

弯曲疲劳时残余应力的作用 —以板簧为例

西安交通大学
胡奈赛



喷丸零件的强度—设计计算和说明

ICSP-1 主题发言

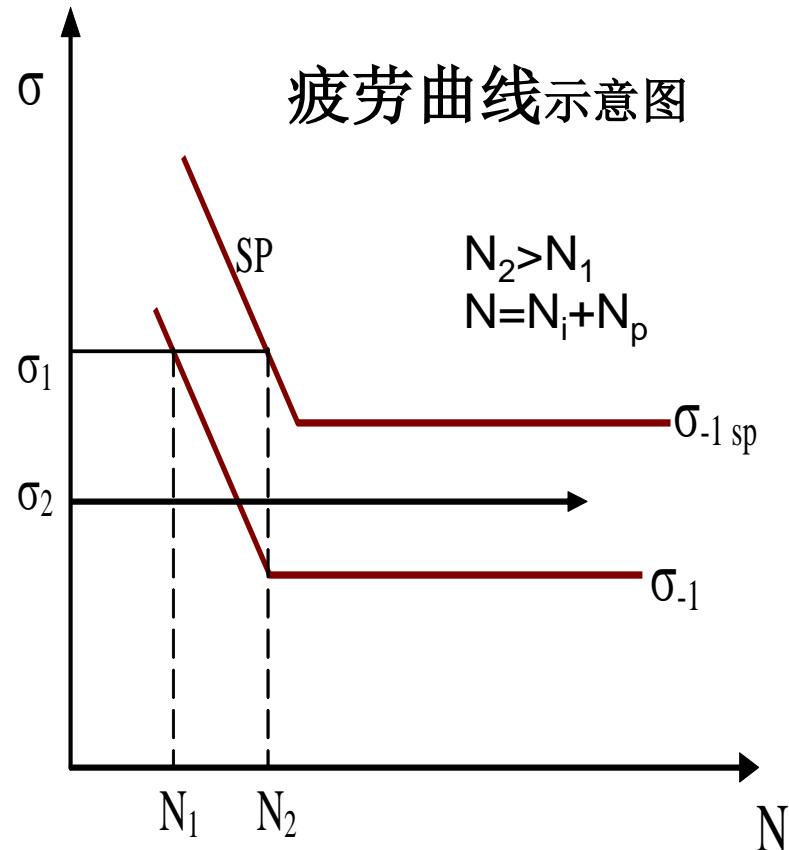
Stanford Univ. Prof.H.O.Fuchs

- 1、高周疲劳比低周疲劳有效；
- 2、高强度材料比低强度材料有效；
- 3、缺口或有裂纹倾向表面（脱碳或镀铬）比光滑表面有效得多，喷丸能克服缺口效应，缺口零件喷丸后和光滑零件的疲劳相当。

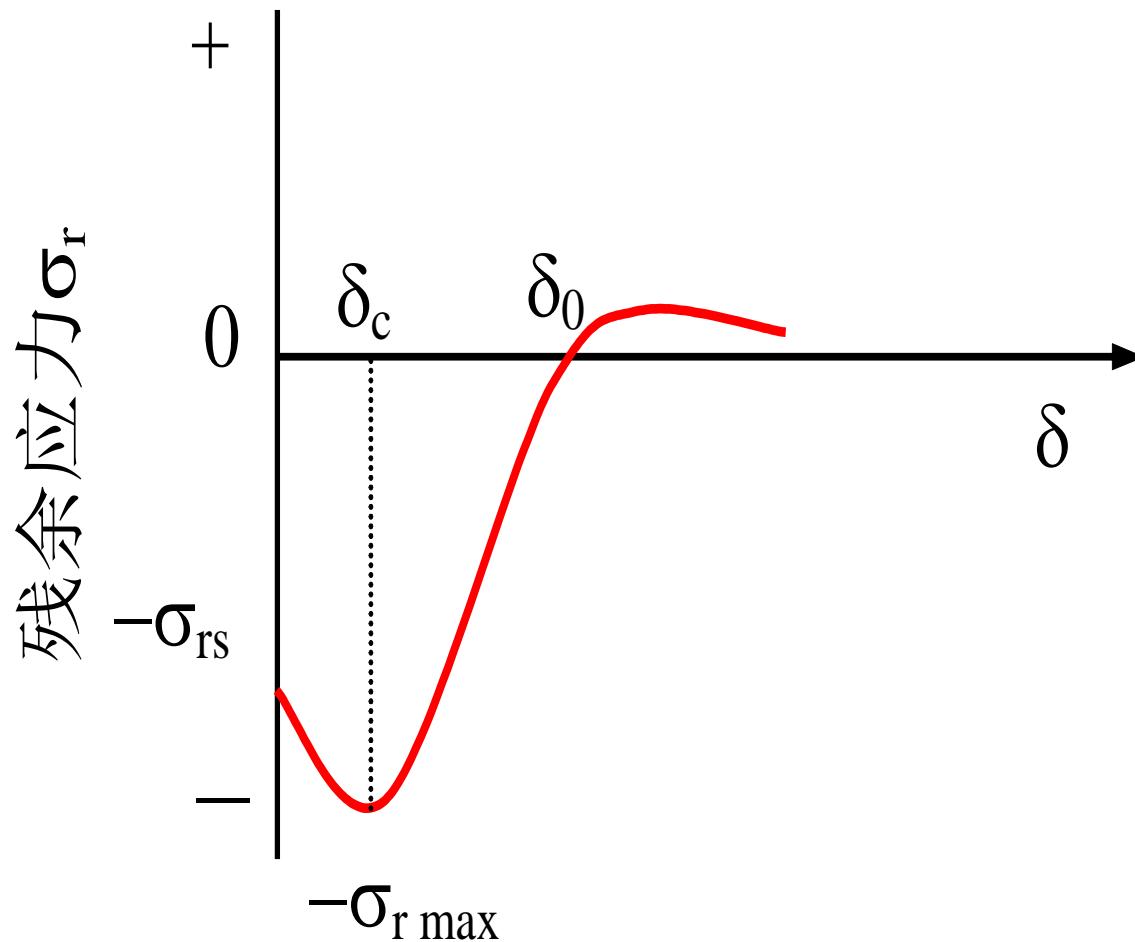
疲劳性能的评价

- 1、用零件疲劳寿命评价（工艺实用性）；
- 2、用疲劳极限、疲劳门槛值、疲劳裂纹扩展速率等指标评价（疲劳设计要求）；
- 3、喷丸在引入残余应力的同时，还有表面形貌和组织结构的变化,分离各因素单独对疲劳性能的作用（材料科学的研究的要求）。

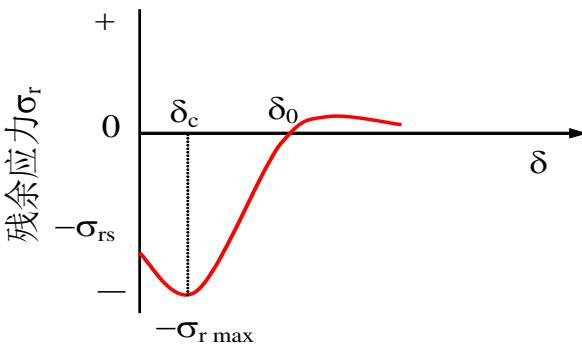
- 1、P-S-N曲线（P为概率、存活率）。
- 2、钢铁材料 $>10^7$ 周次会出现平台。
- 3、有色金属或腐蚀疲劳等不出现平台。
- 4、裂纹的萌生期 N_i 的定义，与检测裂纹长度的手段有关。



喷丸残余应力分布曲线



残余应力与外加应力 的不同



1. 残余应力是平衡力，有一分布值。表层为残余压应力，心部则为拉应力。
2. 残余应力是弹性应力，其值小于屈服强度。
3. 残余应力在温度和交变应力作用下会发生松弛。
4. 残余应力具有多轴性(表面强化后为双轴应力)。

汽车板簧

材料：55SiMnVB

单面双槽热轧型钢

中频感应加热

$\text{HB} \geq 410$

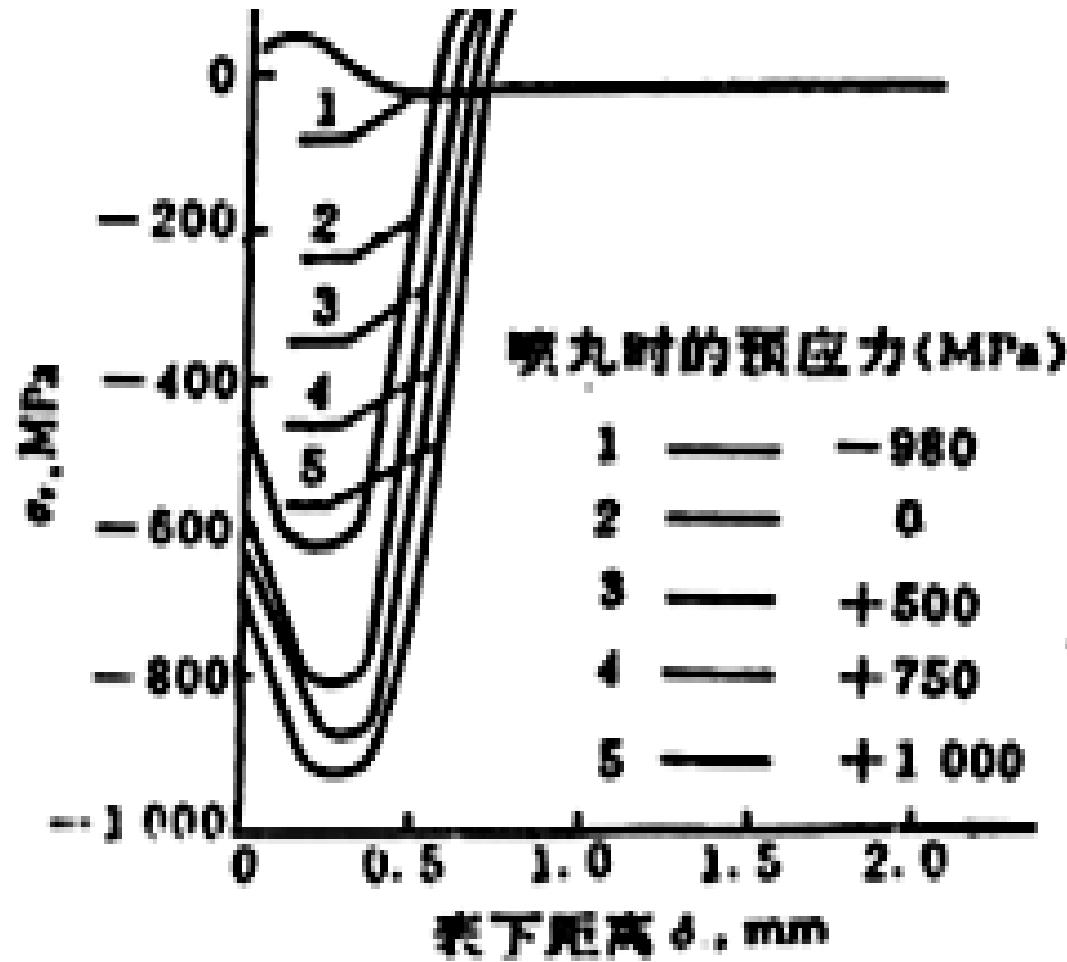
$s_s = 1300 \text{ MPa}$ $s_b = 1450 \text{ MPa}$

脱C层深度 0.13~0.16mm

喷丸强度 0.18~0.20 C

研究工作和二汽合作完成

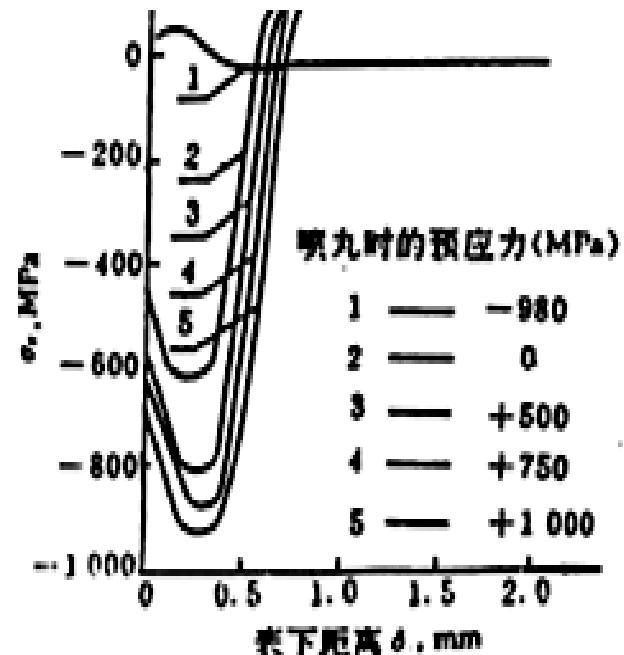
应力喷丸后残余应力分布



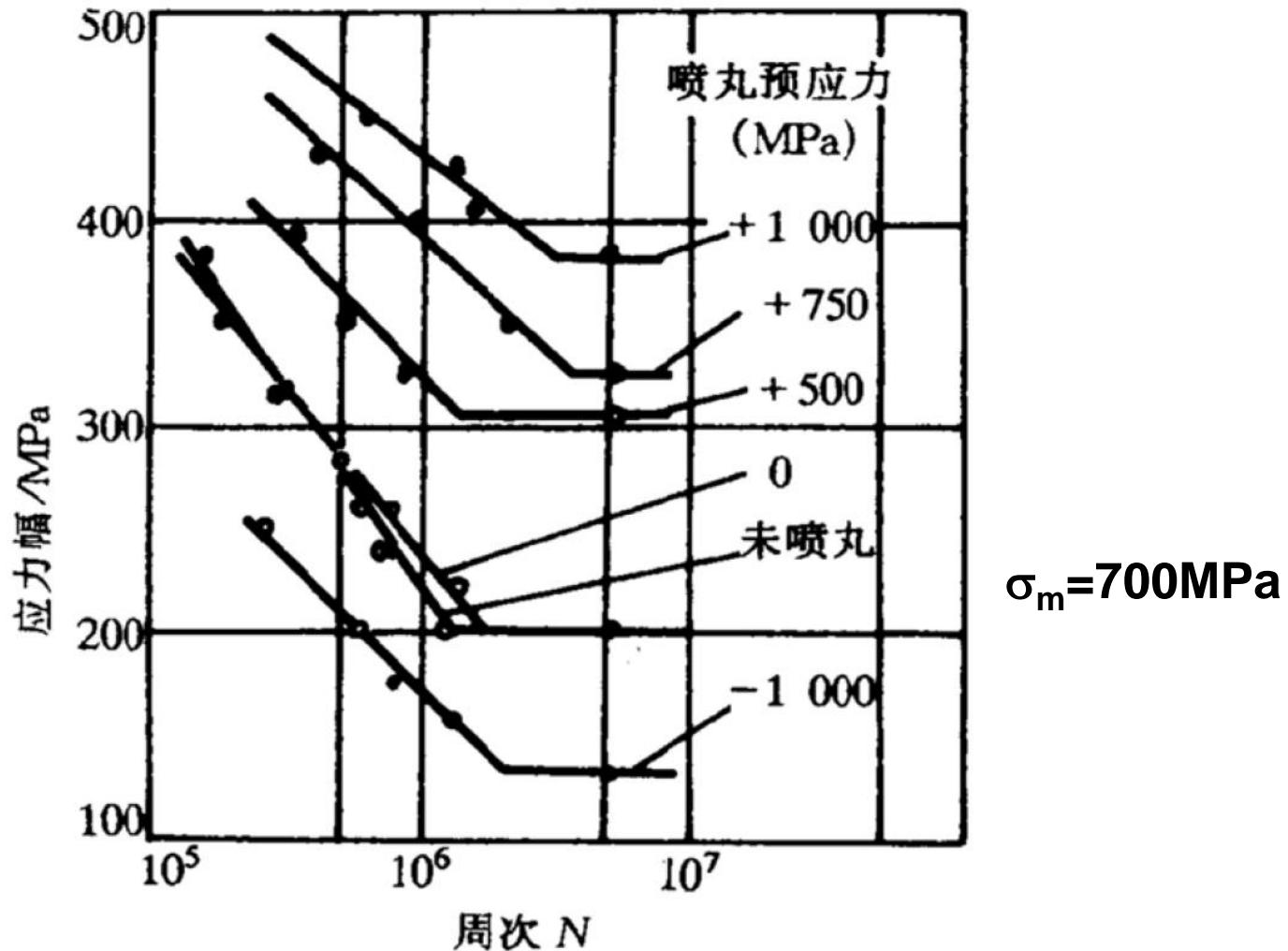
残余应力分布曲线分析

- 1、负应力喷丸时 $\sigma_r \rightarrow 0$ (与未喷丸同)。
- 2、当预应力增加

$|-\sigma_{rs}|$ 和 $|-\sigma_{rmax}|$ 增加。
 $-\sigma_{rmax}$ (峰值) 位置向内移。
残余应力总层深增加。



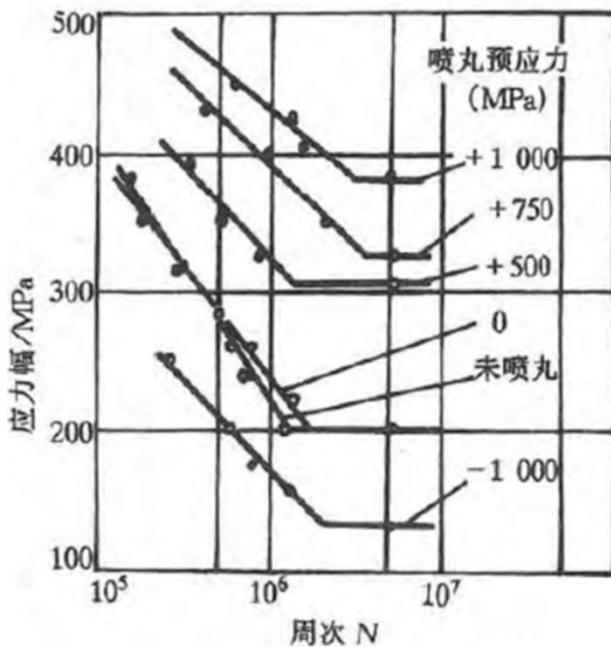
板簧应力喷丸后的疲劳曲线



疲劳曲线分析

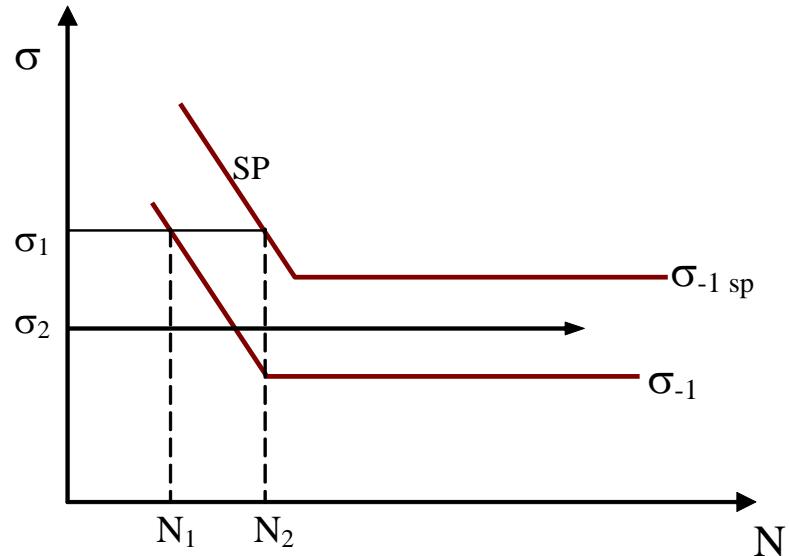
- 1、以零应力喷丸为基准
- 2、负应力喷丸 $\sigma_r \rightarrow 0$, 疲劳性能下降, 表明形貌和组织起负作用。
- 3、预应力增加, 疲劳性能提高, 是残余压应力值加大的作用 (形貌和组织相同)。
- 4、零应力喷丸和不喷丸的疲劳性能相同。

结论: 脱C板簧必须用应力喷丸才有效

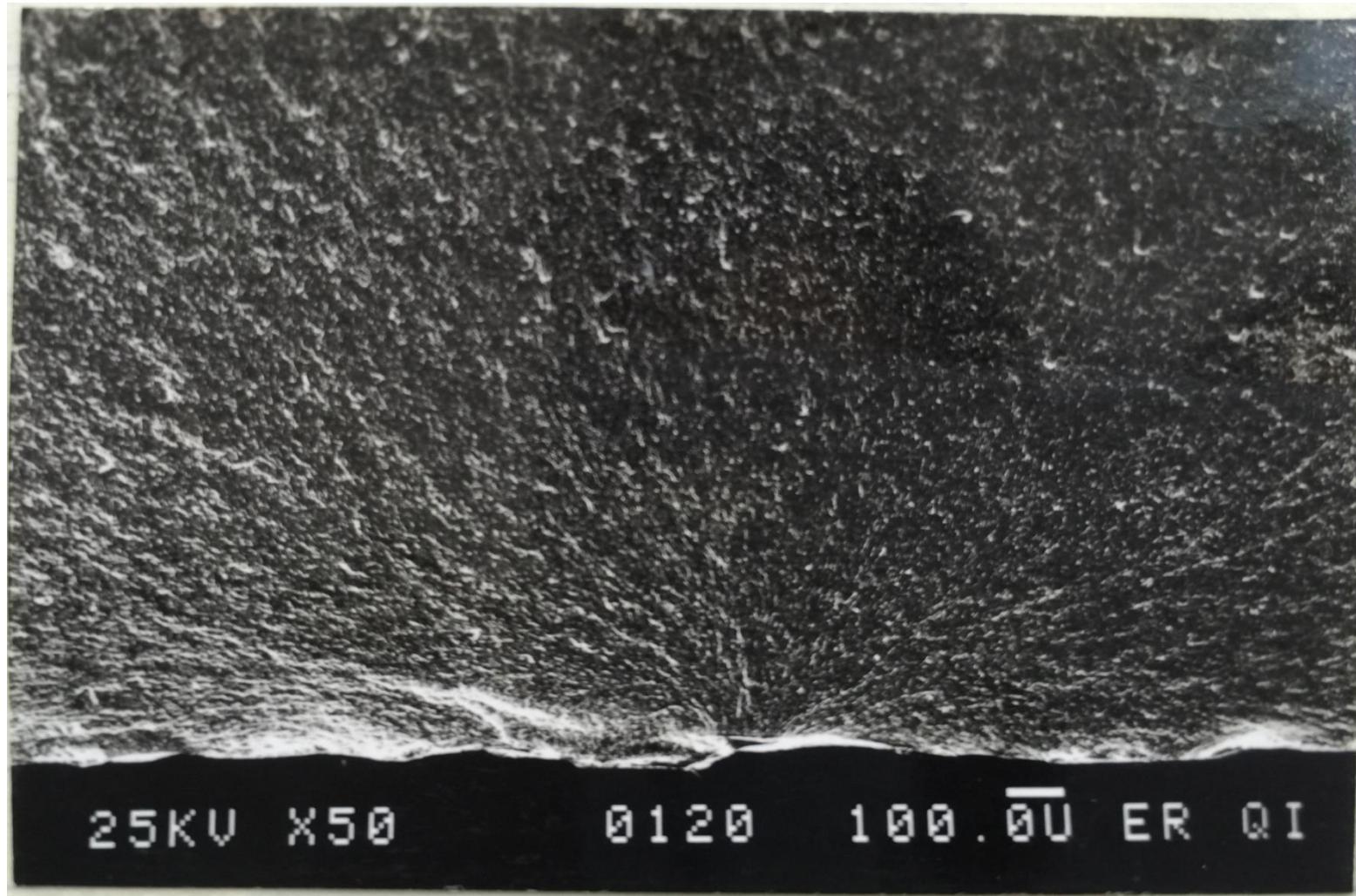


零应力喷丸和不喷丸 疲劳性能相同 疲劳断裂过程相同吗？

$$N = N_i + N_p$$



疲劳断口-1 (未喷丸、负应力喷丸)

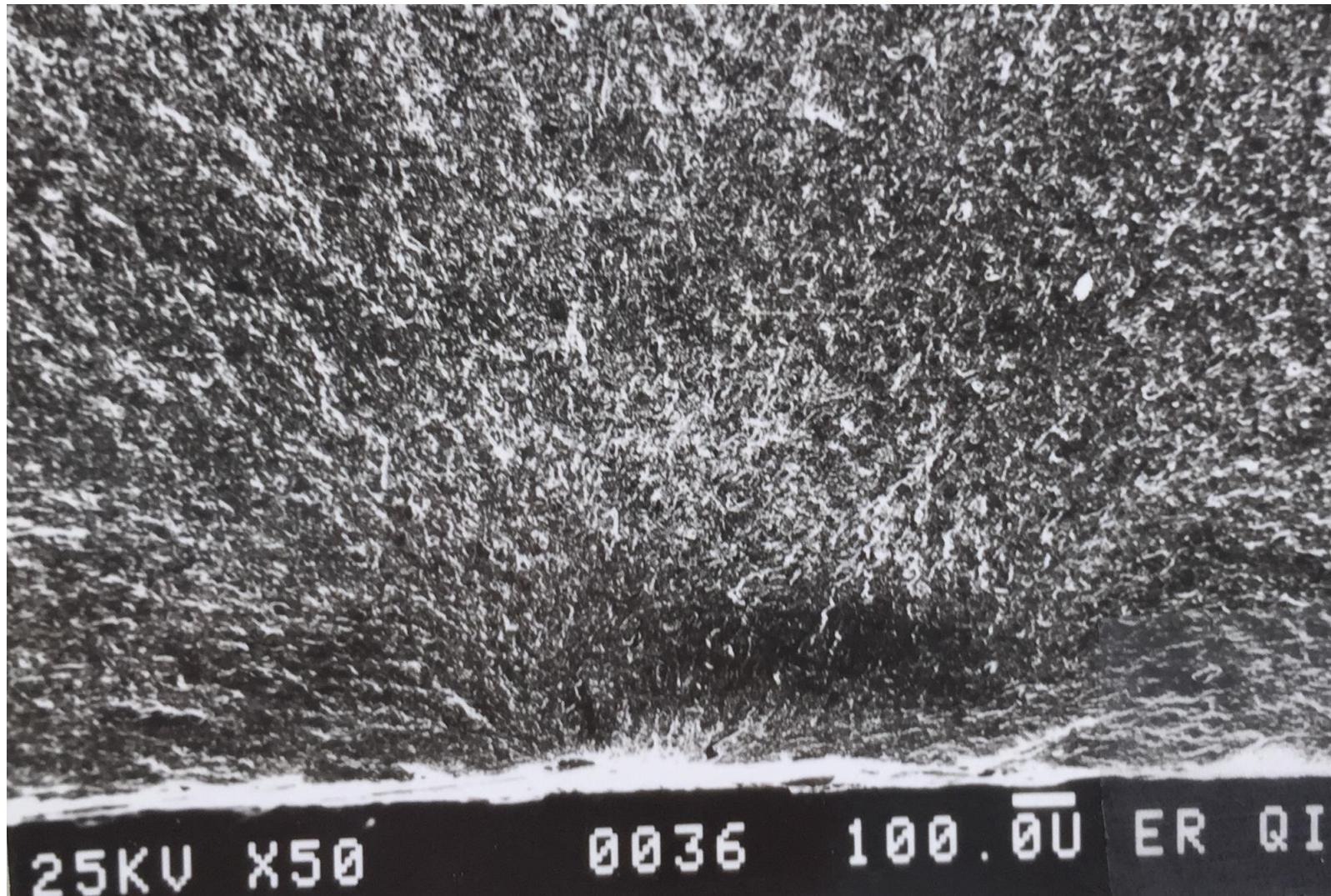


2016/8/13

板簧

13

疲劳断口-2 (喷丸、应力喷丸)

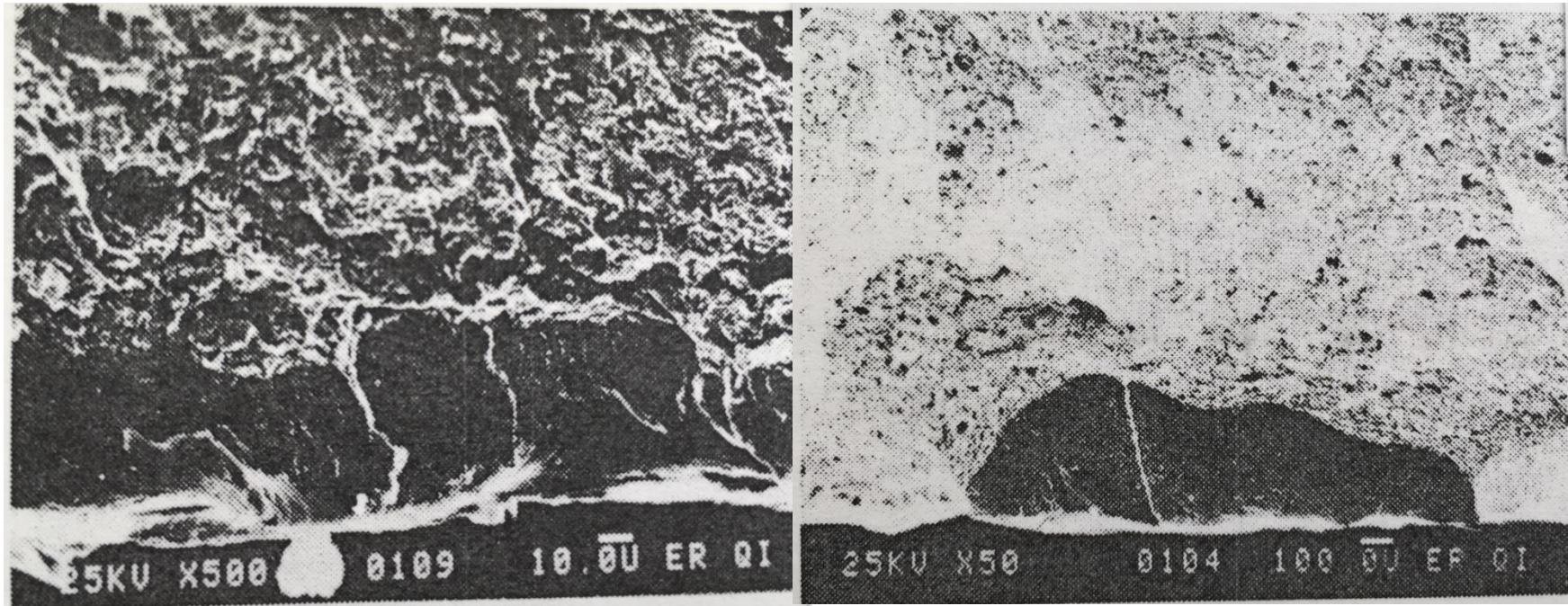


25KV X50

0036 100.0U ER QI

断口上的暗斑区

- 1、脱C板簧疲劳源均在表面。
- 2、有残余压应力存在时，扫描电镜二次电子成像的断口上出现暗斑区（和残余压应力的层深相关）。表面疲劳裂纹扩展速率 da/dN 减小。

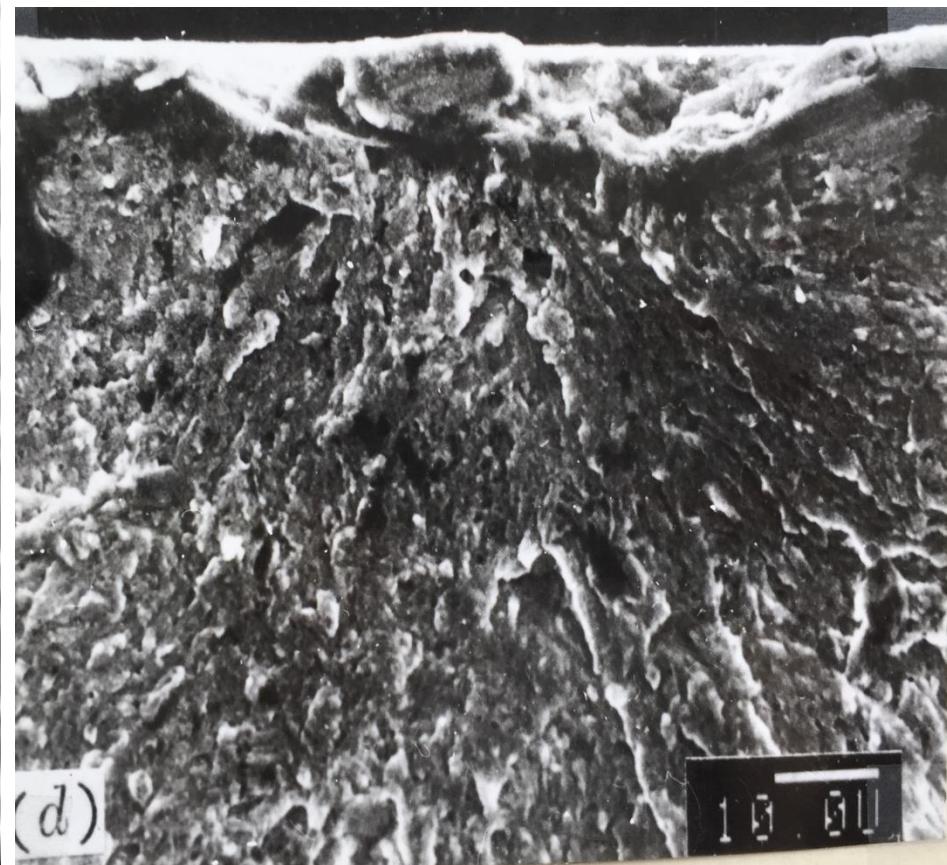
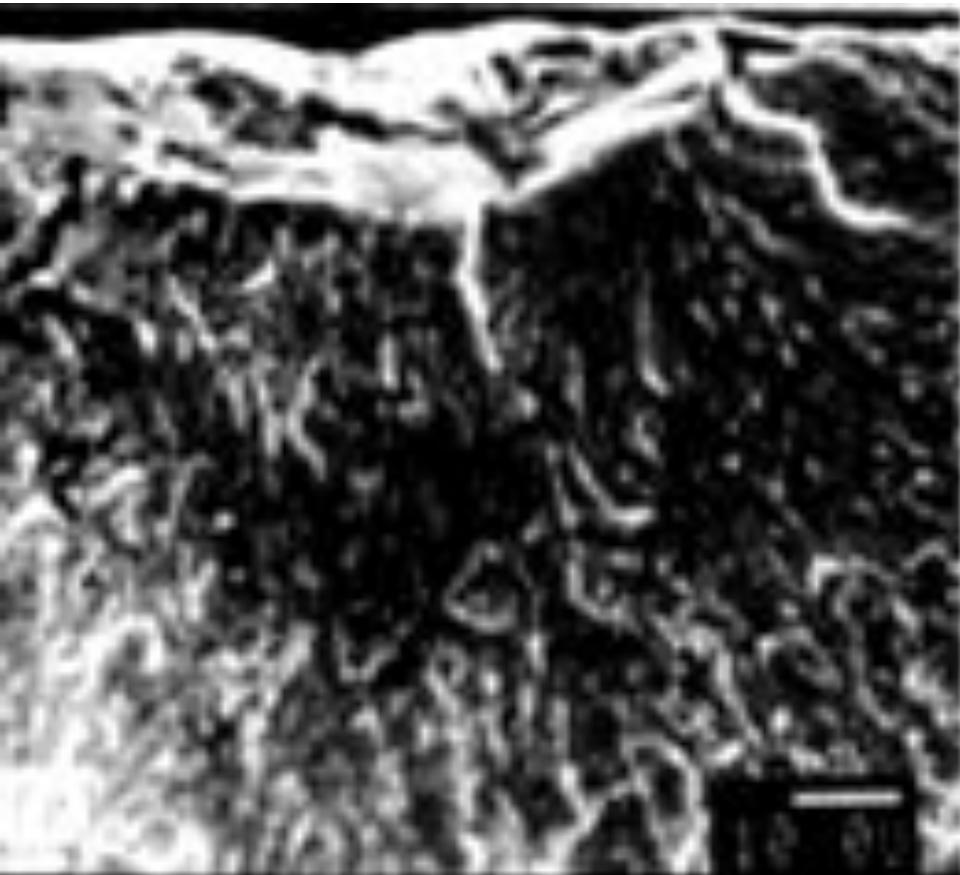


- 预应力 750 MPa 喷丸, $700 \pm 330\text{ MPa}$ 疲劳试验, 断裂寿命 $N_f = 9 \times 10^5$ 。
- 在 $N_i = 3.1 \times 10^4$ 时, 发现 0.05 mm 微裂纹. 以此作为裂纹萌生期 $N_i = 3\%N_f$ (照片号 0109)。
- 在 $N_2 = 8.2 \times 10^5$ 时, 最深裂纹有 0.45 mm , 已达总寿命的 90% (照片号 0104)。

喷丸后 $N_i \downarrow$ ，残余压应力使 $N_p \uparrow$

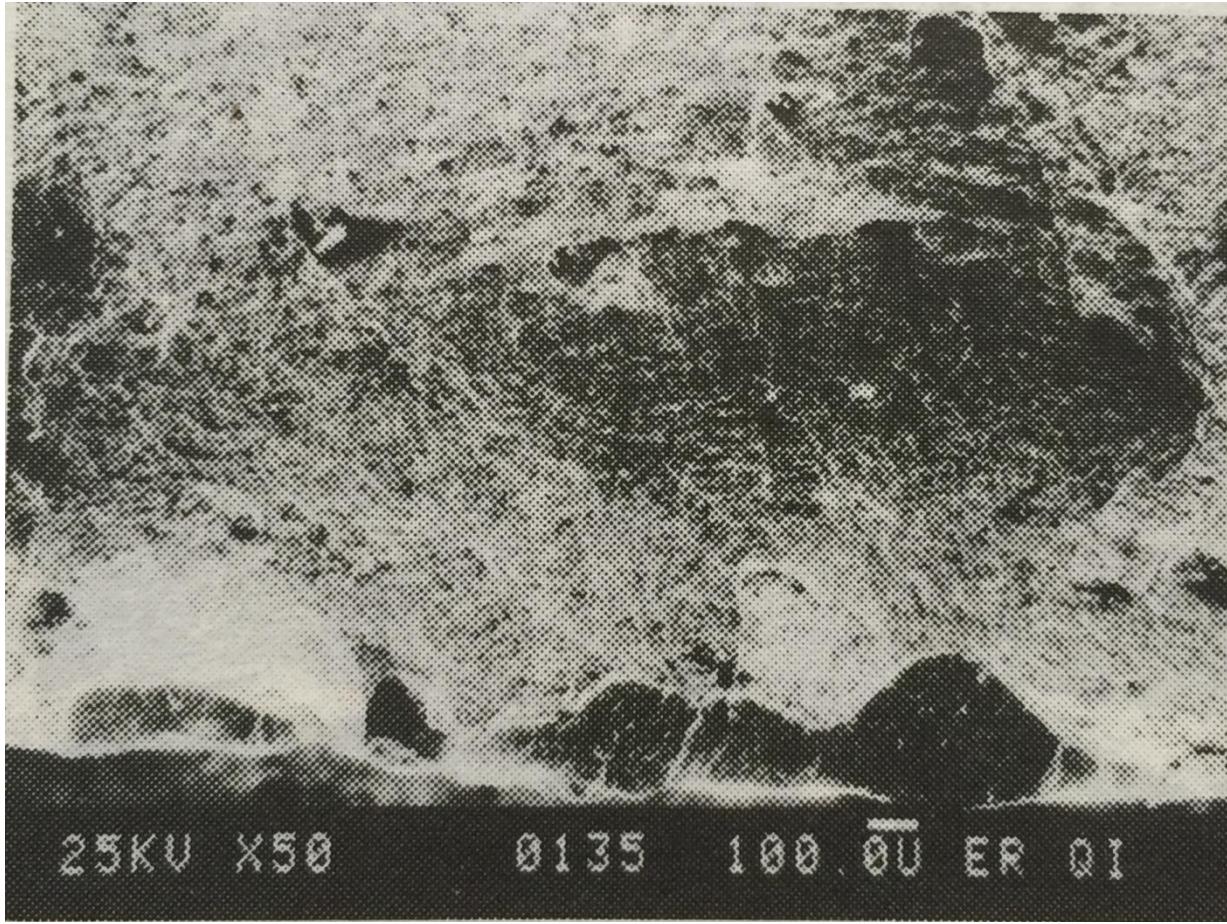
- 未喷丸试样在相同的应力疲劳试验时，在 $N=7 \times 10^5$ 运转后未发现有疲劳裂纹。此时的周次已占总寿命的近80%，即裂纹萌生期很长 $N_i \sim 80\%N_f$ ，裂纹扩展期 N_p 很短。
- 喷丸试样 $N_i \sim 3\%N_f$ ， $N_p > 90\%$ 。即裂纹萌生期很短，扩展期很长。

疲劳裂纹源于丸坑 (缩短裂纹萌生期)

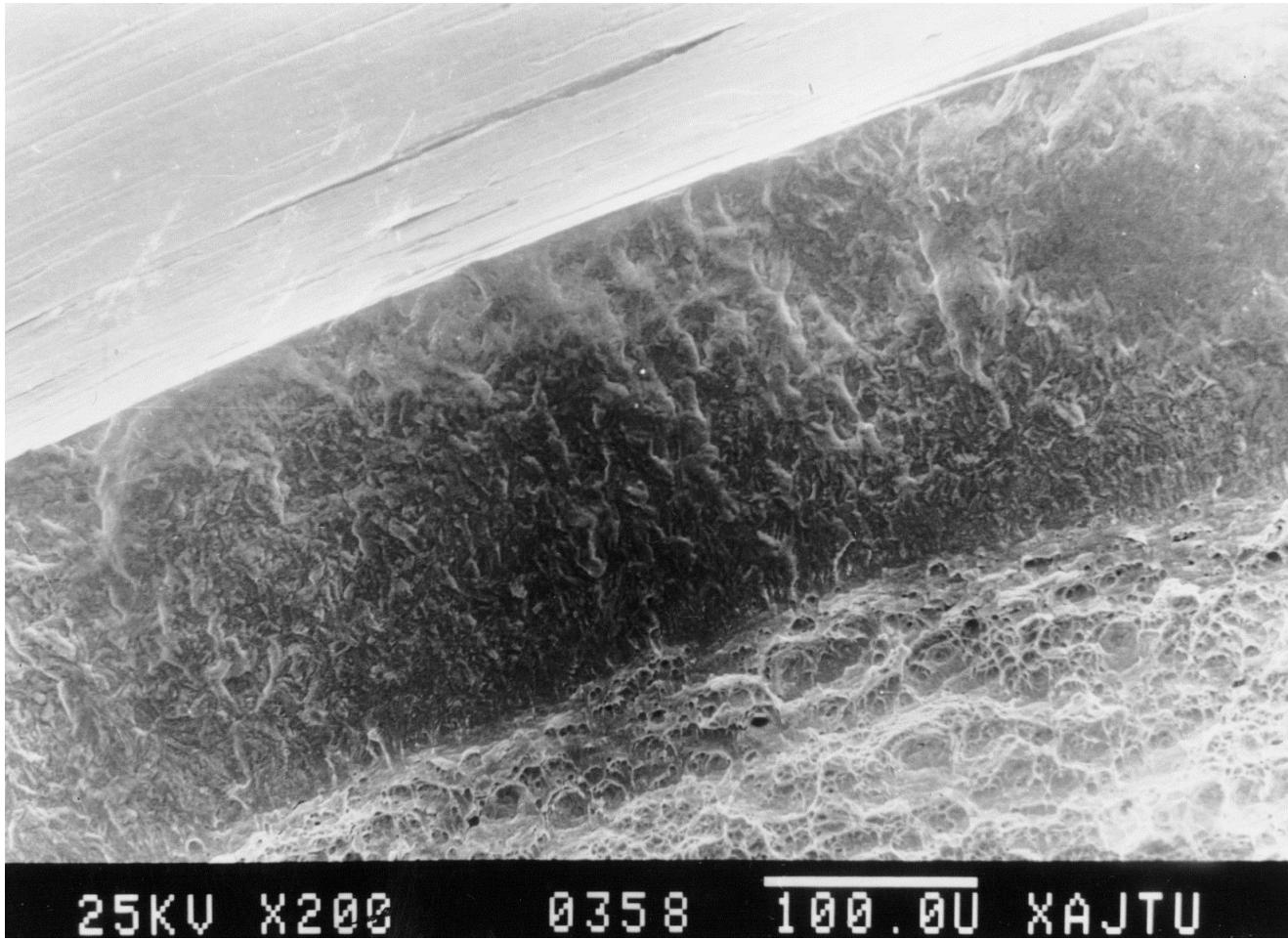


疲劳极限的试样有裂纹

- 钢铁试样在疲劳试验时，经过 10^7 周次未断的就不再继续，认为不再断裂。
- 将这些试样静弯断后，都存在不少的疲劳裂纹，这些裂纹不再扩展称“非扩展裂纹”。



- 预应力 750 MPa , $700 \pm 330\text{ MPa}$, 5×10^6 未断, 静弯断后 18 mm 宽, 有20多个疲劳源, 裂纹最深 0.30 mm （与压应力峰值对应）。



25KV X200

0358

100.0U XAJTU

表下的残余压应力峰值可使疲劳裂
纹停止扩展

喷丸对脱碳板簧用钢疲劳强度的影响 和残余应力的作用

二汽工艺处 徐家炽 板簧分厂 沈邦俊
西安交通大学 张定铨 胡奈赛

机械工程材料 1984年 第6卷 第6期 24~27