



西安交通大学
XI'AN JIAO TONG UNIVERSITY

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 $0.5\text{-}0.7\text{mm}$, 20分，
喷丸强度 $0.3\text{-}0.4\text{A}$ ）→校正→回火
($250\text{-}260^{\circ}\text{C}$, 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）

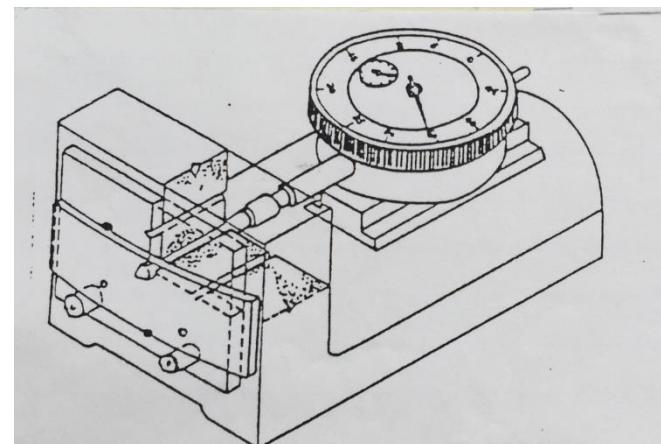
疲劳试验参数

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

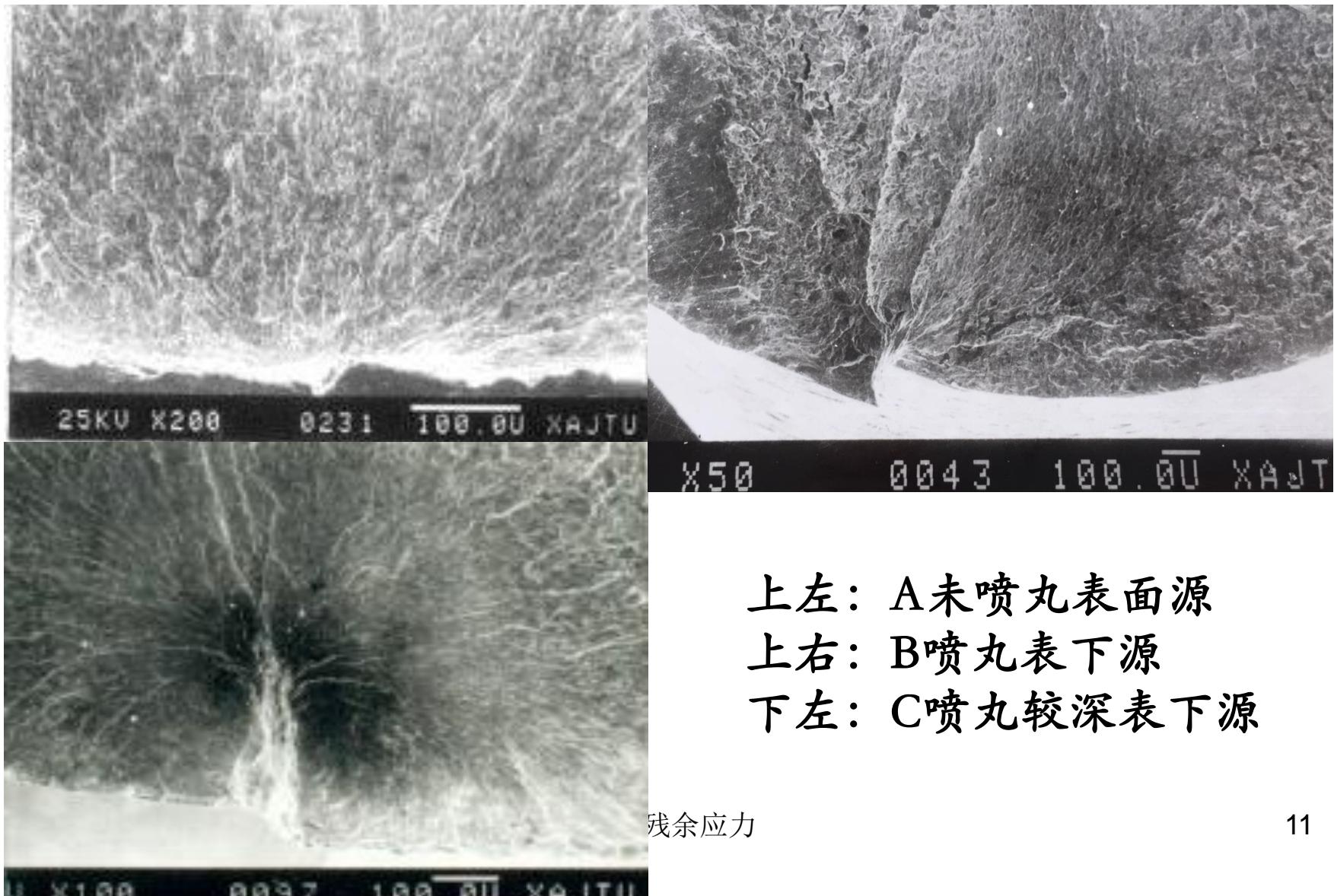
1、宏观分析

断口98%以上为正断，极少数为切断。
疲劳源起于内表面。

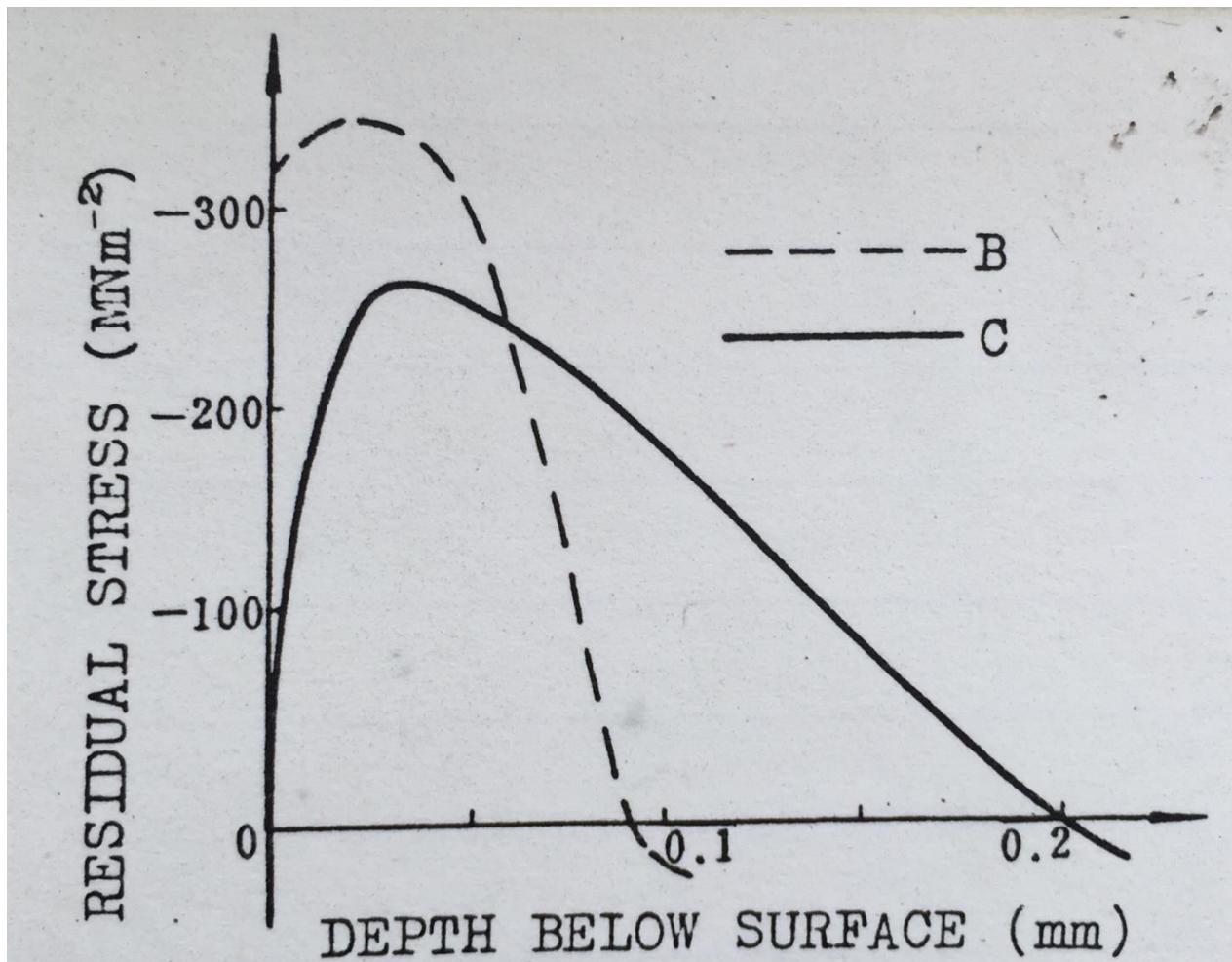
2、微观分析

均为表下源

弹簧的断口形貌



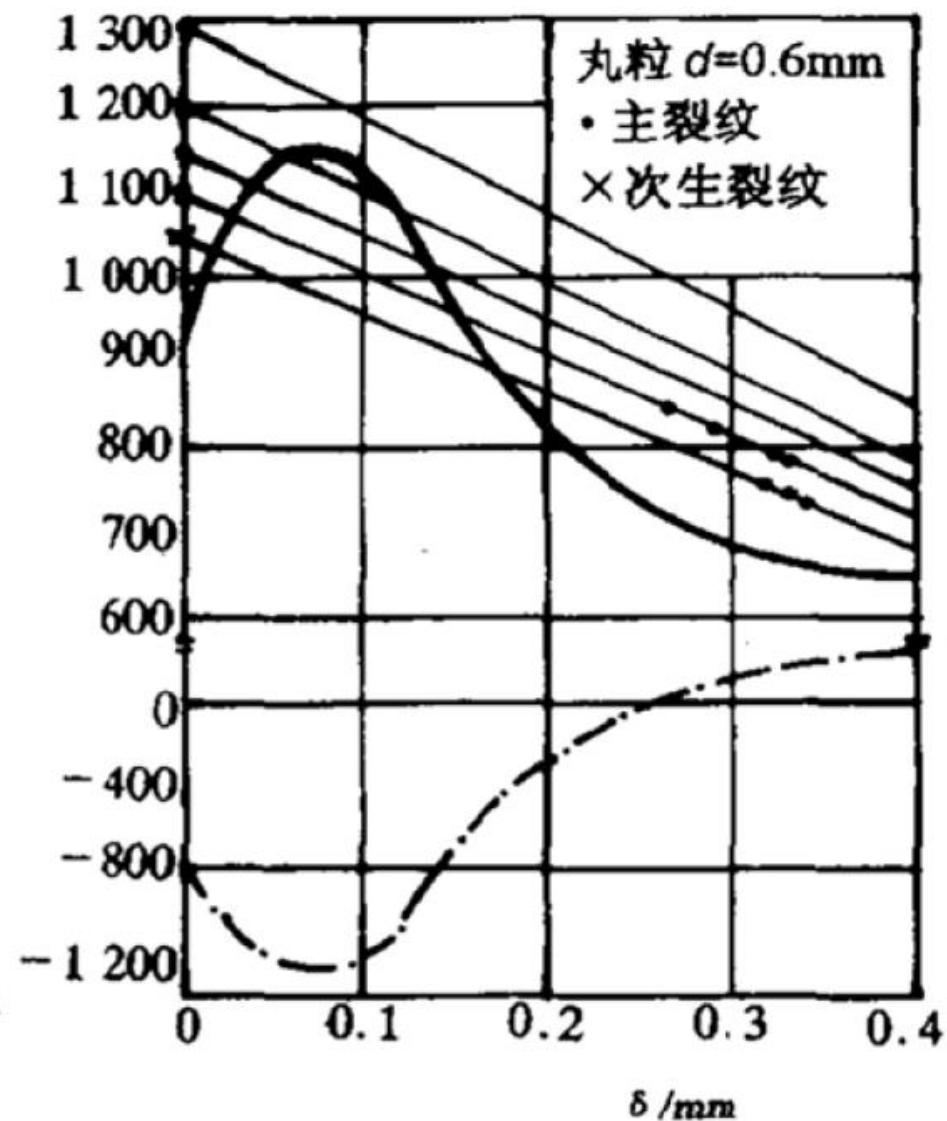
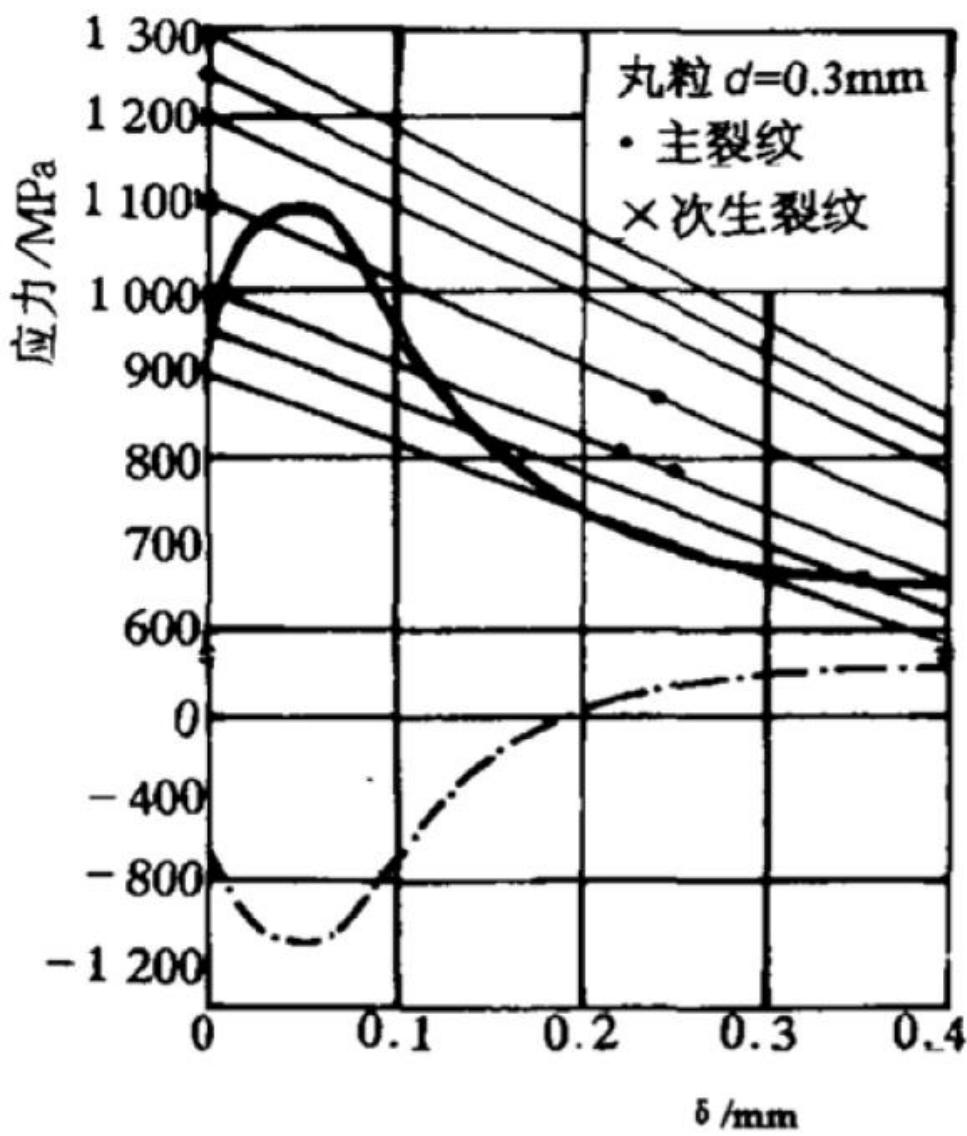
喷丸后残余应力分布曲线

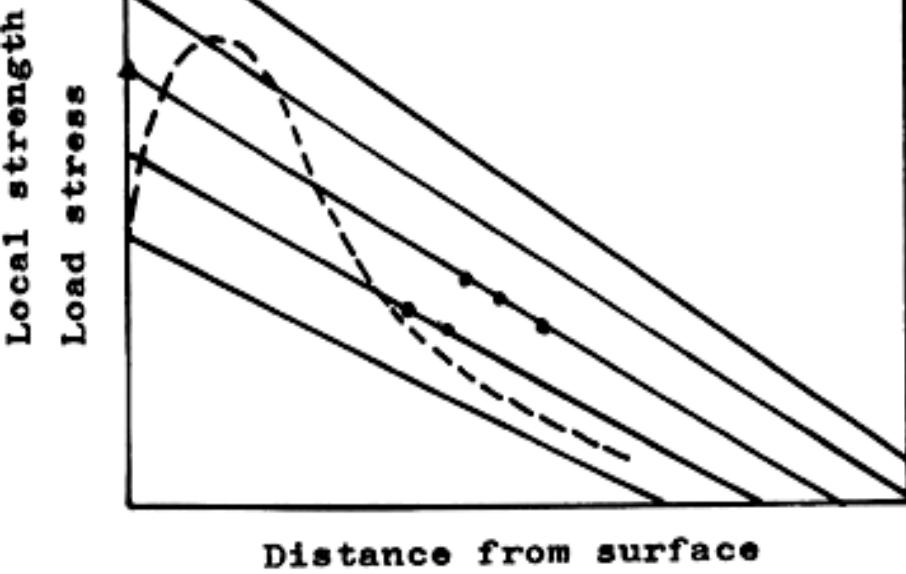


问 题-1

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

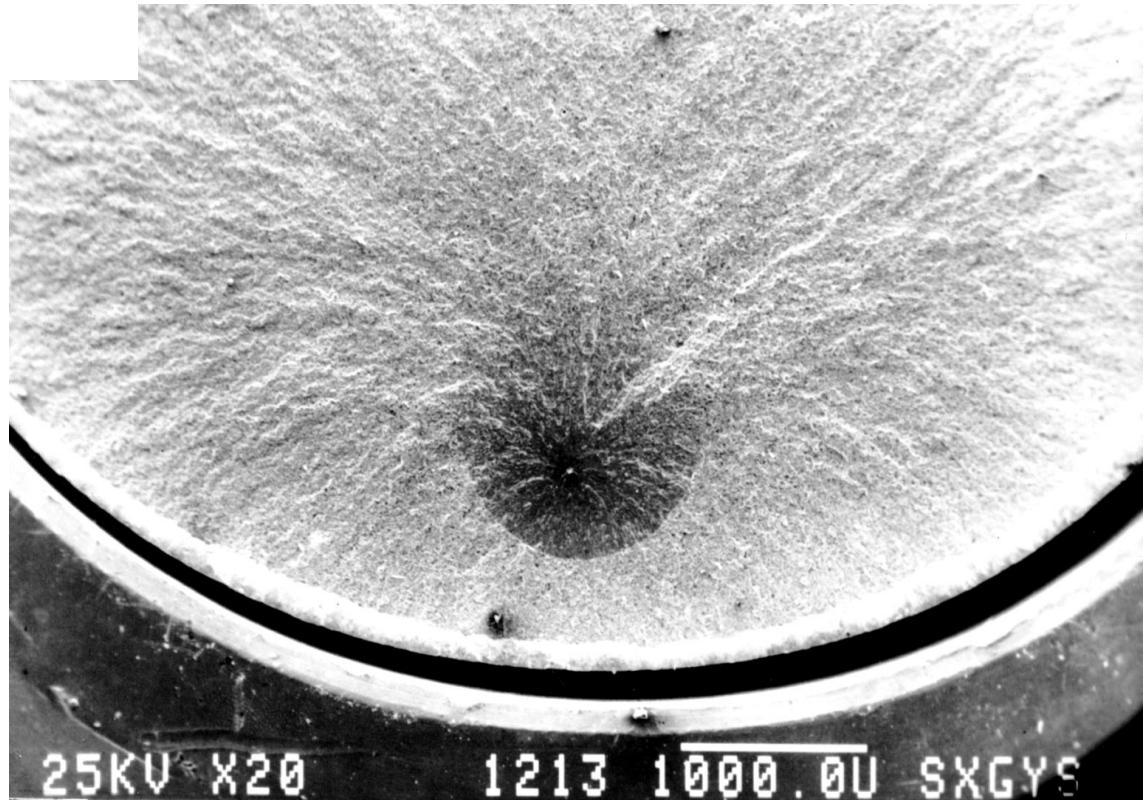
一定的残余压应力

(与加载应力相比)

可使疲劳源转移

至表下萌生

2016/8/13



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

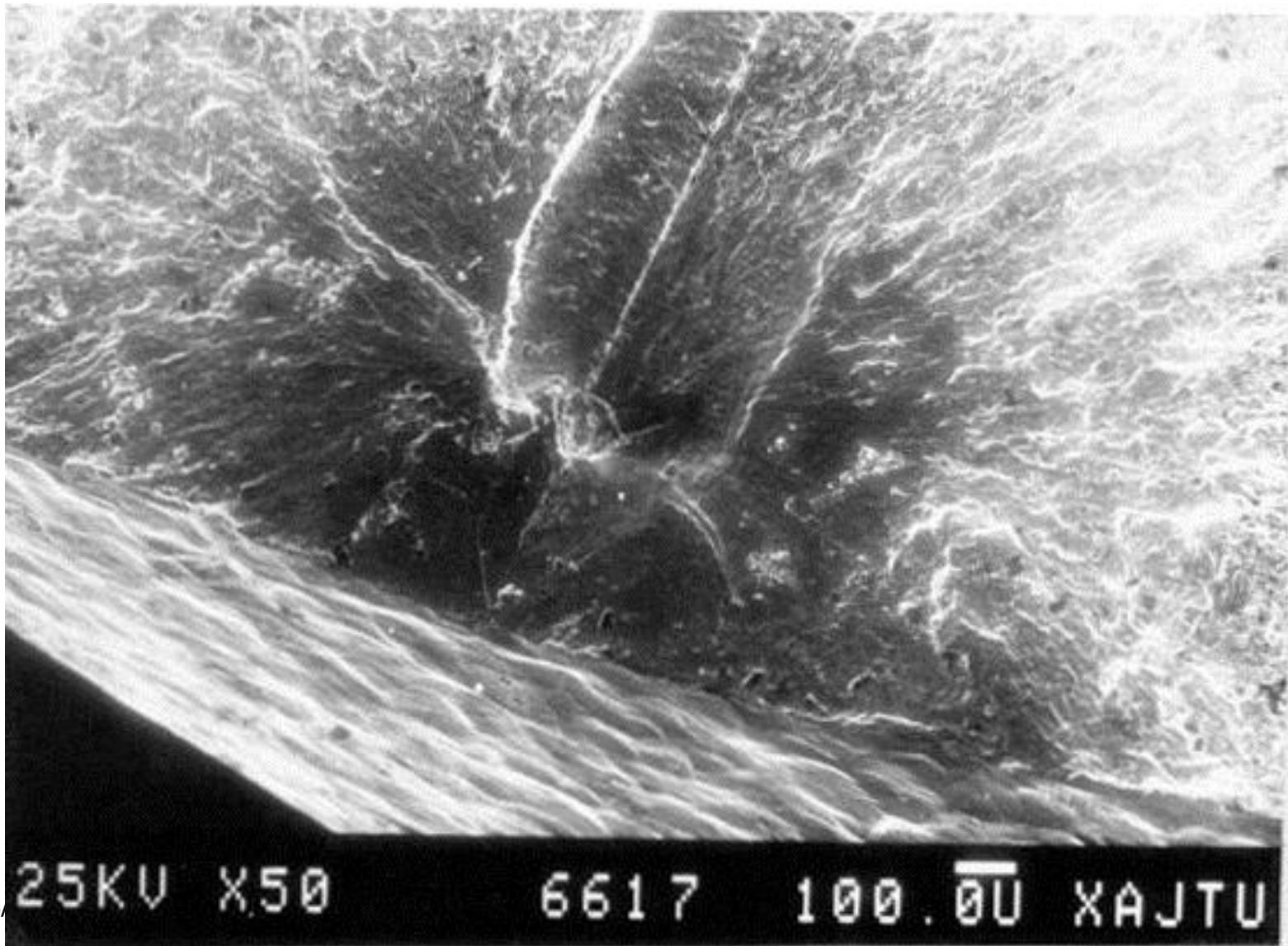
喷丸为什么会提高扭转疲劳强度，
有人认为主要是硬度起作用。

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 45^0 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 正斷 表下源 斷口



2016/8/

25KV X50

6617

100.0μ XAJTU 3

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

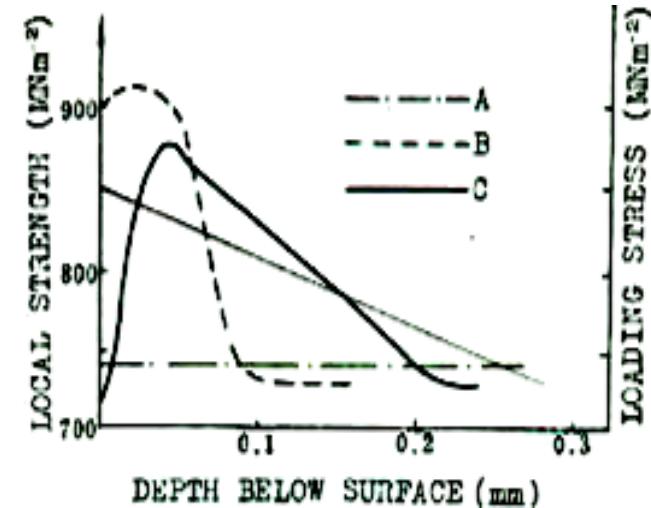
过高的残余压应力峰值有用吗？

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。

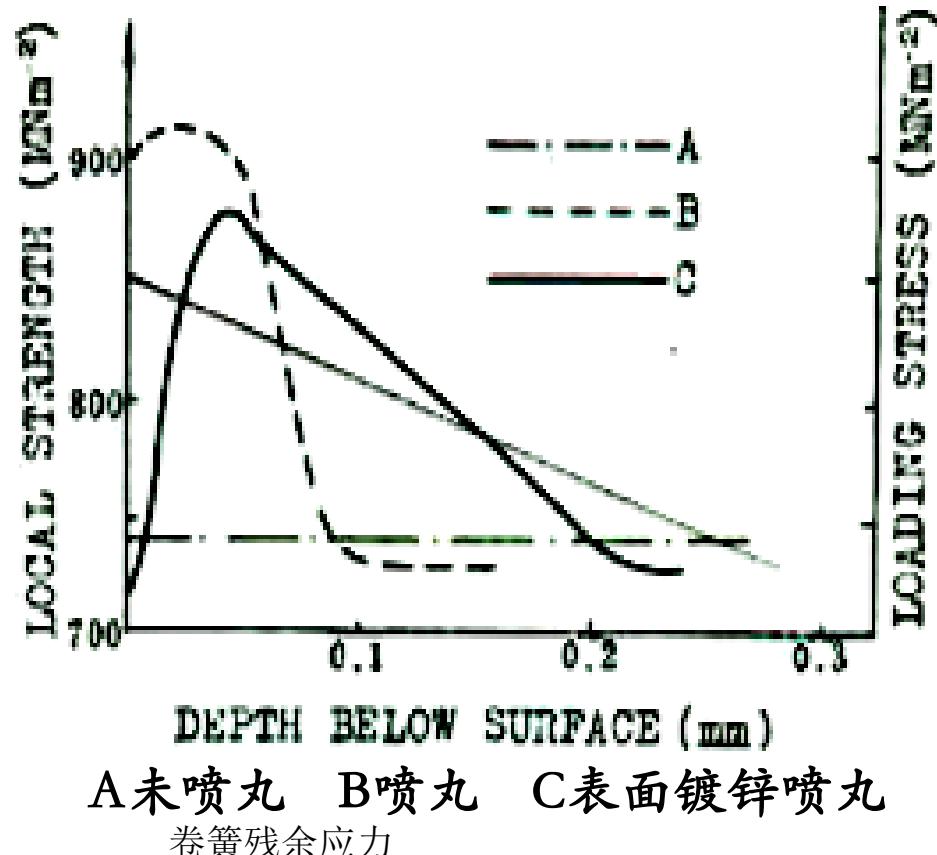
讨论2—材料强度的作用

- 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?

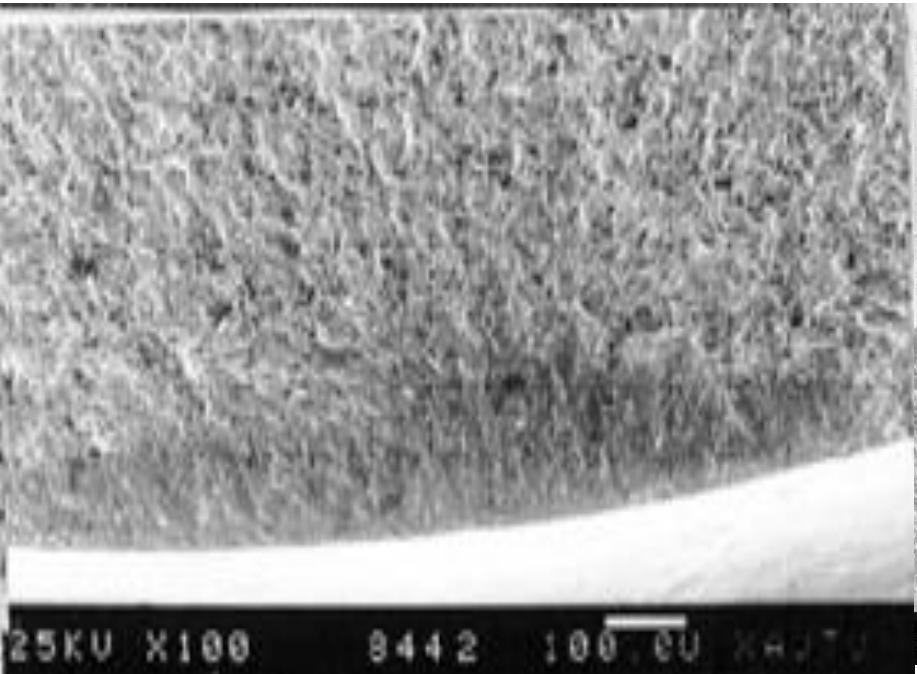
- 当零件的工作环境改变或性能要求更高时，用喷丸强化可增加安全性。
- 如能预测零件喷丸强化后疲劳强度提高的幅度，就有可能进入喷丸零件的强度设计。

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？

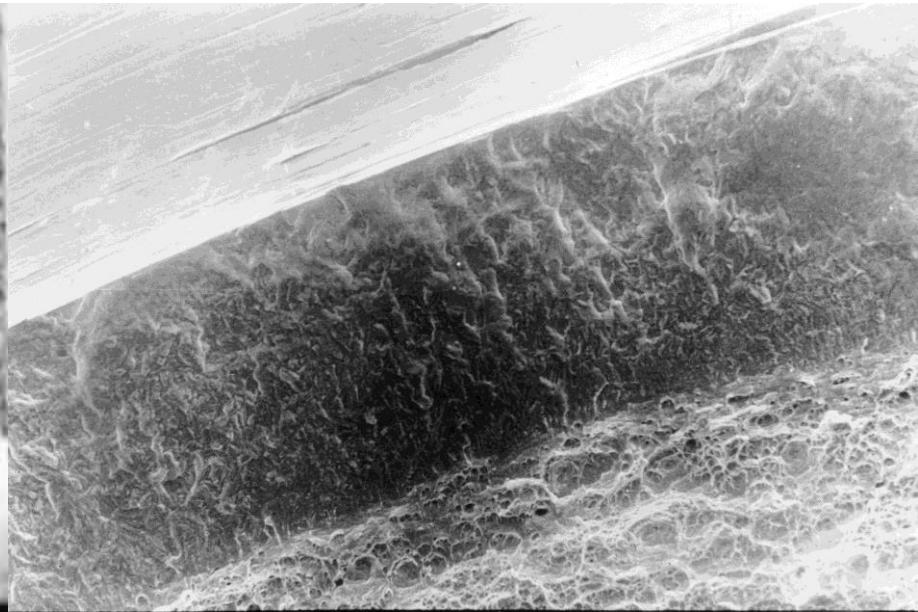


残余压应力提高疲劳性能的原因

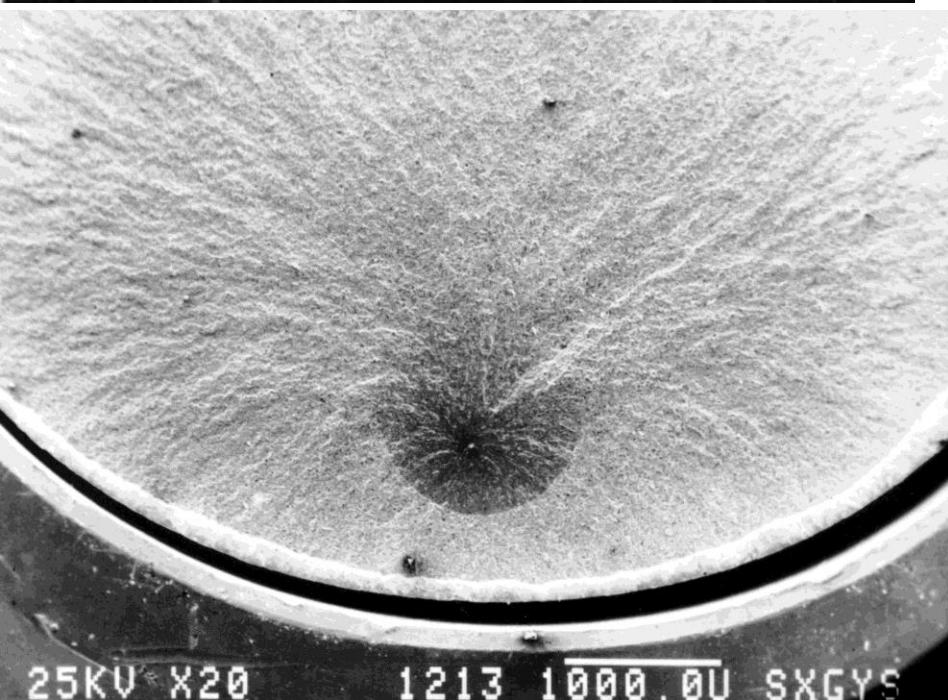
- 1、提高了疲劳裂纹扩展的闭合力,降低裂纹的扩展速率。
- 2、形成非扩展裂纹（止裂）。
- 3、使疲劳源转移至表下萌生。
- 4、缺口部位残余压应力的应力集中，强化效果尤为显著。



25KV X100 8442 100.0U XAJTU



25KV X200 0358 100.0U XAJTU



25KV X20 1213 1000.0U SXGYS

余应力

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