

关键零部件的残余应力分析及其应用

姜传海

信箱 chjiang@sjtu.edu.cn

手机及微信 13391307839

上海交通大学材料学院



上海交通大学
残余应力与喷丸强化

本实验室简介



上海交通大学
材料科学院A楼



残余应力分析与
喷丸强化实验室

实验室简介

上海交大残余应力与喷丸强化实验室，具有**60**多年发展历史，长期从事关键零部件的残余应力分析与喷丸强化工作。拥有多套台高端仪器设备，负责全国残余应力标样研制与校准工作。国内合作单位**700**余家，年检测残余应力数据超过**10**万组

挂靠在本实验室的专业委员会

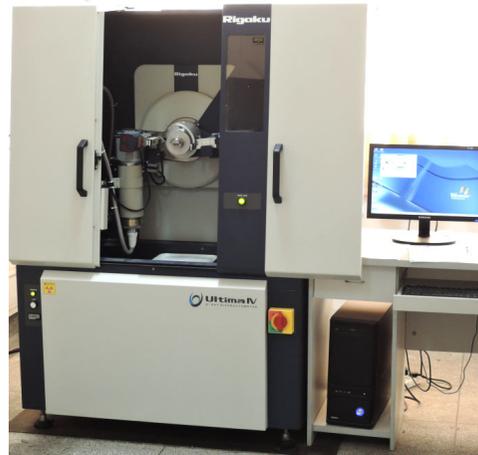
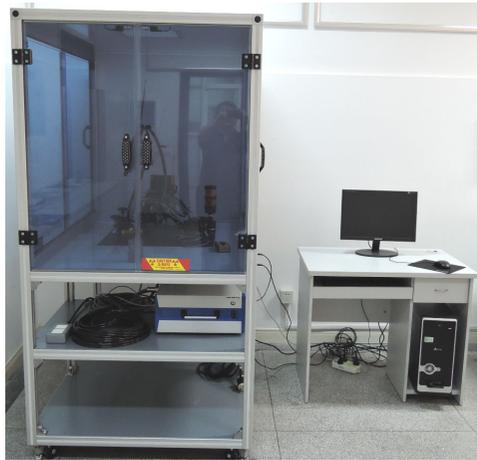
全国残余应力专业委员会

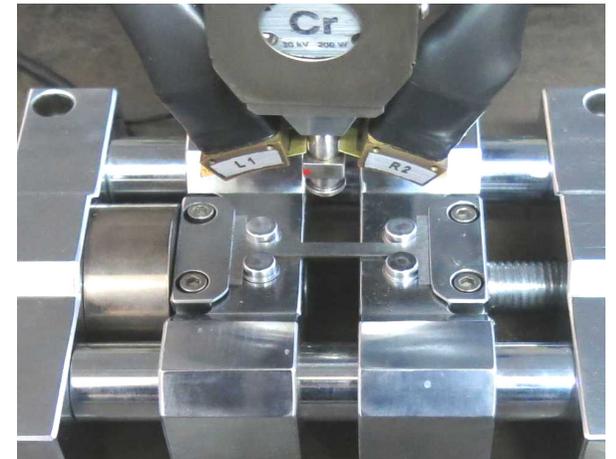
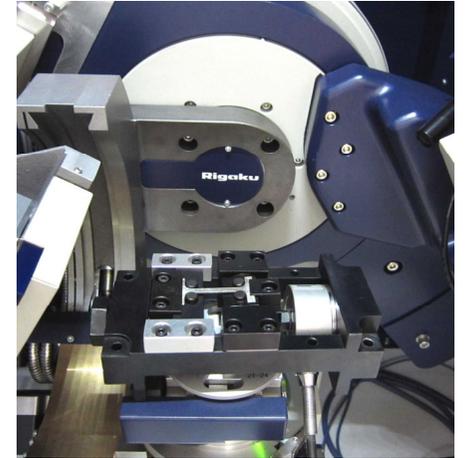
全国喷丸技术专业委员会



上海交通大学
残余应力与喷丸强化

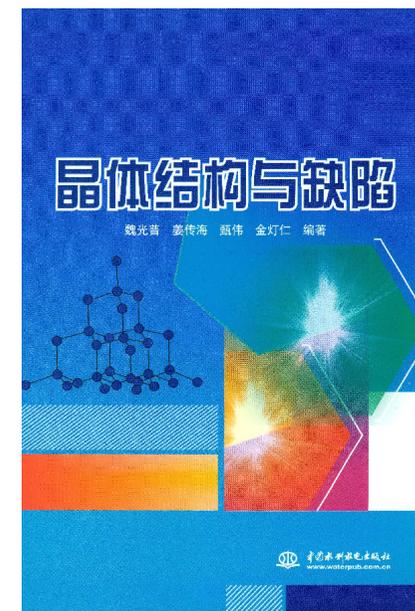
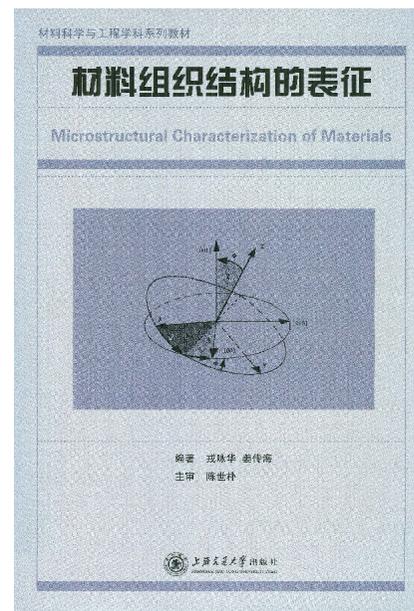
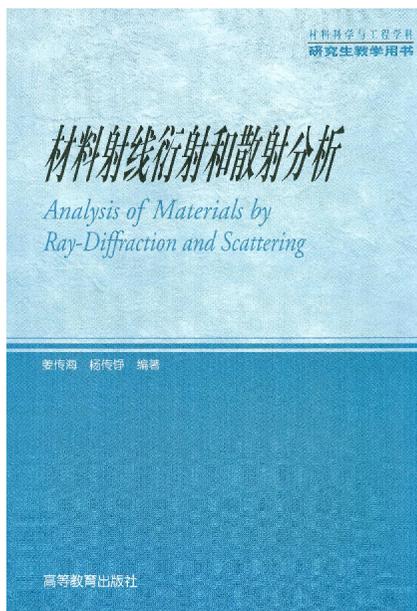
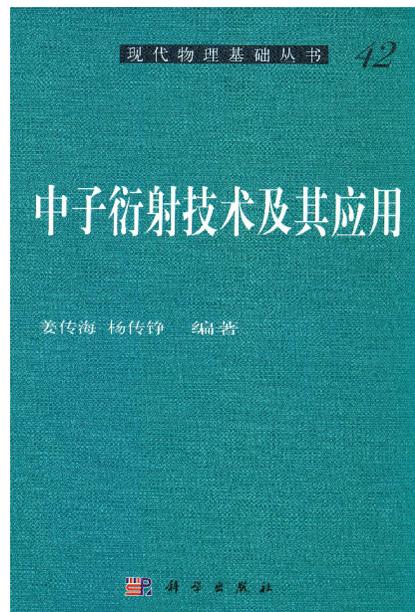
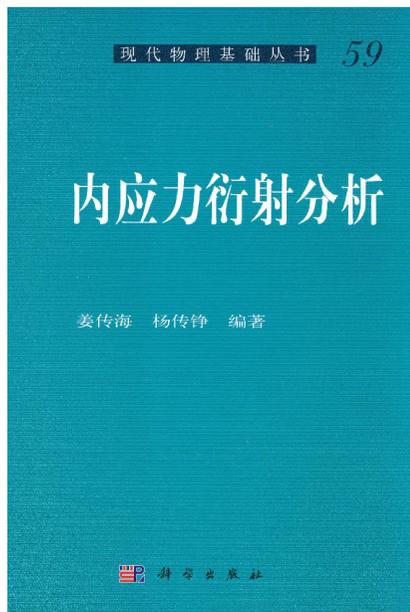








上海交通大学
残余应力与喷丸强化



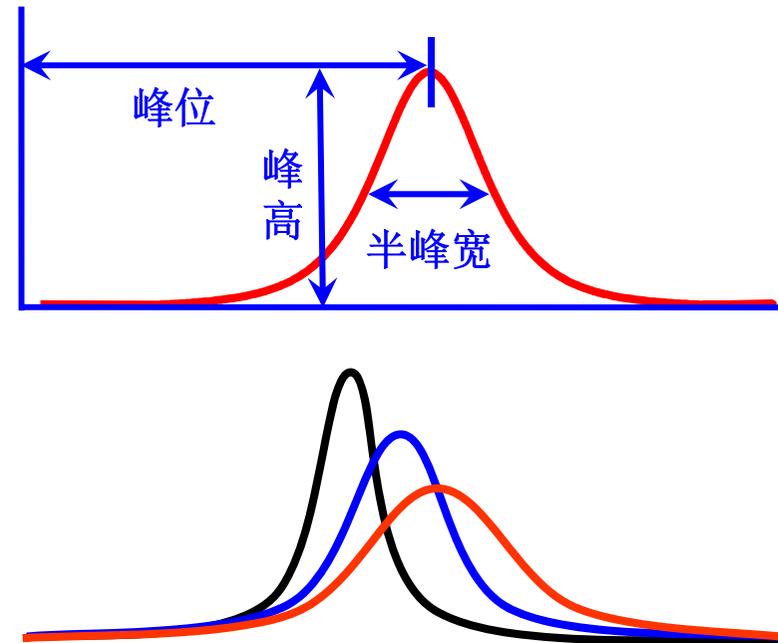
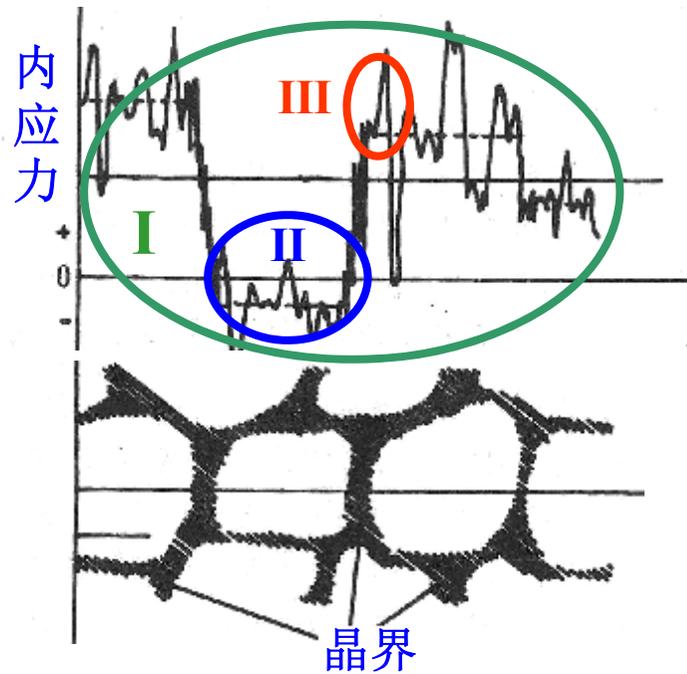


- 一、残余应力概论
- 二、零件制造中残余应力
- 三、使用服役中残余应力
- 四、残余应力与失效分析
- 五、微区残余应力及分布

一、残余应力概论

- ◆产生应力外部因素不存在时，由于材料不同部位曾发生过不均匀塑性变形或不均匀体积变化，导致材料内部存在并自身平衡的弹性应力成为残余应力
- ◆机械零件在制造过程中不可避免产生残余应力，适当的残余应力属于材料的强化因素，不适当的残余应力及其分布则导致零部件变形及失效开裂
- ◆材料中残余应力即内应力，通常分为两大类，宏观应力平衡与分布范围为宏观尺寸，微观应力平衡与分布范围为材料的晶粒甚至晶胞即微观尺寸

根据X射线衍射效应，第I类应力即宏观尺寸(衍射谱线位移)，第II类应力晶粒尺寸(衍射谱线展宽)，第III类应力晶胞尺寸(衍射强度下降)，第II类和第III类内应力统称为微观应力



残余应力工程影响

- ◆ **疲劳强度** 表面残余拉应力叠加外载循环应力，导致疲劳裂纹萌生和扩展，显著降低疲劳强度
- ◆ **应力腐蚀** 表面残余拉应力的存在，是零部件应力腐蚀破坏的必要条件
- ◆ **尺寸变形** 由于残余应力的分布不均匀，直接影响到零部件的尺寸稳定性
- ◆ **脆性破坏** 残余应力或与外载应力叠加局部超过屈服强度后，脆性材料因无法塑性变形而爆裂

残余应力调整与消除

◆ **热作用** 热作用残余应力调整，例如感应淬火、渗碳和氮化可以引入表层残余压应力。热作用残余应力消除，即高温退火处理，是目前最为有效的消除金属零部件中残余应力的方法

◆ **机械作用** 机械作用残余应力调整，基于局部塑性变形，例如滚压、喷丸、冲击以及校直。机械作用残余应力消除，同样基于局部塑性变形原理，例如锤击和过载，振动消除法

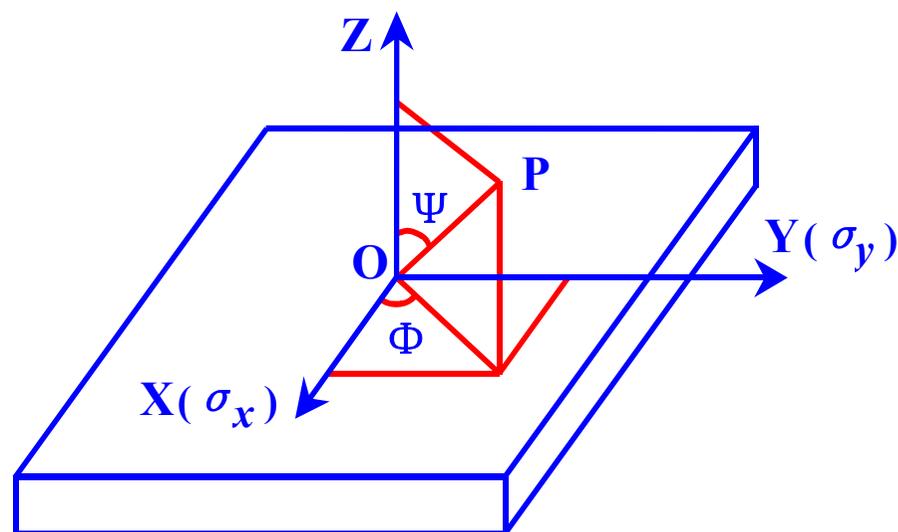
弹性力学中的应力应变关系

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\Phi\Psi} = & \frac{1}{2} S_2 (\sigma_x \cos^2 \Phi + \tau_{xy} \sin 2\Phi + \sigma_y \sin^2 \Phi - \sigma_z) \sin^2 \Psi \\ & + \frac{1}{2} S_2 (\tau_{xz} \cos \Phi + \tau_{yz} \sin \Phi) \sin 2\Psi + \frac{1}{2} S_2 \sigma_z + S_1 (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \end{aligned}$$

根据拉格方程 $2d \sin \theta = \lambda$

X射线所测得的应变

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\Phi\Psi} &= (d_{\Phi\Psi} - d_0) / d_0 \\ &= -\frac{1}{2} \cot \theta_0 (2\theta_{\Phi\Psi} - 2\theta_0) \frac{\pi}{180^\circ} \end{aligned}$$





令上面两个应变相等，整理后得到

$$\sigma_x = \frac{K}{2} \left(\frac{\partial 2\theta_{\Phi=0, \Psi+}}{\partial \sin^2 \Psi} + \frac{\partial 2\theta_{\Phi=0, \Psi-}}{\partial \sin^2 \Psi} \right)$$

$$\tau_{xz} = \frac{K}{2} \left(\frac{\partial 2\theta_{\Phi=0, \Psi+}}{\partial \sin 2\Psi} - \frac{\partial 2\theta_{\Phi=0, \Psi-}}{|\partial \sin 2\Psi|} \right)$$

$$\sigma_y = \frac{K}{2} \left(\frac{\partial 2\theta_{\Phi=90, \Psi+}}{\partial \sin^2 \Psi} + \frac{\partial 2\theta_{\Phi=90, \Psi-}}{\partial \sin^2 \Psi} \right)$$

$$\tau_{yz} = \frac{K}{2} \left(\frac{\partial 2\theta_{\Phi=90, \Psi+}}{\partial \sin 2\Psi} - \frac{\partial 2\theta_{\Phi=90, \Psi-}}{|\partial \sin 2\Psi|} \right)$$

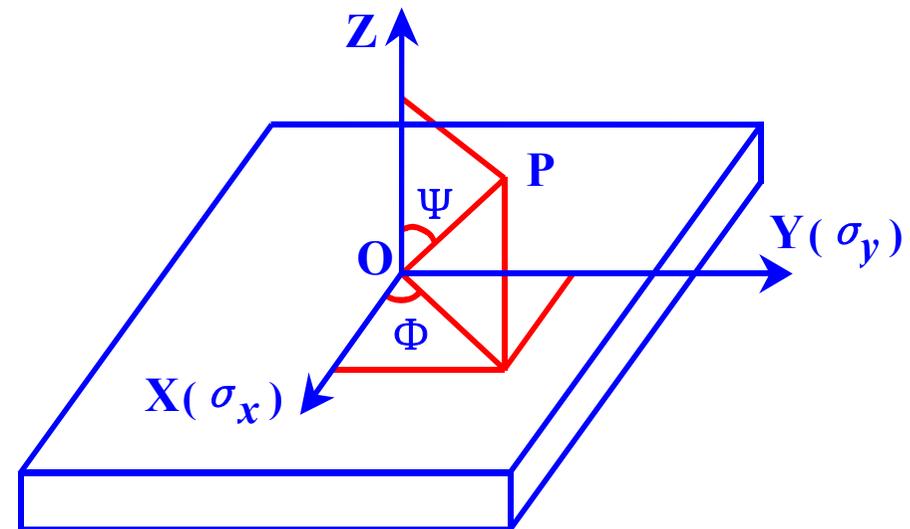
$$K = -\frac{1}{2} \cot \theta_0 \frac{\pi}{180^\circ} \frac{1}{(1/2) S_2}$$

$$\frac{1}{2} S_2 = \frac{(1+\nu)}{E}$$

2θ 为X射线衍射角

E 材料弹性模量

ν 泊松比



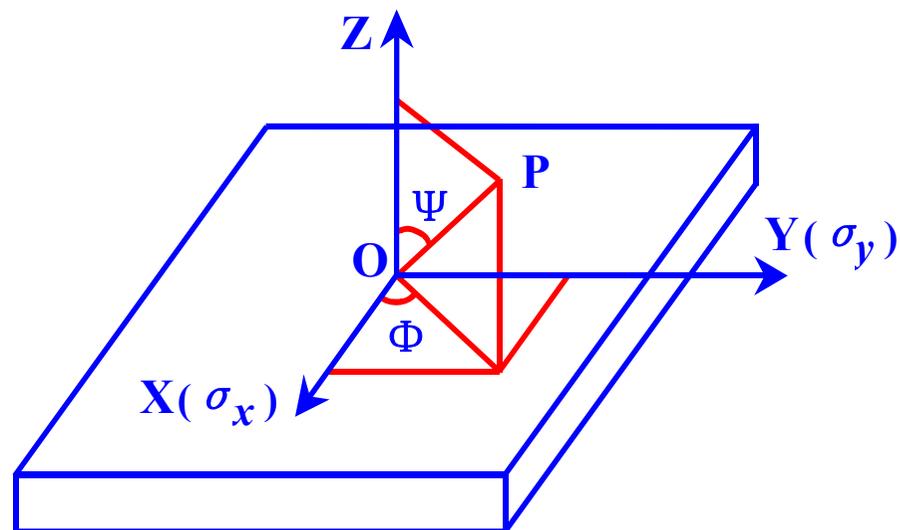
若测得 45° 方向正应力

$$\sigma_{45} = \frac{K}{2} \left(\frac{\partial 2\theta_{\Phi=45, \Psi+}}{\partial \sin^2 \Psi} + \frac{\partial 2\theta_{\Phi=45, \Psi-}}{\partial \sin^2 \Psi} \right)$$

则 xy 平面切应力为

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

至此，已完整描述了
材料表面应力状态

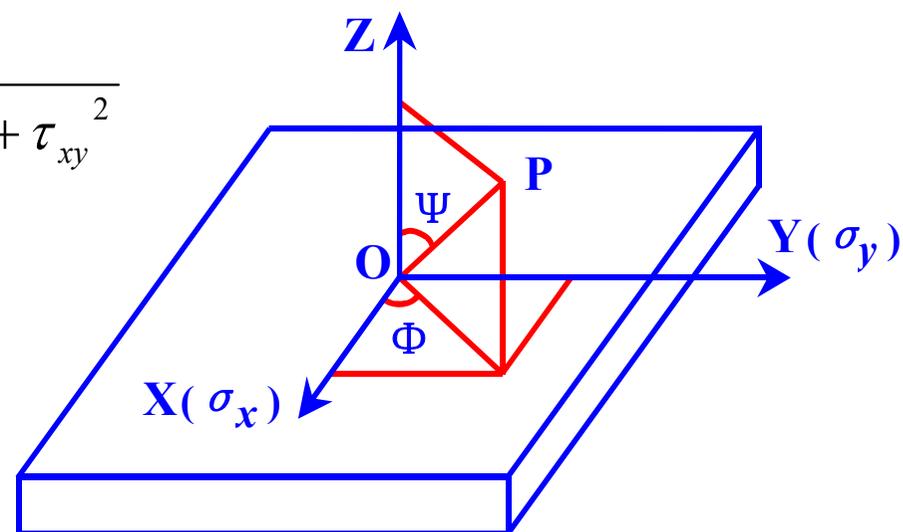


工程应用中，往往需要了解最大主应力 σ_1 、最小主应力 σ_2 及最大主应力方向即 σ_1 与 x 轴之间夹角 α ，可以用以下公式计算

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

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

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

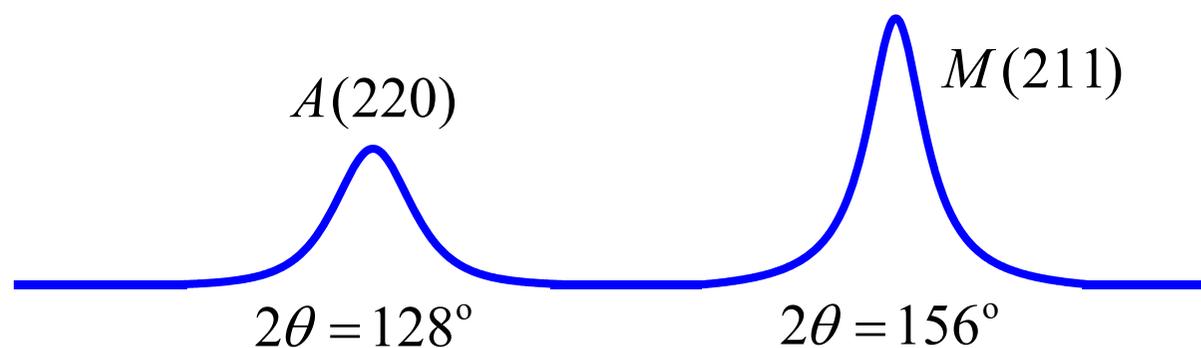


残余奥氏体X射线测试原理

若钢中只包含奥氏体和铁素体(马氏体)两相，则奥氏体的体积分数 V_A 为

$$V_A = 1 / (1 + G I_M / I_A)$$

式中 I_A 和 I_M 分别为奥氏体和铁素体(马氏体)的X射线衍射积分强度， G 是常数

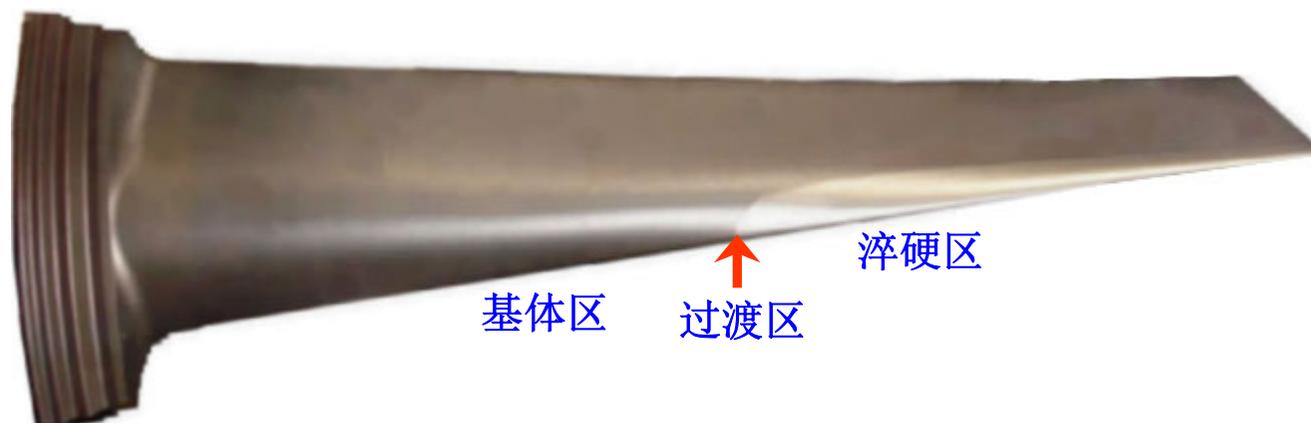


二、零件制造中残余应力

- ◆ 影响残余应力的制造工序，例如冷拉、弯曲、切削和磨削等冷加工，铸造、锻压、焊接和金属热处理等热加工，以及喷丸和滚压等表面处理
- ◆ 在实验室或者生产现场，利用X射线应力测试技术，检测加工制造过程中零部件的残余应力和衍射半高宽，据此可评价产品的加工制造质量
- ◆ 鉴于残余应力的重要性，许多制造行业领域已经制定了相关零部件的残余应力检测评价标准以及技术规范，并对其定期修订完善



电站汽轮机低压叶片

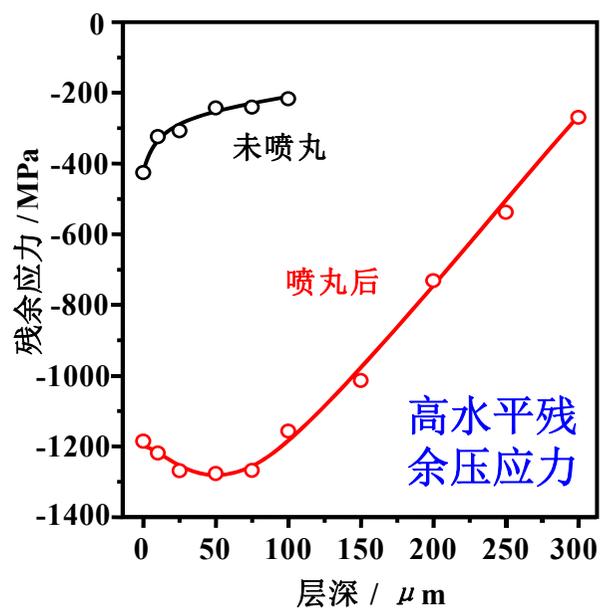


检测部位	残余应力(MPa)	
	喷丸前	喷丸后
基体区	-185	-636
过渡区基体侧	+140	-682
过渡区激光淬硬侧	-95	-873
激光淬硬区	-227	-958

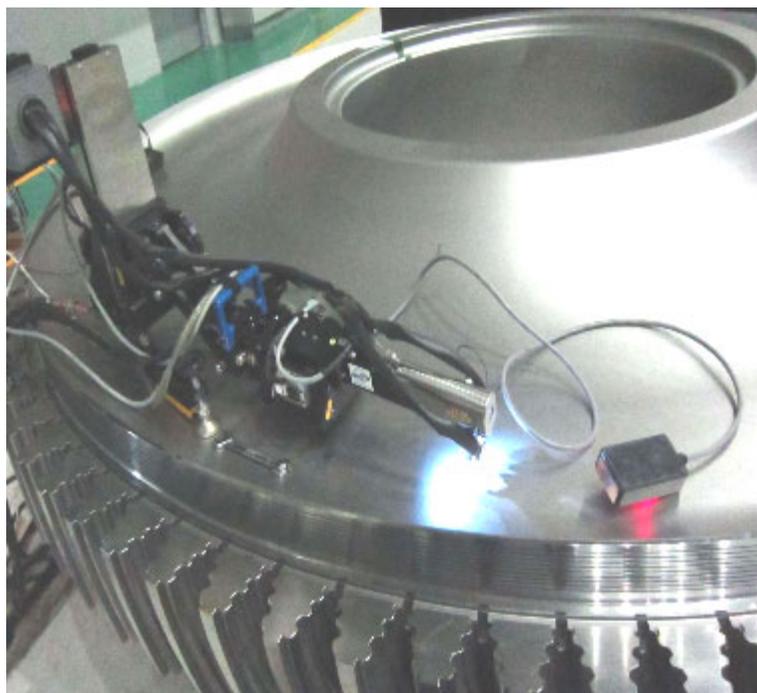
状态说明	施加载荷	疲劳寿命
纯基体材料	492MPa	10^7 未断
激光淬硬未喷丸	492MPa	6×10^5 断裂
激光淬硬喷丸	495MPa	2×10^7 未断



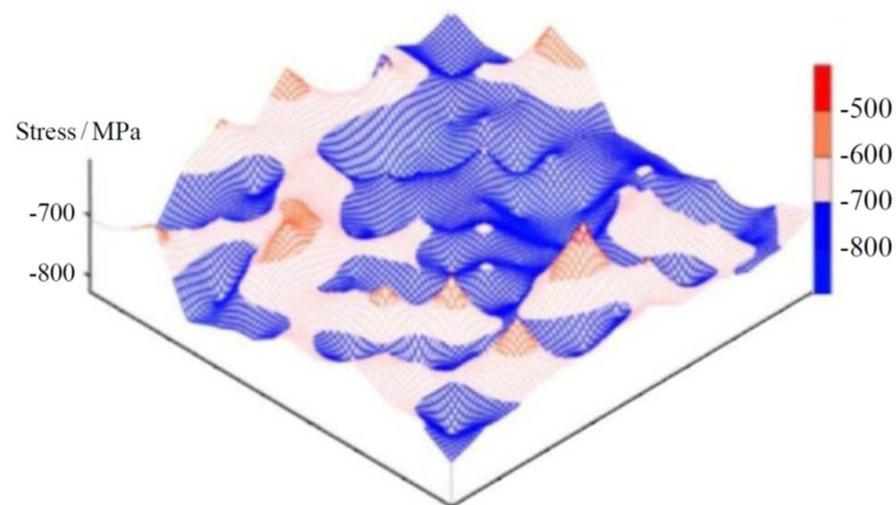
硬齿面齿轮



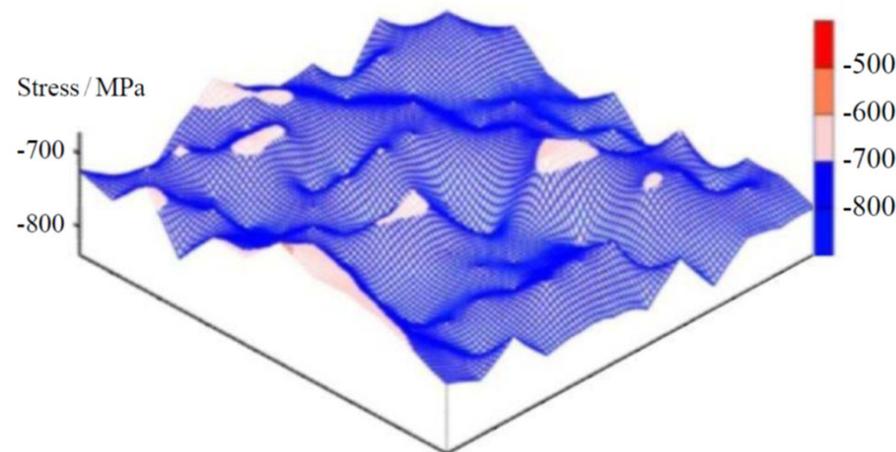
材料及状态	载荷 kN	循环次数 N	备注
20CrMnMo 磨齿未喷丸	57.5	3.4×10^4	断裂
	57.5	3.6×10^4	断裂
	57.5	3.6×10^4	断裂
	57.5	3.9×10^4	断裂
	57.5	4.7×10^4	断裂
20CrMnMo 磨齿后喷丸	57.5	$>3 \times 10^6$	未断裂
	57.5	$>3 \times 10^6$	未断裂
	57.5	$>3 \times 10^6$	未断裂
	57.5	$>3 \times 10^6$	未断裂
	57.5	$>3 \times 10^6$	未断裂



核电汽轮机轮盘



表面残余应力分布





核电反应堆容器





核电不锈钢管





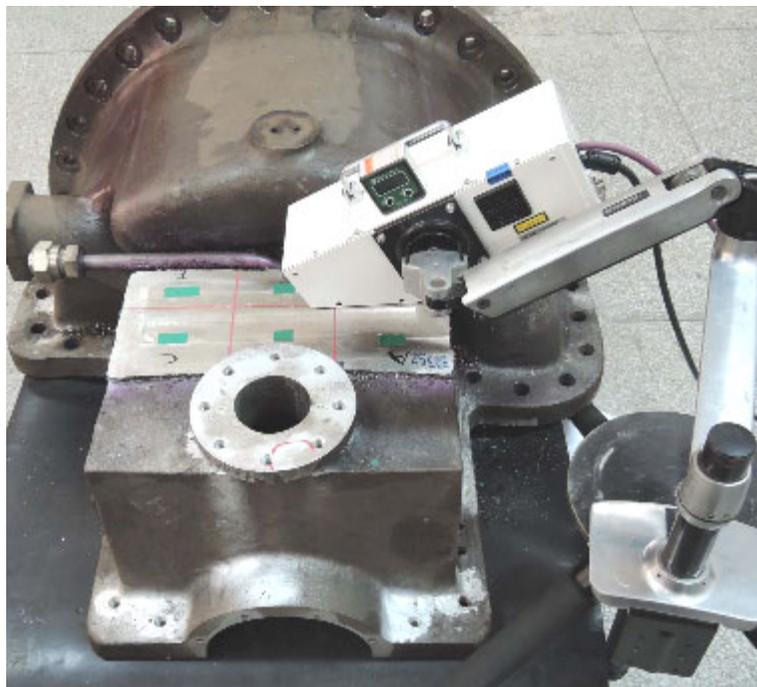
不锈钢管焊缝



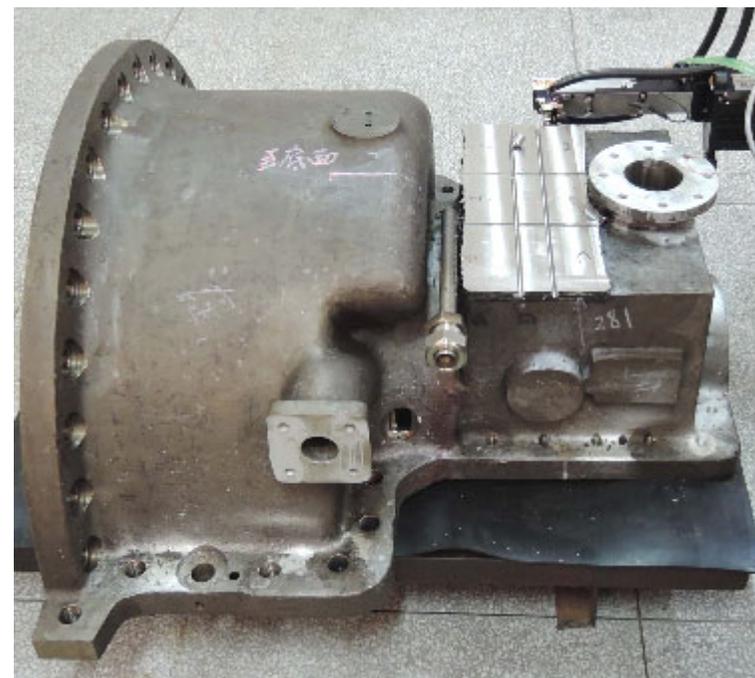


核电基建钢结构件





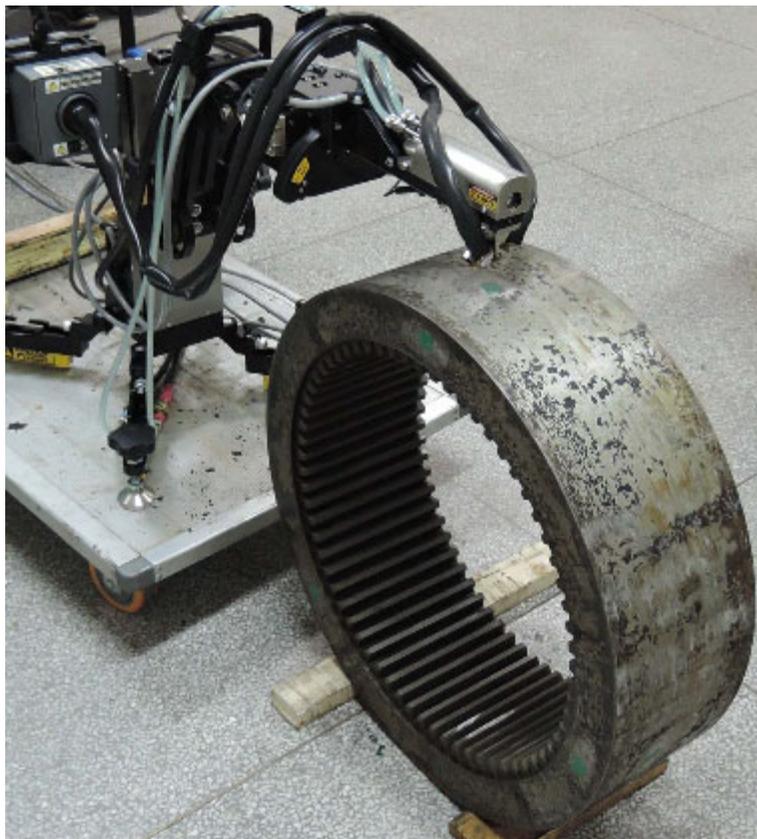
工业透平汽缸





水轮机





重载机车齿轮





机车制动盘

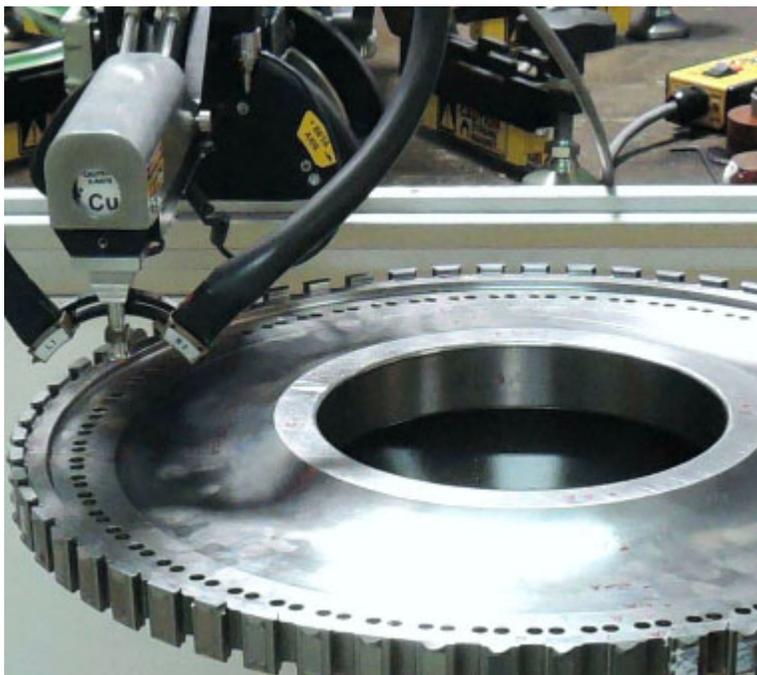




高铁车轮



机车连杆



航空发动机轮盘



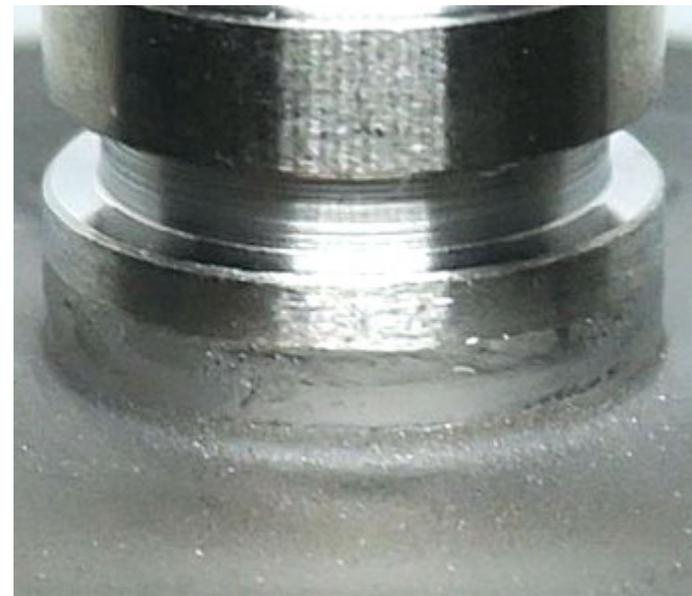


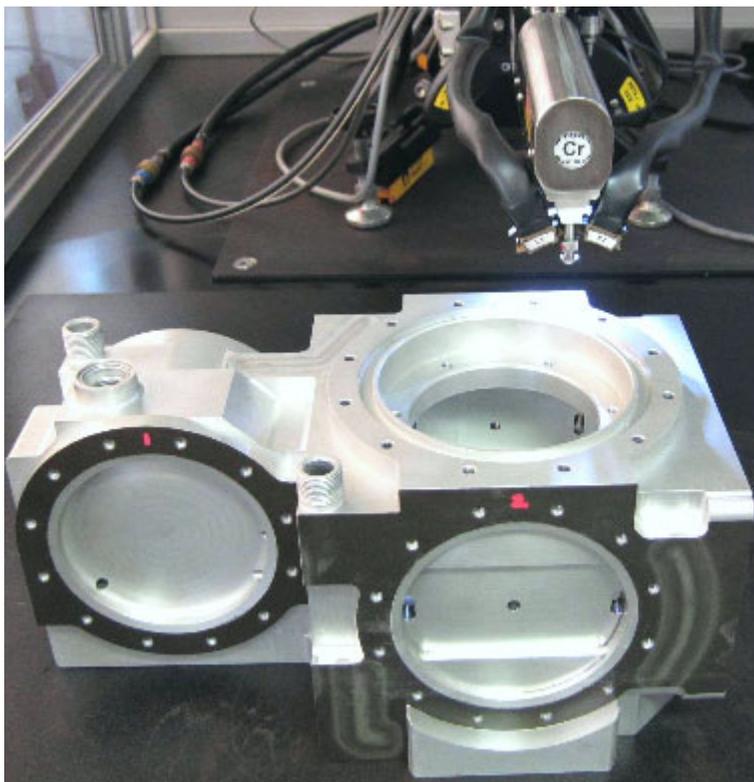
航空发动机盘组合件





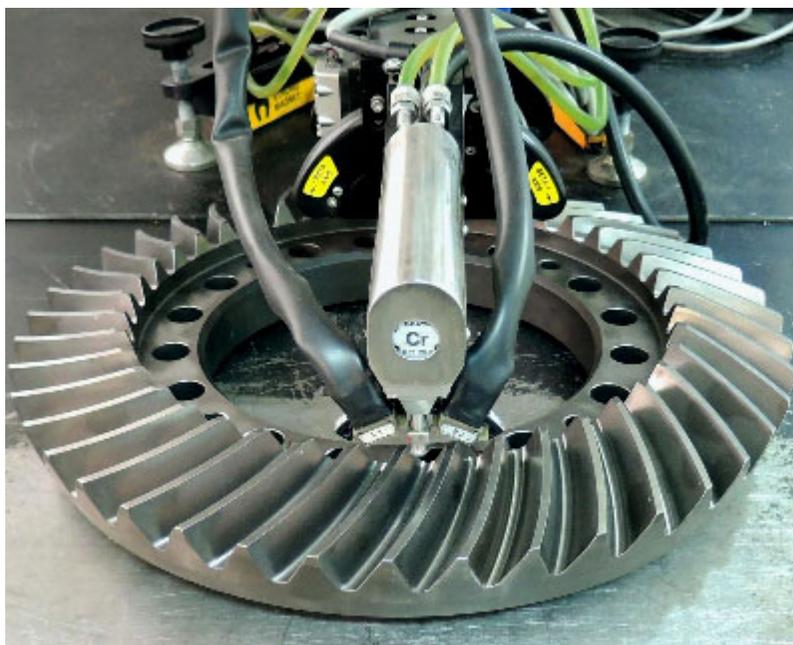
涡轮





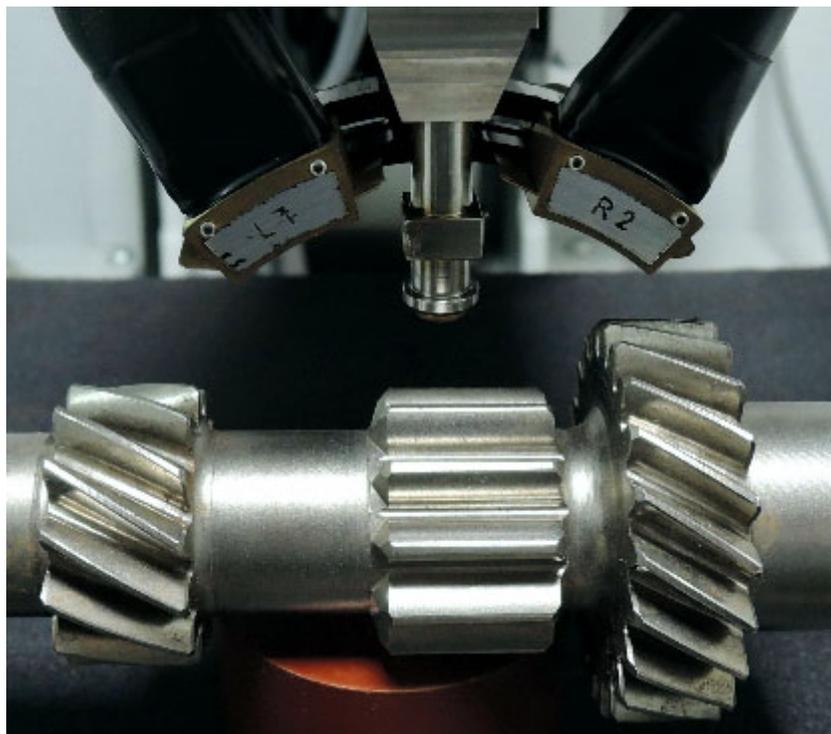
铝合金框架





齿轮





齿轮

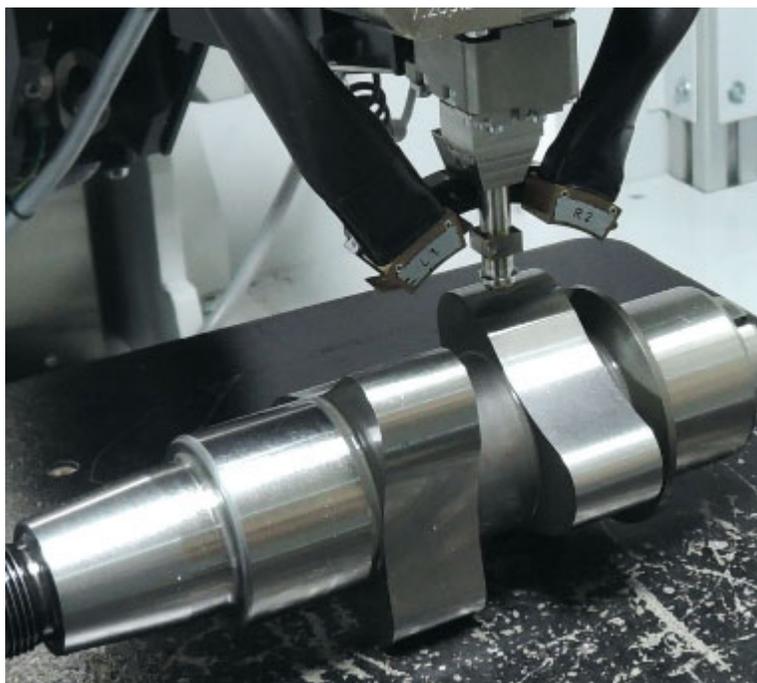




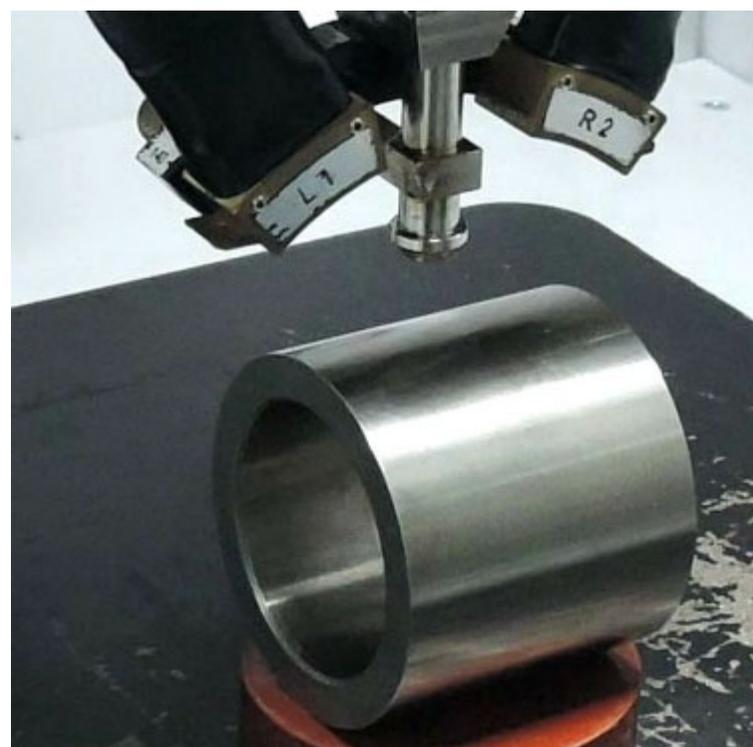
齿轮



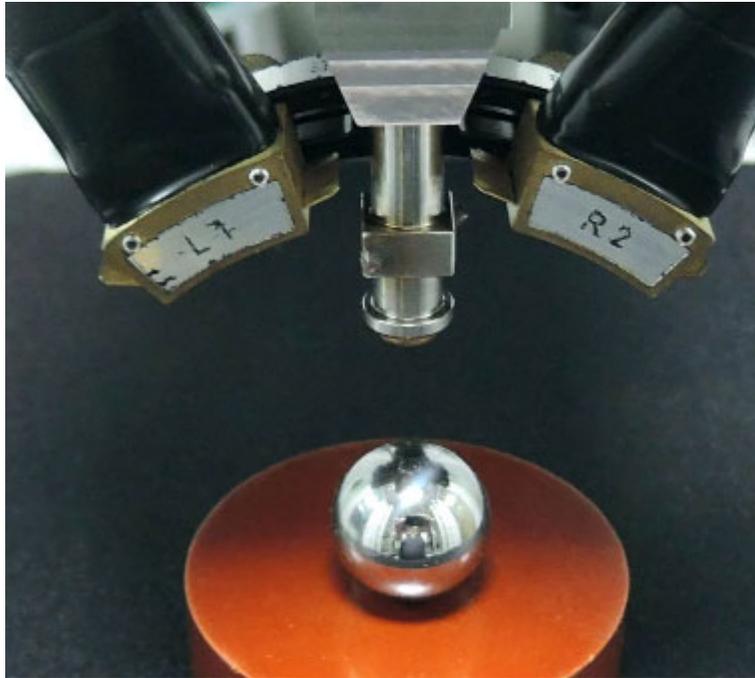
重载齿圈



凸轮轴



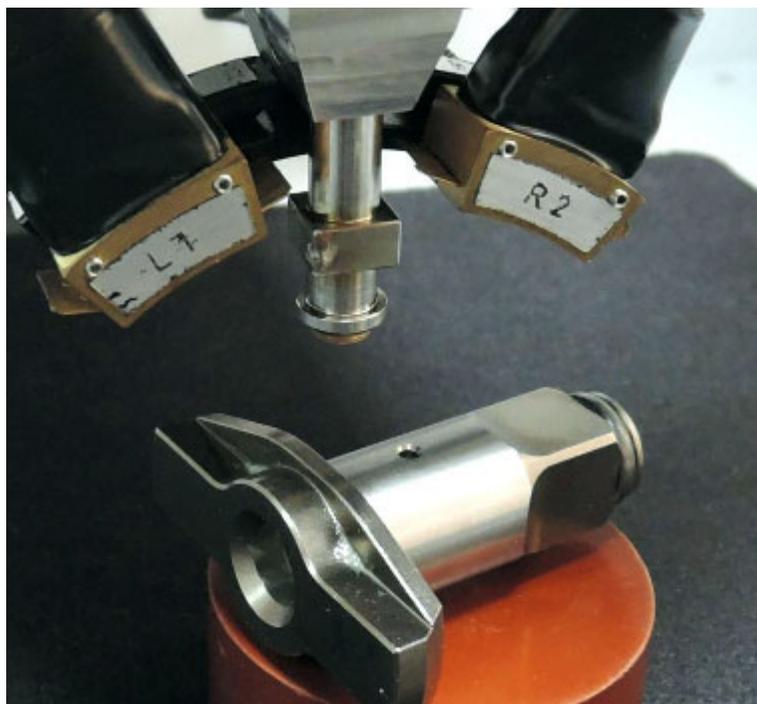
滚子



钢球



滚针



栓销



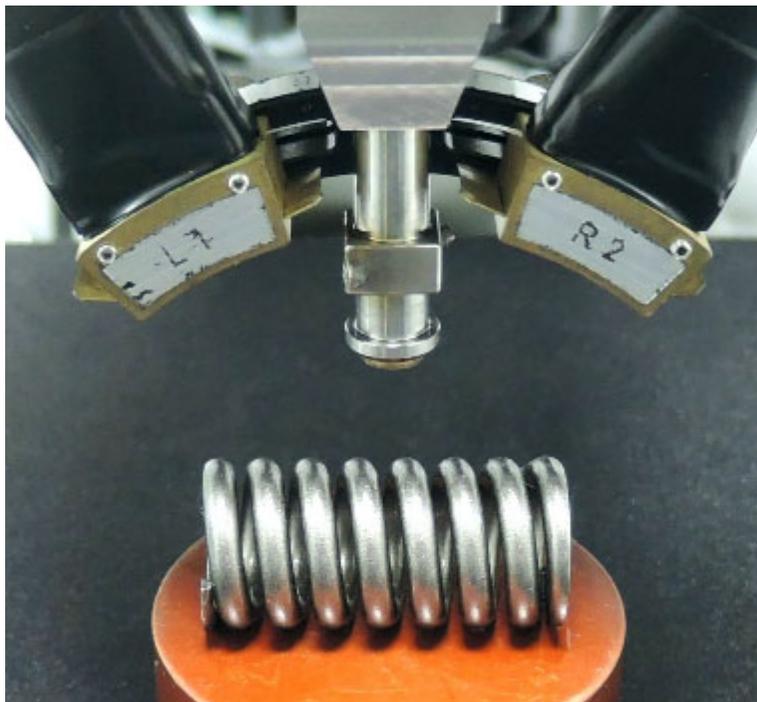
衬垫盖板



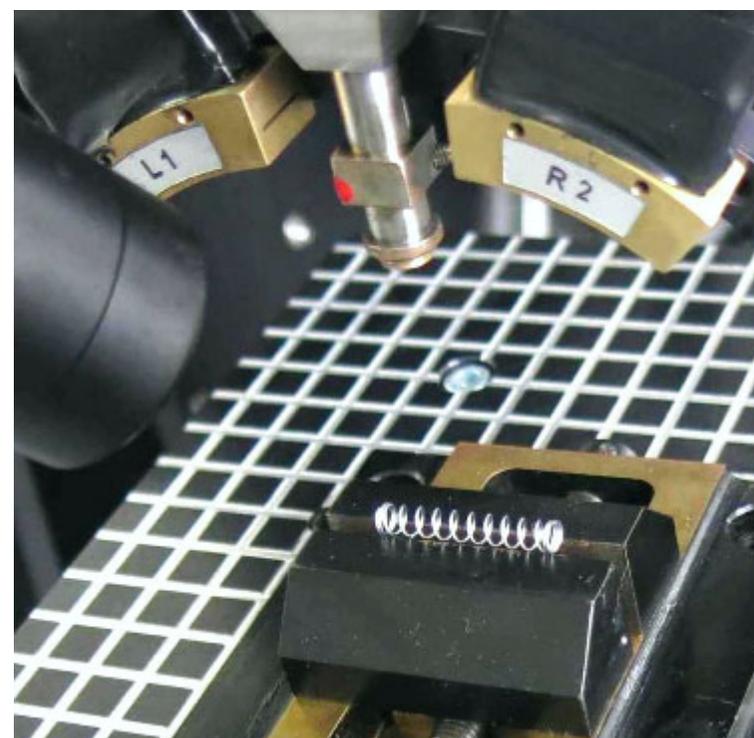
转向节

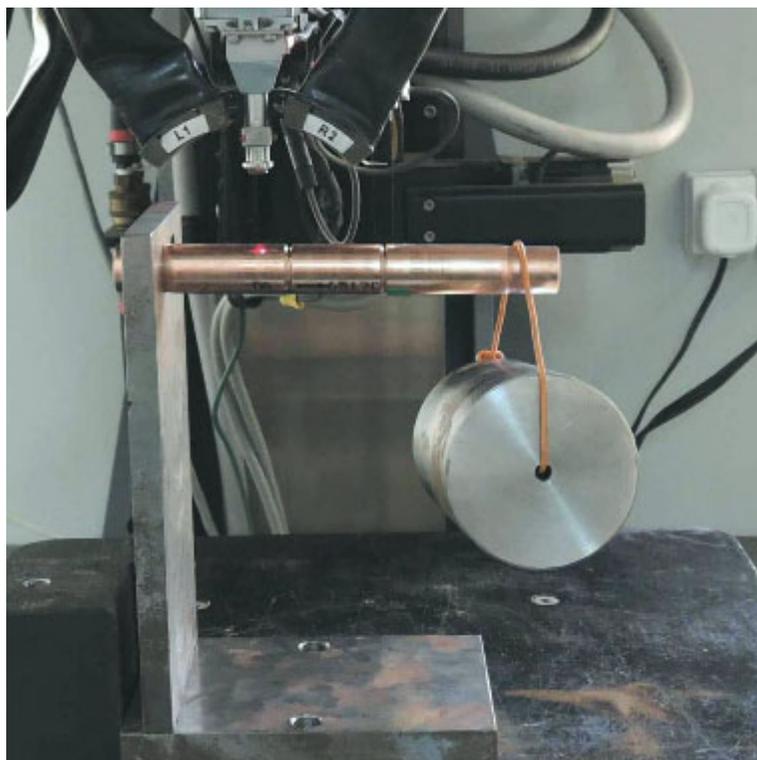


不锈钢阀体



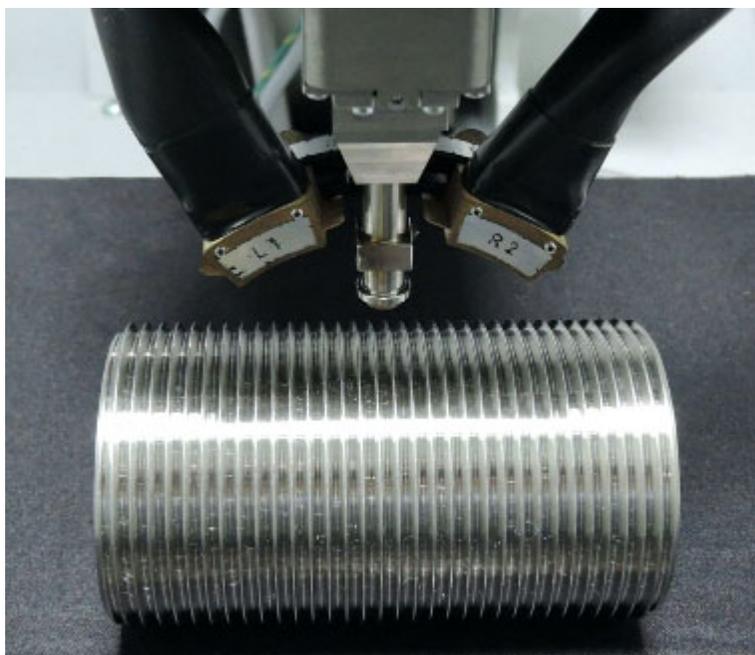
螺旋弹簧



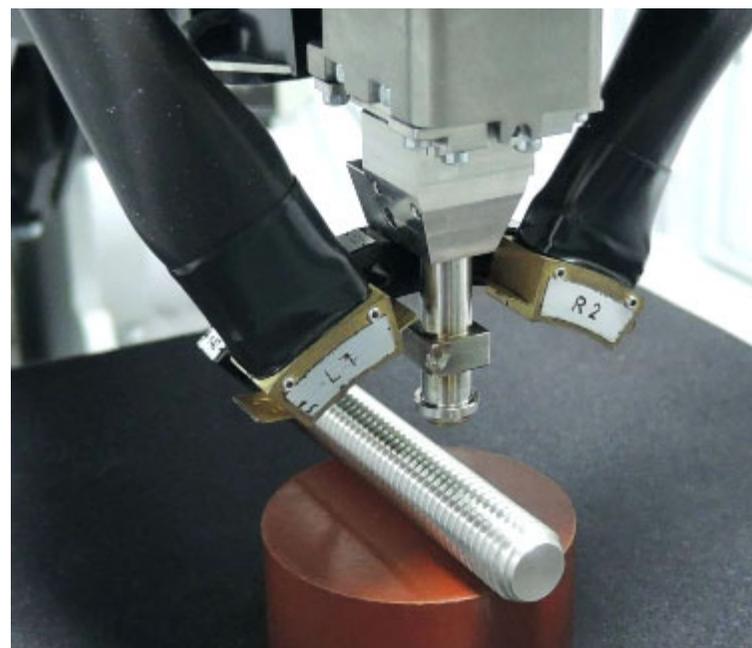


铜管沟槽





螺栓螺纹



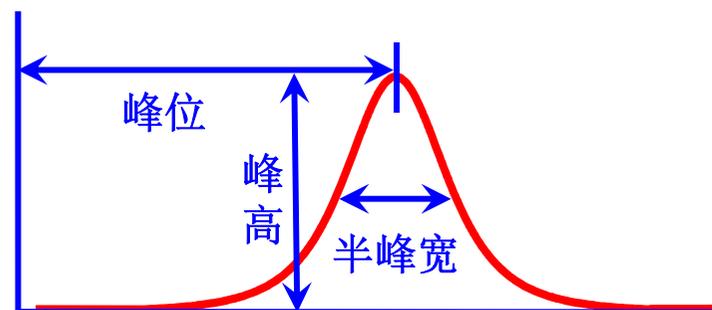
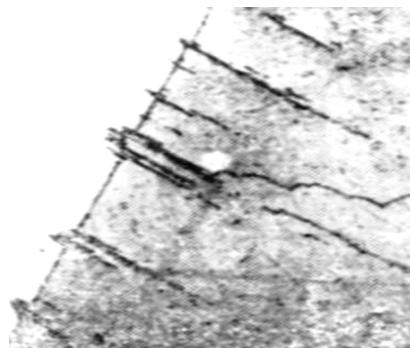
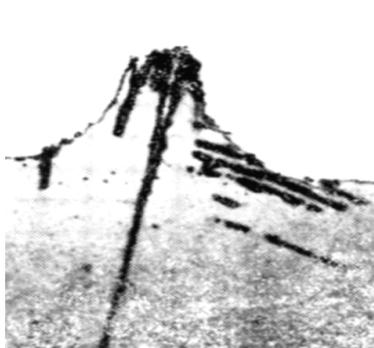


建筑
承力梁

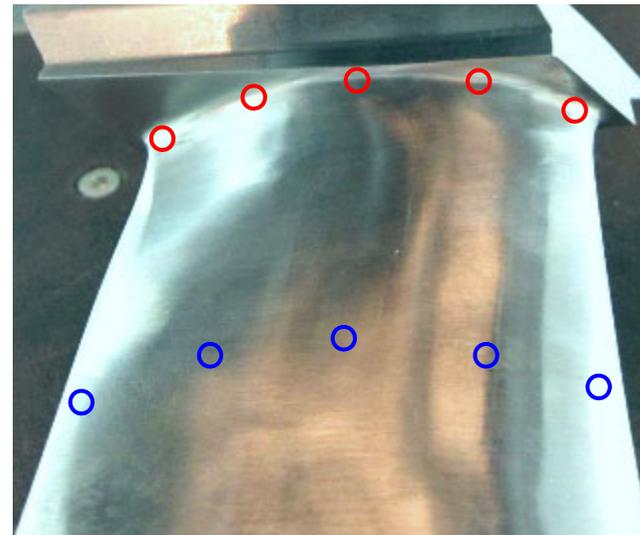


三、使用服役中残余应力

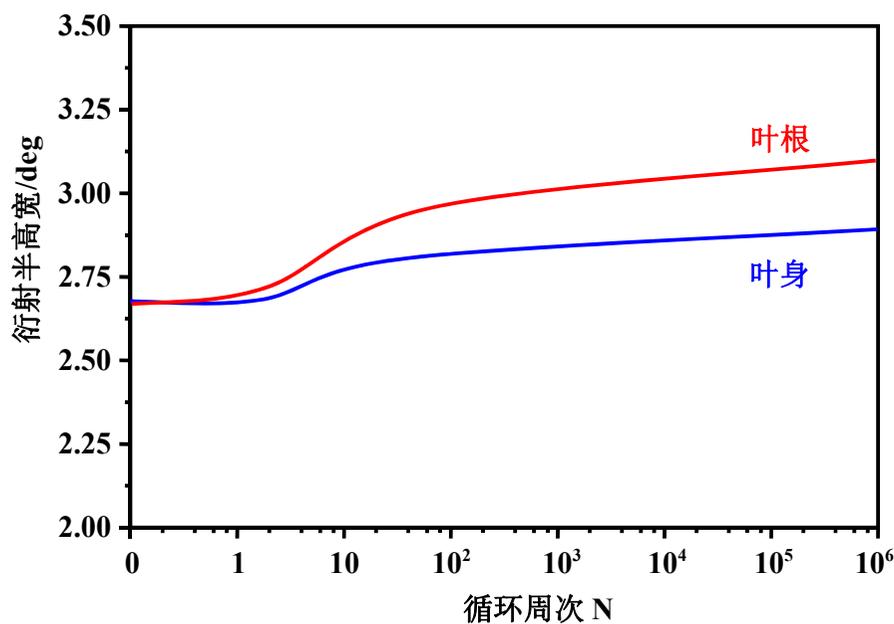
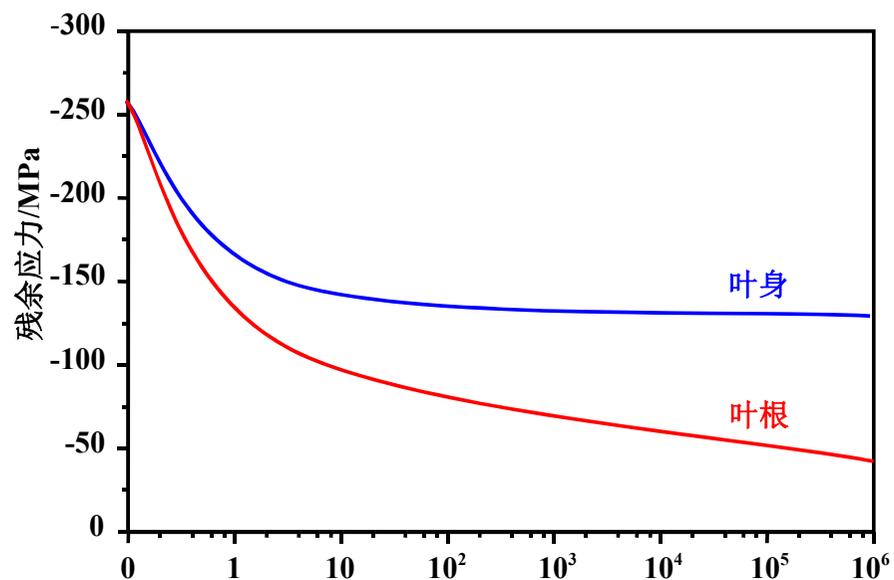
- ◆ 金属零件失效过程，循环载荷将导致材料表面局部塑形变形，残余应力与组织结构必然也发生改变，甚至会引起材料相变。
- ◆ 残余应力与组织结构的改变，在X射线衍射结果上表现为衍射峰位移动和衍射半峰宽变化



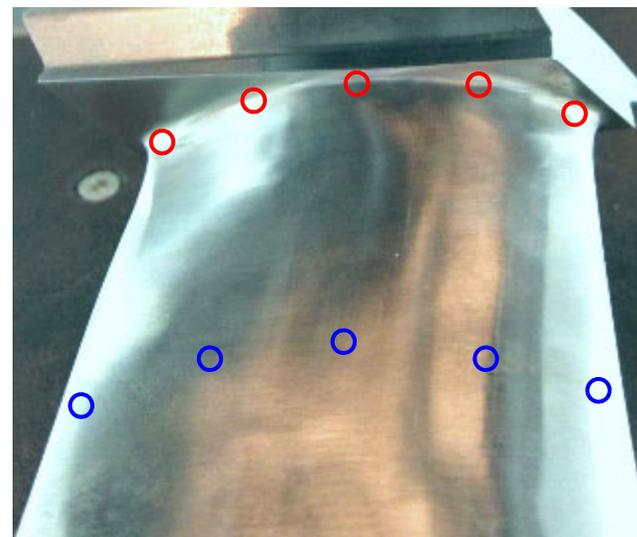
对中小型零部件，可以在实验室中进行X射线衍射分析与评价

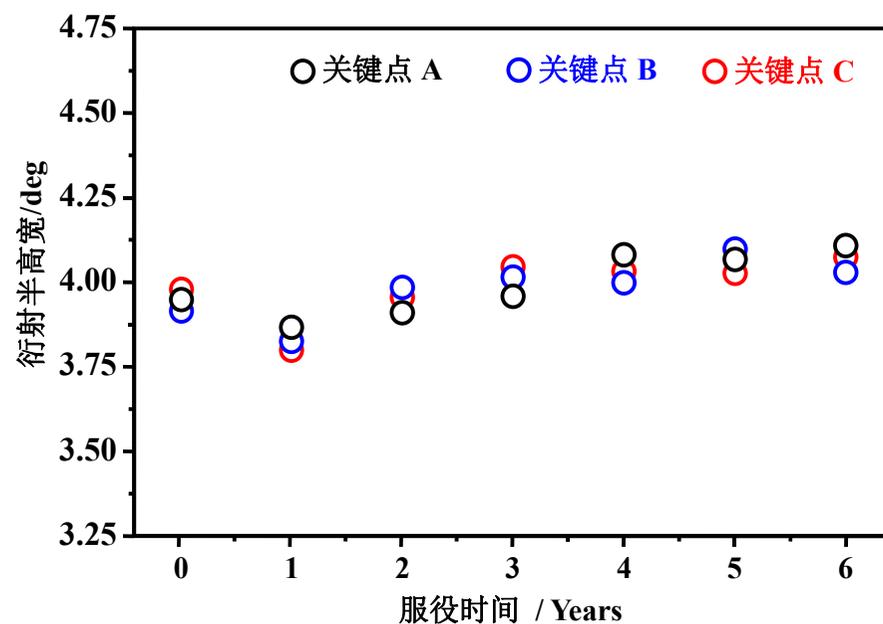
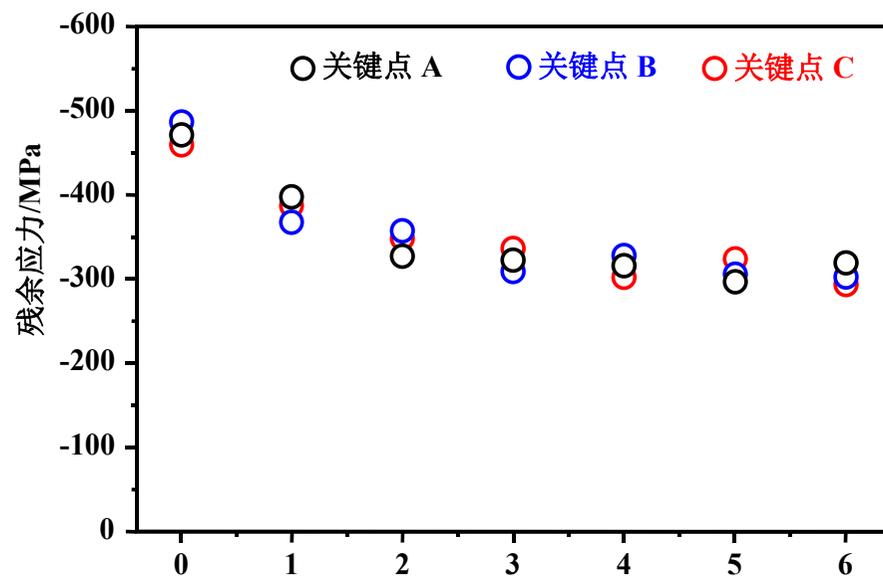


汽轮机动叶片应力分析



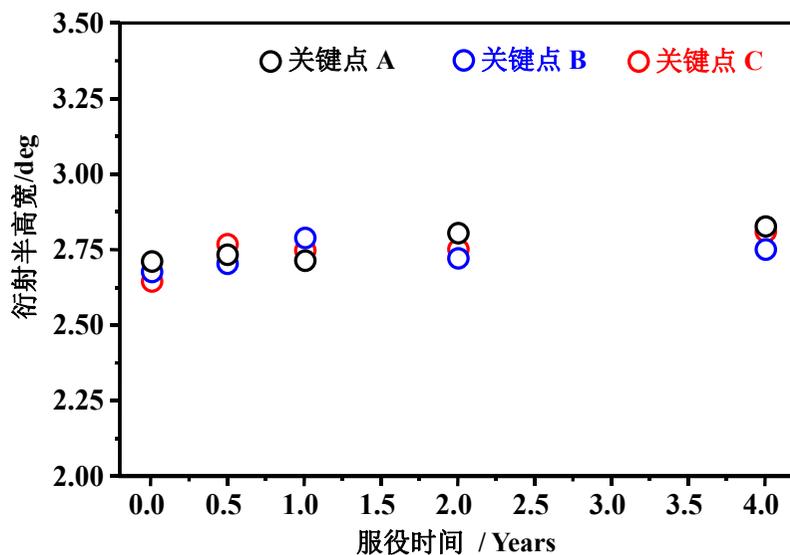
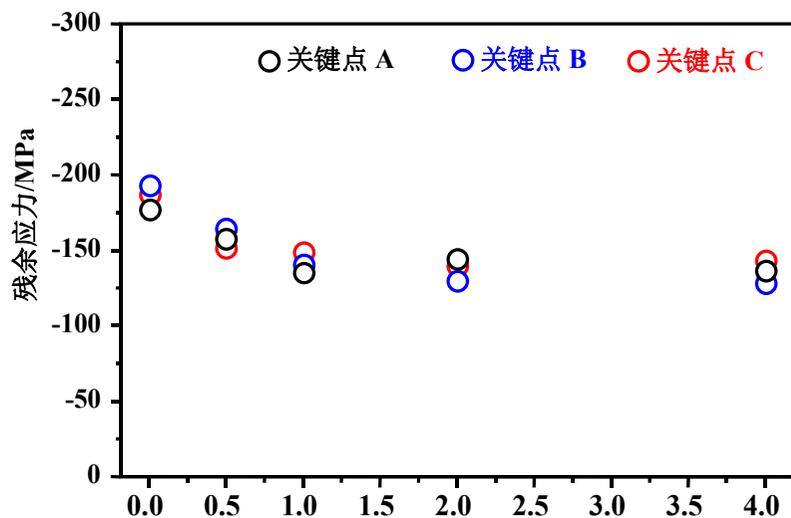
汽轮机叶片 应力分析



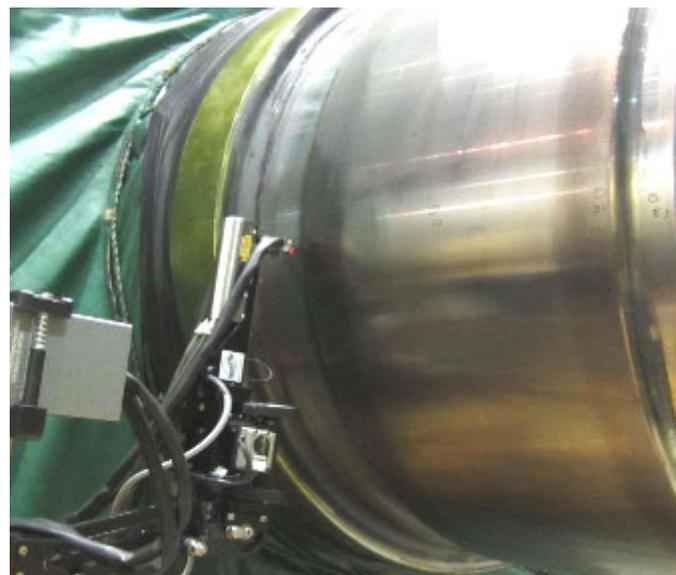


汽轮机叶片





对大型零部件，可携带仪器现场X射线衍射分析与评价



汽轮机转子



转子叶轮槽





核电反应堆





发动机轮盘



飞机起落架

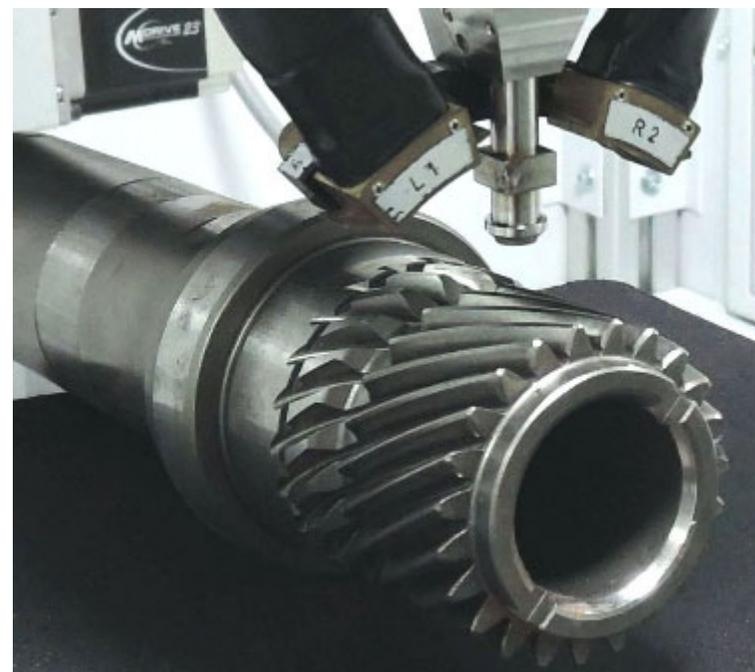


高铁车轮



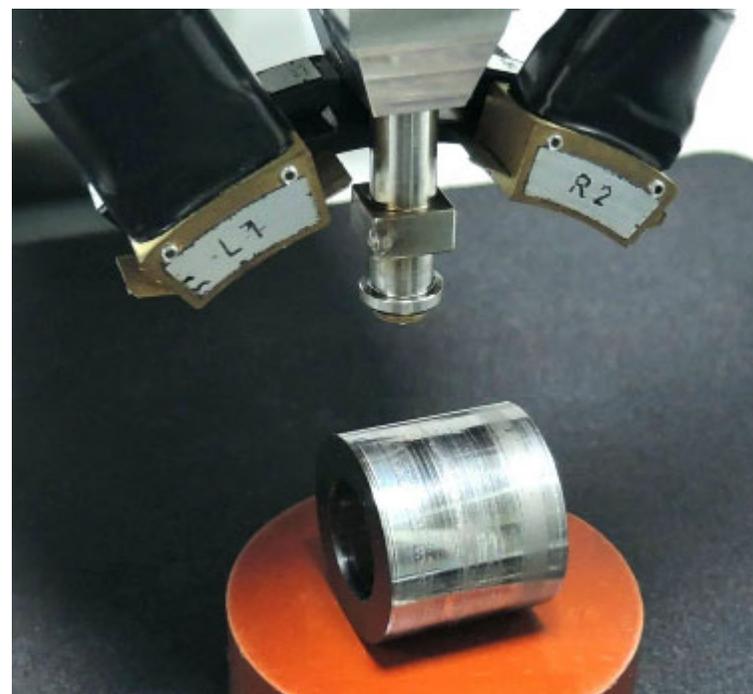


齿轮





轴承



滚子



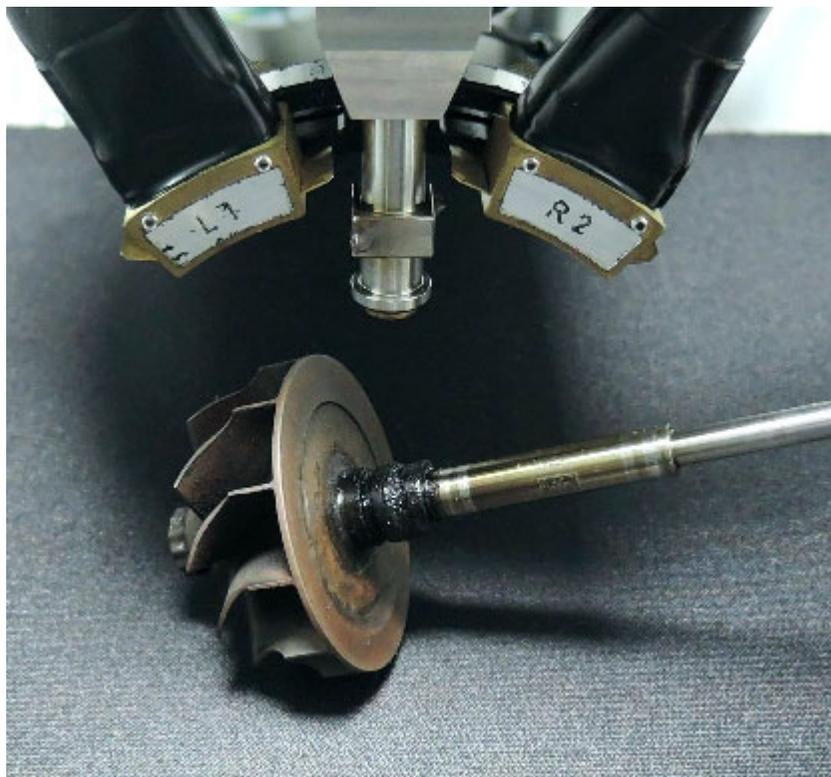
凸轮





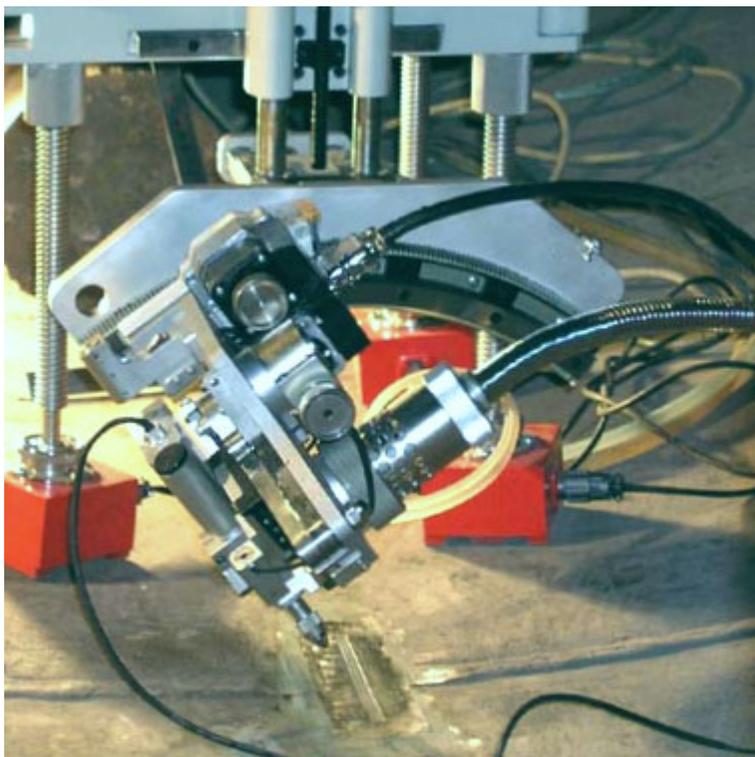
螺旋弹簧





涡轮





焊接构件





西气东输管道





化工管道





全钢桥





建筑承力梁



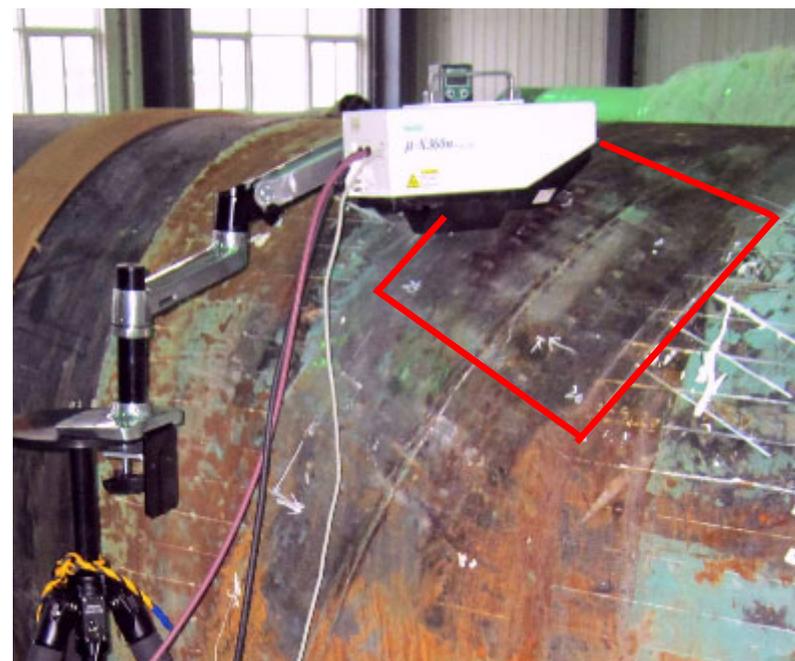


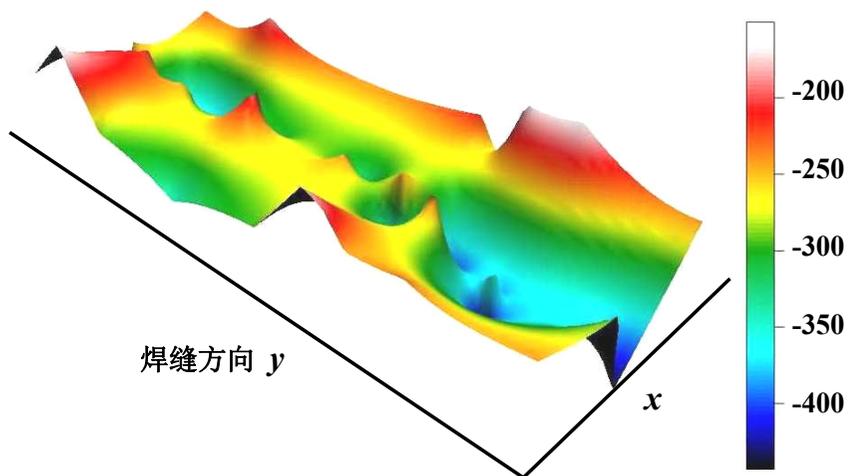
四、残余应力与失效分析

- ◆ 产品丧失规定的功能即称为失效，失效分析就是判断失效模式、分析失效机理、明确失效原因以及提供预防对策等
- ◆ 零部件失效方式，例如疲劳损伤、开裂断裂、尺寸变形、磨损和腐蚀等
- ◆ 残余拉应力是导致机械零部件疲劳破坏和应力腐蚀开裂的主要原因，几何尺寸变形则与残余应力的分布不均匀有关
- ◆ 通过检测失效零部件相关部位的残余应力与衍射半高宽，并结合其它分析手段，可以确定失效原因和失效过程等

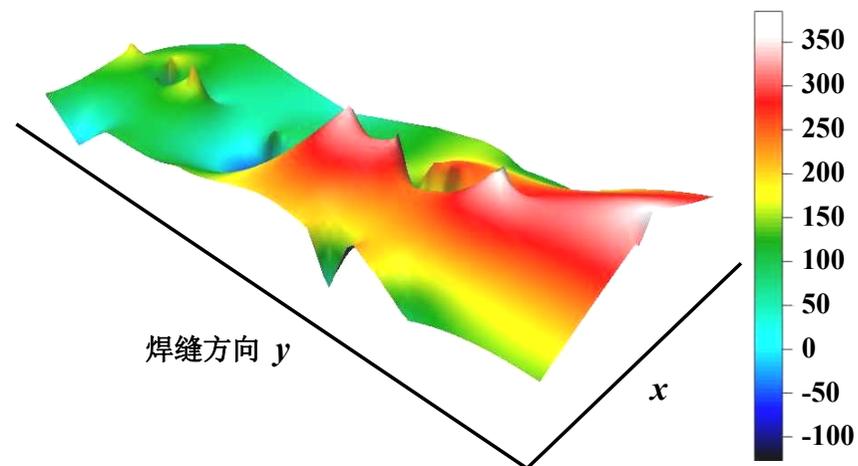


管道现场检测

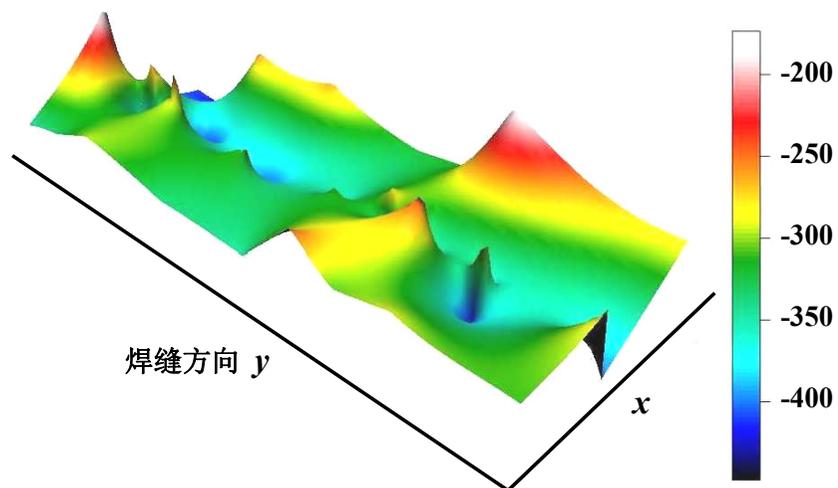




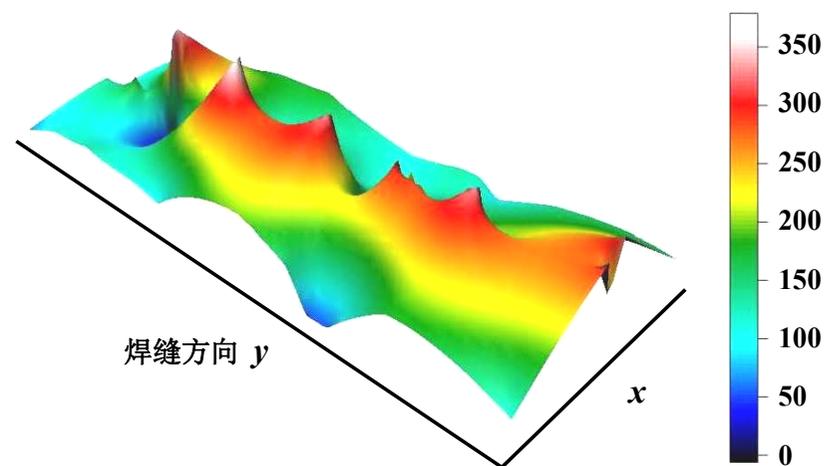
水压试验前管段平行
焊缝方向残余应力



水压试验后管段平行
焊缝方向残余应力



水压试验前管段垂直
焊缝方向残余应力

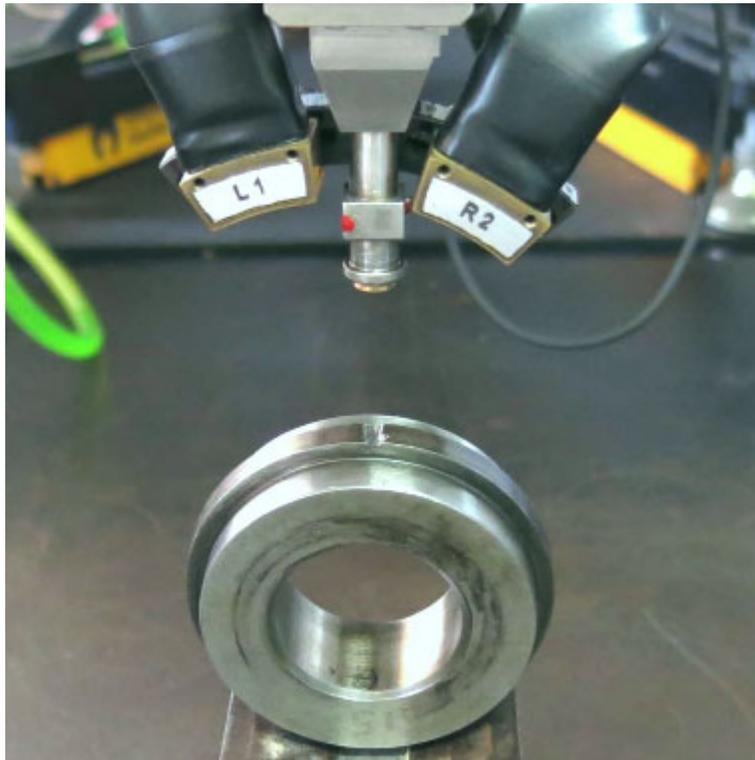


水压试验后管段垂直
焊缝方向残余应力



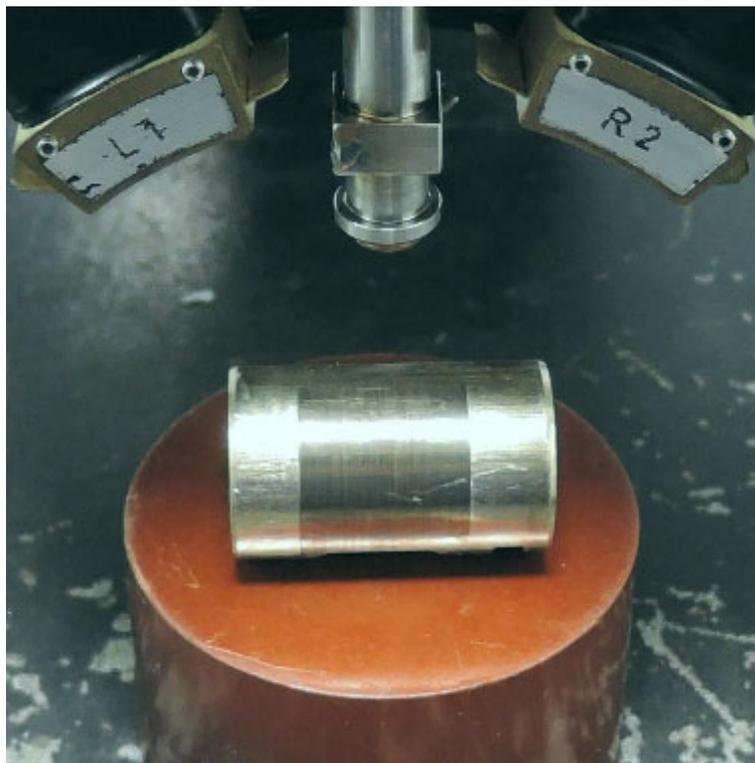
机车齿轮轴



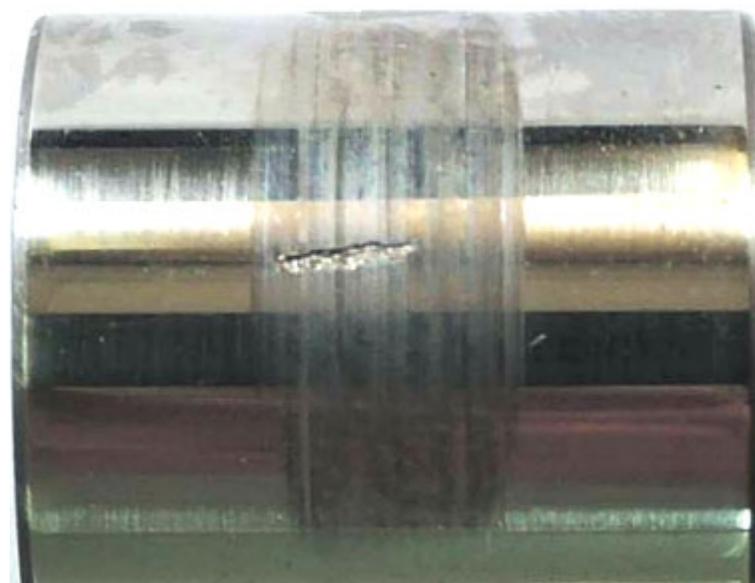


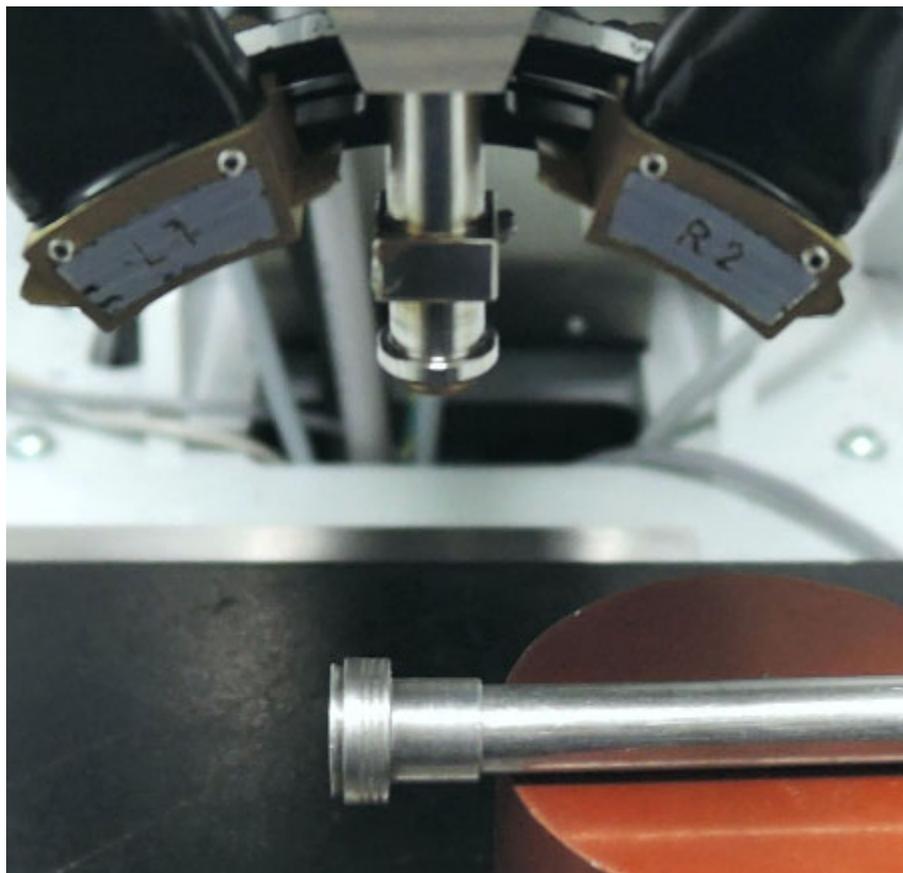
轴承套圈





滚动轴承



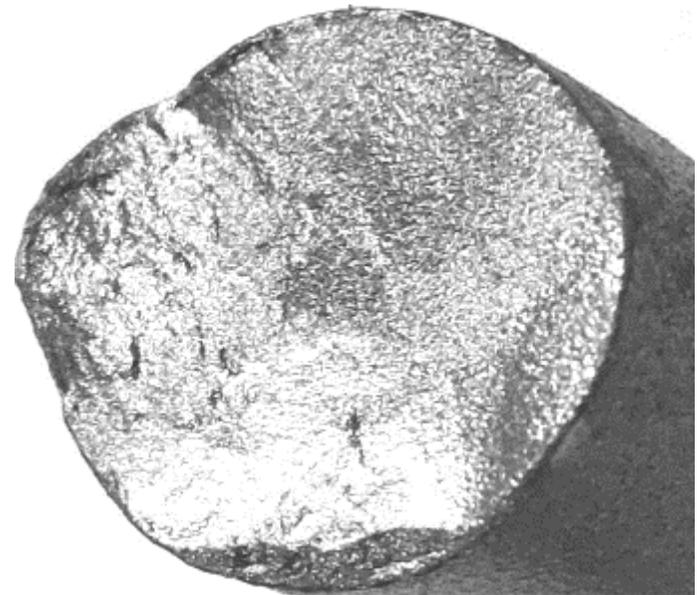


发动机油路管



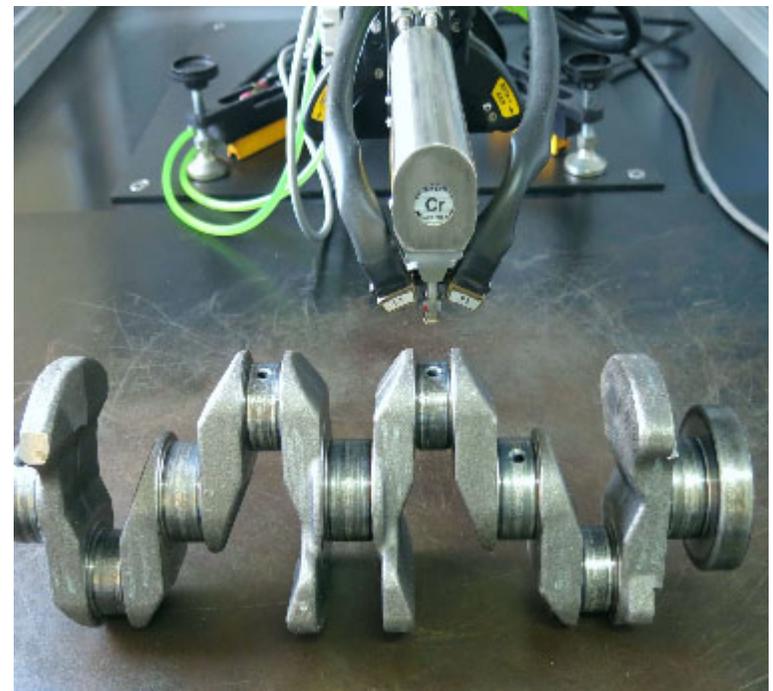


螺旋弹簧





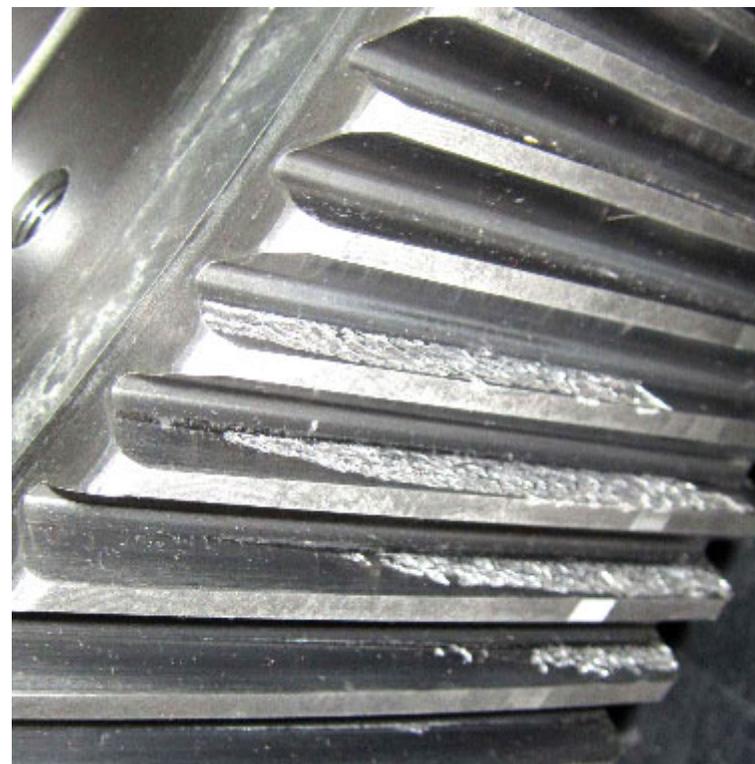
汽车梁



汽车曲轴



齿轮断口

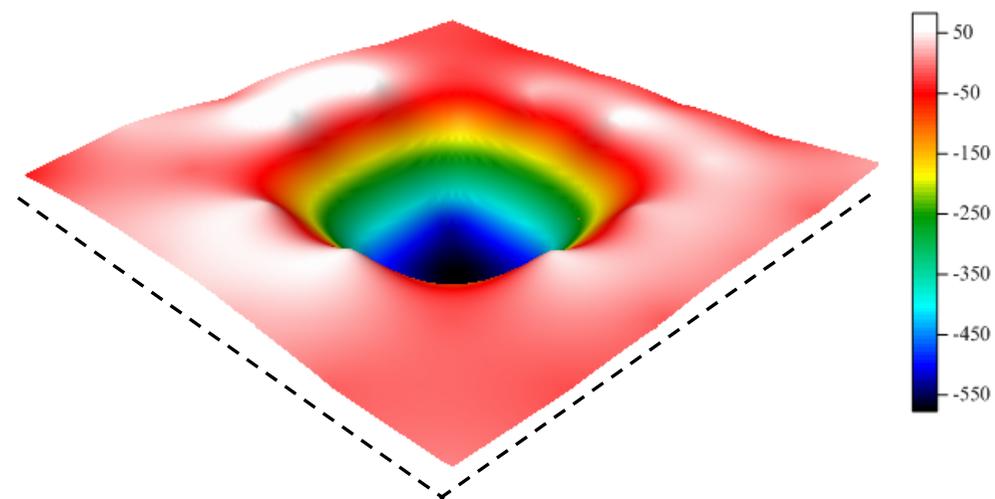


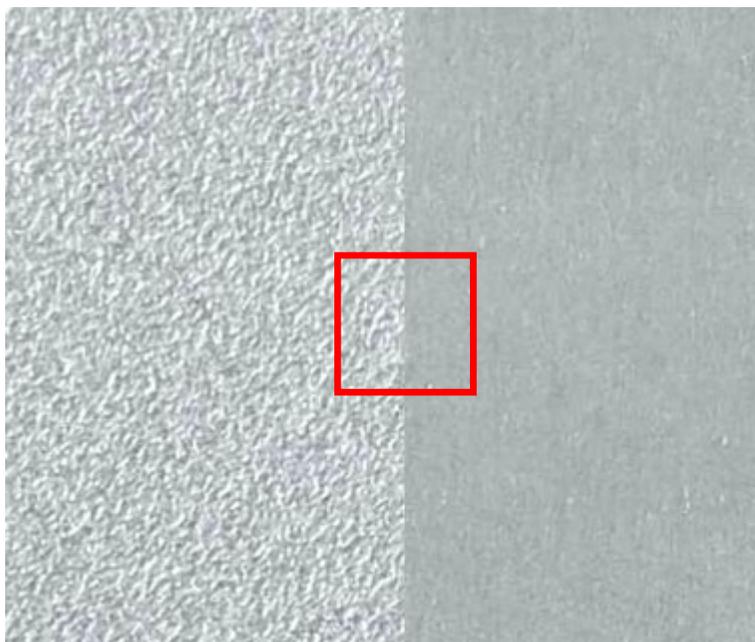
五、微区X射线应力分析

- ◆ 仍基于多晶材料X射线应力测定技术，要求被检测区域包括足够的晶粒数量，不存在明显织构
- ◆ 较小的X射线照射面积，较高的机械定位精度，必要的放大和观察装置
- ◆ 借助微区X射线应力分析技术，能够检测微型机械零部件和电子器件等局部较小区的残余应力
- ◆ 研究零部件残余应力的不均匀性，针对重要区域检测多点应力，绘制应力分布图，从中找出关键

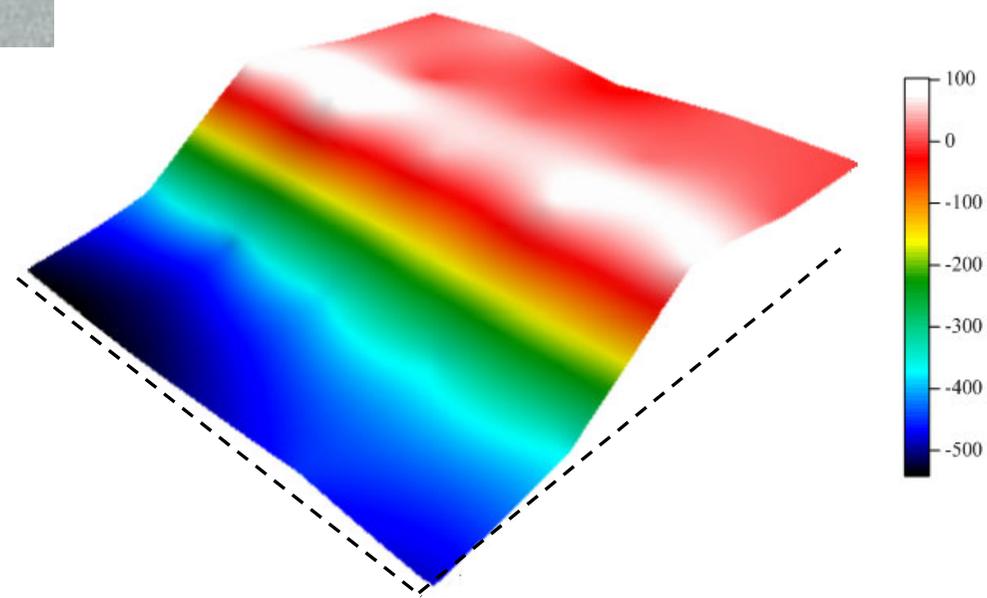


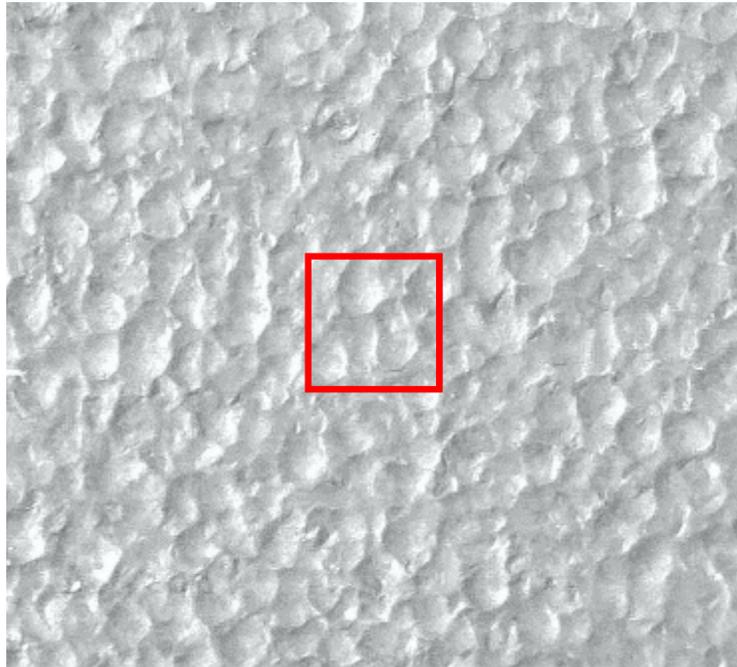
喷丸弹坑附近
残余应力分布



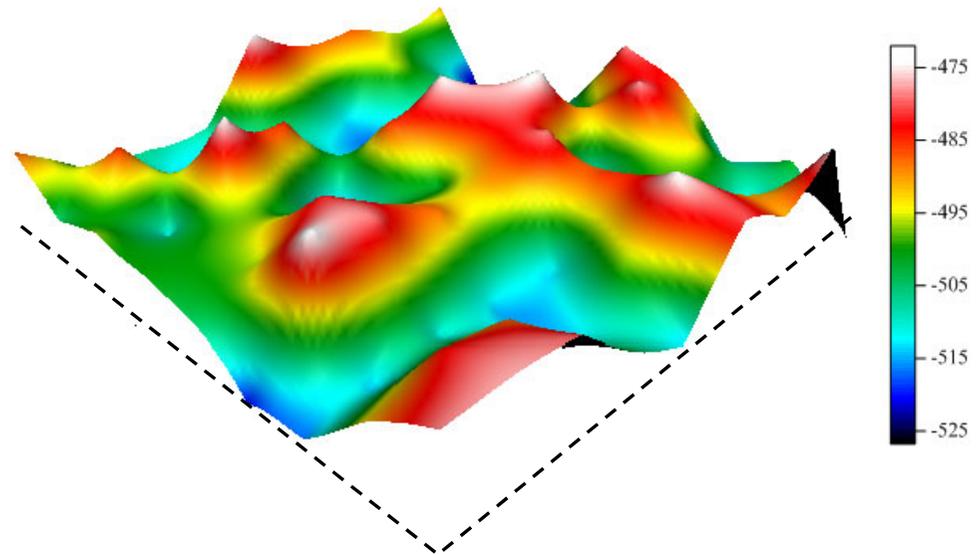


喷丸与未喷丸交接
附近残余应力分布



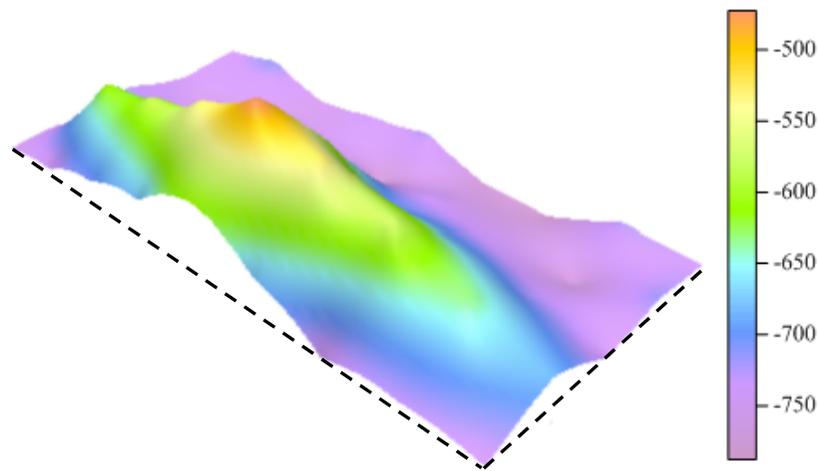
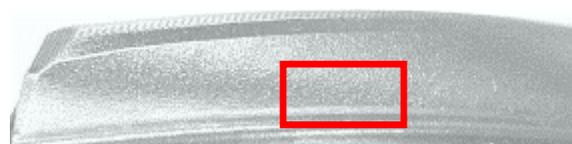


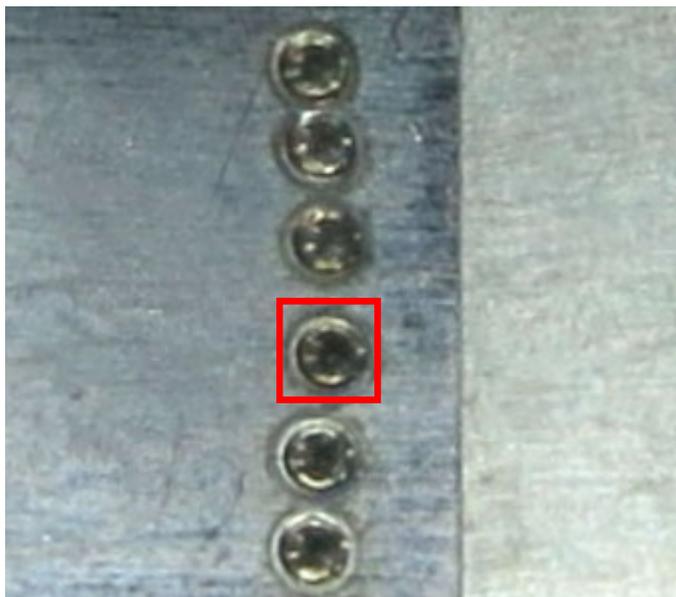
喷丸表面残余应力分布



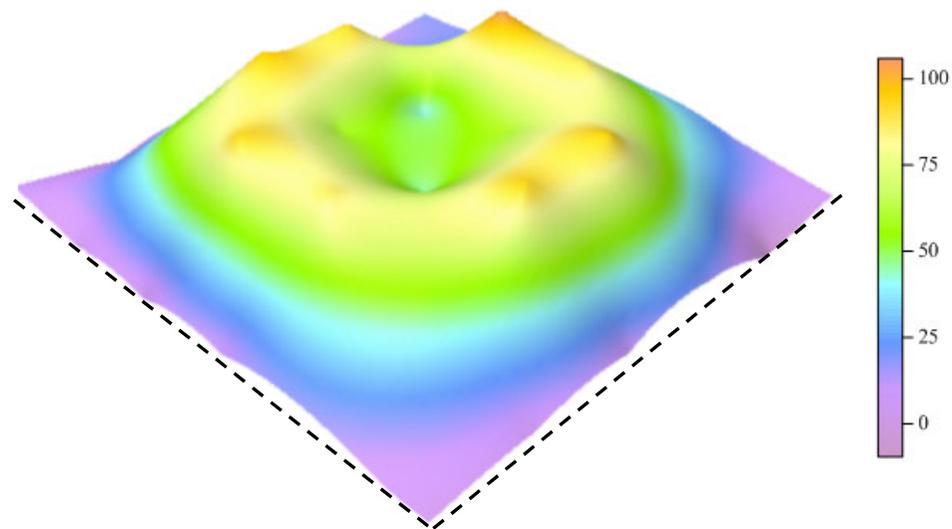


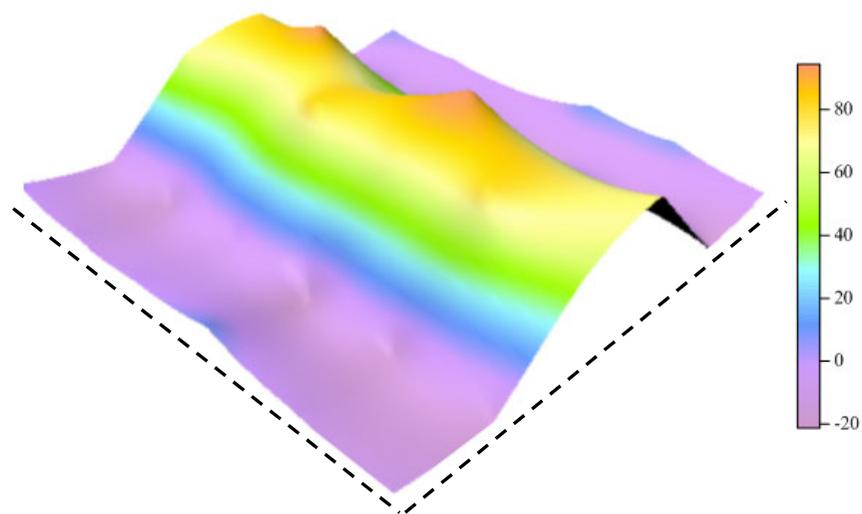
齿根附近残余应力分布



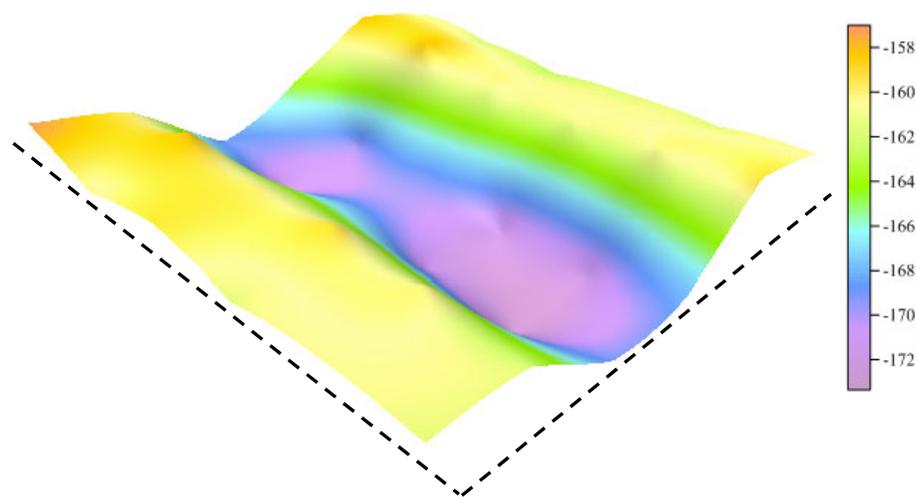


焊点附近残余应力分布

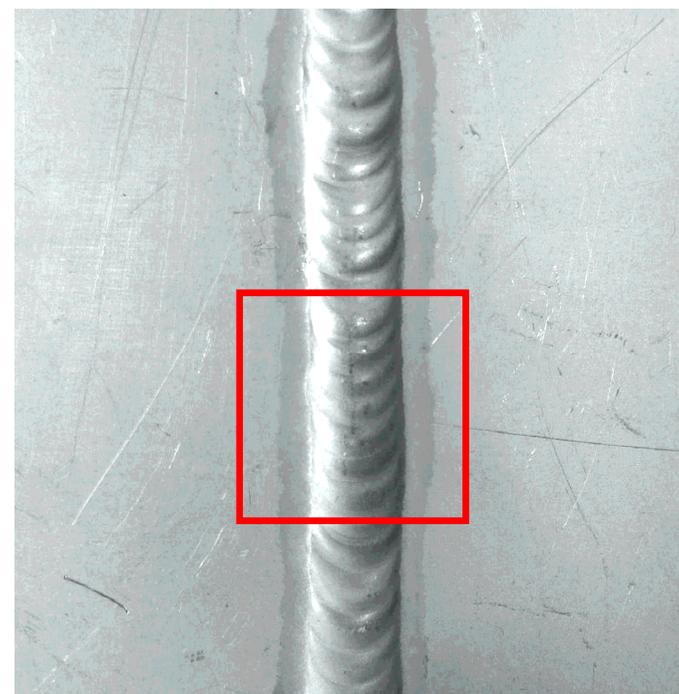




焊缝附近残余应力



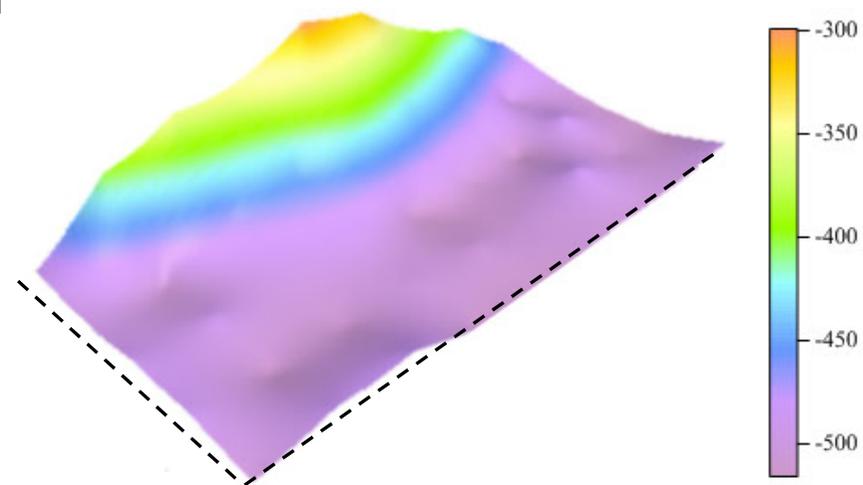
喷丸处理后残余应力



铝合金焊缝

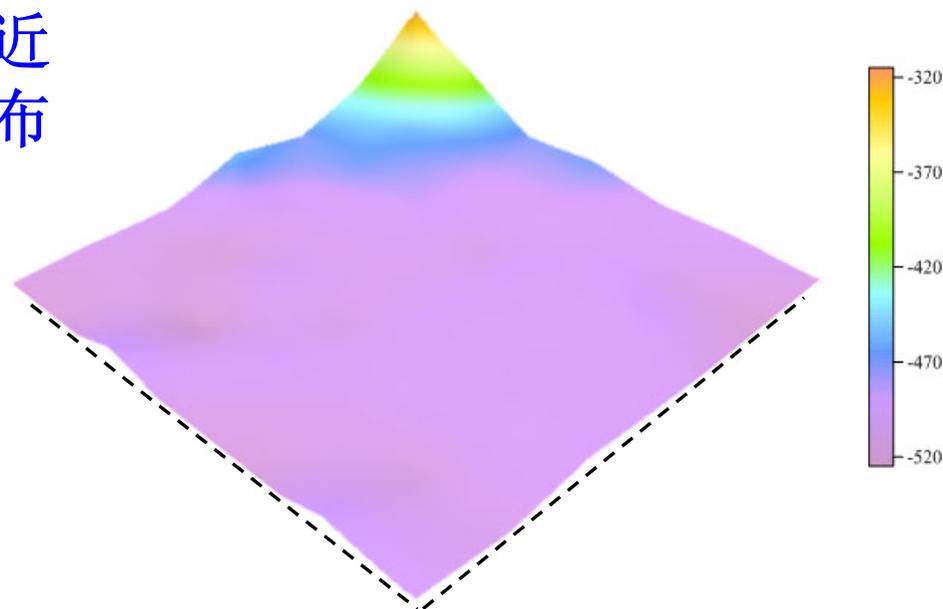


叶轮槽附近
残余应力分布



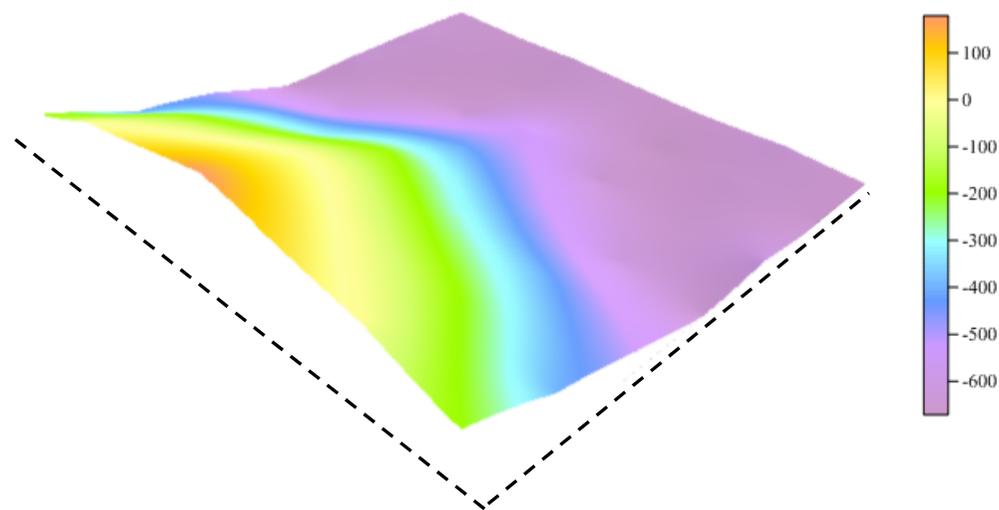


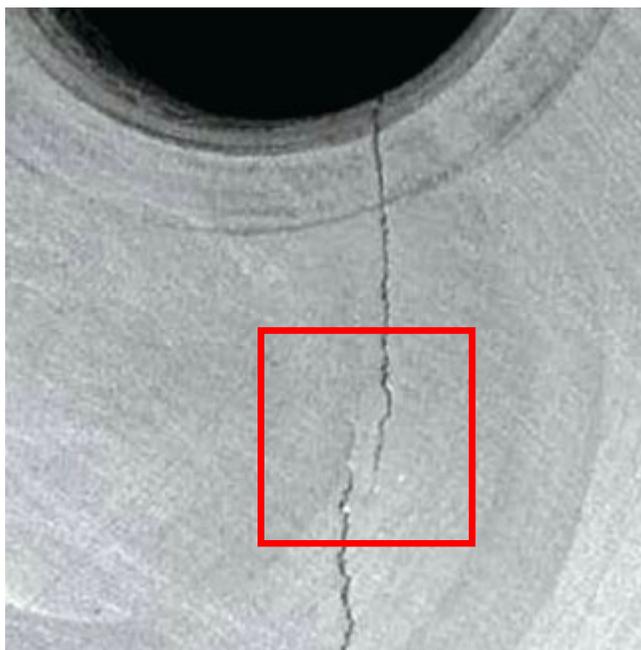
叶片根部附近
残余应力分布



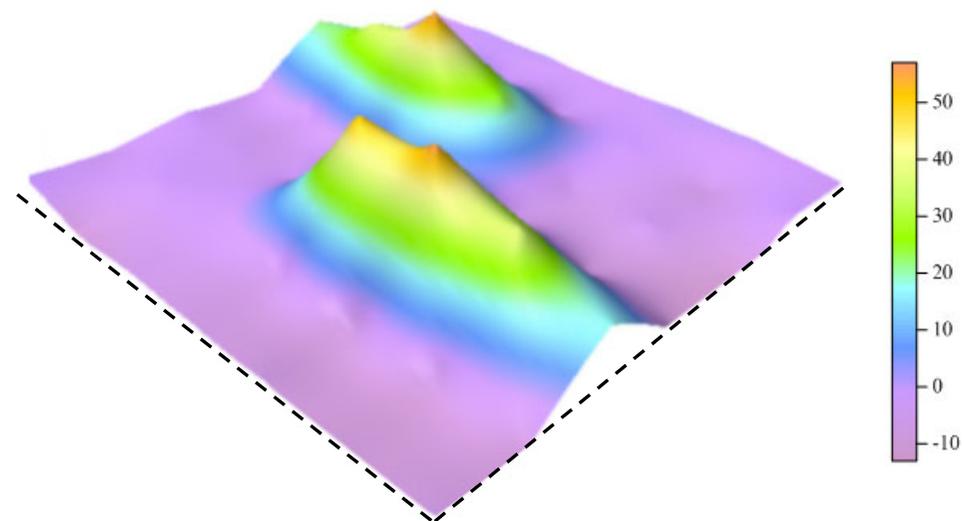


矿山钻头残余应力分布





裂纹附近残余应力分布



总结

- ◆ X射线衍射技术，可以检测零部件加工制造过程中的残余应力和残余奥氏体含量，以及零部件受载服役和损伤失效后的情况。
- ◆ 与其它检测分析方法相比，X射线具有非接触、非破坏、准确度高和可重复检测的优点。
- ◆ 目前在国内机械制造行业，已具有相当数量的成功应用实例，表现出良好的发展前景。



上海交通大学
残余应力与喷丸强化

喷丸强化技术及其工程应用

姜传海

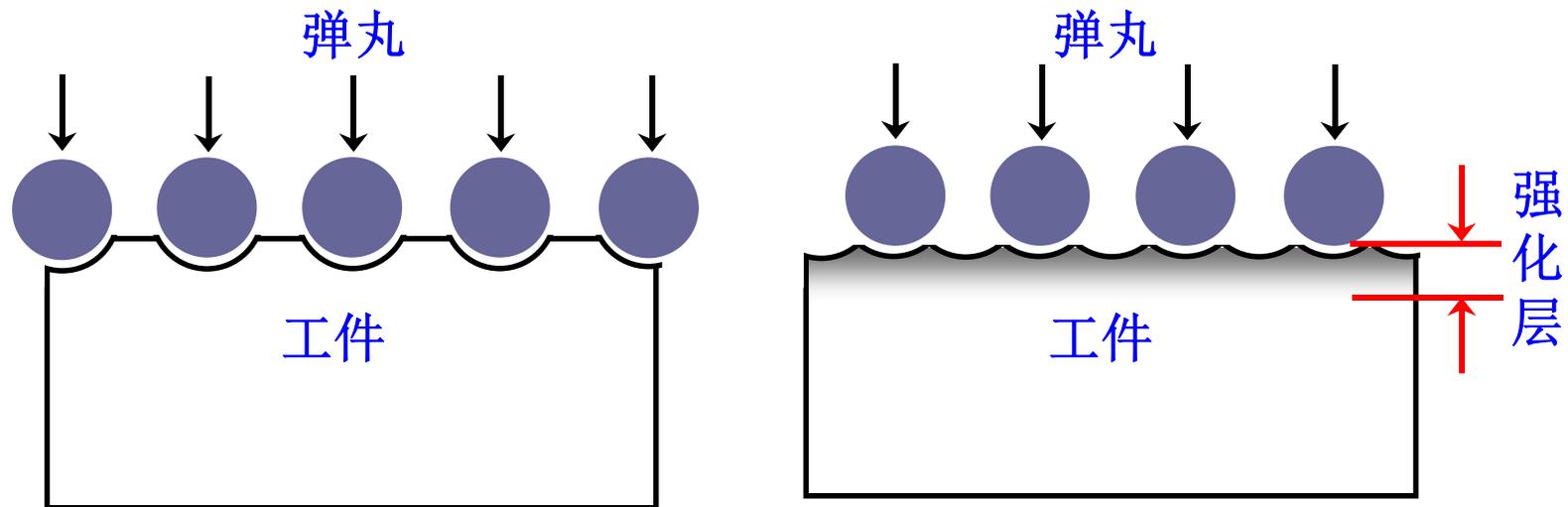
信箱 chjiang@sjtu.edu.cn
手机及微信 13391307839

上海交通大学材料科学与工程学院



喷丸强化技术概况

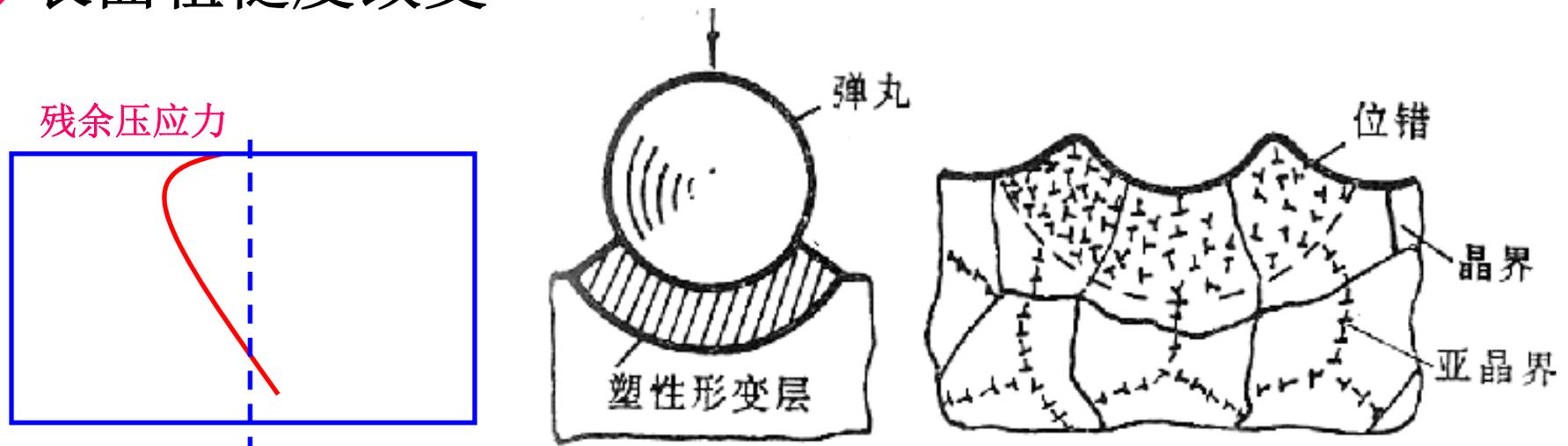
喷丸是在高速运动的弹丸流喷射材料表面，反复击打使材料表层发生明显的塑性变形。最终在材料表面造成一强化层深度 $<1\text{mm}$ ，可有效提高零部件疲劳寿命和应力腐蚀抗力





喷丸导致材料表层变化包括

- ◆ 引入残余压应力场
- ◆ 形变细化组织结构
- ◆ 残余奥氏体转变为马氏体
- ◆ 表面粗糙度改变



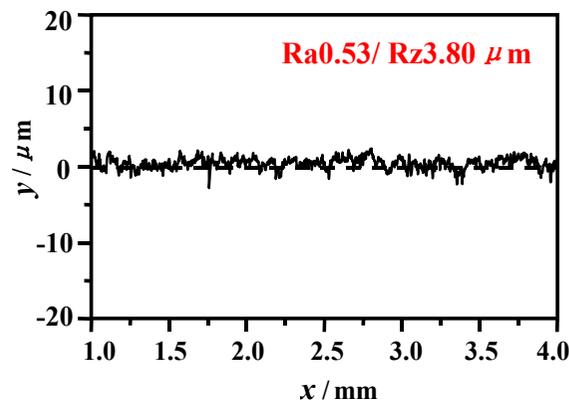
前三种变化均可改善材料疲劳寿命，表面粗糙度增加则可能降低材料疲劳性能。



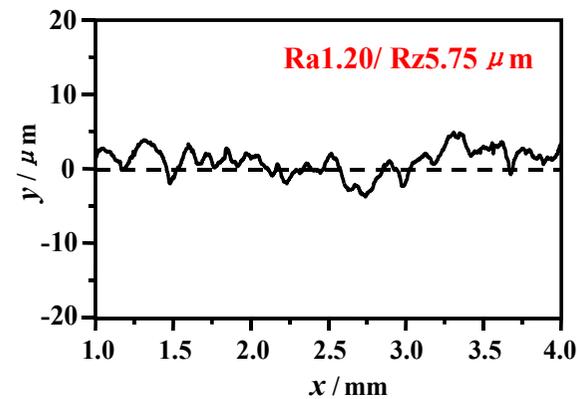
精加工表面仍存在加工刀痕，是疲劳裂纹起源。喷丸处理除了产生强化外，还可有效消除这些加工刀痕



精加工表面



喷丸表面





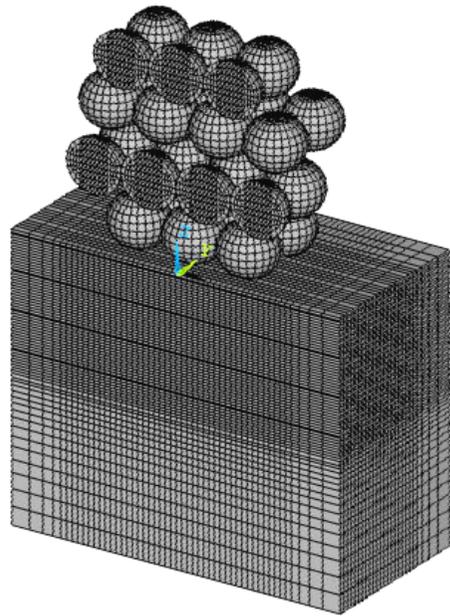
喷丸处理的零构件

- ◆ 承受交变载荷易产生疲劳失效的零部件
- ◆ 承受恒定载荷和腐蚀环境易产生应力腐蚀的零部件
- ◆ 带有应力集中部位 (圆角、键槽、压印标记及结构突变区域)的零部件
- ◆ 焊缝及其热影响区域
- ◆ 易产生氢脆失效的承力件
- ◆ 需要电镀钢制零构件
- ◆ 需要阳极化处理的铝合金零构件

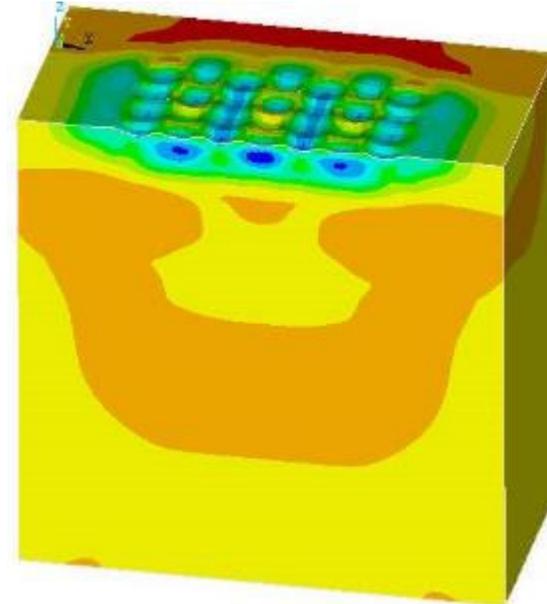


喷丸残余应力数值模拟

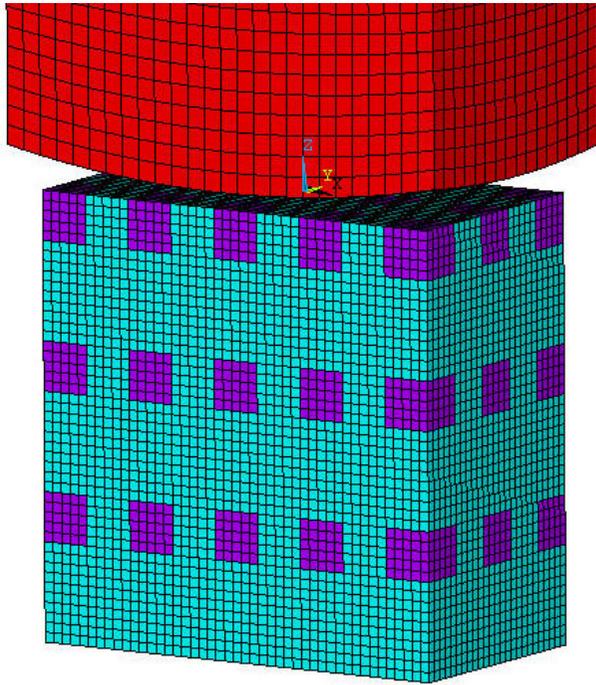
借助商用有限元计算软件，基于弹丸与靶材弹塑性碰撞模型，计算机模拟不同喷丸覆盖率、弹丸速度、弹丸尺寸和弹丸类型对喷丸残余应力场的影响



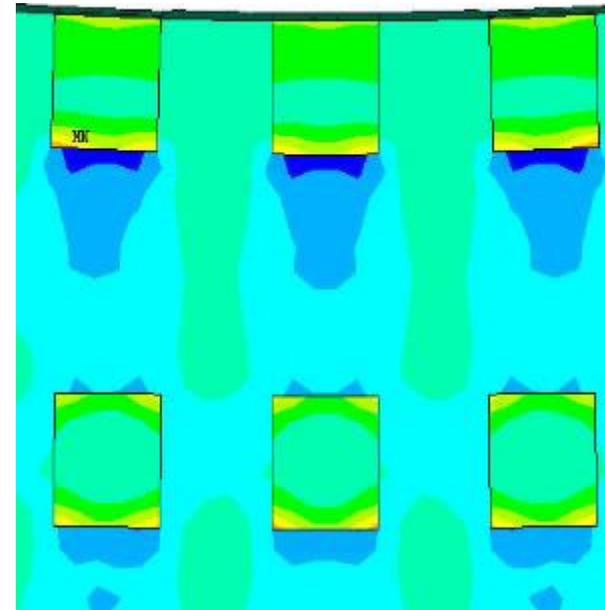
均质材料网格剖分



靶材残余应力分布



非均质材料网格



靶材残余应力分布



比较实用的喷丸工艺

[强化喷丸] 喷丸强化主要工序

[预强化喷丸] 利用喷丸技术预先提高零件表面硬度

[精整喷丸] 利用喷丸技术精整喷丸表面

[抛光喷丸] 利用喷丸技术对喷丸表面抛光

[预应力喷丸] 预拉伸应力条件下喷丸强化

[温度喷丸] 加热状态下进行喷丸强化

[变温喷丸] 变温环境下进行喷丸强化

[复合喷丸] 联合喷丸技术



喷丸相关后续事项

- ◆ 薄零件喷丸后，可能出现短期或长期变形问题，必须采用合适的喷丸强度工艺
- ◆ 对于表面粗糙度有较高要求的零构件，喷丸处理后只允许进行少量表面磨加工 或表面电抛光加工
- ◆ 对于某些特殊情况，虽然允许对喷丸件进行加热处理，但加热温度应视具体情况通过试验确定
- ◆ 零件使用一段时间后若残余应力压发生松弛，允许采用二次喷丸，回复原有残余压应力水平



喷丸强化技术应用示例

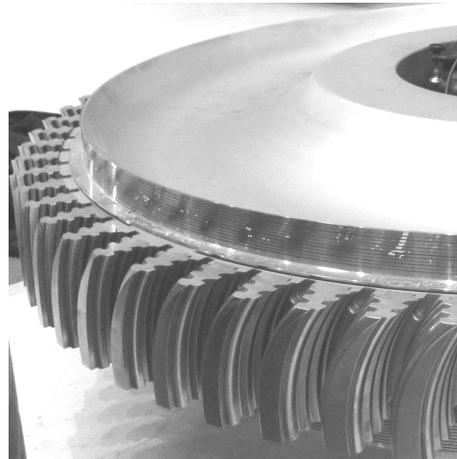
实际应用中，首先是确保喷丸处理均匀性，防止喷丸后零部件尺寸变形，喷丸表面粗糙度不能过高。对于不锈钢零部件，控制马氏体转变量。某些内孔或隐藏缝隙喷丸虽有难度，但可解决。

完整的喷丸工艺研发，不仅包括工艺参数试验和必要检测分析，还要结合生产批量，提出合适的喷丸装备与丸料配置方案，制定技术规范等。

上海交大残余应力与喷丸强化实验室，已与国内几十家单位成功合作，效果良好。



电站汽轮机转子



核电汽轮机轮盘



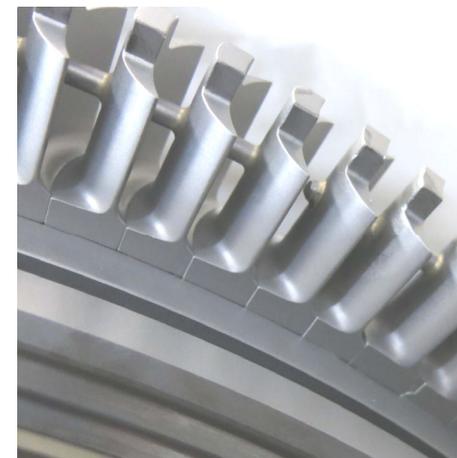
核电镍基合金开口销



钛合金叶片



工业透平叶片组件



核电冷凝器管



上海交通大学
残余应力与喷丸强化



发动机轮盘



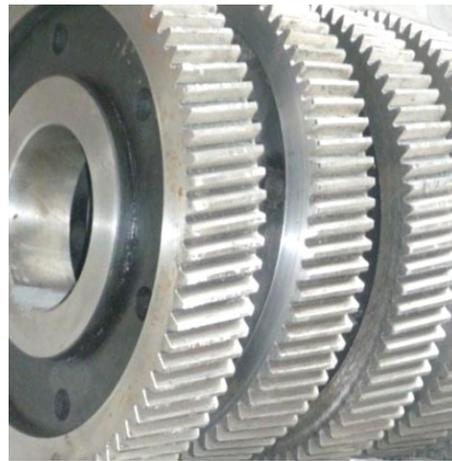
镍基合金叶片



发动机涡轮



风电变速器齿轮



机车高速齿轮



硬齿面齿轮



硬齿面齿轮



机车刹车盘



轴承套圈



轴承套圈



轴承滚子



螺纹螺栓



凸轮喷丸



凸轮喷丸



模具内壁喷丸



汽车曲轴



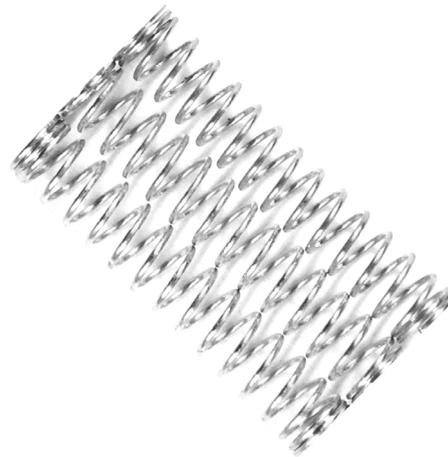
硬质合金刀具



连杆喷丸



牙轮钻头



细钢丝螺旋弹簧



管材对接焊缝



锯条喷丸



弹性阀片



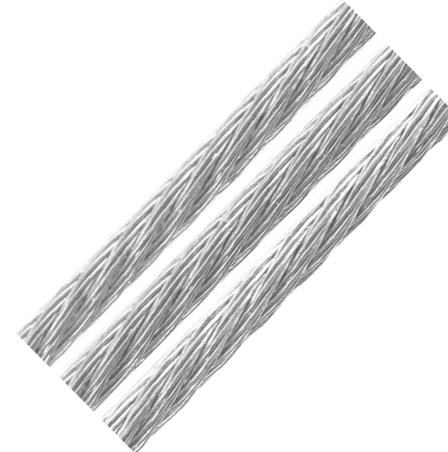
螺旋弹簧



不锈钢弯头



螺纹喷丸



钢丝绳



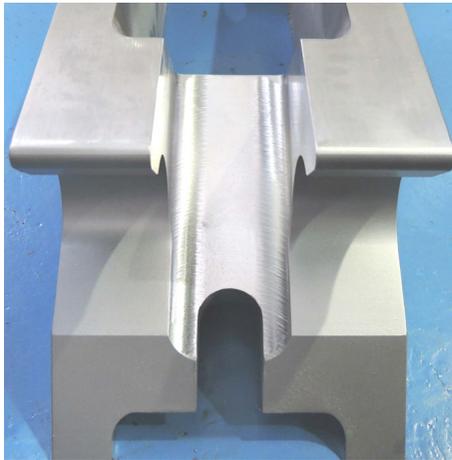
黄铜齿轮喷丸



铝合金缸体



汽车轮毂喷丸



机车承力件



刀具喷丸



铸件喷丸件



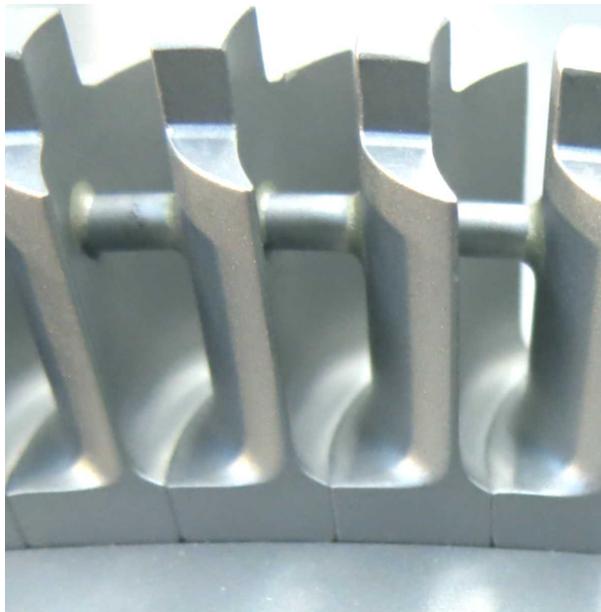
螺钉喷丸



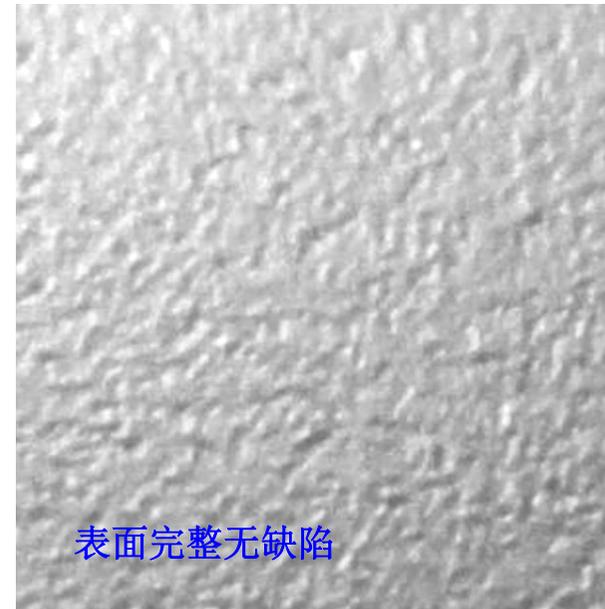
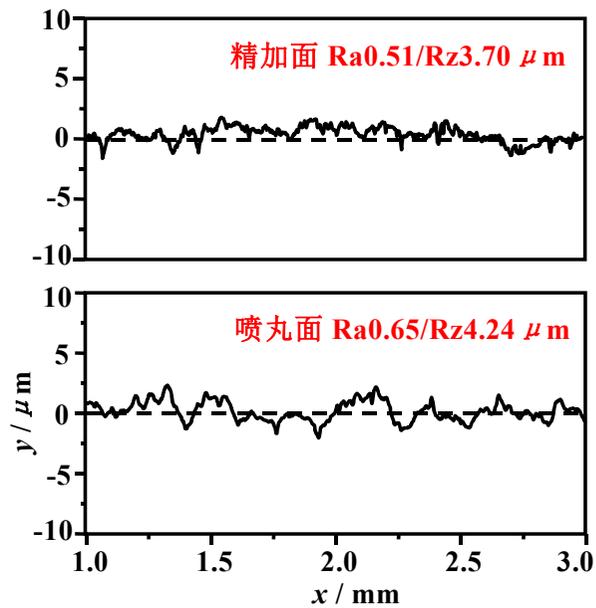
飞机起落架

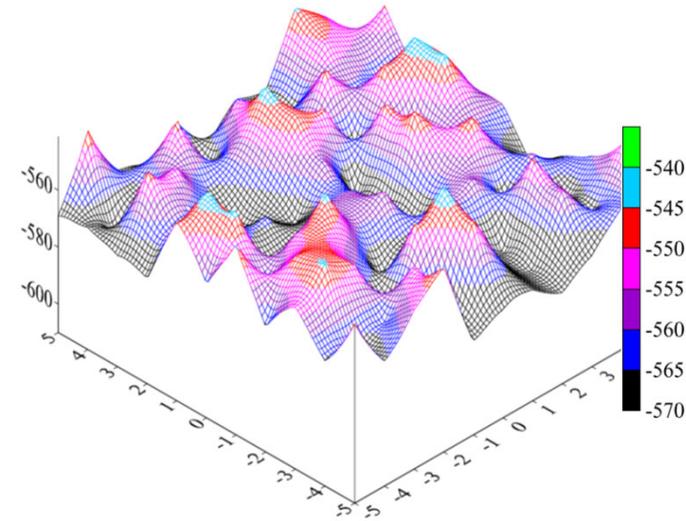
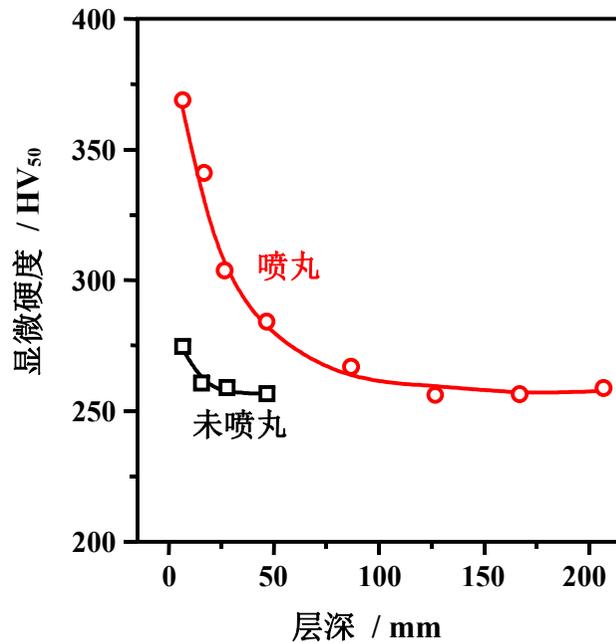
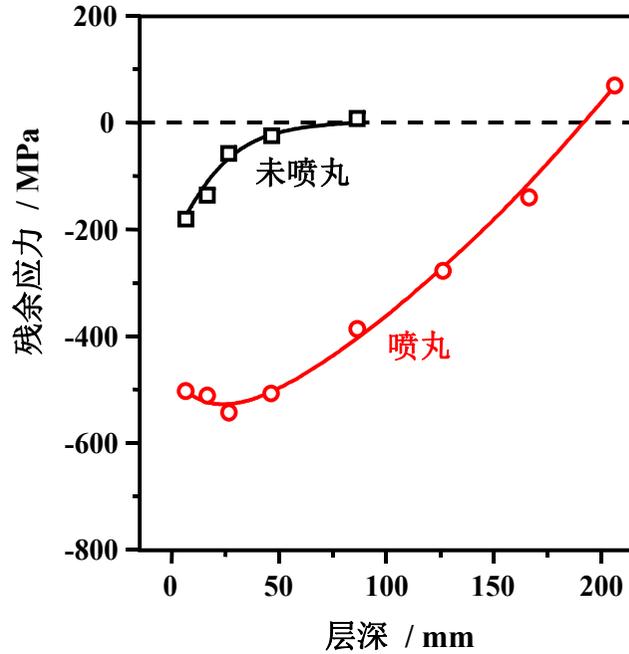


不锈钢管内壁喷丸



透平叶片装配钎焊拉筋
后喷丸处理，对喷丸表
面粗糙度有较高要求



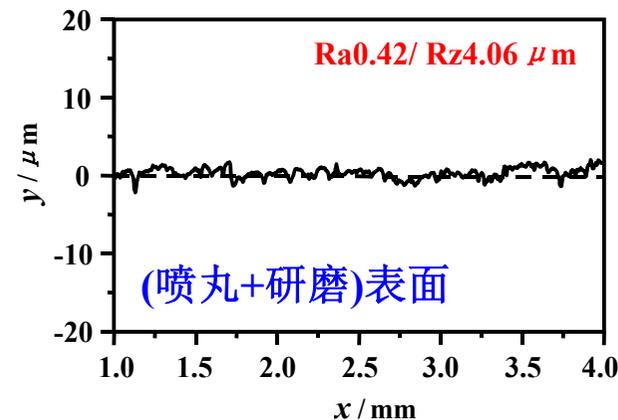
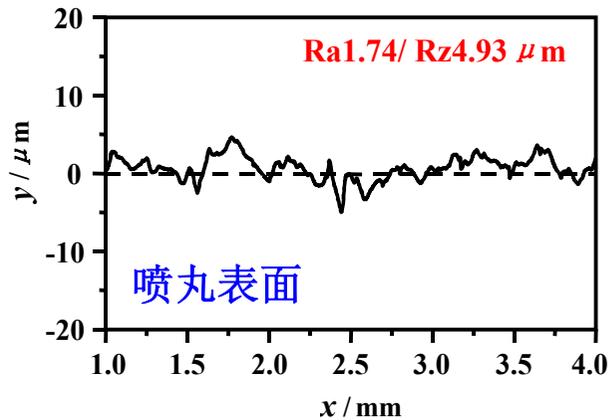
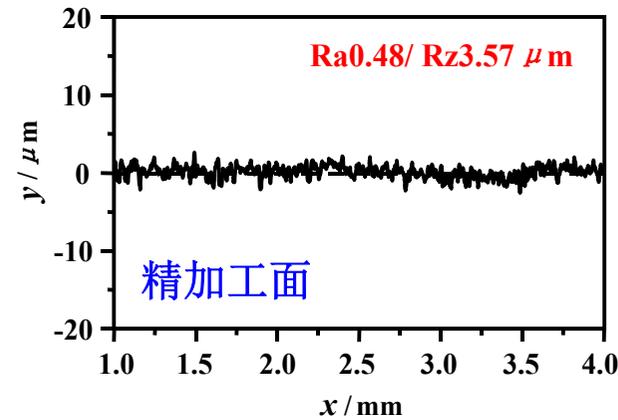
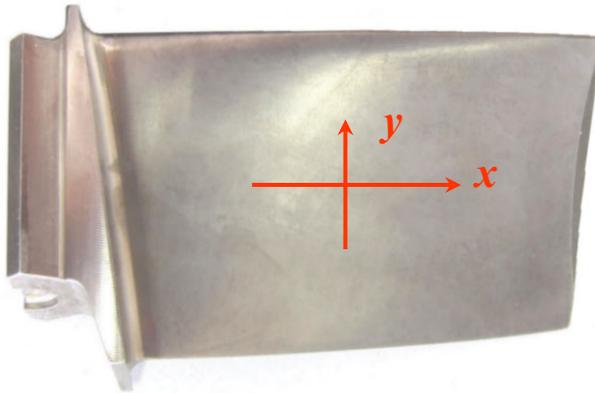


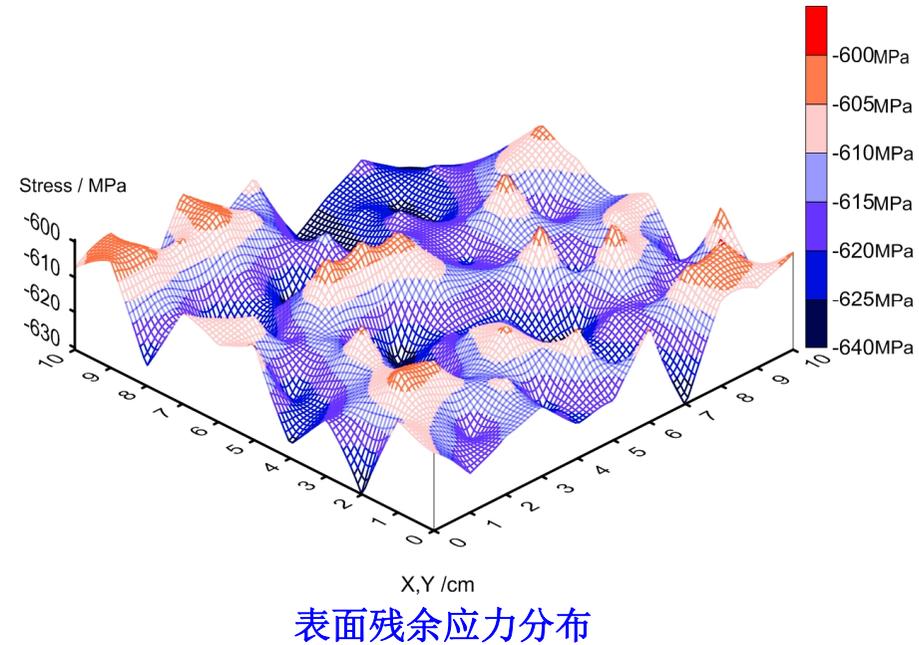
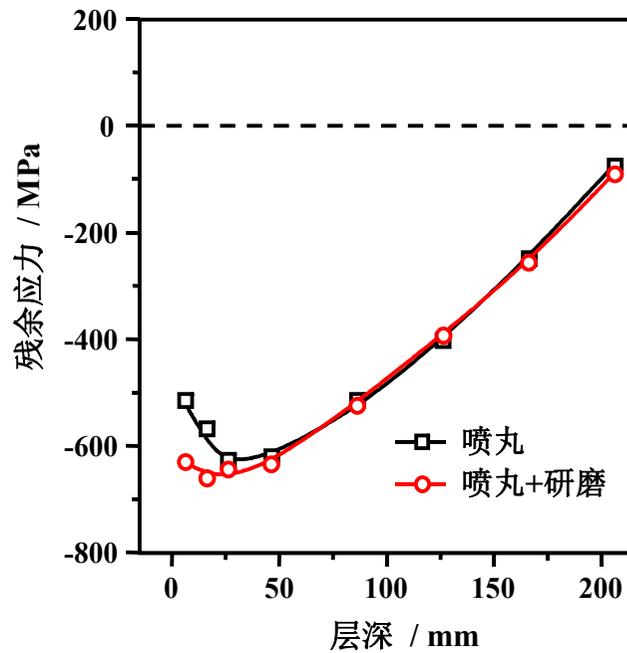
表面残余应力分布

强化喷丸+精整喷丸+抛光喷丸，在获得强化同时，喷丸表面粗糙度不超过 $Ra0.65\mu m$



对Ti₆Al₄V合金叶片喷丸处理，要求较高表面残余应力
和较低表面粗糙度

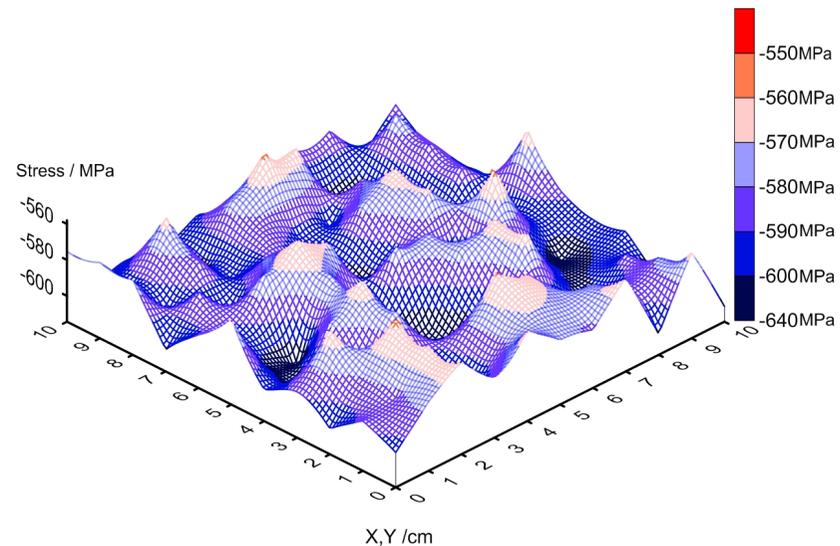
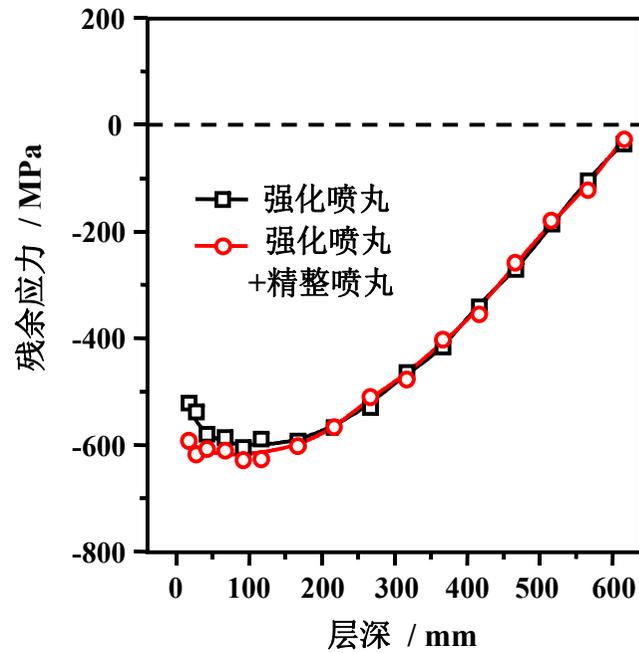




采用强化喷丸+精整喷丸+研磨，喷丸表面残余压应力超过-600MPa，表面粗糙度不超过Ra0.42 μ m



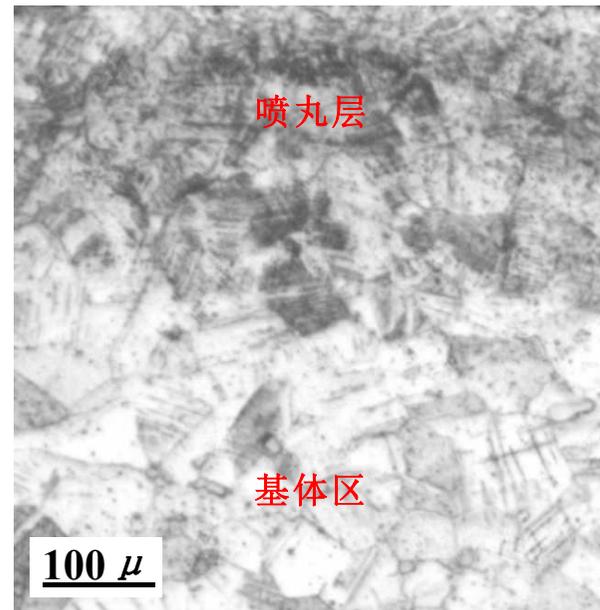
核电汽轮机低压轮盘，强化
喷丸+精整喷丸，表面残余
应力均匀，优于国外规范

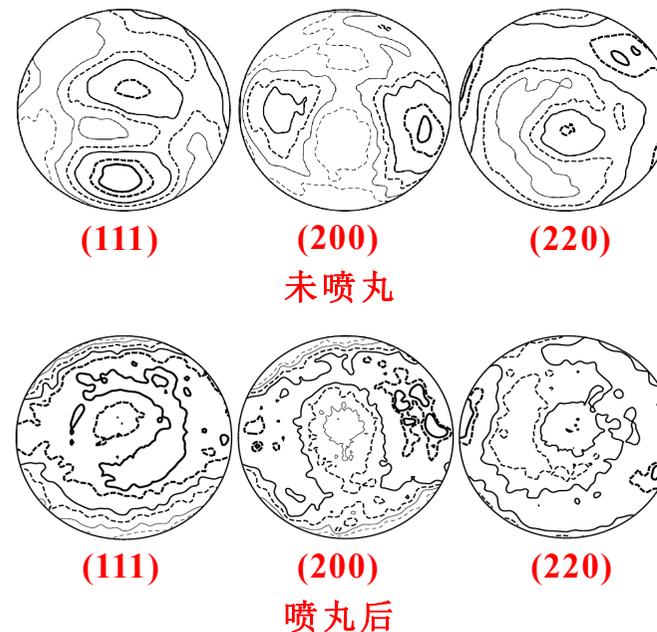
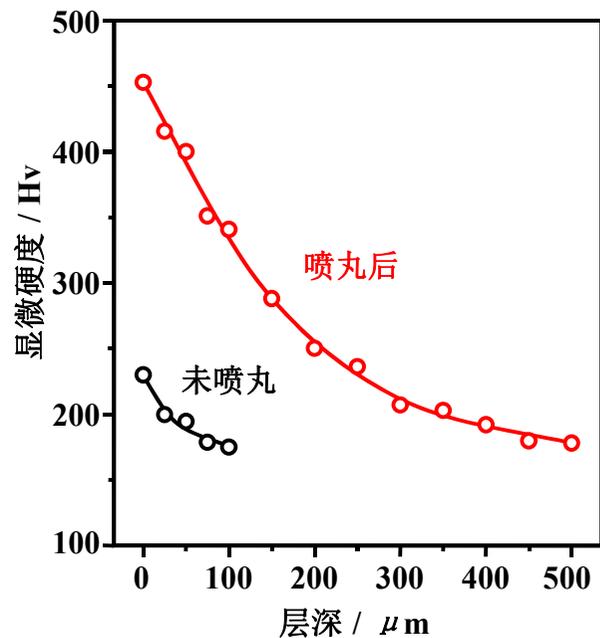


表面残余应力分布

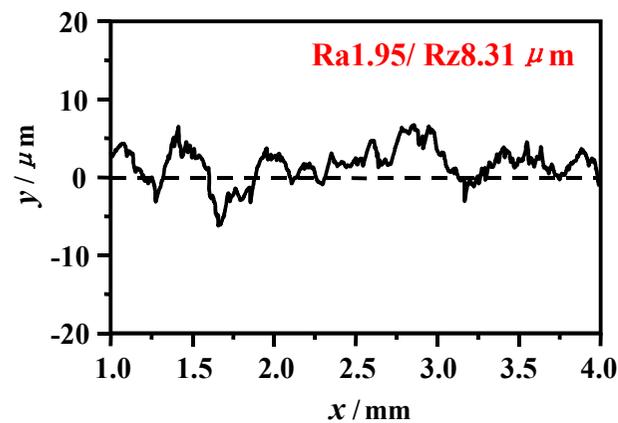


高压锅炉S403奥氏体不锈钢管，为了改善其耐高温氧化性，需要对管材内壁进行喷丸处理



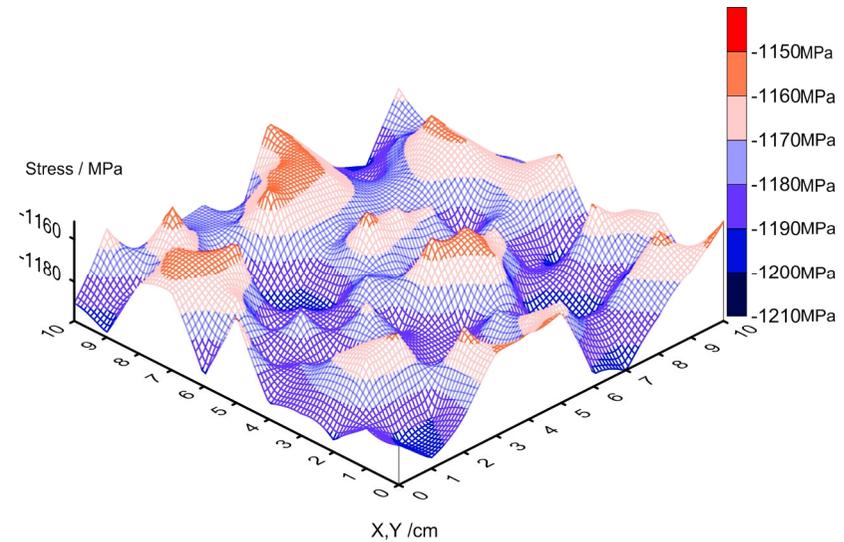


采用强化喷丸 + 精整喷丸工艺，优化喷丸工艺参数，各项检测结果均优于国外技术规范

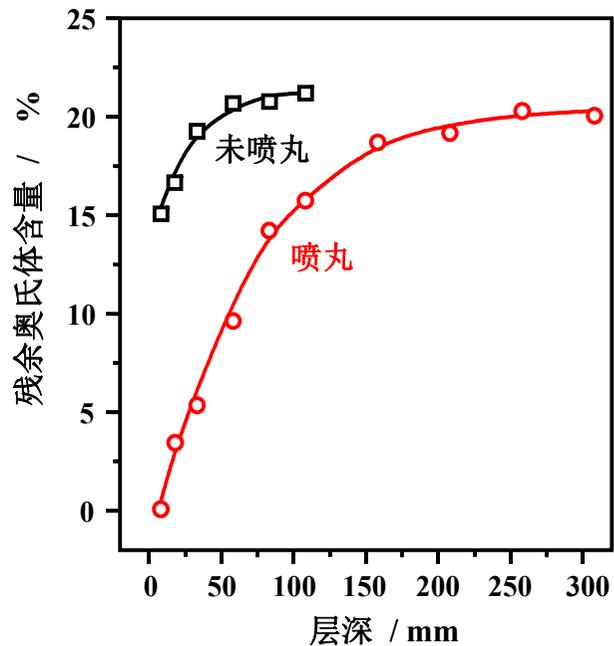
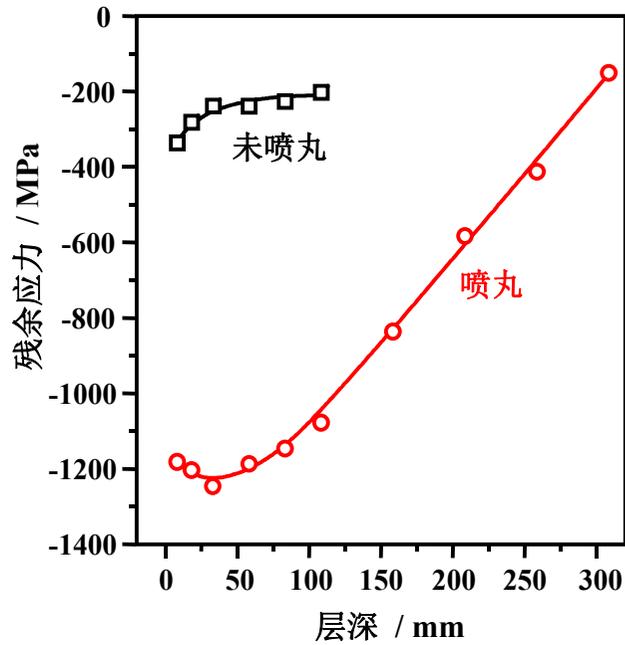




硬齿面高速齿轮，材质 20CrMnMo ，渗碳淬火表面硬度 $\text{HRC } 58-62$ ，提高齿轮疲劳寿命



表面残余应力分布

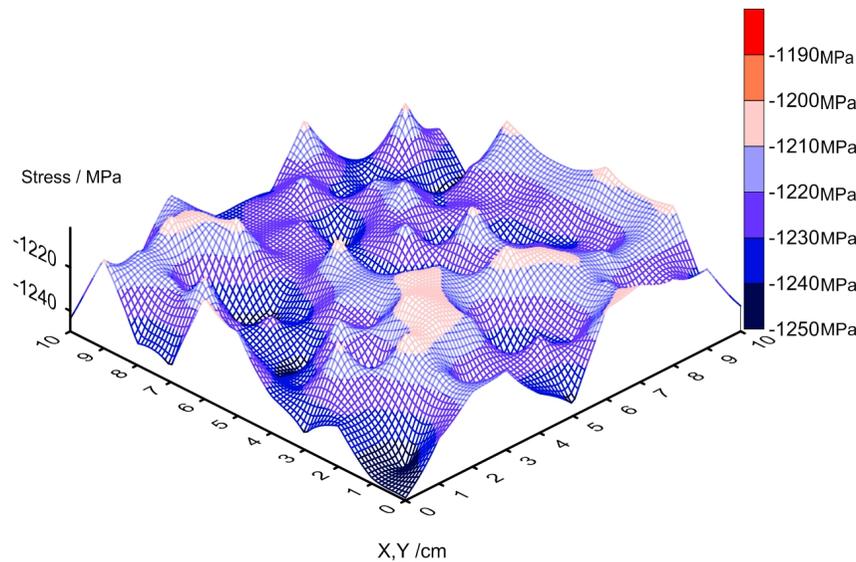
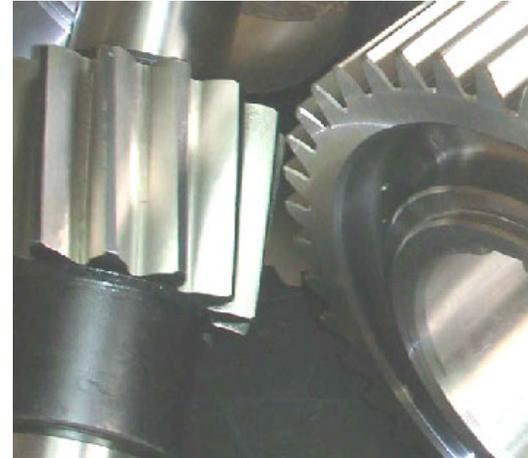


材料及状态	载荷 kN	循环次数 N	备注
20CrMnMo 磨齿未喷丸	57.5	3.42×10^4	已断裂
	57.5	3.55×10^4	已断裂
	57.5	3.58×10^4	已断裂
	57.5	3.91×10^4	已断裂
	57.5	4.73×10^4	已断裂
20CrMnMo 磨齿后喷丸	57.5	$>3 \times 10^6$	未断裂
	57.5	$>3 \times 10^6$	未断裂
	57.5	$>3 \times 10^6$	未断裂
	57.5	$>3 \times 10^6$	未断裂
	57.5	$>3 \times 10^6$	未断裂

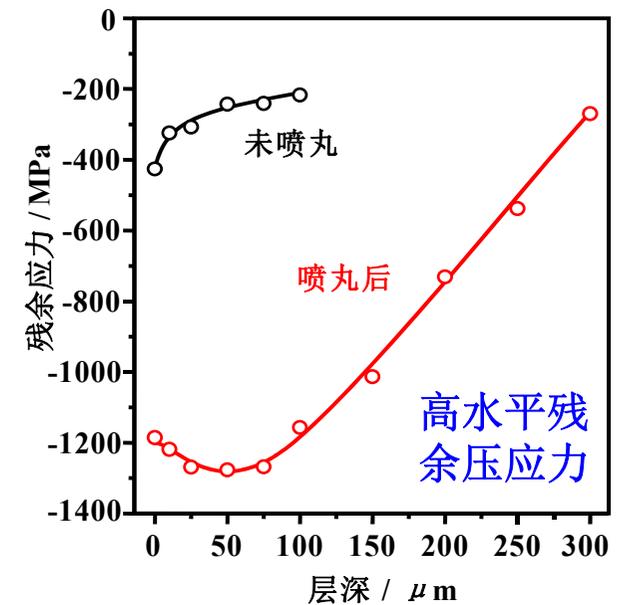
采用**强化喷丸 + 精整喷丸**，疲劳性能显著提高

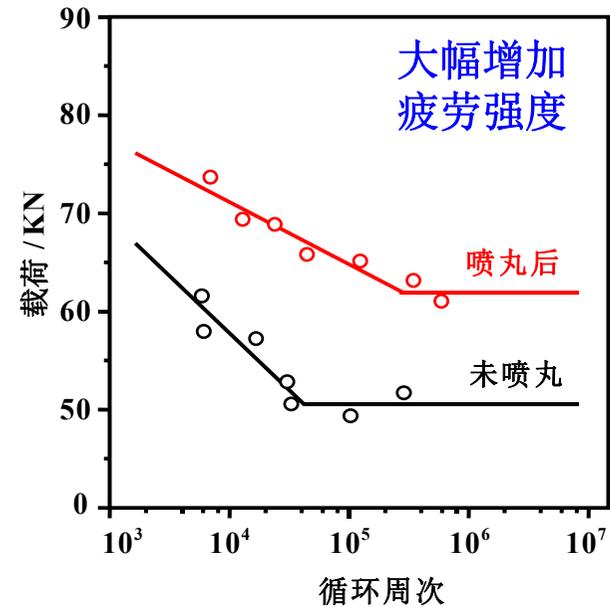
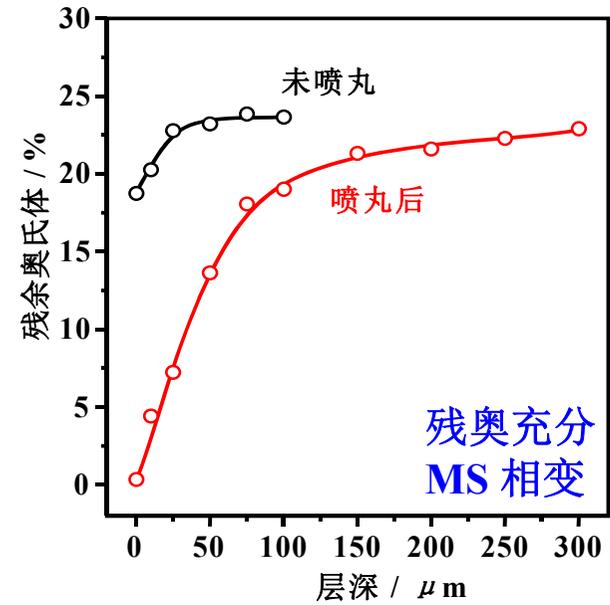
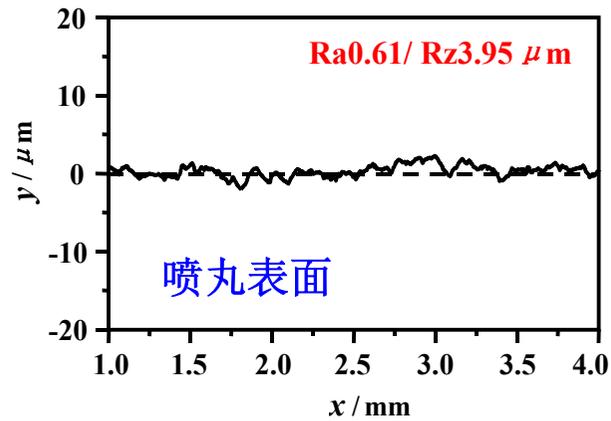
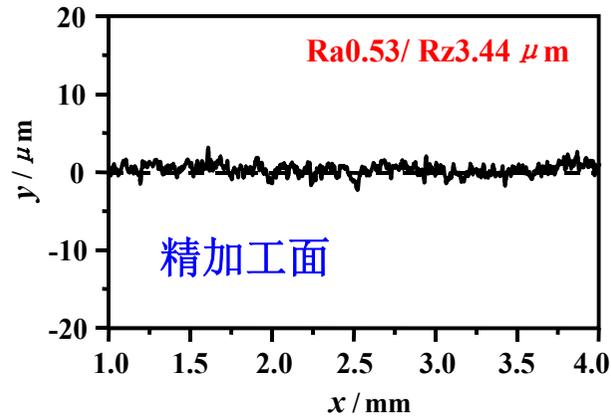


硬齿面齿轮，渗碳淬火后喷丸，要求尽可能降低喷丸表面粗糙度，提高疲劳强度



表面残余应力分布





强化喷丸+精整喷丸+抛光喷丸，优化喷丸工艺参数，检测结果优于国外技术规范

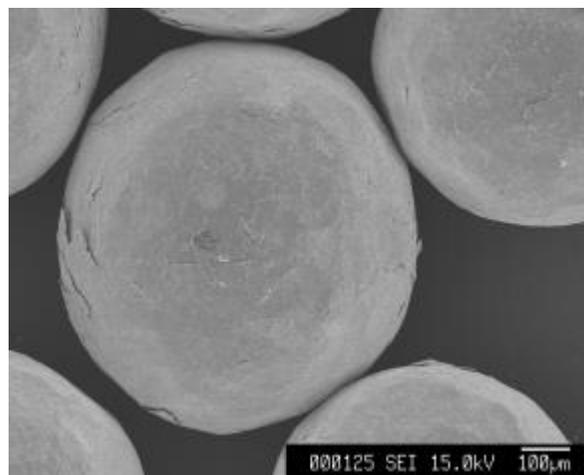
微粒子喷丸原理

微粒子喷丸处理（**Fine particle shot peening, FPSP**）是近年来兴起的一种新型金属表面处理方法，操作简单，成本低。该处理方法通过施加高压空气，使直径**0.01-0.2 mm**的微粒子以极高的动能反复冲击工件表面，使表面发生塑性变形，晶粒细化，在材料表面形成硬化层，提高表面强度。

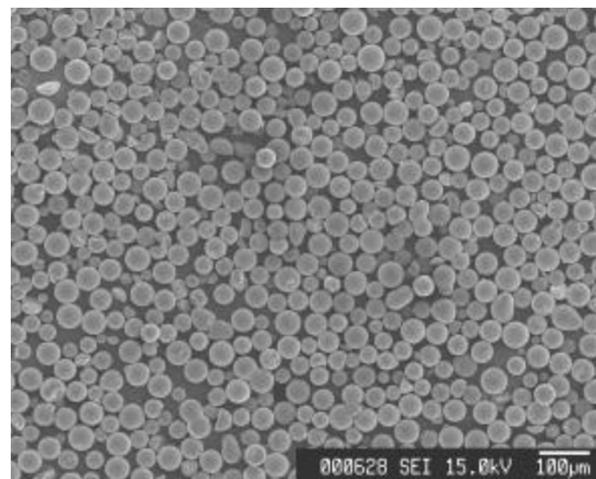
微粒喷丸的优点：**1. 更高的残余压应力**
2. 表面粗糙度小

◆ 微粒子喷丸介质

微粒子喷丸和传统喷丸最大的不同使其使用的弹丸尺寸很小，一般不超过 $200\ \mu\text{m}$ 。一般也分为玻璃丸、陶瓷丸和钢丸。



传统钢丸



微粒丸 $\sim 50\ \mu\text{m}$



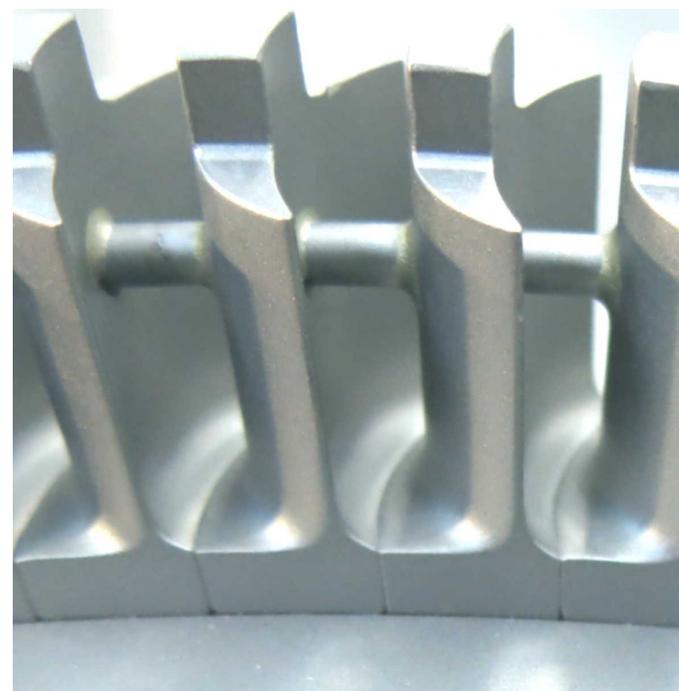
车体零件微粒子喷丸



透平叶片微粒子喷丸



车体零件微粒子喷丸



透平叶片微粒子喷丸



总结

- ◆ 喷丸强化工艺操作简便、成本低廉、适应性广和强化效果显著。是用来改善和提高零构件的疲劳和应力腐蚀断裂抗力的一种有效方法。
- ◆ 目前国内许多单位是利用喷砂来代替喷丸，因此强化效果较差。在我国机械工业行业，众多类型的零构件需要规范它们的表面喷丸强化技术。
- ◆ 需要对重要零部件喷丸强化工艺进行更为广泛的研究工作。包括喷丸工艺试验、残余应力和喷丸形变组织结构优化、表面粗糙度及尺寸稳定性等。



上海交通大学
残余应力分析与应用

谢谢！

姜传海

信箱 chjiang@sjtu.edu.cn

手机及微信 13391307839

上海交通大学材料学院