

扭转疲劳时残余应力的作用 ——以卷簧为例

西安交通大学
胡奈赛



- 卷簧承受扭转和剪切载荷（内表面应力最大）。
- 未喷丸的卷簧疲劳源起于内表面划痕等缺陷处。
- 卷簧喷丸后，疲劳强度大幅度提高。

板簧/卷簧的受力不同

- 1、板簧受弯曲疲劳，弯曲应力属正应力 σ 。
喷丸产生的残余压应力起平均应力的作用，
能有效地提高疲劳强度。
- 2、卷簧受扭转疲劳，扭转应力属切应力 τ 。
喷丸产生的残余应力 σ 对切应力 τ 不起作用，
是喷丸引起的什么因素对提高疲劳强度起作用？

是硬度提高了疲劳强度吗？

油泵柱塞弹簧

材料 65Mn油淬火钢丝 HV 450

$\sigma_{0.2}$ 1500 MPa σ_b 1600 MPa

$\tau_{0.3}$ 1000 MPa τ_b 1300 MPa

钢丝直径3mm 内径20mm

弹簧总圈数7圈 有效圈数5圈

自由高度50mm

研究工作和无锡油嘴油泵研究所合作完成

工艺过程

绕制→去应力退火（ 360°C ，30分）
→磨头→喷丸（丸径0.5-0.7mm，20分，
喷丸强度0.3-0.4A）→校正→回火
（ $250-260^{\circ}\text{C}$ ，20分）→发兰。

疲劳试验机

振幅0~24mm可调（通过调节偏心轮组的相对位置变换偏心距）

转速 240-2400rpm可调

每台24个工位（同时装24个弹簧）

疲劳试验参数

6个切应力水平 τ_{\max} 680-855MPa

680、715、750、785、820、855

应力比 $R=0.1$ $R=\tau_{\min}/\tau_{\max}$

每组20个试样

每个应力水平85%试样超过 10^7

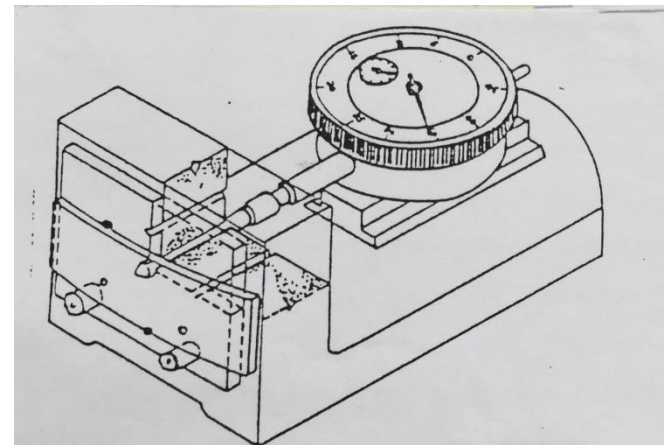
三组试样结果

| | HRc | 喷丸强度 | τ_{\max} | 疲劳源位置 μm |
|---|-----|-------|---------------|---------------------|
| A | 48 | / | 695 | 表面 |
| B | 48 | 0.25A | 810 | 表下50~100 |
| C | 43 | 0.35A | 855 | 表下200 |

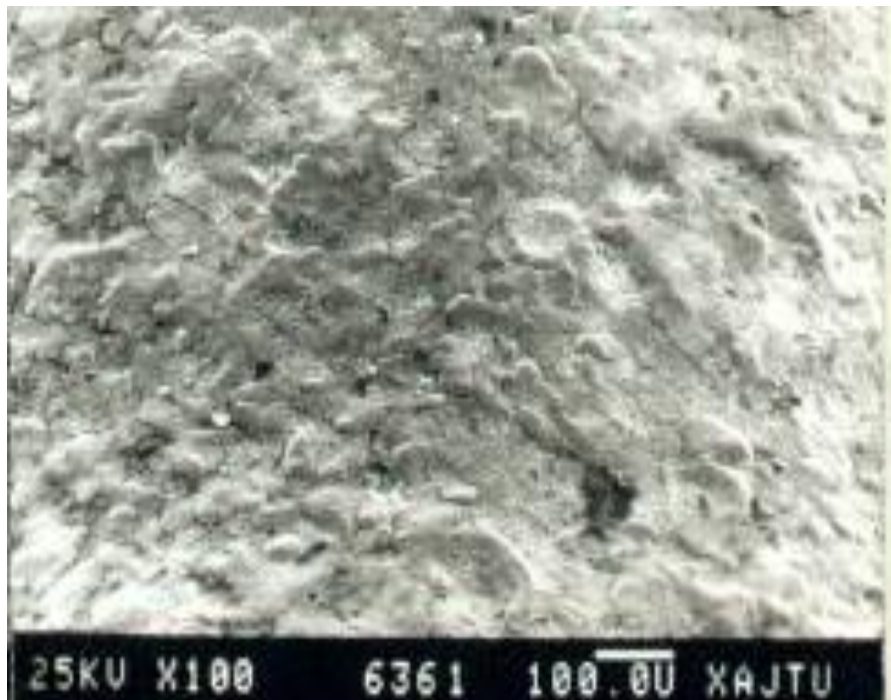
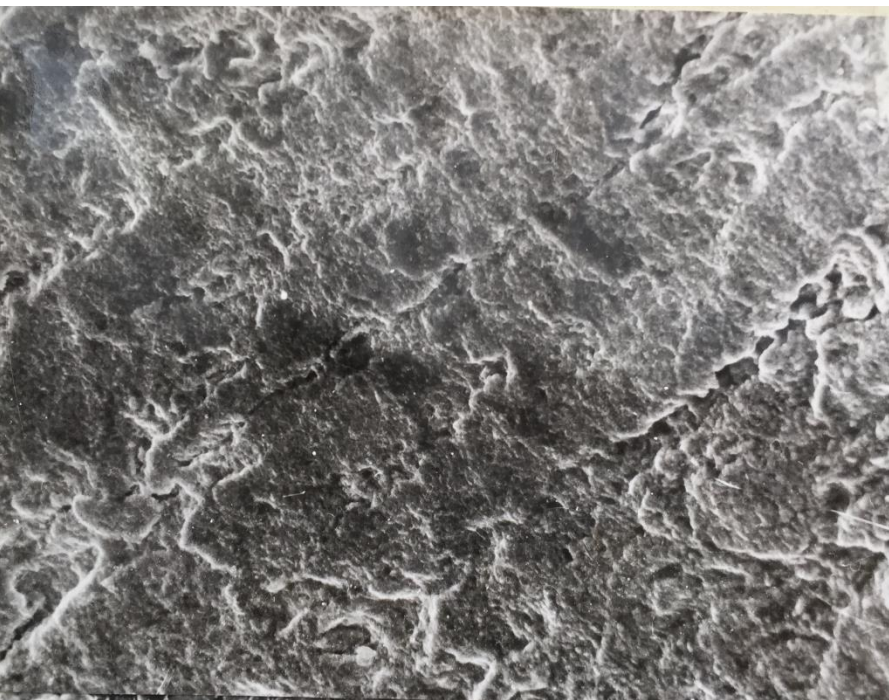
A 未喷丸 B喷丸

C 表面镀Zn喷丸

喷丸强度由Almen试片“A”
(不同试片厚度分别标为N、
A、C) 的弧高度mm确定



表面形貌



上左：A弹簧钢丝表面

上右：C弹簧喷丸后表面

断口分析

1、宏观分析

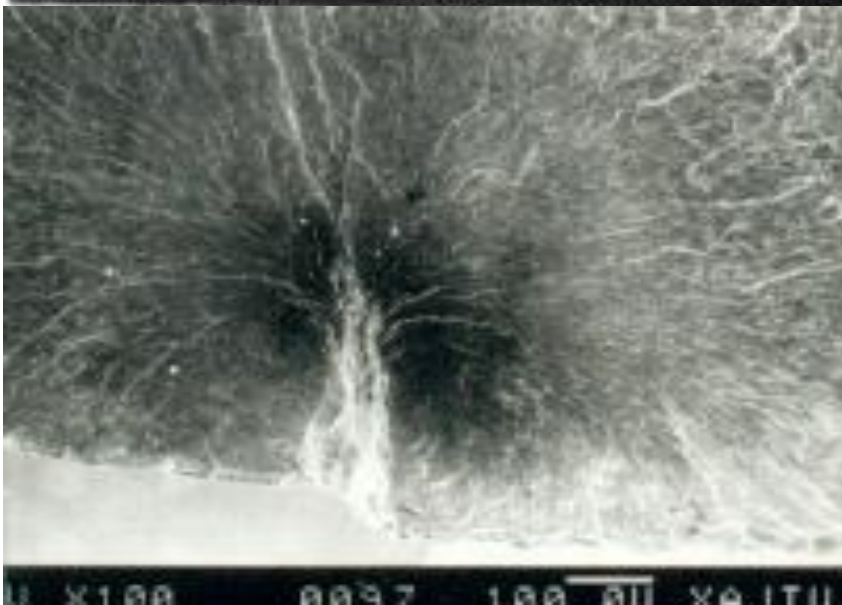
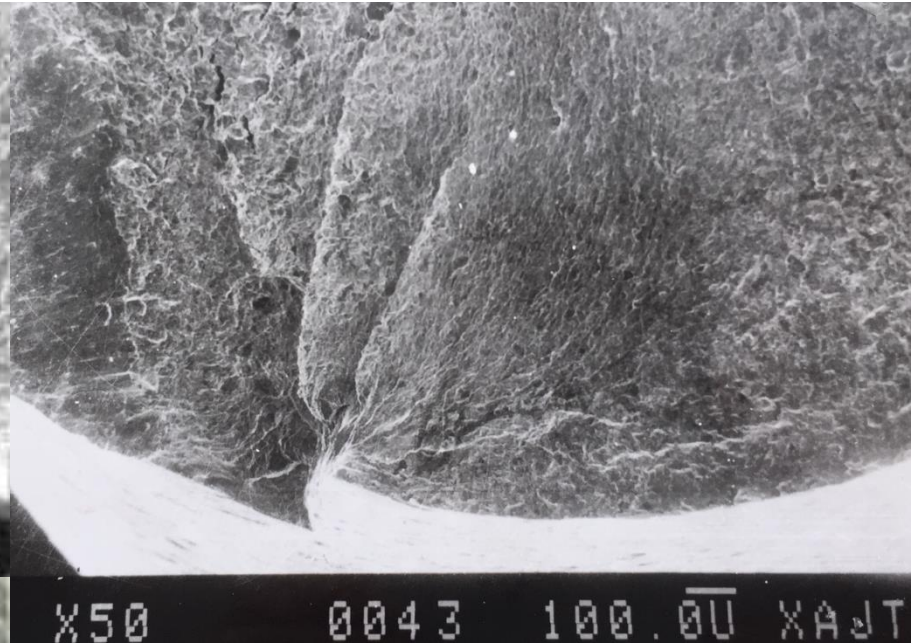
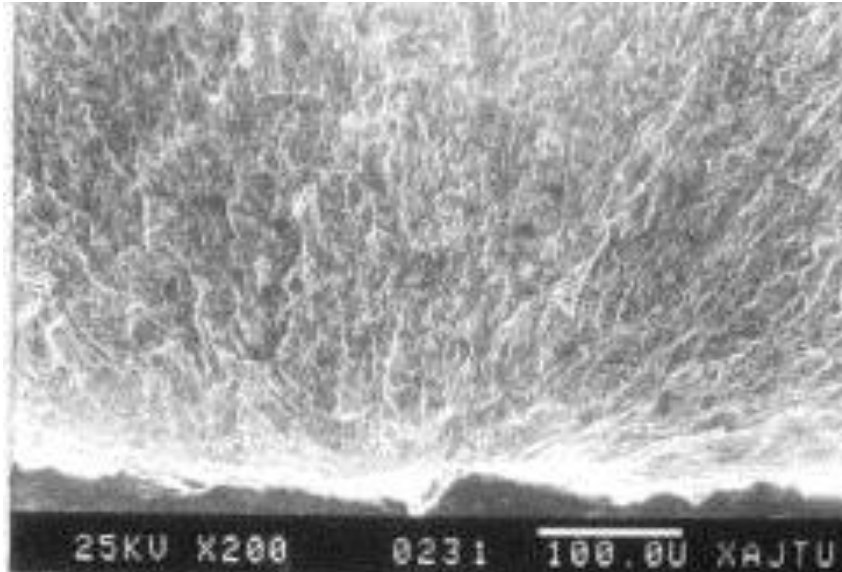
断口98%以上为**正断**，极少数为切断。

疲劳源起于内表面。

2、微观分析

均为**表下源**

弹簧的断口形貌



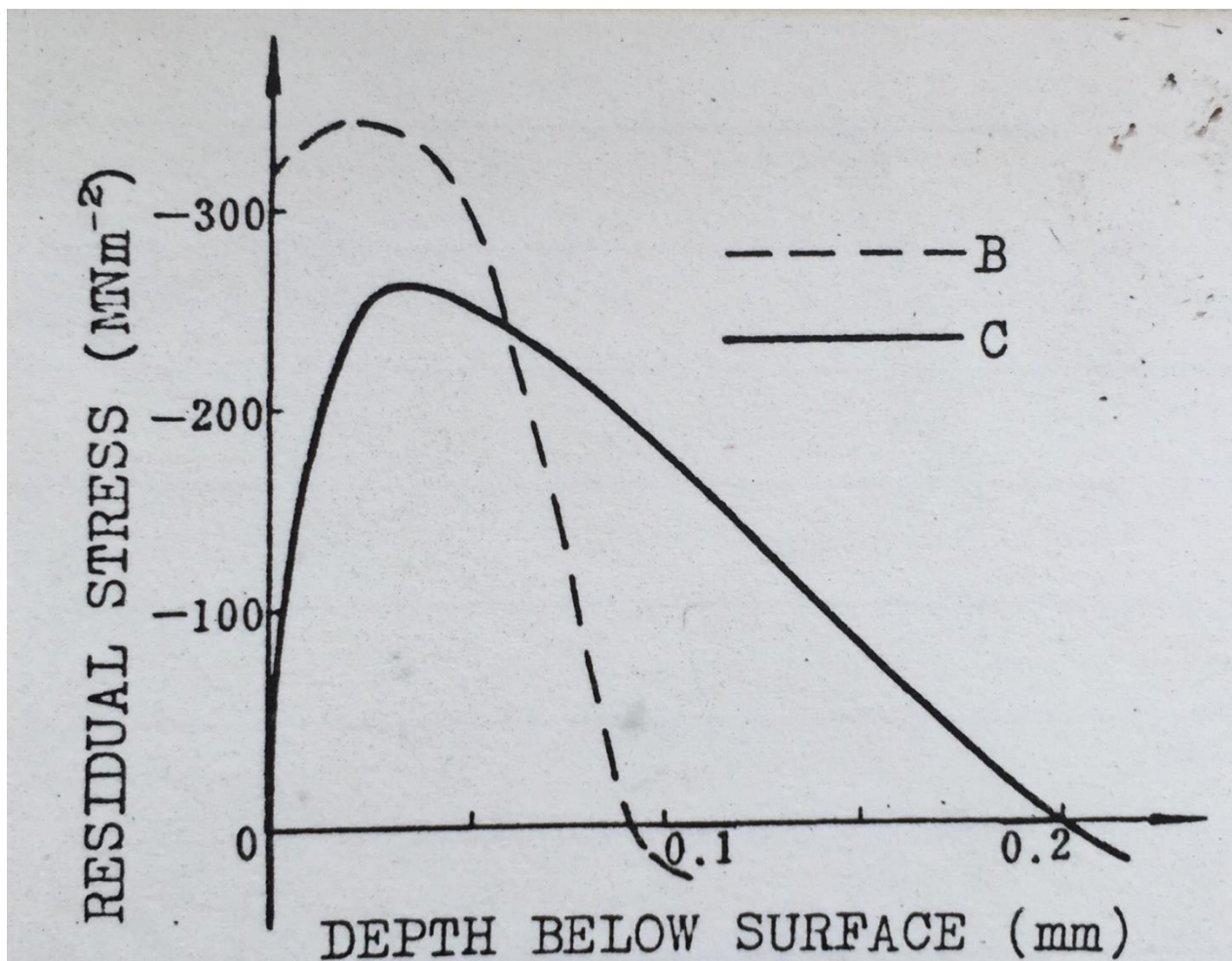
上左：A未喷丸表面源

上右：B喷丸表下源

下左：C喷丸较深表下源

残余应力

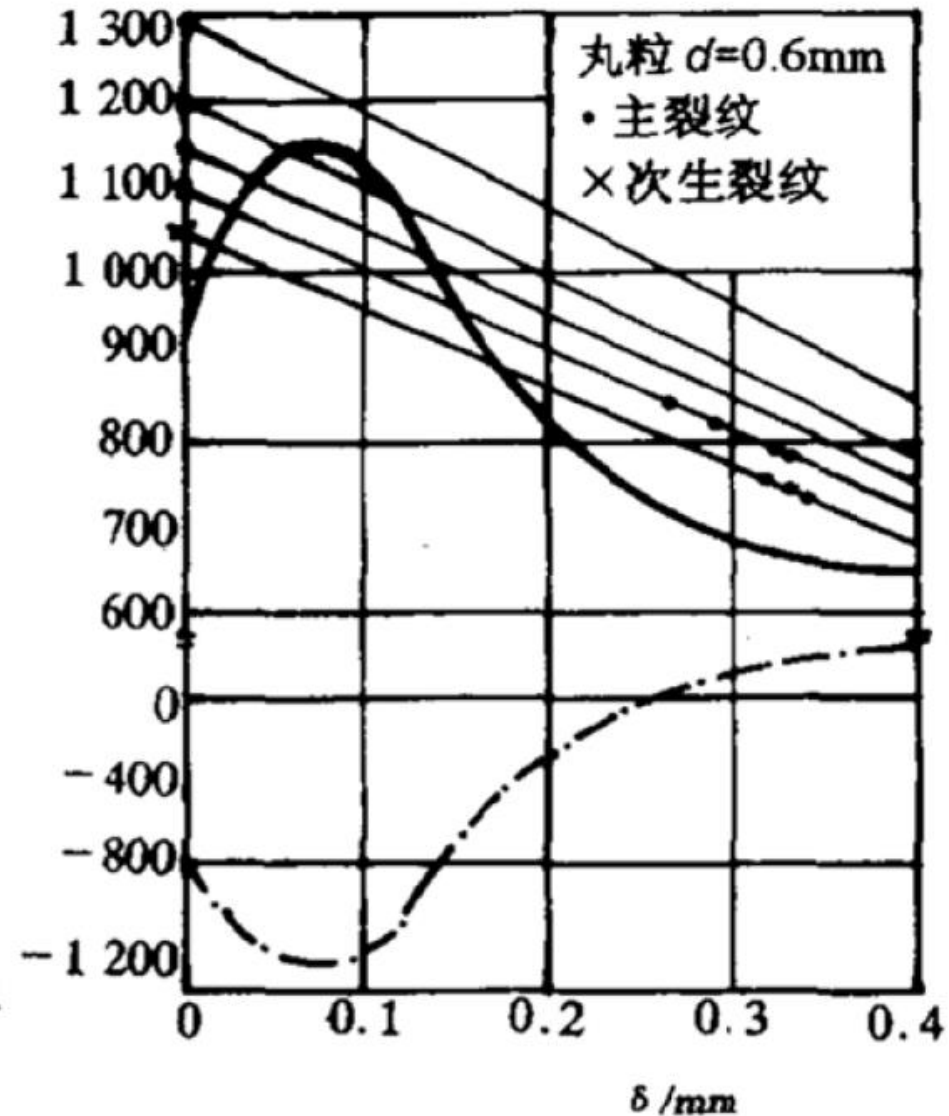
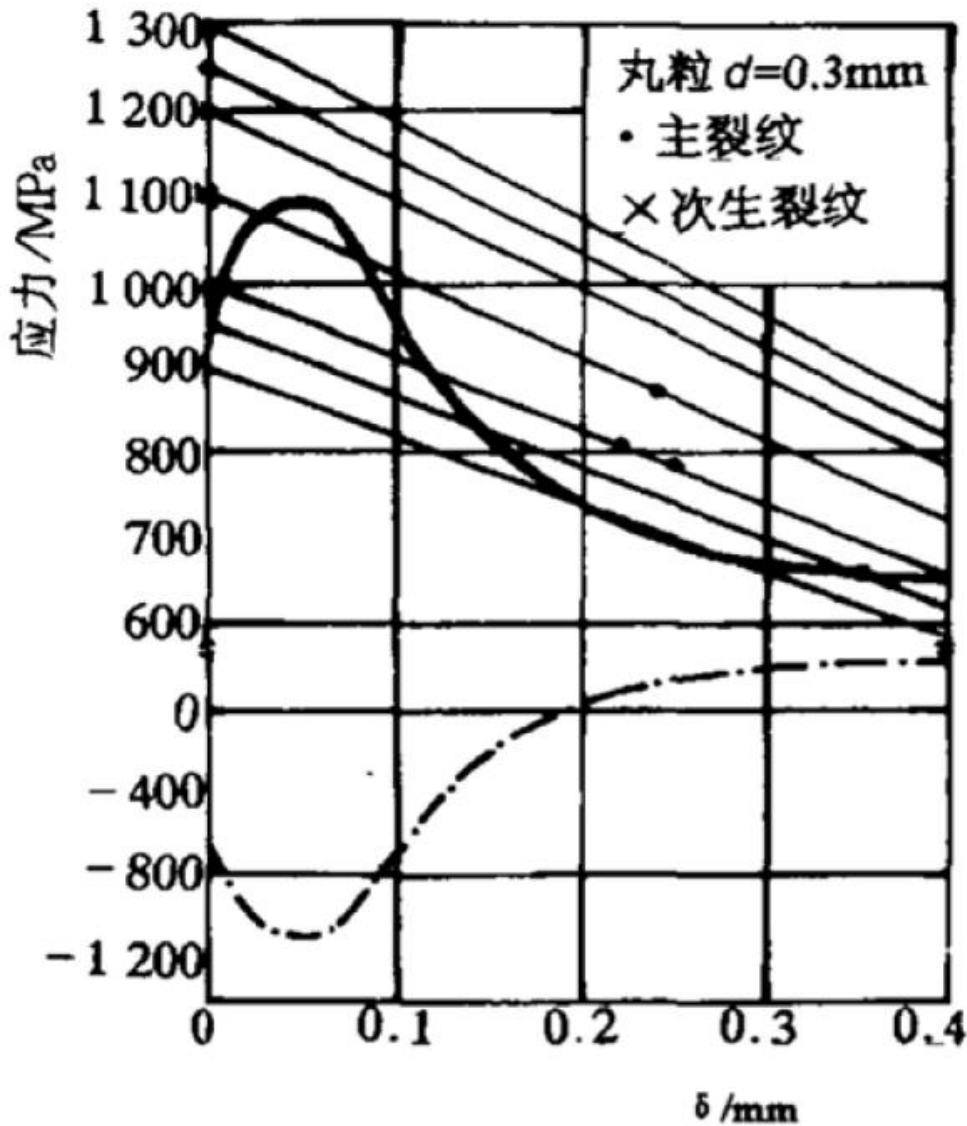
喷丸后残余应力分布曲线

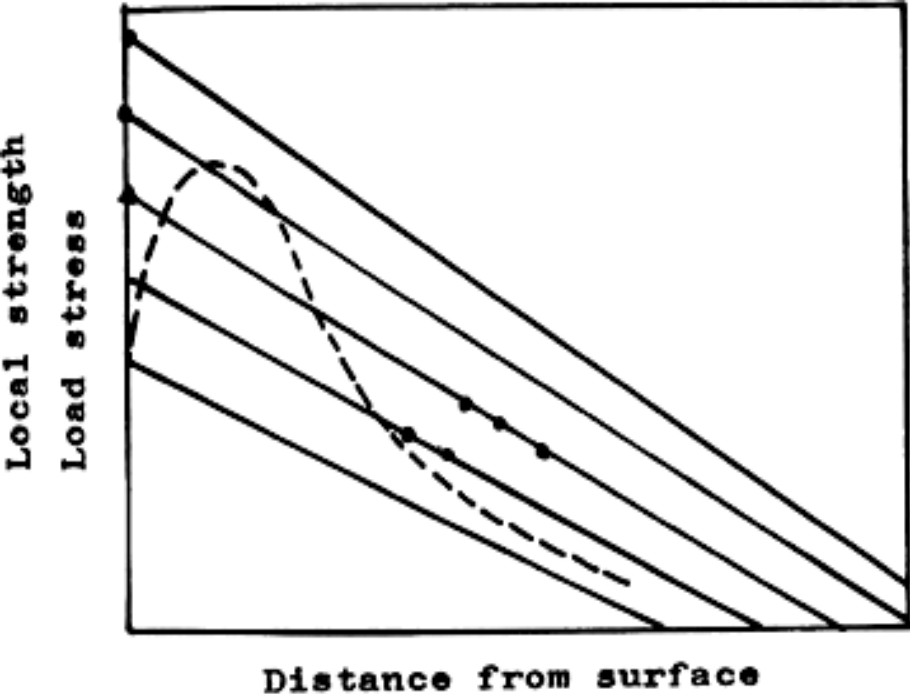


问 题-1

疲劳源怎么会
转移到
表下？

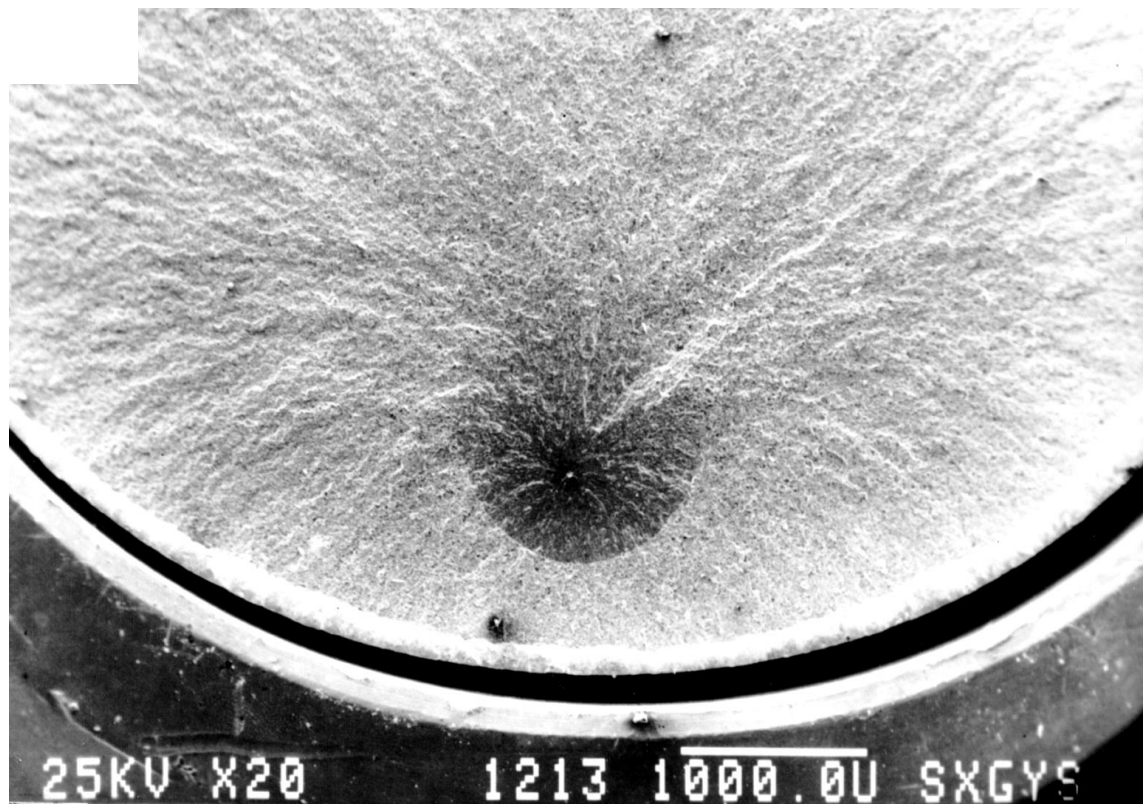
局部疲劳强度的概念





滚压后形成的鱼眼断口
疲劳源于夹杂

一定的残余压应力
(与加载应力相比)
可使疲劳源转移
至表下萌生



问 题-2

残余应力 σ_r 对
扭转疲劳 τ_{-1}
有用吗？

残余应力 σ_r 在疲劳中起平均应力 σ_m 的作用

则对切应力不起作用

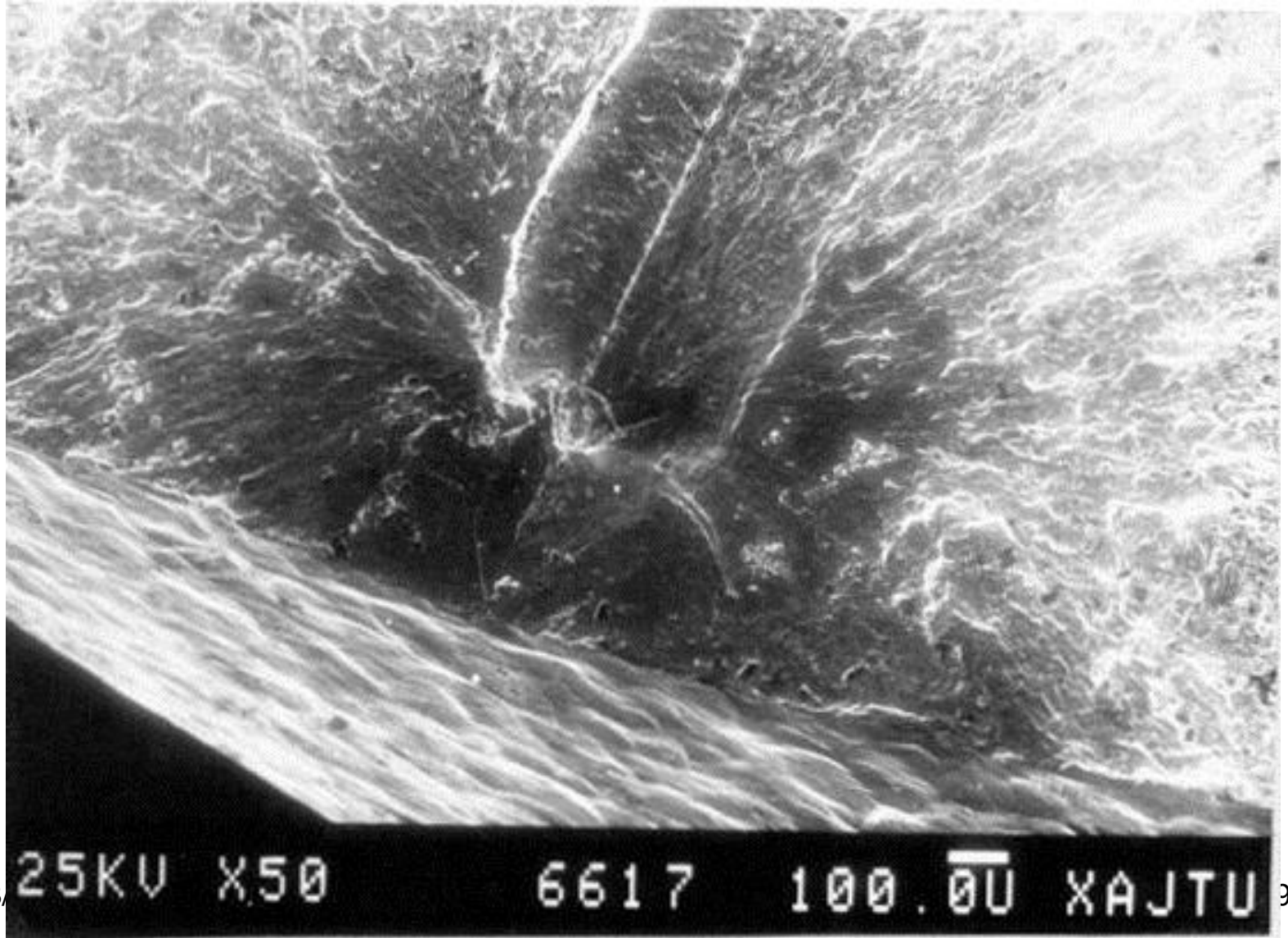
喷丸为什么会提高扭转疲劳强度，有人认为主要是硬度起作用。

扭转的断裂方式

- 1、当 $\tau_a/\tau_s < 0.7$ 时 为**正应力断裂**，断口沿 45° 开裂。
- 2、当 $\tau_a/\tau_s > 0.85$ 时 为**切应力断裂**，断口沿径向或轴向开裂。
- 3、当 τ_a/τ_s 在 $0.7-0.85$ 时 表现为正应力和切应力综合作用的断口特征。

残余应力对正应力断裂是起作用的

扭转 正断 表下源 断口



卷簧喷丸后的变化

1、表面形貌的改变

2、硬度的变化不大

组织结构对疲劳裂纹的萌生有作用

3、残余压应力使疲劳源转移至表下萌生。
表面产生的疲劳源在残余压应力的峰值处
“止裂”

裂纹萌生的位置

- 1、与工作应力的大小有关
- 2、与残余应力的分布有关

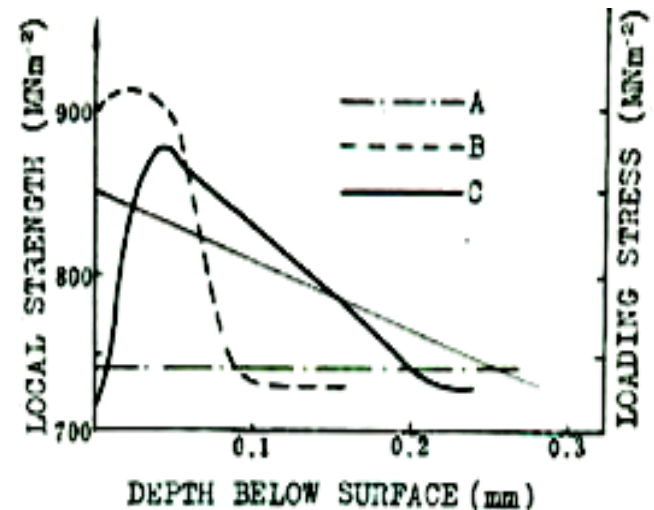
过高的残余压应力峰值有用吗？

残余压应力分布深度对裂纹萌生位置影响？

表下疲劳源提高疲劳寿命

- 1、在弯、扭应力条件时，表下的**工作应力**比表面**小**，使裂纹萌生期延长。
- 2、在真空条件下萌生裂纹，**材料抗力大**。
- 3、 裂纹扩展时，向里扩展工作应力更小，向外扩展则遇到较高的残余压应力，会减少裂纹的扩展速率。

A 未喷丸
B 喷丸
C 表面镀锌喷丸



讨论1--喷丸残余应力的作用

- 当卷簧的疲劳断裂属于**正断**时，喷丸引起的残余压应力对疲劳性能的提高起决定性作用。

材料扭转时出现正断是有条件的，即
 $\tau_a/\tau_s < 0.75$ 。

- 疲劳强度的提高与疲劳源转至**表下**有关，用局部疲劳强度的概念可预测疲劳源表下的位置。过高的残余压应力没有必要。

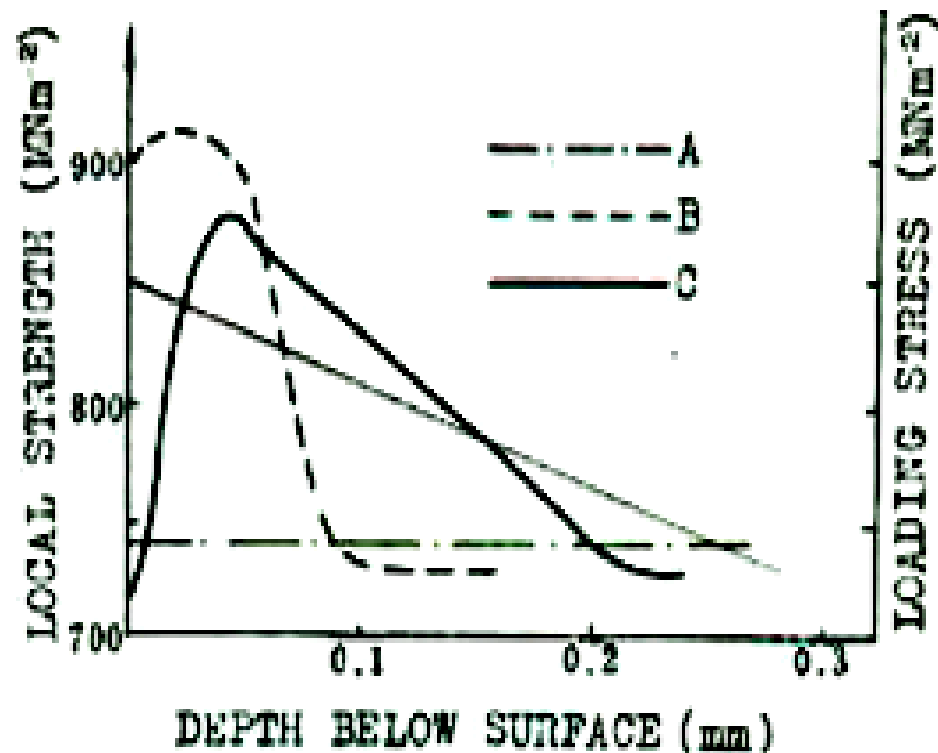
讨论2—材料强度的作用

- 喷丸后扭转疲劳性能主要是硬度提高的作用，在此（正断）**不适用**。
- 材料表面强度提高对表面疲劳裂纹萌生期Ni是有利的。
- 喷丸后表层残余应力的分布与材料强度有关也与喷丸工艺有关。
- 高的材料强度有可能使扭转疲劳产生“正断”；有可能获得高的残余压应力值。

讨论3--喷丸零件的强度能设计吗？

- 当零件的工作环境改变或性能要求更高时，用喷丸强化可增加安全性。
- 如能预测零件喷丸强化后疲劳强度提高的幅度，就有可能进入喷丸零件的强度设计。

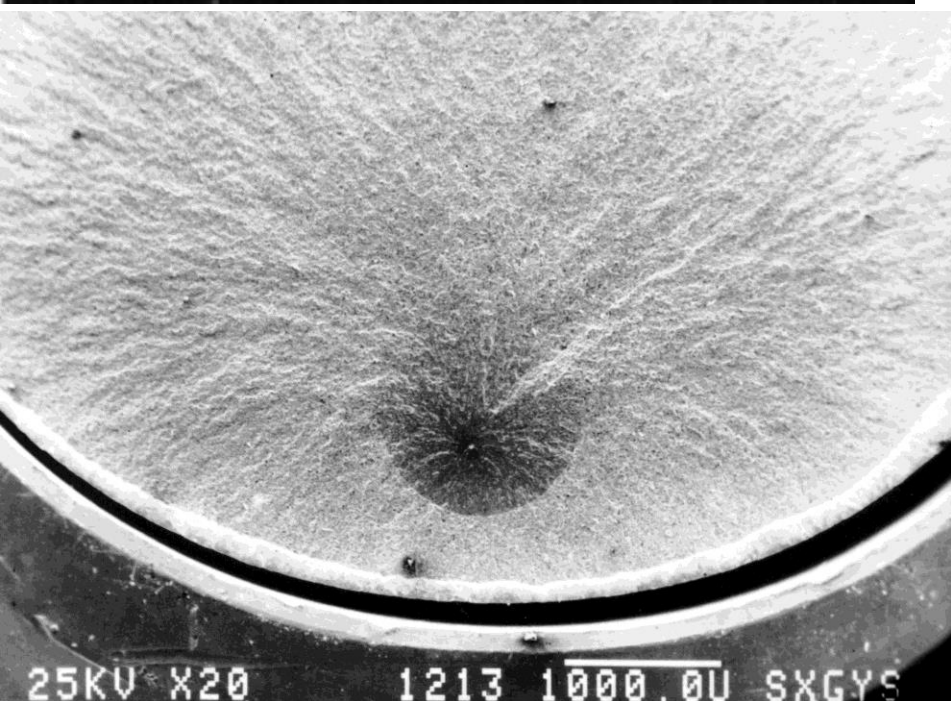
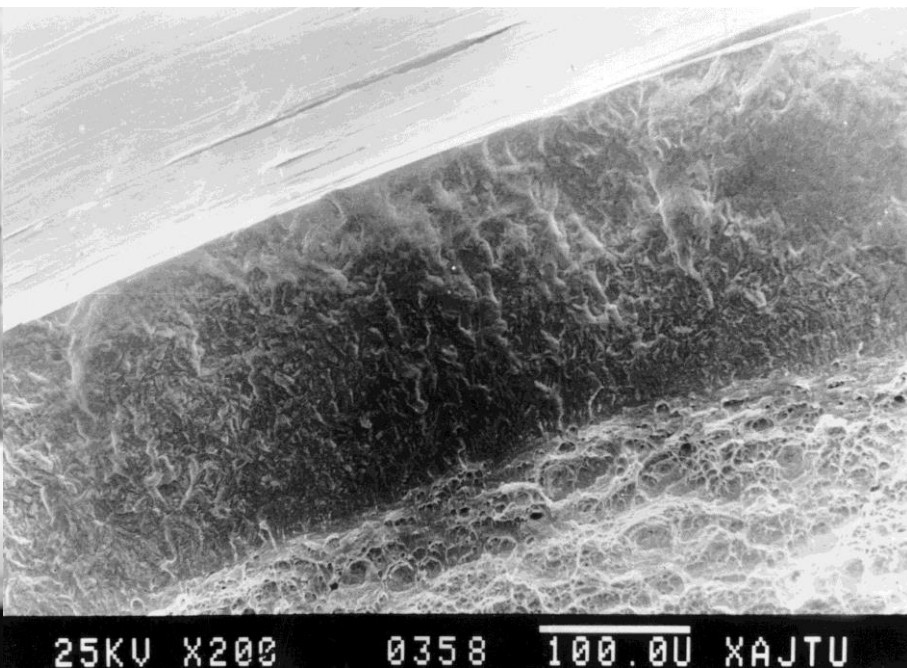
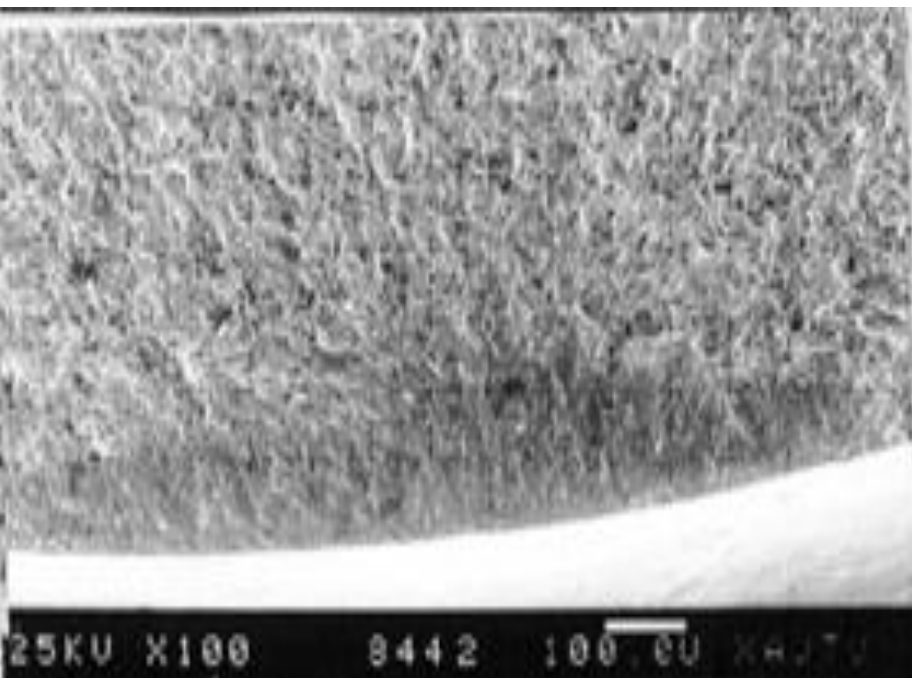
当弹簧的工作应力提高时，
能设计出要求的残余应力分布，
再设计出喷丸工艺吗？



A未喷丸 B喷丸 C表面镀锌喷丸
卷簧残余应力

残余压应力提高疲劳性能的原因

- 1、提高了疲劳裂纹扩展的闭合力,降低裂纹的扩展速率。
- 2、形成非扩展裂纹（止裂）。
- 3、使疲劳源转移至表下萌生。
- 4、缺口部位残余压应力的应力集中，强化效果尤为显著。



上右：非扩展裂纹
上左：慢速扩展区
下左：表下疲劳源

卷簧喷丸后的疲劳强度和断裂特征

西安交通大学 胡奈赛 刘炫洲 南俊马
无锡油嘴油泵研究所 姚军 金葵

兵器材料科学与工程1990年第3期

13~18页