

# 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](http://www.hdst.net)

[lvkema061015@163.com](mailto: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)  $\sigma_r^I$ 、 $\sigma_r^{II}$  和  $\sigma_r^{III}$  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。

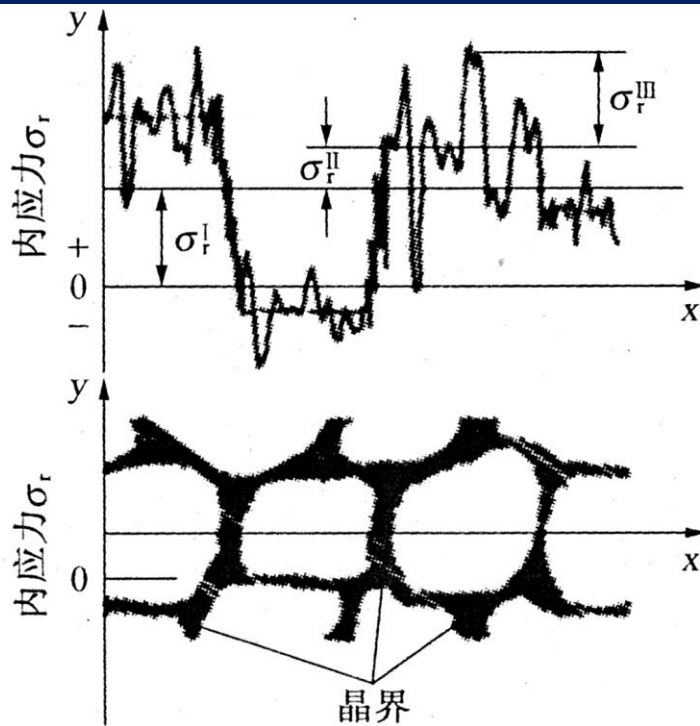


图1 内应力分类的示意图<sup>[1]</sup>

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



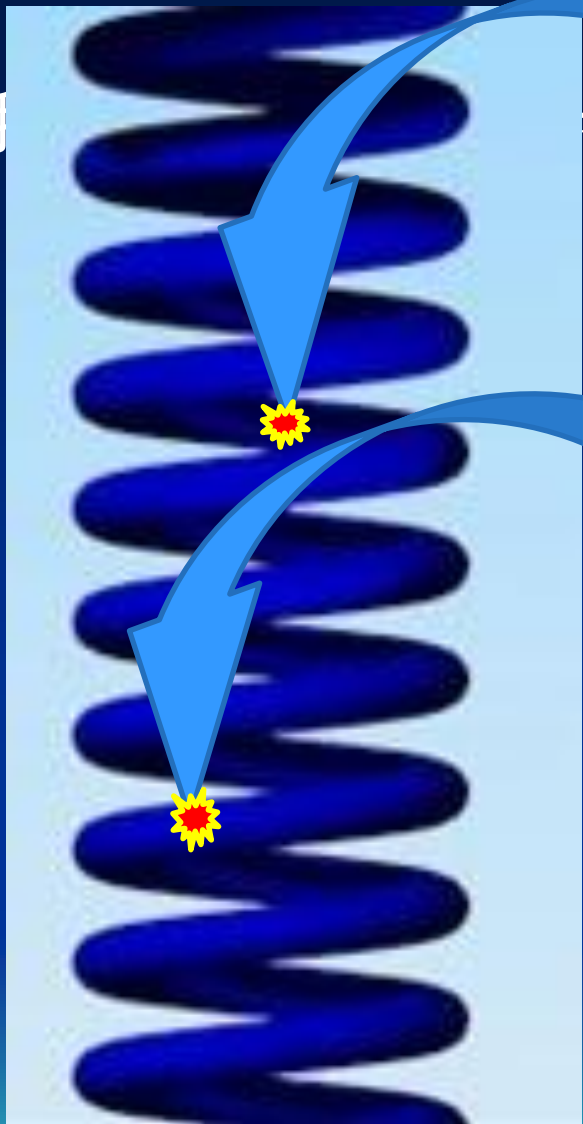
让我

卷圆柱弹簧

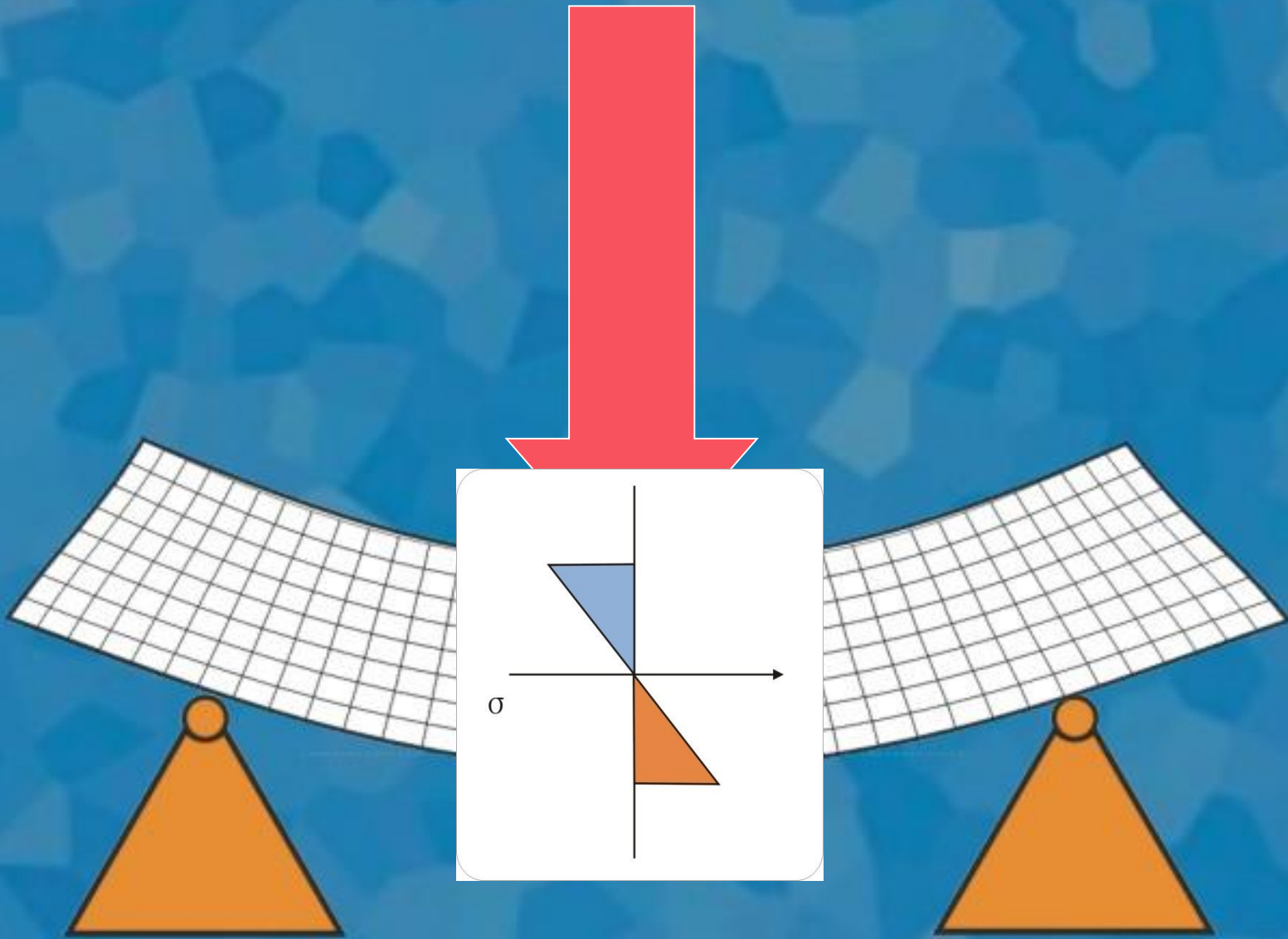
弹簧螺旋管的内壁

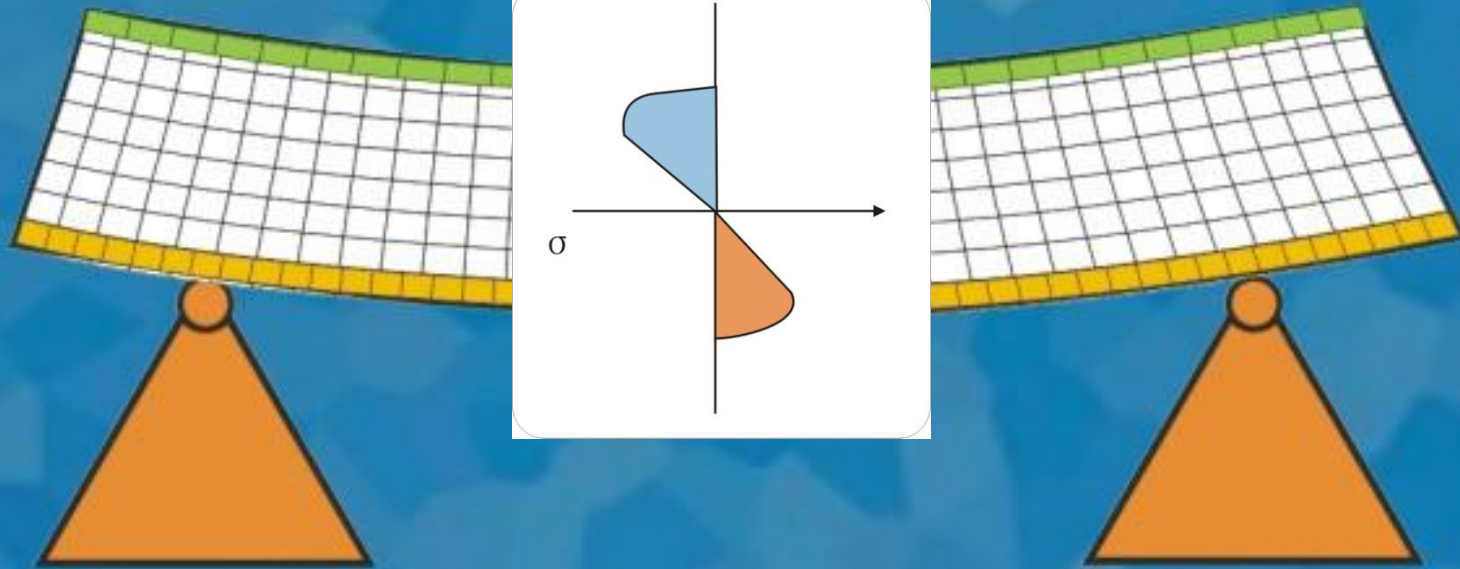
弹簧螺旋管的外壁

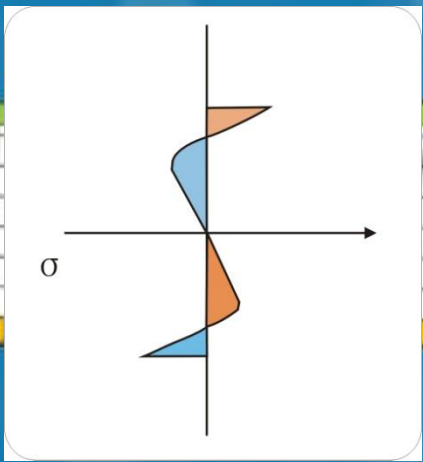
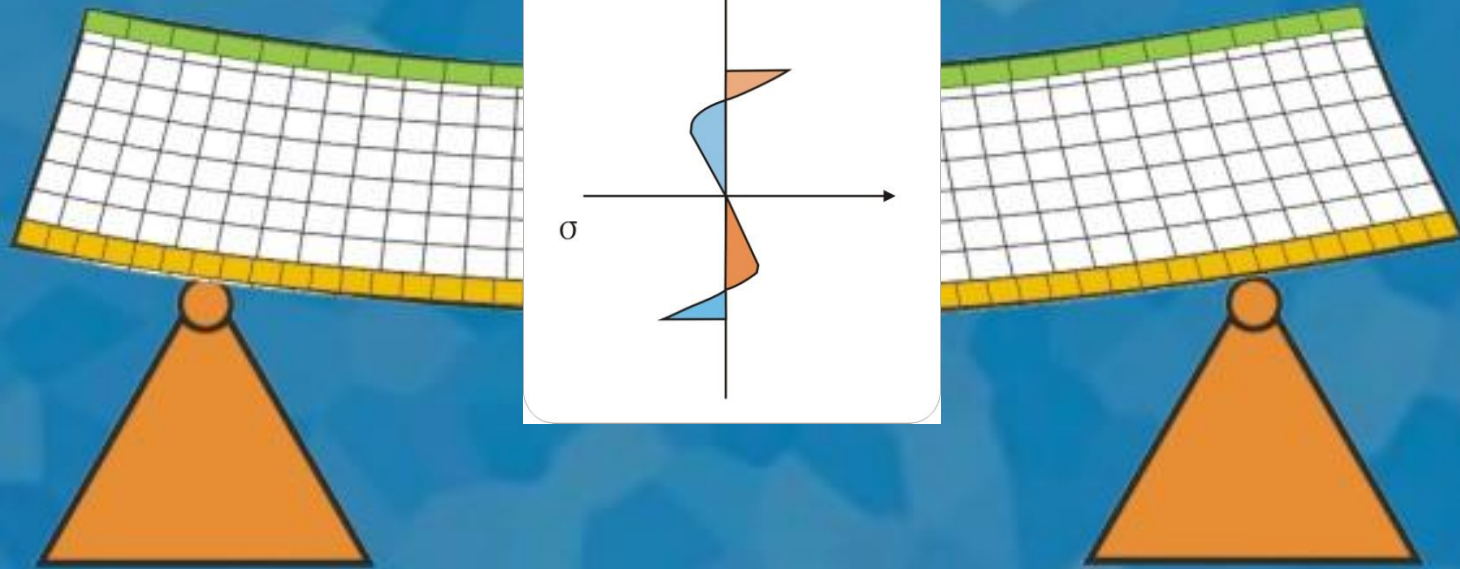
分别是什么残余应力状态？





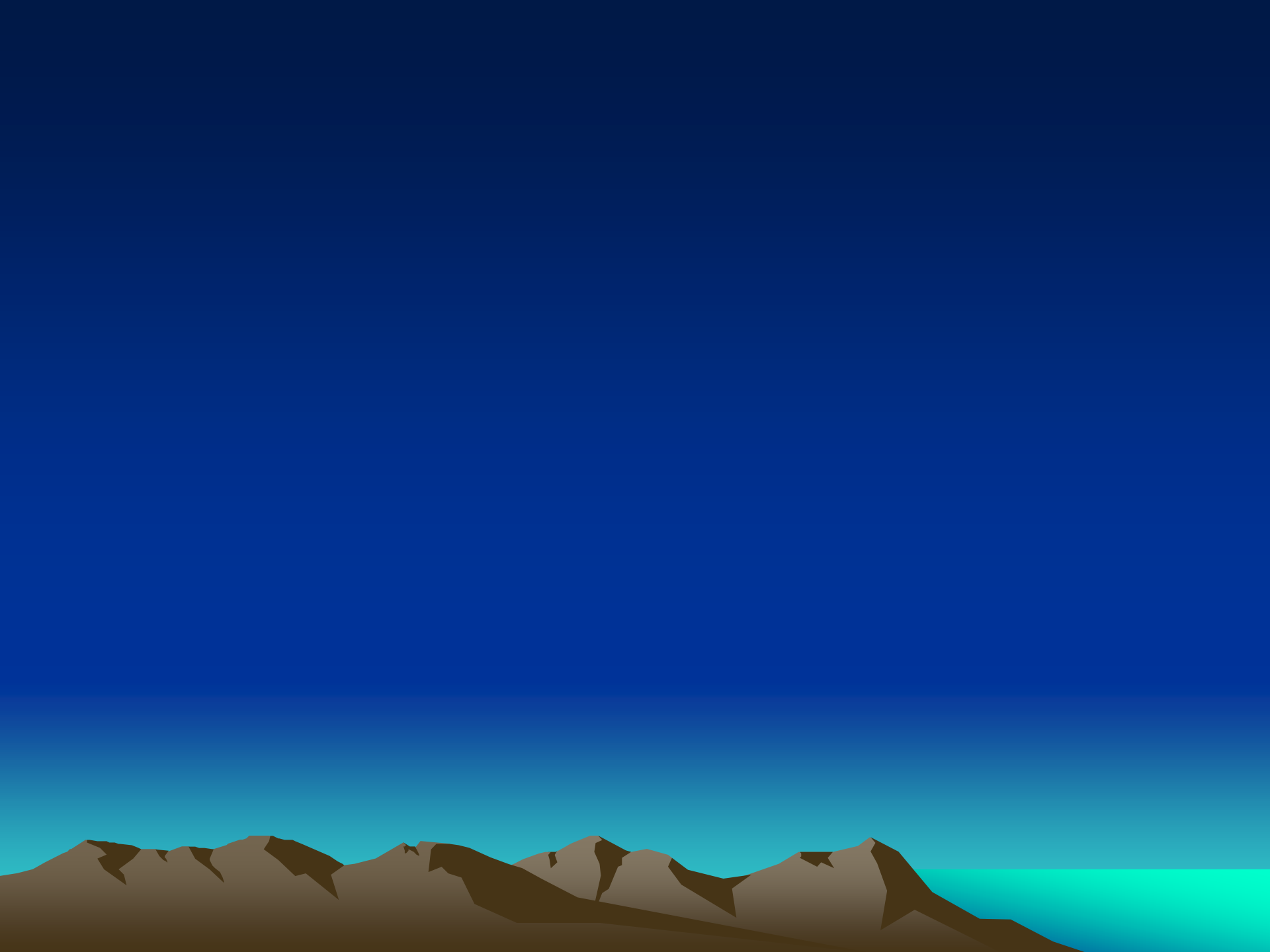




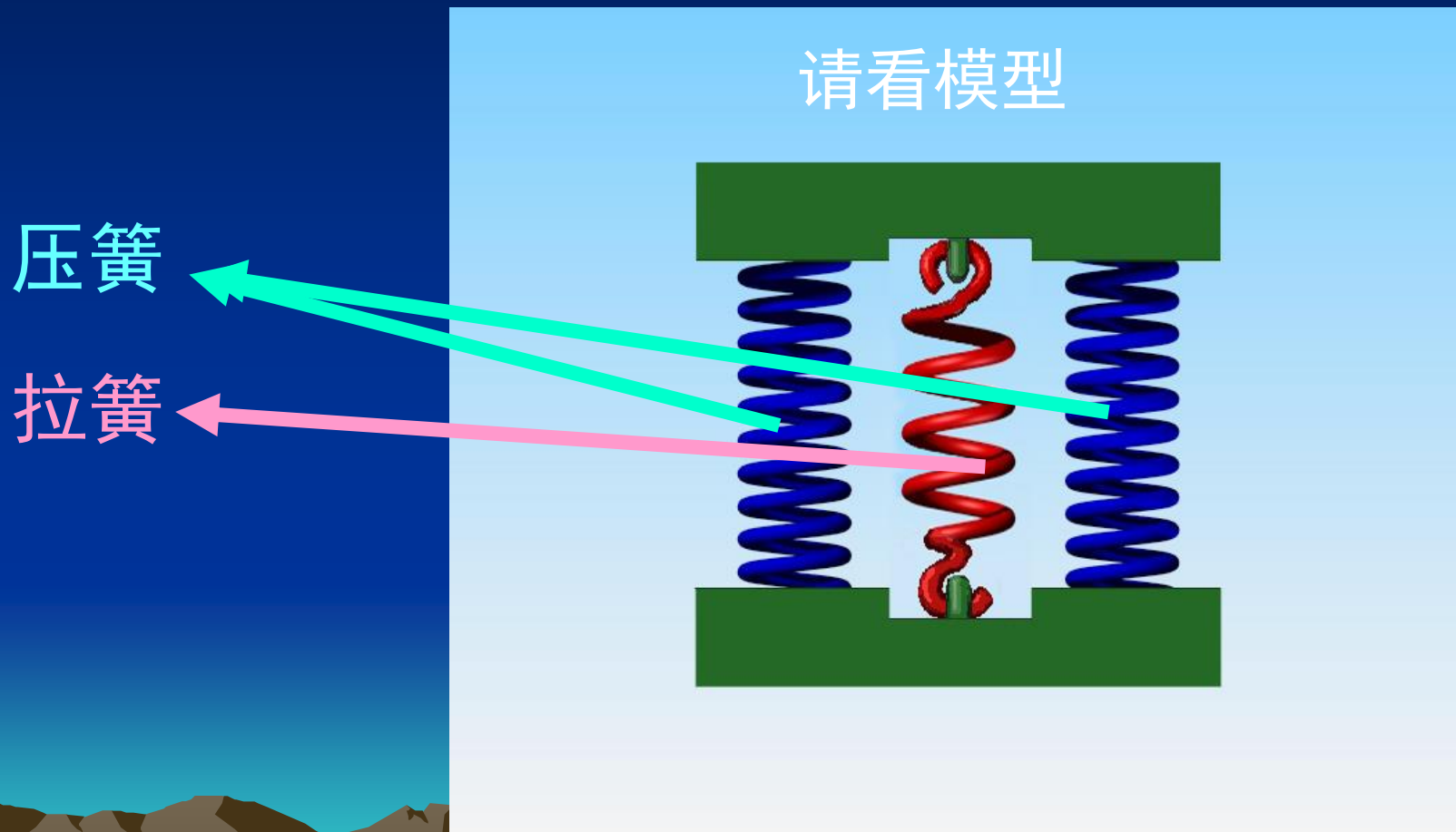


- 在机械加工中，各种各样的冷弯、冷卷、冷拔、冷校直工艺，产生残余应力的情形都和上面的例子类似。
- 各种切削加工，都会在表层留下不同深度的塑性变形层，而且变形量沿层深变化梯度明显，所以都会产生残余应力。
- 喷丸强化工艺更是因不均匀塑性变形产生残余应力的典型实例。

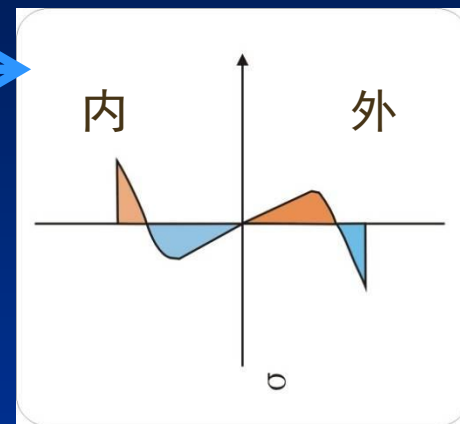
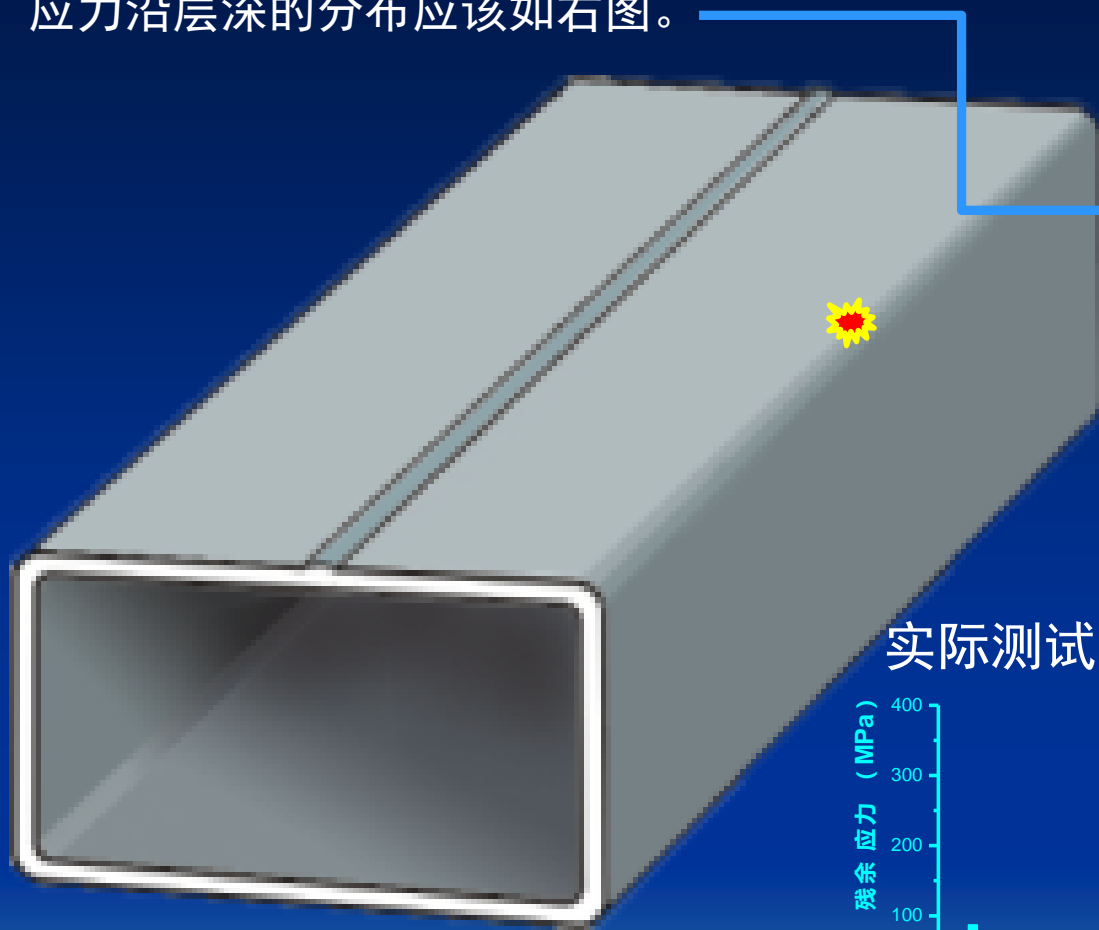




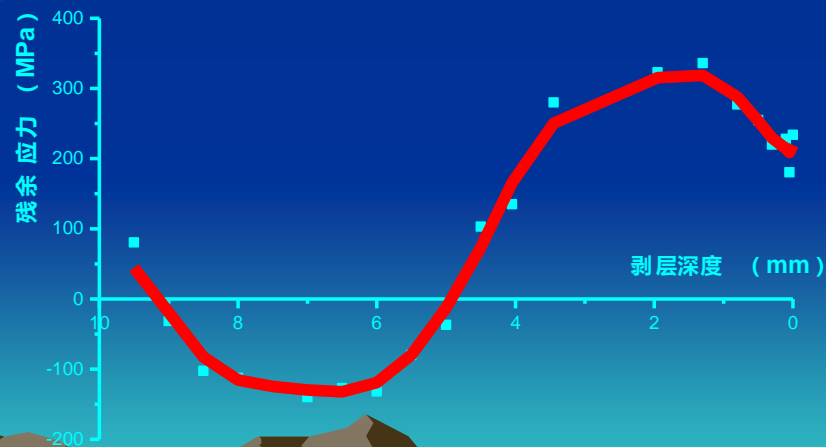
# ◆ 不均匀的弹性变形引起残余应力

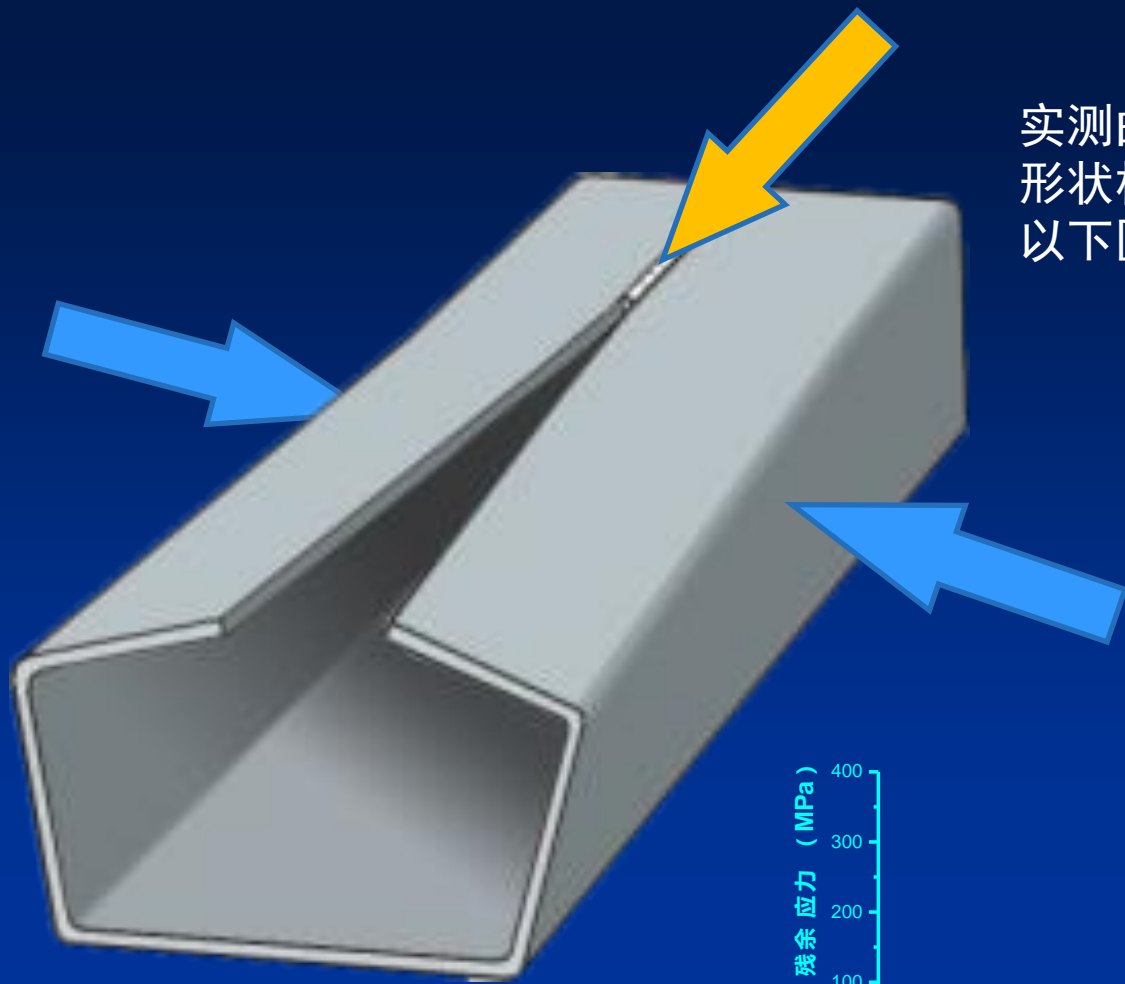


按照前面简支梁上下表面发生塑性变形形成残余应力的分析，方管圆角处残余应力沿层深的分布应该如右图。



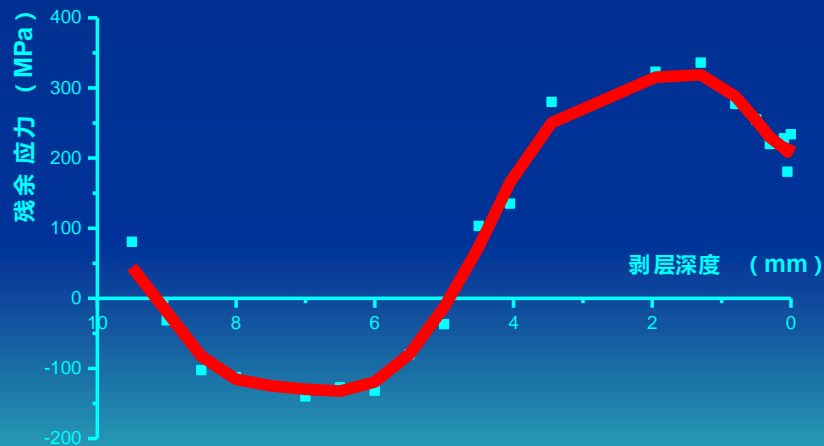
实际测试得到的分布曲线却是这样的





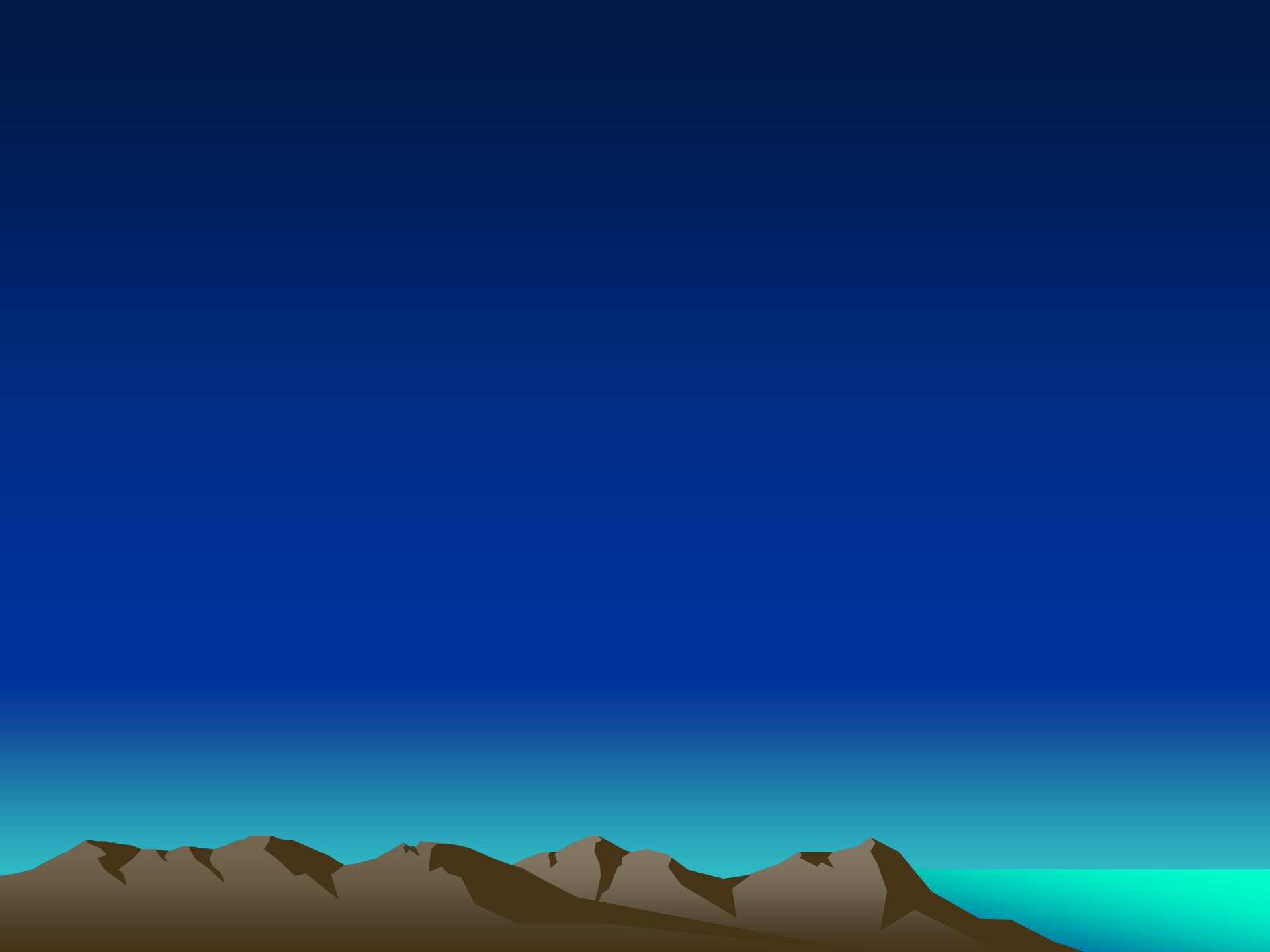
实测曲线与理论分析所得曲线形状相似，区别在于表层及其以下区间多了显著的拉应力。

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

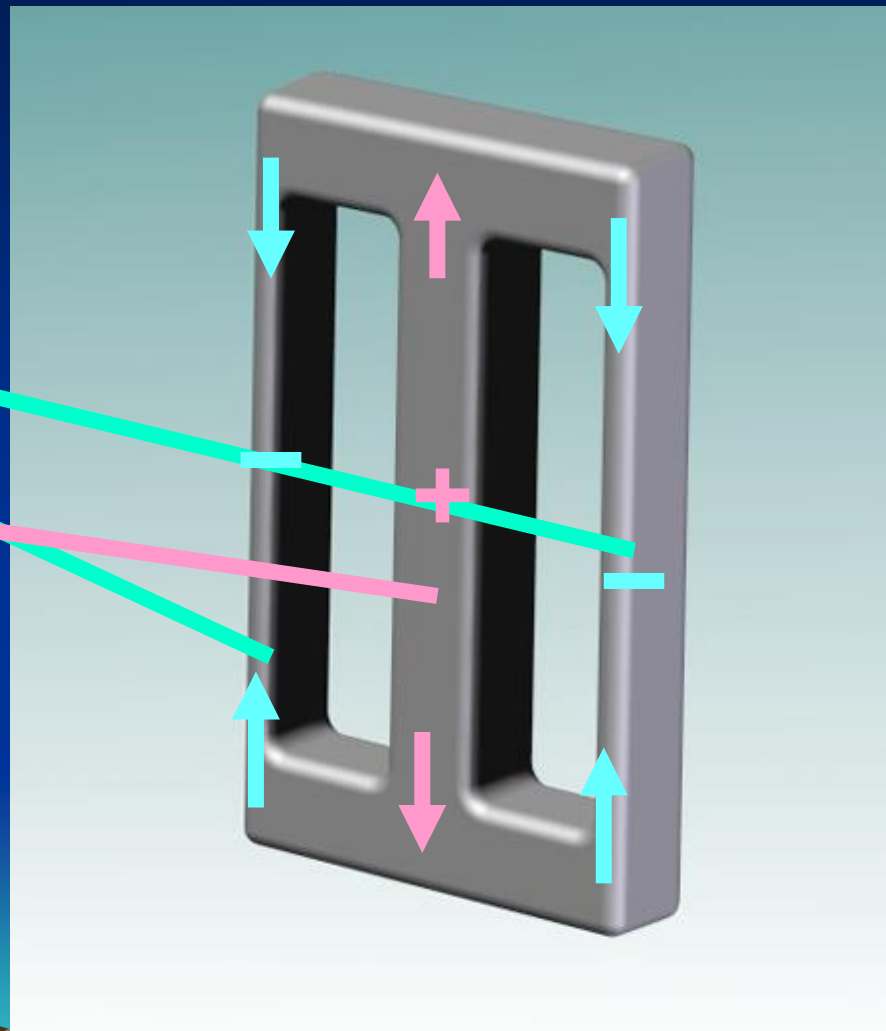
## 铸造应力框

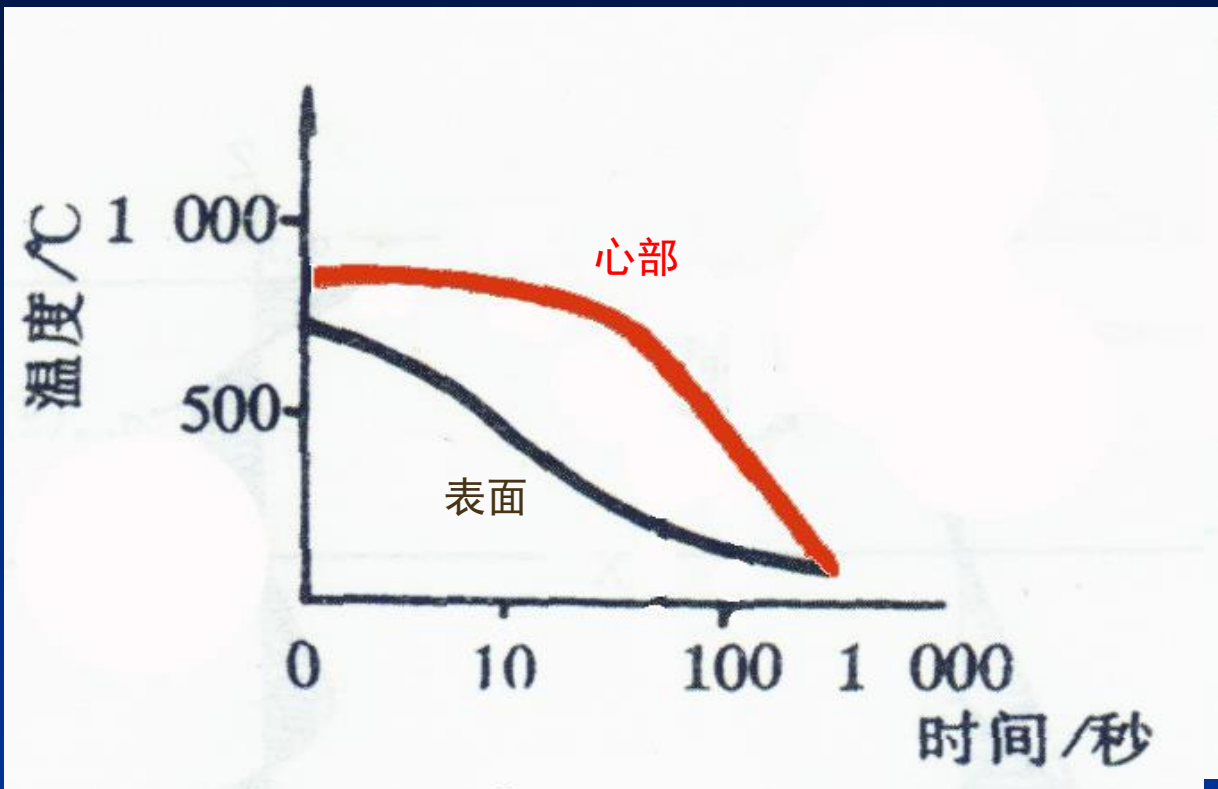
**边杆** ← 截面积较小  
先凝固，先冷却，先收缩

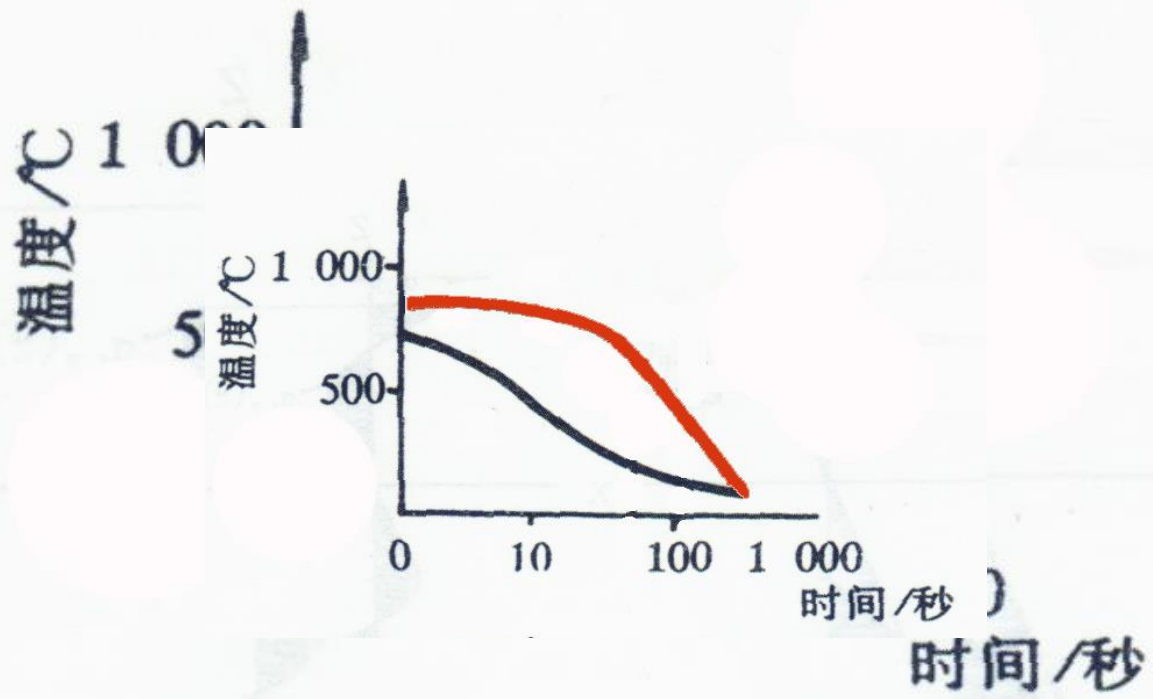
**中杆** ← 截面积较大  
后凝固，后冷却，后收缩

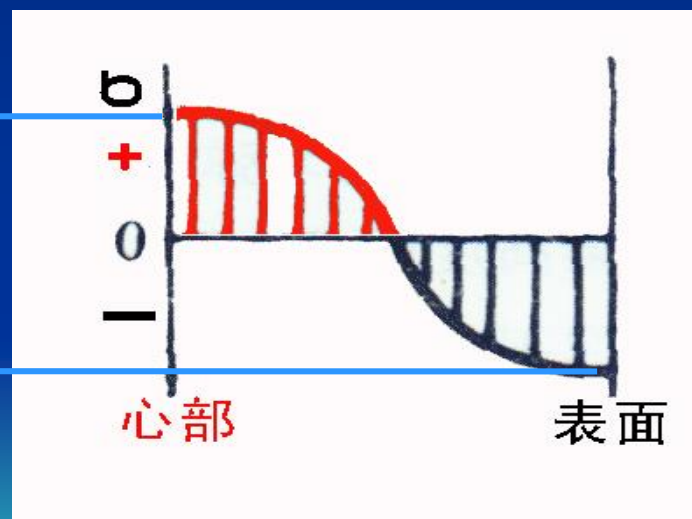
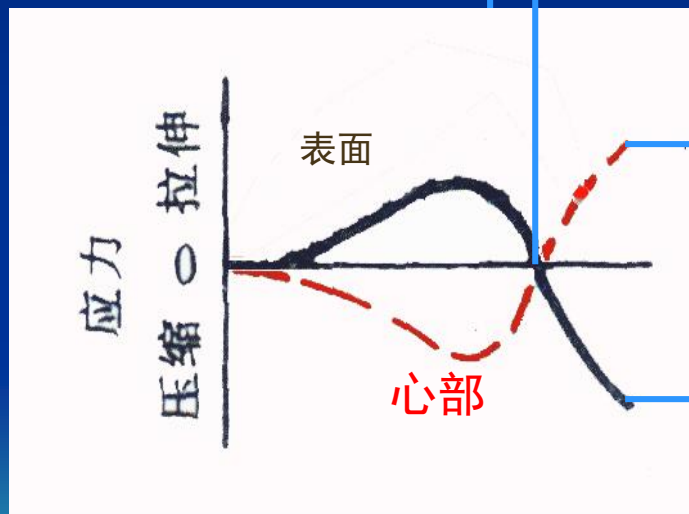
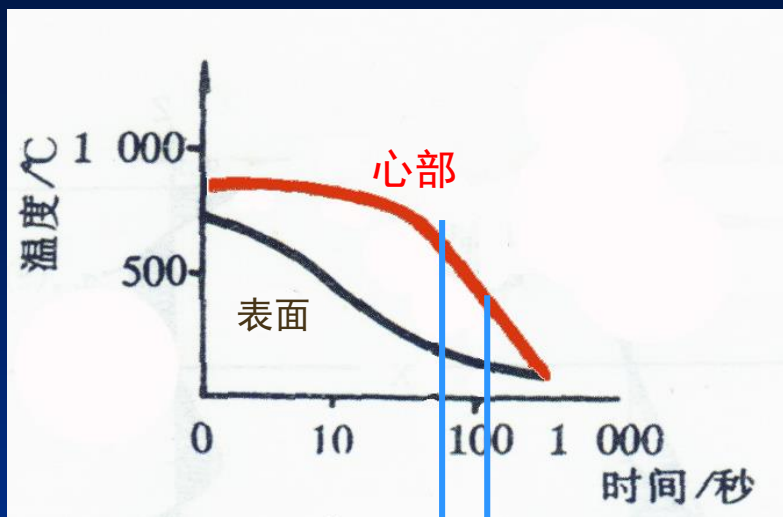
由于受到已经定型的边杆的支撑，  
中杆不能充分收缩，便有拉应力残留下来。

相应地，边杆会承受残余压应力。



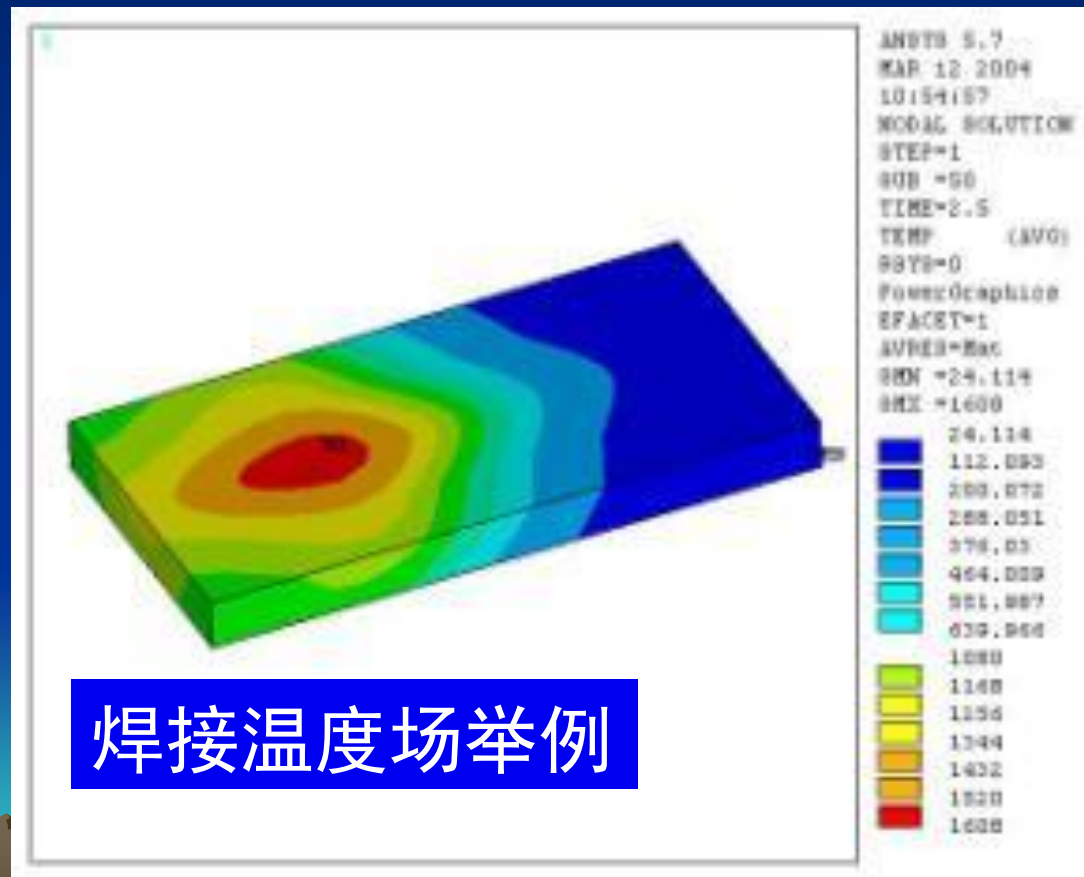




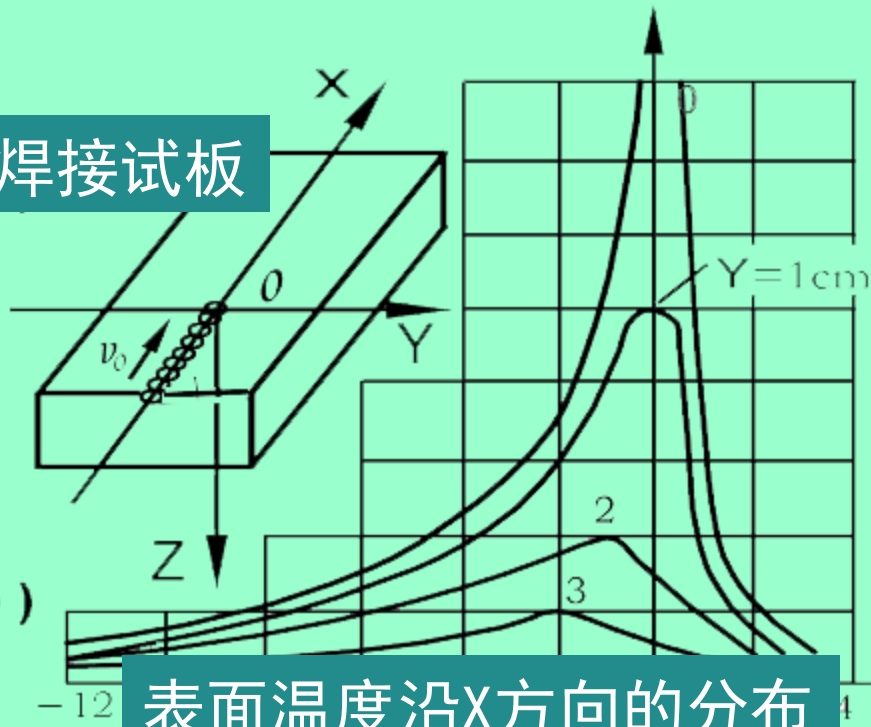


# 焊接残余应力的产生

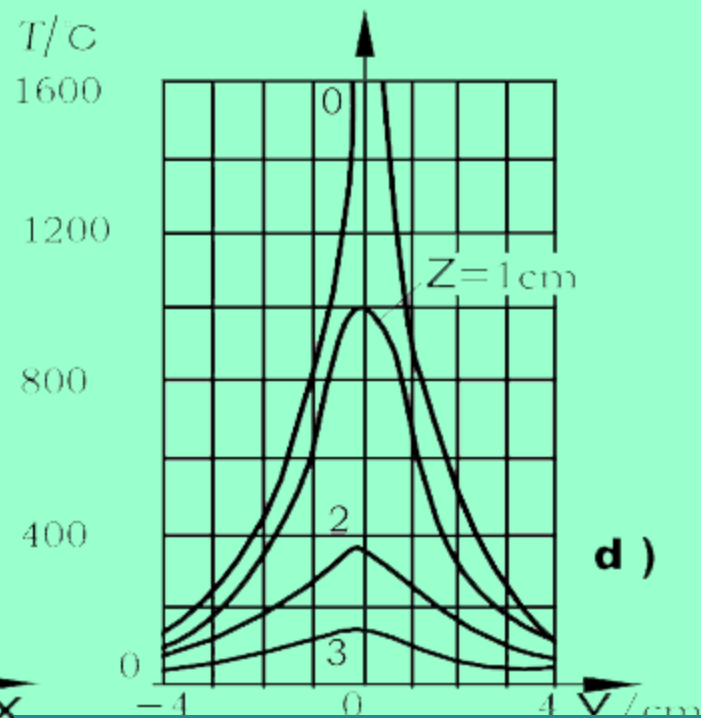
焊接是一个局部熔化、局部高温、温度梯度极高、温度快速升高快速下降，并且发生结晶和相变的过程。典型的极端的非均匀温度变化，必然产生残余应力。



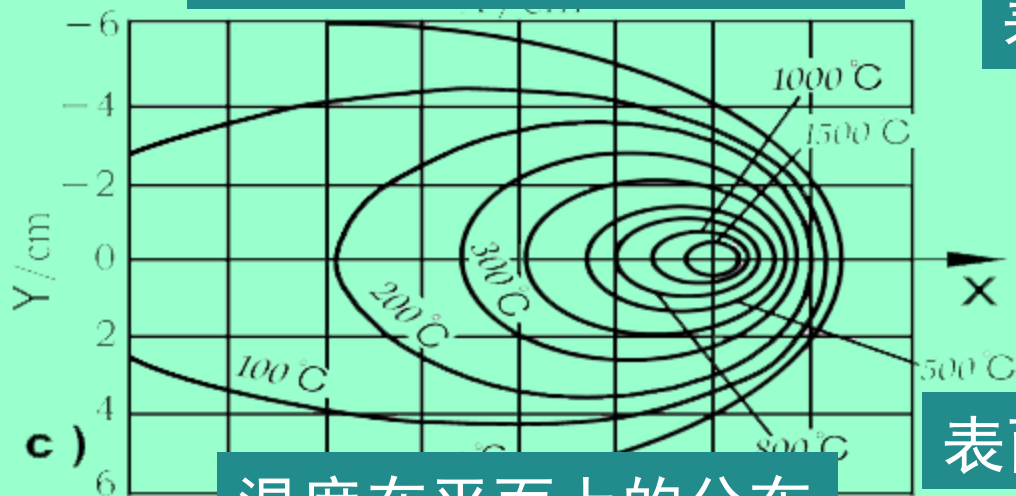
焊接试板



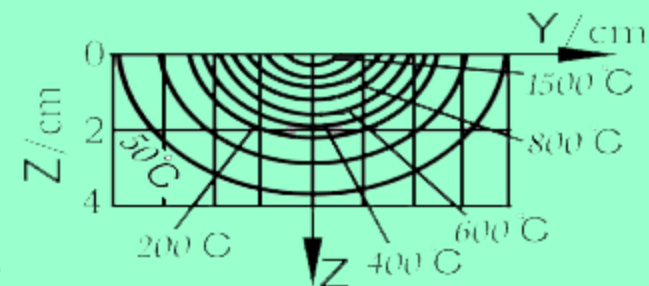
表面温度沿X方向的分布



表面温度沿Y方向的分布



温度在平面上的分布

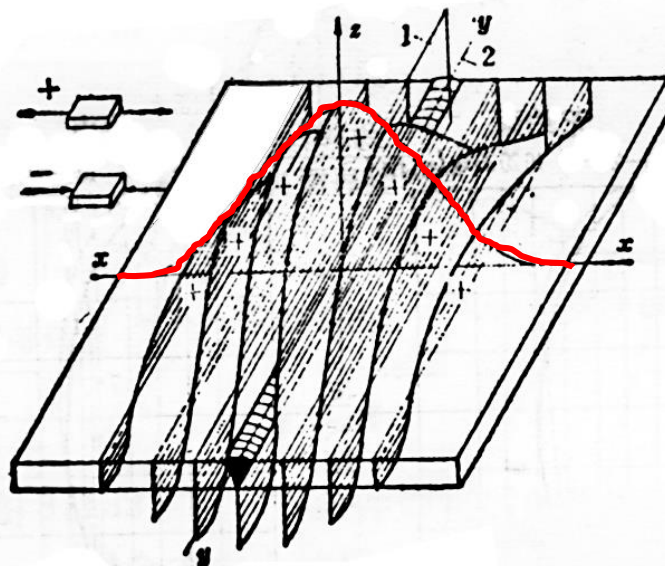
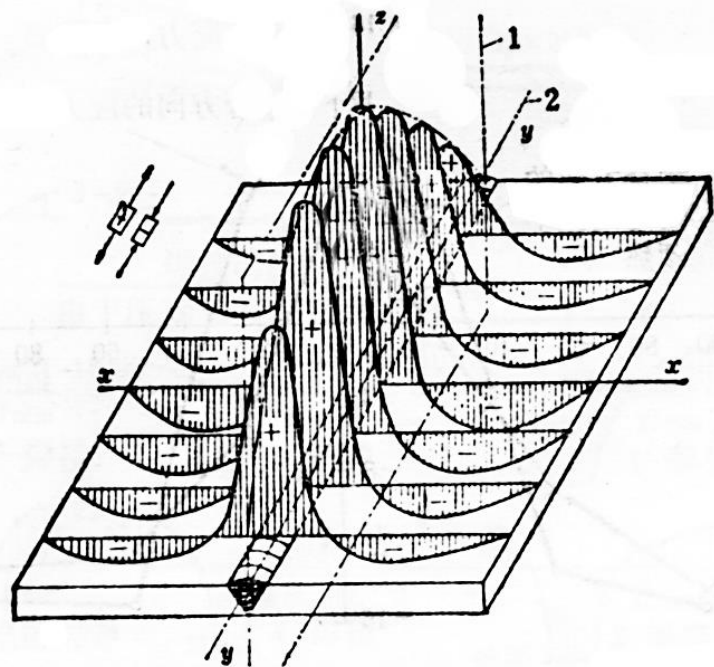


表面温度沿深度方向的分布

# 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

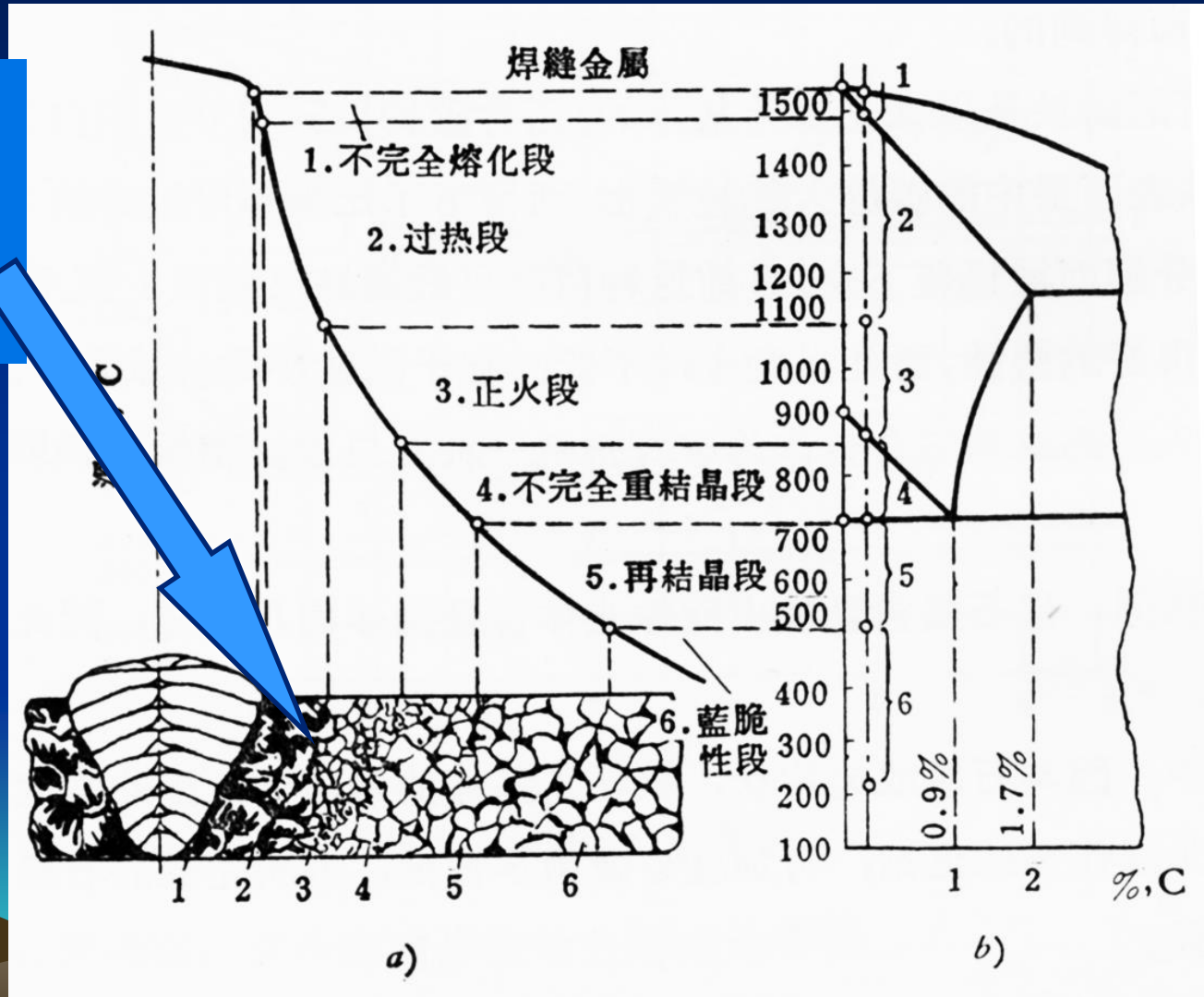
在实际测试中的得到比较好的验证





# 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

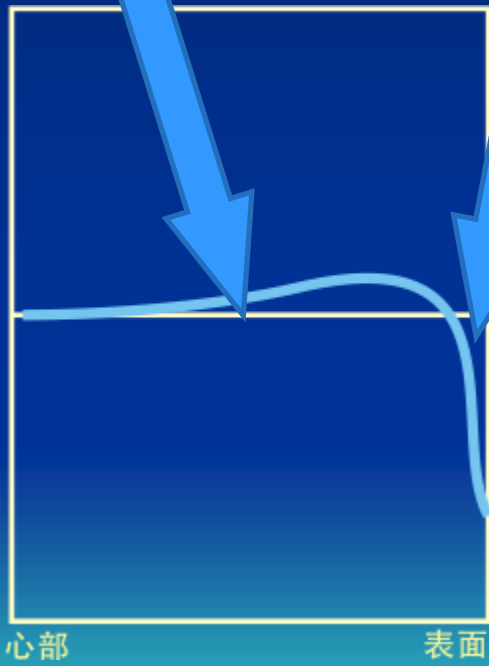
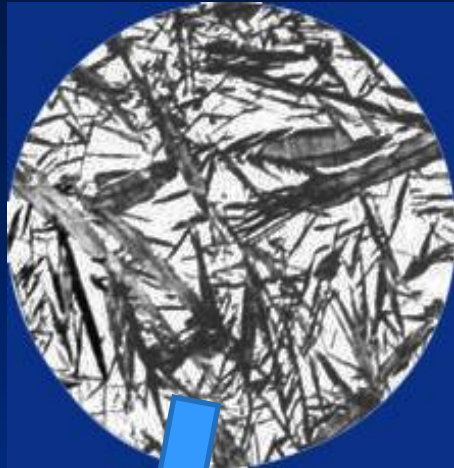


# ◆ 不均匀的相变引起残余应力

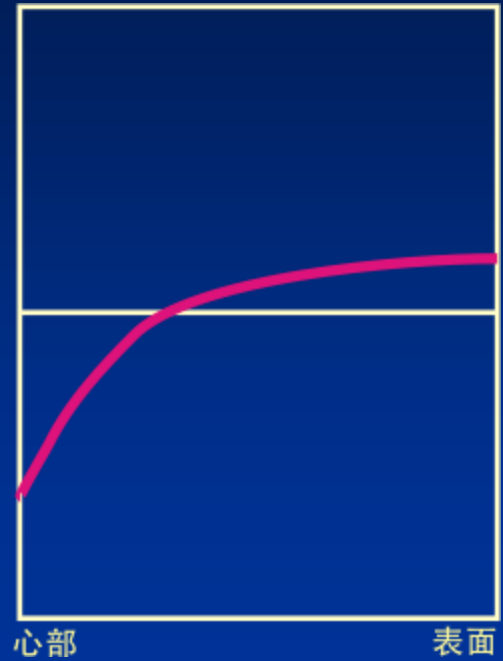
- 例如轧辊表面淬火

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。



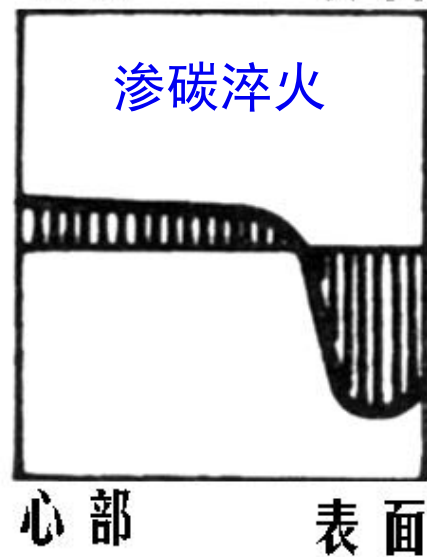
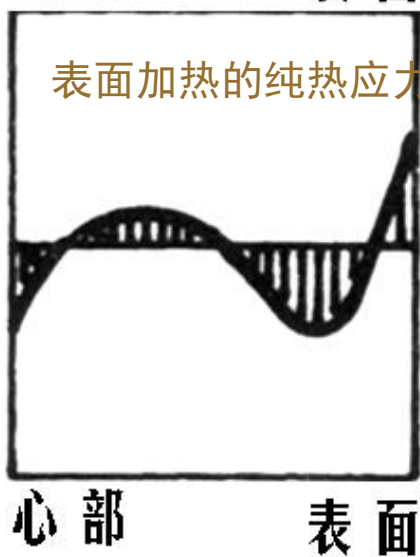
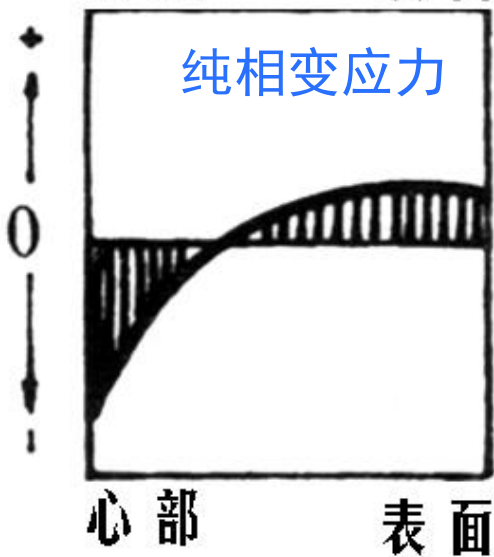
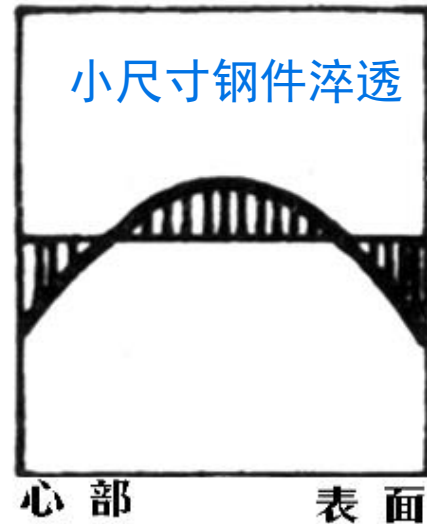
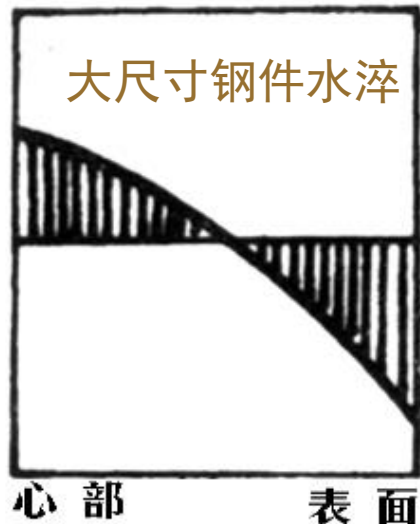
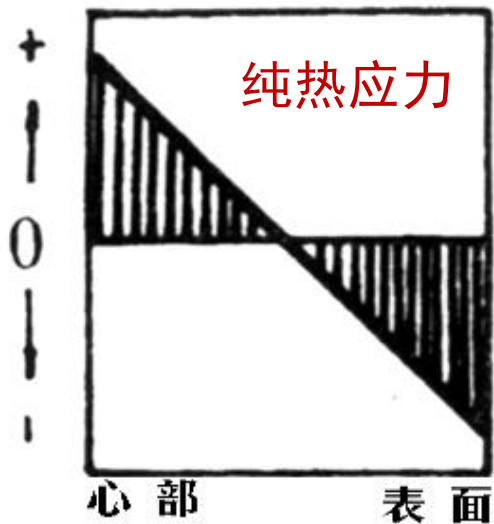


表面淬火的残余应力



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；

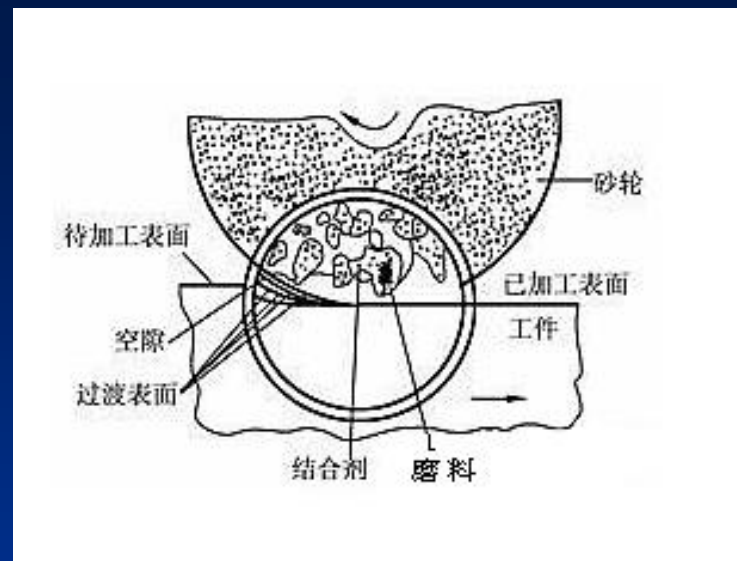
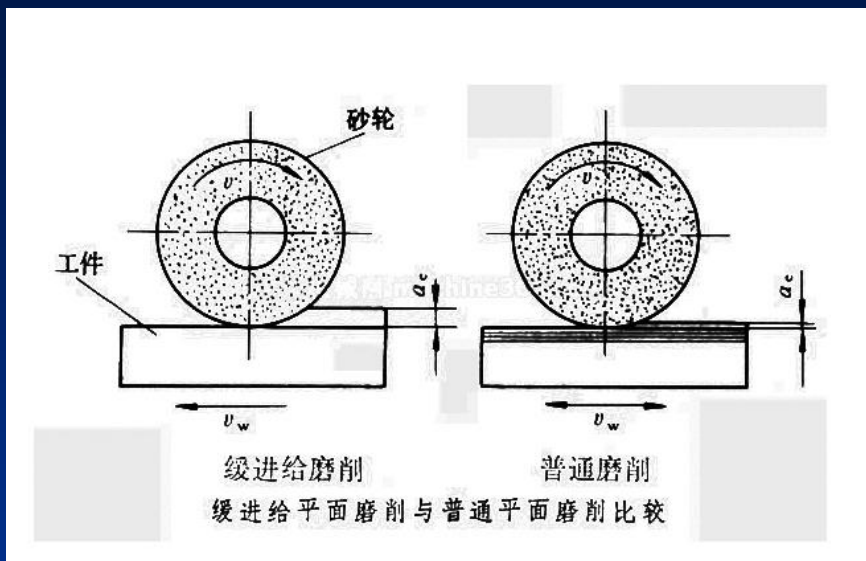
第三，热应力——产生拉应力；

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。

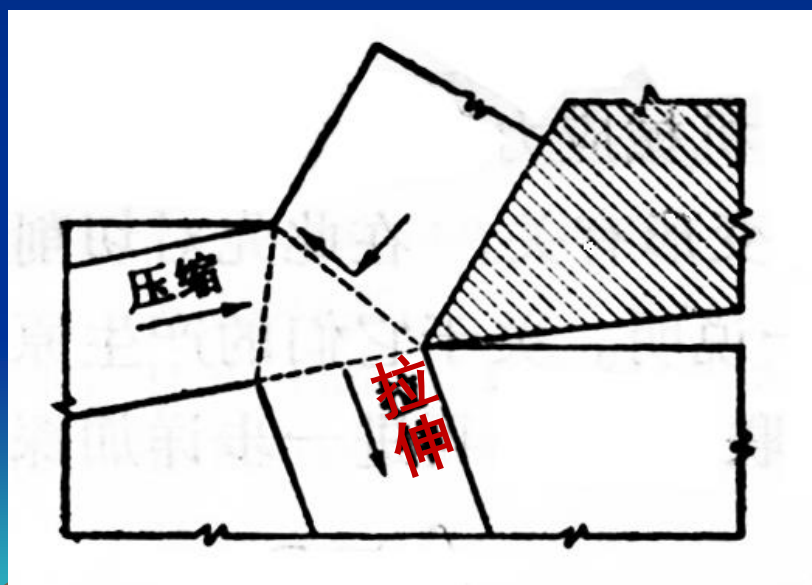




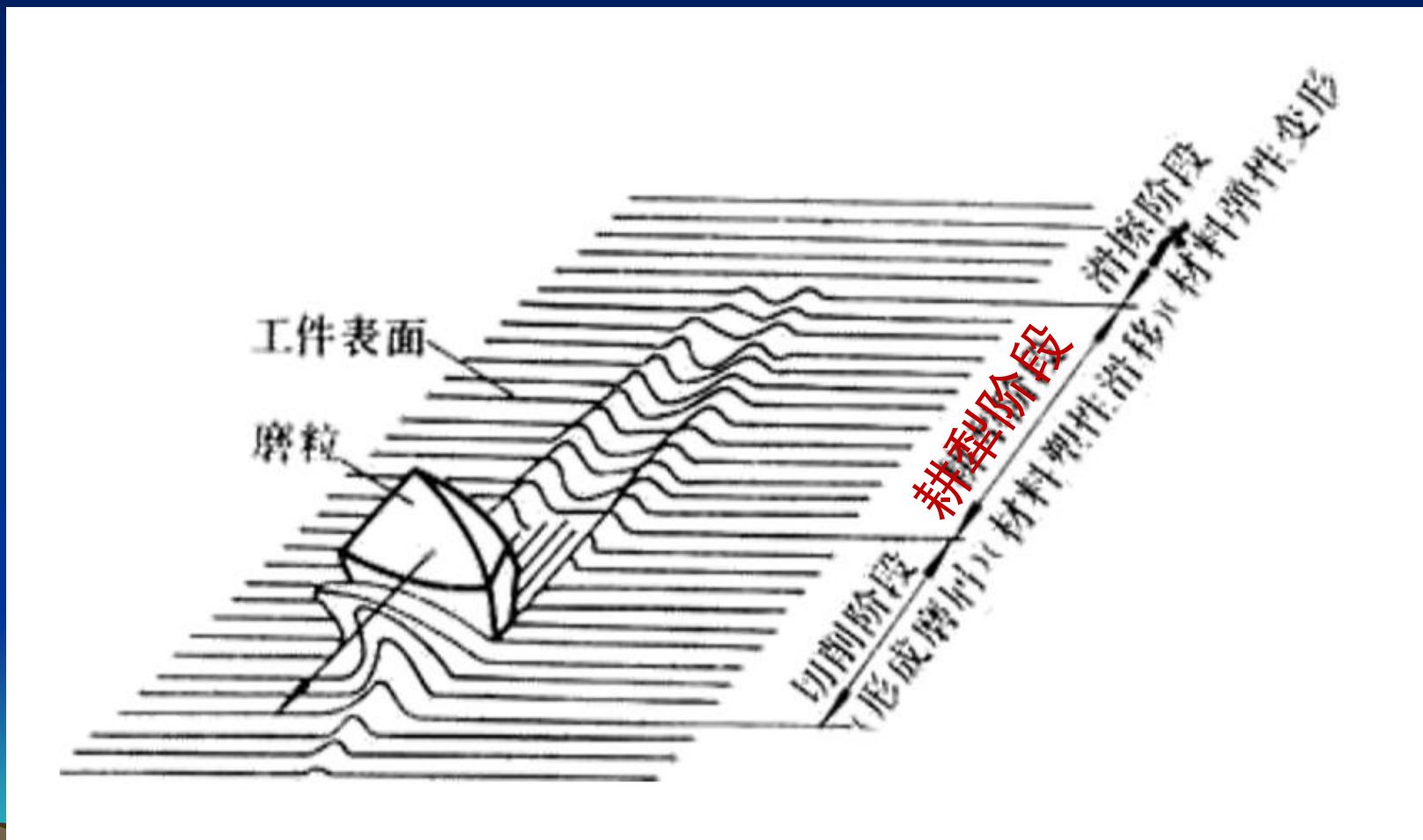
## 拉伸作用引起凸出效应

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。



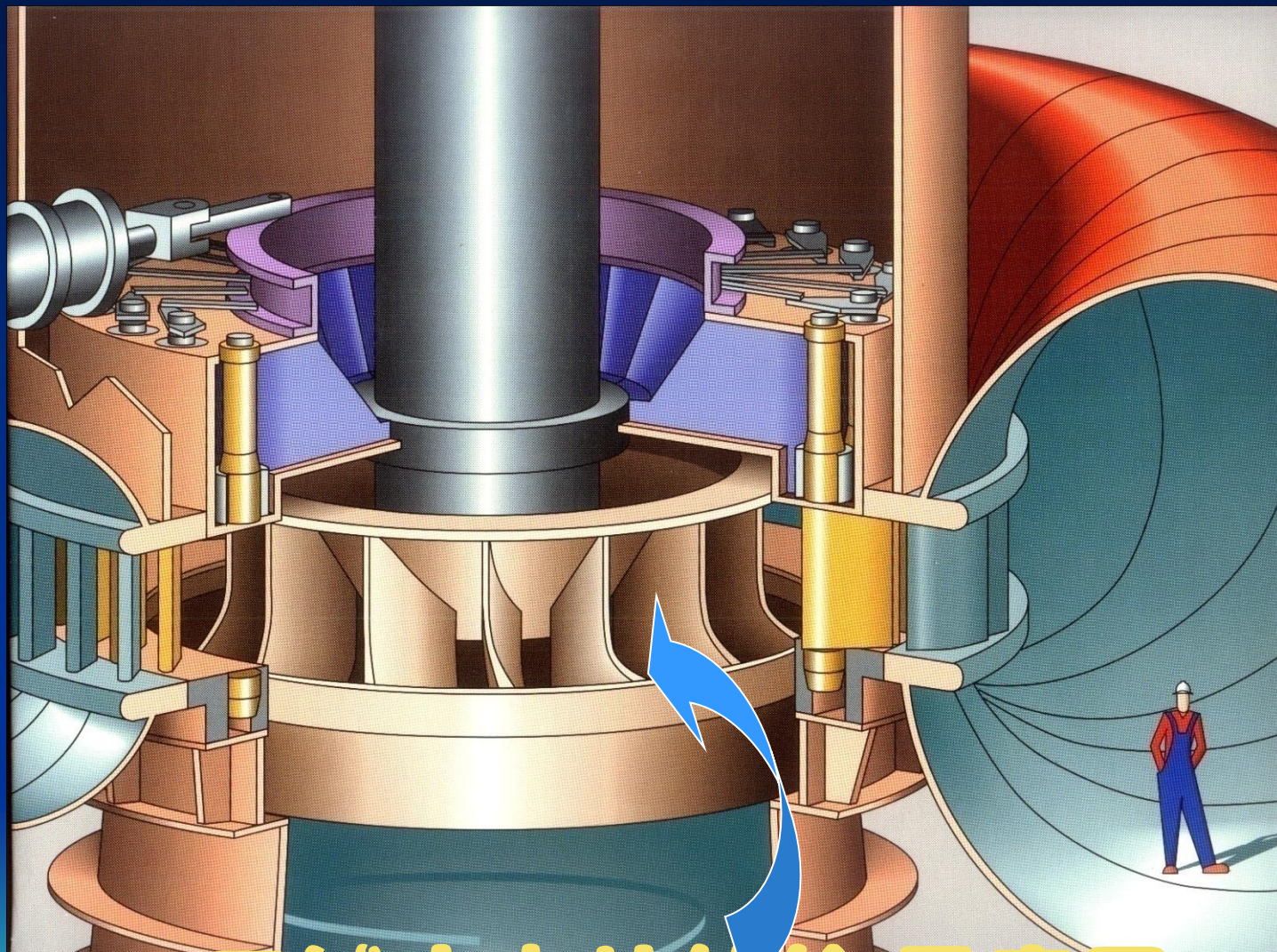
# 1、钢结构残余应力测试实例





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。

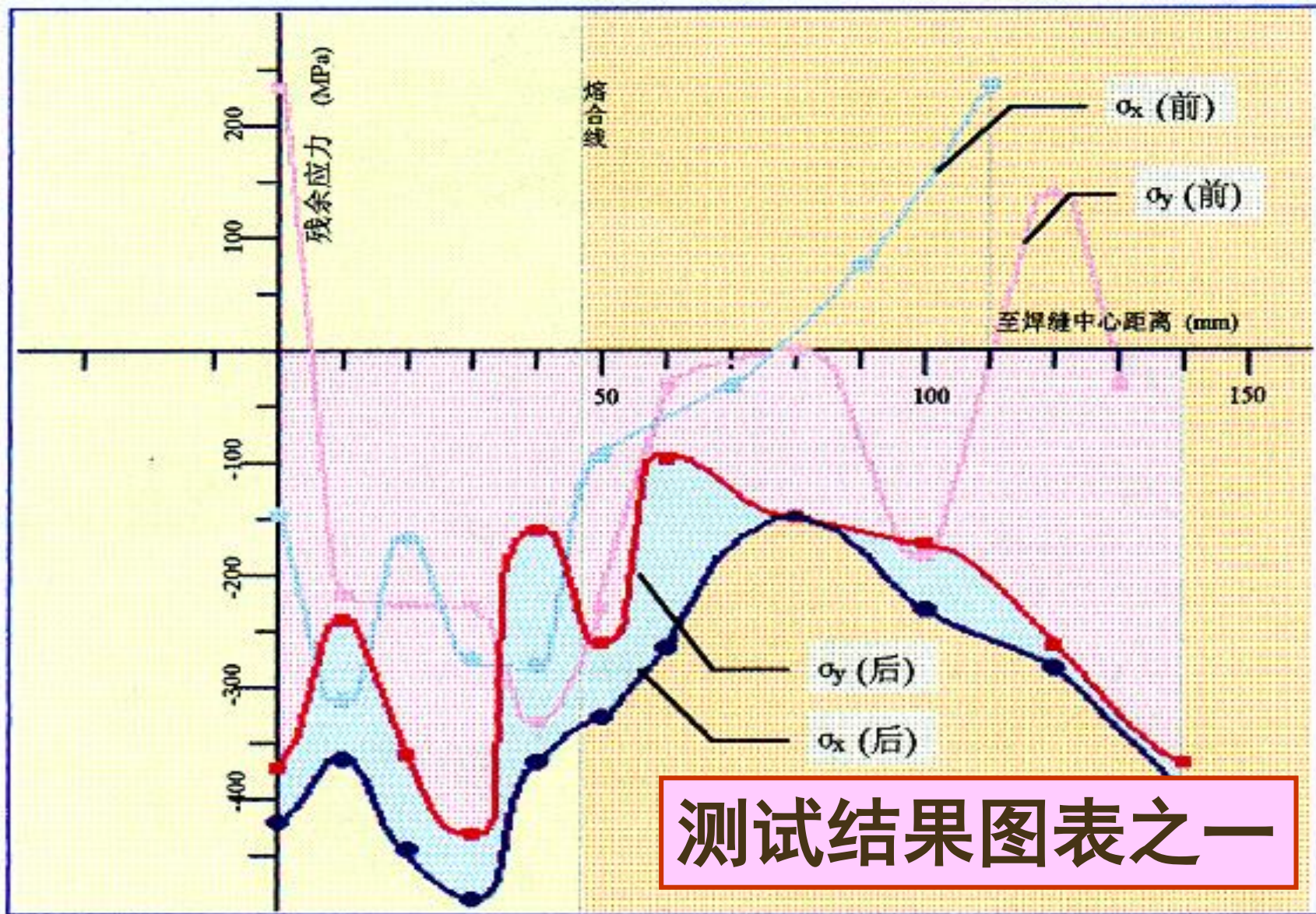


1998年我们携带X射线应力仪到二滩水电站，测定转轮现场焊缝的残余应力。

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。

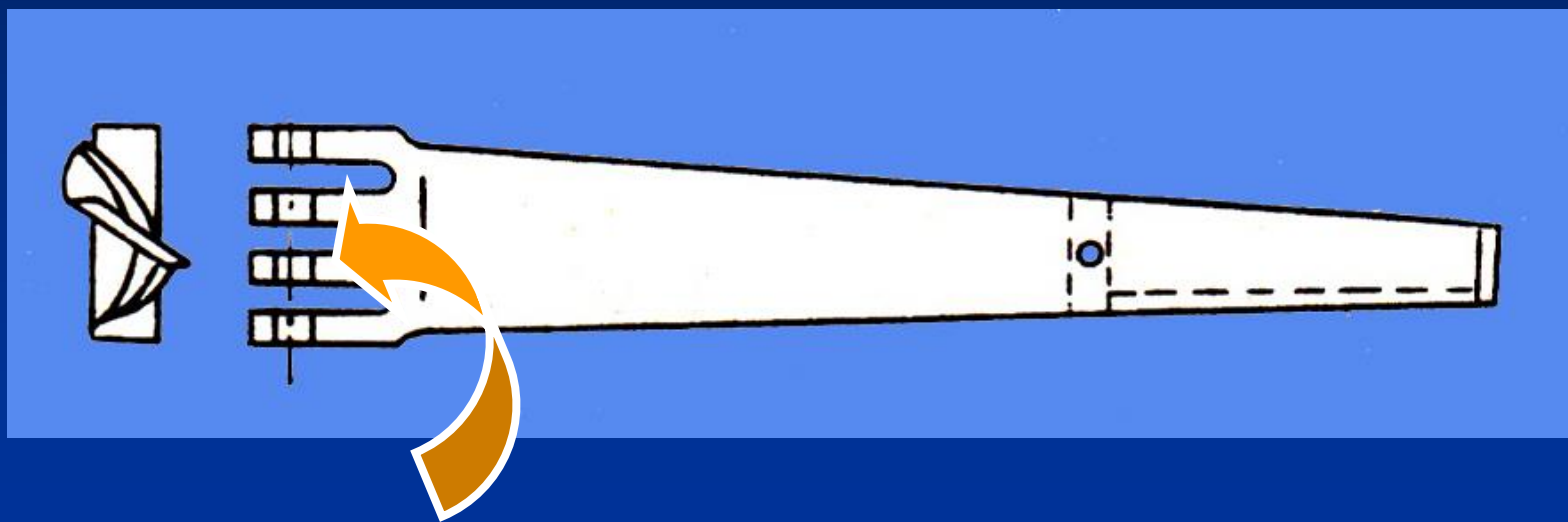


- 转轮各处极不均匀的应力，在运行过程中自然会逐步释放，但是必然以产生永久变形为代价。转轮的变形将破坏原有的动平衡状态，特别是叶片之间迷宫间隙的不均匀，会引起附加振动。显然，这些因素有损于转轮的寿命。



# 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	

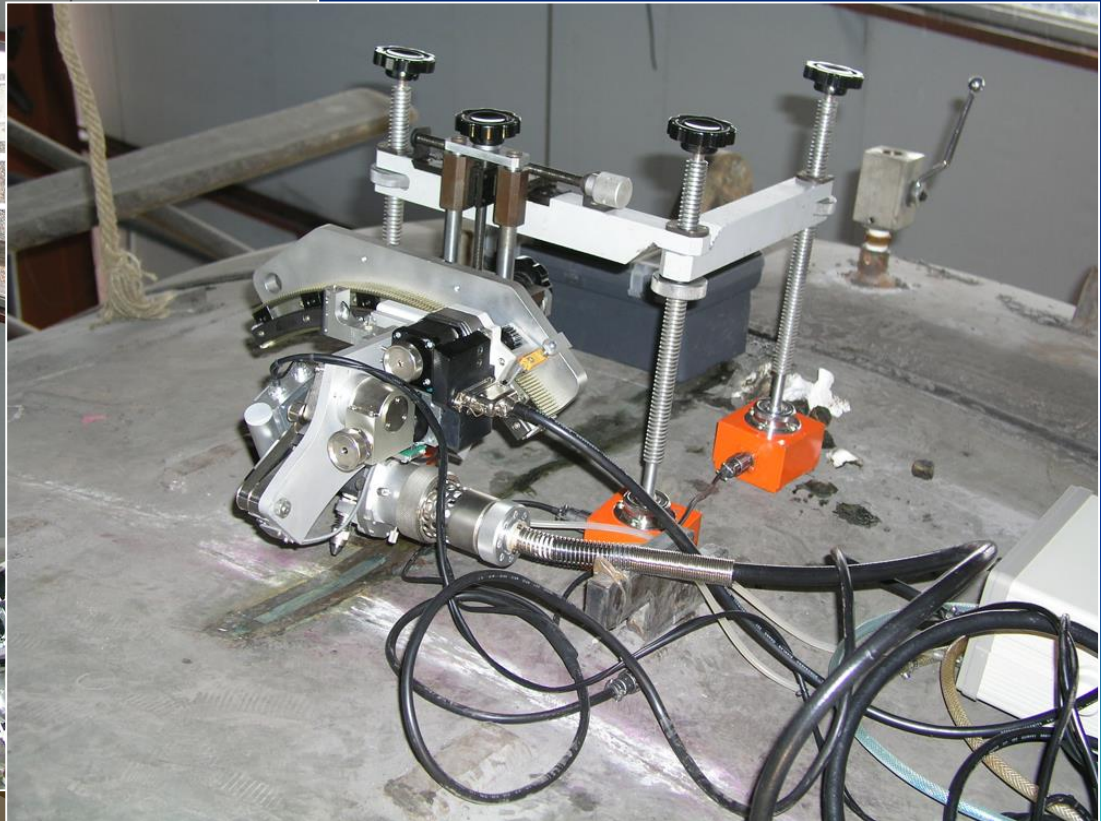


上海天然气管网 残余应力测试



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。



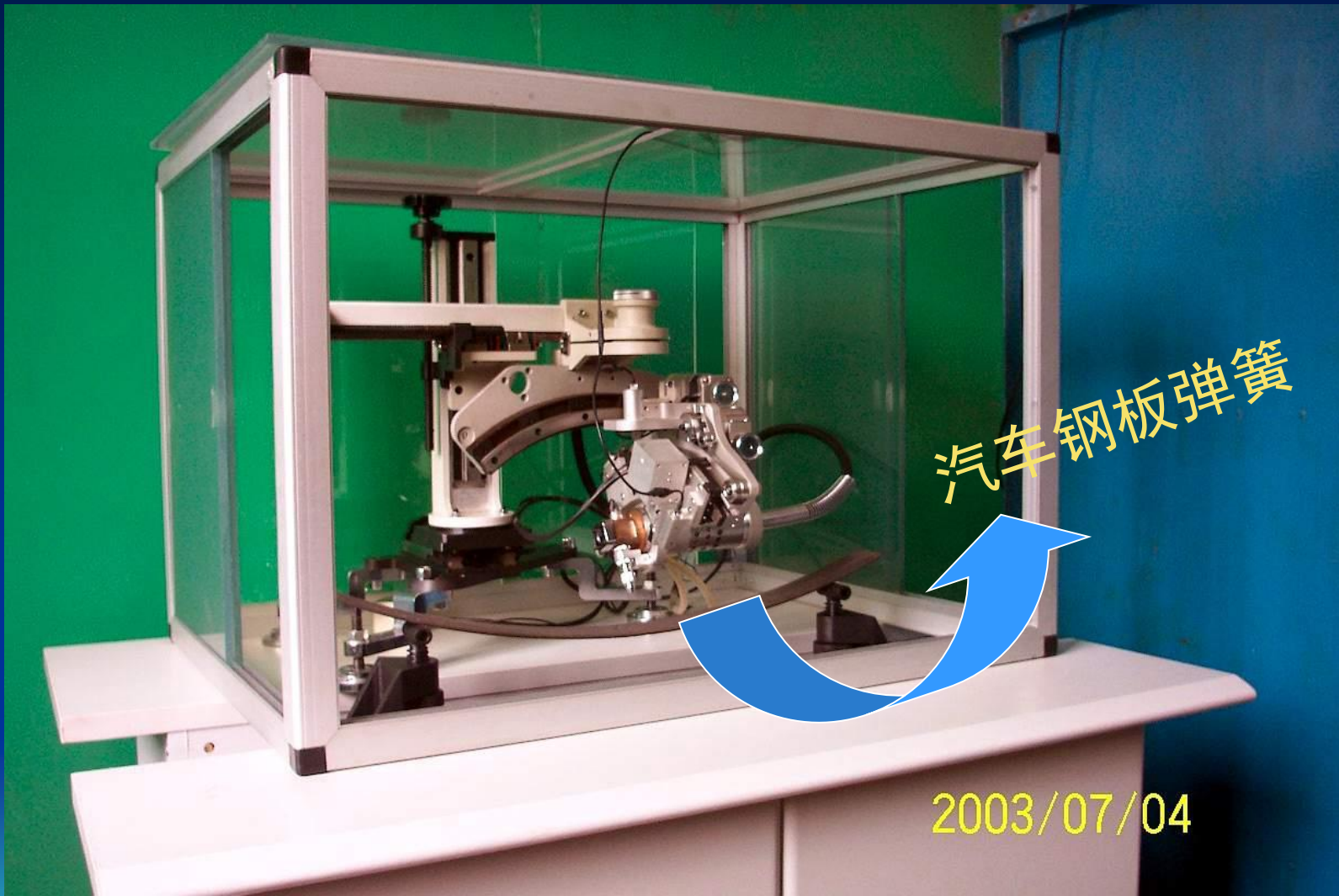
# 初期的推广应用示例

## 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 $30\text{kg/mm}^2$ 。自此在未发生连杆断裂事故。



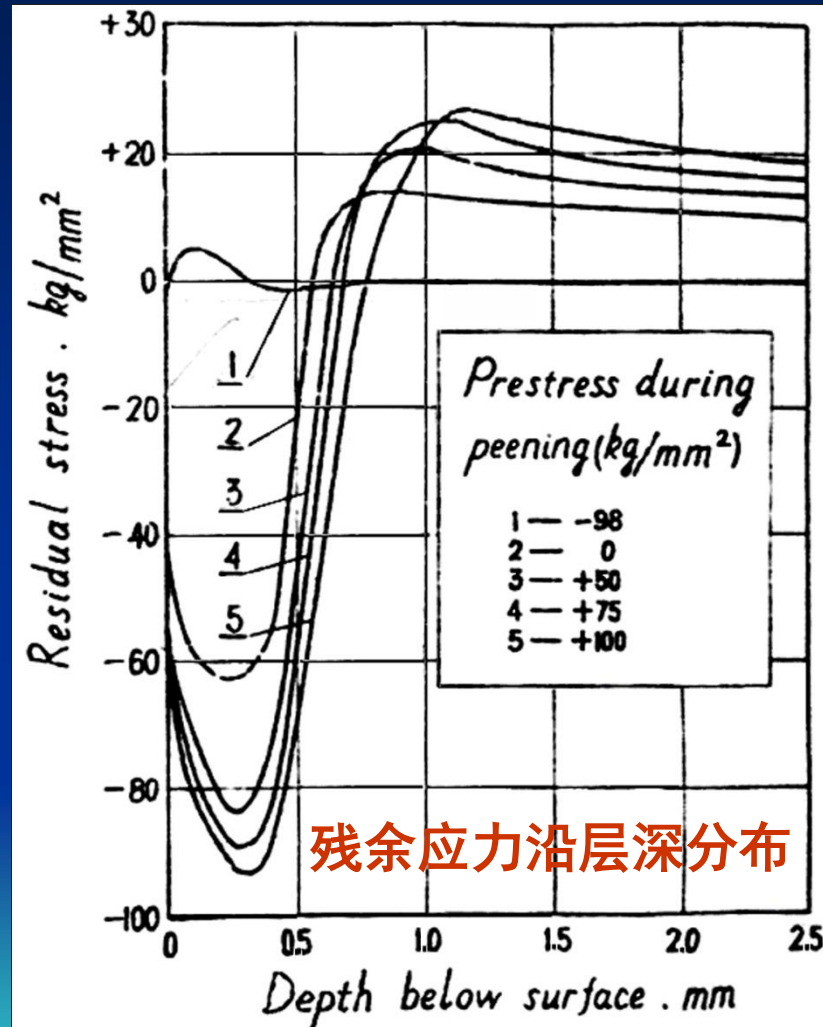
汽车钢板弹簧

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

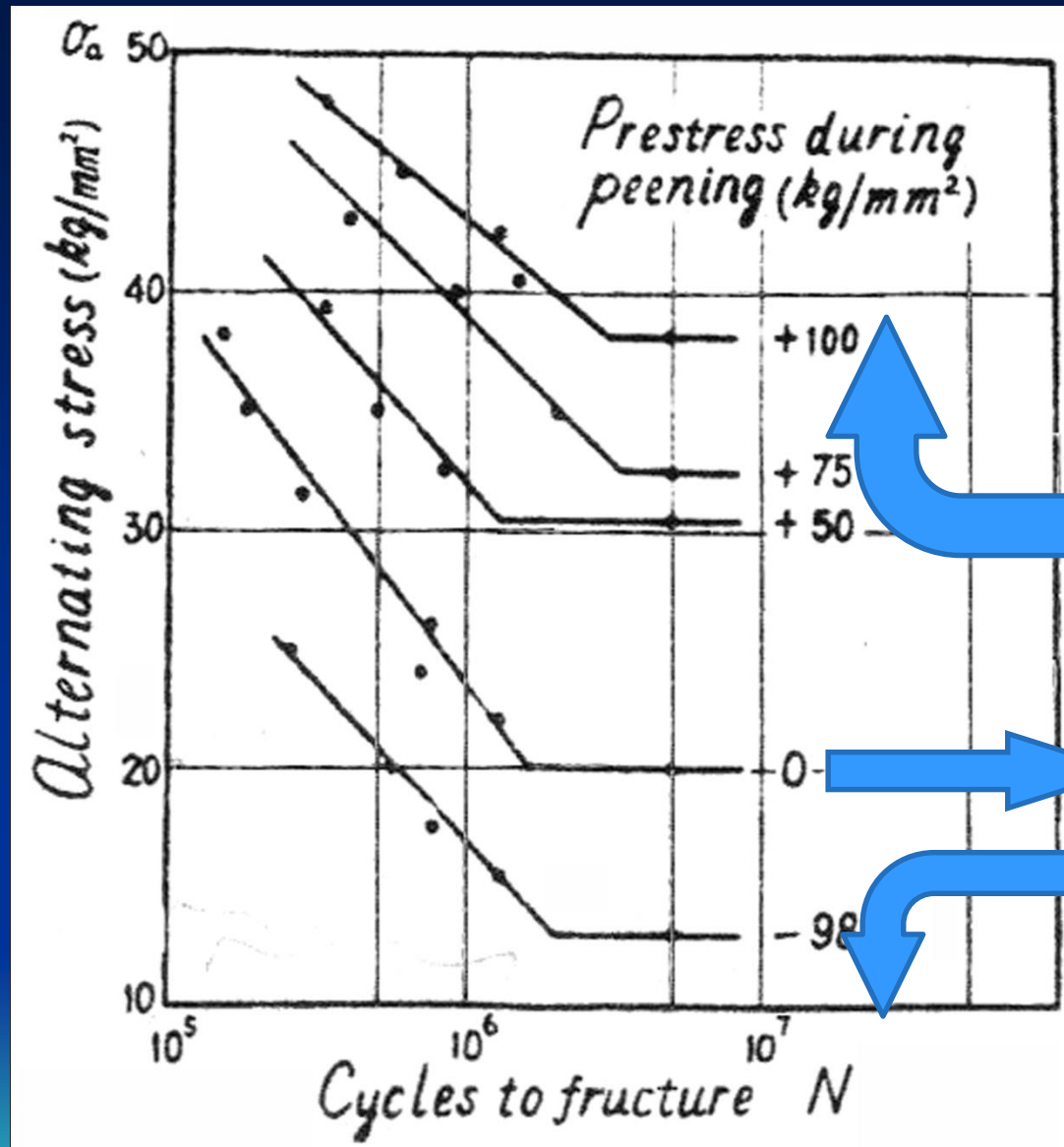
对钢板弹簧施加不同的预应力进行喷丸，可以得到峰值不同、分布深度不同的压应力。

表一 残余应力峰值与喷丸预应力的关系

$\sigma_p$ (Kgf/mm <sup>2</sup> )	+100	+75	+50	0	-98
$\sigma_{rp}$ (Kgf/mm <sup>2</sup> )	-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。

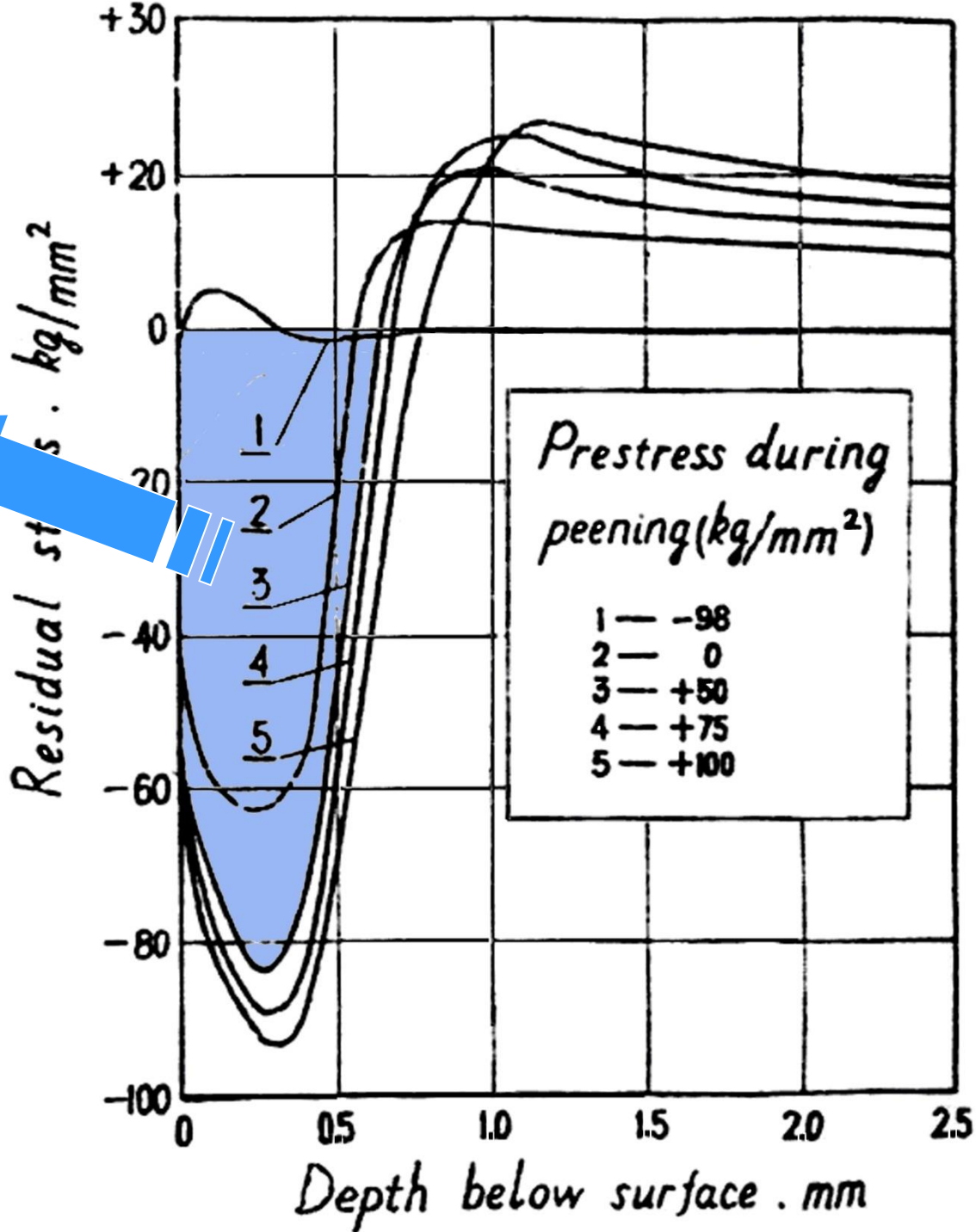
不加预应力喷丸板簧的  
疲劳极限

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 <sup>2</sup> )	+100	+75	+50	0	-98
面积A (Kgf/mm)	-23.4	-21.4	-18.5	-12.1	+0.2
疲劳极限 $\sigma_a$ (Kgf/mm <sup>2</sup> )	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 $\sigma_r$ 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 $\sigma_r$ 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。



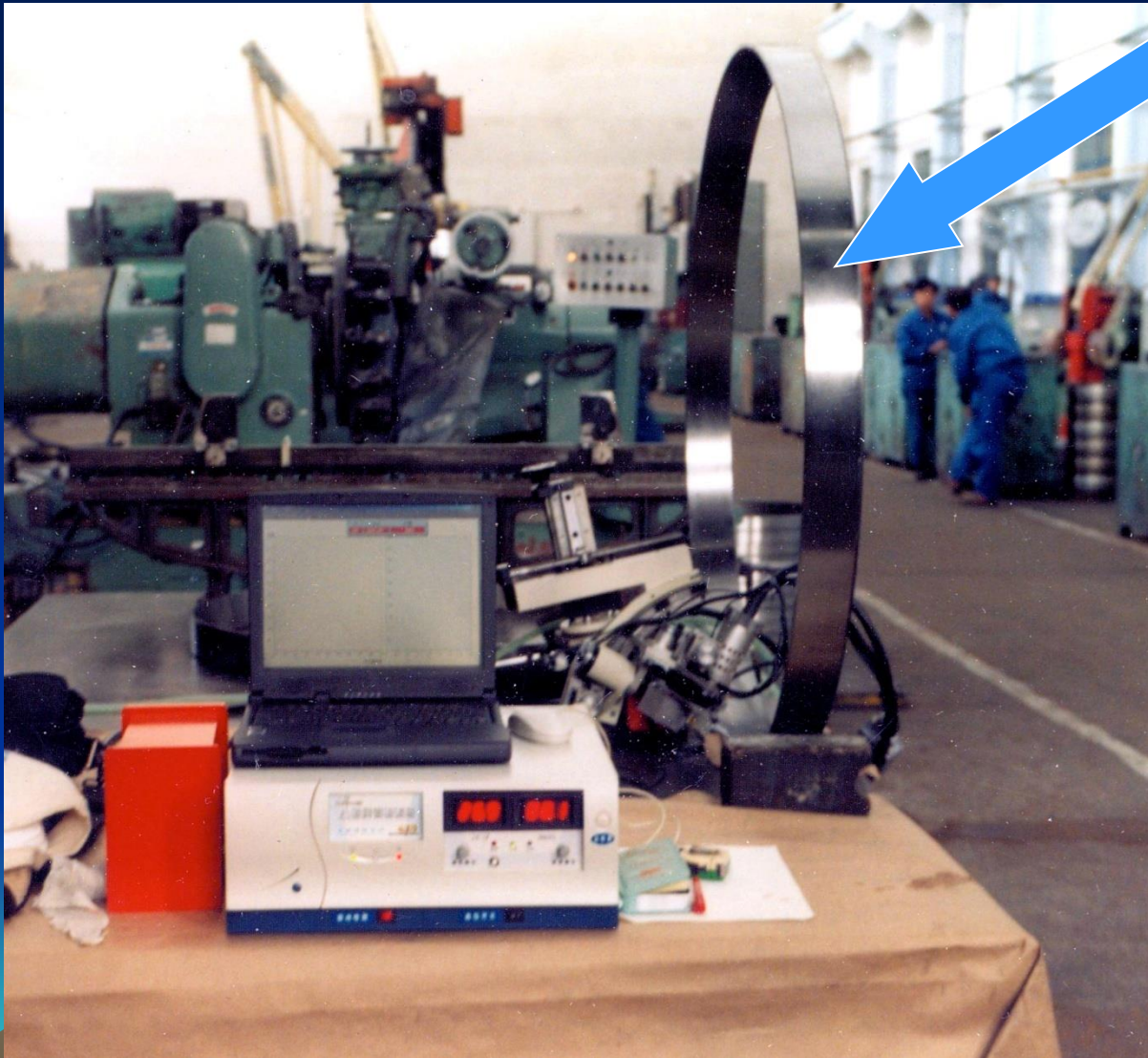
残余应力场在表面强化中的作用

王仁智

(北京航空材料研究所)

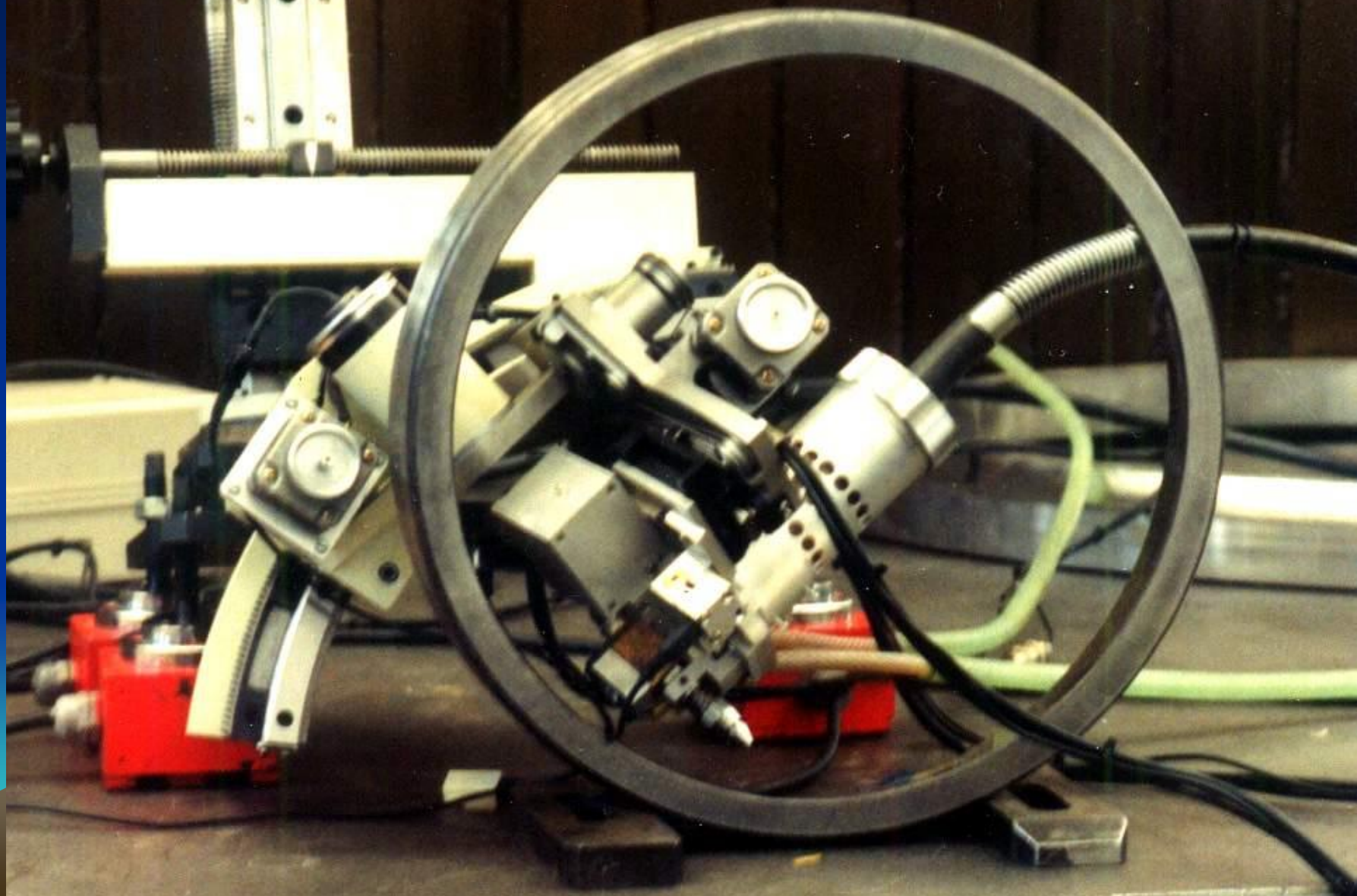
1987. 6. 20

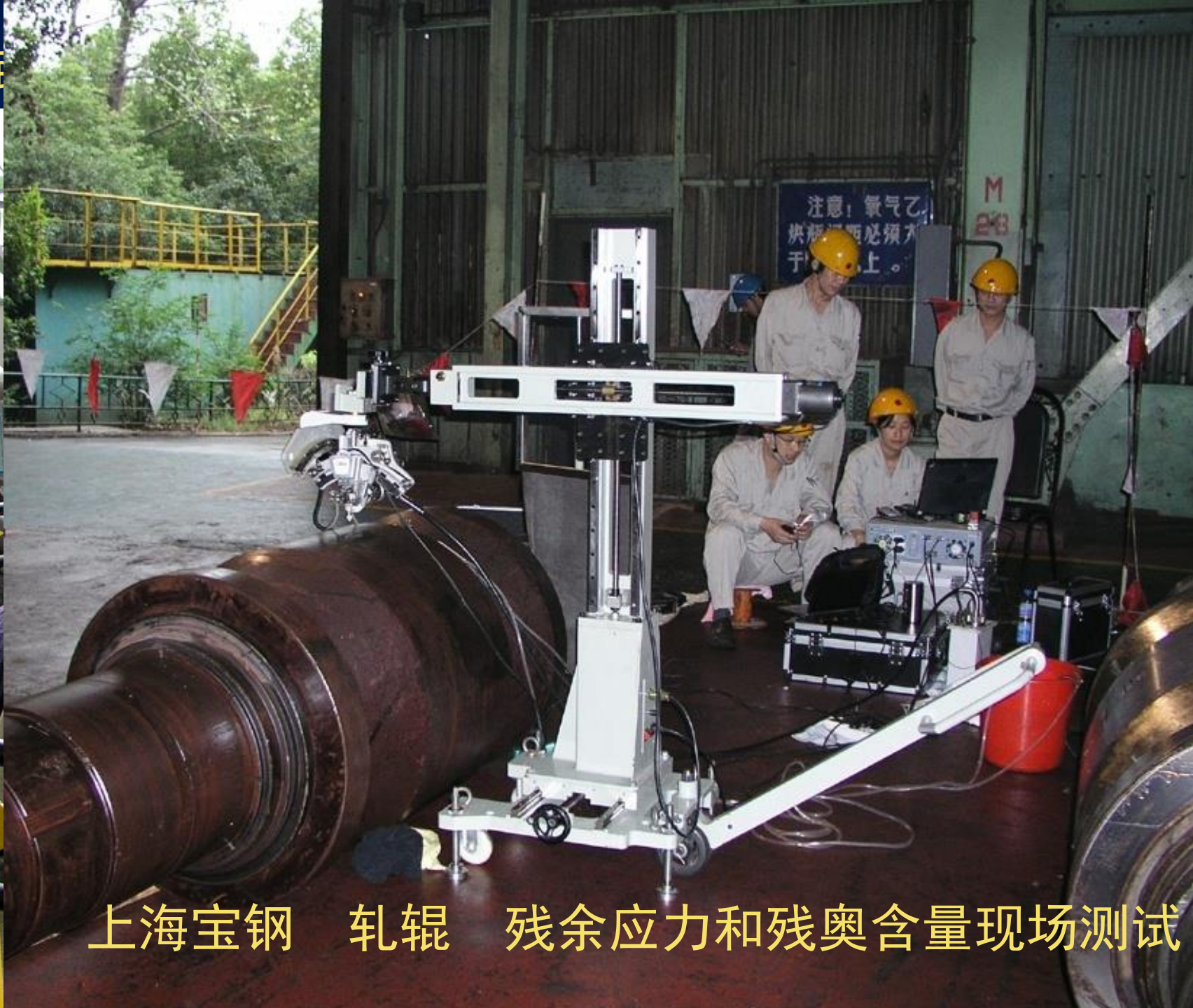
# 瓦轴生产的大型轴承套圈



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

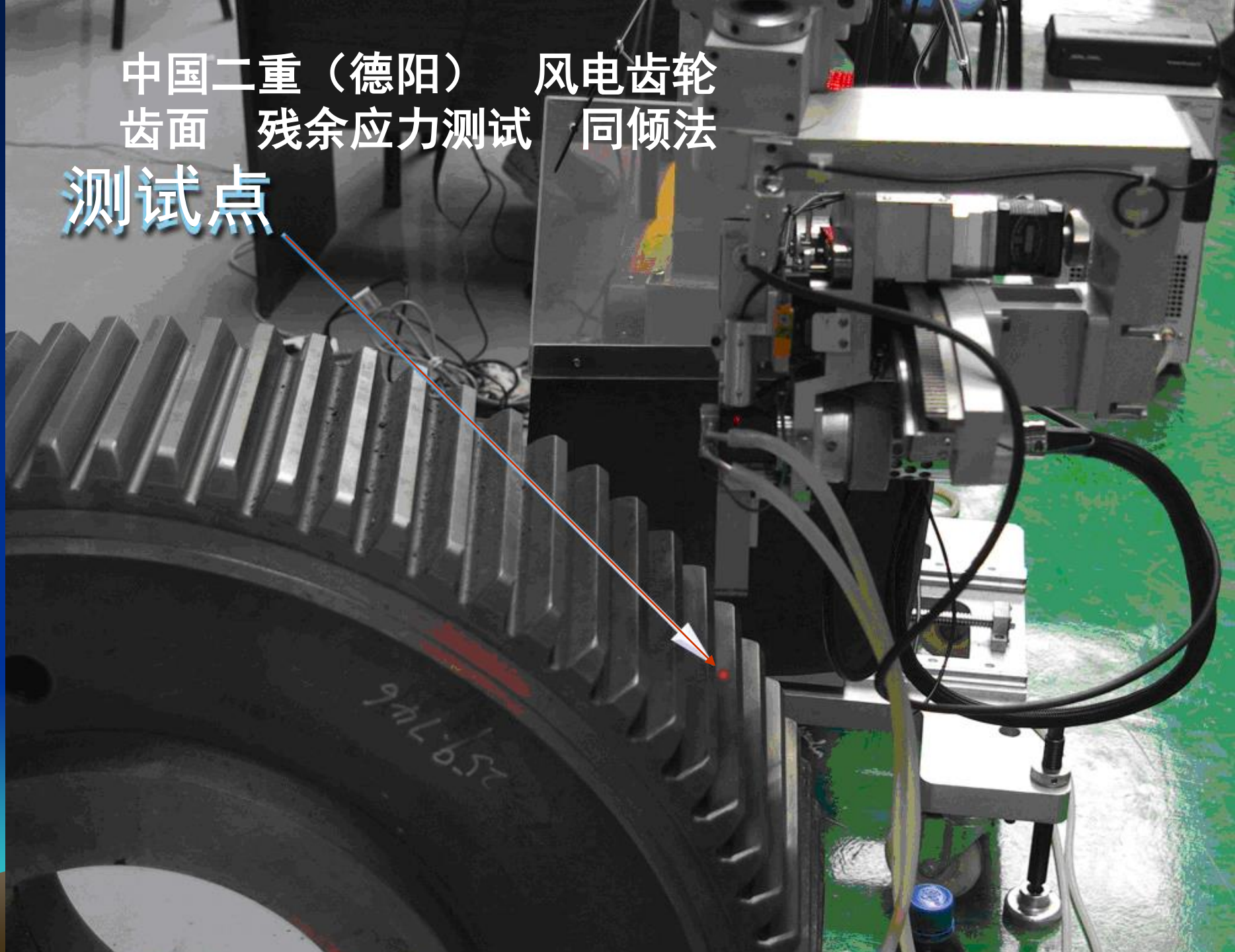




上海宝钢 轧辊 残余应力和残奥含量现场测试

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。

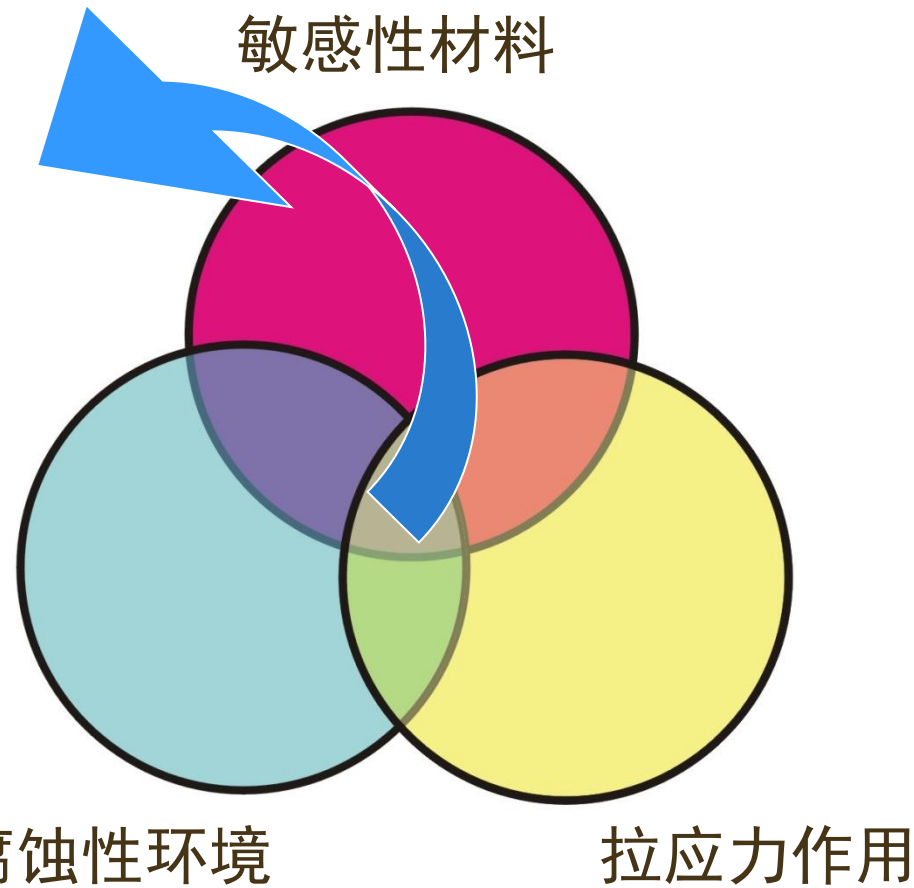
第二天工作人员果然发现了相当数量的断掉的螺栓头。再次请教郑教授。郑教授开出的药方是把所有高强度螺栓更换为普通螺栓。至此问题得到完满解决。

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。

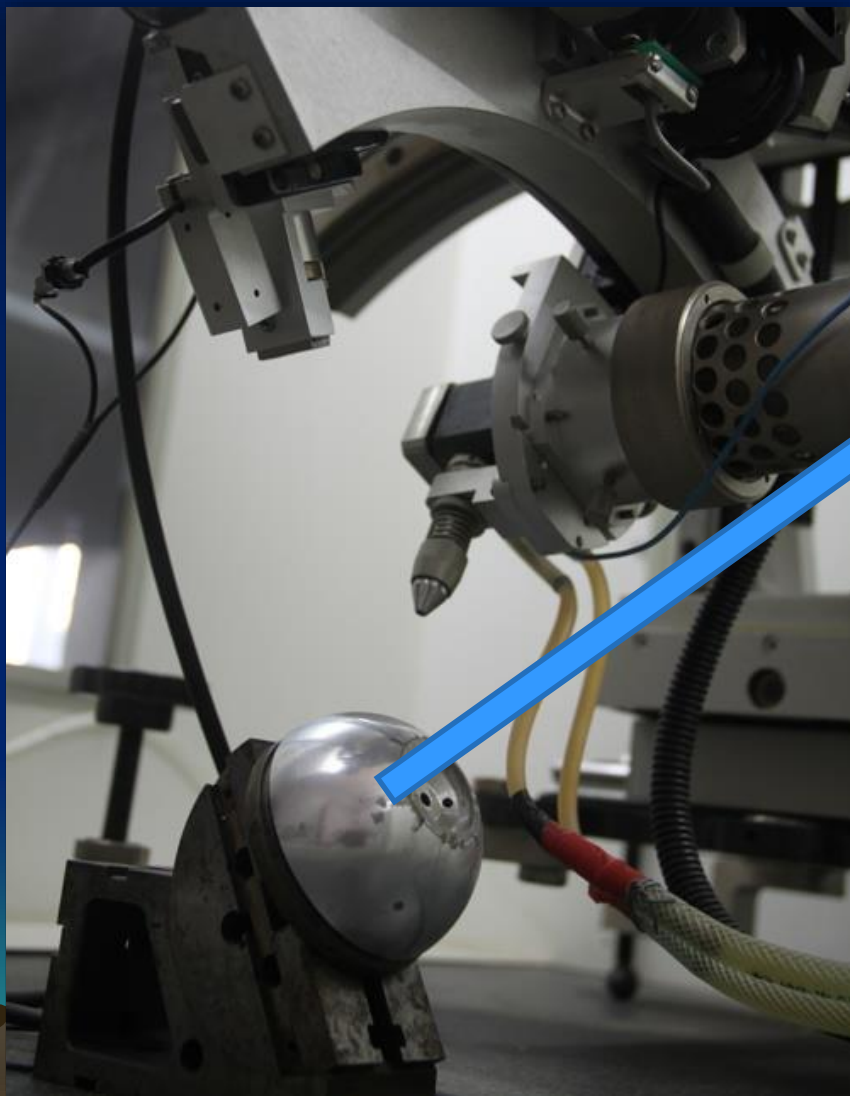






因为存在残余拉应力，经氨熏试验，发生严重的裂纹。这是典型的应力腐蚀现象。

## 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。

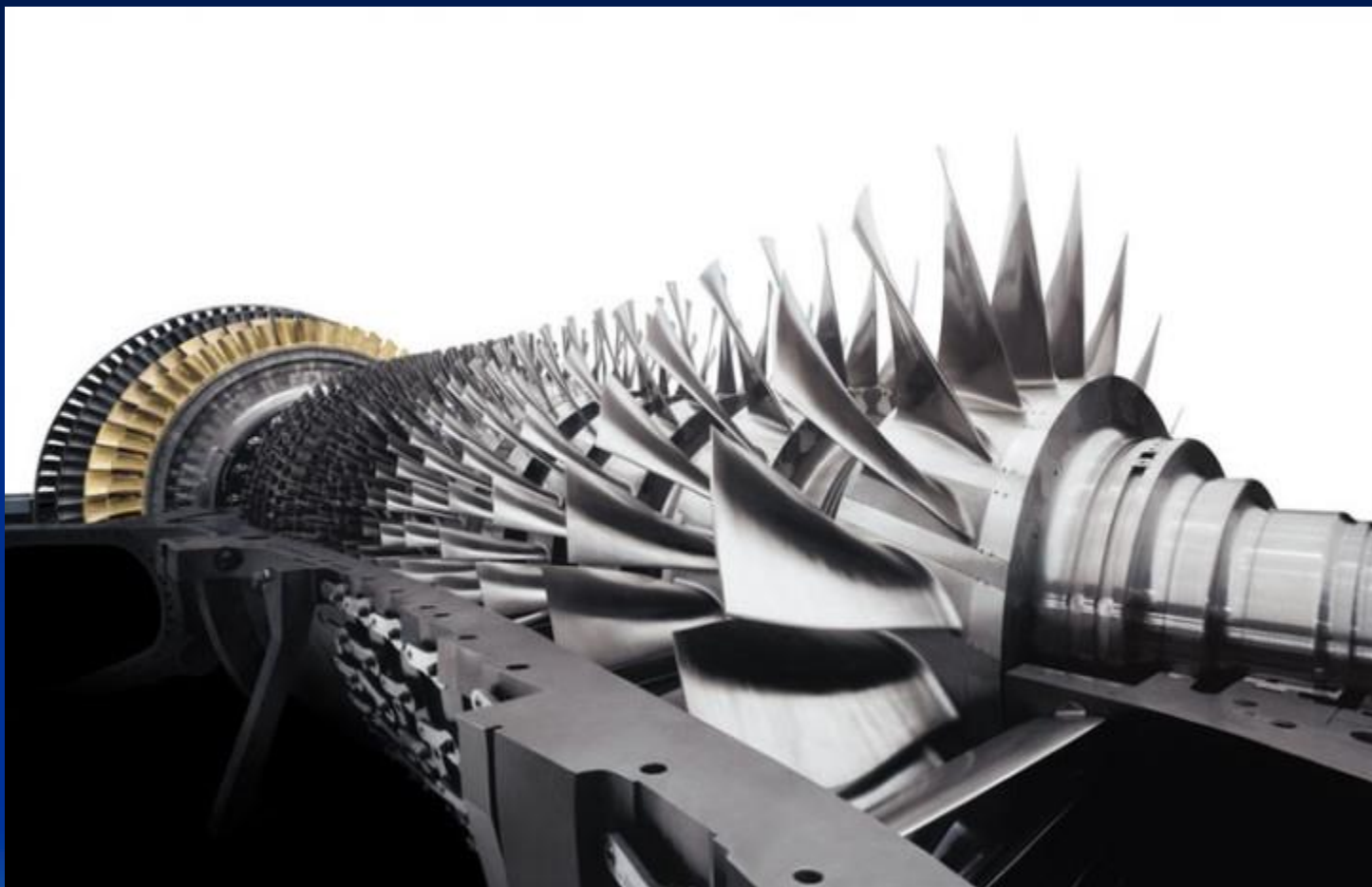
**差之毫厘.谬以千里。**

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



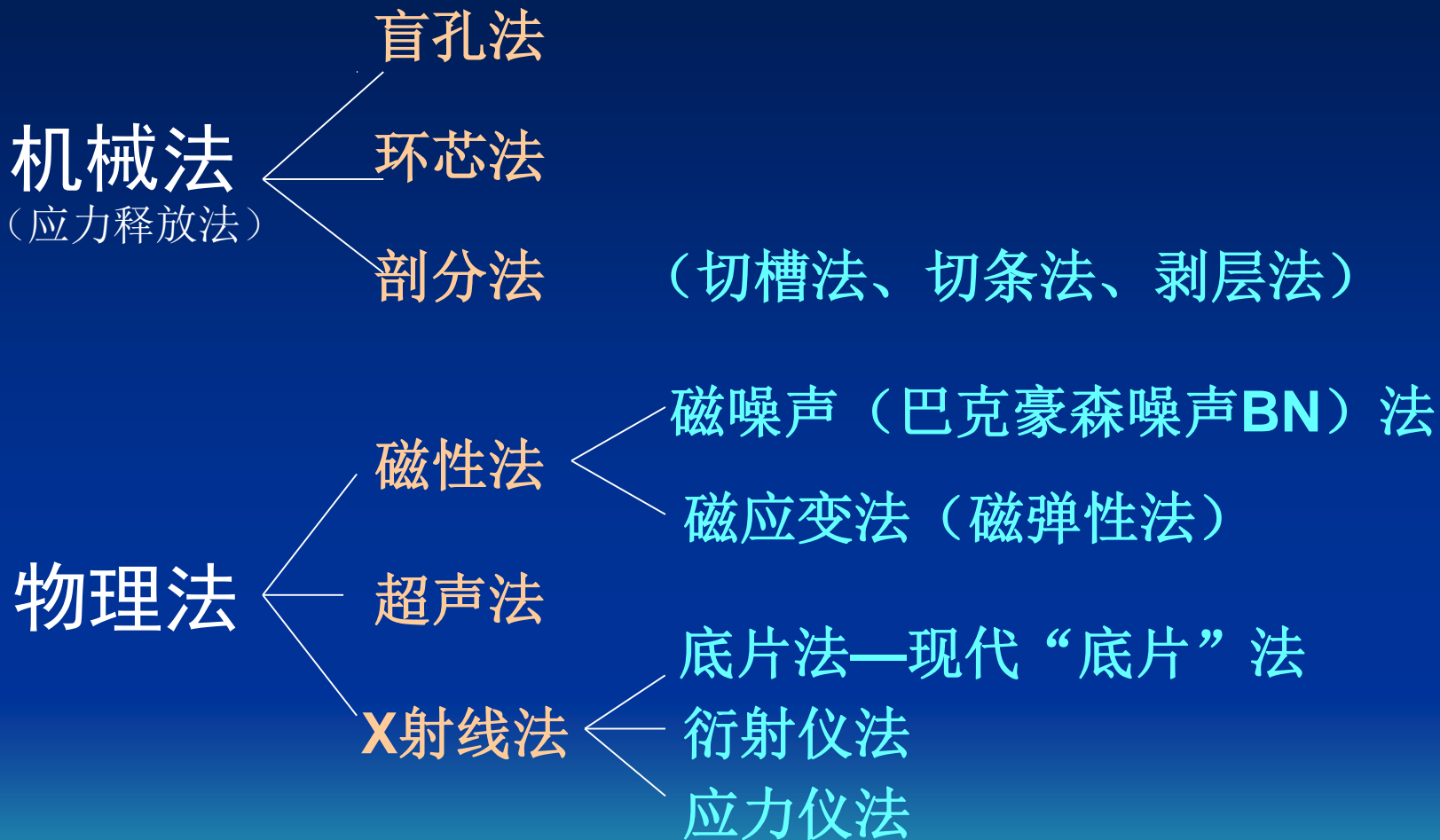
航空发动机钛合金铝合金“叶片匣”（环状，直径900至1200mm）的残余应力备受关注，目标是严格控制变形。

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。



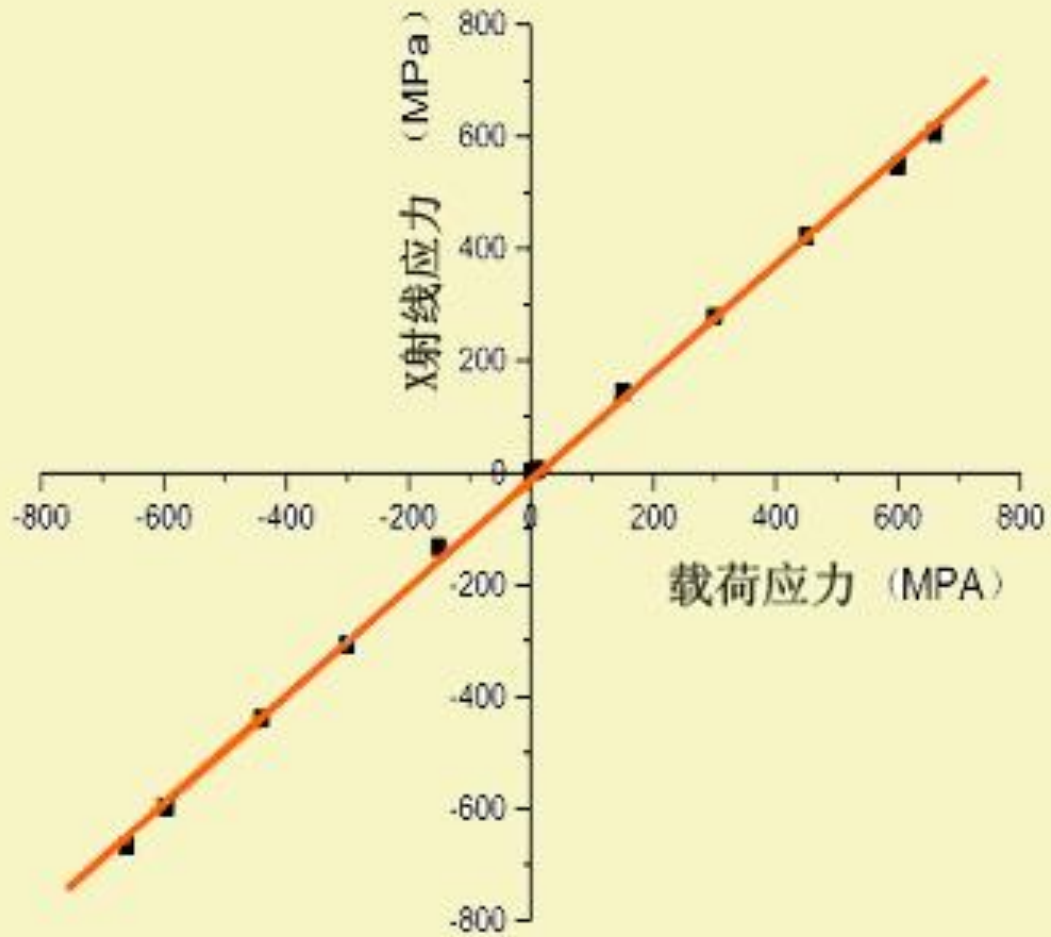
# 测试方法分类

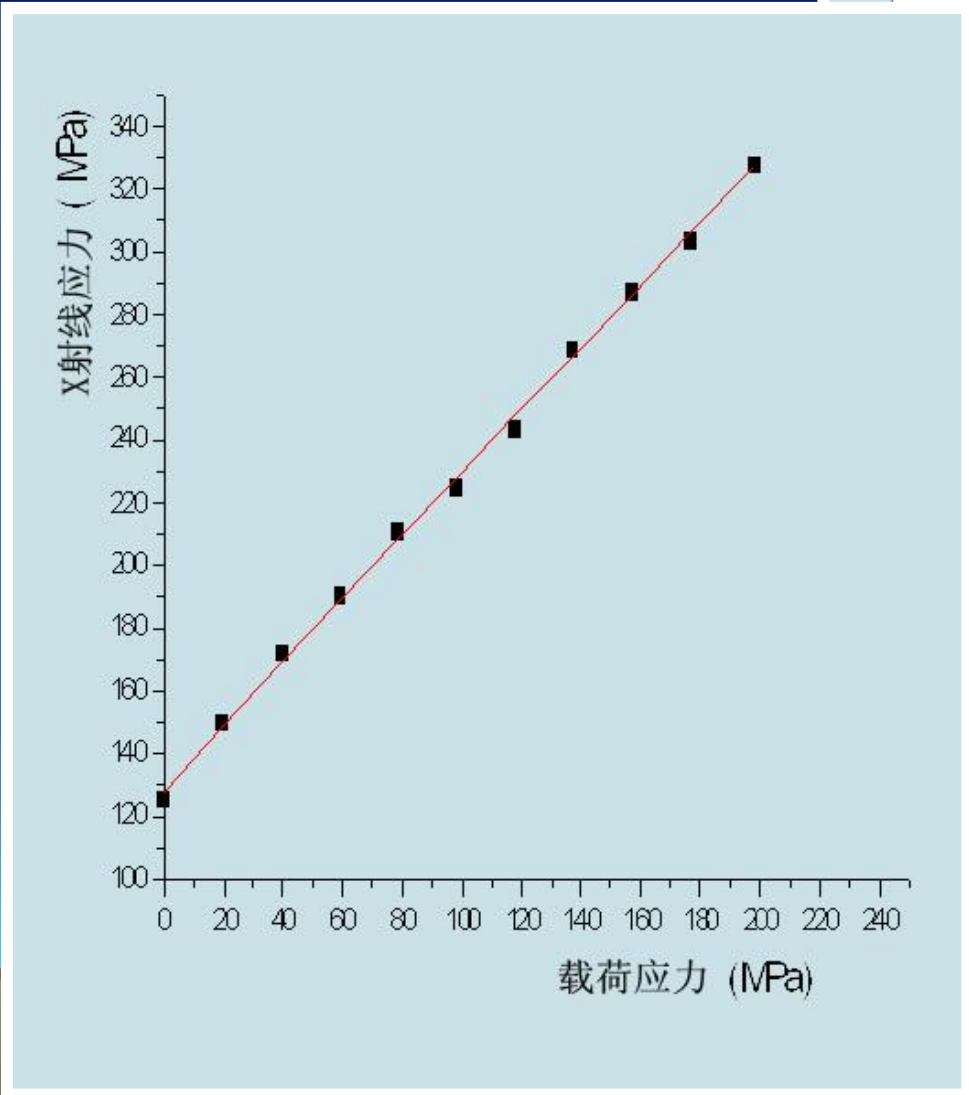
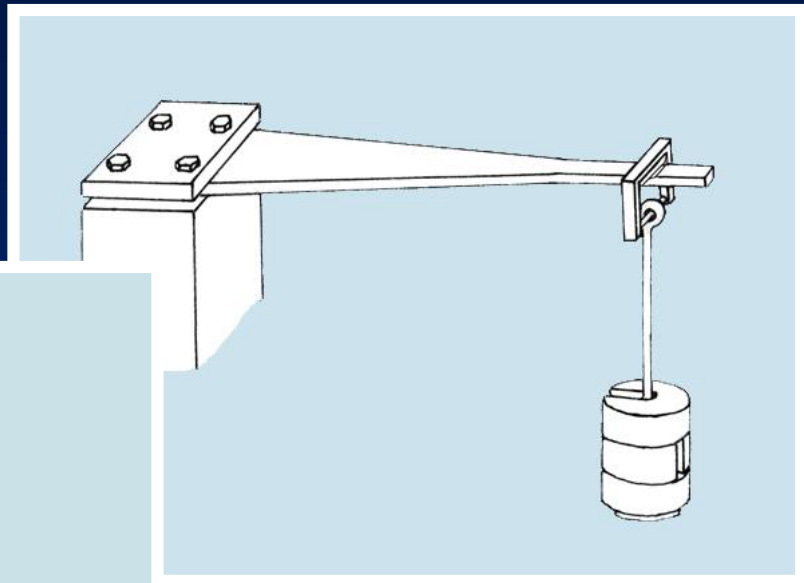


# X射线衍射法的特点

- 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 $2\theta$ 宽度为 $0.029^\circ$ ，所以探测器的一次 $2\theta$ 宽度为 $14.8^\circ$ 。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 $2\theta$ 宽度为 $16^\circ$ 。

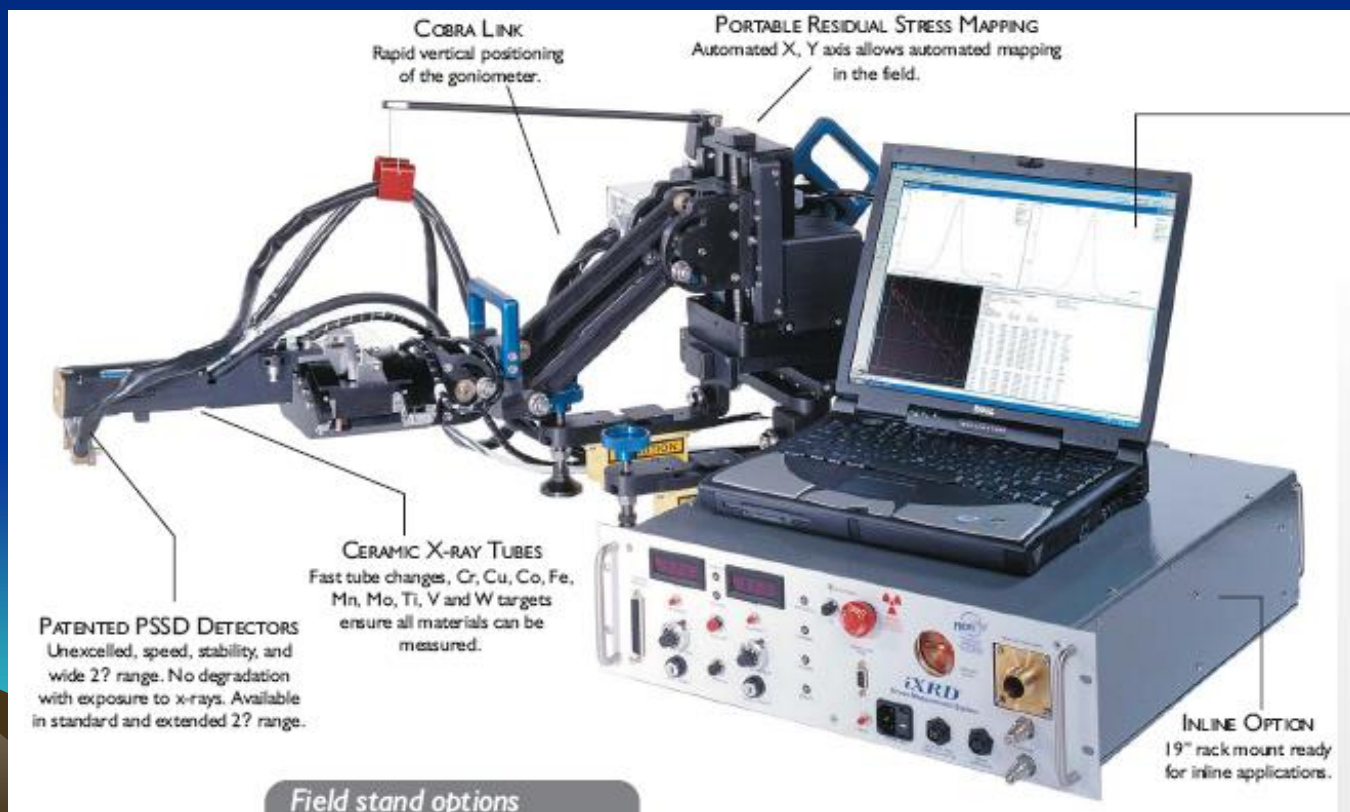


# 加拿大Proto X 射线衍射应力分析仪

## 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

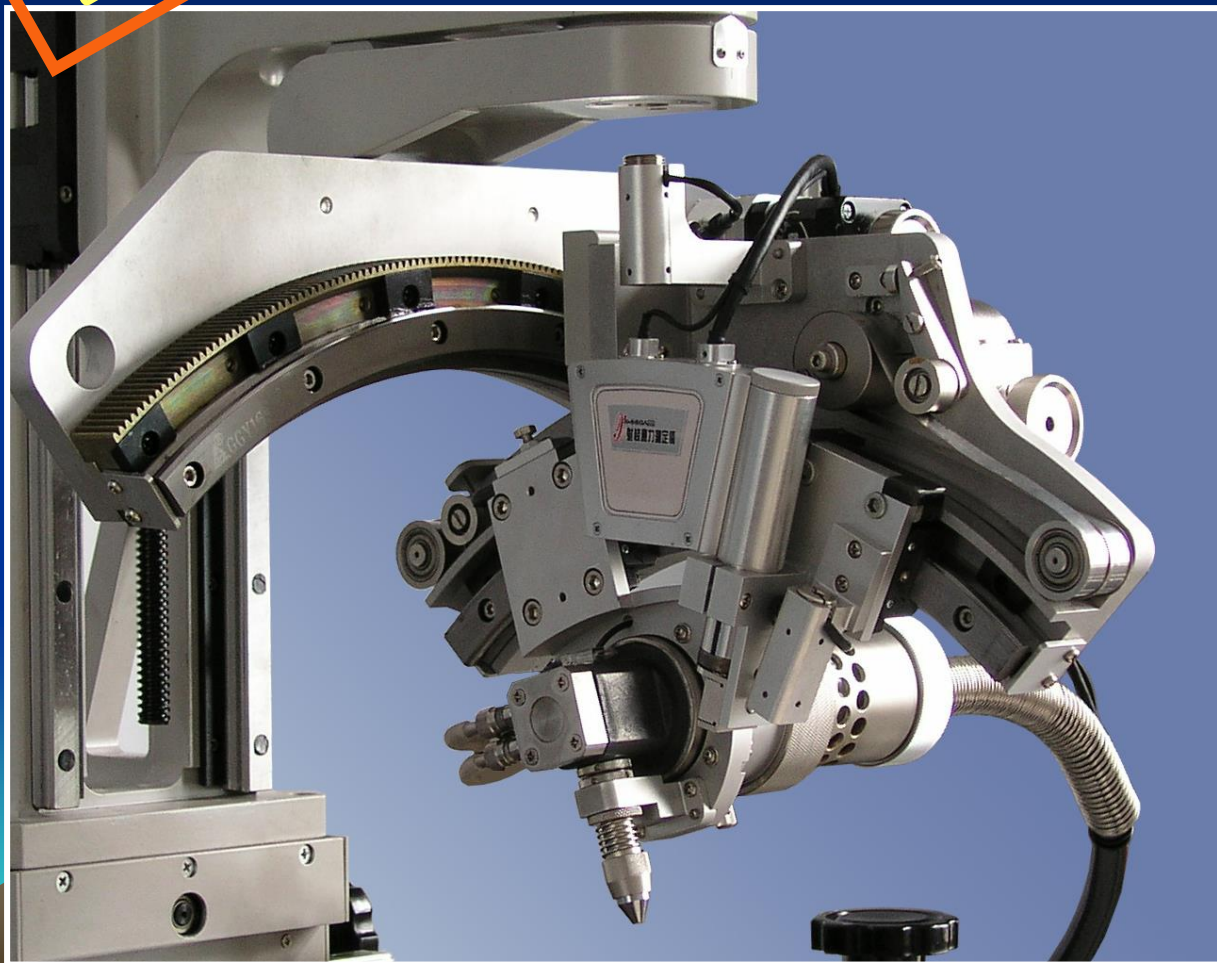
提供6种不同  
支架。高精度  
三坐标运动和  
定位装置，可  
以自动生成三  
维应力分布图，  
形象地展示应  
力分布。



# 国产 X 射线应力测定仪

创新点

$\theta-\theta$  扫描  $\psi$  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 $\psi$ 法结合在一起，实现侧倾固定 $\psi$ 法——最理想的测量方法。吸收因子恒等于1，大幅度扩展了 $2\theta$ 扫描范围。

# 国产 适用于实际工件的 X 射线衍射分析仪

## 特点

$\theta$ - $\theta$  扫描  $\psi$  测角仪

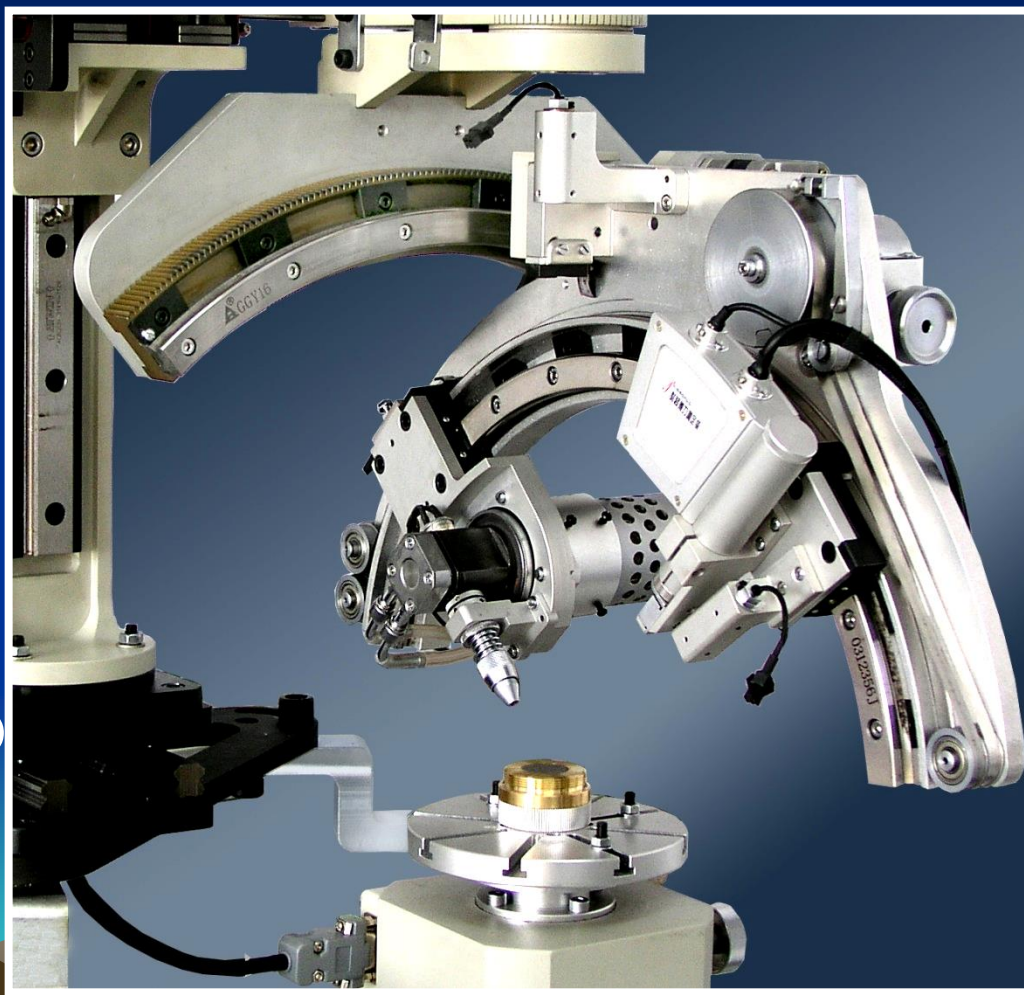
2 $\theta$  扫描范围

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

## 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

