



零部件残余应力测试及相关设备

昌宇应力技术（上海）有限公司
白涛 博士



昌宇应力技术（上海）有限公司成立于2016年4月

总部：位于江景秀美的上海浦东新区张杨路188号汤臣商务中心

残余应力分析实验室：上海青浦区双联路168号复襄公社4号楼211-212室

生产制造基地：无锡市新吴区新锦路101-8号
无锡富岛科技股份有限公司



昌宇应力技术(上海)有限公司 能做什么？

技术服务

- 齿轮抗疲劳设计
 - 提高齿轮弯曲疲劳强度
 - 改善齿轮接触疲劳强度
- 残余应力检测服务
 - X射线衍射残余应力检测
 - 全自动盲孔法残余应力检测
 - 微区应力分析
 - 残留奥氏体检测
 - 制备应力云图
 - 现场应力检测等

设备制造

- 双通道抛丸机



1 残余应力的基本概念

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 (德, 维勒) 指出火车轴的断裂有内应力作用这个因素。

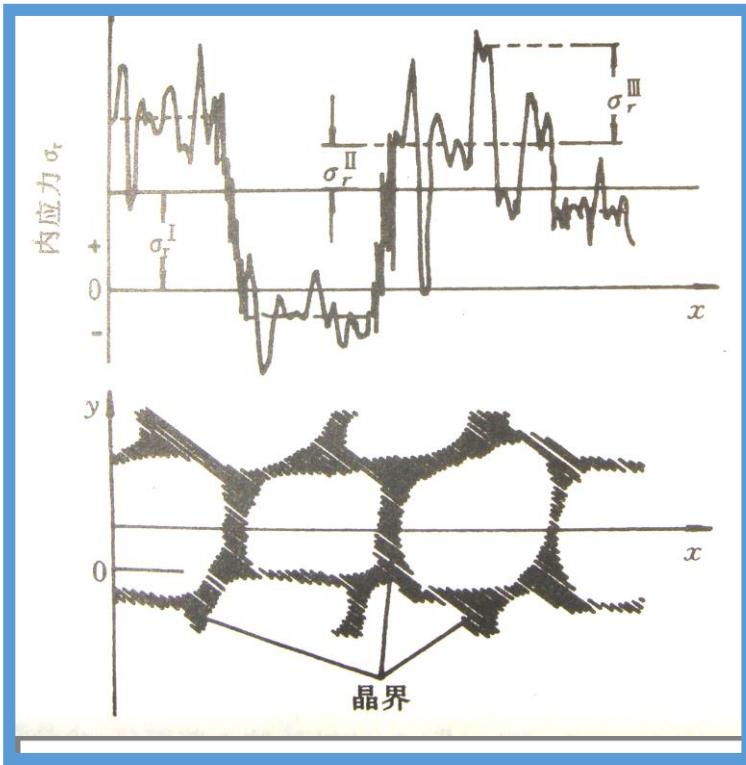
1925年 Masing (玛辛) 首次提出将内应力分为三类。

1935年 Давиденков (苏, 达维金科夫) 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 Macherauch(德, 马赫劳赫) 提出了新的内应力模型



Macherauch的定义：

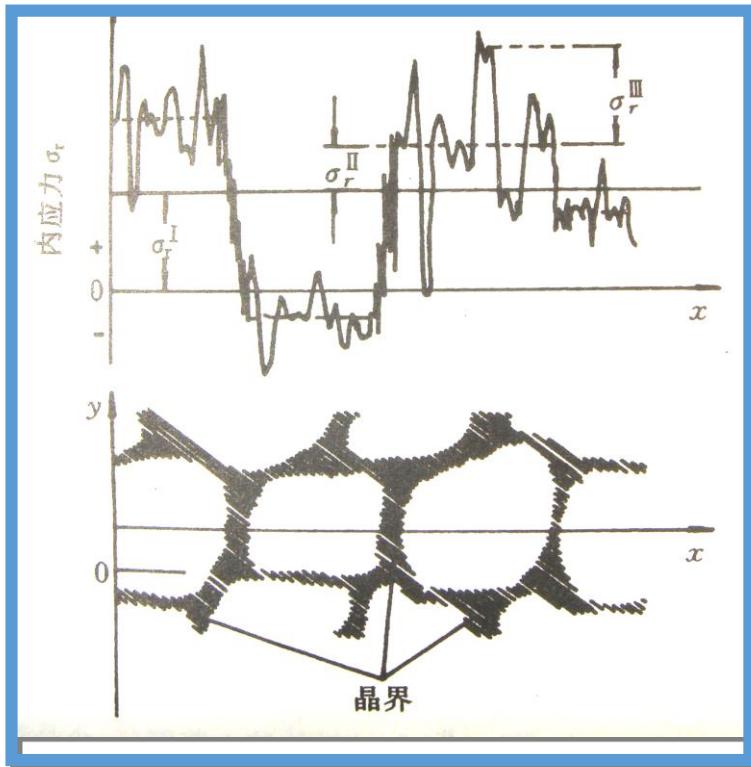


第一类内应力 (σ_r^I)

在较大的材料区域（很多个晶粒范围）内几乎是均匀的。与第I类内应力相关的内力在横贯整个物体的每个截面上处于平衡。与 σ_r^I 相关的内力矩相对于每个轴同样抵消。当存在 σ_r^I 的物体的内力平衡和内力矩平衡遭到破坏时会产生宏观的尺寸变化。



Macherauch的定义：

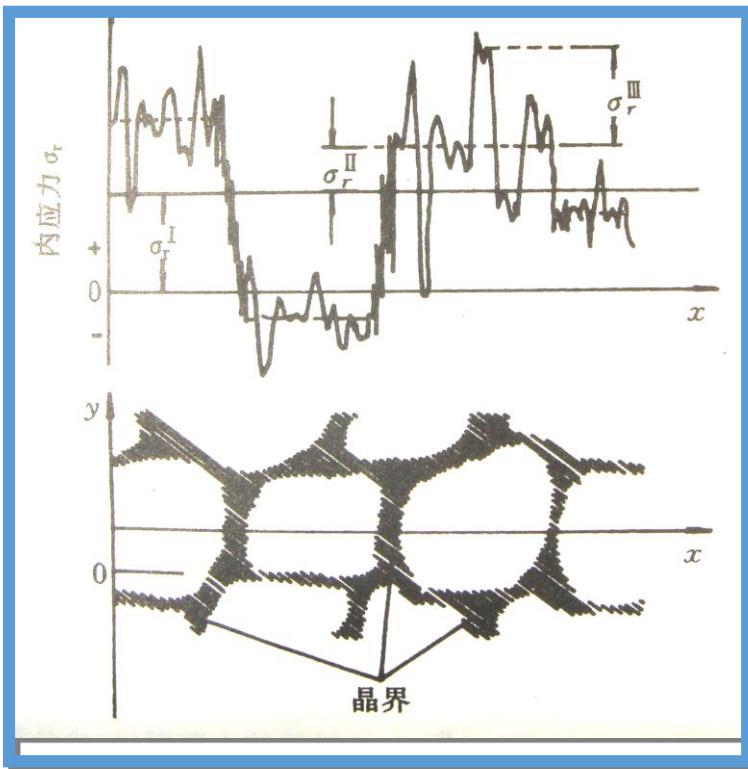


第二类内应力 (σ_r^{II})

在材料的较小范围（一个晶粒或晶粒内的区域）内近乎均匀。与 σ_r^{II} 相联系的内力或内力矩在足够多的晶粒中是平衡的。当这种平衡遭到破坏时也会出现尺寸变化。



Macherauch的定义：



第三类内应力 (σ_r^{III})

在极小的材料区域（几个原子间距）内也是不均匀的。与 σ_r^{III} 相关的内力或内力矩在小范围（一个晶粒的足够大的部分）是平衡的。当这种平衡破坏时，不会产生尺寸的变化。



什么是残余应力？

- ◆ 国内科技文献习惯于将第一类内应力称为残余应力
- ◆ 至于通常所说的“热处理应力”，“焊接应力”，“铸造应力”等则是实施这些工艺的过程中产生并最终残留的残余应力（即第一类内应力）的简称。
- ◆ 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）
- ◆ 残余应力是在没有外力或外力矩作用的条件下构件或材料内部存在并自身平衡的宏观应力。（GB7704 《X射线应力测定方法》）



残余应力的产生

残余应力是材料中发生了不均匀的弹性变形或不均匀的弹塑性变形而引起的，或者说是材料的弹性各向异性和塑性各向异性的反映。

单晶体材料是一个各向异性体。

多相多晶体材料在宏观上表现出“伪各向同性”。

在微区，由于晶界的存在和晶粒的不同取向，弹塑性变形总是不均匀的。



造成材料产生残余应力的原因主要有：

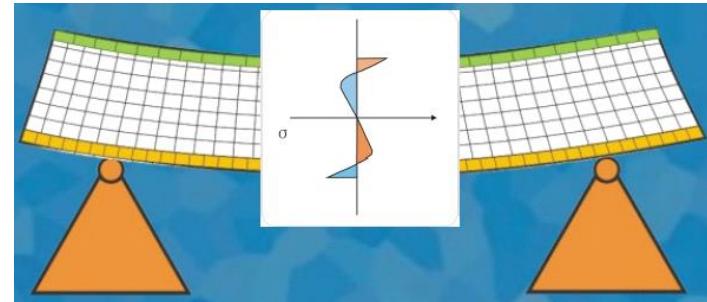
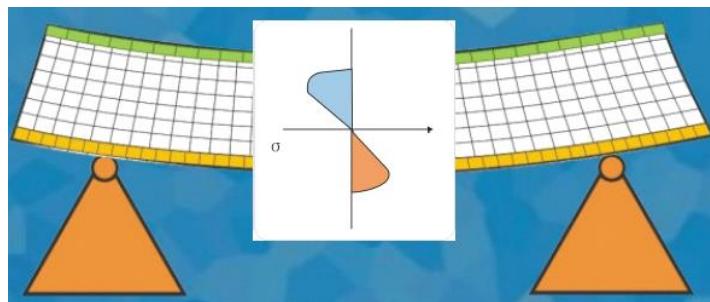
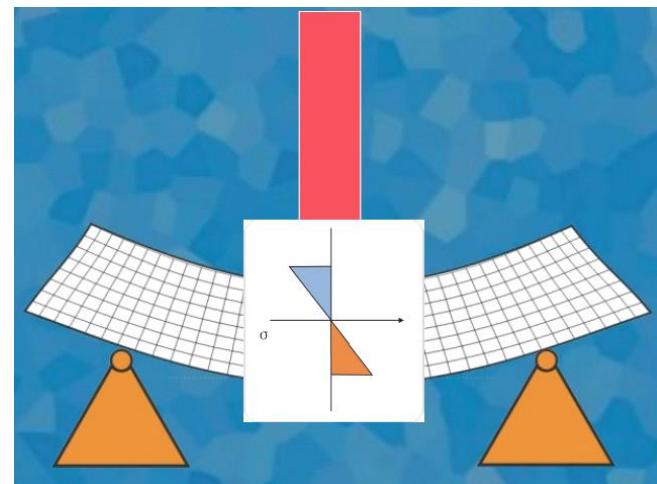
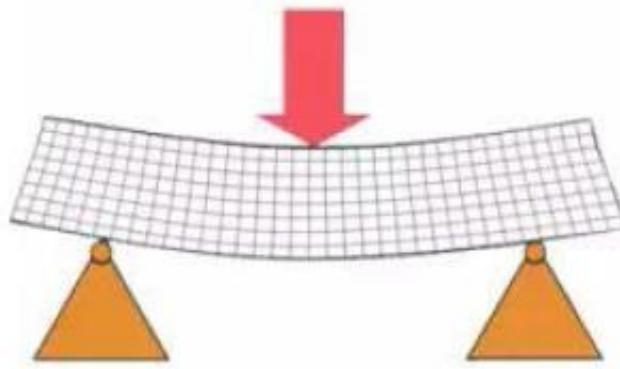
外加作用和影响造成的不均匀弹塑性变形才是残余应力的来源。

- i) 不均匀的机械变形；
- ii) 不均匀的温度变化，导致热胀冷缩不均匀；
- iii) 热处理时不均匀的温度分布引起相变过程的不同时性（不均匀的相变）。



不均匀的机械变形

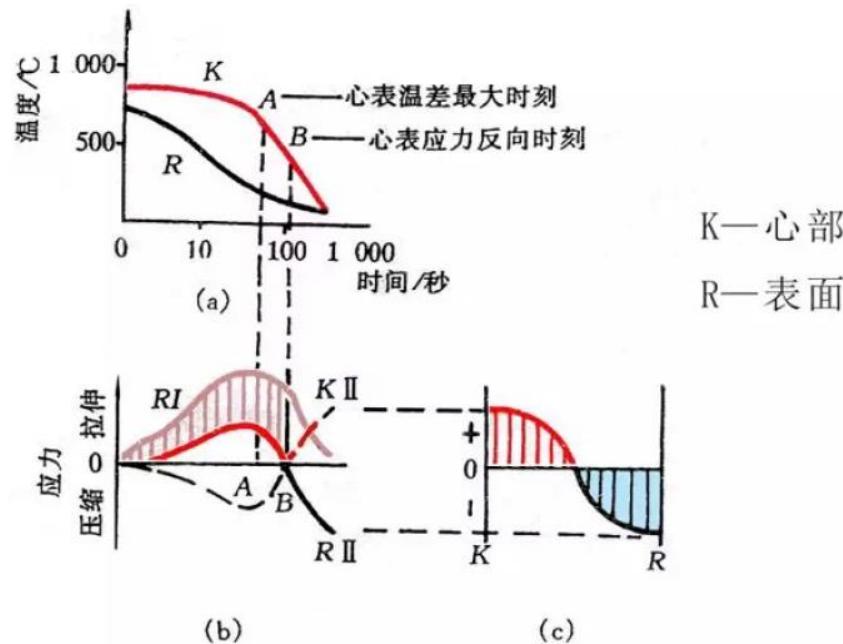
简支梁：





不均匀的温度变化

因加热或冷却过程中温度分布不均匀而产生的残余应力又常称为热影响残余应力。它本质上也是由于材料相邻区域塑性变形的差异造成的，这种塑性变形是冷却（或加热）时心表温差引起的热应力作用的结果。下面以圆柱钢制试样冷却过程（无相变发生）为例进行说明：





总上所述，铸造、焊接、各种机加工、热处理等等工艺都会给零件留下残余应力。

既然残余应力不可避免，残余应力的作用：

- 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。
- 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（残余压应力）来提高零件的疲劳寿命。
- 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。
- 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。



残余应力的测定方法：

机械法（应力释放法）

盲孔法

环芯法

部分法

切槽法
切条法
剥层法

物理法

磁性法

超声法

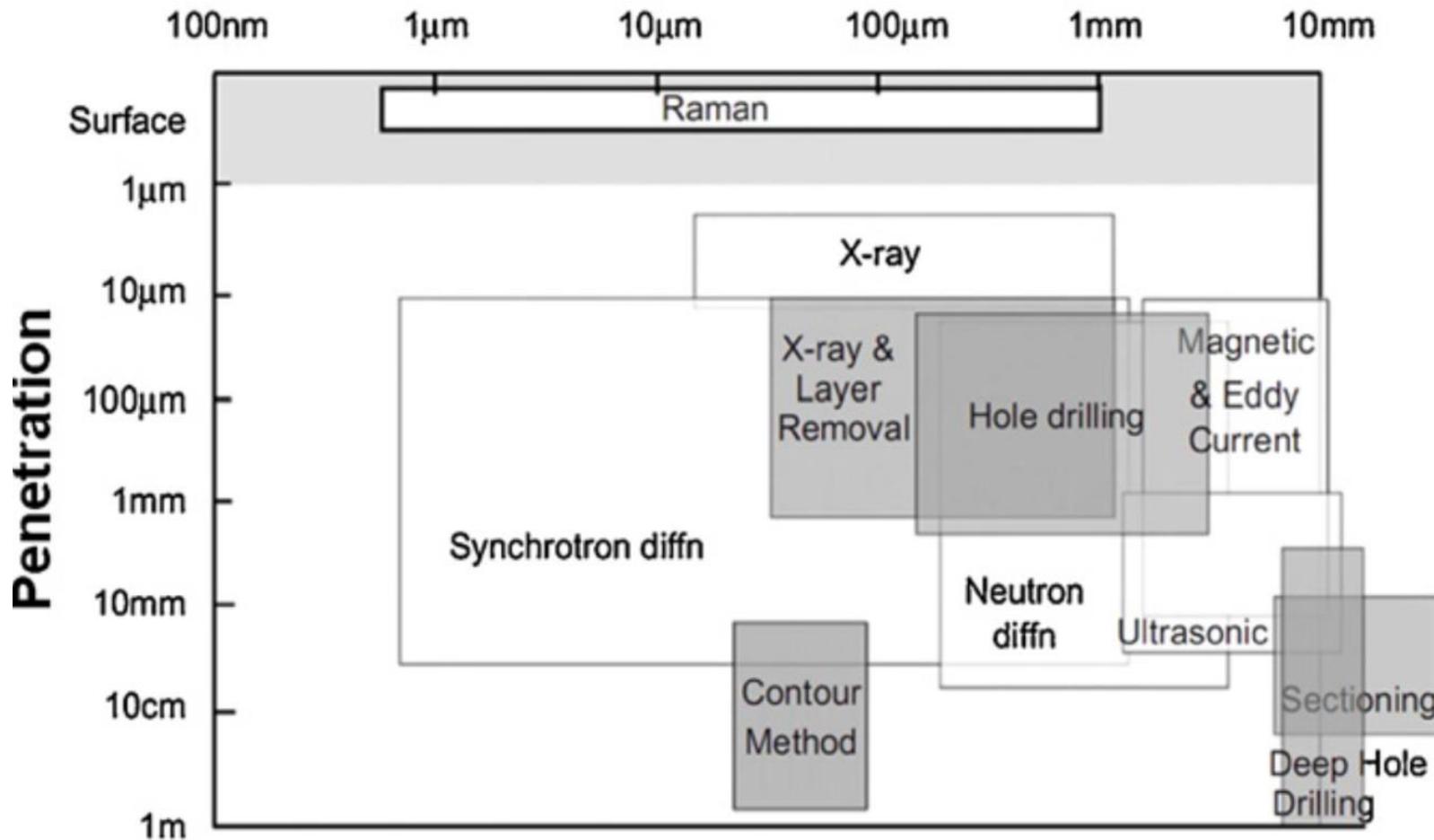
X射线法

磁噪声（巴克豪森噪声BN）法
磁应变法（磁弹性法）

底片法—现代“底片”法
衍射仪法
应力仪法

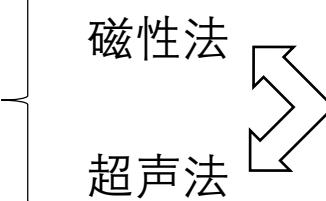


Spatial Resolution





不同方法的比较：

相关关系  内应力的变化会引起其变化但并不是唯一主要因素

磁性法
超声法

因果关系  内应力的变化是引起其变化的唯一主要因素

X射线法：内标
盲孔法（电阻）：外标



盲孔法和X射线法的比较：

盲孔法：由J. Mathar于1934年首先提出，后经研究改进，形成了比较成熟的通过钻小孔测量构件残余应力的技术。

- 破坏性质的有损测试手段
- 适用于晶体及非晶体材料
- 由于需要贴应变花和钻孔，小曲面或者复杂结构的残余应力测试比较困难
- 铣刀价格昂贵，一把铣刀通常只能测试1到2个点，所以大量测试和长期使用的成本较高

X射线法：用X射线衍射分析技术来测定材料中的残余应力的一种方法。

- 属于物理方法，不改变原始的应力状态，无损检测。
- 用于测试晶体材料
- 对于测试小曲面或者复杂结构的残余应力有独特优势
- X射线穿透深度 $5\sim30\mu\text{m}$ ，搭配化学剥层的方法可测深层应力。
- 对材料的表层状态较敏感。表面光洁度越高，应力测定就越准确；粗糙的表面应力会有一定程度的释放。**GB7704**规定被测部位表面粗糙度Ra应小于 $10\mu\text{m}$ 。采用适当的方法清除油污、氧化皮和锈斑。



二者测试数据如何对比？



- ◆ 同一部件同一位置
- ◆ 盲孔法给出的是主应力，而X射线法测试的是单一方向应力，因此对比前需要用X射线法测试三个方向应力后计算出主应力
- ◆ X射线单次剥层深度要与盲孔法中的步进钻孔深度一致

数据不可能完全相同，但趋势一致！



主要特性	
高速气动涡轮转速	最高达40万转/分钟
高速电机转速	最高达5万转/分钟
慢速电机转速	100转/分钟
钻孔步进精度	10微米
软件	EVAL



爱派克公司代理的SINT MTS3000





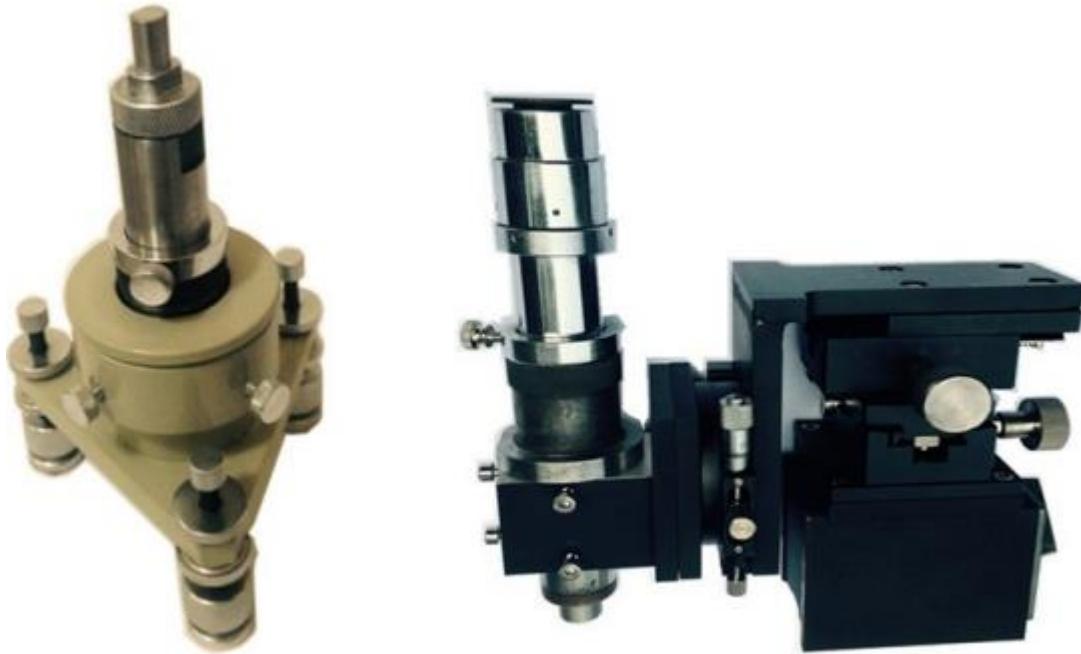
主要技术指标：

对中精度：±0.025mm

钻孔直径：1.5 – 3.0mm

钻孔深度：0 – 2.0mm

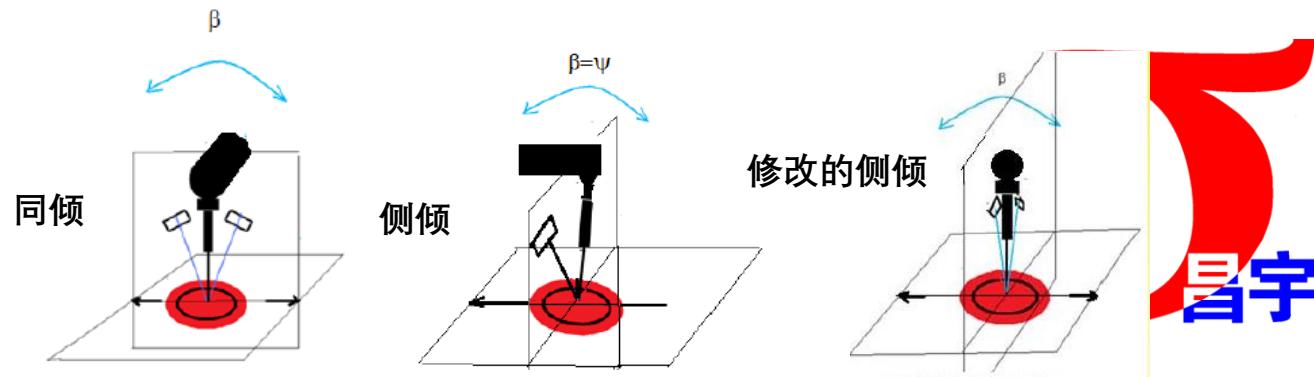
移动行程：±20mm



郑州机械研究所ZDL-III型盲孔法测残余应力钻孔装置

$\text{Sin}^2\psi$ 法

同倾法、侧倾法、
修改的侧倾法



3000瓦研究级微区应力仪



1200瓦大功率实验室应力仪



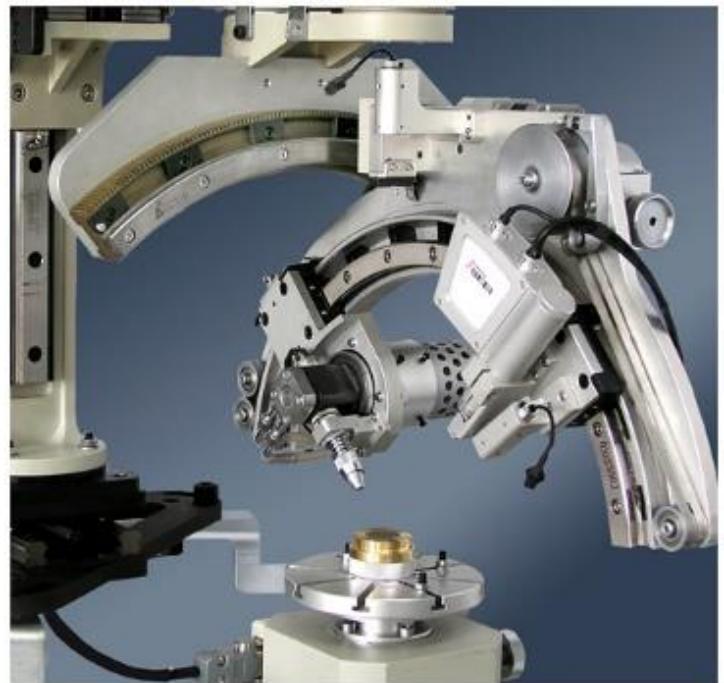
300瓦便携式残余应力仪

爱派克公司代理的加拿大PROTO X射线残余应力仪



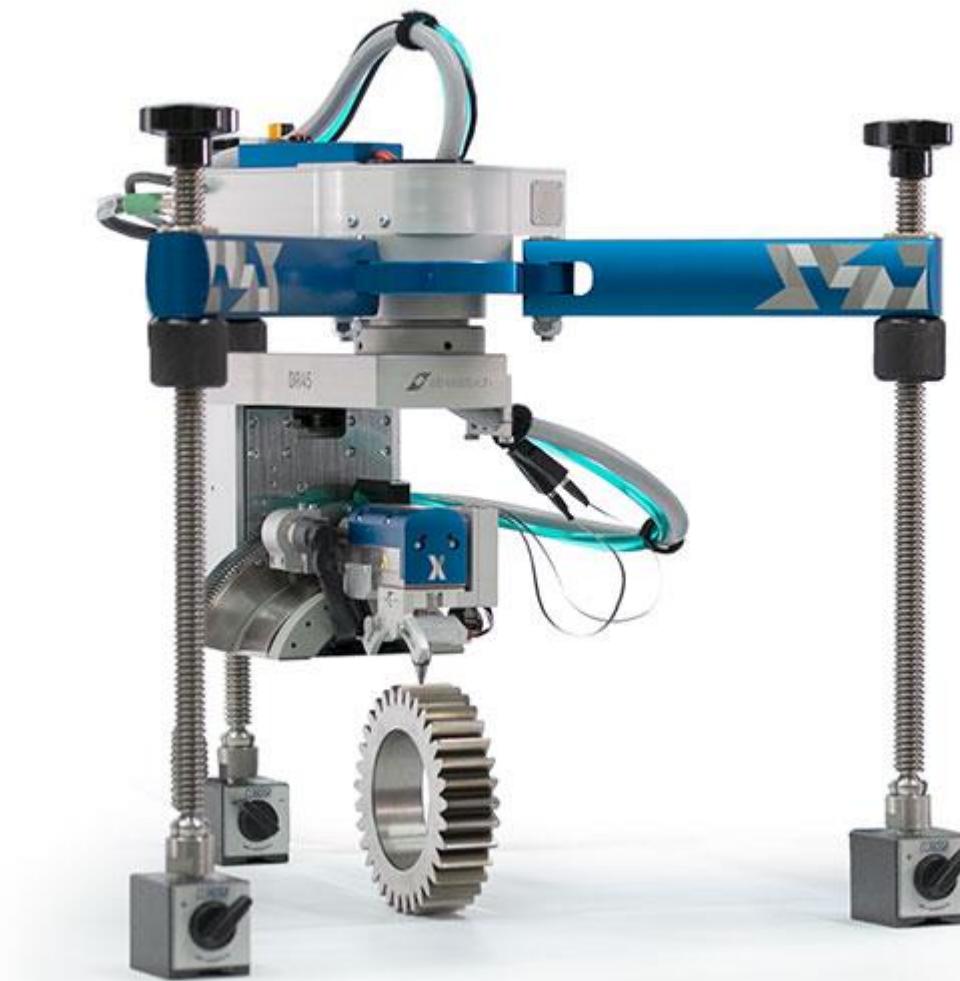


侧倾法：



邯郸爱斯特公司生产的X-350A残余应力仪

修改的侧倾法

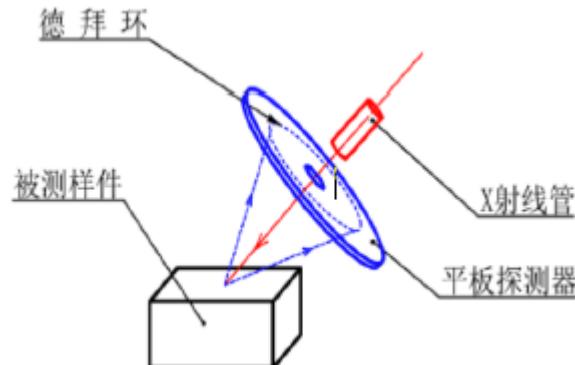


芬兰Stresstech公司生产的Xstress DR45

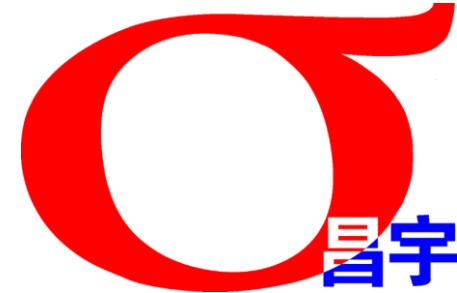


日本Pulstec制造，型号为 μ -x360s

二维探测器一次性采集获取完整德拜环



Cosa法



基本参数

准直器尺寸	标配：直径1mm 被照射面积直径约2mm
X射线管参数	30KV 1.5mA
X射线管所用靶材	标配：铬靶（可选配其他）
是否需要冷却水	无需
是否需要测角仪	无需
X射线入射角度	单一入射角即可获取全部数据
所用探测器	二维探测器
直接测量参数	残余应力 衍射峰的半峰高全宽
测量时间	约60秒钟
电源参数	130W功率 110-240V 50-60HZ
可否户外现场检测	可以 便携、可电池工作



Thank You!

昌宇应力技术（上海）有限公司
商业化的残余应力和喷丸强化技术研发和应用平台

www.cystress.com

bait@cystress.com 13761455663 (微信同号) 白涛



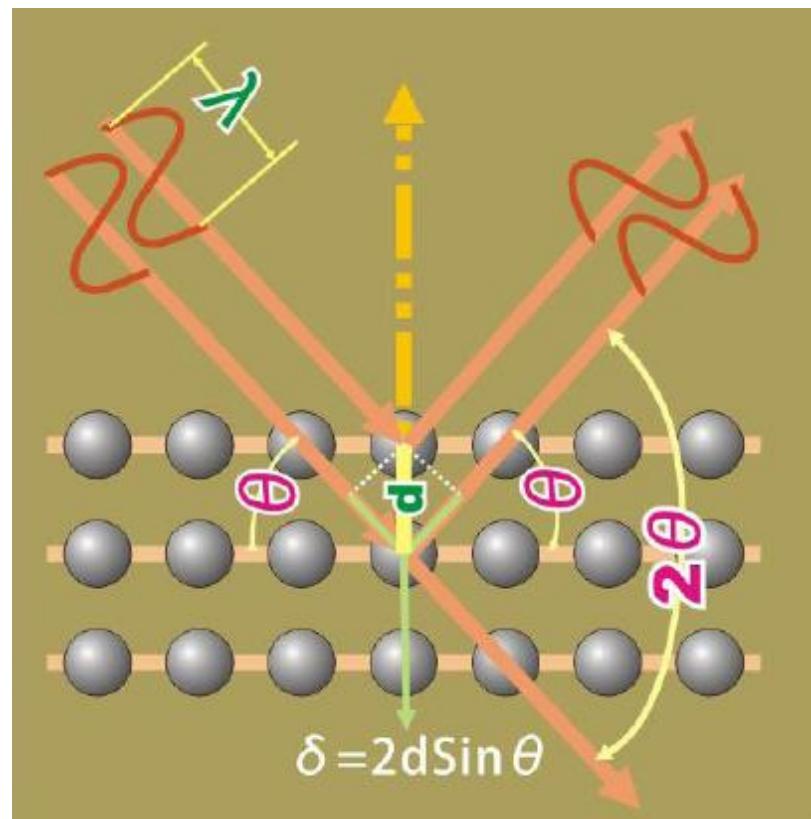
X射线法残余应力测量原理

布拉格方程

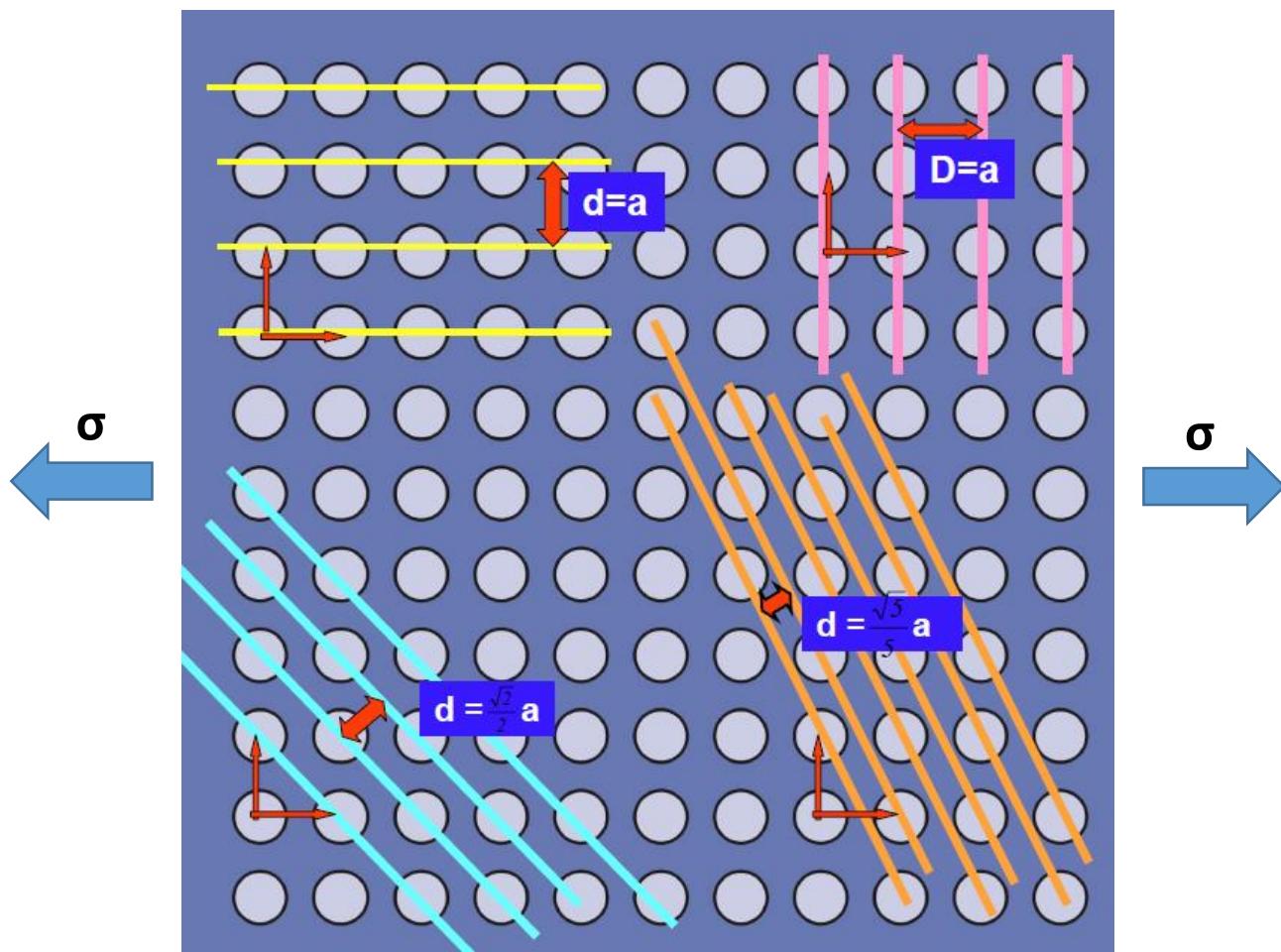
$$n\lambda=2dsin\theta$$

此处 λ 是波长， d 是晶面间距， θ 是入射角

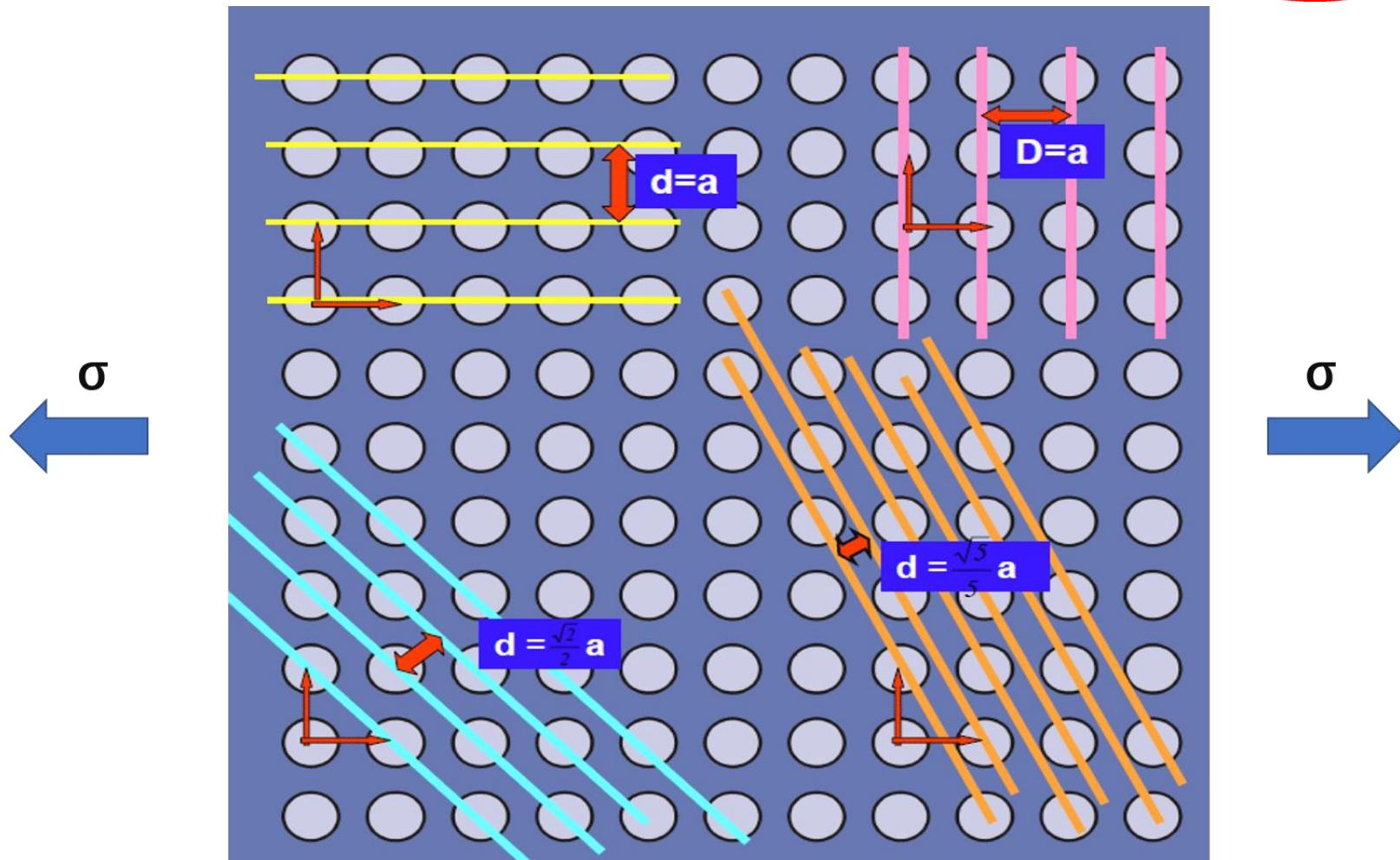
当一束X射线以掠射角 θ 照射到晶体上，若相邻两个原子面反射的X射线的光程差正好等于波长 λ 的整数倍。则在对称于晶面法向的相同角度 θ 处会出现一束衍射线（又称反射线或干涉线）。



σ 昌宇



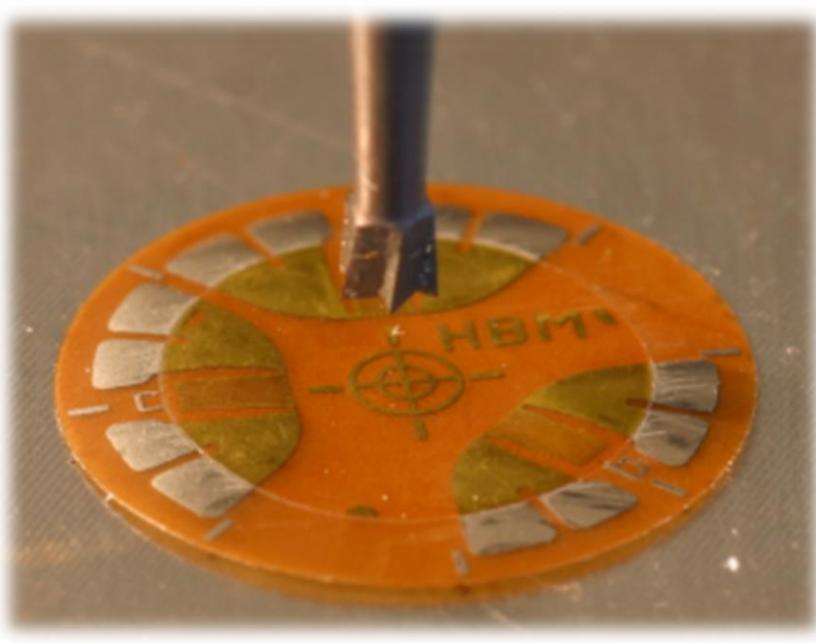
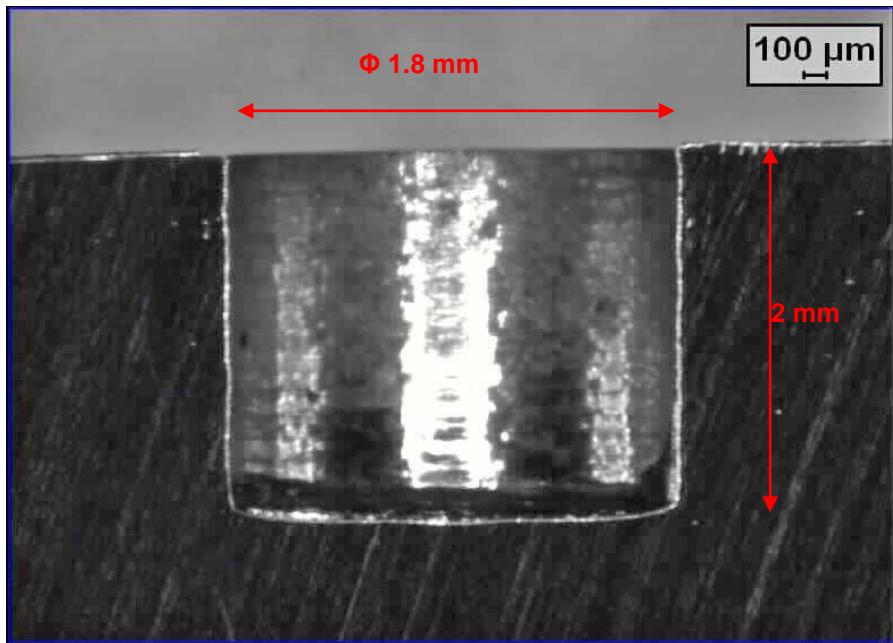
σ
昌宇



Back



钻孔法采用专门的箔式应变花和电阻应变仪来测量孔周围释放的应变，将所测得的应变带入一系列公式便可计算出已去除材料所在部位的残余应力。



Back