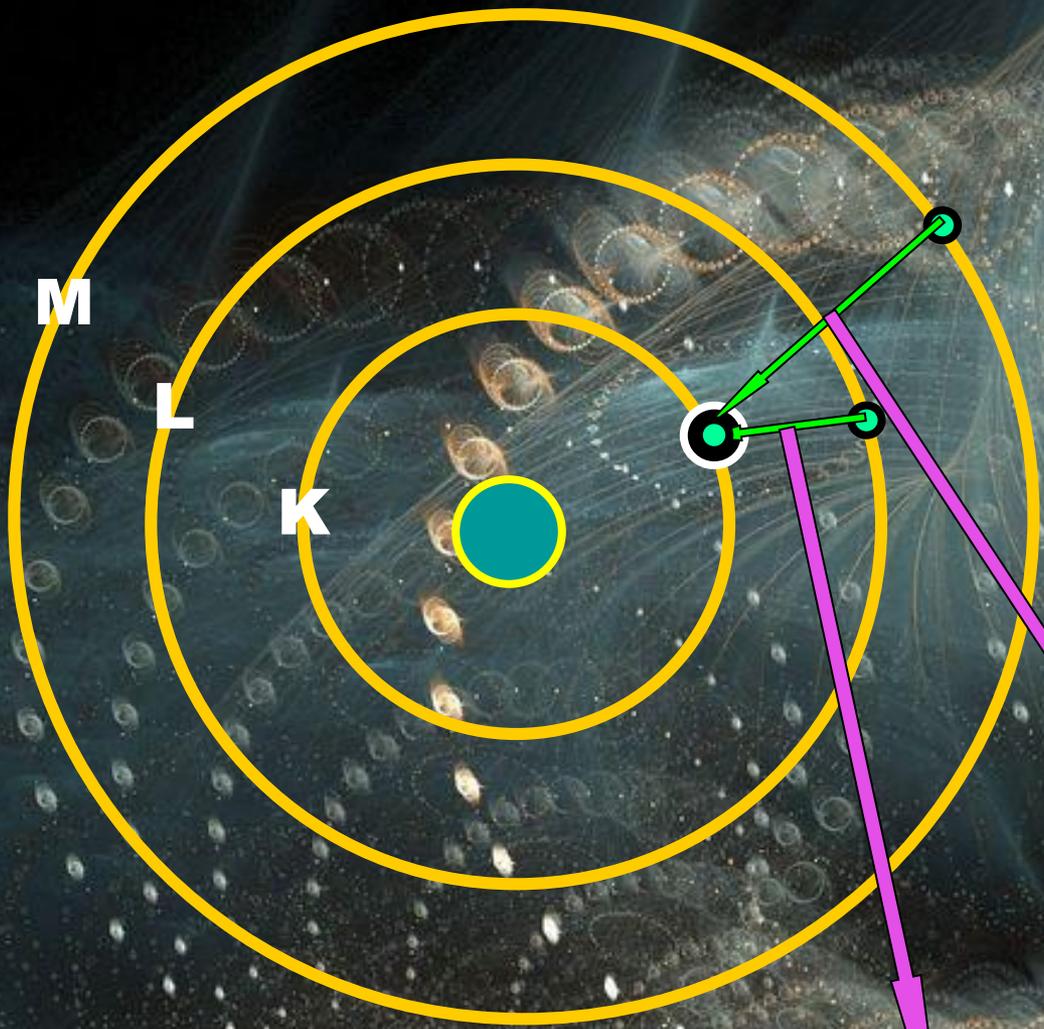
The background of the slide is a dark, abstract space filled with numerous glowing particles and light trails. The particles are primarily golden-yellow and white, appearing as small spheres or dots. Some of these particles are arranged in circular or spiral patterns, suggesting a dynamic or orbital motion. The light trails are thin, wispy lines that radiate from various points, creating a sense of movement and energy. The overall effect is reminiscent of a microscopic view of a particle beam or a complex atomic structure.

$$\text{能级之差 } \Delta E = h\nu$$

h ——普朗克常数

ν ——X射线的频率





M至K能级之差较大

**K β 辐射频率较高，
波长较短，光子能量较高**

**但是由于M至K产生跃迁的
几率较低，所以K β 辐射
强度较低。**

K β 辐射

K α 辐射

X射线的强度 (相对单位)

$K\alpha$

$K\beta$

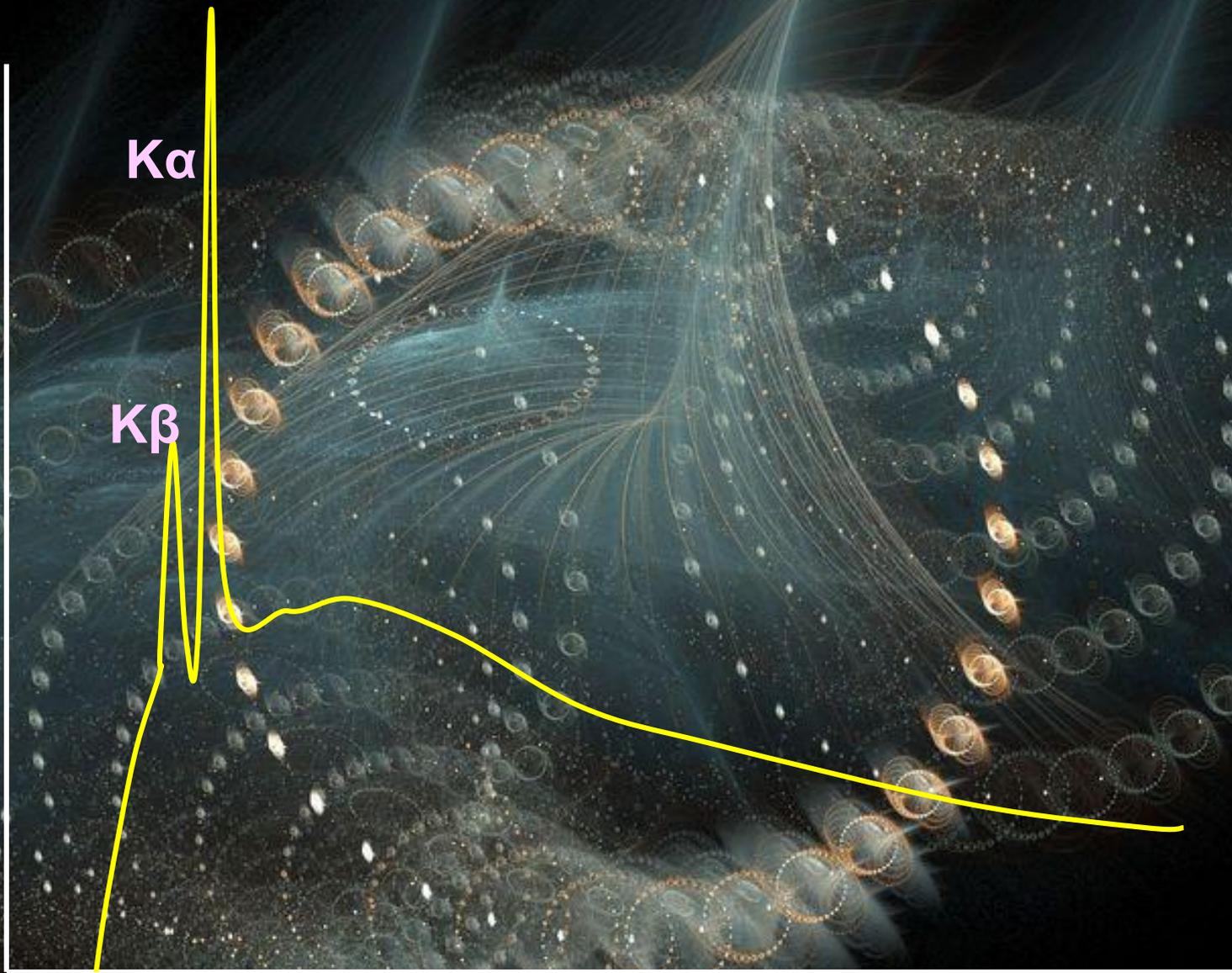
1.0

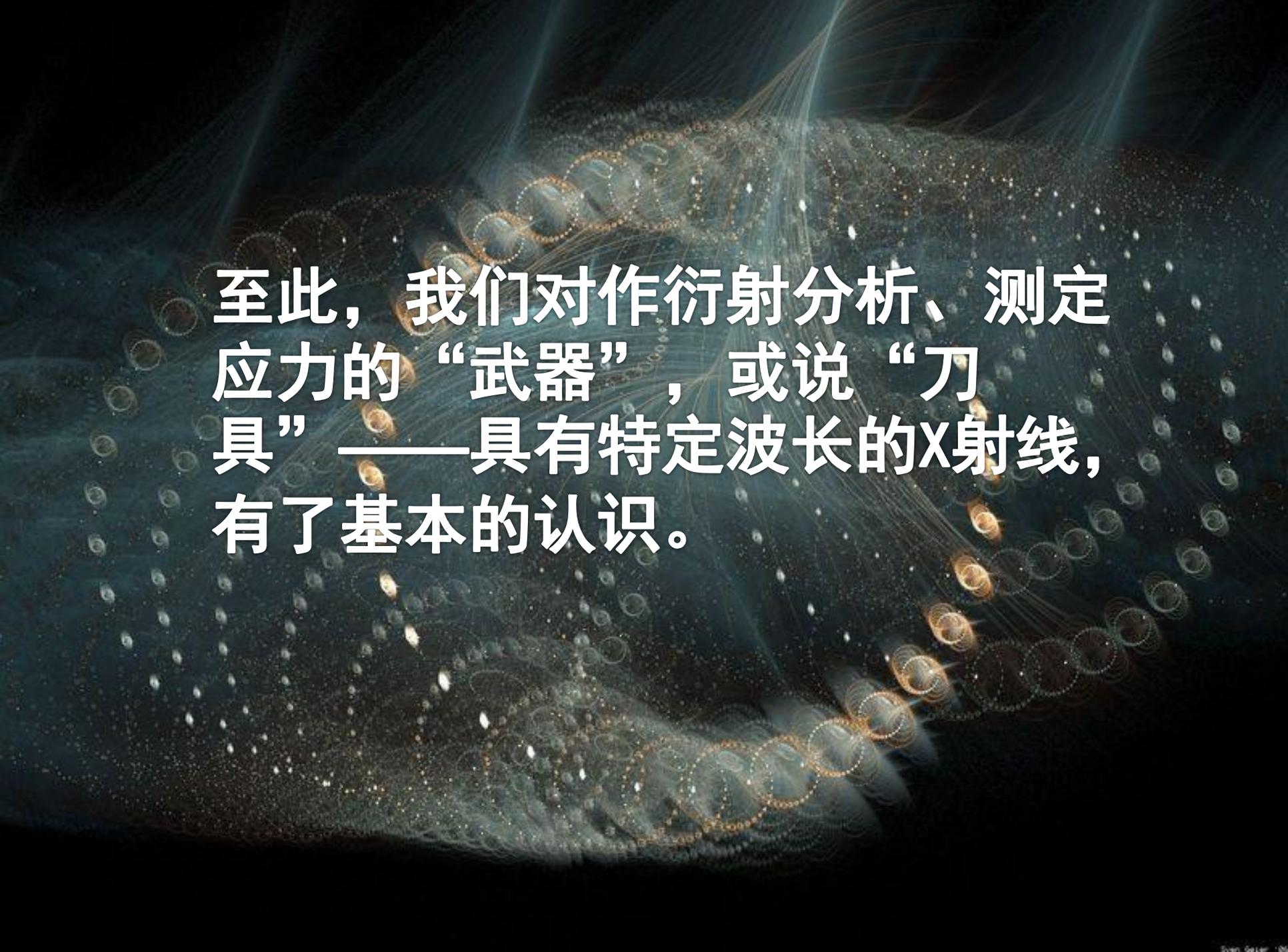
2.0

3.0

4.0

波长 (埃)



The background is a dark, abstract space filled with glowing particles and light trails. The particles are small, bright dots in various colors, including white, yellow, and orange. The light trails are thin, curved lines that create a sense of motion and depth. The overall effect is reminiscent of a microscopic view of a material or a complex data visualization.

至此，我们对作衍射分析、测定应力的“武器”，或说“刀具”——具有特定波长的X射线，有了基本的认识。

X 射线基本知识

吕克茂



伦琴(W.C.Rontgen, 1845–1923)

德国物理学家

X射线又叫伦琴射线。

1895年秋，德国乌茨堡大学的物理学家伦琴Roentgen在其实验室研究阴极射线时，偶然发现了一种能穿过固体物质，使荧光质发光和胶片感光的射线，他称之为X射线。

伦琴夫人的手

——世界上第一张X射线透视片

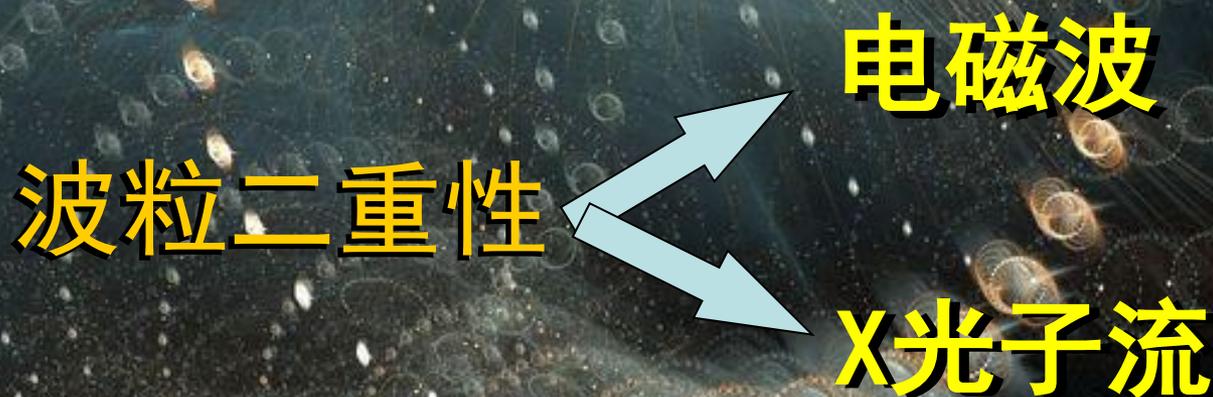


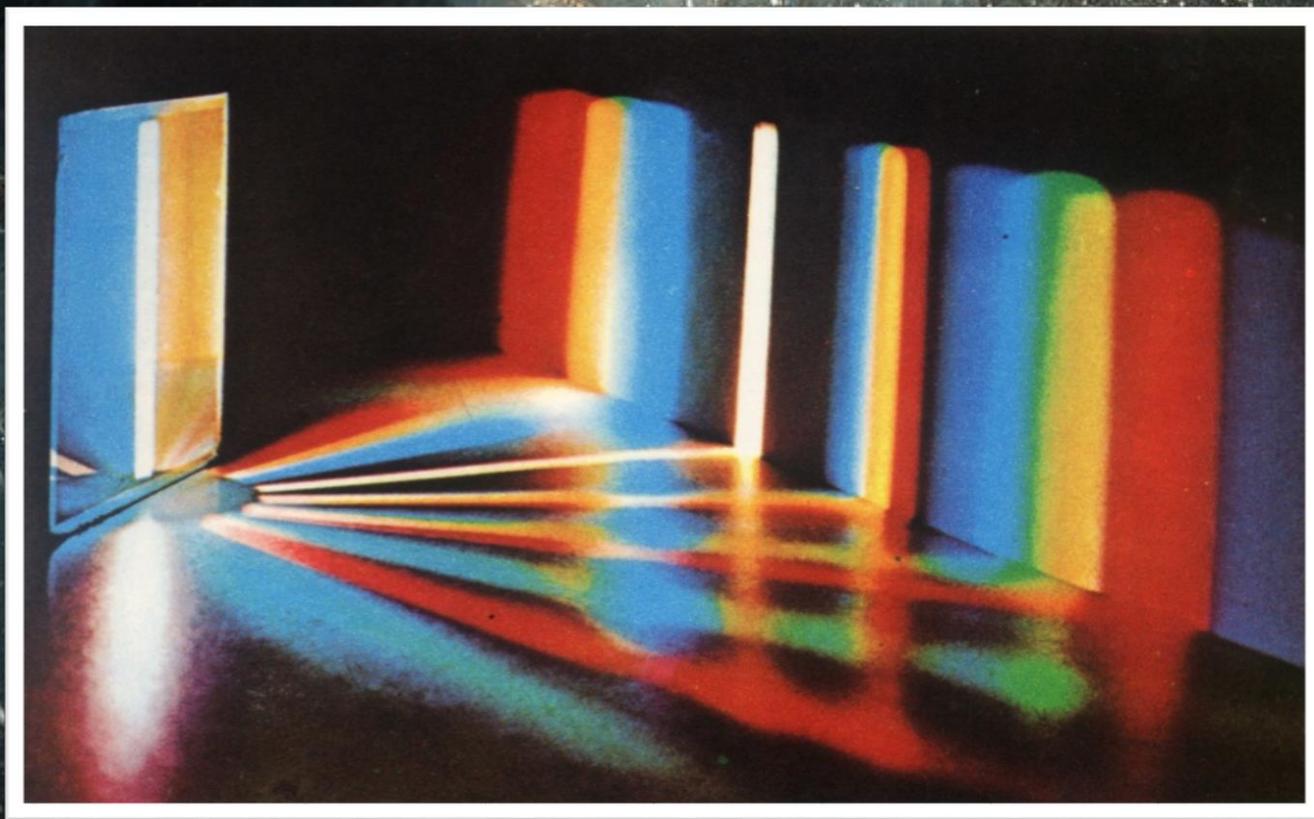
当年伦琴的实验室



获得了诺贝尔奖

X射线的本质



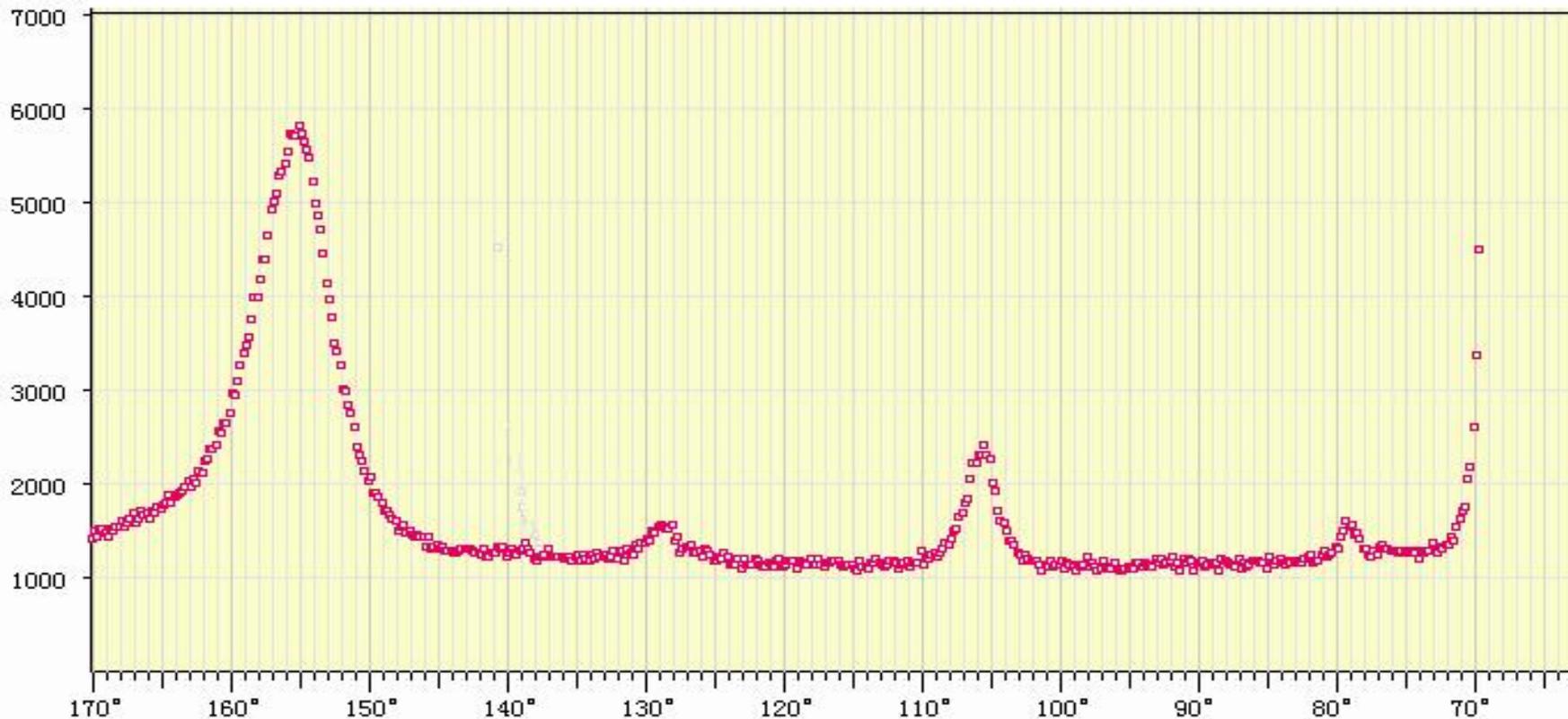


可见光衍射图

X射线在晶体上衍射现象

——X射线电磁波本质的证明

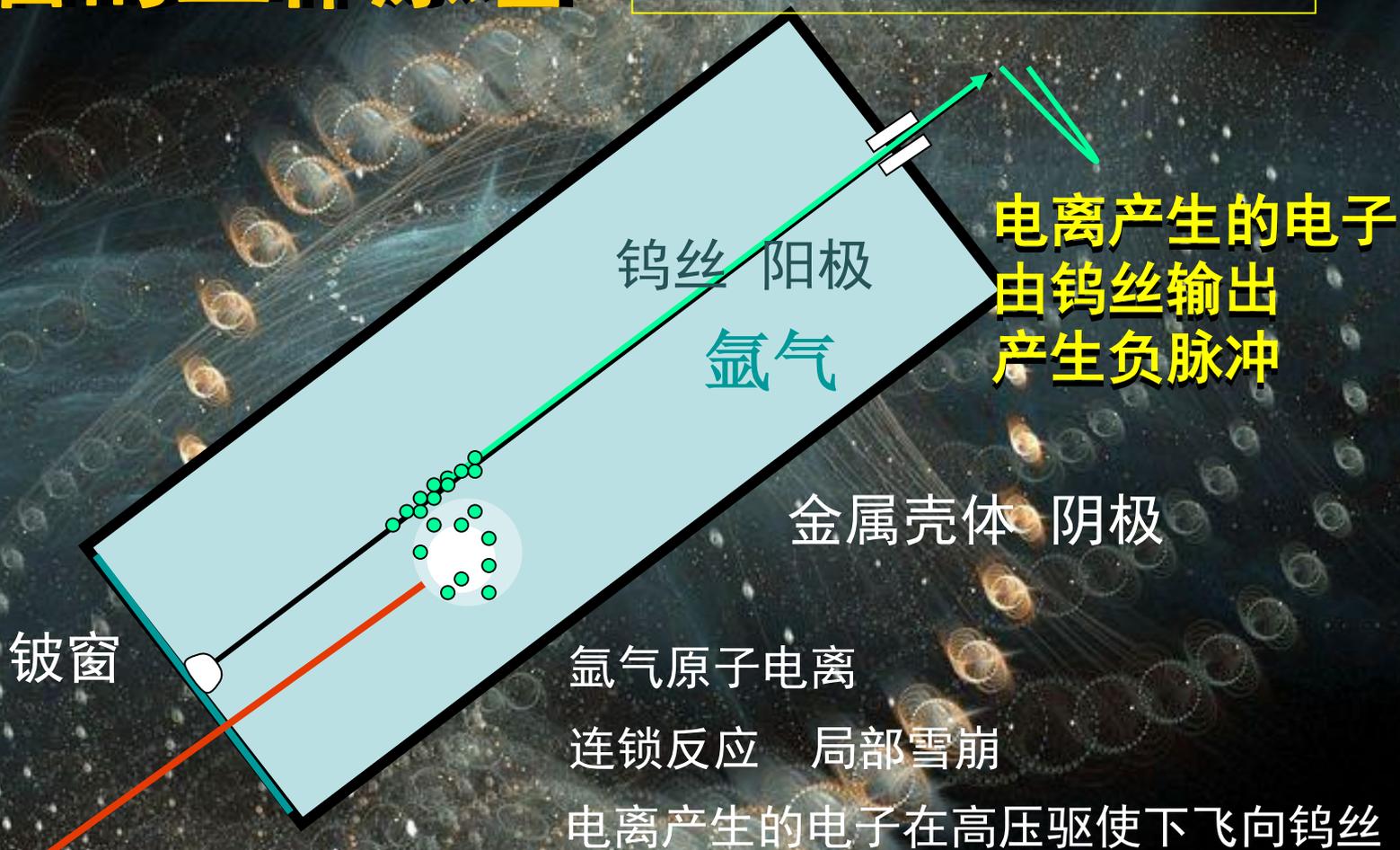
计数



2θ 扫描范围

计数管的工作原理

——X射线粒子性的证明



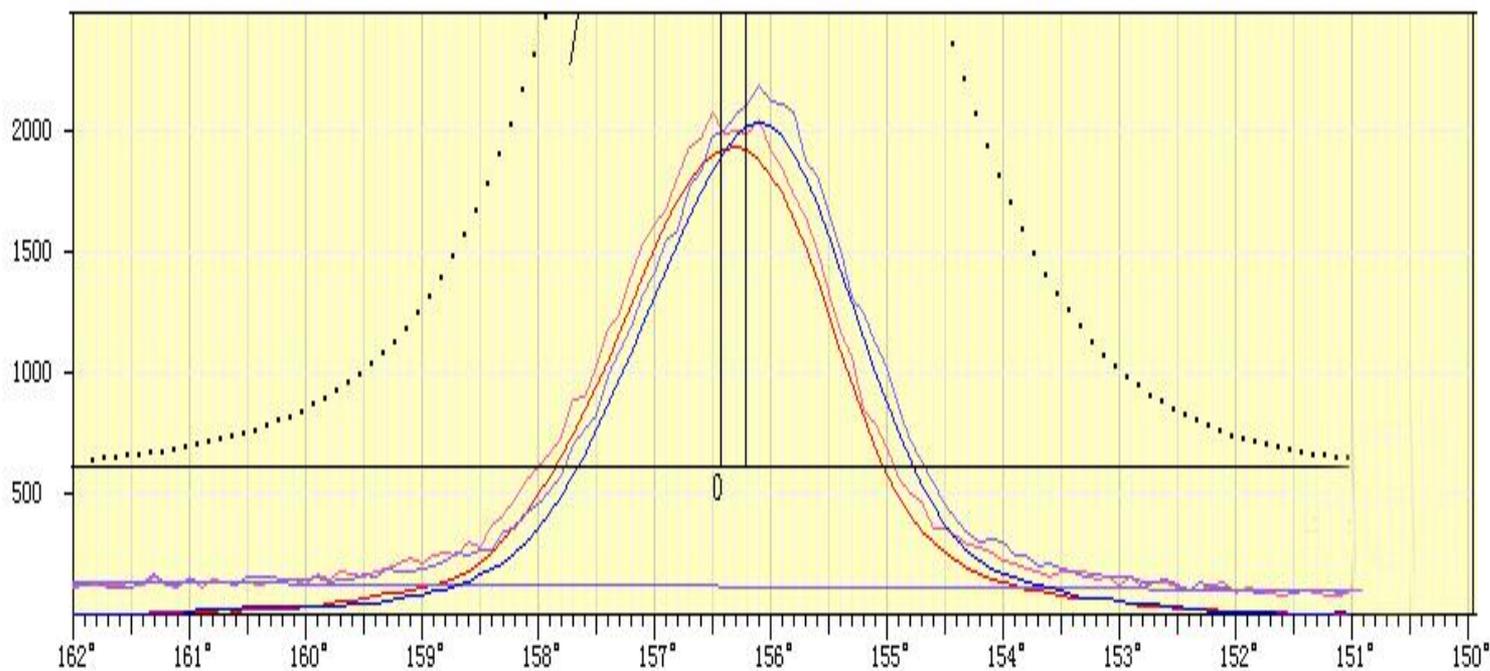
X光子

这样，一个X光子进入计数管，便产生一个脉冲。

计数

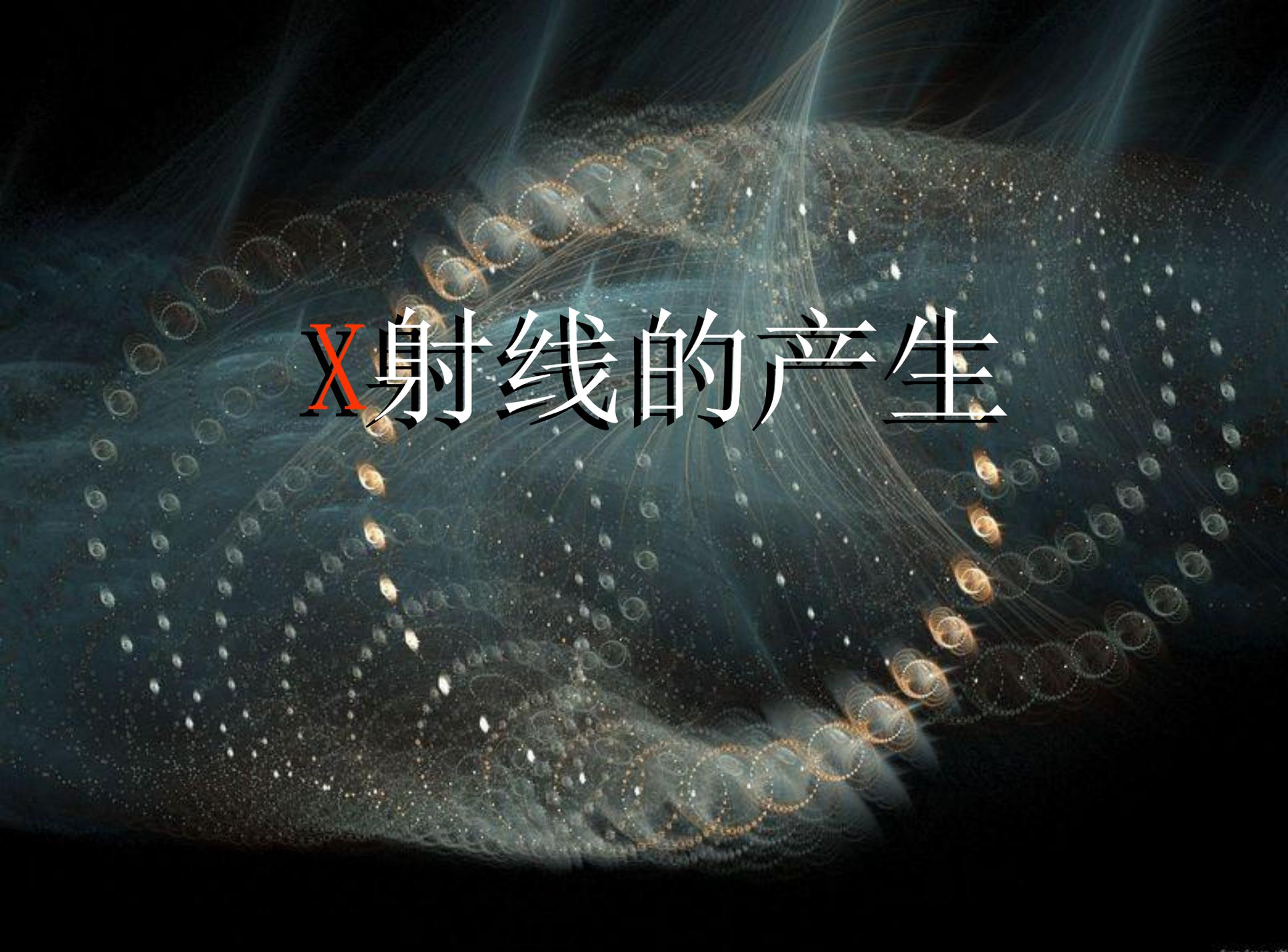
——规定时间内进入计数管的X光子数

计数

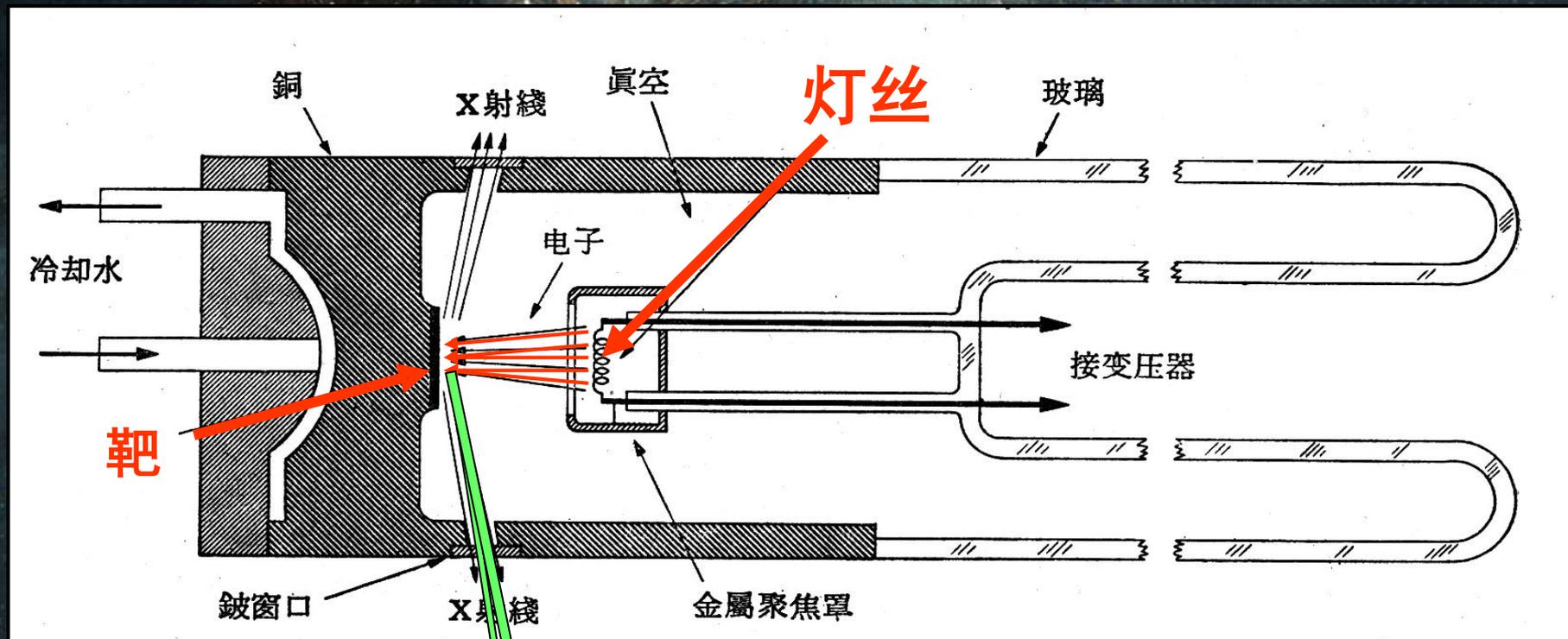


2θ 扫描范围

X射线的产生



我们这里讲的是**韧致辐射**，它是在X射线管里产生的。



X射线

X射线管结构示意图

X射线的光谱

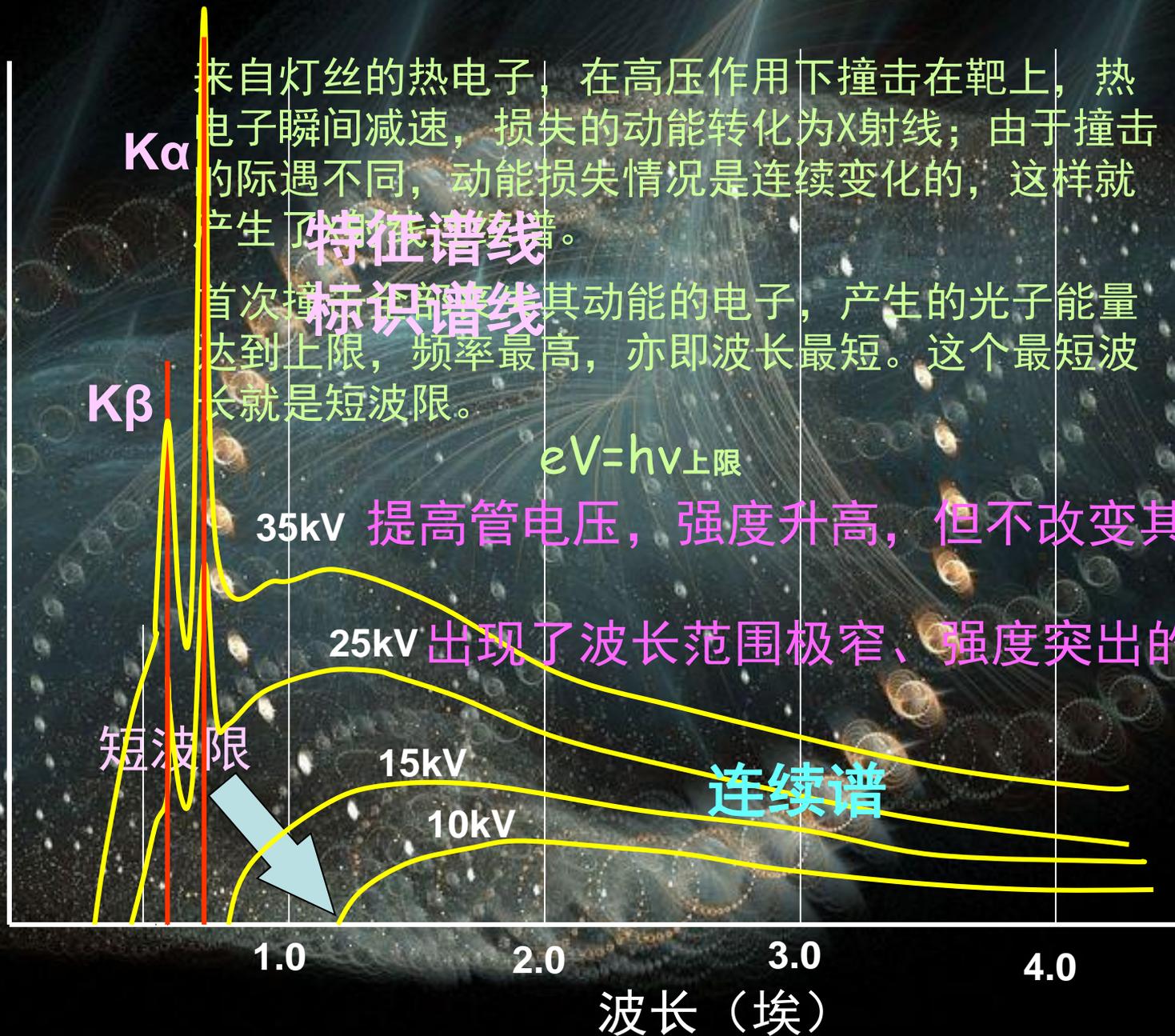
——强度沿波长的分布

X射线

连续谱线

特征谱线（标识谱线）

X射线的强度（相对单位）



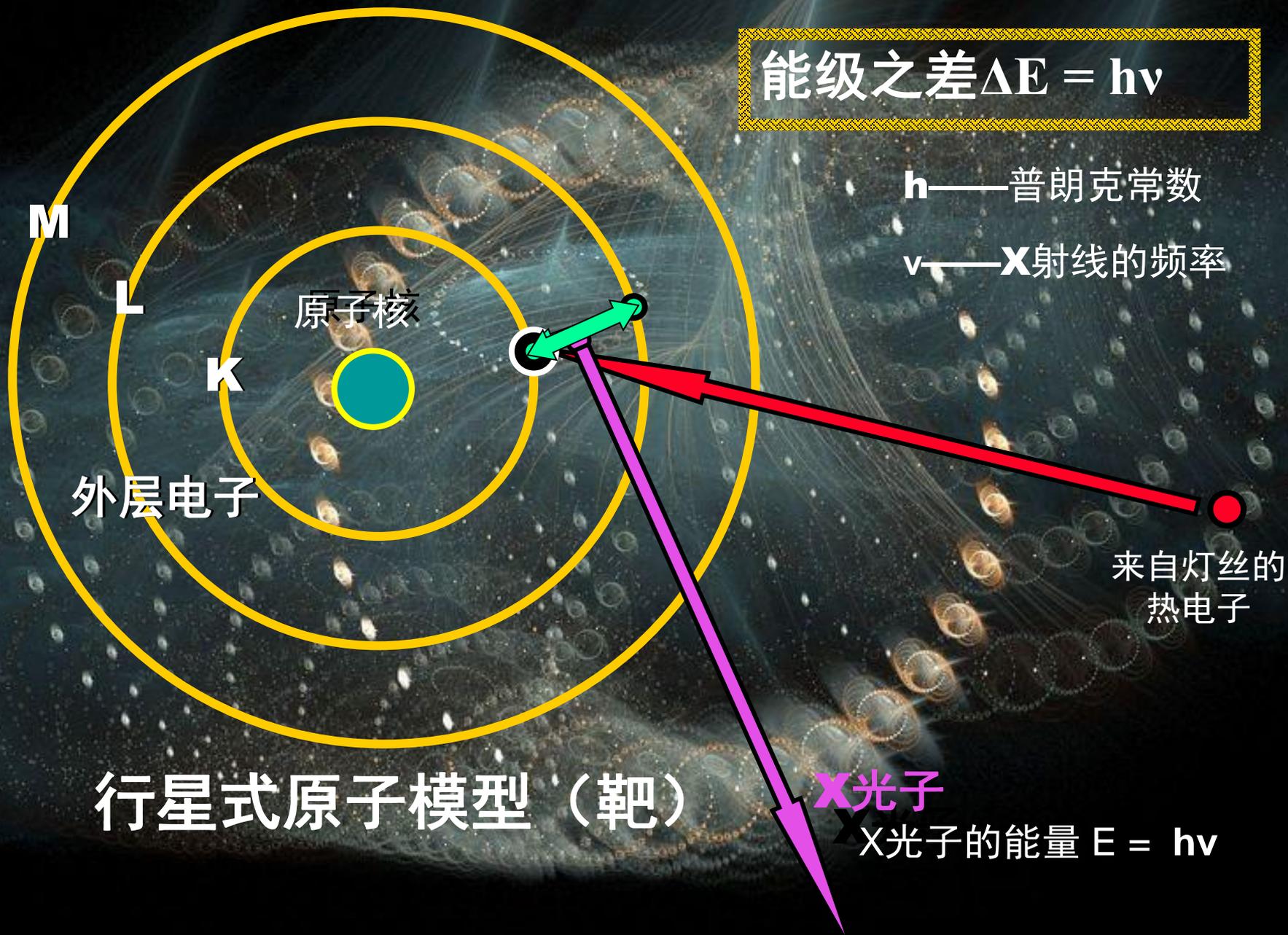
特征X射线的产生

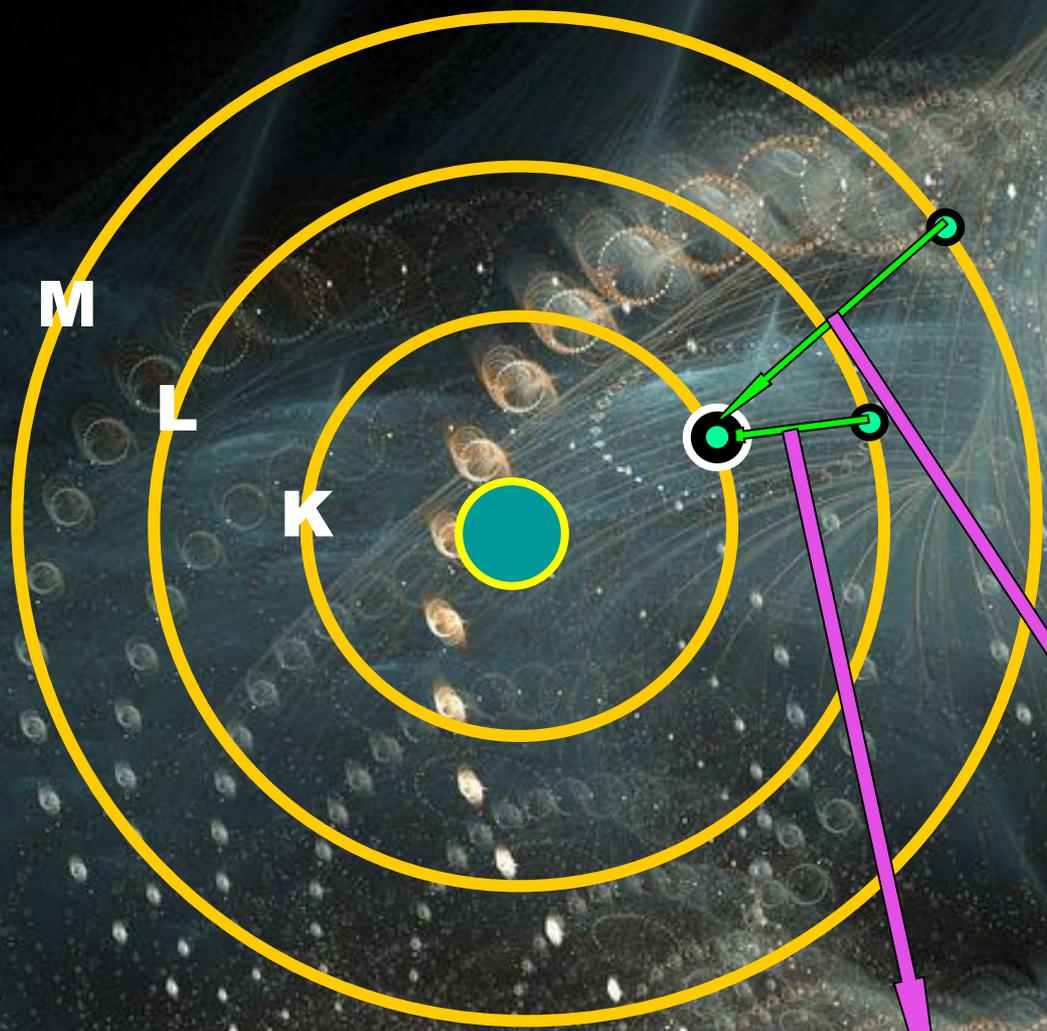
The background is a dark, almost black space filled with intricate, glowing patterns. These patterns consist of numerous small, bright white and blue dots, some of which are arranged in circular or spiral formations. Interspersed among these dots are thin, wispy lines of light in shades of blue and white, creating a sense of movement and depth. The overall effect is reminiscent of a complex particle interaction or a microscopic view of a physical process, such as the production of characteristic X-rays.

能级之差 $\Delta E = h\nu$

h ——普朗克常数

ν ——X射线的频率





M至K能级之差较大

**K β 辐射频率较高，
波长较短，光子能量较高**

**但是由于M至K产生跃迁的
几率较低，所以K β 辐射
强度较低。**

K β 辐射

K α 辐射

X射线的强度 (相对单位)

$K\alpha$

$K\beta$

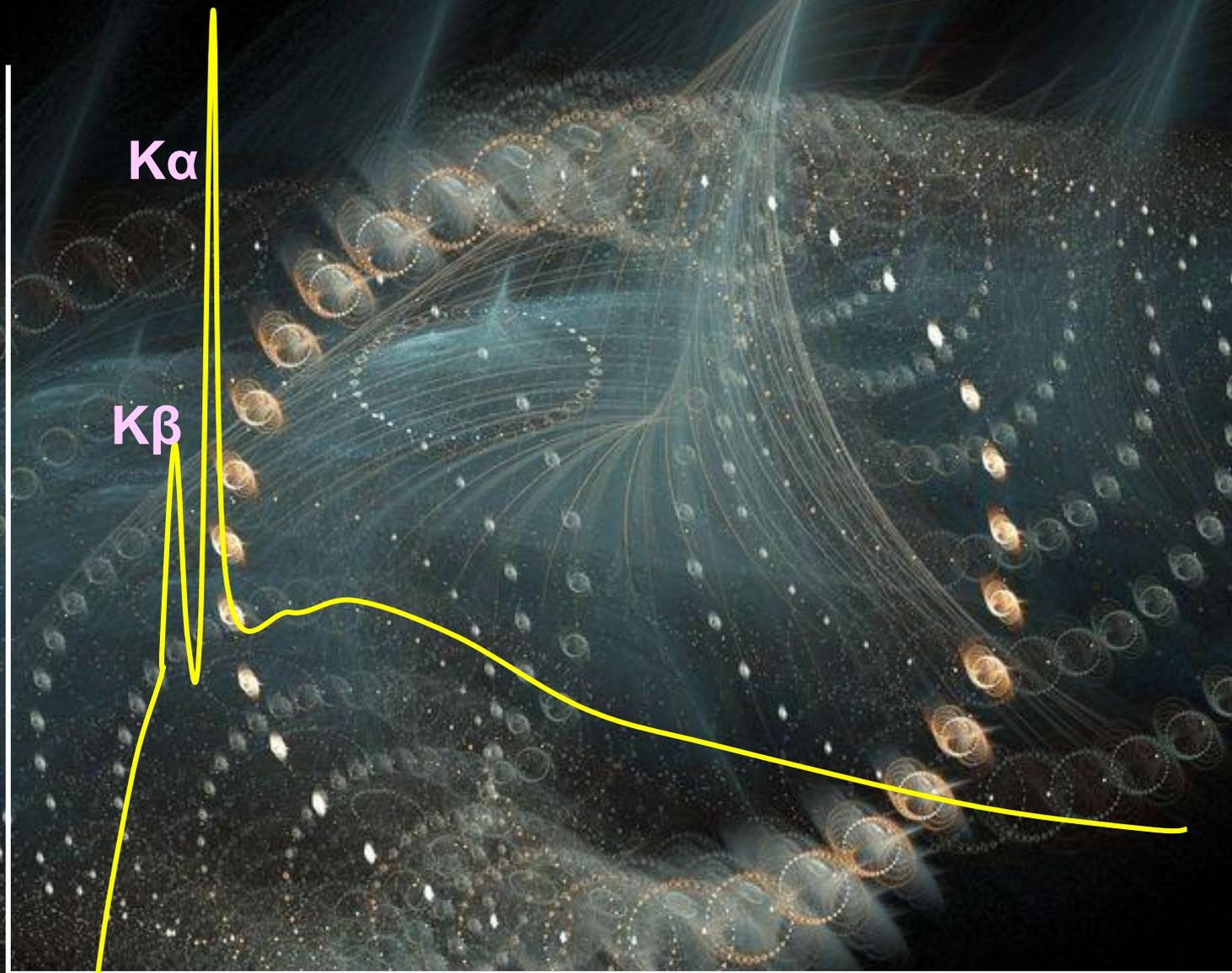
1.0

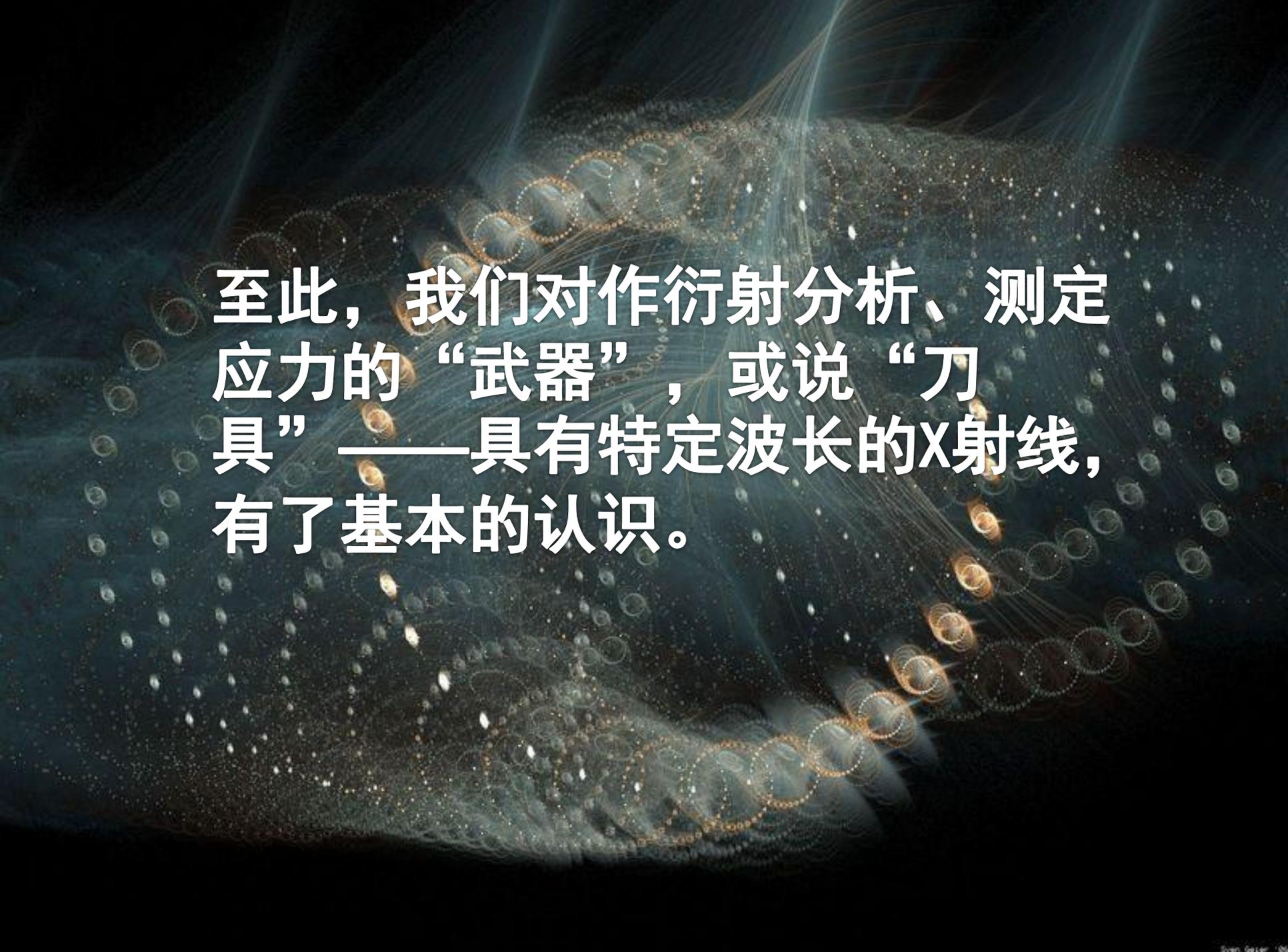
2.0

3.0

4.0

波长 (埃)



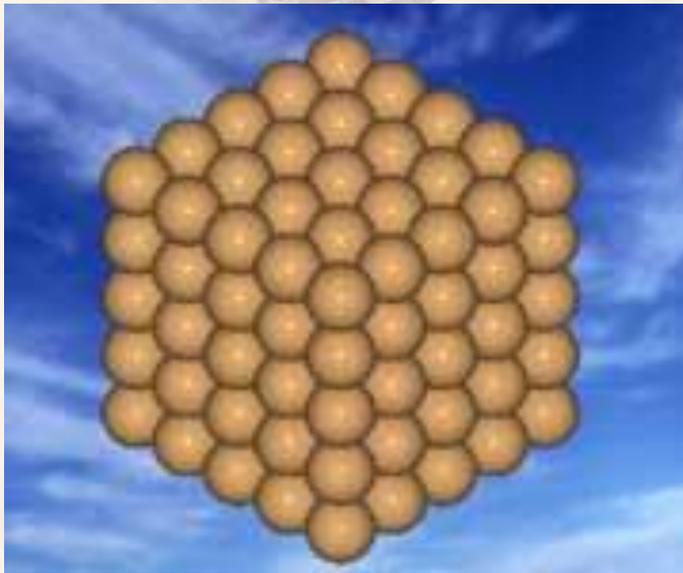
The background is a dark, abstract space filled with glowing particles and light trails. There are numerous small, bright white and yellow dots scattered throughout. Larger, more prominent features include glowing orange and yellow circular patterns that resemble orbits or paths of particles. Faint, wispy lines of light in shades of blue and green are also visible, creating a sense of depth and movement. The overall effect is that of a complex, dynamic system, possibly representing a scientific or technological theme.

至此，我们对作衍射分析、测定应力的“武器”，或说“刀具”——具有特定波长的X射线，有了基本的认识。

简单的晶体学知识

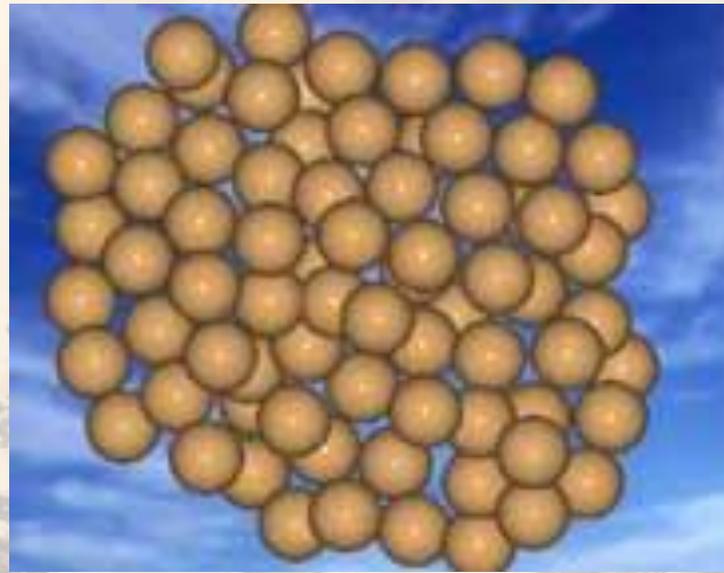
宇宙里的固体物质分为晶体和非晶体。

由分子、原子或离子是按规则排列组成的物体叫做**晶体**。



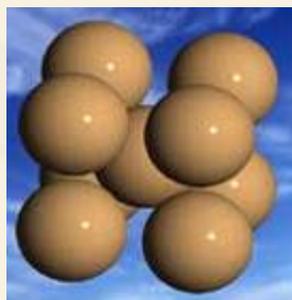
晶体

由分子、原子或离子是无规则排列组成的物体叫做**非晶体**。

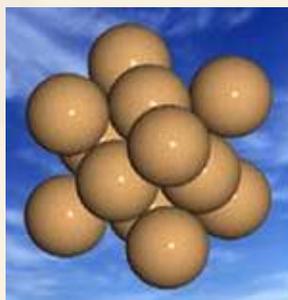


非晶体

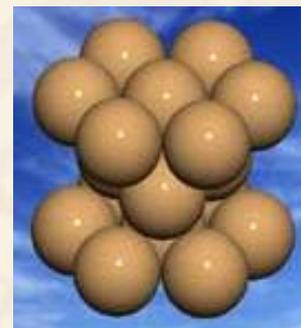
对于晶体，把分子、原子或离子排列的规律抽象出来，就形成了所谓**点阵**。
能代表点阵排列花样和规律的最小单元叫作**晶胞**。



体心立方



面心立方



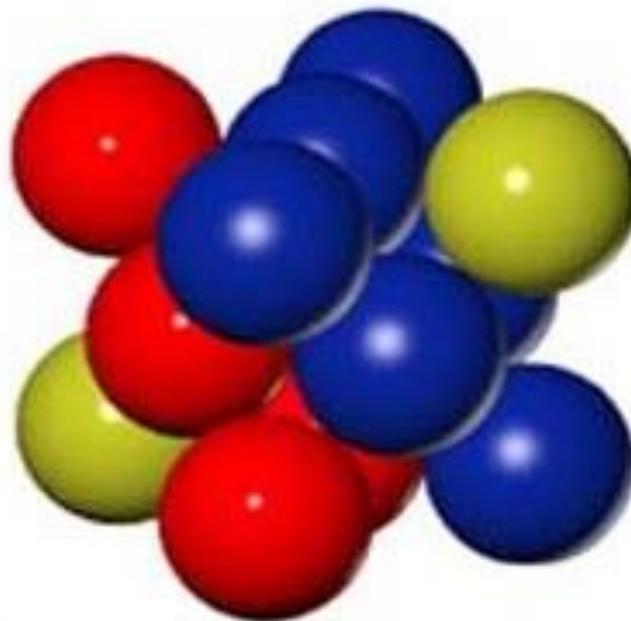
密排六方



体心立方

α -Fe、Mo、W、
V、Cr、 β -Ti

碳原子间隙式融入 α -Fe
的体心立方晶格中形成
的固溶体叫做**铁素体**。



面心立方

γ -Fe、Al、Cu、
Ni、Au、Ag

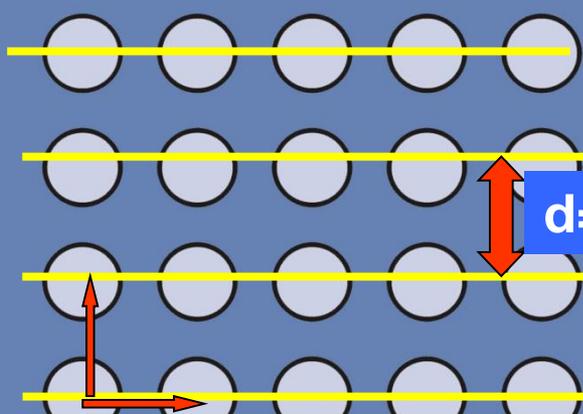
碳原子间隙式融入 γ -Fe
的面心立方晶格中形成
的固溶体叫做**奥氏体**。

密排六方



Mg、Zn、Be、
Co、 α -Ti

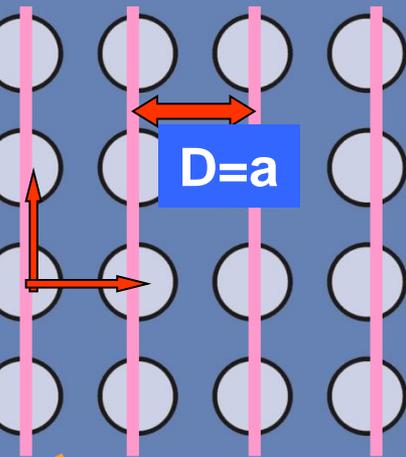
(01)



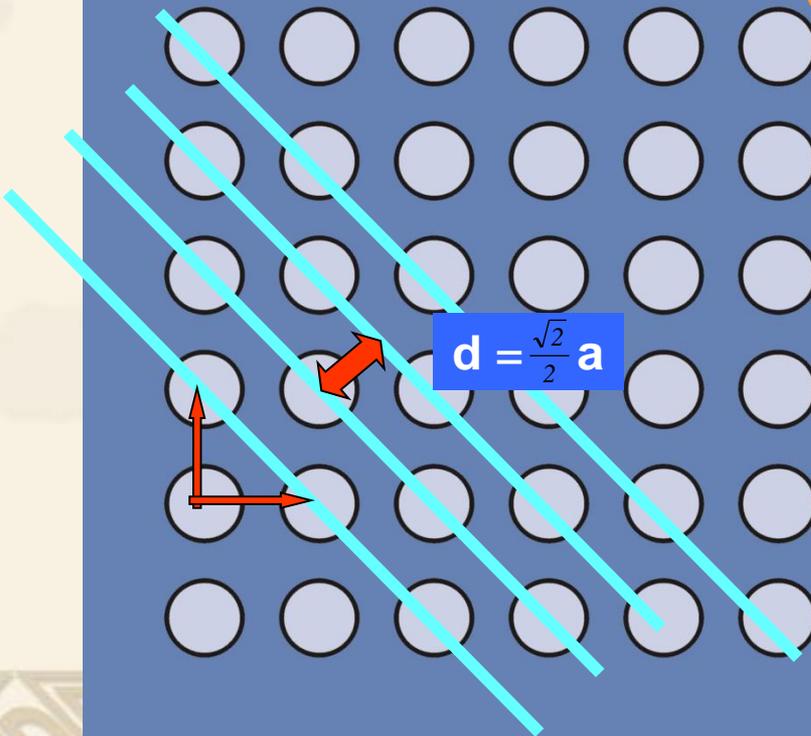
$d=a$

$D=a$

(10)



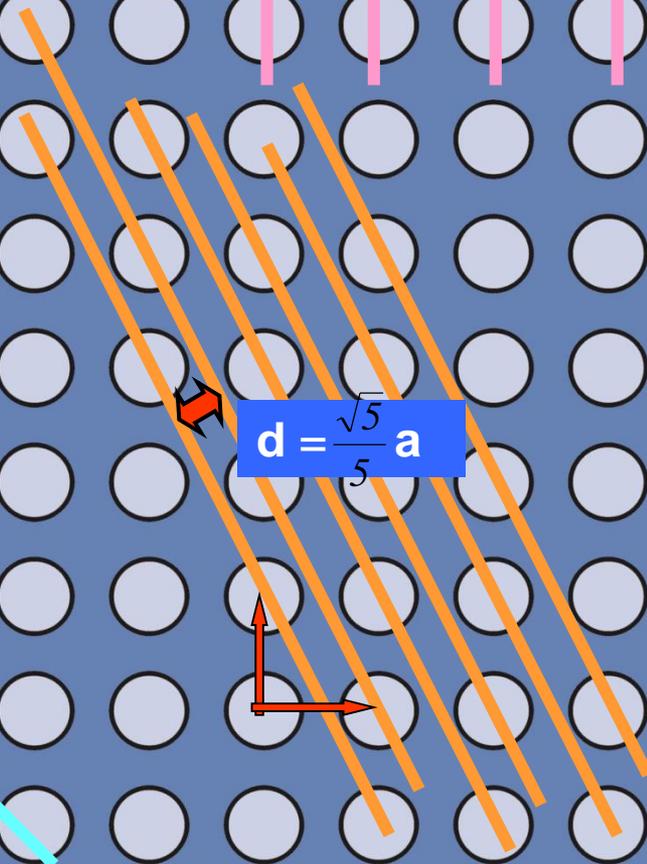
(11)



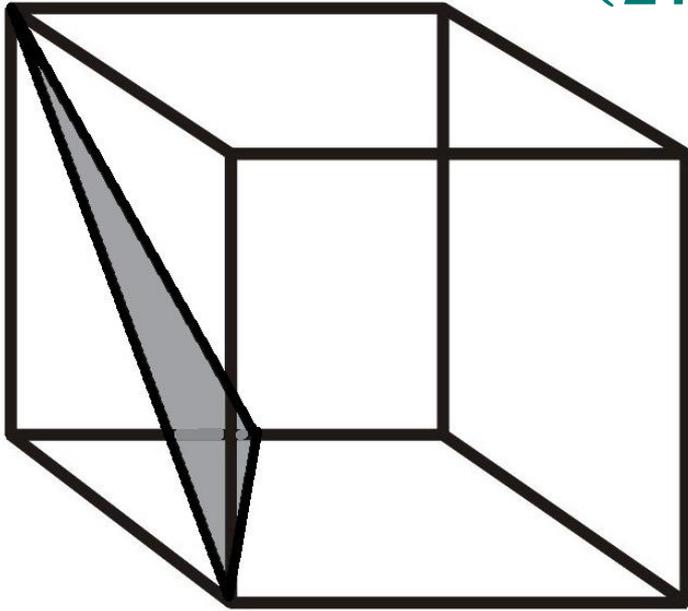
$d = \frac{\sqrt{2}}{2} a$

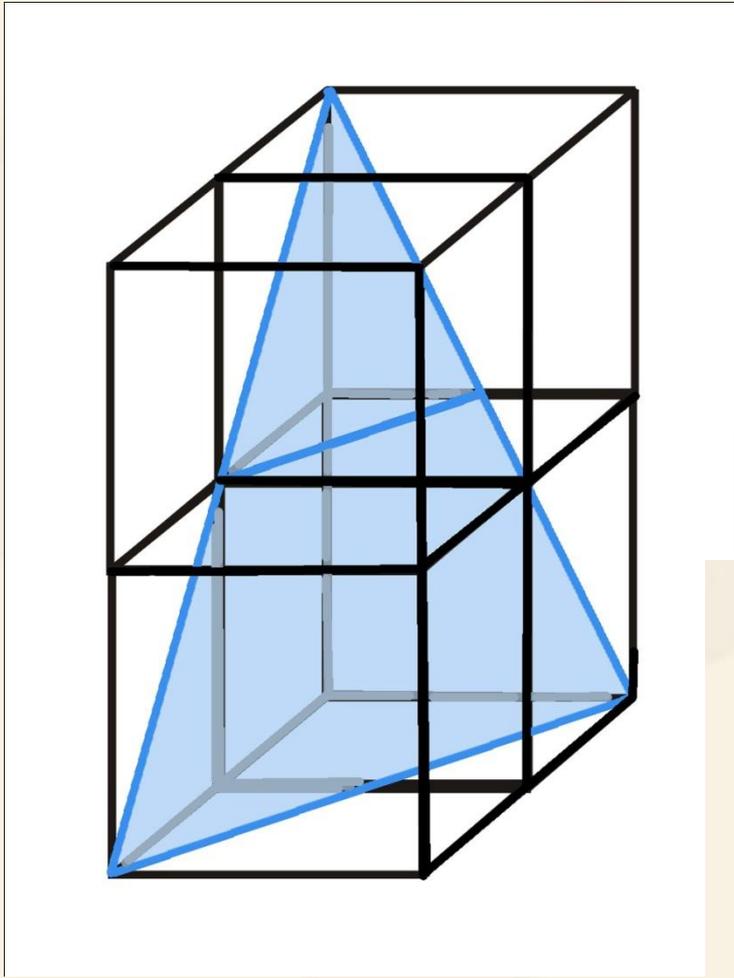
$d = \frac{\sqrt{5}}{5} a$

(21)



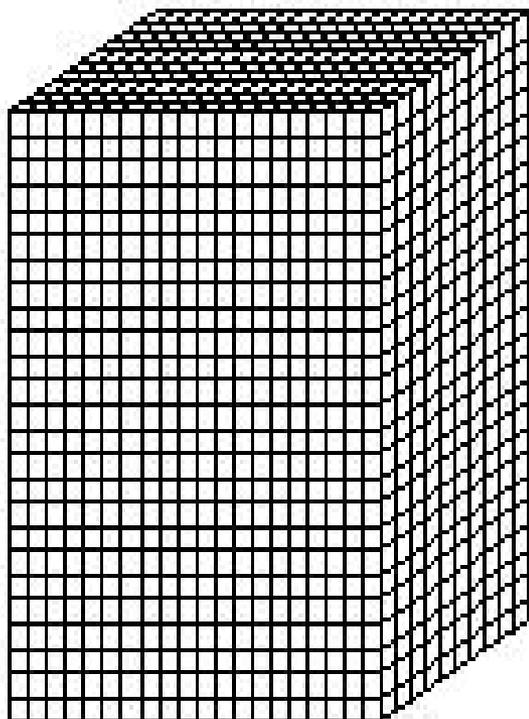
(211)





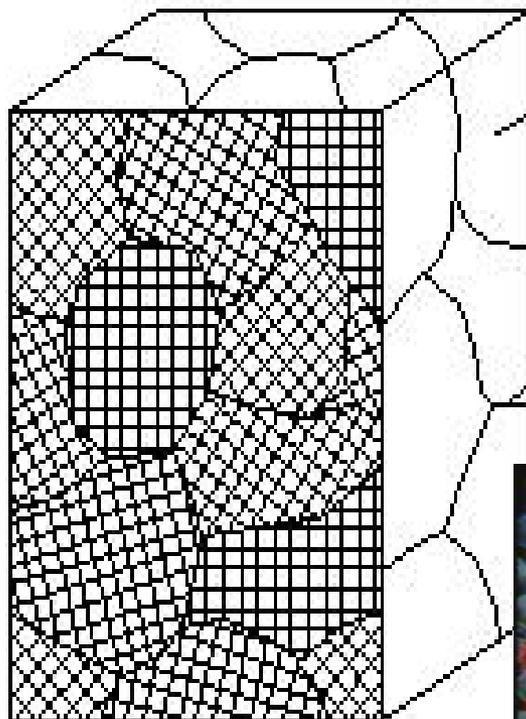
(211)

- ❖ 在晶体点阵当中，由节点构成的、相互平行、间距相等的平面组叫做晶面。
- ❖ 晶面指数描述了所指晶面在点阵中的取向。
- ❖ 晶面指数越小 [例如 (100) (111) 等]，则晶面间距越大，晶面上的节点密度越高，对x射线的反射能力越强。
- ❖ 晶面指数越大 [例如 (211) (311) (331) 等]，则晶面间距越小，晶面上的节点密度越低，对x射线的反射能力越弱。



单晶体

由分子、原子、离子按照一定的点阵花样，在三维空间里连续排列，不改变结晶学方向，直至形成一个物体，这物体叫做**单晶体**。

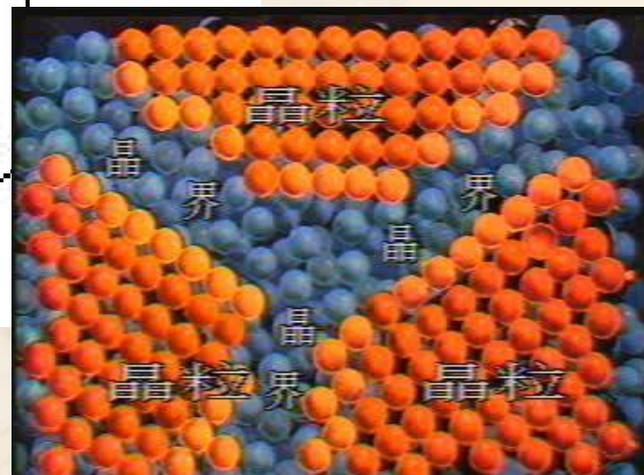


多晶体

如果形成的单晶体非常细小，而同时生成许多小单晶，那么由这许许多多小单晶构成的物体叫做**多晶体**。

晶粒

晶界



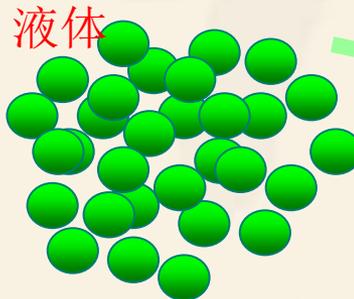
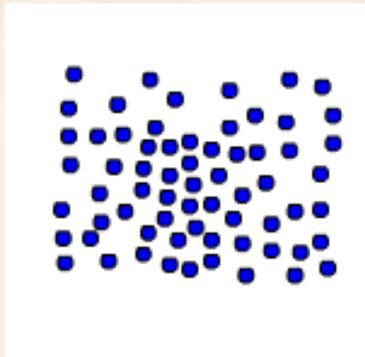
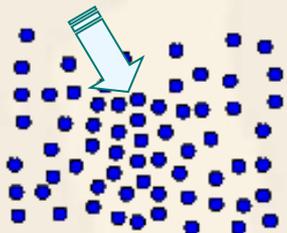
构成多晶体的小单晶叫做**晶粒**。各个晶粒的结晶学方向通常是不相同的。

结晶过程

结晶的一般过程为：

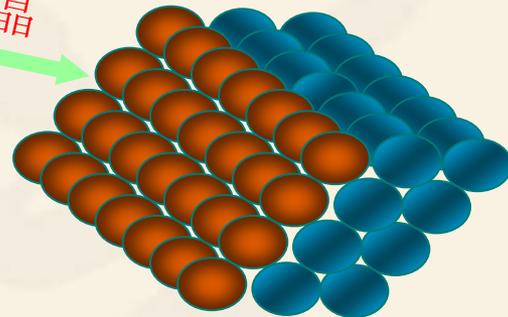


近程有序



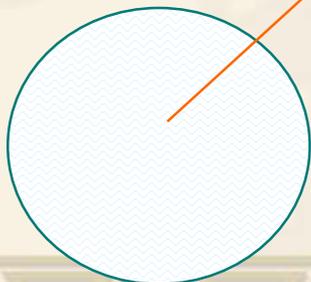
结晶

晶体

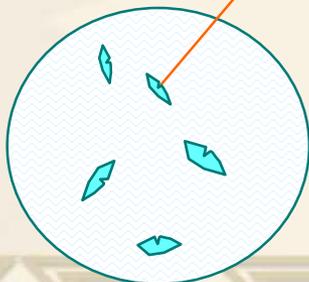


液态金属在接近相变温度的时候，在一定的过冷度的条件下，由于成分起伏、温度起伏，近程有序会固定下来，或者难熔杂质质点的存在等因素，形成**晶胚**；进一步长大形成**晶核**。会形成“**近程有序**”的排列。

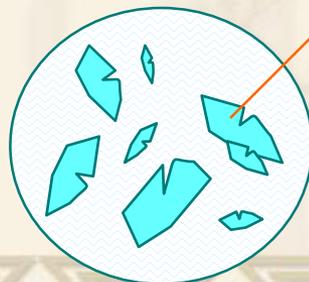
液态金属



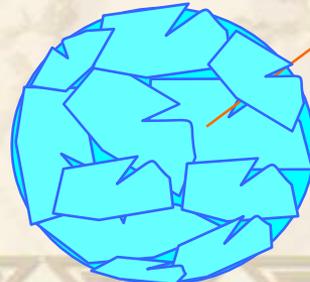
形核

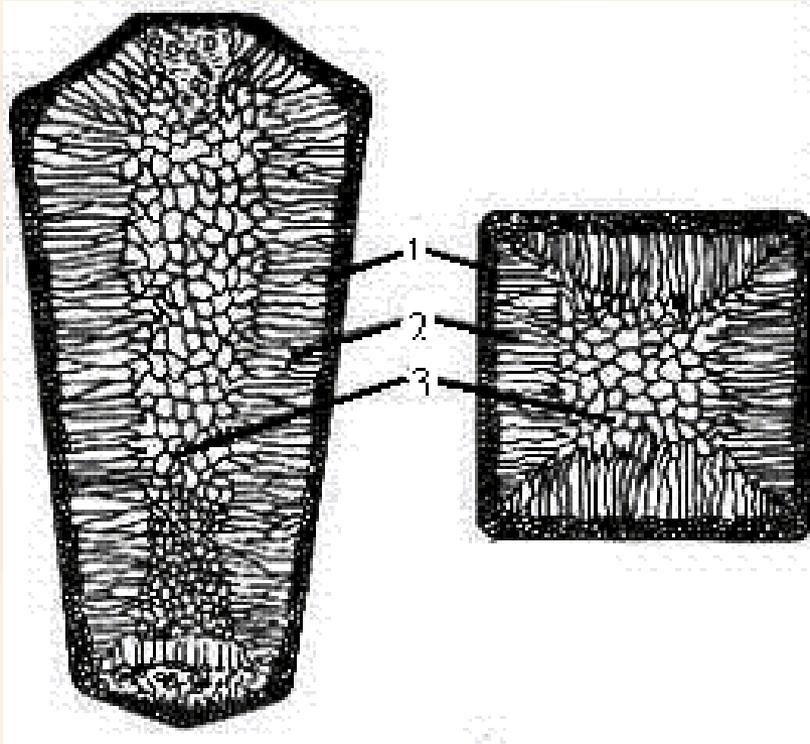


晶核长大



完全结晶





- 1——表面细晶粒层（激冷层）
- 2——柱状晶粒层
- 3——中心等轴晶粒

常见金属材料都是多晶体。

冶炼好的金属材料大多有一个从液态到固态的结晶过程。结晶需要一系列动力学条件。有了一定的过冷度，首先形成许多晶核。每个晶核长成一个小单晶，亦即一个晶粒，于是凝固成多晶体。

对于多晶体，如果各个晶粒的结晶学方向是充分紊乱的，那就是无织构材料。

如果各个晶粒的结晶学方向不是充分紊乱，而是由某种择优取向，这种现象就叫做**织构**。

布拉格公式

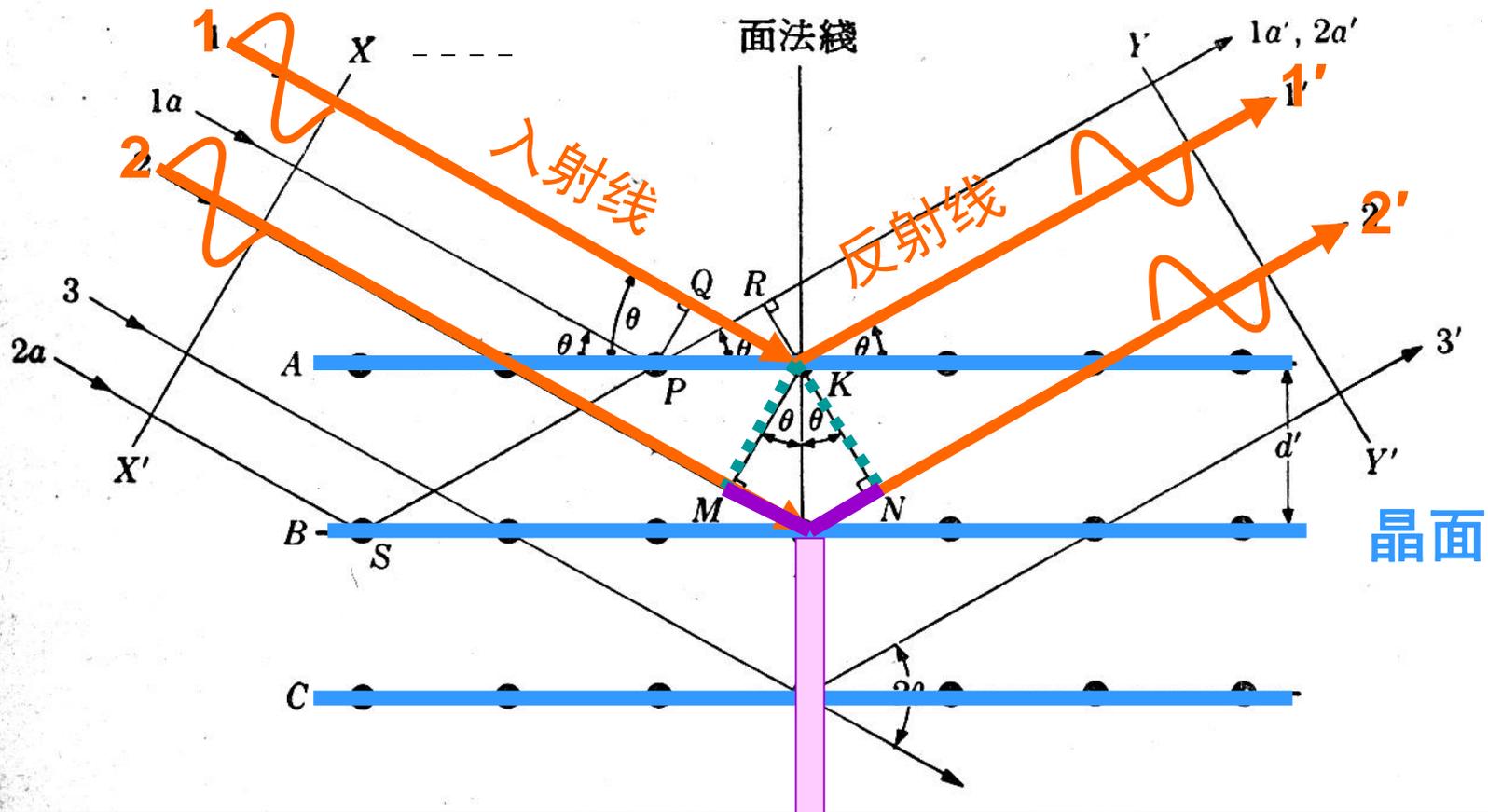
的推导

京娘湖

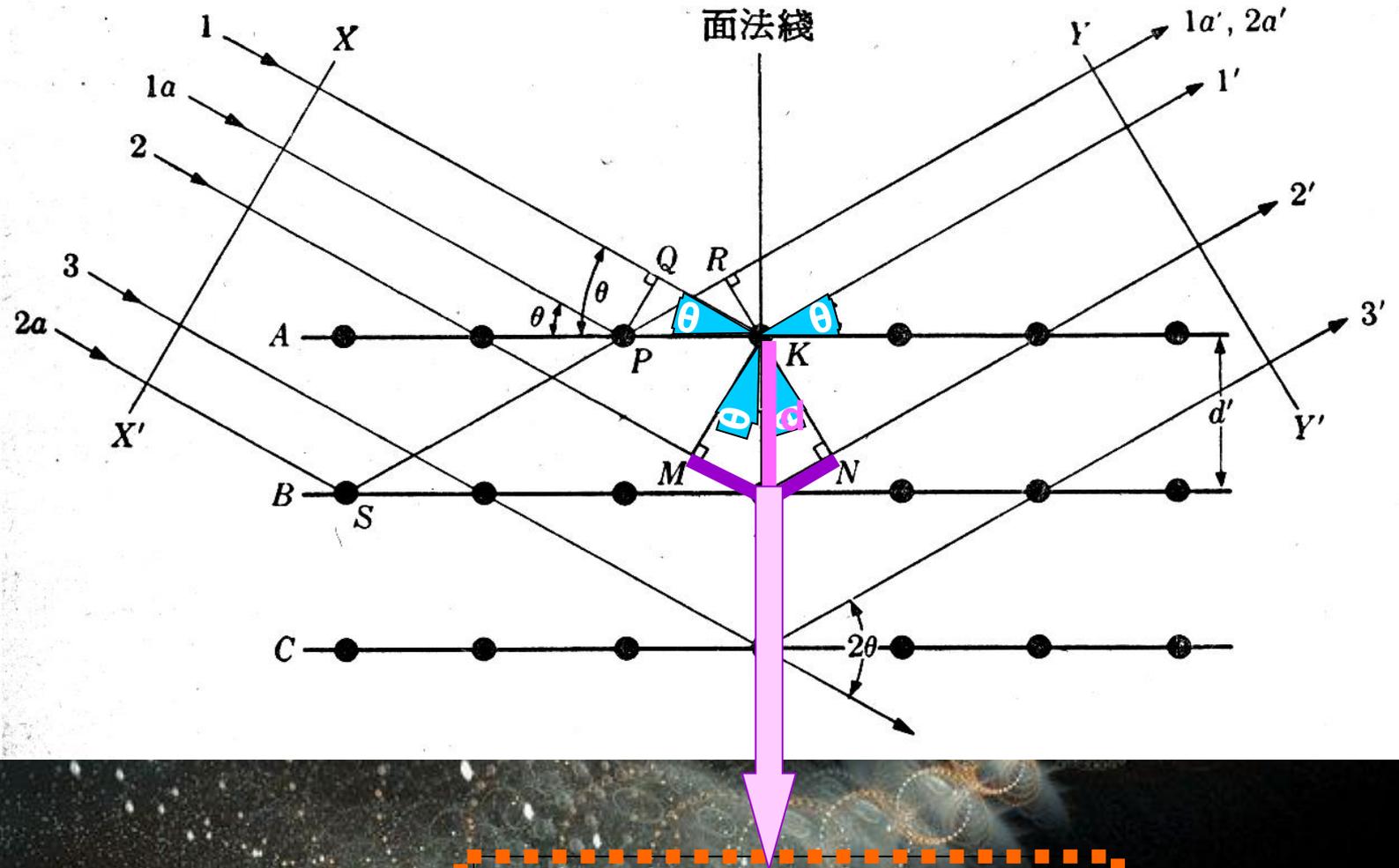
碧波干涉图







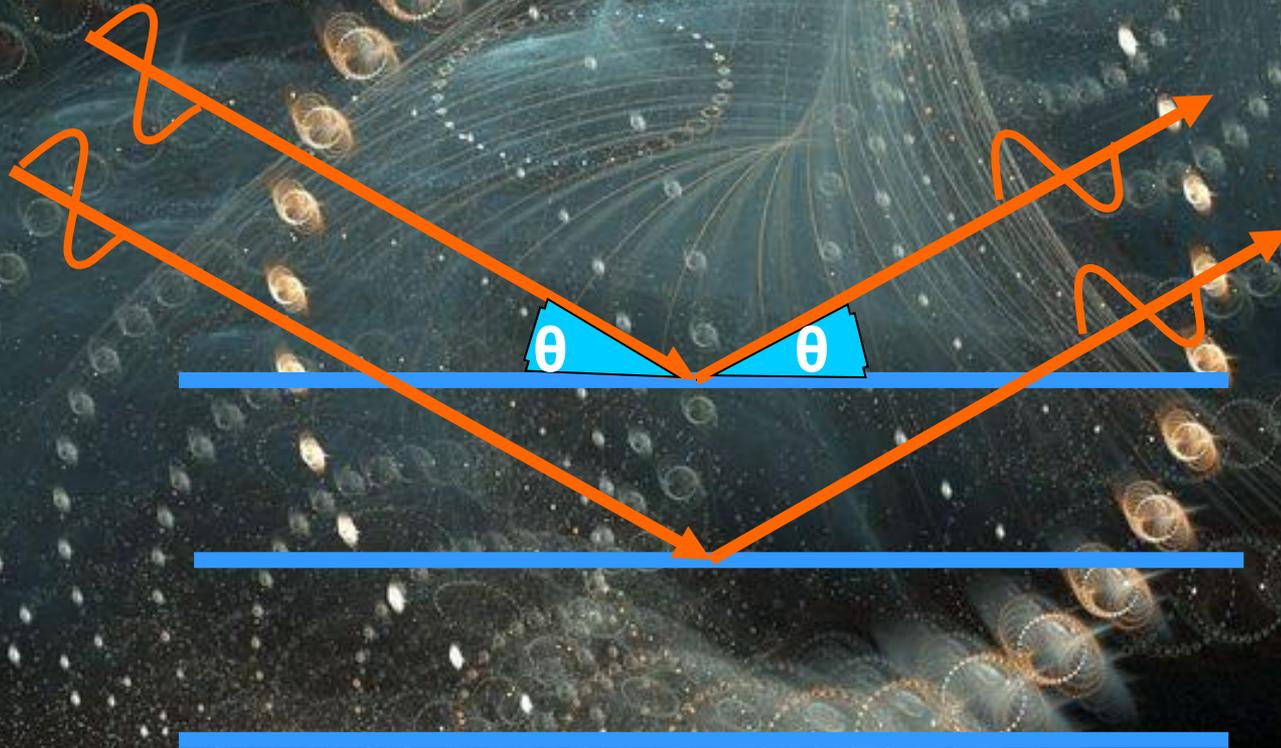
光程差 δ



光程差 $\delta = 2d \sin\theta$

$$2d \sin\theta = n\lambda$$

布拉格定律



衍射几何关系

与入射线和反射线的角平分线重合



θ 角是入射线、反射线与晶面的夹角，因为晶面是微观的，所以 θ 角不可观察。但是 2θ 角却是容易观察到的，它就是入射线延长线与反射线之夹角。

一个倾斜的平面

X射线管

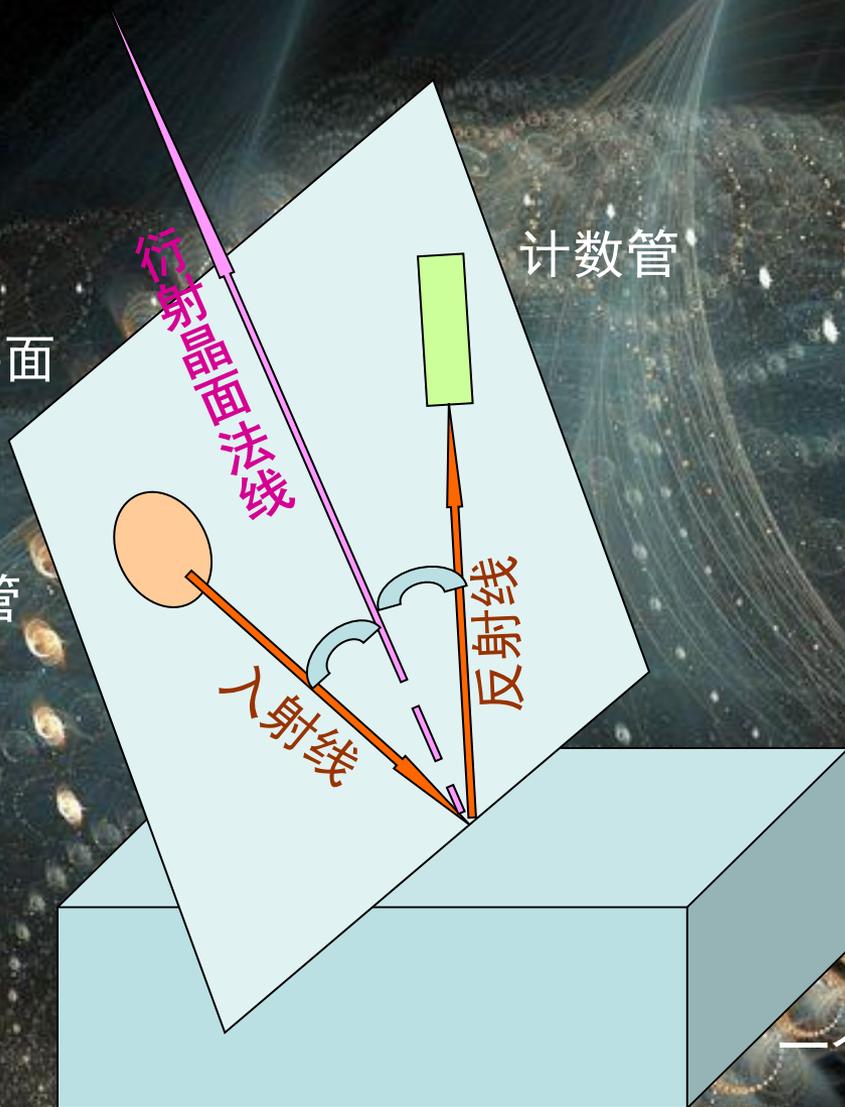
衍射晶面法线

入射线

反射线

计数管

一个实际工件



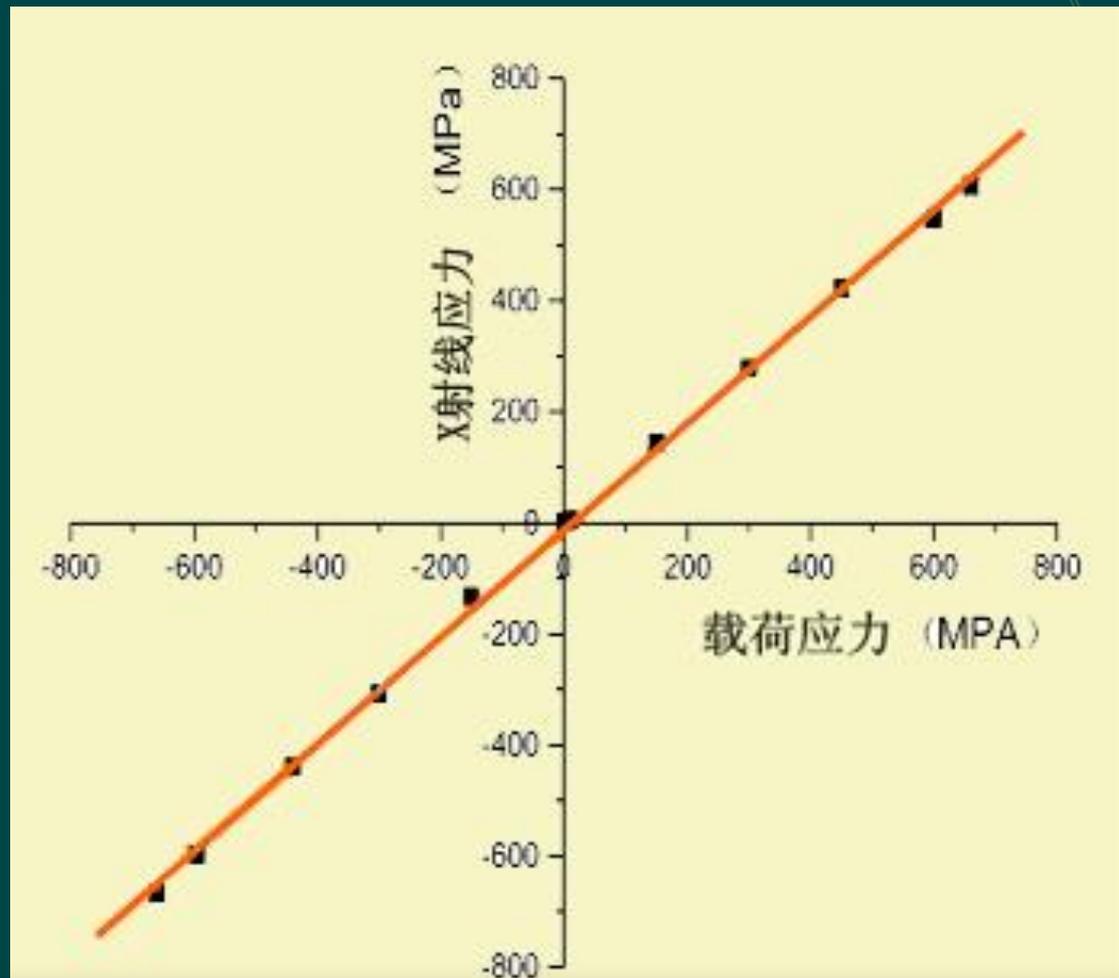
X射线衍射法的特点





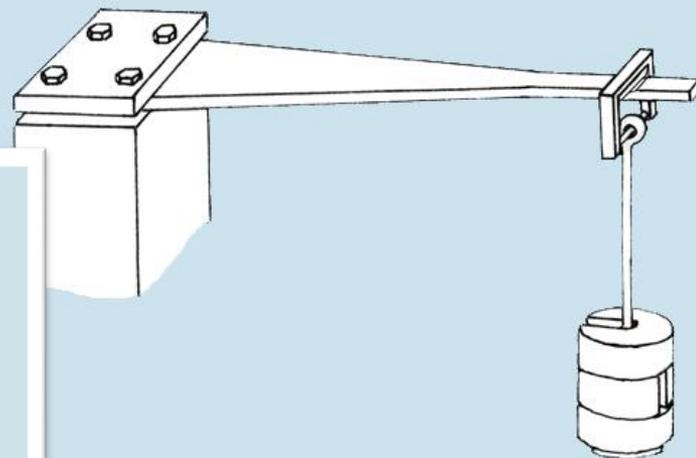
- ◆ 由测量原理可知，X射线衍射法通过测定材料中晶面间距的应变来计算应力，因而从根本上讲是可靠的。在构件承载的情况下，测得的是载荷应力与残余应力之代数和。测定等强度梁在不同载荷下的应力，可以看到X射线应力与载荷应力有很好的 consistency，令人信服地表明X射线衍射法的准确与可靠。

四点弯曲加载 X射线应力测定

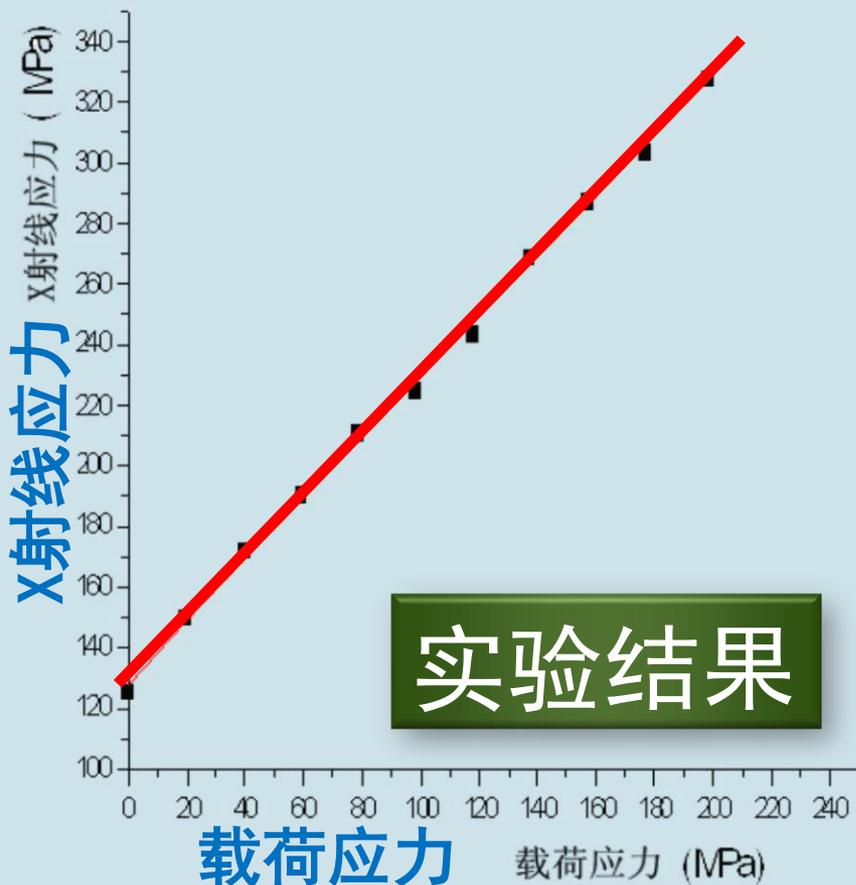


2008年11月15日水利部水工金属结构质检中心与爱斯特研究所联合进行试验，对一个退火钢试样加载，同时用电阻应变仪和X射线应力测定仪测试，证明X射线应力与载荷应力有很好的—致性。

等强度梁实验



加载装置



$$\sigma_P = \frac{6L}{B_0 H^2} P$$

- 
- ◆ 以无接触的方式测定应力，所以是无损的测试方法，这对于实际工件是最可宝贵的特点之一。
 - ◆ 因所使用的X射线有效穿透深度的限制，本方法测得的是试样表层几微米到几十微米深度内的加权平均应力。利用这个特点，借助于适当的手段(如电解抛光、化学抛光)对试样进行剥层，并逐层测试应力，便可测得应力沿层深的分布。正因为每次的测试深度比较小，才能比较客观地反映每一层的应力，才能在沿层深的分布中找到接近真实的应力极值。

- ◆ 测试点的大小(即X射线照射面积)可以很小, 这样便于测定应力在表面各处的分布。X射线照射面积一般可以在 $5 \times 10 \text{ mm}$ 到 $2 \times 2 \text{ mm}$ 之间选择。如需更小, 则只须适当改变测量条件; 即便照射面直径小到 $\varphi 1 \text{ mm}$ 仍可达到足够的测量精度。
- ◆ 对于复相材料(例如铁素体或马氏体与奥氏体双相钢), 在某些情况下可以分别测定各相的应力。

X射线衍射应力分析的 $\sin^2\Psi$ 法

1961年德国学者马赫劳赫提出

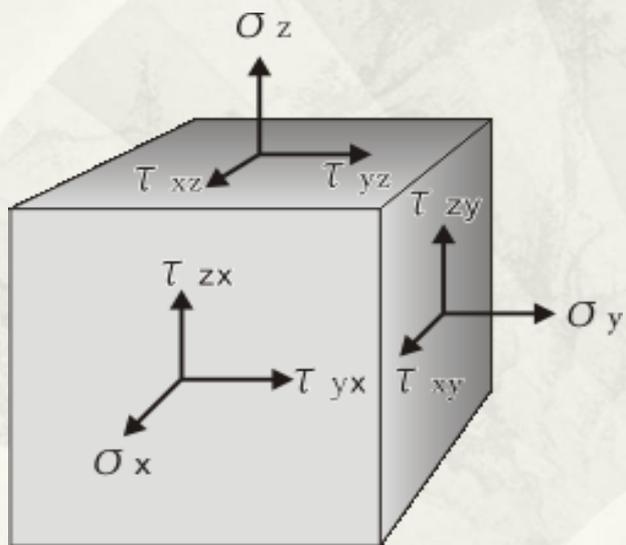
俄国学者阿克先诺夫1929年提出：把材料的宏观应变看成是晶格应变的结果。依据弹性力学可以建立应力与应变的关系式；晶格应变可以通过X射线衍射分析；这样就可以推导出应力 σ 和衍射角 2θ 的确定关系。

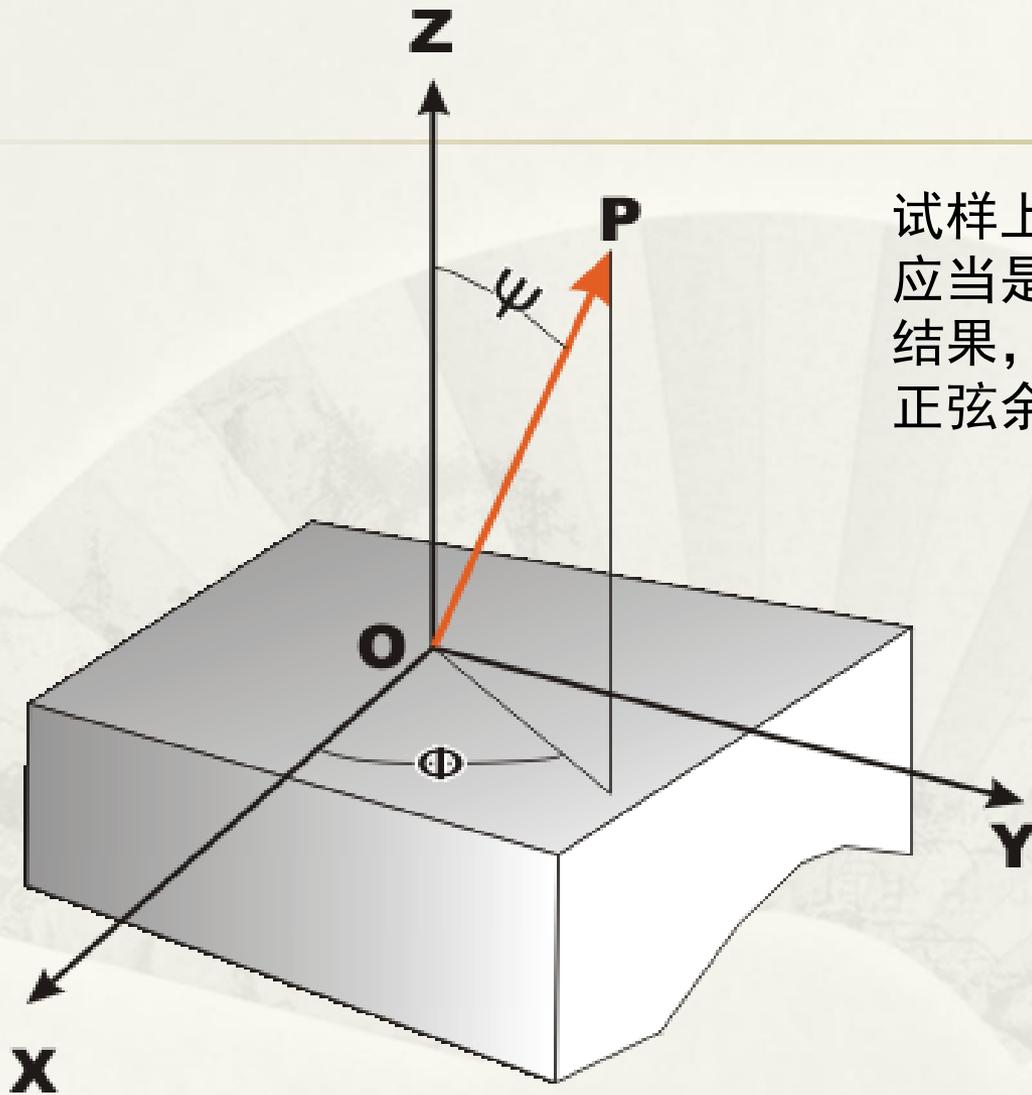
胡克定律： σ —— ε

阿克先诺夫： ε —— ε^J

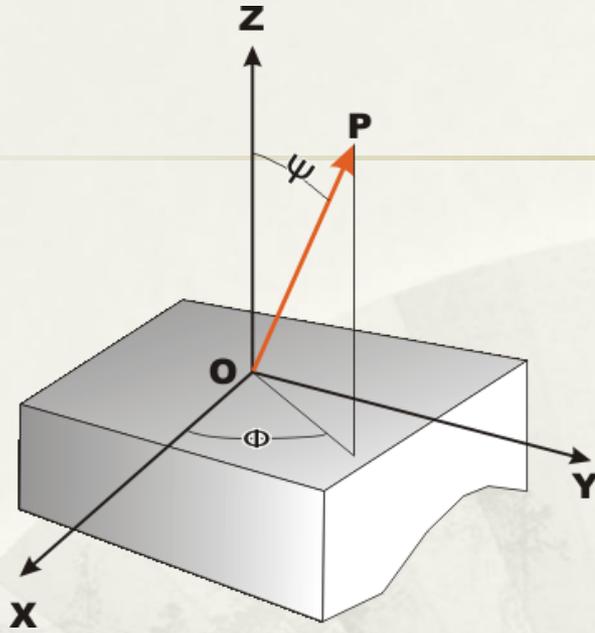
布拉格定律： 2θ —— d —— $\Delta d / d$ —— ε^J

根据力学基础知识，为了描述材料中某一个点的受力状况，在正交坐标系中，把这个点看成一个小的立方体，用它的六个面上的正应力和切应力，构成一个应力张量。





试样上O点在OP方向上的应变应当是该点应力张量作用的结果，且与图中 ϕ 角 ψ 角的正弦余弦相关。



根据广义胡克定律，可推导出OP方向的宏观应变 $\varepsilon_{\Phi\Psi}$ 与各应力分量及 Φ 角 Ψ 角的关系：

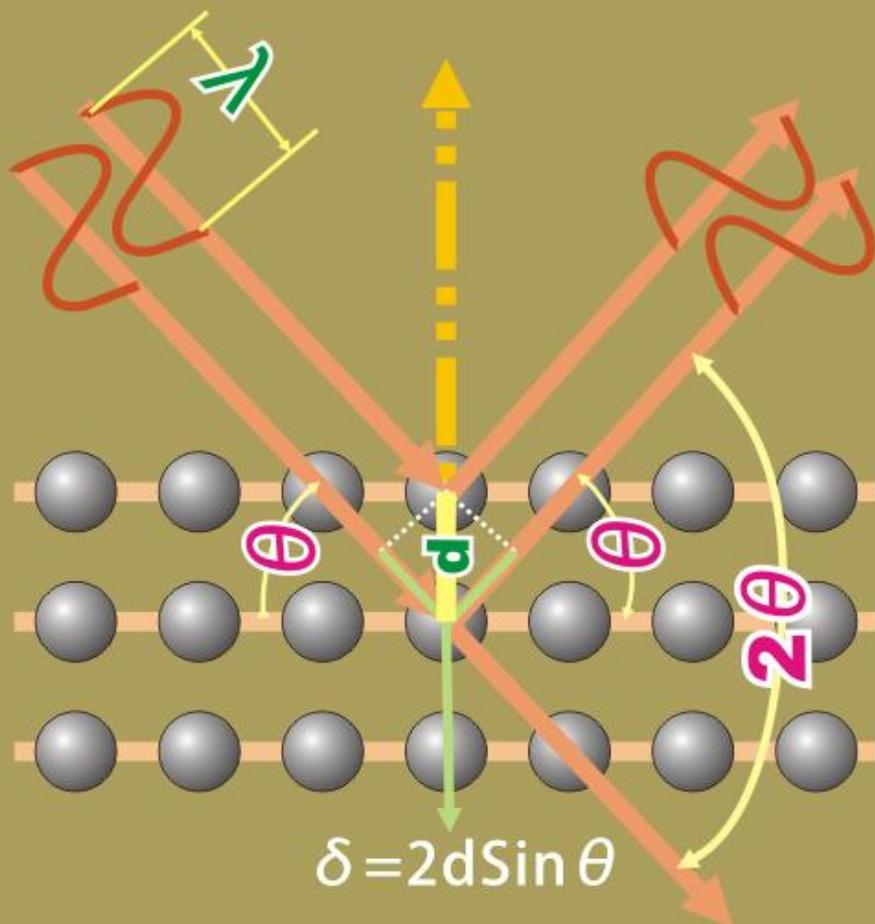
$$\begin{aligned} \varepsilon_{\Phi\Psi} = & [(1+\nu)/E](\sigma_x \cos^2 \Phi + \tau_{xy} \sin 2\Phi + \sigma_y \sin^2 \Phi - \sigma_z) \sin^2 \Psi + \\ & [(1+\nu)/E](\tau_{xz} \cos \Phi + \tau_{yz} \sin \Phi) \sin 2\Psi + [(1+\nu)/E]\sigma_z \\ & - (\nu/E)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \end{aligned}$$

一般情况下，材料的自由表面应该是平面应力状态，垂直于表面的的应力为零，即 $\sigma_z = \tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$ 。所以上式可以改写为

$$\varepsilon_{\Phi\Psi} = [(1+\nu)/E](\sigma_x \cos^2 \Phi + \tau_{xy} \sin 2\Phi + \sigma_y \sin^2 \Phi) \sin^2 \Psi - (\nu/E)(\sigma_x + \sigma_y)$$

这是材料表面宏观应变 $\varepsilon_{\Phi\Psi}$ 与各应力分量及 Φ 角 Ψ 角的关系。

$$2d \sin \theta = n \lambda$$



布拉格定律

$$2d \sin\theta = n\lambda \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

布拉格定律把宏观上可以测量的衍射角 2θ 与微观的晶面间距 d 建立起确定的关系。当材料中有应力 σ 存在时，其晶面间距 d 必然随晶面与应力相对取向的不同而有所变化，按照布拉格定律，衍射角 2θ 也会相应改变。

对布拉格公式进行微分

$$\varepsilon_{\phi\psi} = (d_{\phi\psi} - d_0) / d_0 = -(1/2)(\pi/180^\circ) \cot\theta_0 (2\theta_{\phi\psi} - 2\theta_0)$$

这就是晶面间距相对变化即晶格应变 $\varepsilon_{\phi\psi}$ 的表达式，它是利用衍射角 2θ 的相对变化来描述的。

根据 А к с е н о в 的晶格应变与宏观应变一致的基本思想，可得

$$\left[\frac{(1+\nu)}{E} \right] \left(\sigma_x \cos^2 \Phi + \tau_{xy} \sin 2\Phi + \sigma_y \sin^2 \Phi \right) \sin^2 \Psi - \left(\nu / E \right) \left(\sigma_x + \sigma_y \right) = - \left(1/2 \right) \left(\pi / 180^\circ \right) \cot \theta_0 \left(2\theta_{\Phi\Psi} - 2\theta_0 \right)$$

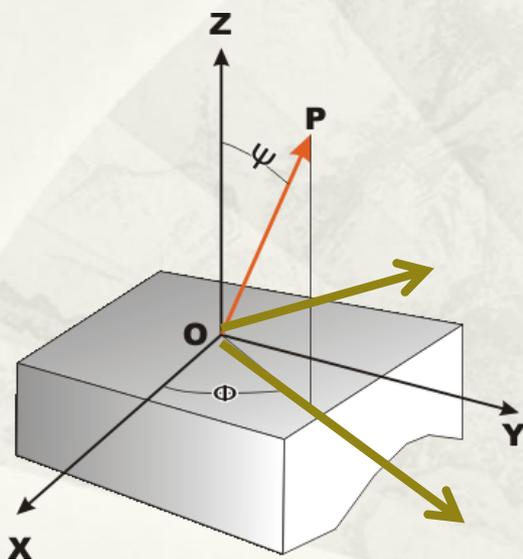
可见，等式左端包含应力分量，右端包含衍射分析得到的衍射角 2θ 。

为了简化计算，我们不妨暂且以 OZ 为轴，转动 X 轴和 Y 轴，使 Φ 为 0 ，简化上式。然后对 $\sin^2 \Psi$ 求偏导，整理后可以得出著名的 $\sin^2 \Psi$ 法应力公式：

$$\sigma_\phi = K \frac{\partial 2\theta_\psi}{\partial \sin^2 \Psi}$$

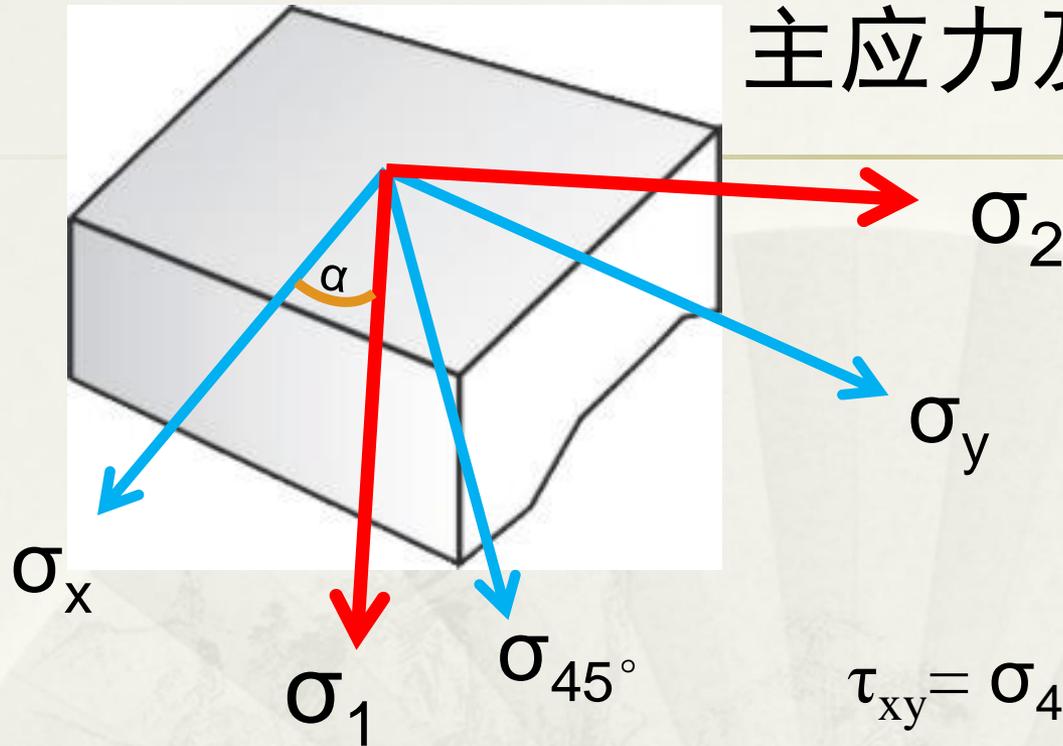
式中 K 为应力常数

$$K = - \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{\pi}{180^\circ} \cot \theta_0$$



至此，我们得到了试样表面指定点（o）指定方向（平径角 Φ 所确定的方向）的应力。

主应力及其方向的测定



$$\tau_{xy} = \sigma_{45^\circ} - (\sigma_x + \sigma_y) / 2$$

$$\sigma_1 = (\sigma_x + \sigma_y) / 2 + \sqrt{[(\sigma_x - \sigma_y) / 2]^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_2 = (\sigma_x + \sigma_y) / 2 - \sqrt{[(\sigma_x - \sigma_y) / 2]^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\alpha = \arctan[(\sigma_1 - \sigma_x) / \tau_{xy}]$$

X 射线应力测定原理

图解

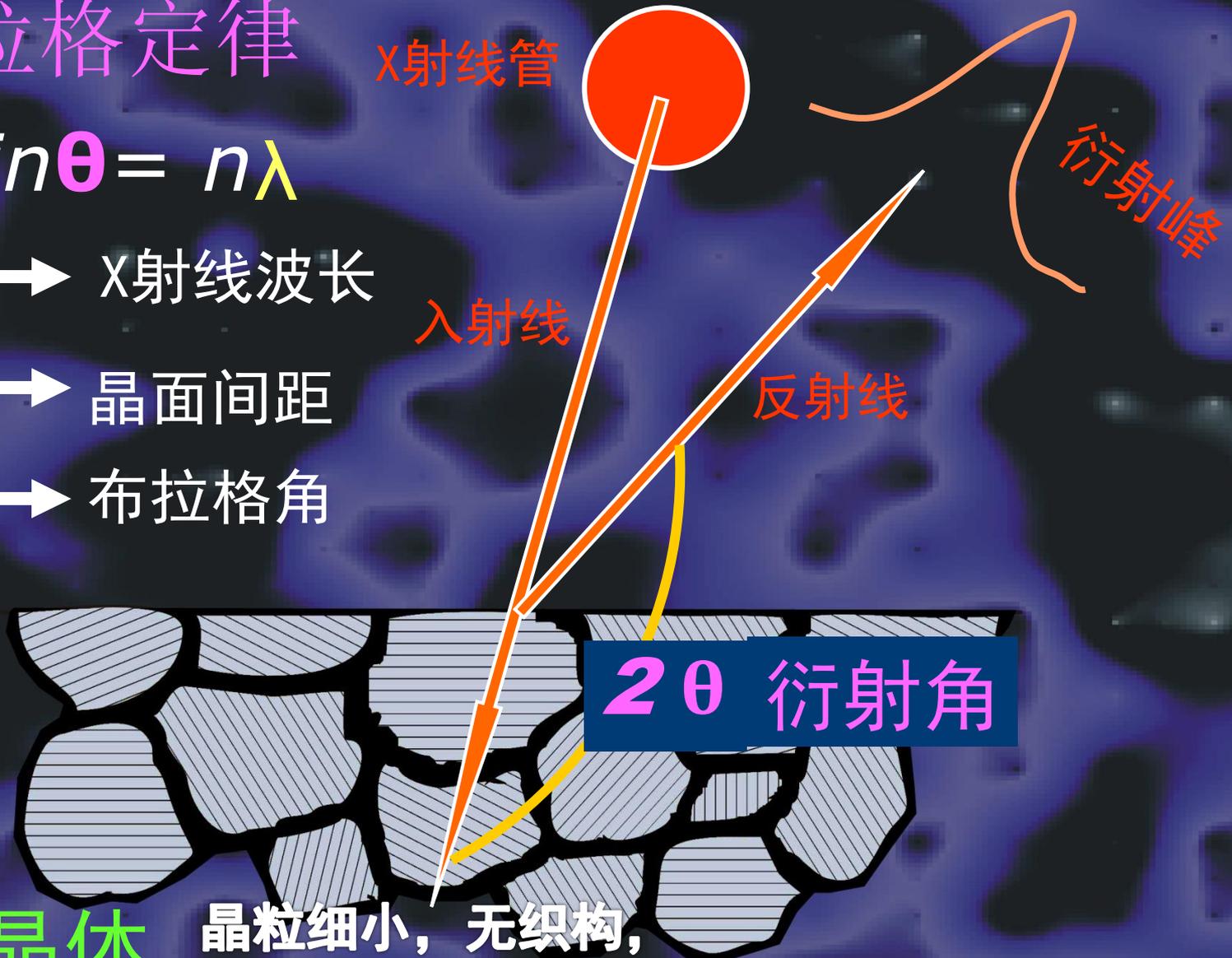
布拉格定律

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

λ → X射线波长

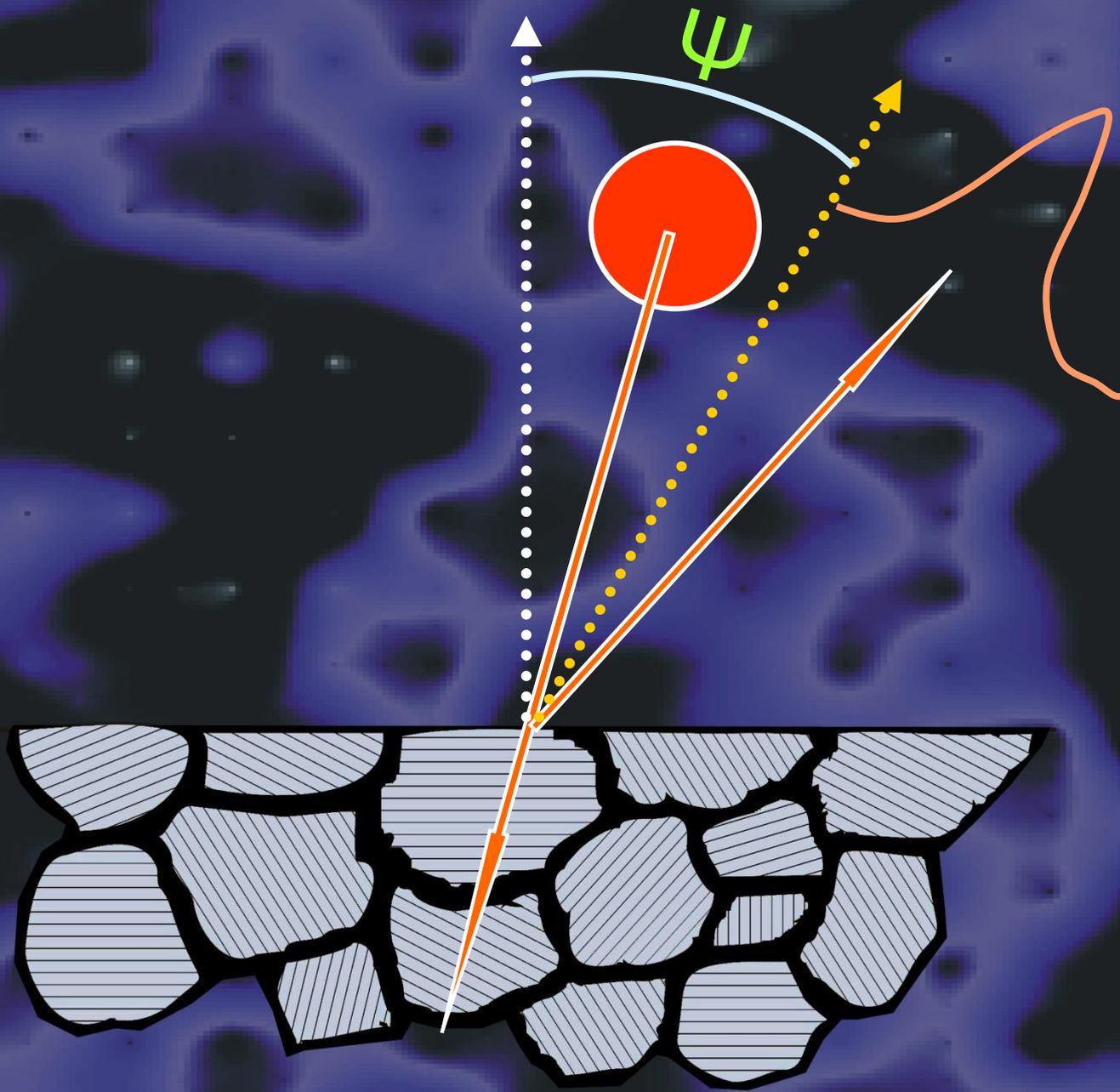
d → 晶面间距

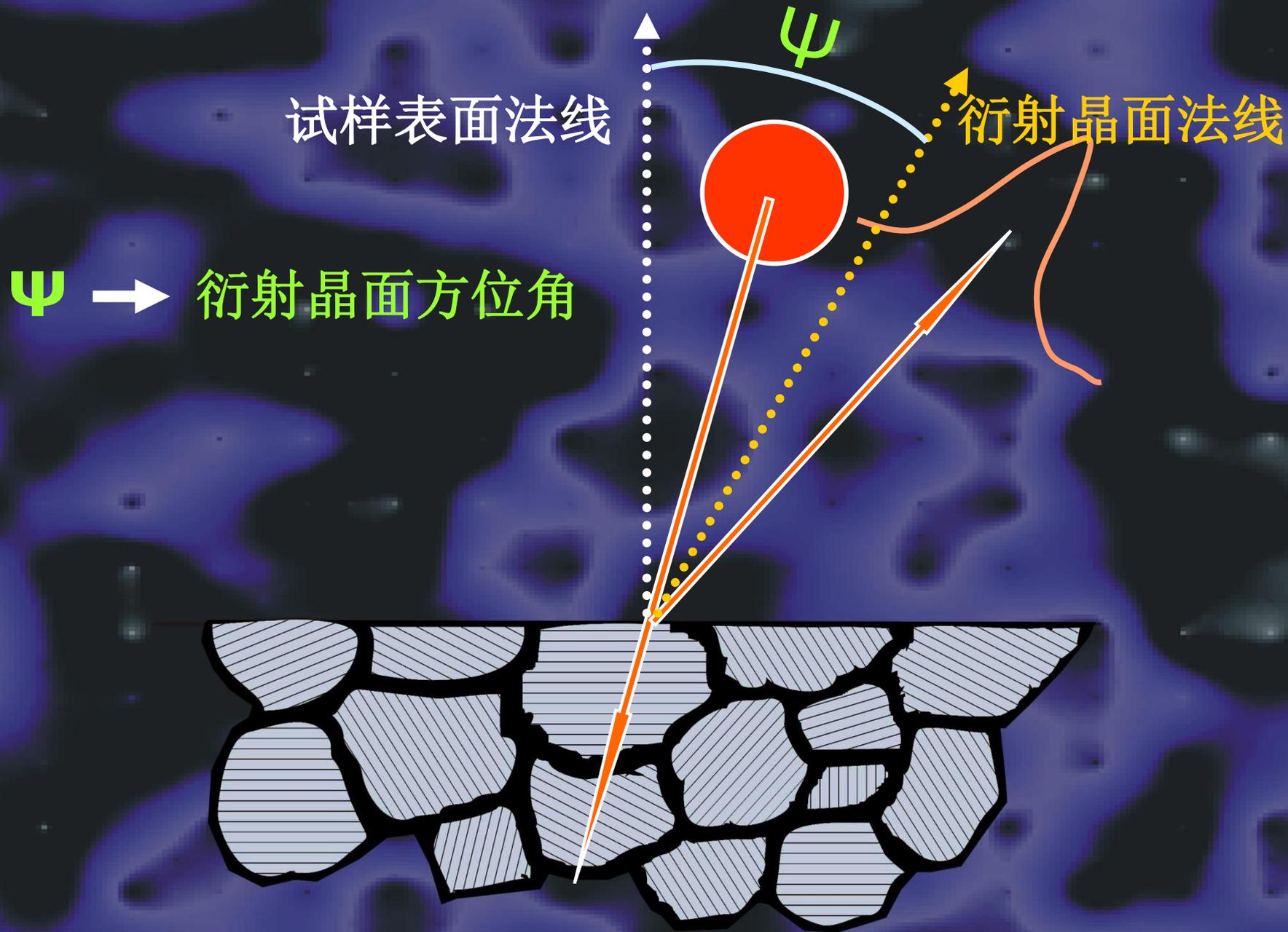
θ → 布拉格角



多晶体

晶粒细小，无织构，在一束X射线的照射范围内有许许多多晶粒。





在无应力状态下

在各个晶粒当中

所选 (hkl) 晶面间距 d 均相等



多晶体

无应力状态

在无应力状态下

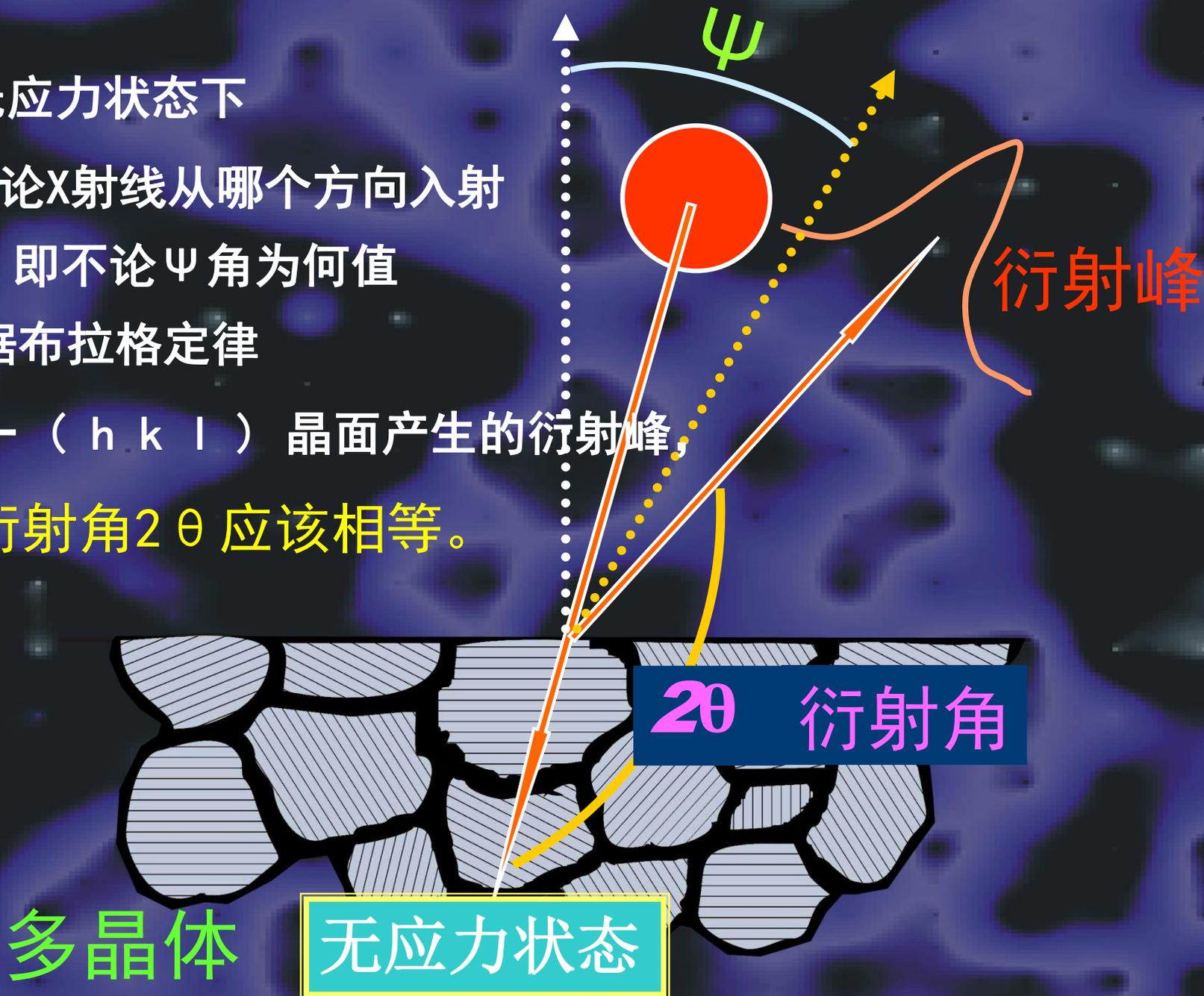
不论X射线从哪个方向入射

即不论 ψ 角为何值

根据布拉格定律

同一 (hkl) 晶面产生的衍射峰，

其衍射角 2θ 应该相等。



同一组 $(h\ k\ l)$ 晶面，在各个晶粒当中，不论处于什么方位，其晶面间距是相等的。



多晶体

无应力状态



多晶体

拉应力状态

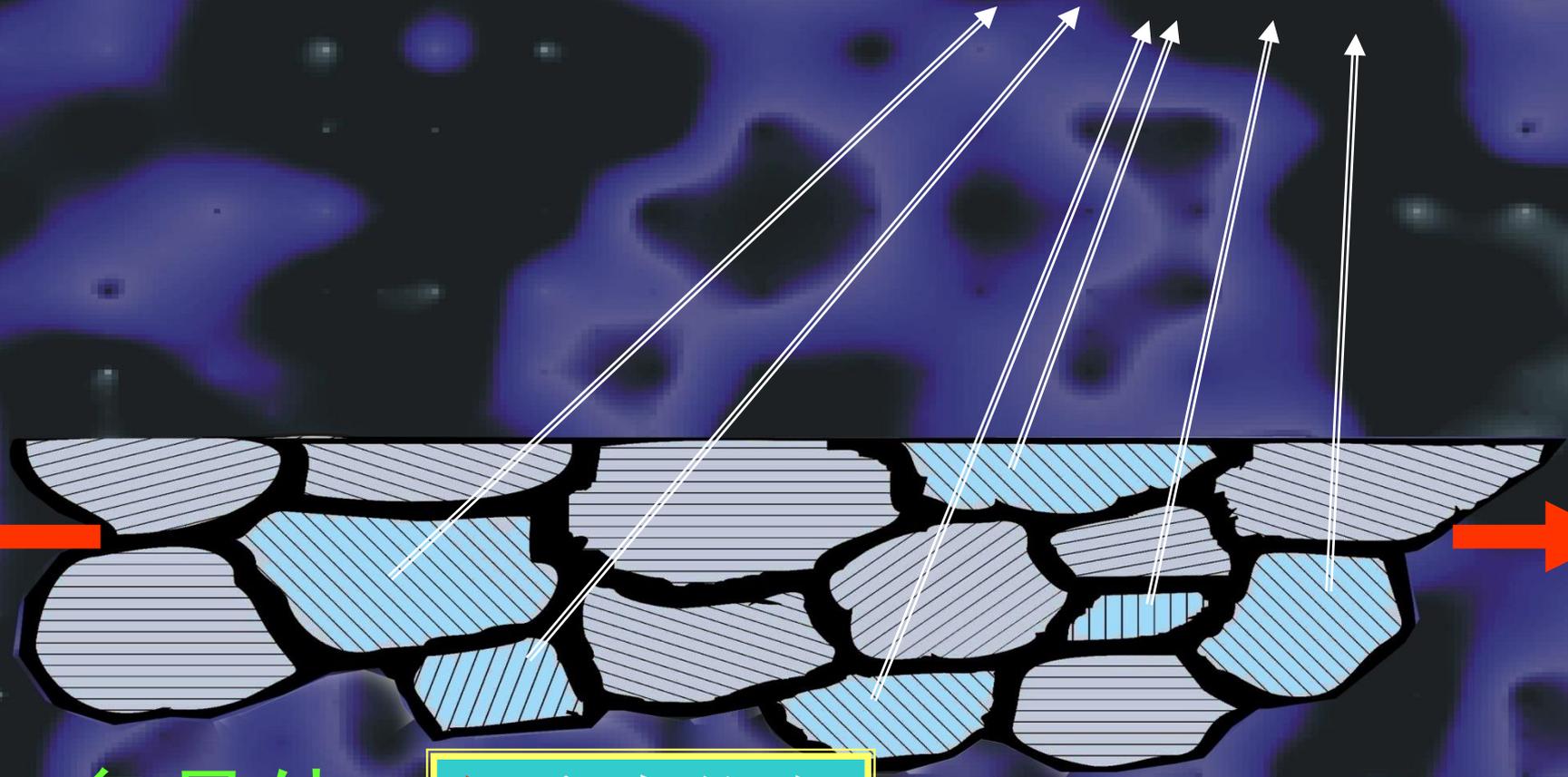
晶面间距 d 变小



多晶体

拉应力状态

晶面间距 d 变大



多晶体

拉应力状态

确定衍射晶面法线 使之与试样表面法线重合 即 $\psi=0^\circ$

确定衍射晶面法线

衍射峰

计数管扫描

根据布拉格定律

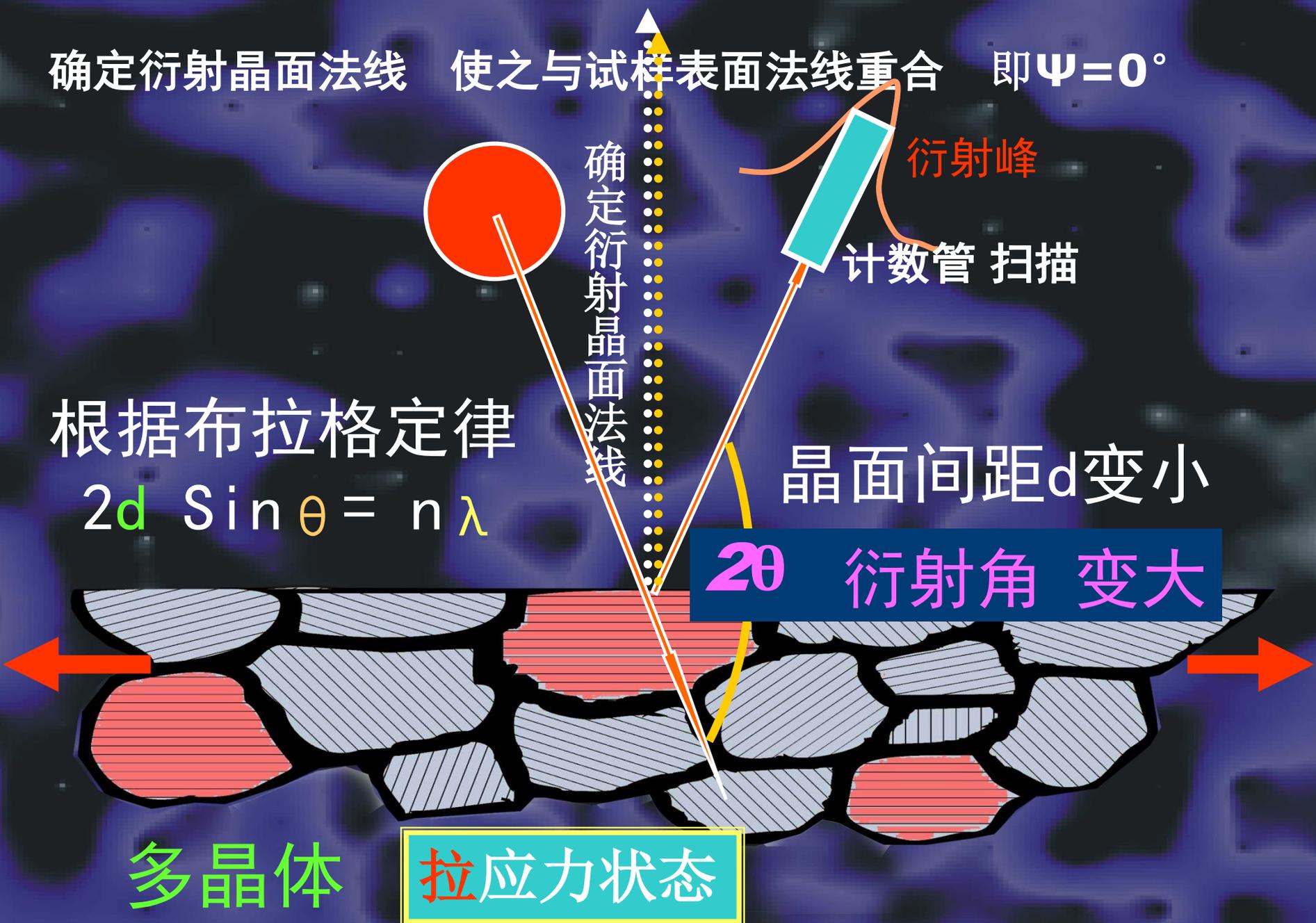
$$2d \sin \theta = n \lambda$$

晶面间距 d 变小

2θ 衍射角 变大

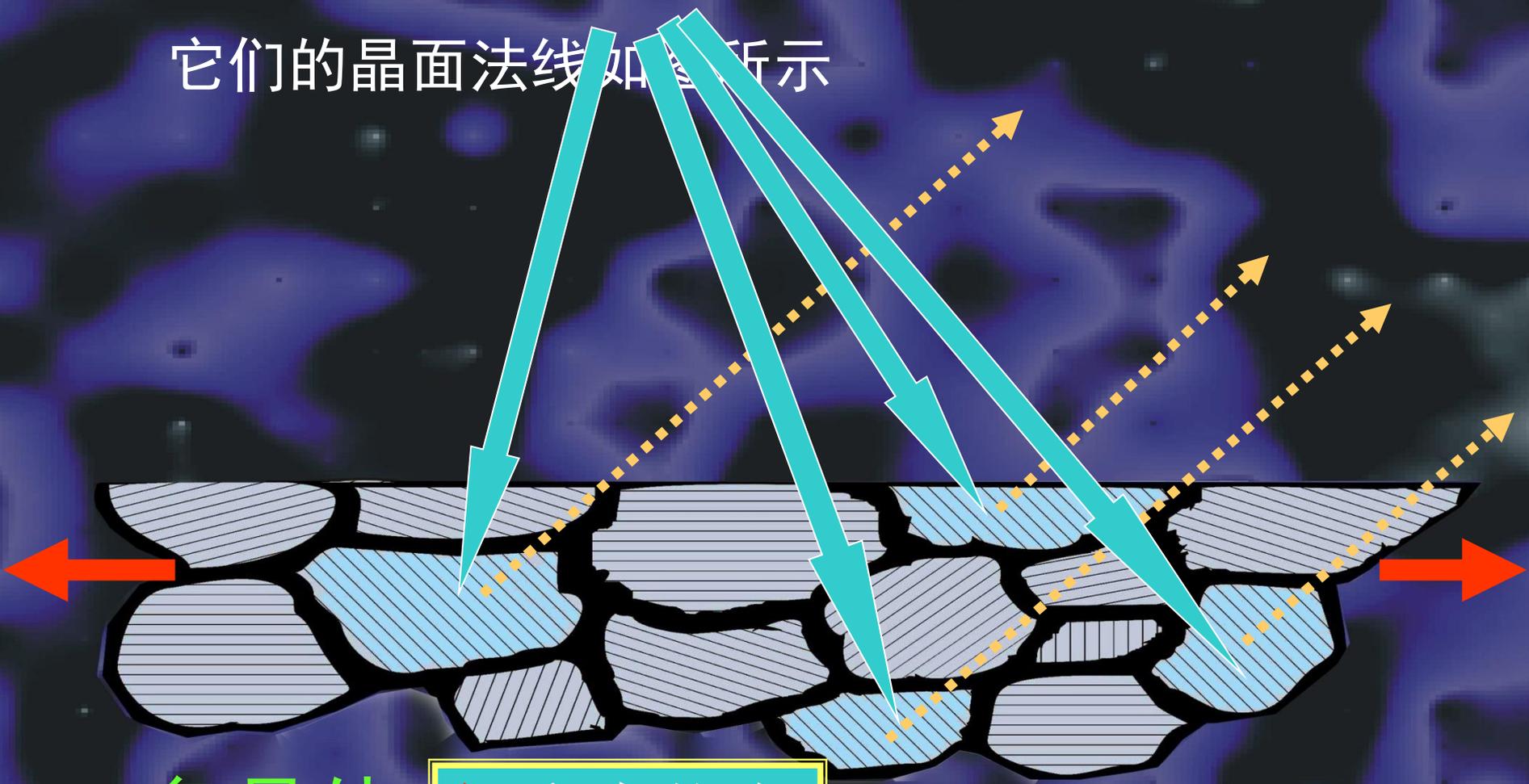
多晶体

拉应力状态



接下来，选取 (hkl) 晶面间距被拉大的晶粒
(示意图中被涂上淡蓝色)

它们的晶面法线如图所示



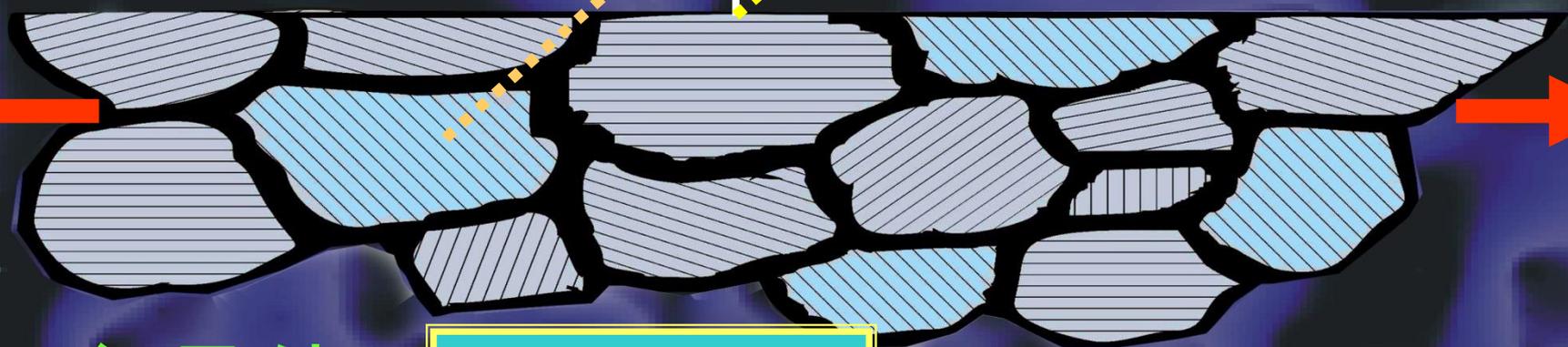
多晶体

拉应力状态

如果从宏观上确定一条晶面法线
它必然对应有许多多晶粒

试样表面法线

晶面法线



多晶体

拉应力状态

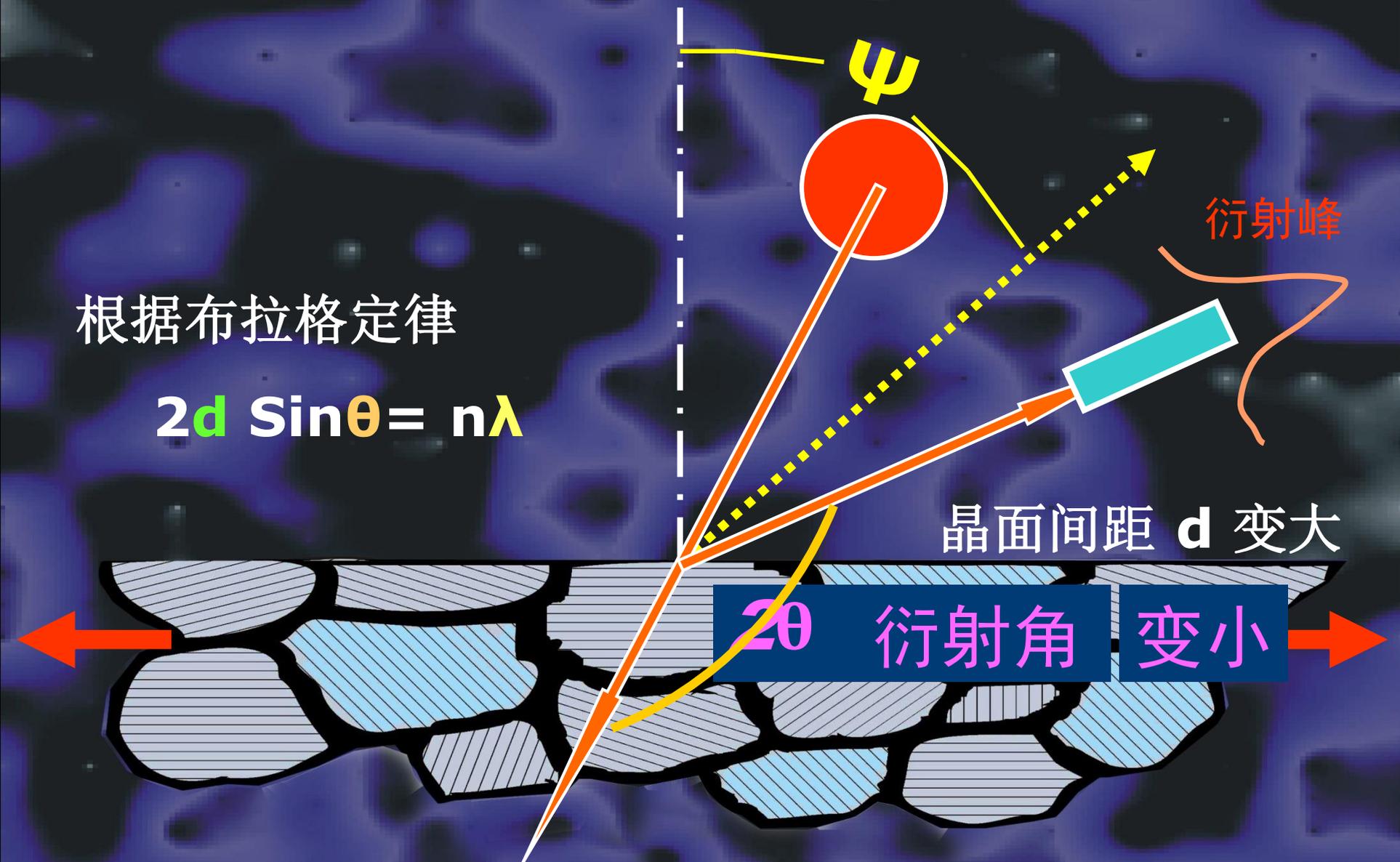
根据布拉格定律

$$2d \sin\theta = n\lambda$$

晶面间距 d 变大

2θ 衍射角 变小

衍射峰



- 在无应力状态，衍射角 2θ 不随晶面方位角 ψ 变化而变化；
- 在拉应力状态，晶面方位角 ψ 越大，晶面间距 d 也越大，依据布拉格定律，衍射角 2θ 就越小；
- 相反，在压应力状态，晶面方位角 ψ 越大，晶面间距 d 也越小，相应地，衍射角 2θ 就越大；
- 可以推想，衍射角 2θ 随晶面方位角 ψ 变化而变化的快慢程度，直接反映出应力值的大小；
- 根据布拉格定律和弹性理论，可以推导出：

$$\frac{\partial (2\theta)}{\partial \sin^2 \psi}$$

$$\sigma = K \cdot \frac{\partial (2\theta)}{\partial \sin^2 \psi}$$

$$\frac{\partial (2\theta)}{\partial \sin^2 \psi}$$

- 式中 K 为应力常数。

测定应力的可操作过程 就是

选定若干 ψ 角

分别测定对应的衍射角 2θ

测量原理

简明示意图

布拉格定律

$$2d \sin\theta = n\lambda$$

通过衍射得到衍射角 2θ

依据布拉格定律可以求出晶面间距 **d**

N_0

每条法线

N_0, N_1, \dots, N_4

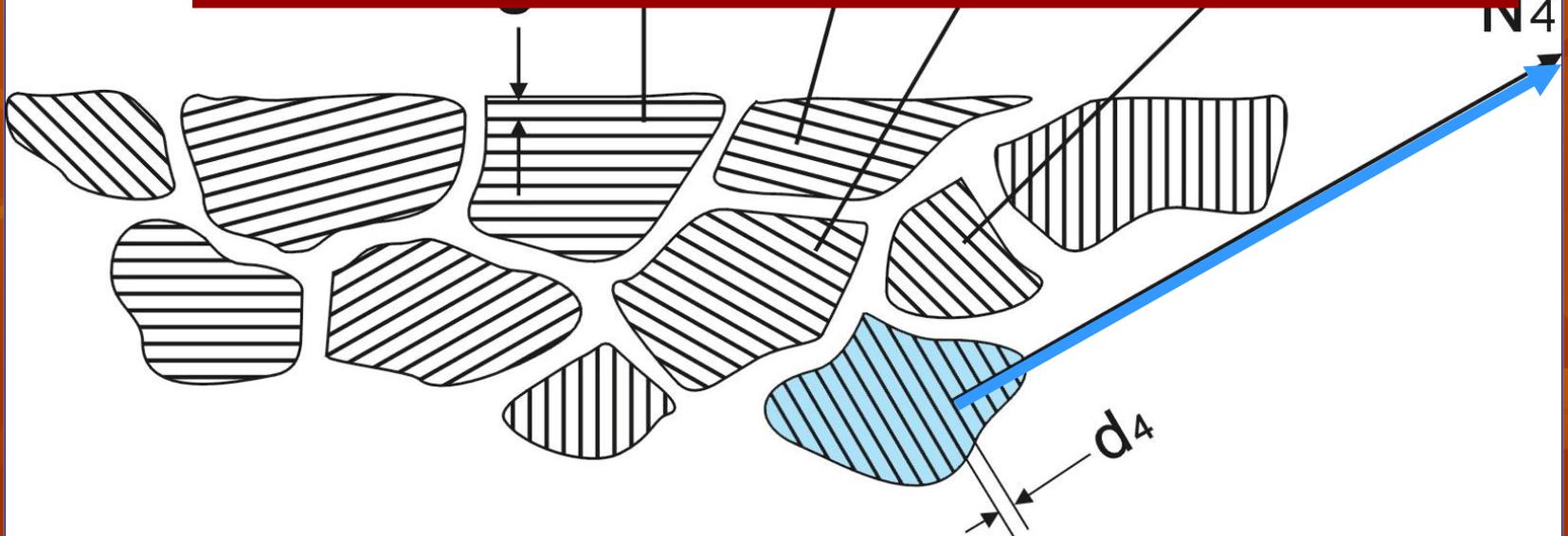
分别对应的晶面间距为 d_0, d_1, \dots, d_4

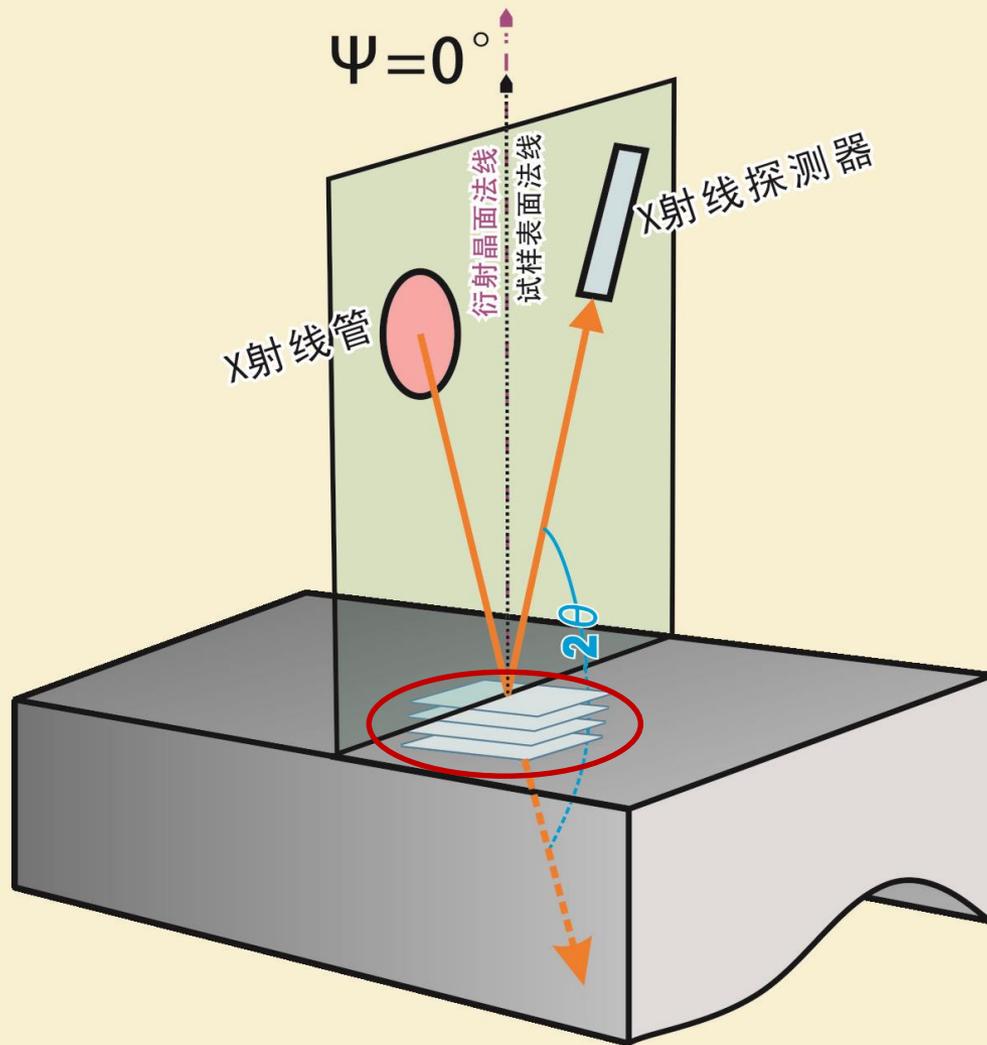
如果测得晶面间距从 d_0 到 d_4 大体相等

· 如未测得晶面间距从 d_0 到 d_4 依次减小

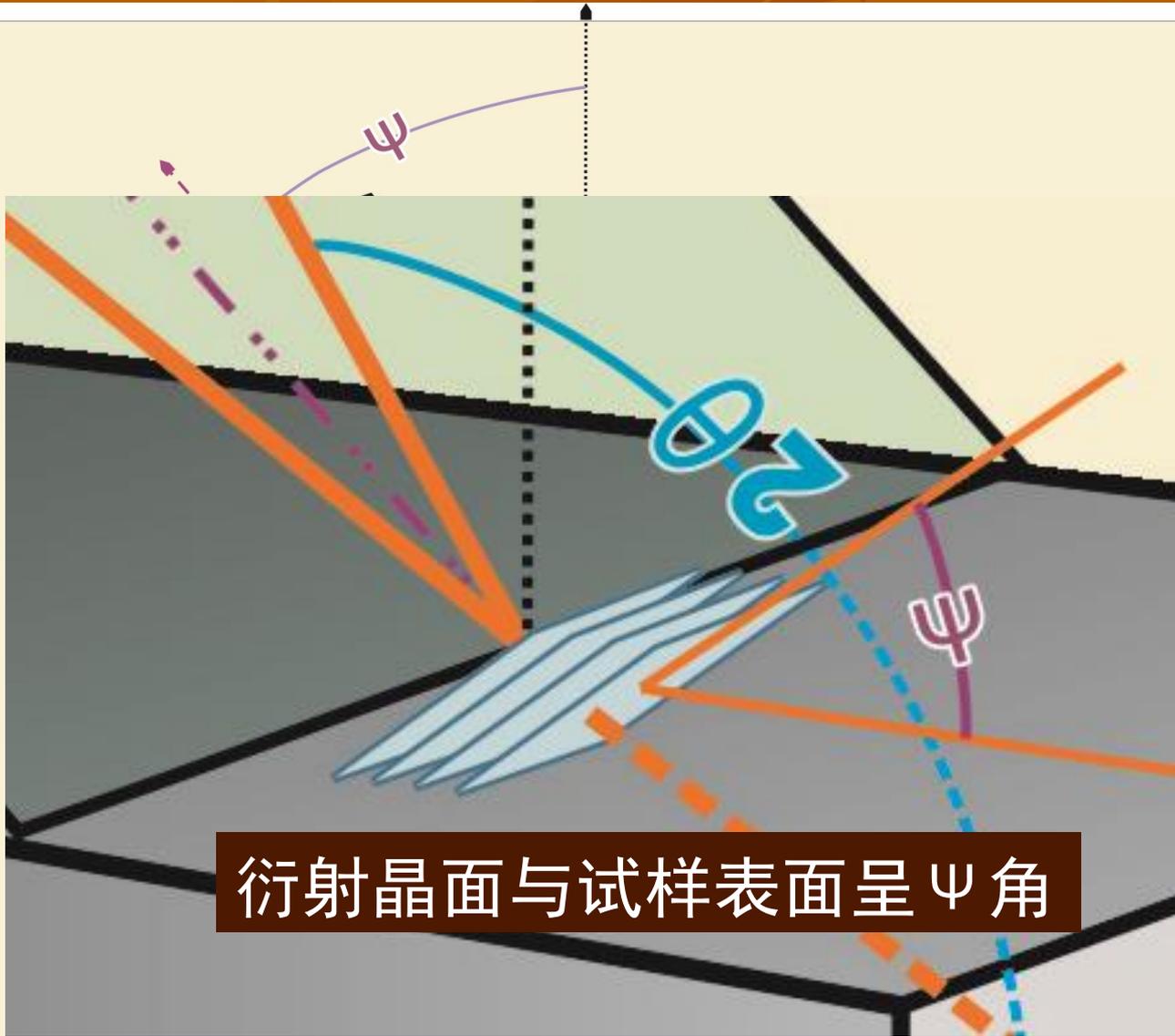
可以推断材料中基本无应力;

可以推断材料中存在压应力;





衍射晶面平行于试样表面



衍射晶面与试样表面呈 ψ 角

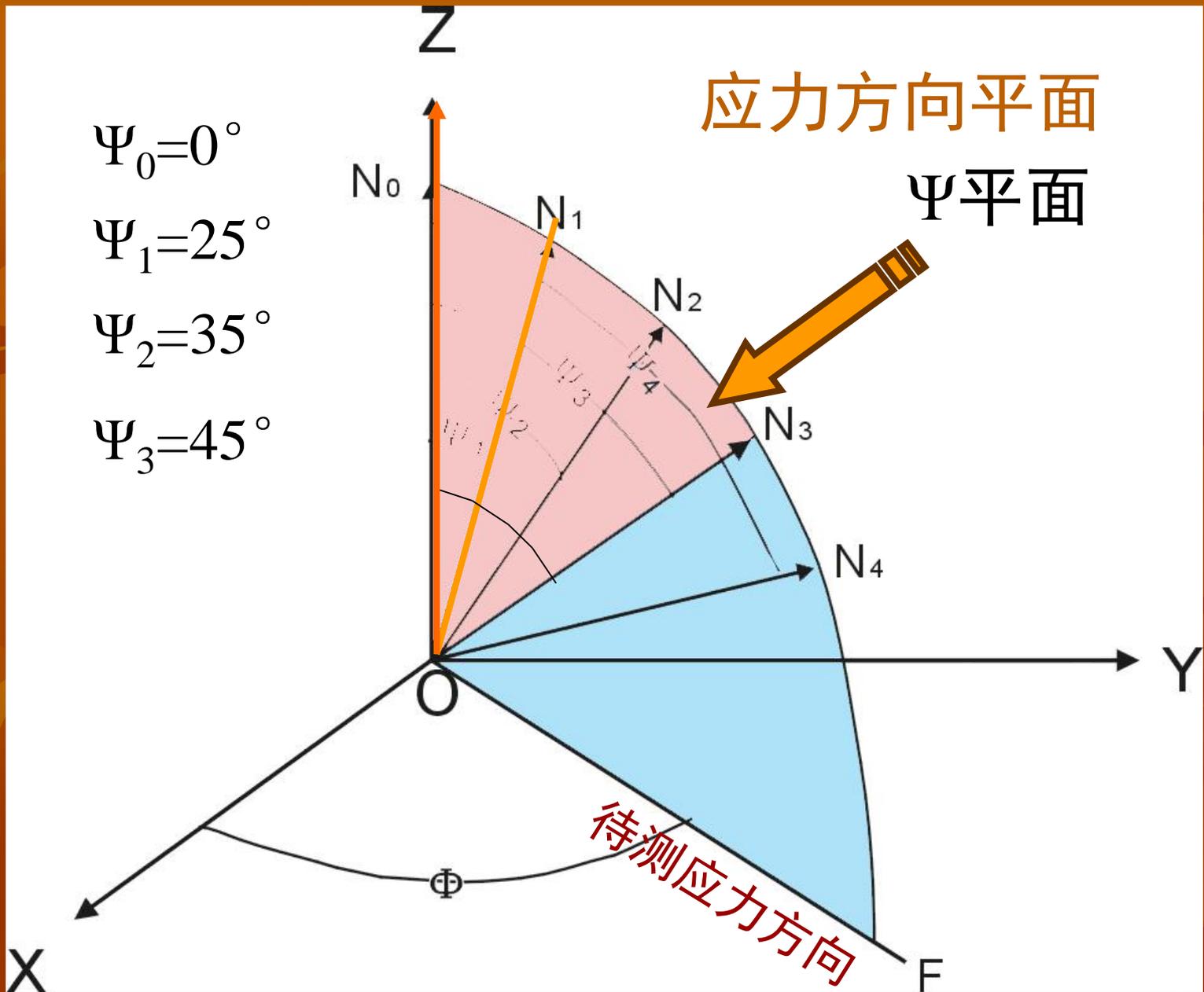
角

测定应力的可操作过程 就是

选定若干 ψ 角

分别测定对应的衍射角 2θ

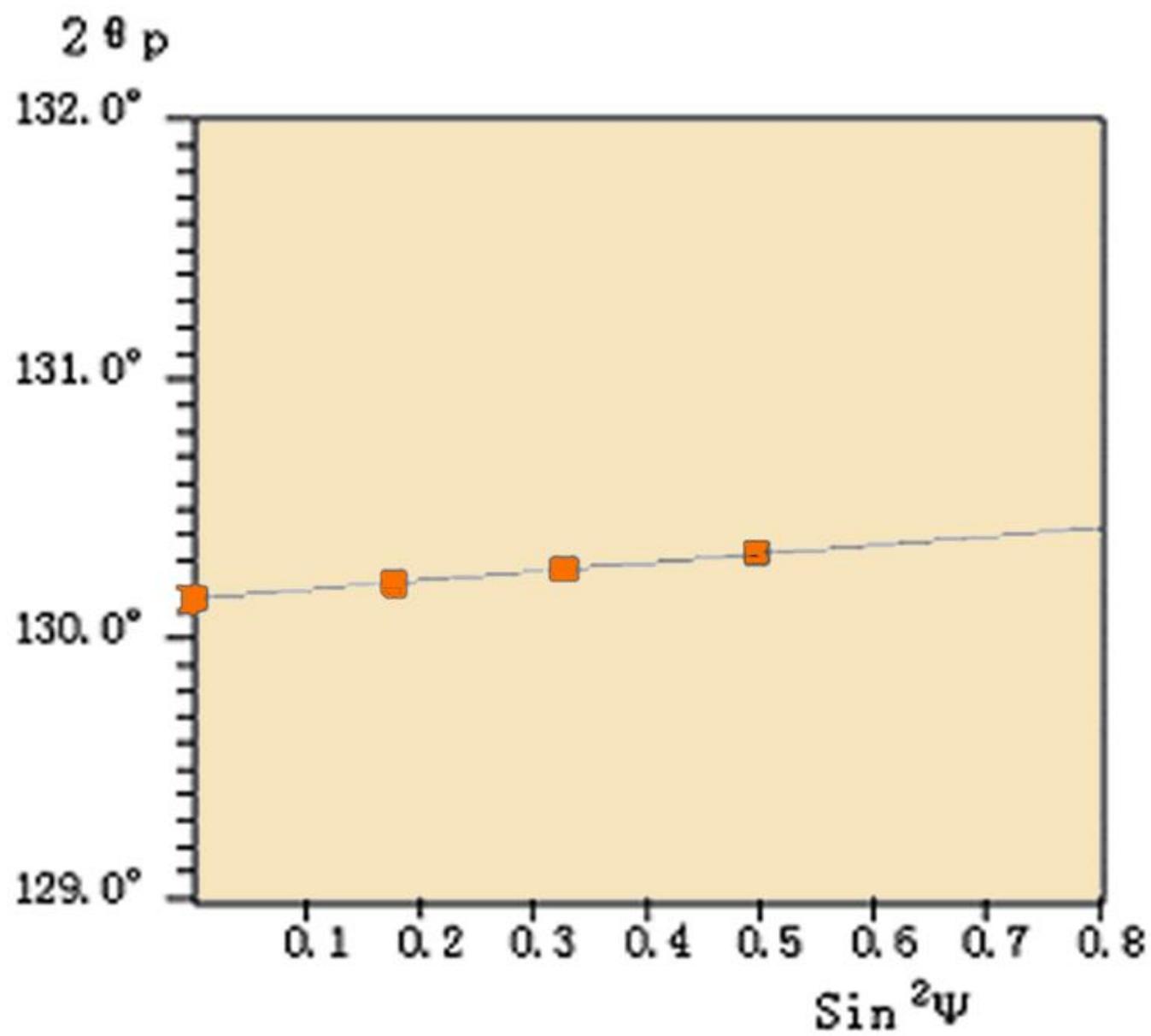
亦即分别测定对应的晶面间距 d



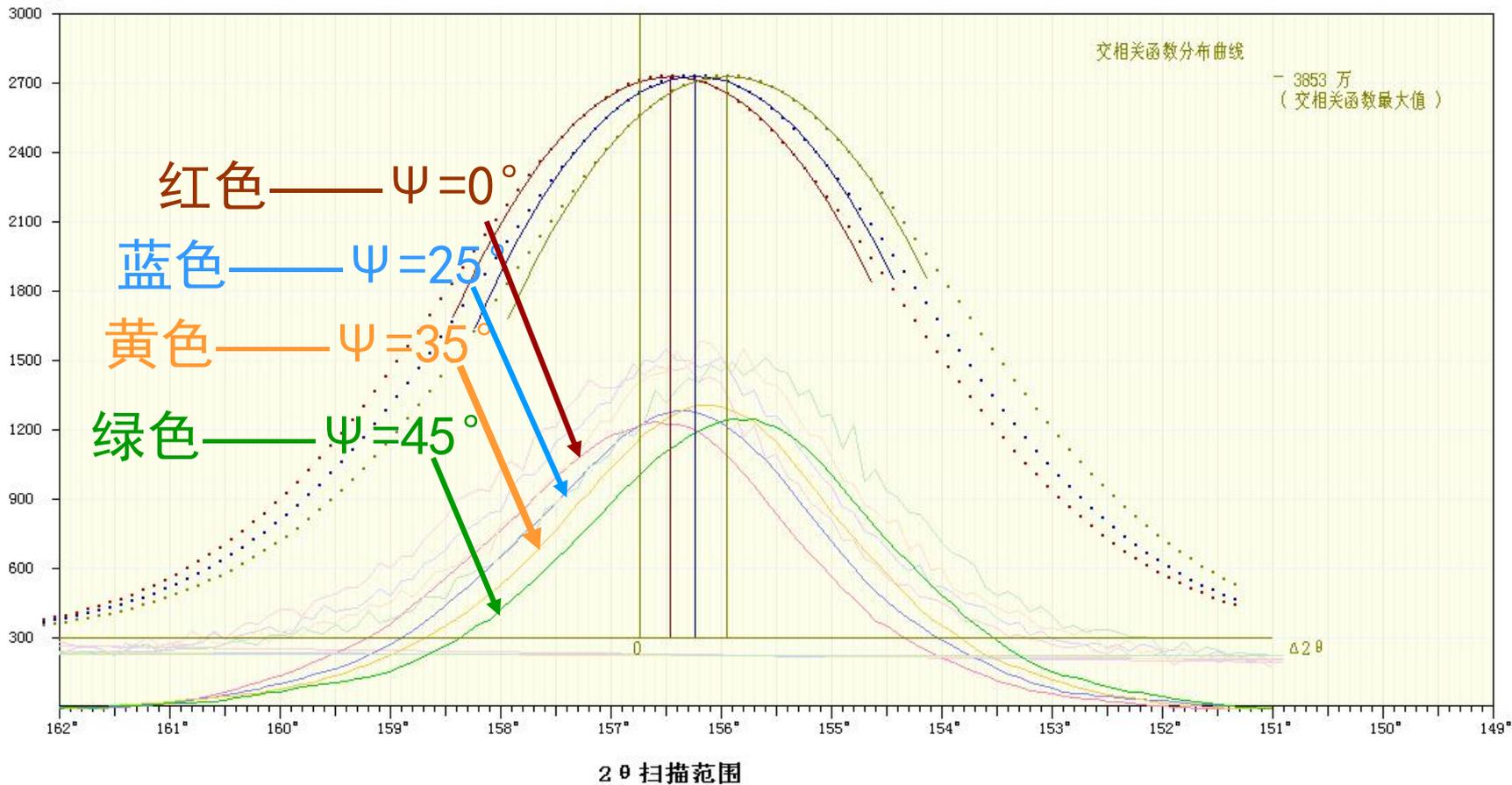
$$\sigma = K \cdot M$$

$$M = \frac{\partial 2\theta}{\partial \sin^2 \Psi}$$

$$K = \frac{E}{2(1 + \mu)} \cot \theta_0 \frac{\pi}{180}$$



计数



2 θ p

158.0°

157.0°

156.0°

155.0°

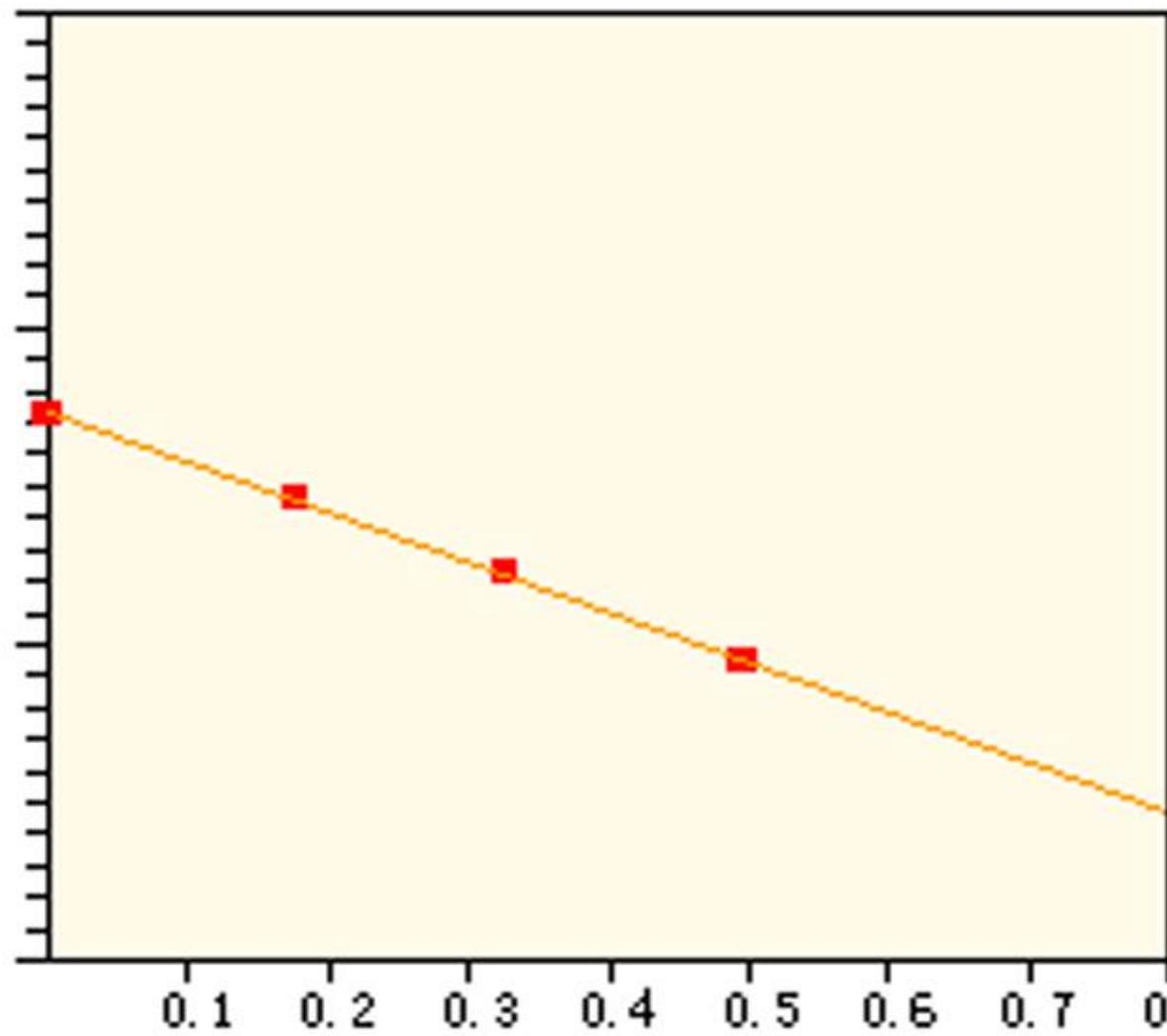
峰

半

积

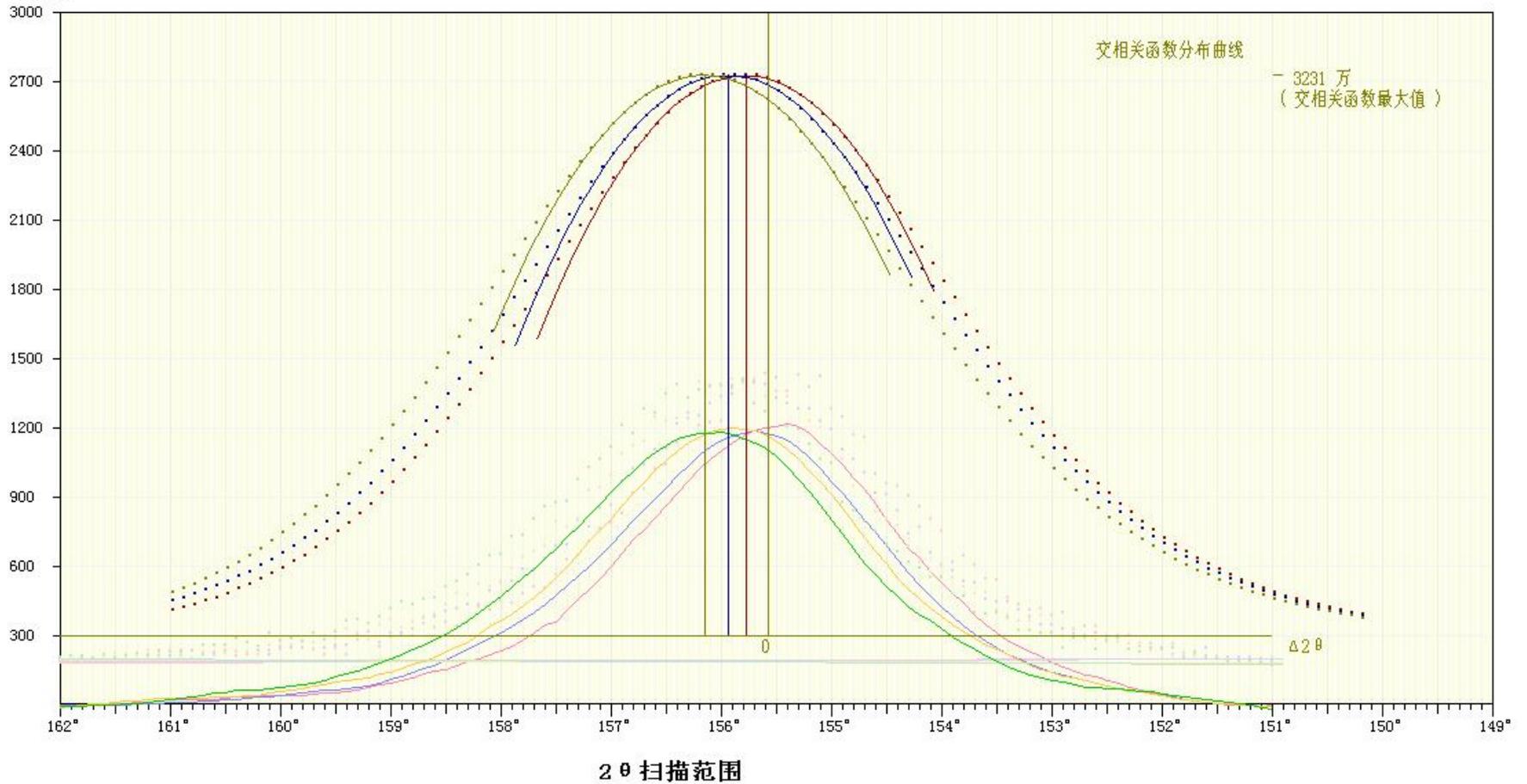
积

应



$\text{Sin}^2 \Psi$

计数



应力值 σ

-369 MPa

误差 $\Delta \sigma$

± 6 MPa

0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8

$\text{Sin}^2 \Psi$

同倾法 与 侧倾法

X 射线应力测定方法简介
之 一

X射线应力测定

基本衍射几何关系

按照常规法 —— 同倾固定 ψ_0 法

试样表面法线

入射角 ψ_0

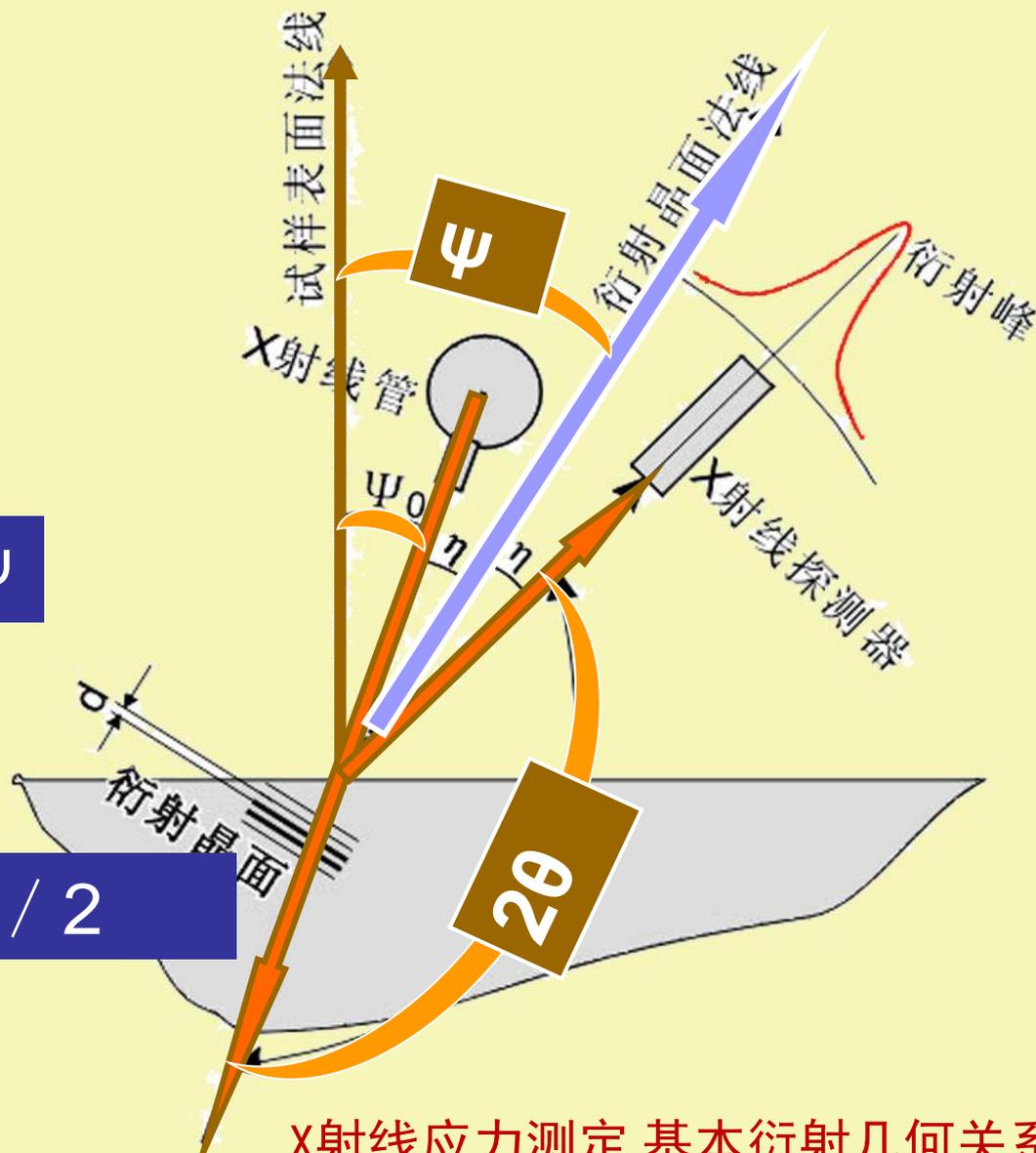
衍射角 2θ

衍射晶面法线

衍射晶面方位角 ψ

$$\psi = \psi_0 + \eta$$

$$\eta = (180^\circ - 2\theta) / 2$$



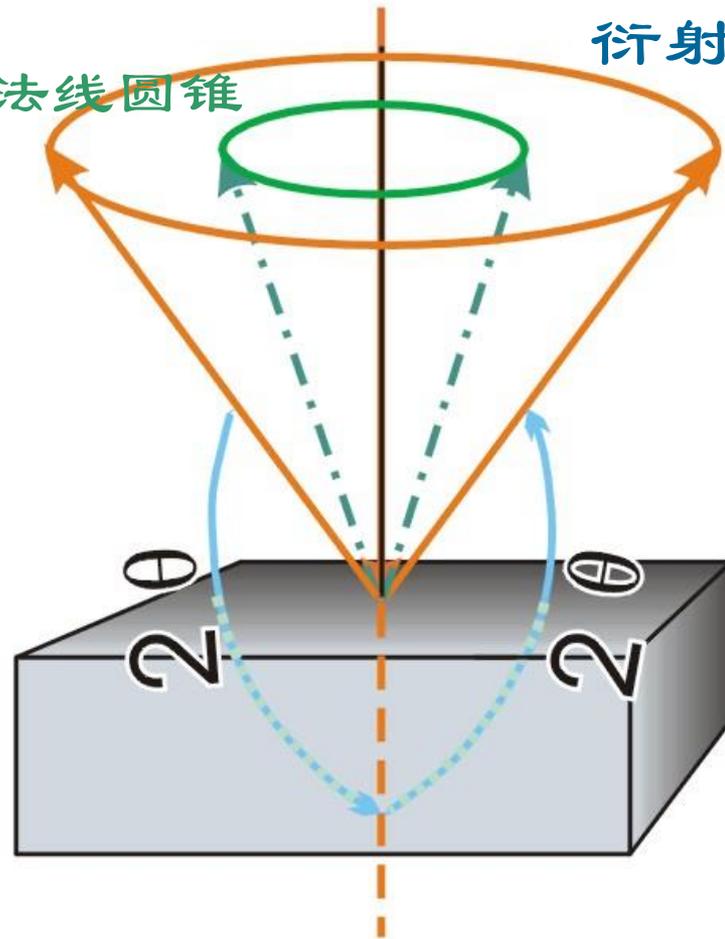
X射线应力测定 基本衍射几何关系



多晶体的衍射

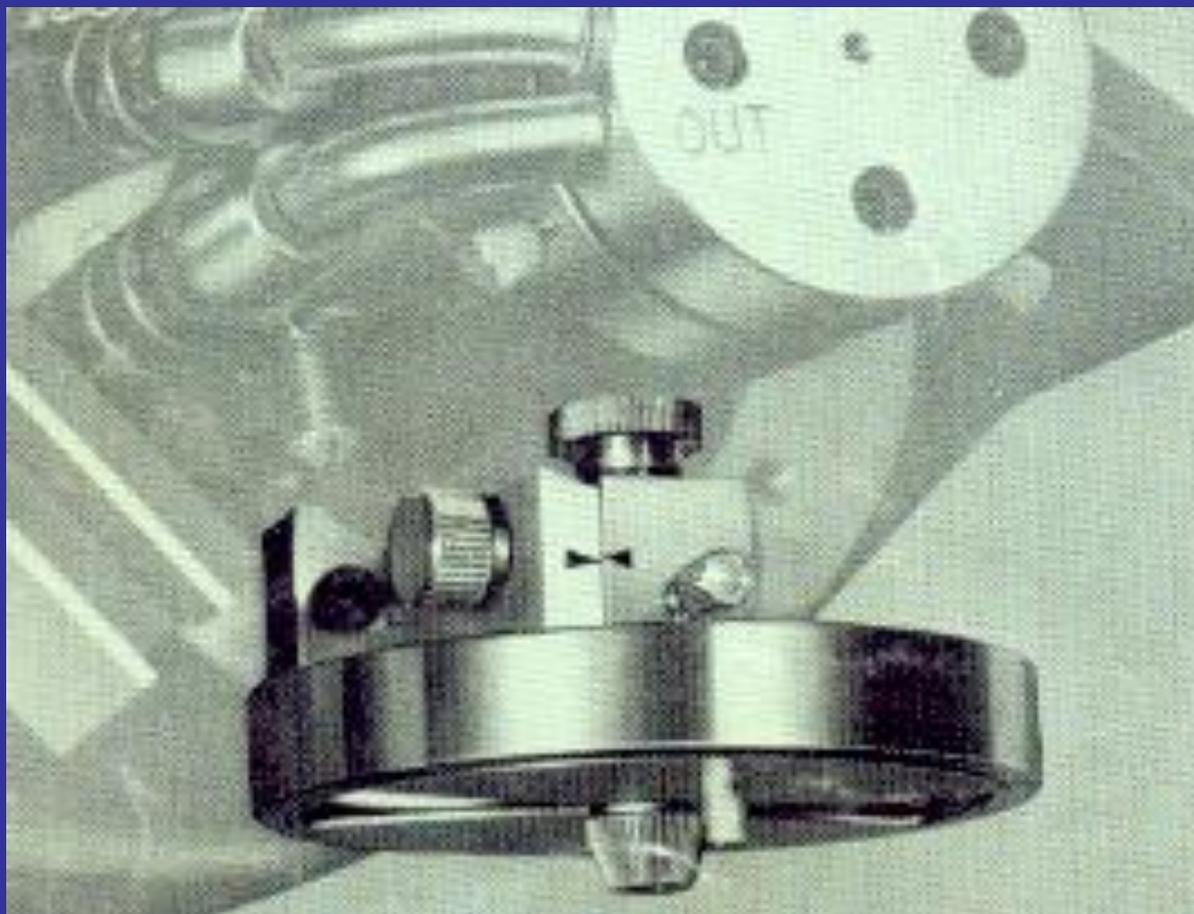
衍射晶面法线圆锥

衍射圆锥



德拜环相机

置于X射线管窗口之下



横截衍射圆锥曝光 得到德拜环

德拜环

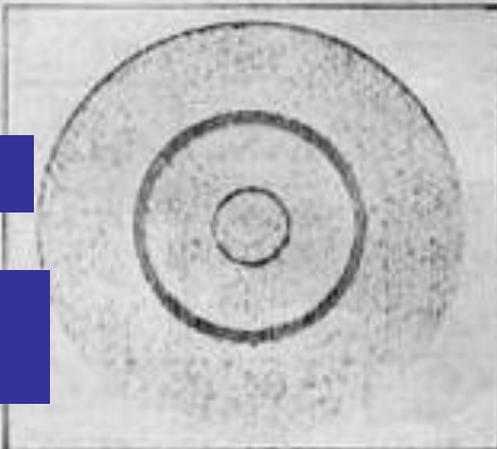
X-ray conditions
Measuring instrument: "Stroinflex" Slit: 1 μ collimator
Target: CrK α V filter Specimen-to-film distance: 40mm
Diffraction plane: (221) Film: Non-screen type
Tube voltage & current: 25kV, 6mA Exposure time: 5 min.

调质钢

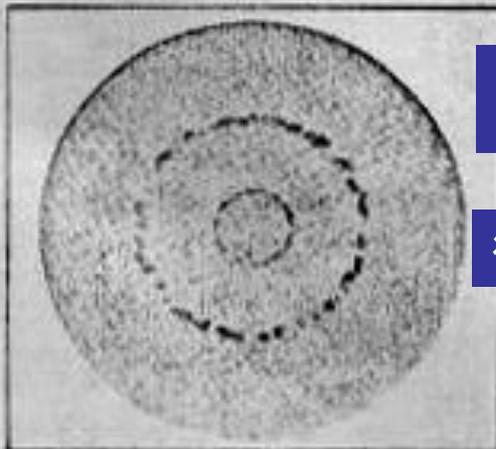
淬火+500 $^{\circ}$ C回火

德拜环均匀连续，
线条不宽

(1) Example of fine crystal grains
(S40C 850 $^{\circ}$ C Oil quenching
500 $^{\circ}$ C tempering)



(2) Example of coarse crystal grains (10 μ)
(S45C Normalizing)



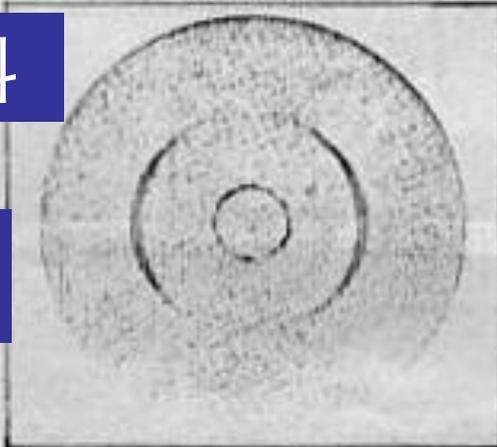
粗晶材料

德拜环由斑点组成

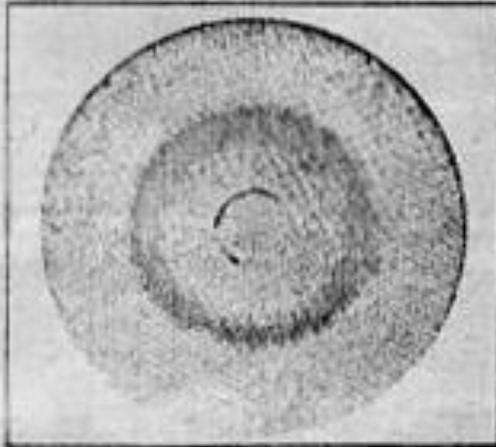
织构材料

德拜环不连续，
呈方向性分布

(3) Example of crystal grains having preferred orientation
(S534CP10.41 Cold Rolling)



(4) Example of very fine crystal grains
(SLS 850 $^{\circ}$ C Water quenching)



淬火钢

淬火 (850 $^{\circ}$ C水冷)

德拜环显著加宽

这种方法叫做

无倾角侧倾法

ψ 平面

入射X光

2θ 扫描平面

衍射晶面法线

注意：此时衍射晶面法线并不在垂直于试样表面的平面里！

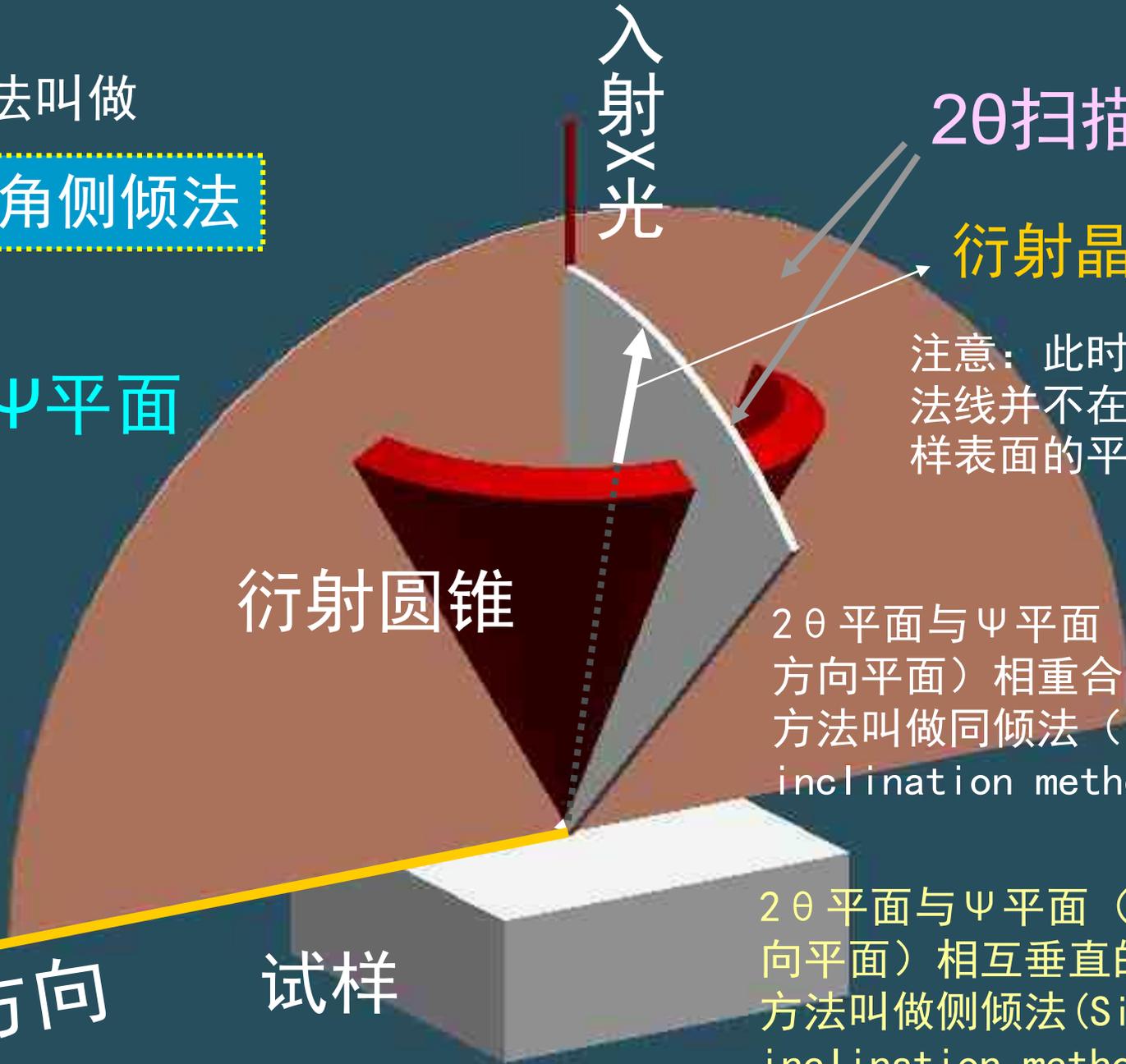
衍射圆锥

2θ 平面与 ψ 平面（应力方向平面）相重合的测量方法叫做同倾法（Iso-inclination method）。

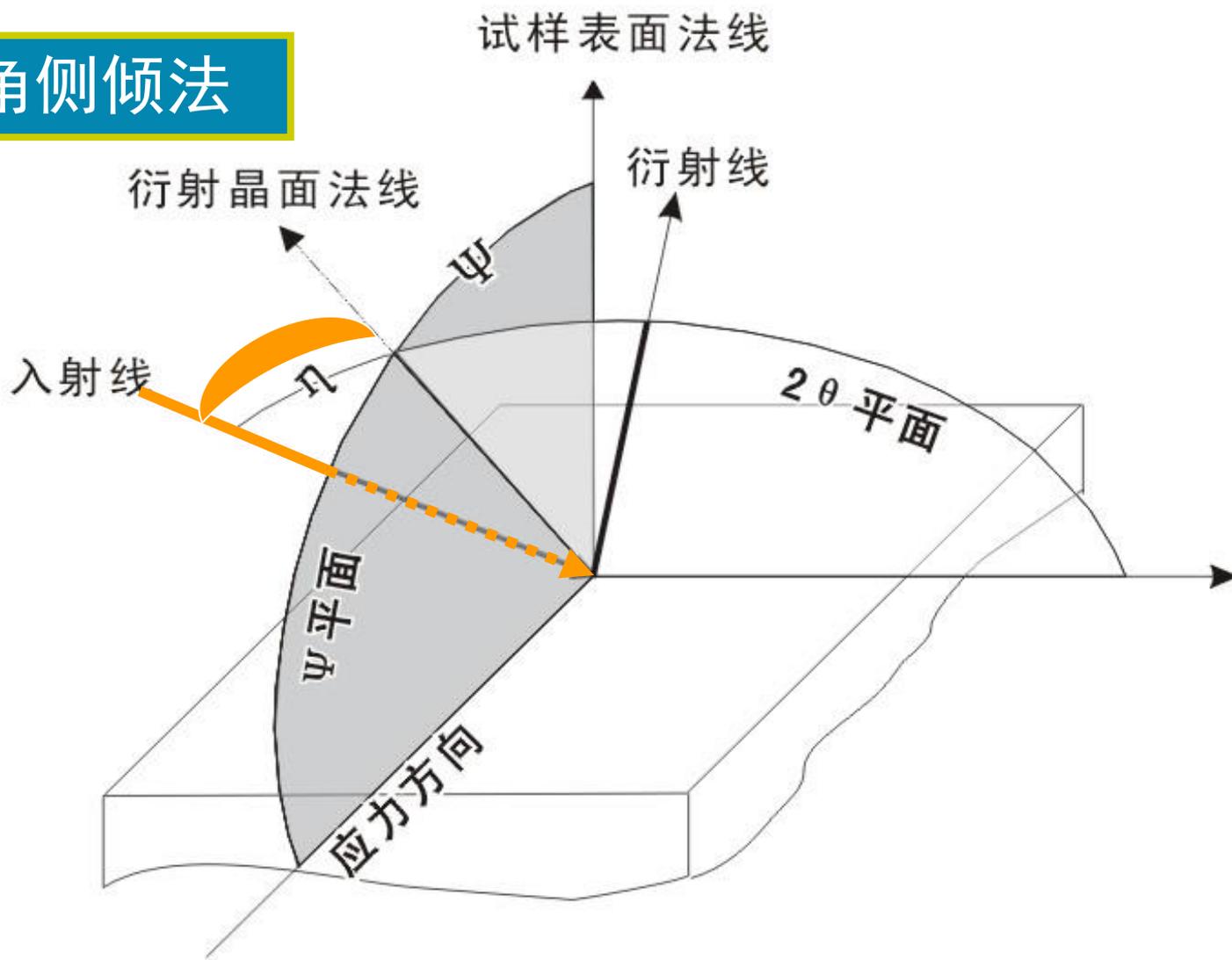
应力方向

试样

2θ 平面与 ψ 平面（应力方向平面）相互垂直的测量方法叫做侧倾法（Sid-inclination method）。

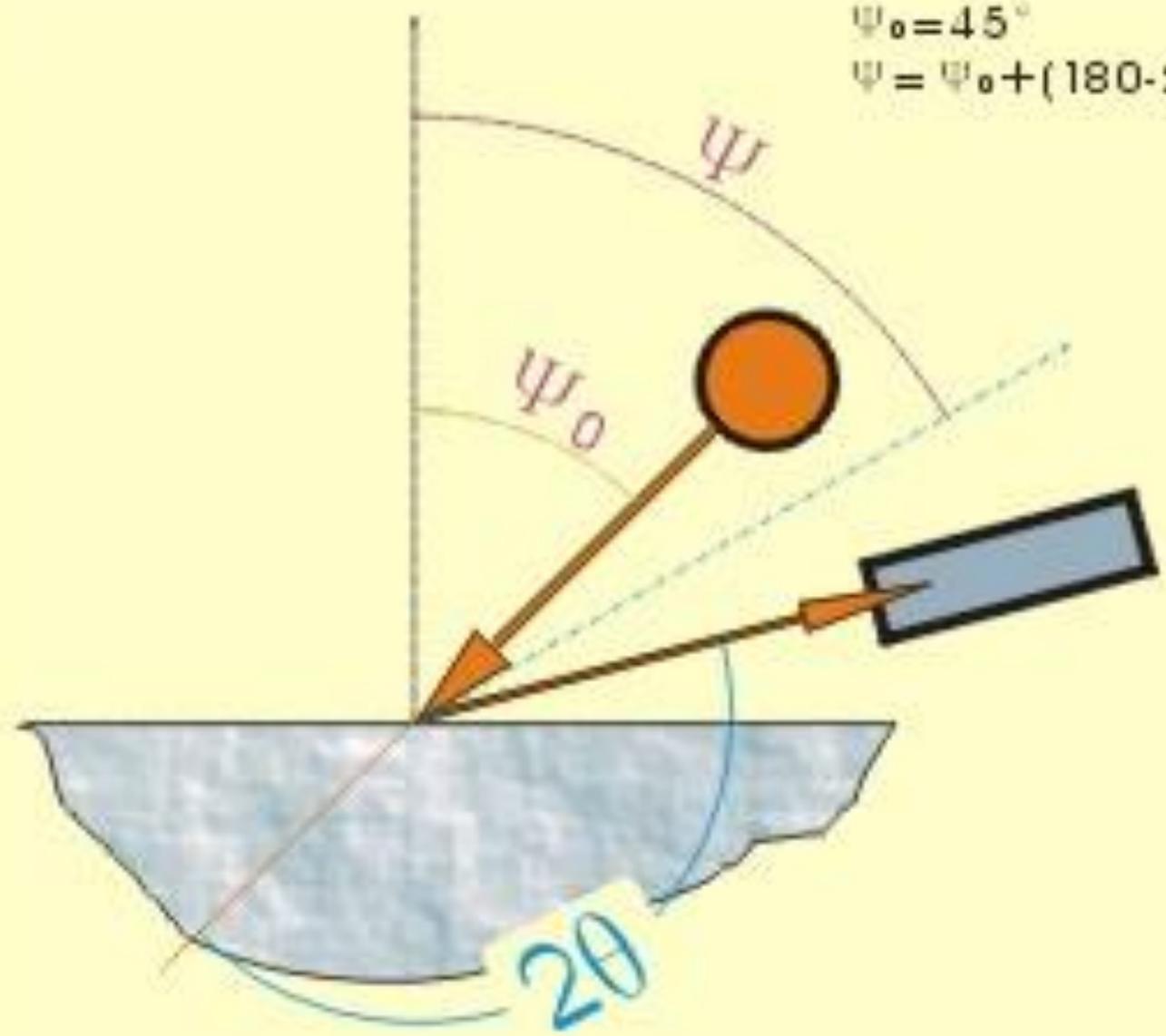


有倾角侧倾法



$$\psi_0 = 45^\circ$$

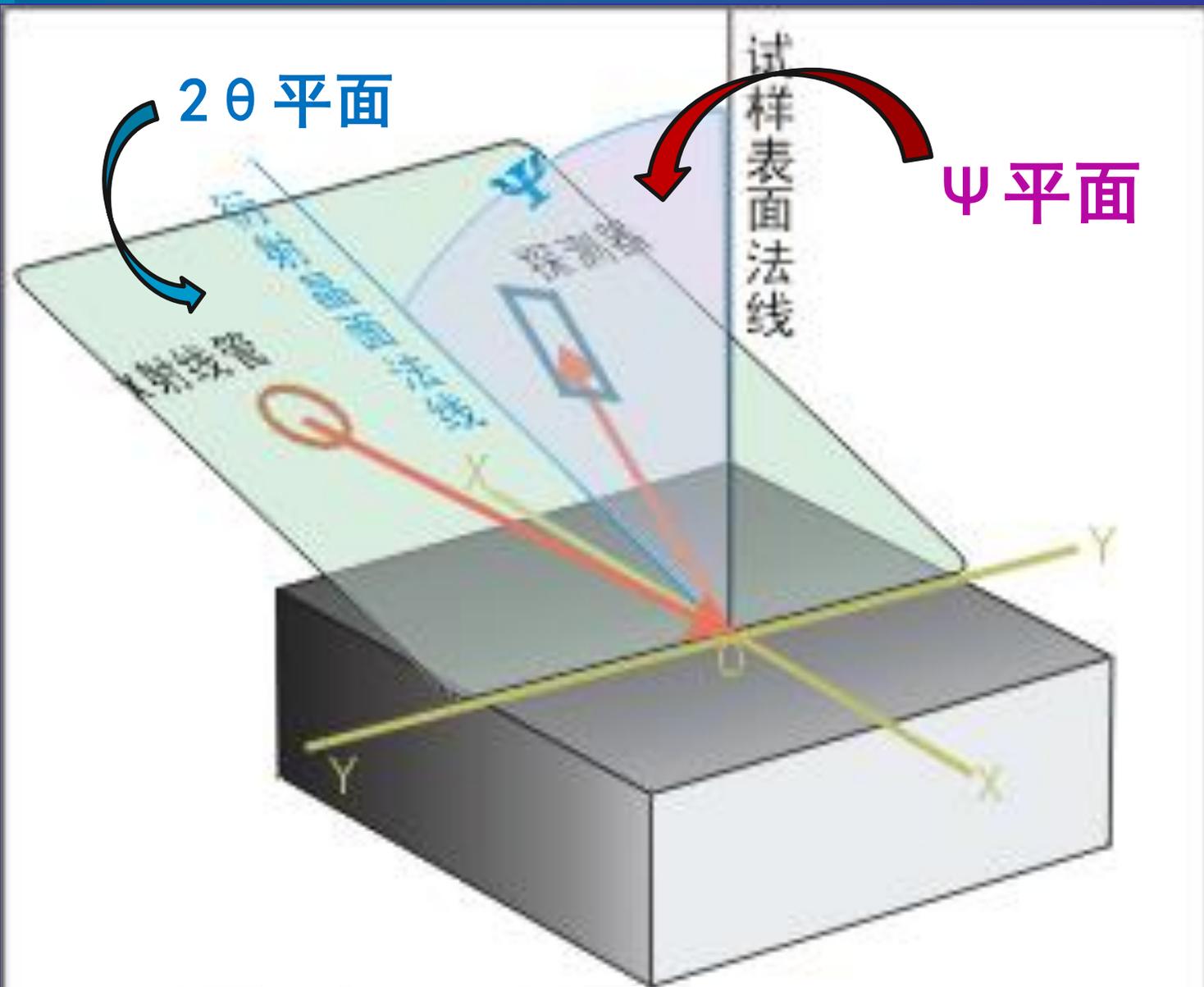
$$\psi = \psi_0 + (180 - 2\theta) / 2$$



同倾测角仪

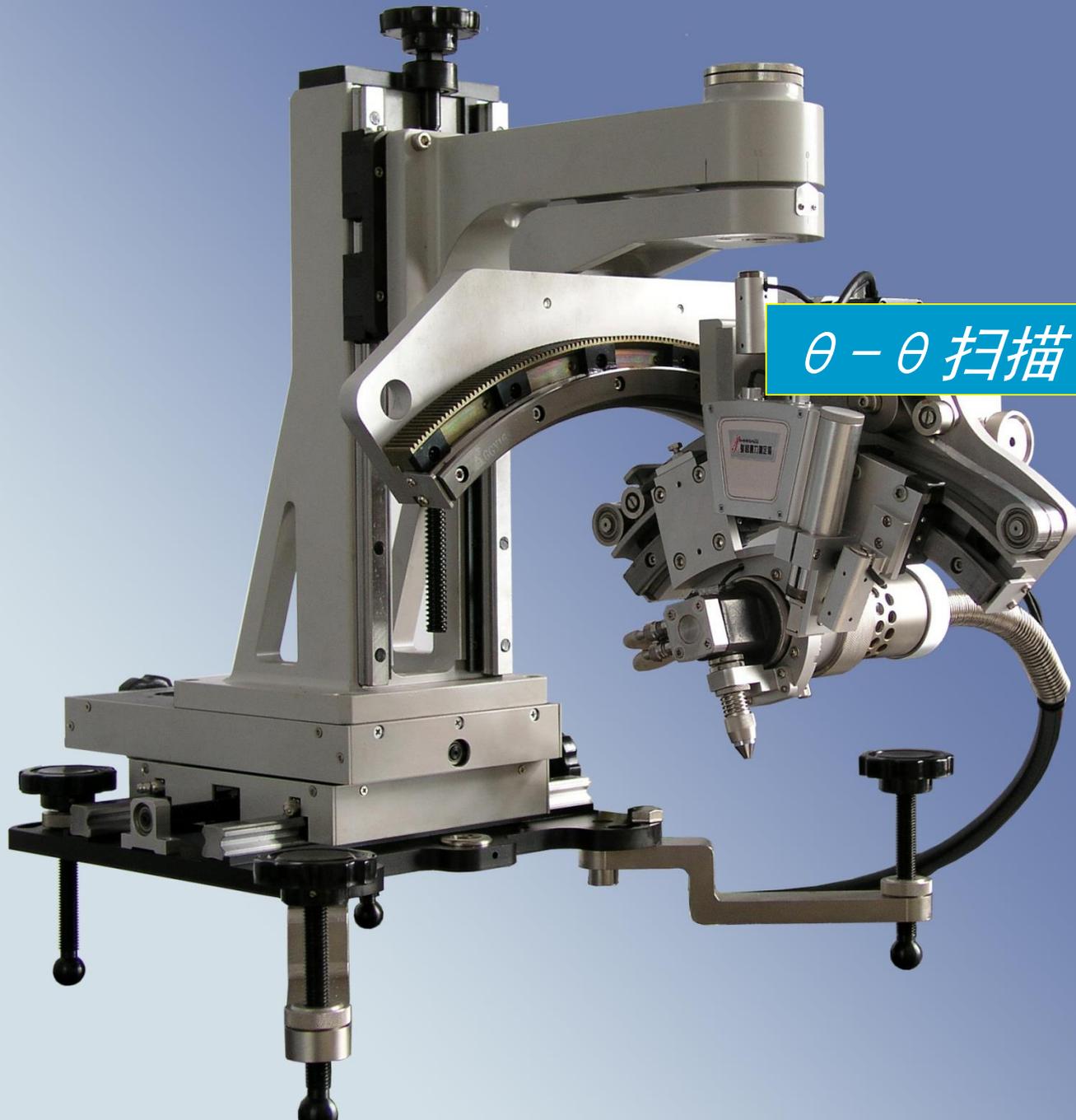
(非对称结构)

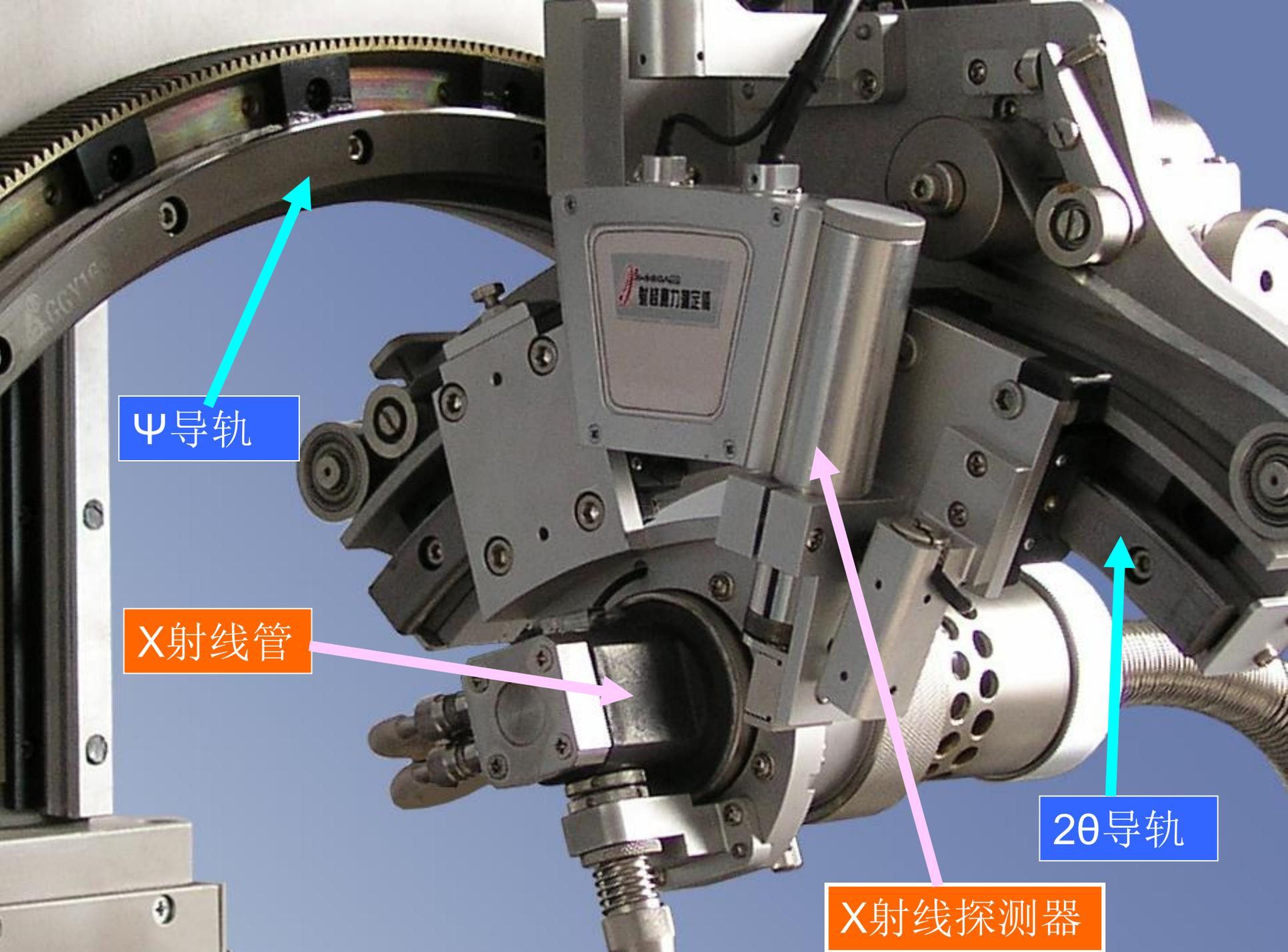




ψ 平面 \perp 2θ 平面

$\theta - \theta$ 扫描 ψ 测角仪





Ψ 导轨

X射线管

2 θ 导轨

X射线探测器

侧倾法与同倾法相比具有一定的优越性。

首先在几何空间分配上

在侧倾法的几何条件下， 2θ 平面垂直于 Ψ 平面，二者不会发生空间矛盾。一般测定应力应当尽量使用较高的衍射角；但是在某些情况下也可能不得不使用稍低的衍射角。侧倾法就适应这种情况。而同倾法就不能容忍较低衍射角。

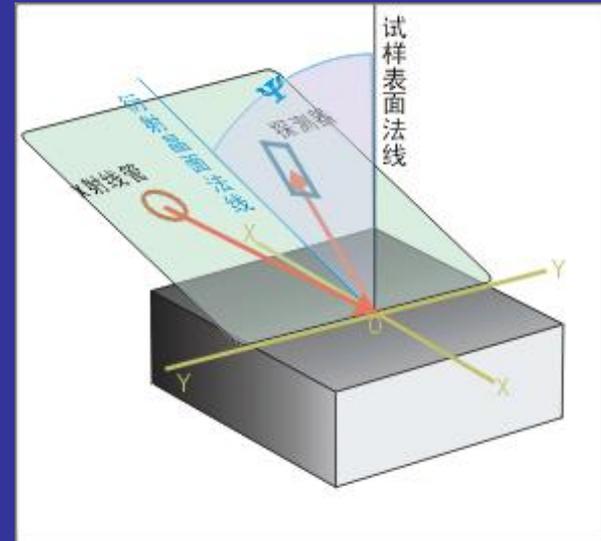
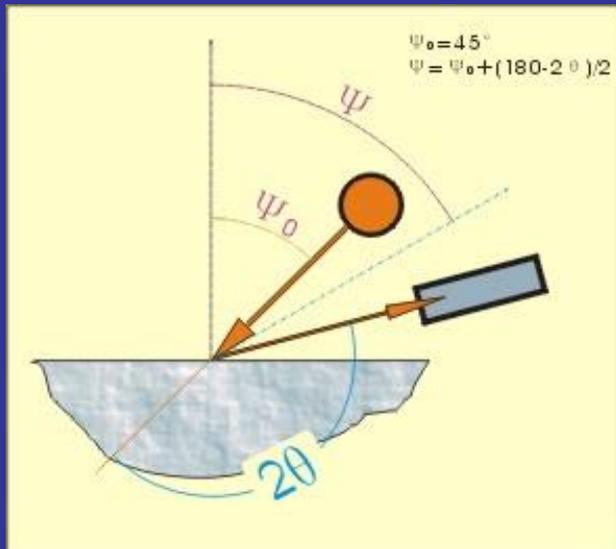
例如

CuK α —钛合金 (311) —141°

CrK α —金刚石 (220) —130°

CrK α —硬质合金WC (111) —124°

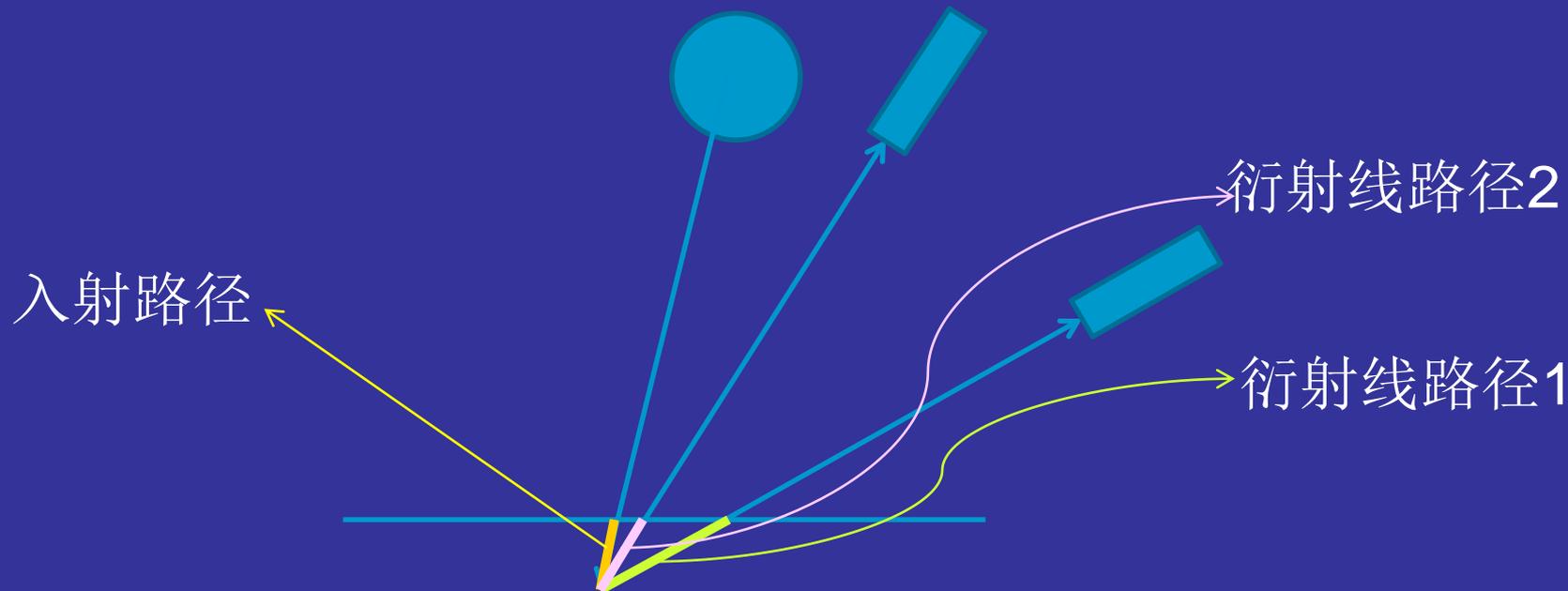
均能保证足够的 Ψ 角，可以达到足够的测试精度。



其次在吸收因子的作用方面，

衍射线路径1 > 衍射线路径2 所以衍射峰的背景是倾斜的。

尽管可以进行吸收校正，但是对于峰背比较差的衍射峰，加上倾斜的背景，往往会降低定峰精度



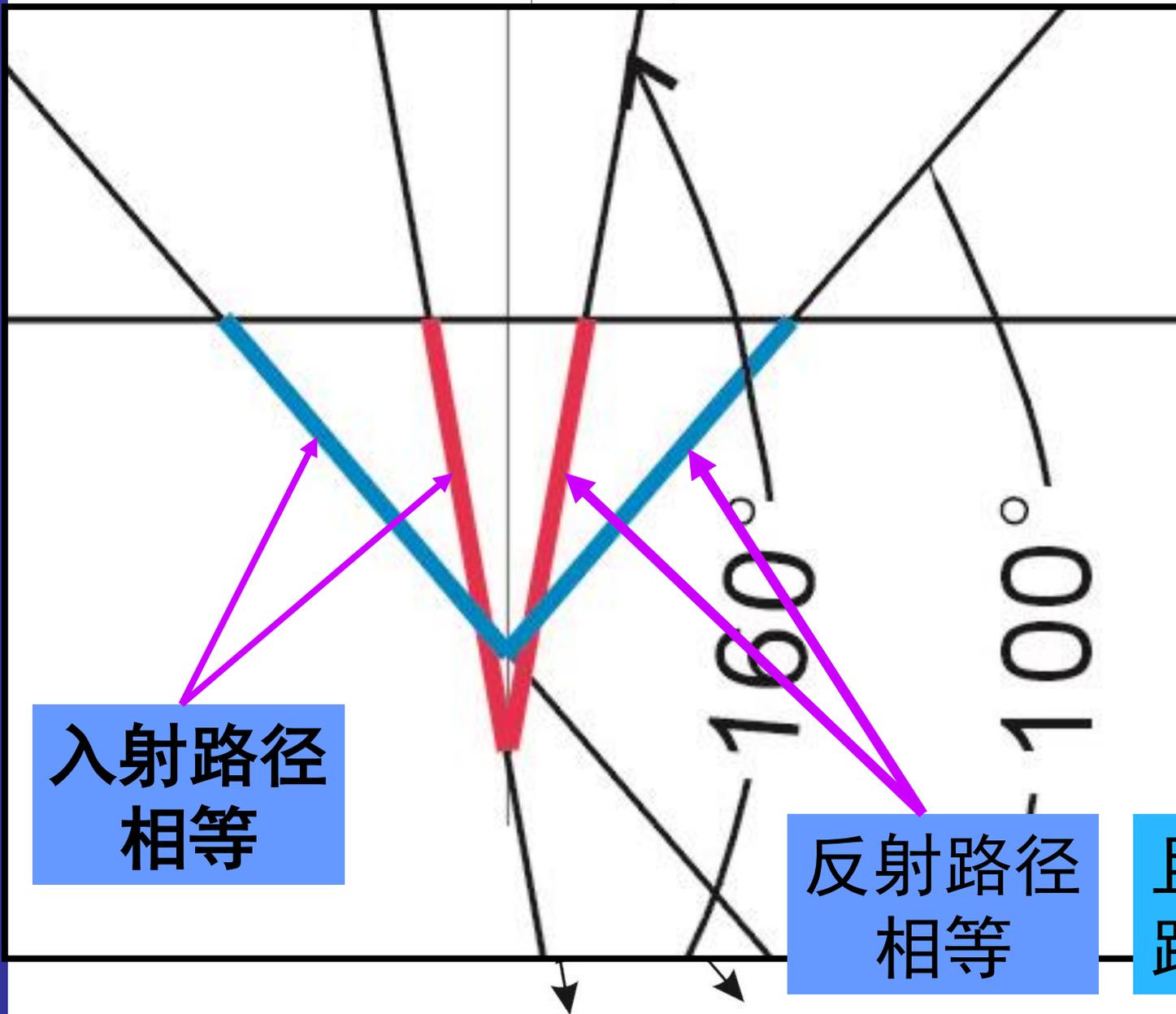
常规法（同倾固定 ψ_0 法）的衍射线吸收路径 示意图



在侧倾法中，吸收因子的影响较小。

特别是侧倾固定 Ψ 法，吸收因子恒等于 1 。

请看示意图：



入射路径
相等

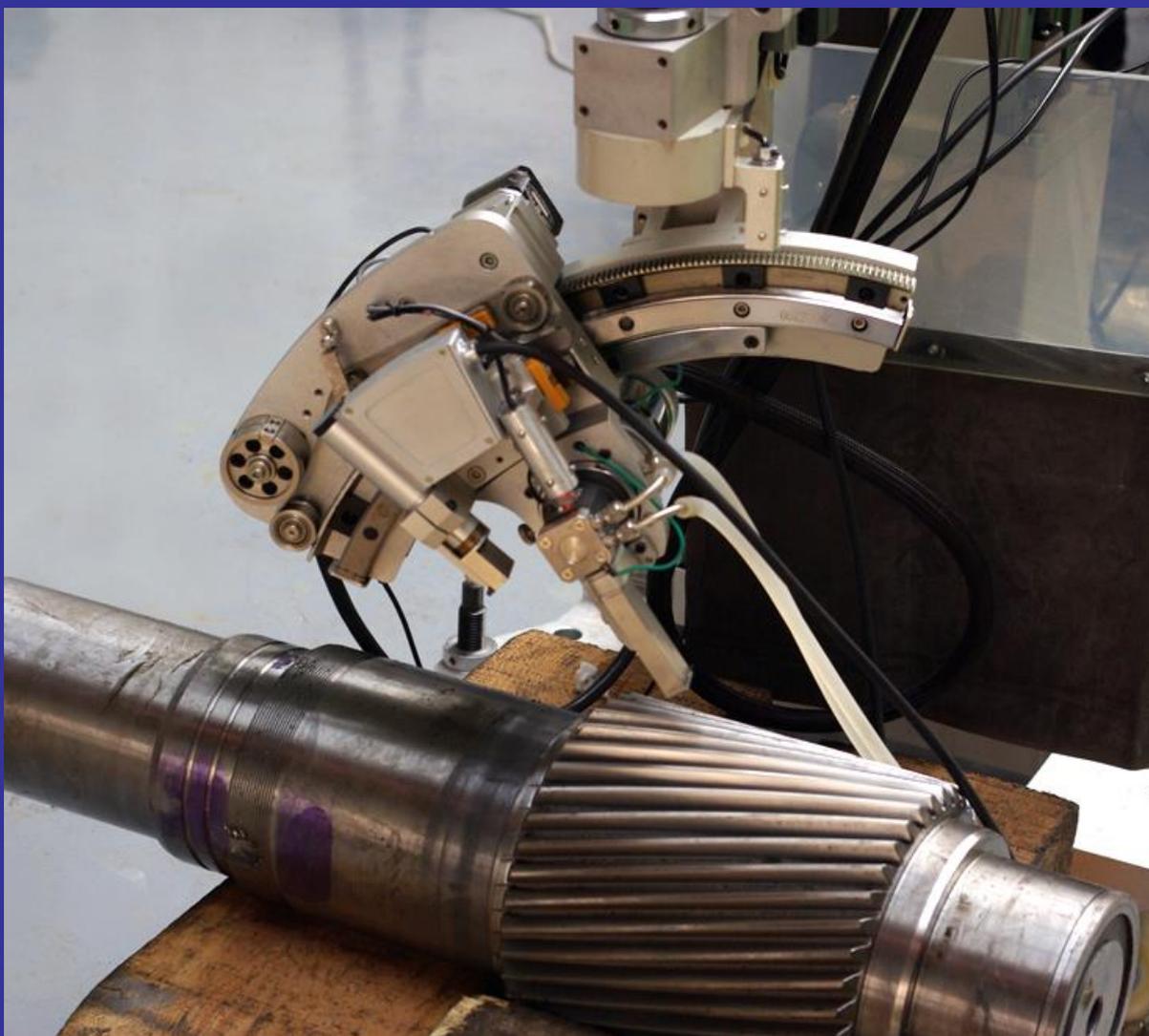
反射路径
相等

且与入射
路径相等

同倾法，特别是非对称结构的同倾测角仪尚有其独特的应用场合。

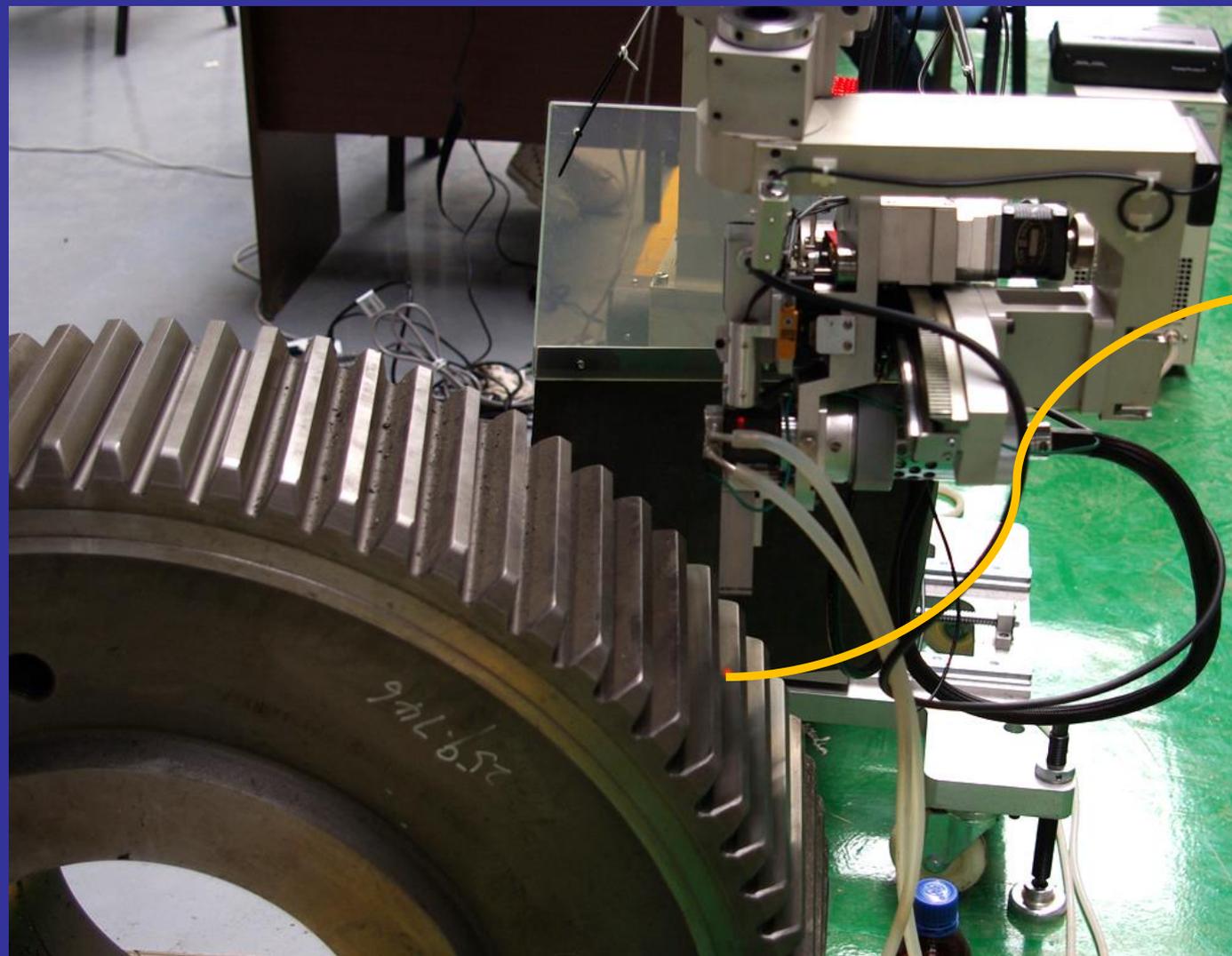


测定直角焊缝
及其热影响区应力



测定齿根部位，齿槽方向应力

测定大齿轮齿面部位，齿槽方向应力



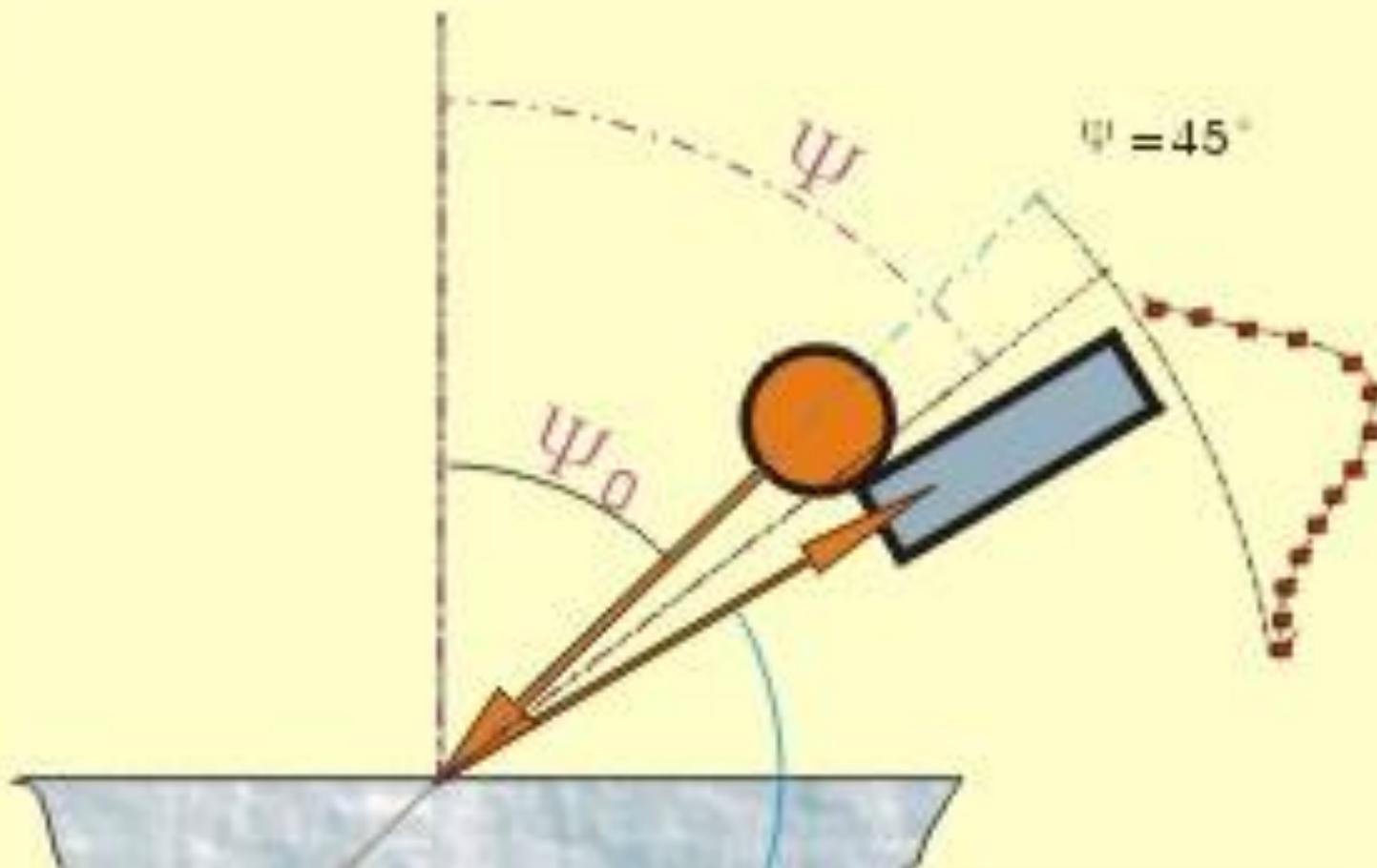
测试点

固定 Ψ_0 法 与 固定 Ψ 法

X 射线应力测定方法简介
之 二

固定 Ψ_0 法



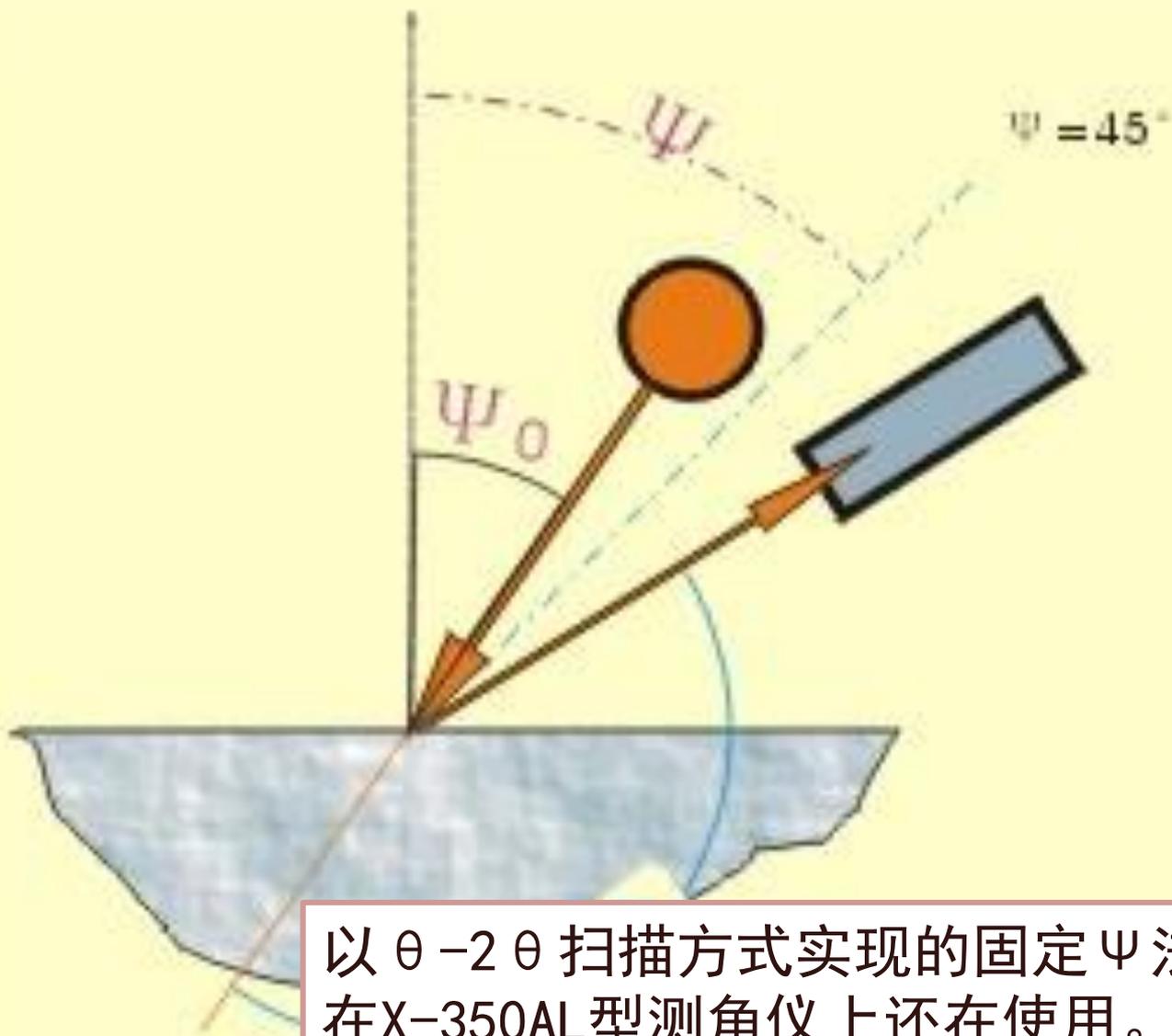


在整个扫描过程中，X射线管保持不动，而衍射晶面法线却是在改变的，这与测量原理有某种偏差；也可以说参加衍射的晶粒是有所改换的，对于有一定织构的材料，会带来衍射峰的异常变化。

固定 Ψ 法

$\Theta - \Psi \Theta$ 扫描



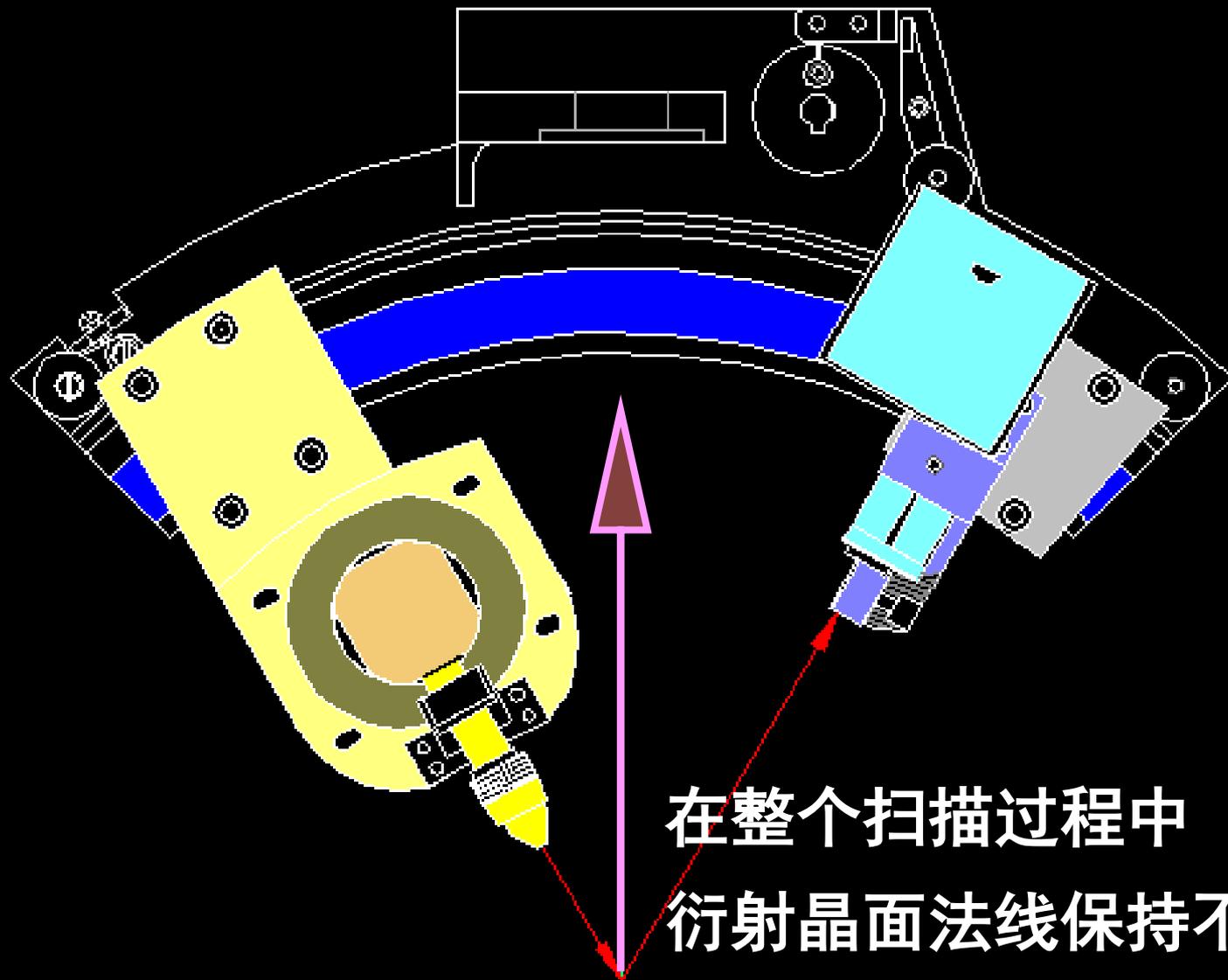


以 $\theta - 2\theta$ 扫描方式实现的固定 ψ 法，
在X-350AL型测角仪上还在使用。

固定 Ψ 法

$\Theta - \Theta$ 扫描





在整个扫描过程中
衍射晶面法线保持不动!

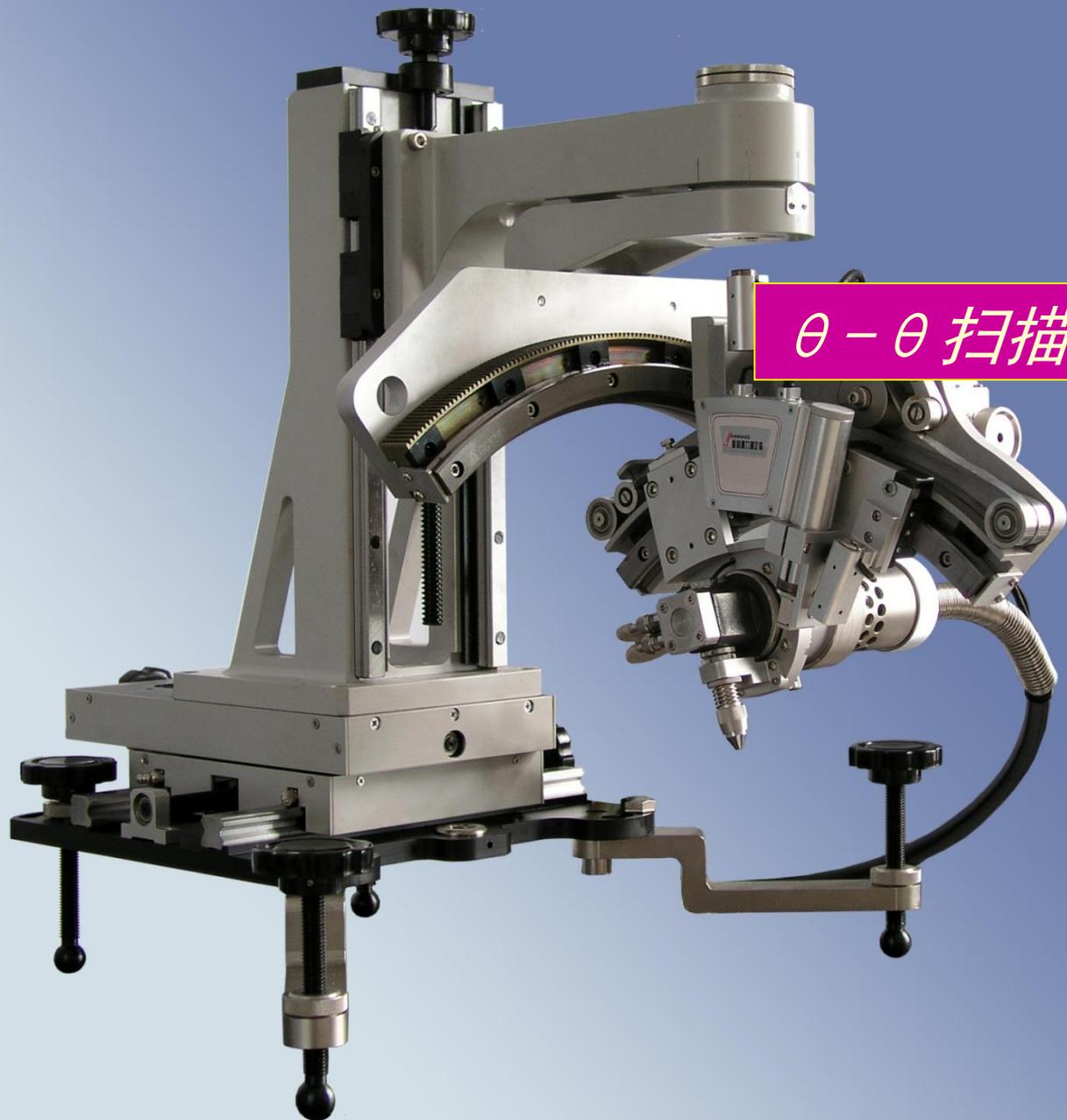
准确地实现了固定 ψ 法



θ - θ 扫描 ψ 测角仪

的功能与结构

$\theta - \theta$ 扫描 ψ 测角仪



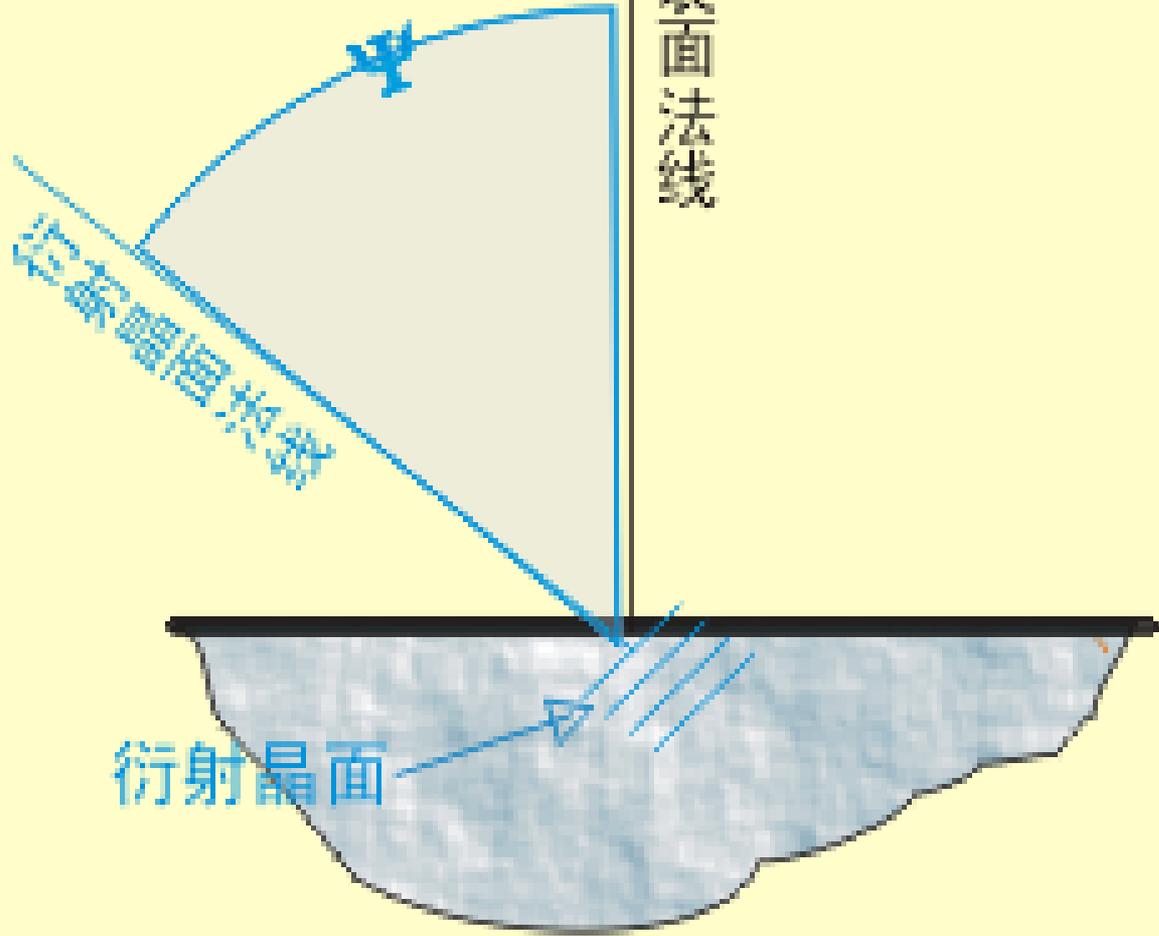
$\theta - \theta$ 扫描 Ψ 测角仪

直接实现的测量方法是

侧倾固定 Ψ 法

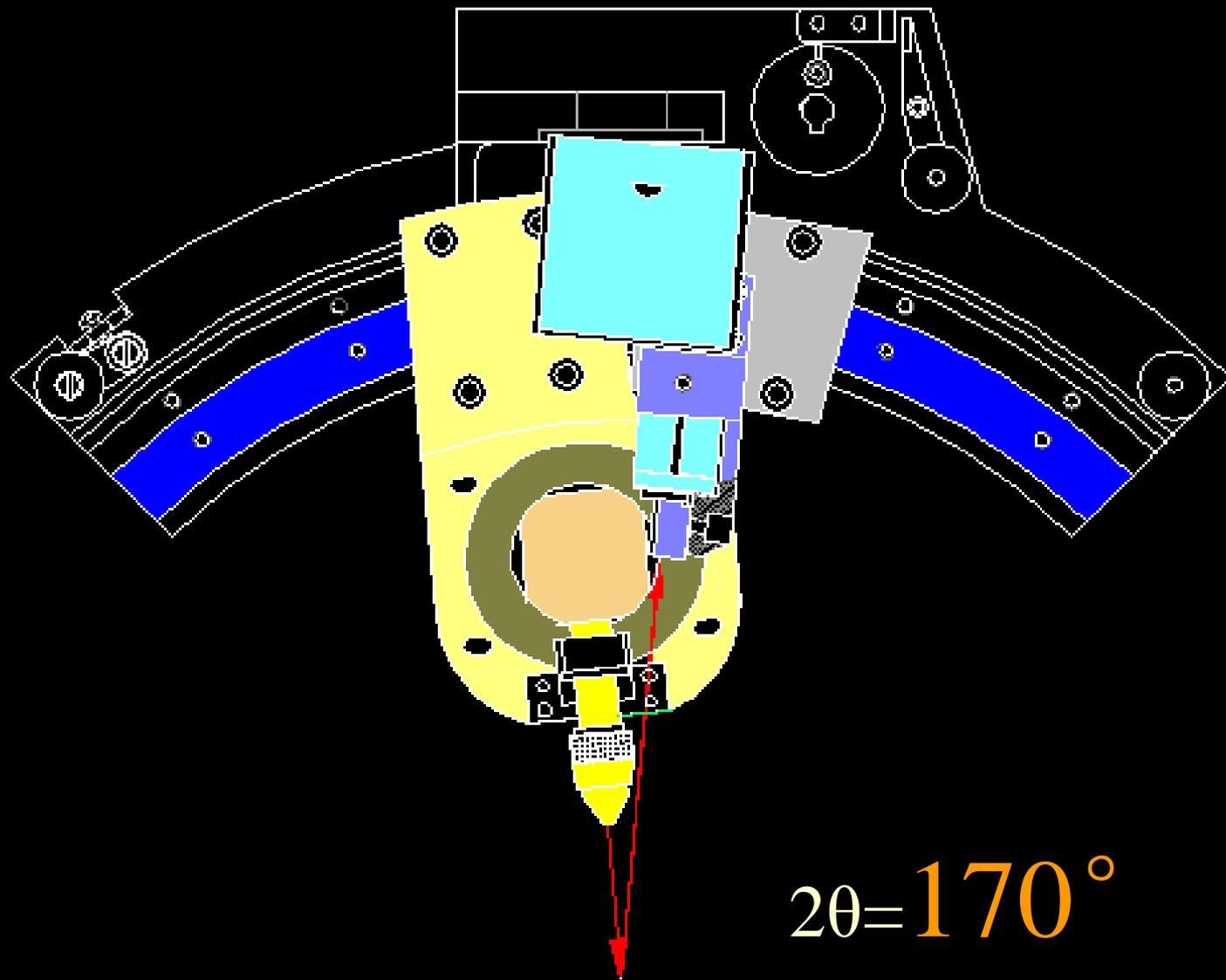
—— 最理想的测量方法

试样表面法线

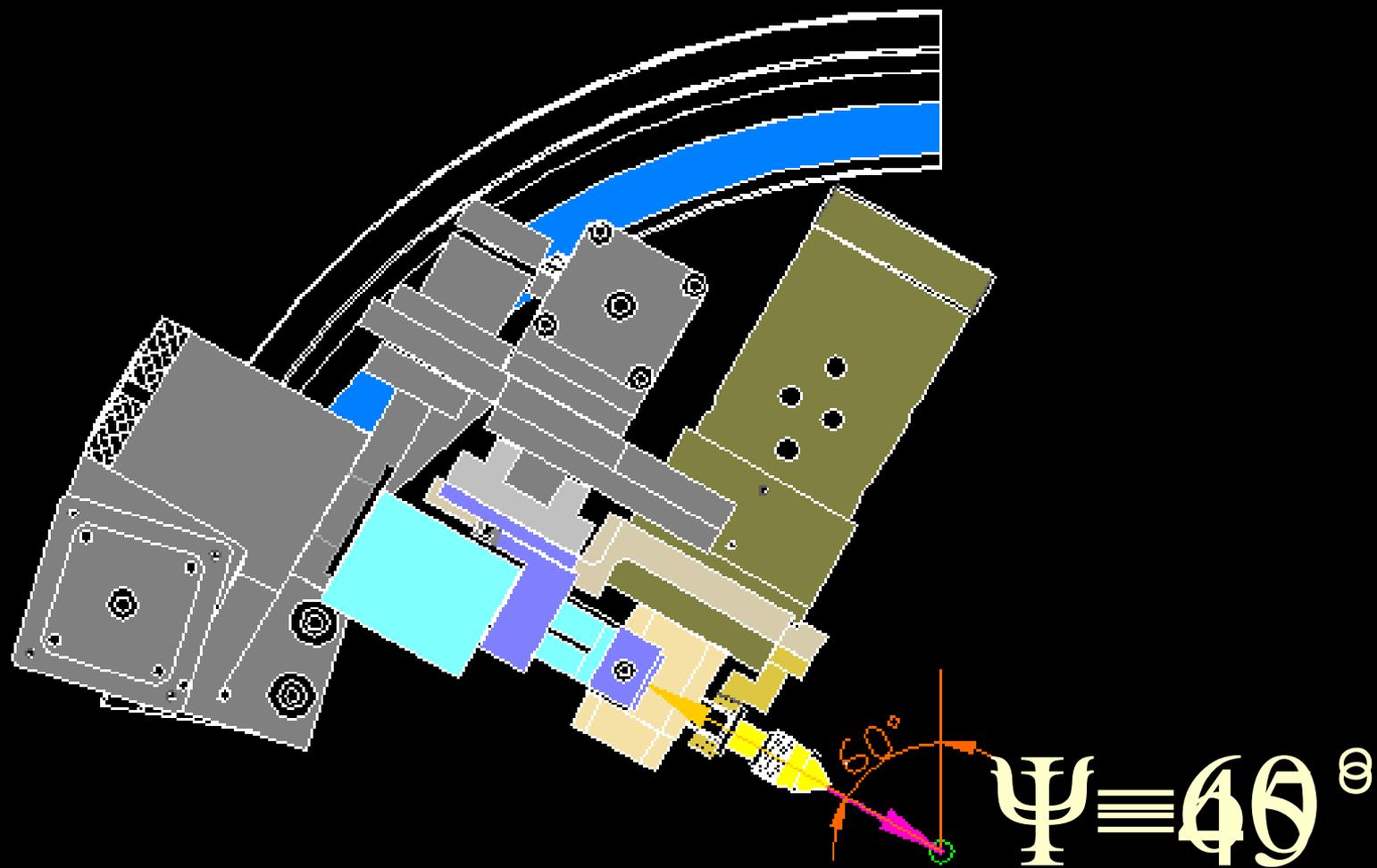


X射线

衍射晶面



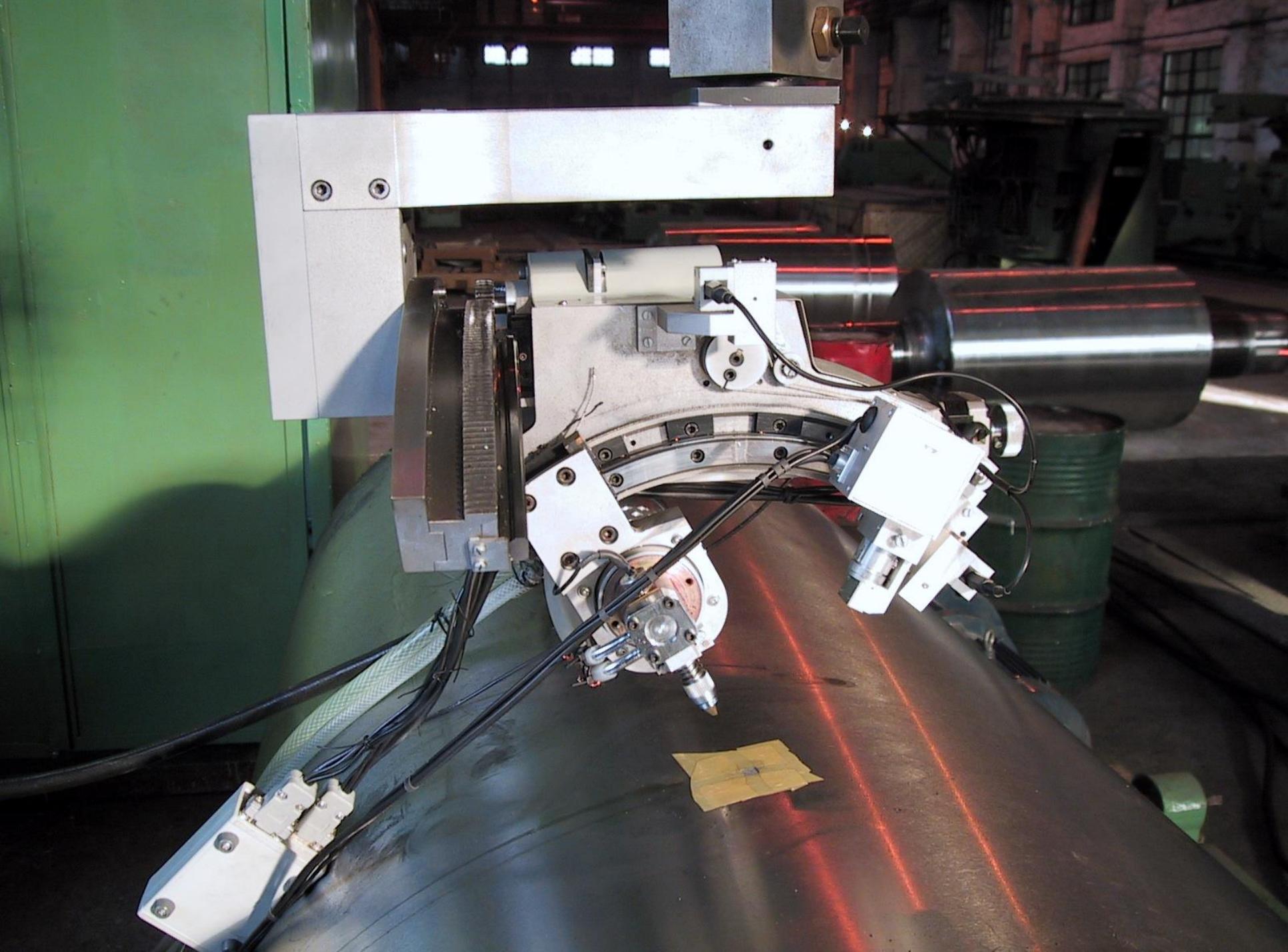
④ - θ 扫描示意动画

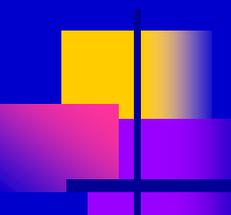


Ψ 运动示意动画

$\theta - \theta$ 扫描 Ψ 测角仪的功能特点

- 吸收因子恒等于1。无论衍射峰敏锐还是漫散，也不管 Ψ 角如何变化，衍射峰都不会倾斜，峰形基本对称。这对于提高测量精度十分有利。
- 允许设置较宽的 2θ 扫描范围，例如 $120^\circ \sim 170^\circ$ 。对不同的材料，可以选择更合适的衍射峰进行应力测定。测定残余含量方便快捷，重复性好。
- 允许设置较宽的 Ψ 范围，例如 $0^\circ \sim 60^\circ$ ，这也有利提高测量精度。
- 固定 Ψ 法准确体现衍射原理，对粗晶和织构材料的应力测定大有好处。
- 聚焦法的衍射几何可以提高衍射强度。





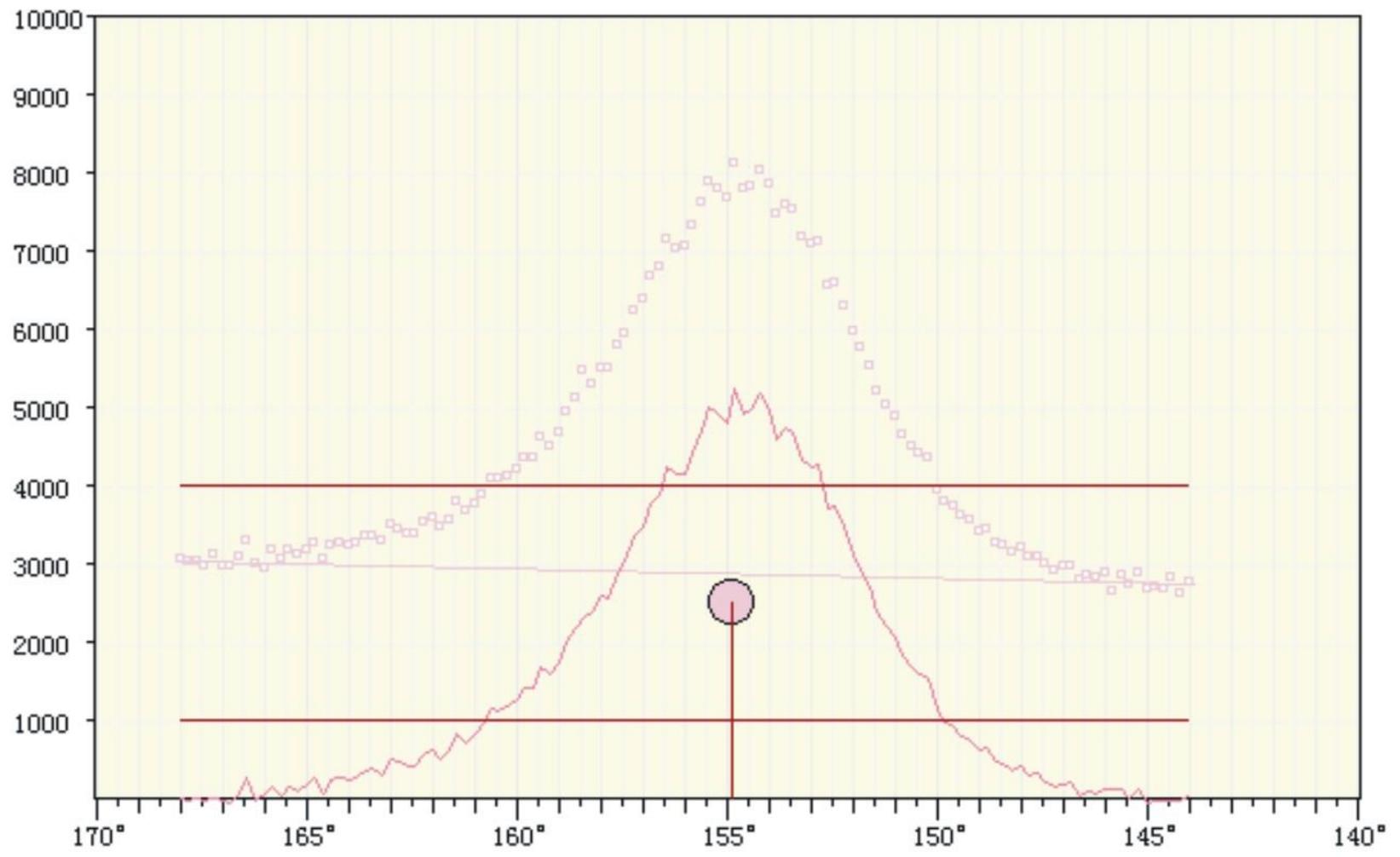
定峰方法

半高宽法

抛物线法

重心法

交相关法



160°

155°

150°

Cross-correlation method

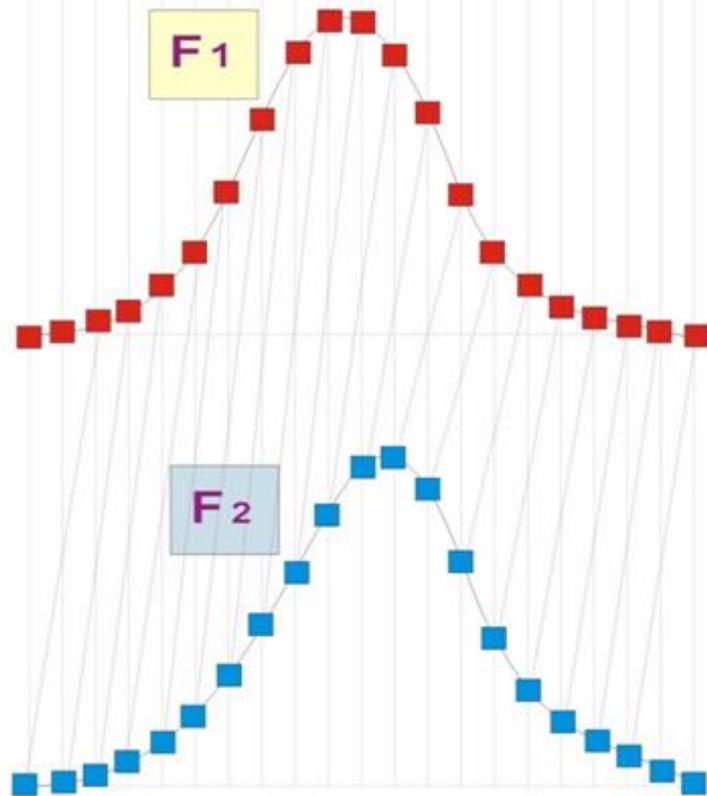
交相关法

——确定衍射峰位移的方法

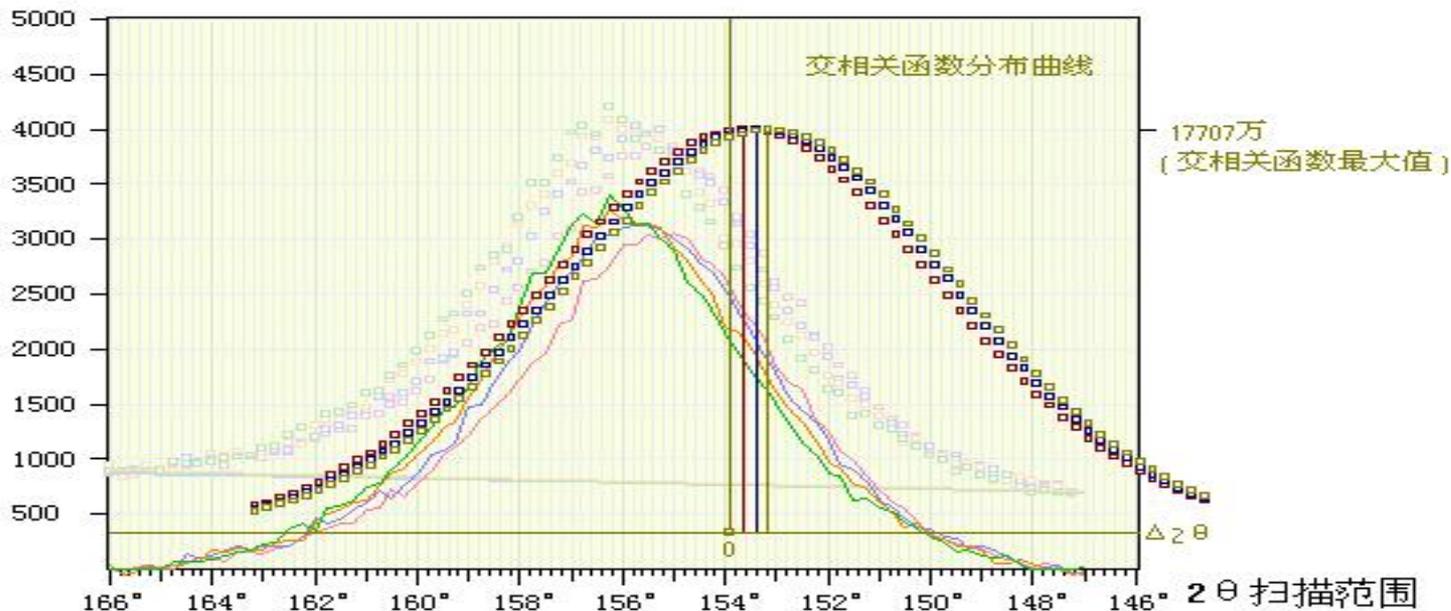
交相关法图解

Cross-correlation method

$$\Phi(k\delta) = \sum F_1(2\theta) \cdot F_2(2\theta + k\delta)$$



计数



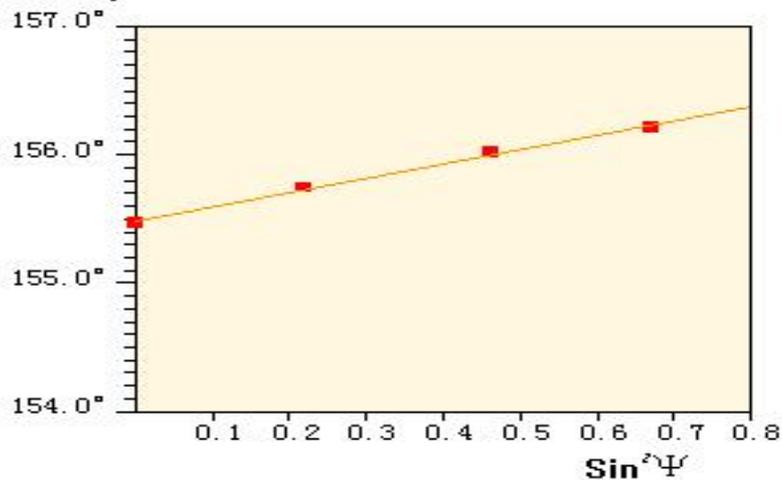
测量结果

Ψ	0.0°	28.0°	43.0°	55.0°
$2\theta_p$	155.479°	155.754°	156.021°	156.221°
峰值计数	3036	3121	3201	3285
半高宽度	6.03°	6.11°	6.08°	5.89°
积分强度	20197	21261	21456	21547
积分宽度	6.65°	6.81°	6.70°	6.56°

应力值 σ **-352 MPa** 误差 $\Delta\sigma$ **± 13 MPa**

[评述:]

$2\theta_p$



测量参数

对结果的影响

测量参数

扫描范围

扫描步距

计数时间

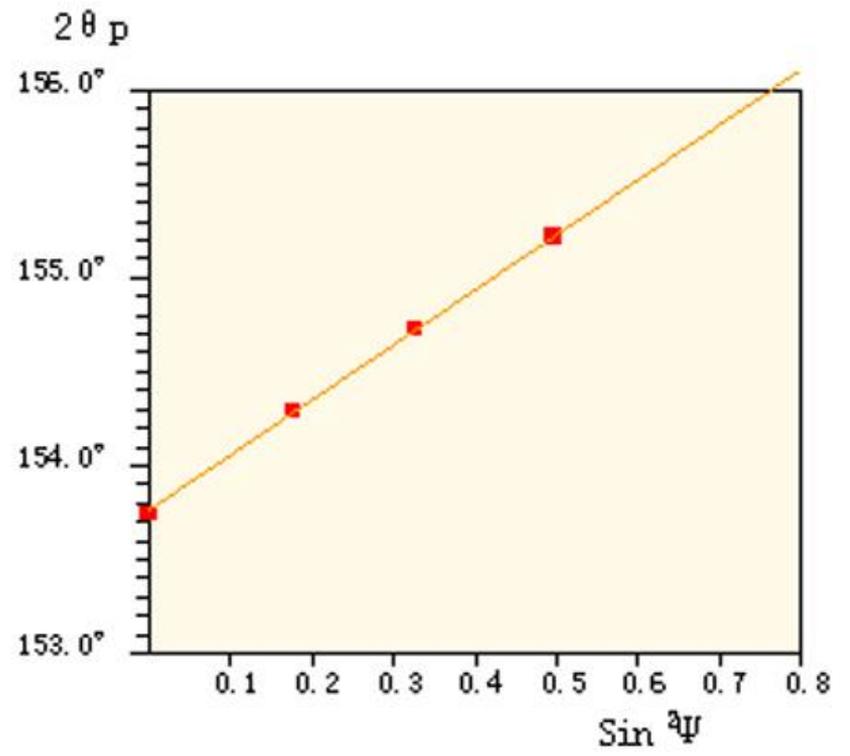
定峰方法

计数
5000

测量结果

Ψ	0.0°	25.0°	35.0°	45.0°
$2\theta_p$	153.753°	154.296°	154.737°	155.228°
峰值计数	2235	2427	2415	2394
半高宽度	8.43°	8.10°	7.97°	8.00°
积分强度	21515.6	22037.8	21731.6	21385.0
积分宽度	9.63°	9.08°	9.00°	8.93°

应力值 σ **-938 MPa** 误差 $\Delta\sigma$ ± 7 MPa



测试结果准确可靠

168°

165° 160° 155° 150° 145°

2θ 扫描范围

142°

扫描范围应当能够得到完整的衍射峰，衍射曲线两侧尾部与背底线相切。
扫描步距此处取的是0.2°；如果取0.1°，衍射曲线会更加平滑。

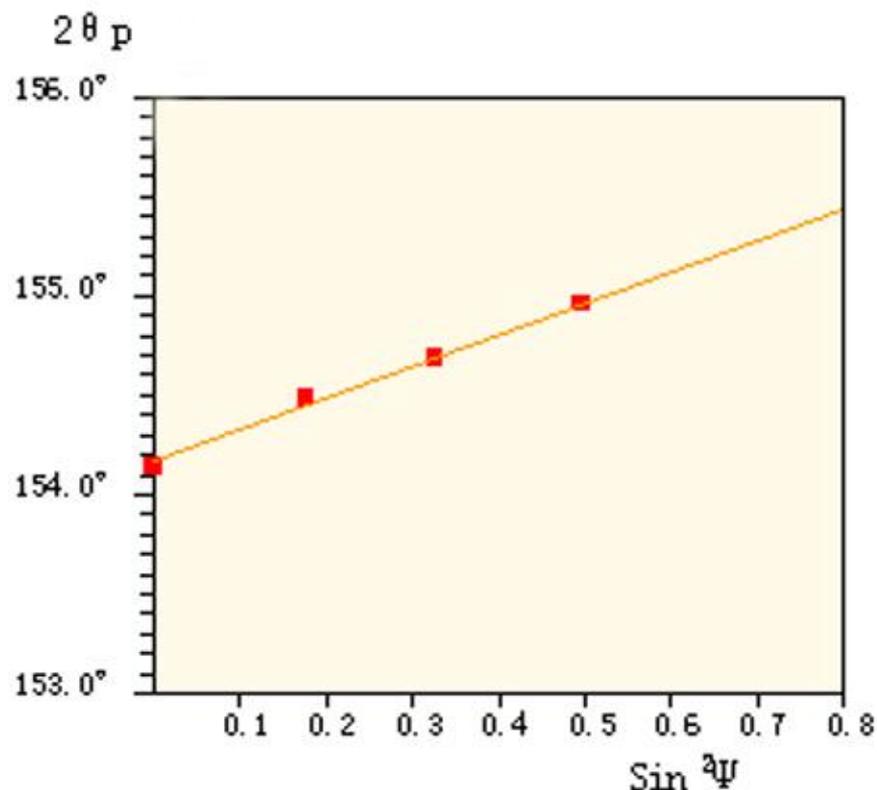
计数

测量结果

Ψ	0.0°	25.0°	35.0°	45.0°
$2\theta_p$	154.150°	154.497°	154.699°	154.963°
峰值计数	1014	1294	1475	1590
半高宽度	5.34°	5.76°	5.92°	6.07°
积分强度	5334.1	7390.4	8679.5	9600.4
积分宽度	5.26°	5.71°	5.88°	6.04°

应力值 σ **-511 MPa** 误差 $\Delta\sigma$ **± 23 MPa**

[评述:]



2θ 范围不够，产生很大的测量误差。

计数

5000

4500

有限交相关法定峰

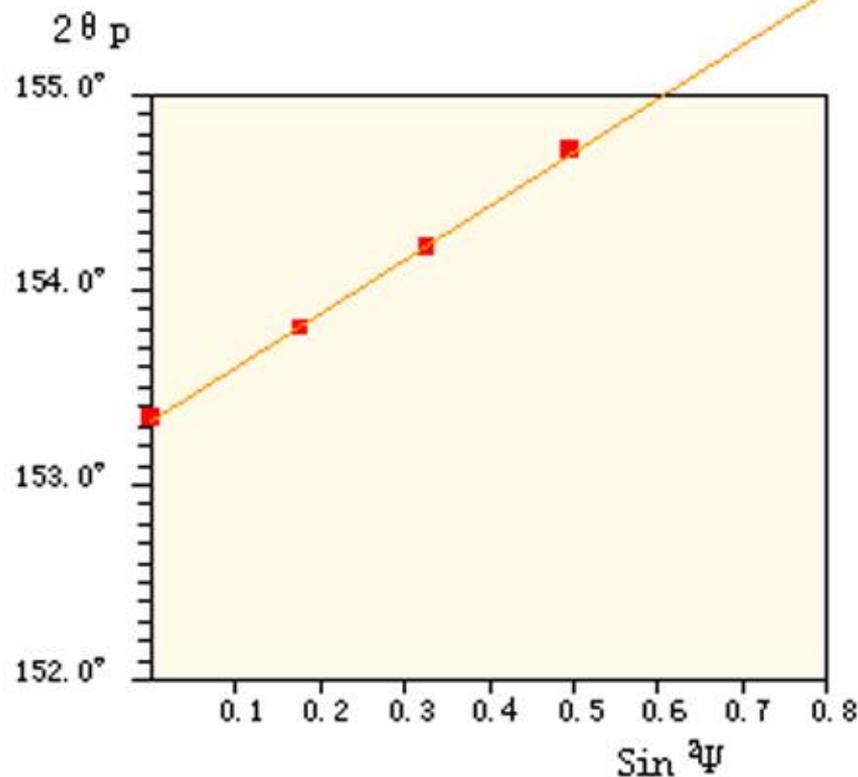


测量结果

Ψ	0.0°	25.0°	35.0°	45.0°
$2\theta_p$	153.346°	153.804°	154.223°	154.728°
峰值计数	527	568	570	569
半高宽度				
积分强度	1755.8	1678.0	1734.7	1775.6
积分宽度	3.33°	2.95°	3.04°	3.12°

应力值 σ	-880 MPa	误差 $\Delta \sigma$	± 17 MPa
--------------	----------	--------------------	----------

[评述:]



在扫描范围不足的情况下，如果改变定峰方法，还可以获得较为准确的计算结果。

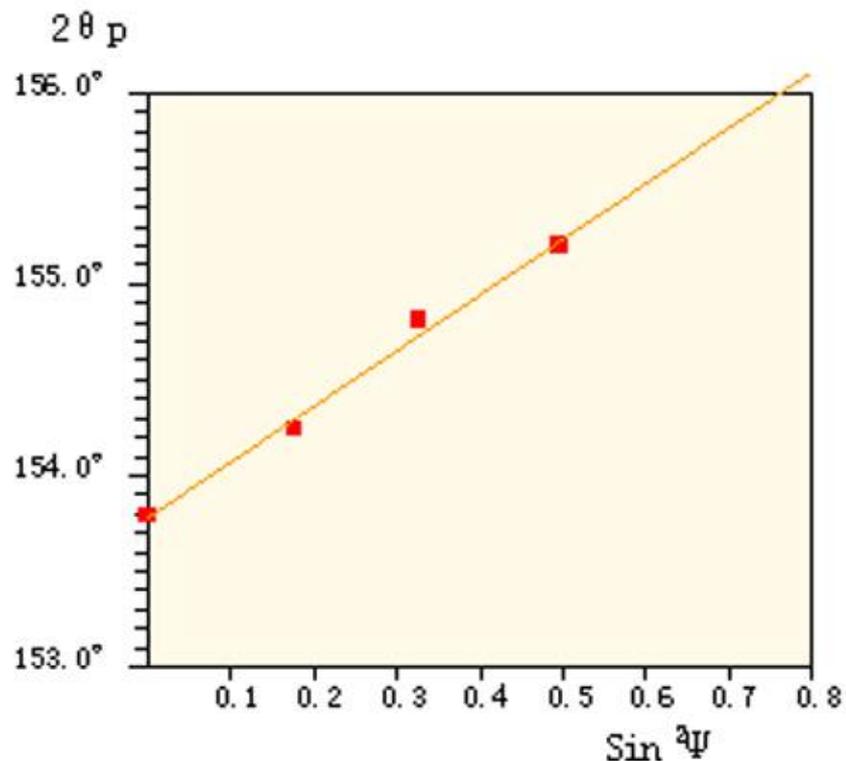
一个条件：侧倾固定 Ψ 法，真正的衍射峰背底基本上平行于横坐标。

测量结果

Ψ	0.0°	25.0°	35.0°	45.0°
$2\theta_p$	153.800°	154.251°	154.822°	155.210°
峰值计数	221	236	235	239
半高宽度	8.35°	8.42°	7.82°	8.08°
积分强度	21324.0	23312.0	21078.0	21562.0
积分宽度	96.49°	98.78°	89.69°	90.22°

应力值 σ -923 MPa 误差 $\Delta\sigma$ **± 50 MPa**

[评述:]



2θ 扫描范围

计数时间太短，衍射峰太弱，产生较大的偶然误差。

X射线衍射法

残余奥氏体含量

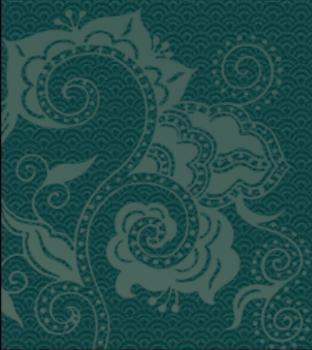
测定原理与方法



什么是奥氏体？

这要从晶体学说起。

简单的晶体学知识



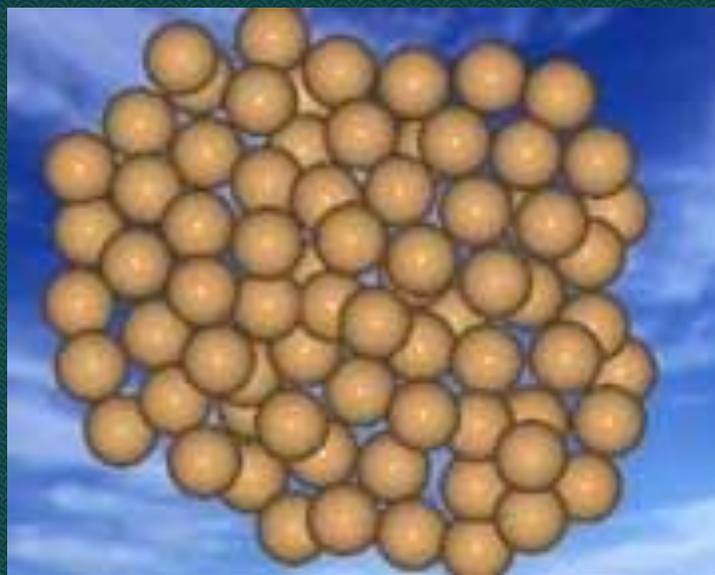
宇宙里的固体物质分为晶体和非晶体。

由分子、原子或离子是按规则排列组成的物体叫做**晶体**。



晶体

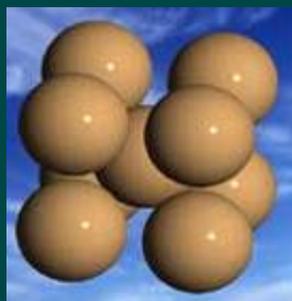
由分子、原子或离子是无规则排列组成的物体叫做**非晶体**。



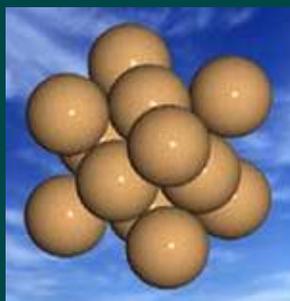
非晶体

对于晶体，把分子、原子或离子排列的规律抽象出来，就形成了所谓**点阵**。

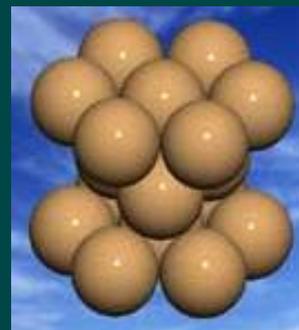
能代表点阵排列花样和规律的最小单元叫作**晶胞**。



体心立方



面心立方



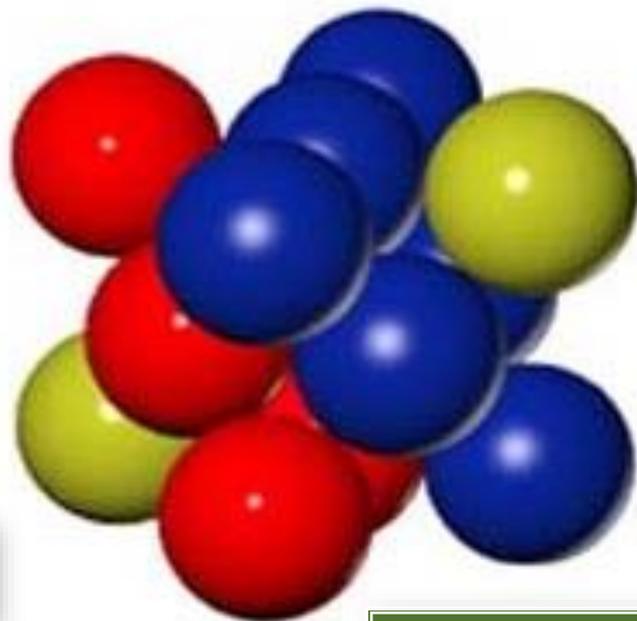
密排六方



体心立方

α -Fe、Mo、W、
V、Cr、 β -Ti

碳原子间隙式融入 α -Fe
的体心立方晶格中形成的
固溶体叫做**铁素体**。

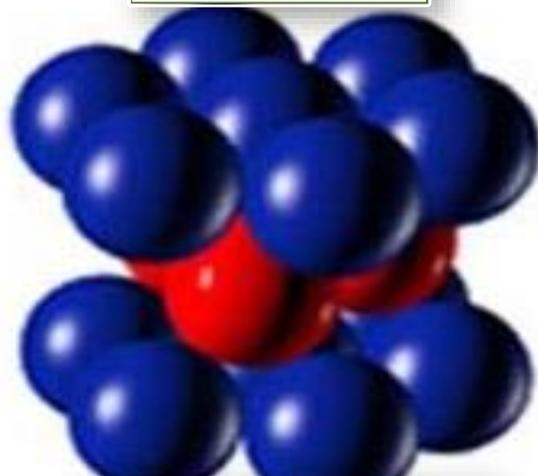


面心立方

γ -Fe、Al、Cu、
Ni、Au、Ag

碳原子间隙式融入 γ -Fe
的面心立方晶格中形成的
固溶体叫做**奥氏体**。

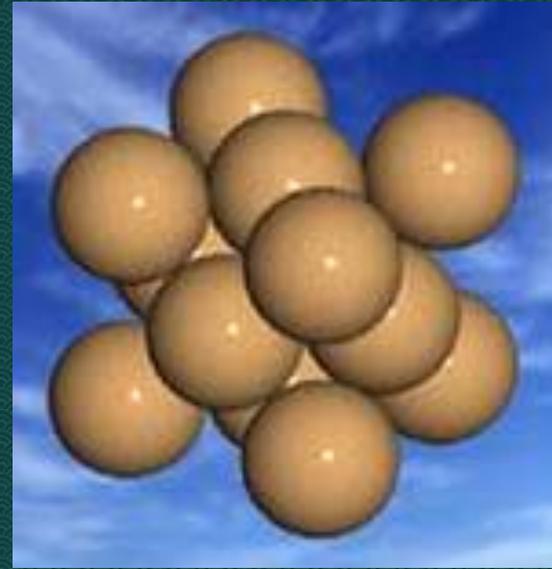
密排六方



Mg、Zn、Be、
Co、 α -Ti



体心立方



面心立方

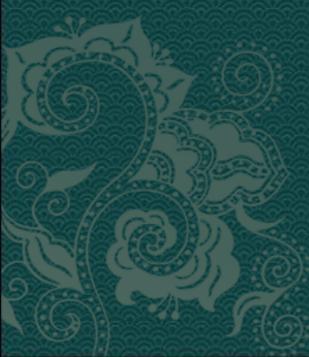
同是铁原子，可以按体心立方模式排列（左图），生成 α -Fe，也成为铁素体；也可以按照面心立方模式排列（右图），生成 γ -Fe，也叫奥氏体。这两种晶体叫做同素异晶体。

只不过，一般情况下奥氏体是高温组织；当钢中镍、铬元素有足够含量的情况下才能在室温得到奥氏体，例如Cr18Ni9奥氏体不锈钢。

某些合金钢或铸铁，从高温奥氏体状态快速冷却的时候，原来奥氏体当中溶解的碳原子来不及析出并生成渗碳体，面心立方瞬间直接转变成体心立方组织，碳原子过饱和地溶入其中，这就是马氏体组织。

但是，由于动力学原因，这个转变往往是不彻底的，会有奥氏体组织残留下来，这便是残余奥氏体。

钢中残余奥氏体含量对于某些机械零部件的使用性能有着重要影响。

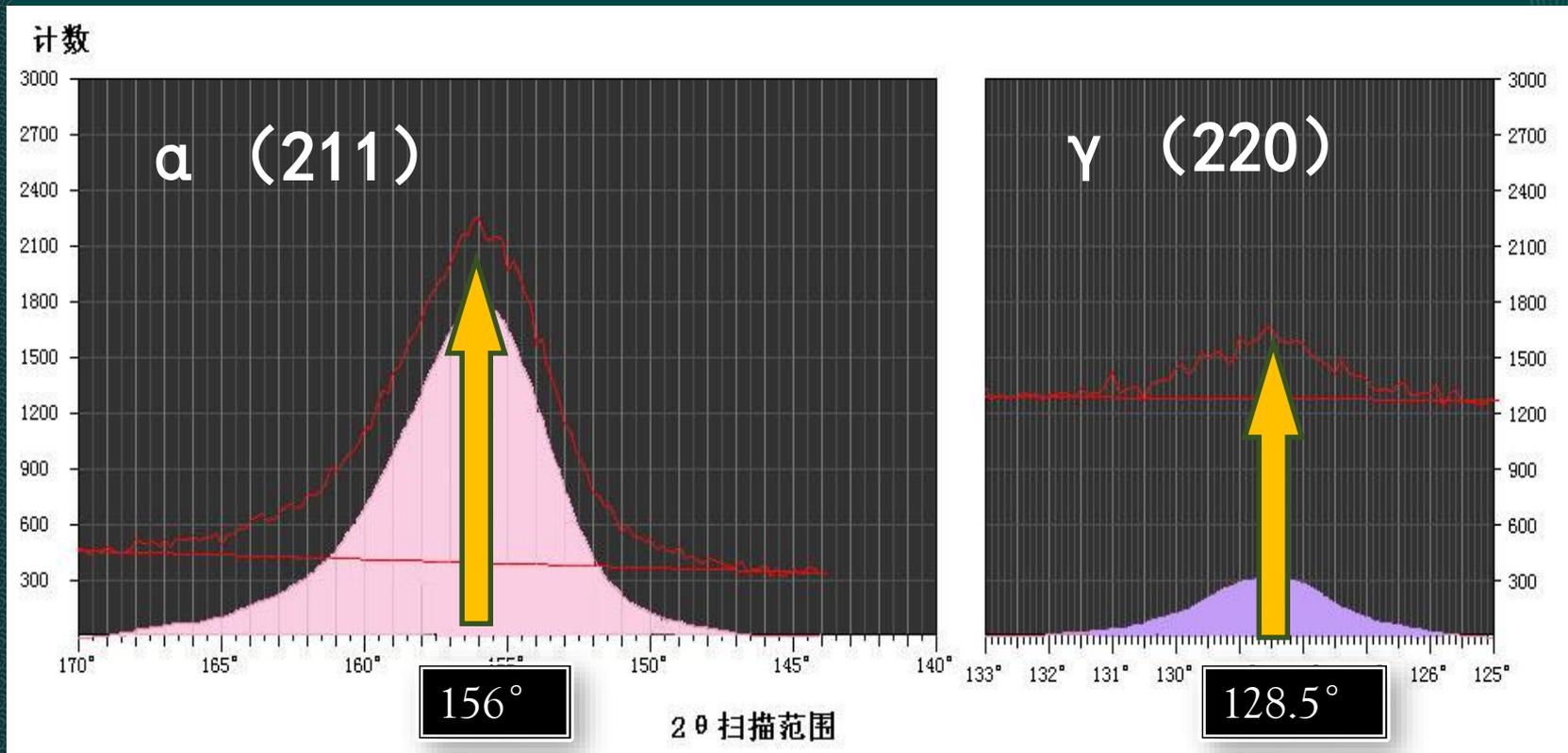


测量原理

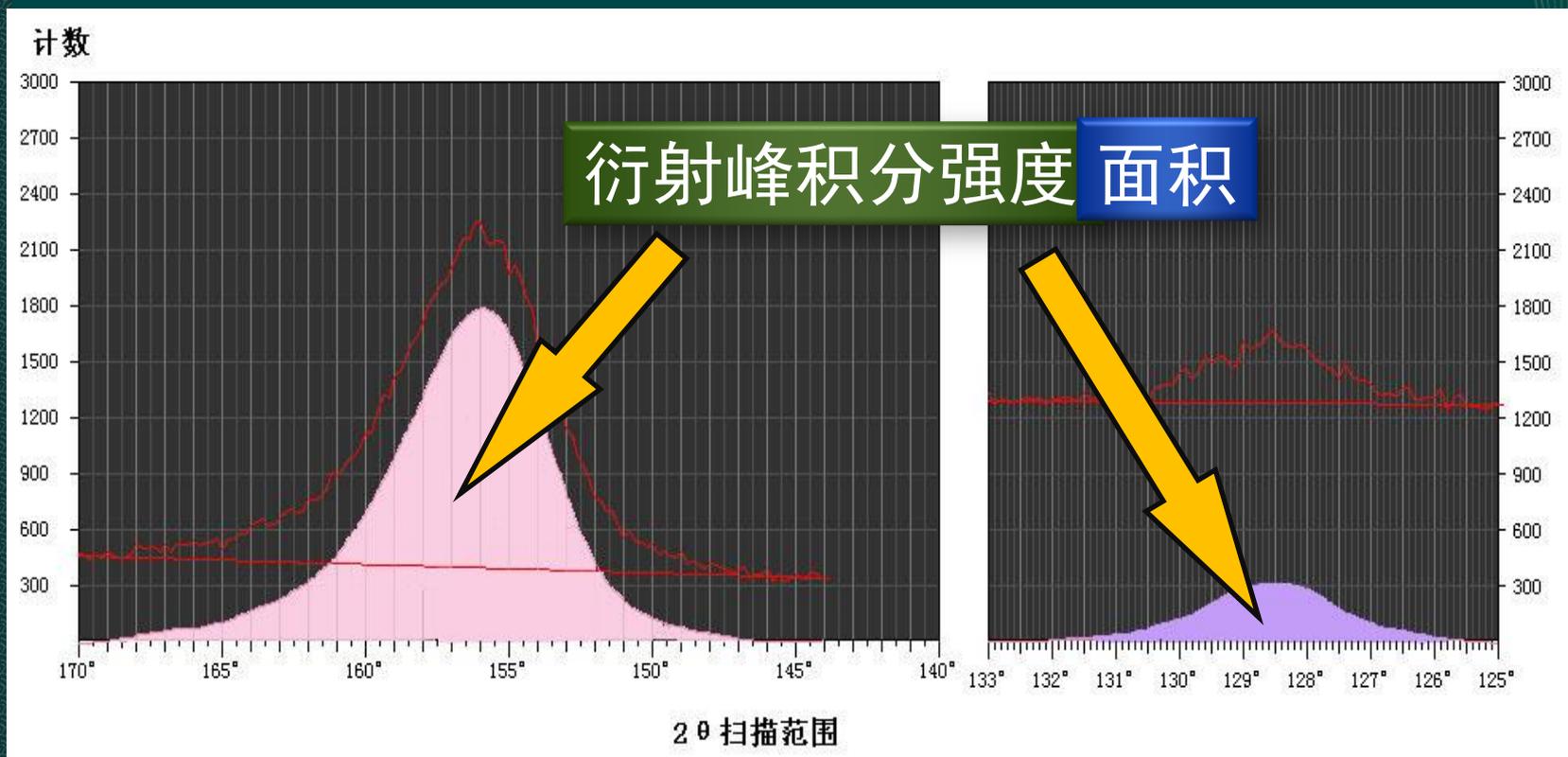
测定钢中残余奥氏体含量依据的是X射线衍射原理。

如果说测定残余应力是依据衍射线方向的话，那么测定残奥含量依据的则是衍射线的强度。

当钢中存在 α 、 γ 两相时，一束单色X射线照射在它上面，遵从布拉格定律，这两相会分别在不同的角度上产生衍射峰。

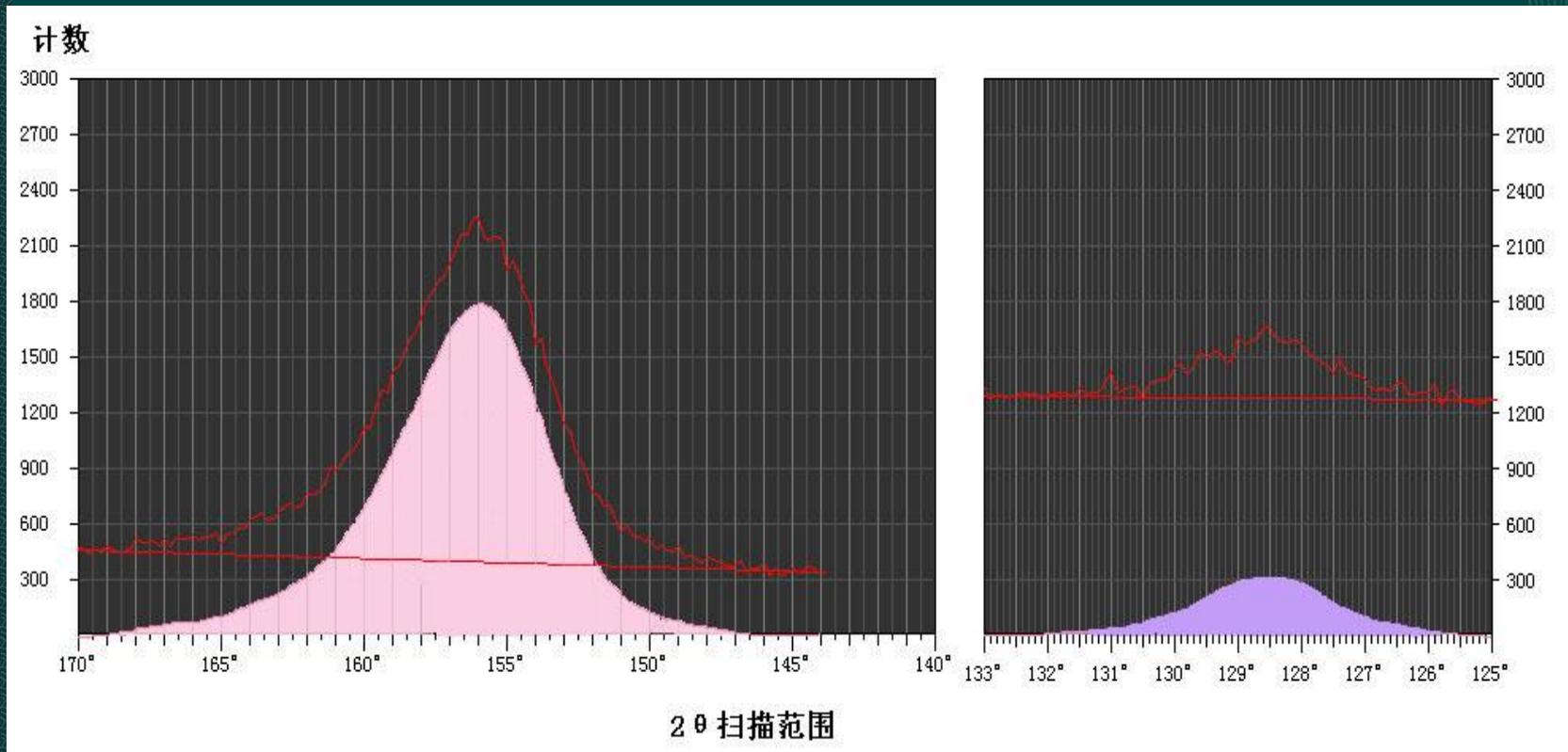


使用CrK α 辐射，
 α (211) 晶面在 156° 左右产生衍射峰，
 γ (220) 晶面在 128.5° 左右产生衍射峰。



这两个衍射峰的大小和强弱，用衍射峰积分强度来描述。衍射峰积分强度，即净峰轮廓线之下的面积。

这两个衍射峰的积分强度，分别与该两相参与衍射的体积百分比成正比。



是否可以直接用这两个面积来计算探们的相对含量呢？

换句话说，如果这两相（马氏体和奥氏体）含量各占50%，那么他们对应的两个衍射峰面积是否相等的呢？

答案是否定的。



这是因为，这两相的晶体结构不同，马氏体是体心立方，而奥氏体是面心立方，衍射晶面更不可能相同，产生衍射峰的角度也不同。各种物理和几何因素使得它们的衍射峰积分强度不可能相等。

X射线衍射运动学理论从一个电子对于入射的单色X射线的散射出发，一步步地研究一个原子的散射，一个晶胞的散射，直至多晶体的散射，最后推导出了衍射线积分强度公式。根据这个公式计算，如果马氏体和奥氏体含量各占50%，那么他们对应的两个衍射峰积分强度之比大体为4：1。这就是X射线残奥测定 G 因子（0.25）的来历。

残余奥氏体含量测定的计算公式

$$A_r \% = \frac{1 - C}{1 + G \frac{A_\alpha}{A_\gamma}}$$

A_α —— α 相（马氏体）衍射峰面积

A_γ —— γ 相（奥氏体）衍射峰面积

C —— 材料中碳化物的含量，可以用金相法确定。
(输入两位小数)

G —— 强度因子，本仪器取0.25.

技术和经验

- 1、应该尽量选用仪器提供的直径较大的准直管（例如 $\Phi 3\text{mm}$ ，甚至 $\Phi 4\text{mm}$ ）
- 2、马氏体（211）衍射峰的扫描范围，取 $169^\circ \sim 143^\circ$ 。
奥氏体（220）衍射峰的扫描范围：
含量在10%以上的，可以选取 $135^\circ \sim 122^\circ$ ；
如果含量较低，例如在5%以下，可以取 $131^\circ \sim 126^\circ$ ；
含量在1%以下时，应该取 $130^\circ \sim 127^\circ$ 。
- 3、 α （211）衍射峰的扫描步距一般可以选择 0.1° 或 0.2° ，在在用直径为 $\Phi 3\text{mm}$ 或 $\Phi 2\text{mm}$ 的条件下，计数时间可确定为 0.5s 或 1s ；
 γ （220）衍射峰的扫描步距可取 0.1° 或 0.05° ，计数时间则依残奥含量高低而定，含量高的，可用 1s 或 2s ，含量低的可延长至 4s 、 5s 。

测试点表面处理



- 1、表面不应该有氧化皮、污垢或磕碰划伤。
- 2、热处理零件的表面如果有稍微的脱碳就无法测出残奥。
- 3、采用线切割手段得到的截面，不可直接测定残奥。因为线切割实际上是一个快速的从熔化到凝固和相变的过程，似有固溶处理的某种效果，残奥含量会大幅度升高。
- 4、手工砂布打磨一般来说对残奥含量影响不大。但是如果使用电动砂轮作强力地疾速地打磨，则会带来意想不到的后果——残奥含量异常升高。
- 5、经过磨削的零件，须注意有无烧伤，烧伤部位无法测定残奥；还要注意的，在砂轮较钝或进刀量较大的情况下，磨削会在极表层产生明显塑性变形，这样，一来会导致某种程度的残奥转变，使含量降低；二来还会产生某种程度的磨削织构，在垂直于磨削方向和平行于磨削方向上（改变 ϕ 角），沿着若干个 ψ 角测得的残奥含量会有所不同。如果不是成品零件，建议采用电解抛光的办法去除磨削影响层。对于不可再作任何处理的成品零件，最好试验在不同的 ϕ 角和 ψ 角分别测定残奥，以观察有无磨削织构的影响。