



残余应力和齿轮弯曲疲劳极限 间的定量关系

昌宇应力技术（上海）有限公司

白涛 博士

渗碳淬火齿轮

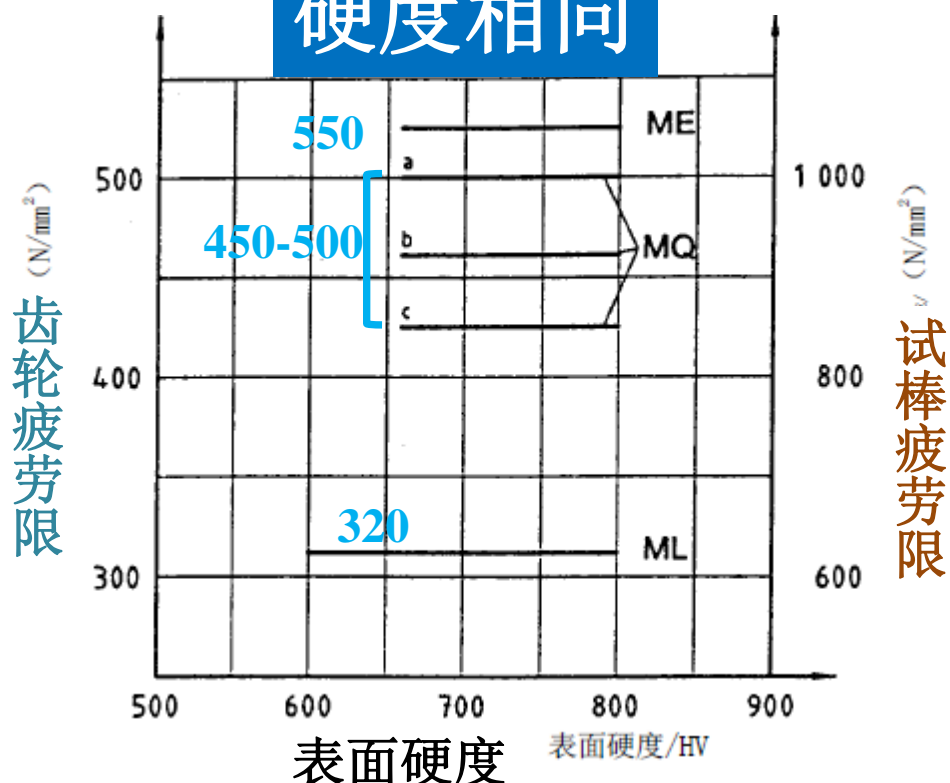
弯曲疲劳限：三级

材料、热处理工艺差异

原材料

- ✓ 钢坯成分，均匀性
- ✓ 夹杂物，含氧量
- ✓ 锻造比，晶粒度

硬度相同



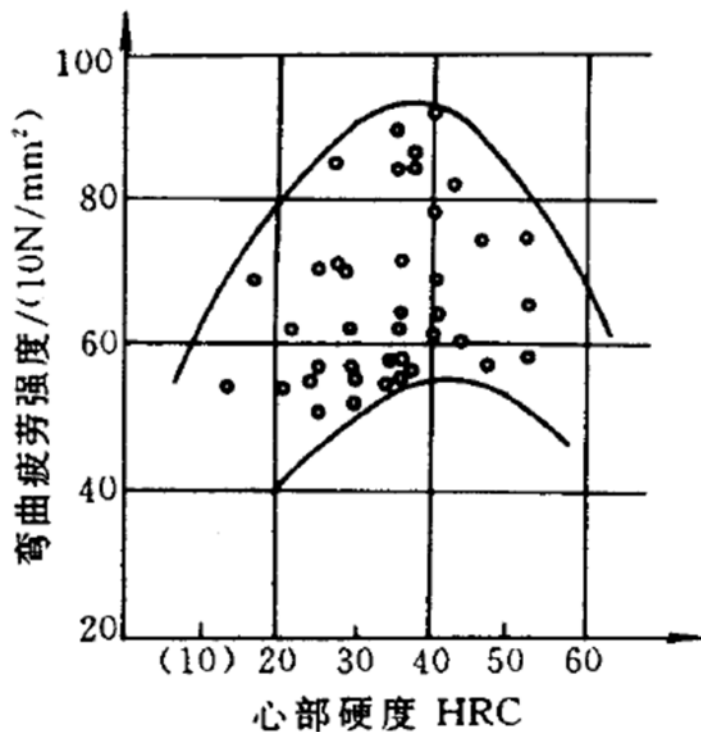
渗碳层

- 含碳量及深度
- 黑色组织
- 析出碳化物
- 残余奥氏体
- 淬火缺陷

单纯提高硬度有一定限度

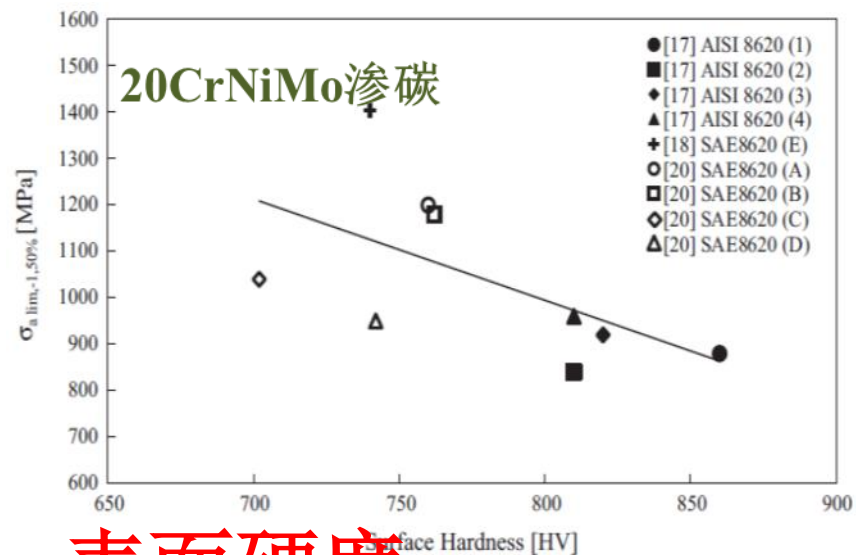
2015, 意

疲劳强度



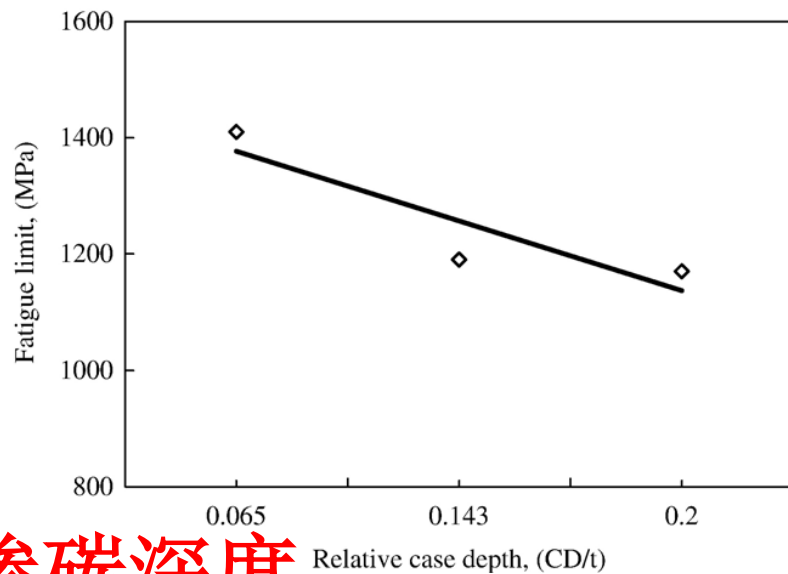
心部硬度

疲劳强度



表面硬度

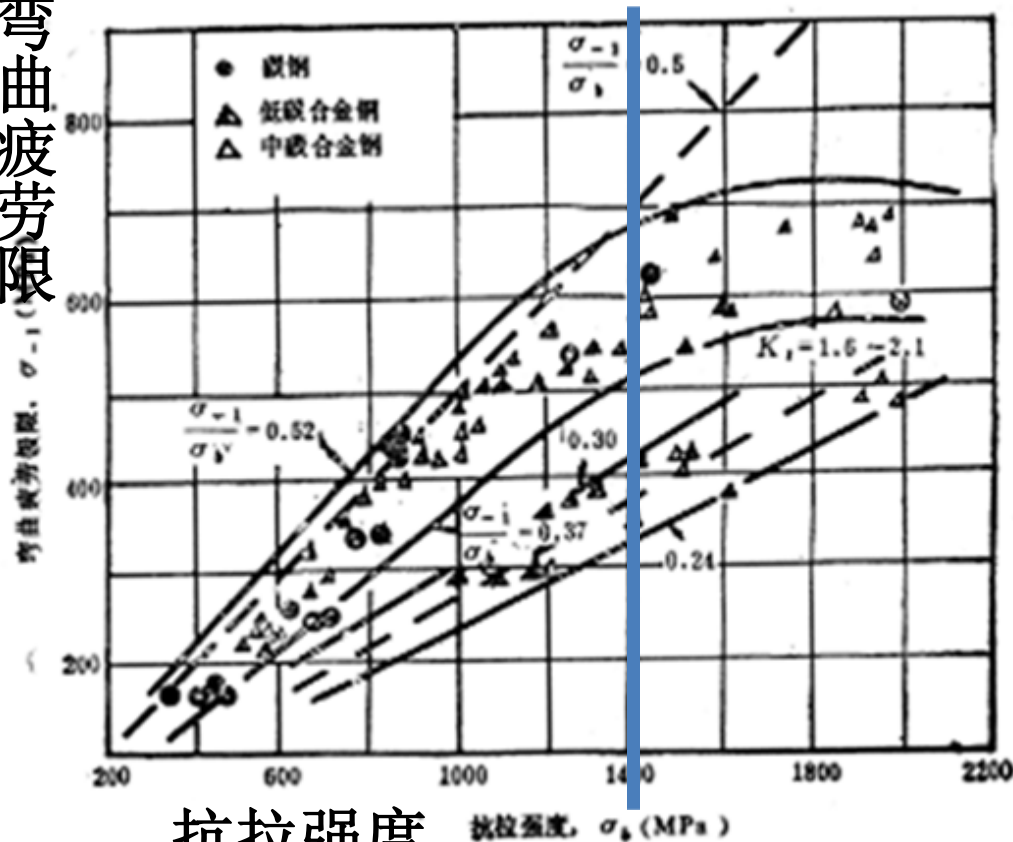
疲劳限



渗碳深度

$<1400\text{MPa}$ $\sigma_{-1}/\sigma_b=0.5$

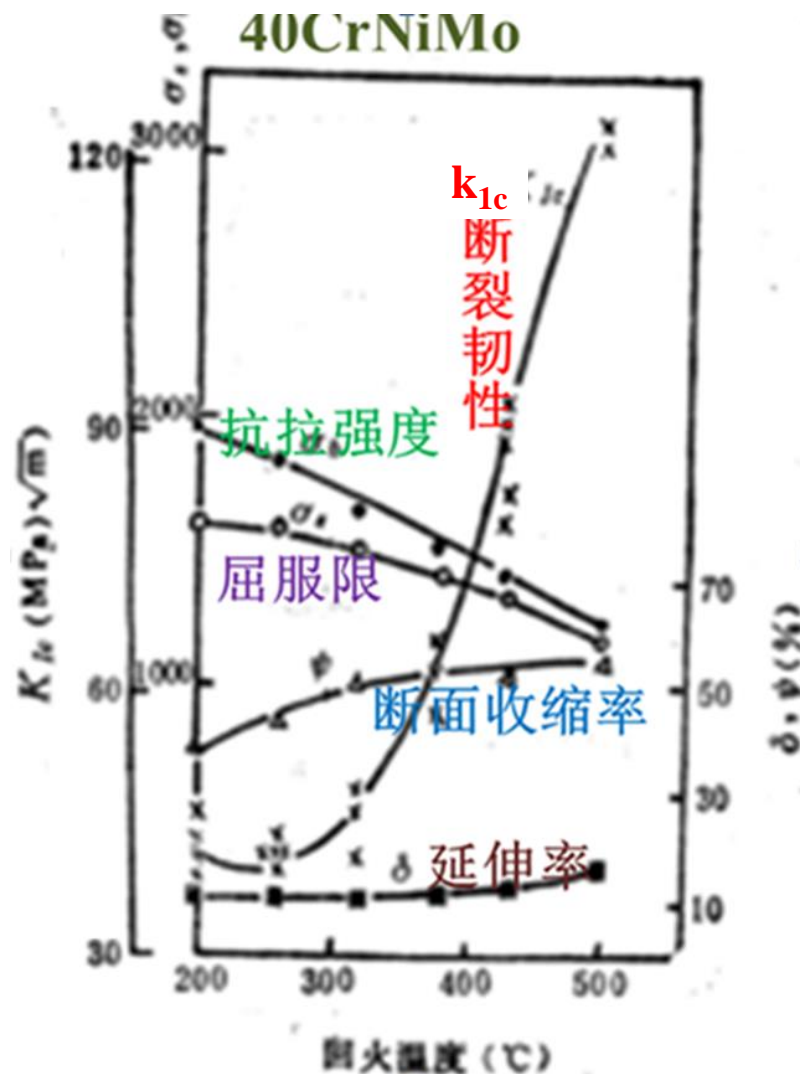
弯曲疲劳限



抗拉强度

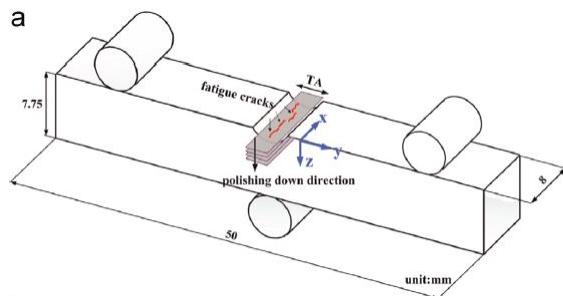
强度高塑性下降，夹杂处应力集中，塑性低，易形成裂纹

硬度↑ k_{1c} ↓
 k_{1c} 裂纹扩展阻力



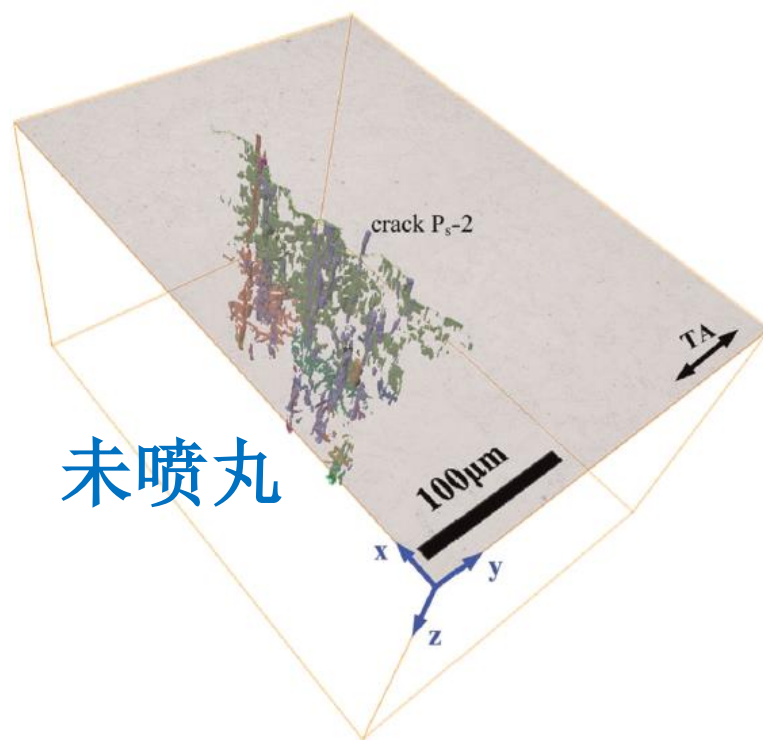
疲劳裂纹3D扩展

分层切片

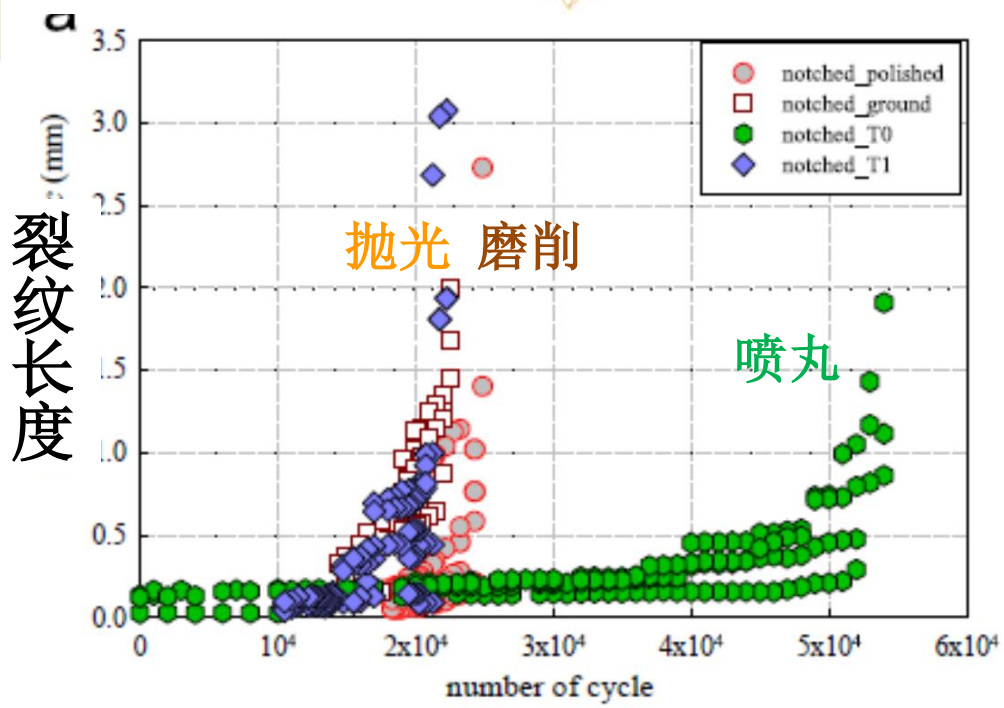
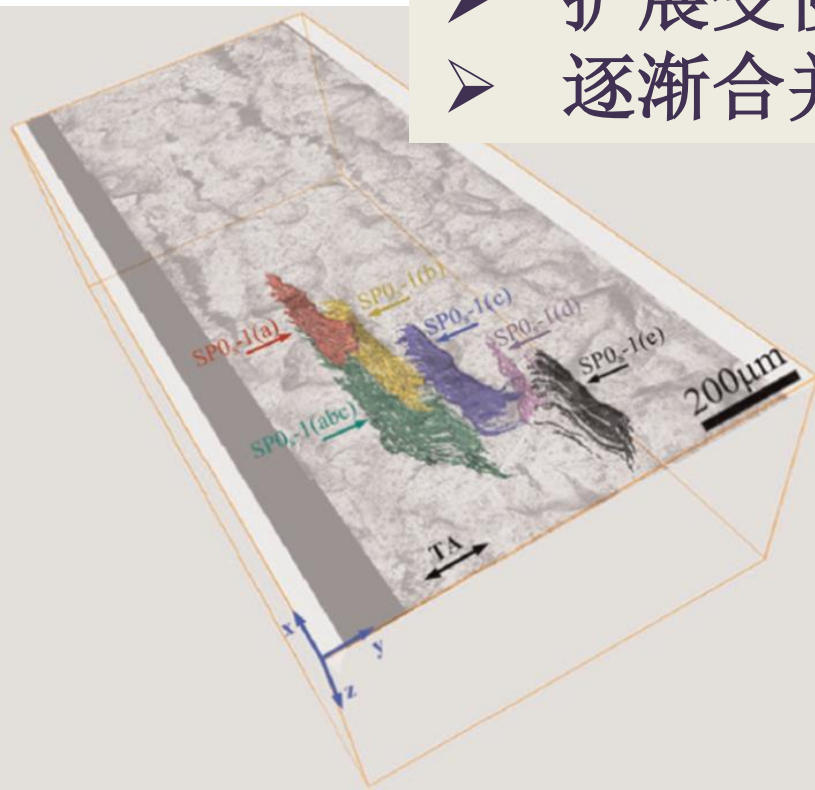


喷丸后

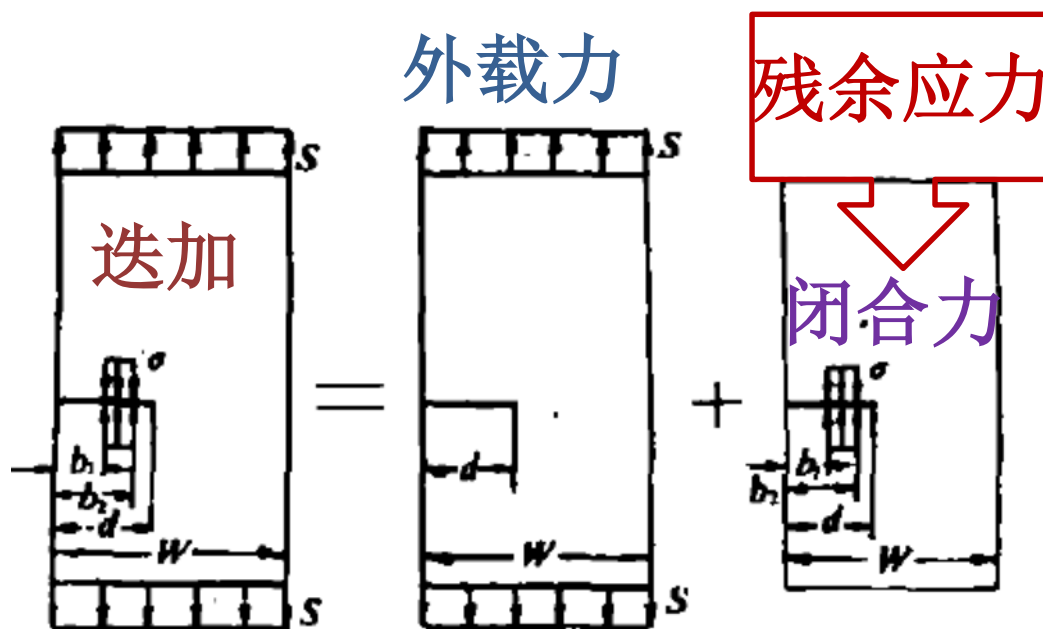
- 扩展变慢
- 逐渐合并



未喷丸



残余应力作用在裂纹面



一般共识 不同处理

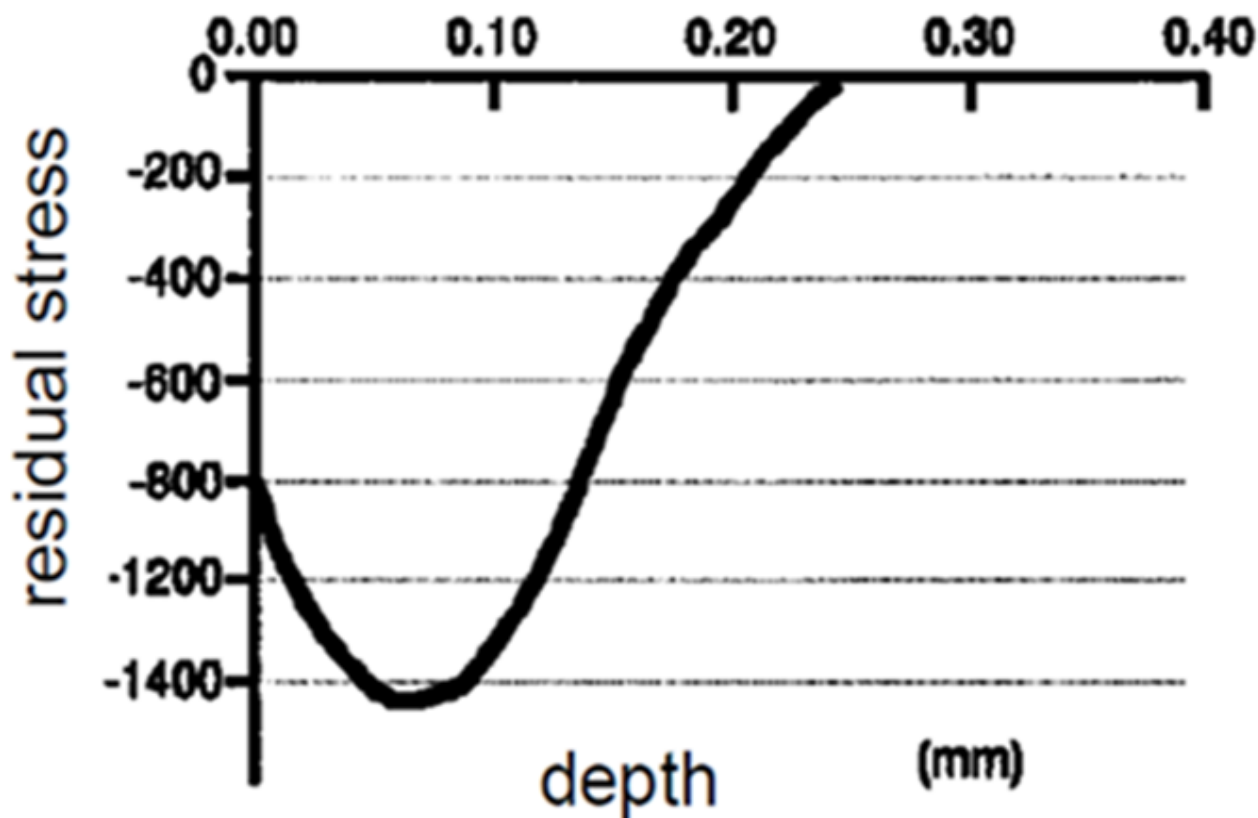
作为力学参量，定量进入设计

纳入残余应力

弯曲疲劳

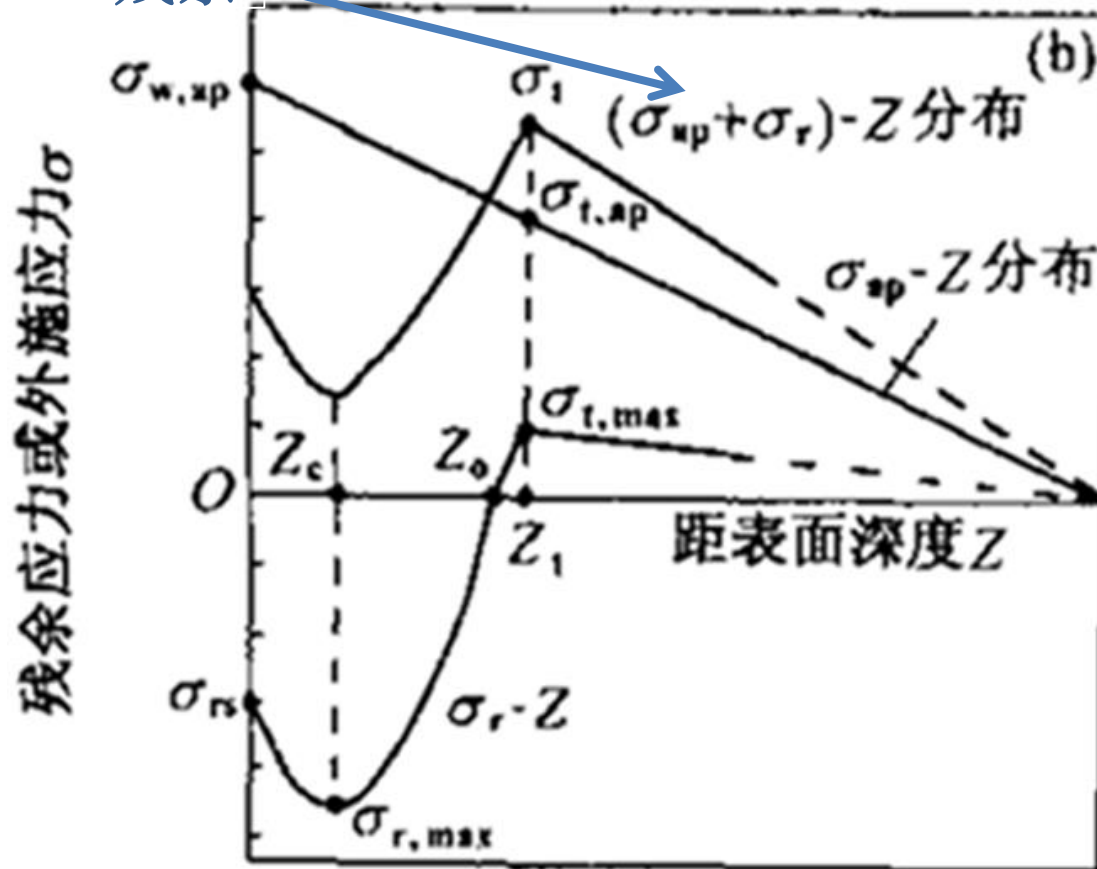
设计

喷丸后残余应力沿深度分布的典型曲线:



部分工作的处理方法

$\sigma_{\text{外载}} + \sigma_{\text{残余}}$



残余应力+外载应力

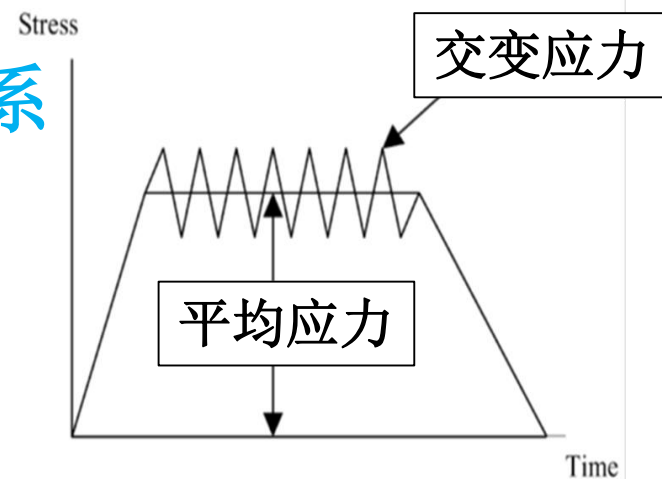
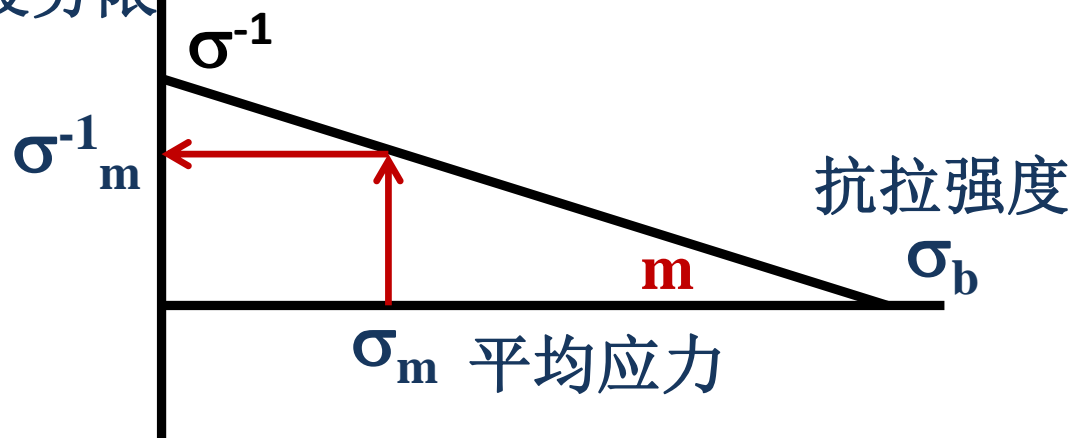
静 + 动 ?

平均应力 \neq 交变应力

静、动载对材料破坏作用不同

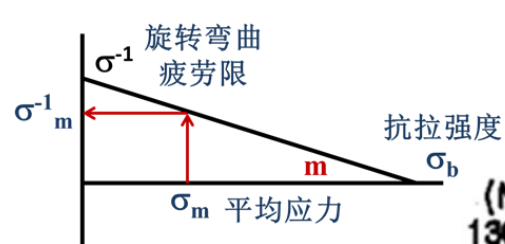
静动强度间关系：Goodman关系

弯曲
疲劳限



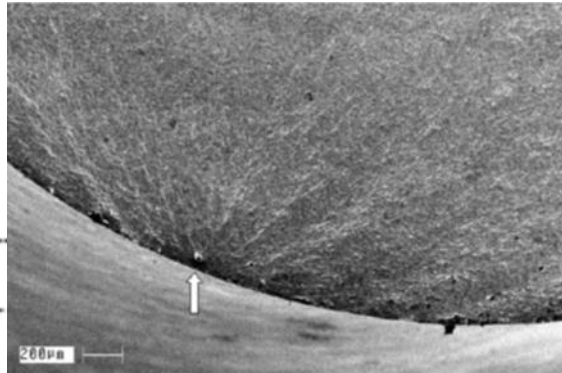
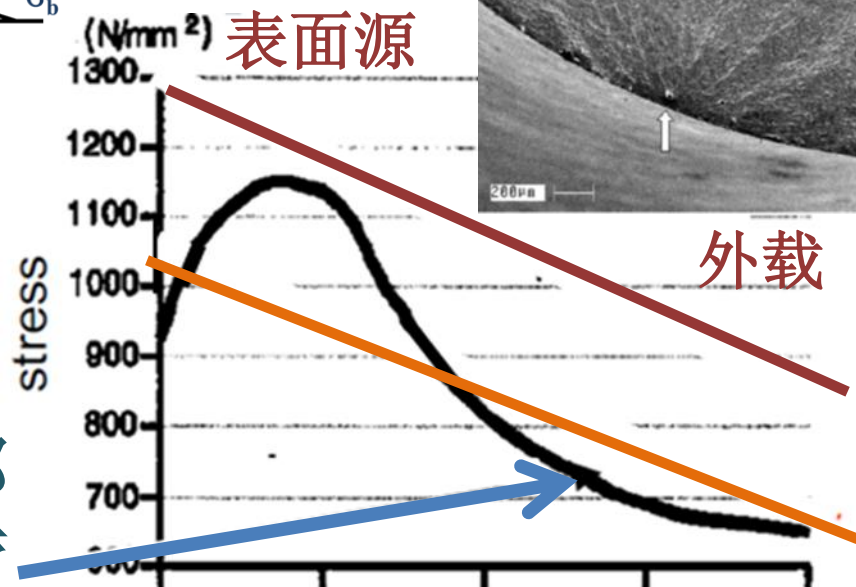
$$\boxed{\text{动}} \rightarrow \sigma^{-1}_m = \sigma^{-1} - m \sigma_m \leftarrow \boxed{\text{静}}$$

残余应力对疲劳的作用：m值

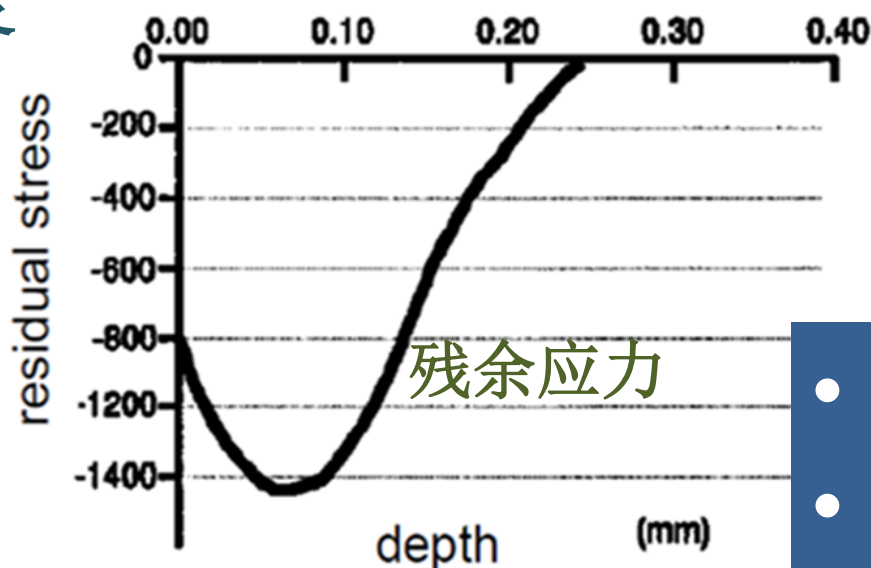
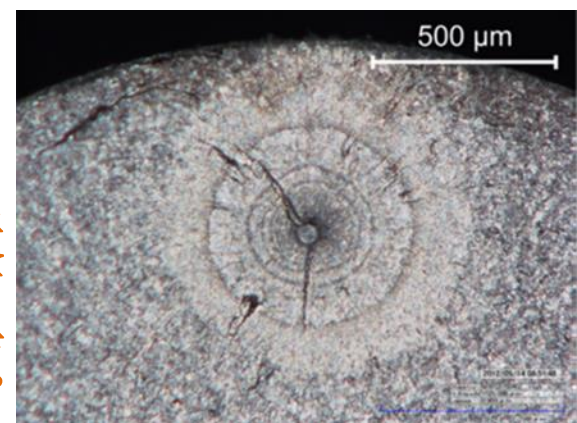


**m值转化
疲劳抗力**

**局部
疲劳
强度**



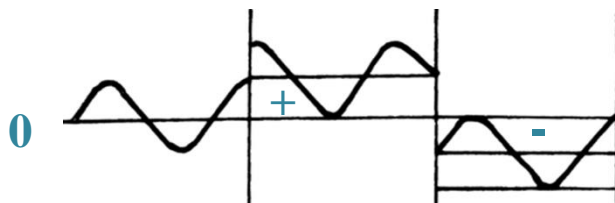
表下源



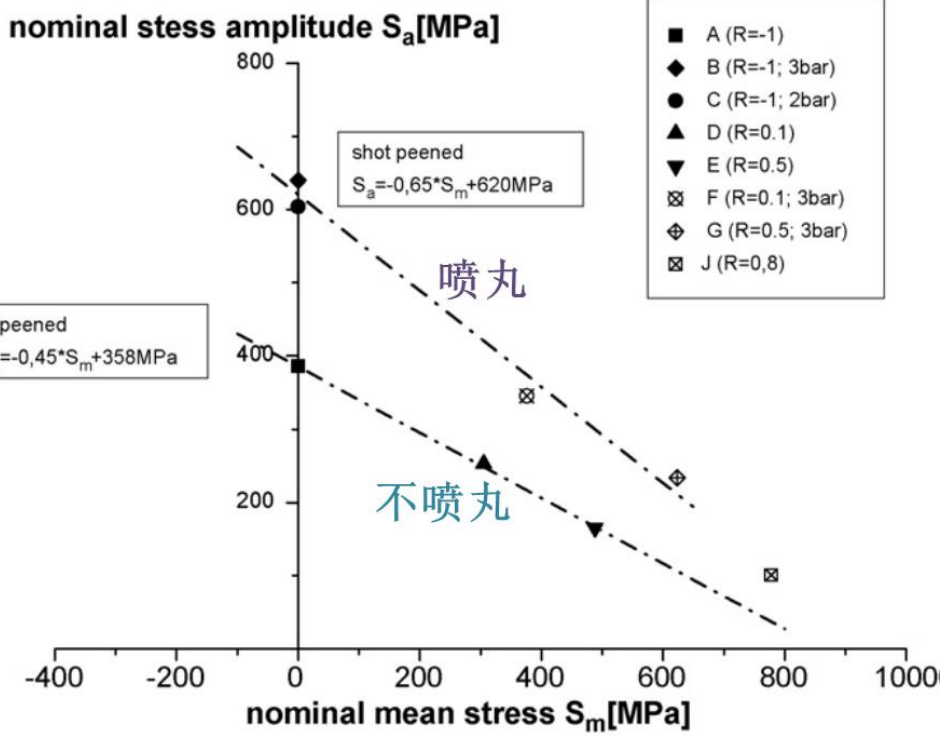
判断

- 承载能力
- 表面或表下源

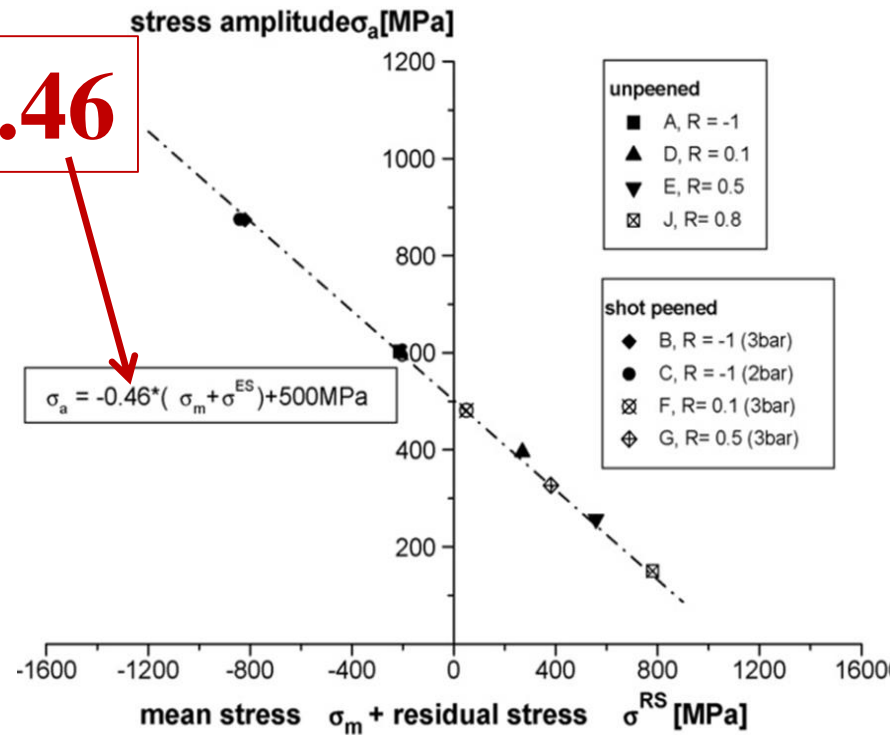
渗碳钢 不同平均应力疲劳



m=0.46



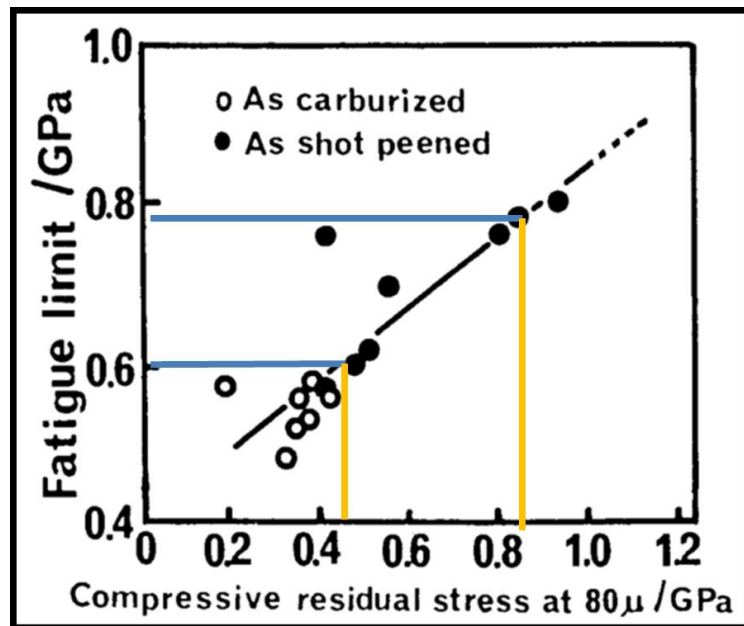
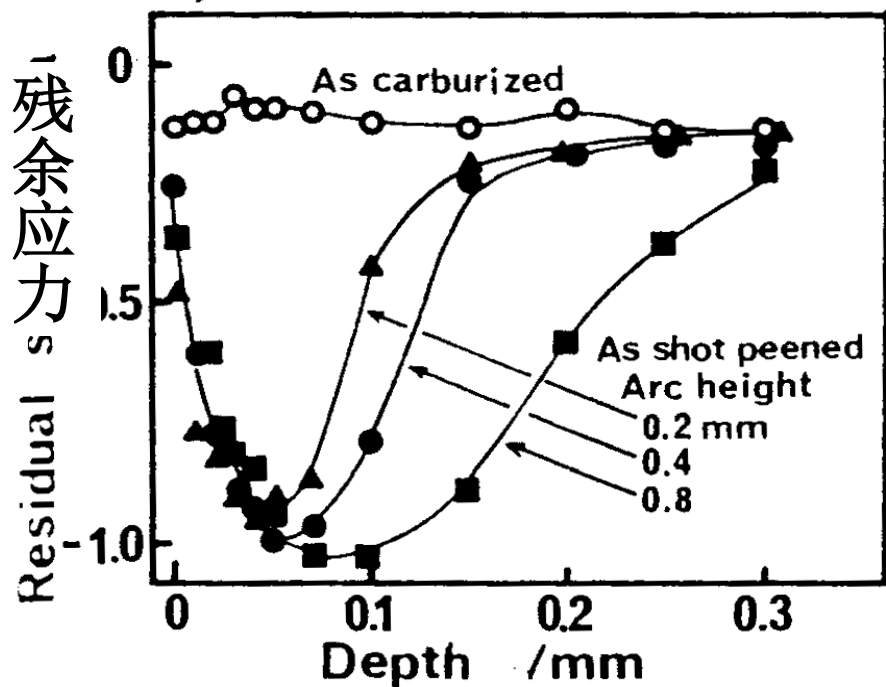
平均应力



平均应力+残余应力

20CrMnMo渗碳 旋转弯曲疲劳

a) Residual stress

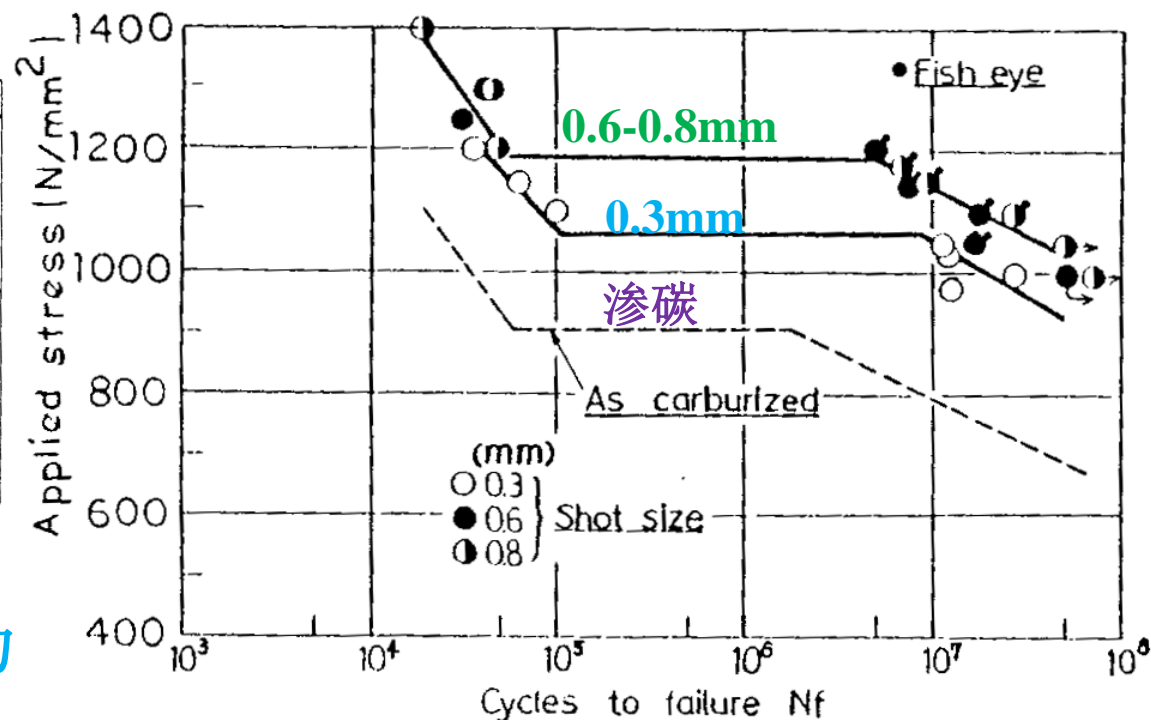
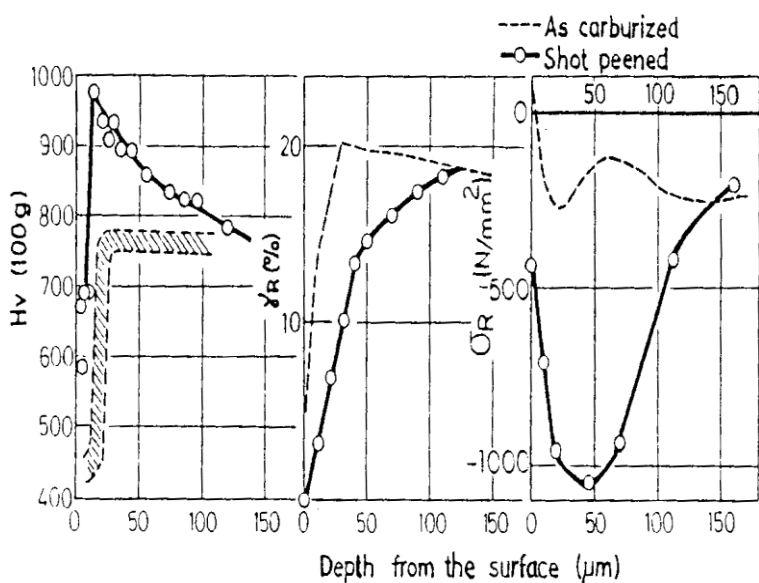


$$m=0.45$$

- 3种喷丸强度0.2A-0.8A
- 硬度，残奥影响相似
- 残余应力不同起**主要**作用

20CrMnMo渗碳 旋转变曲疲劳

0.3, 0.6, 0.8mm钢丸，速度46 m/s

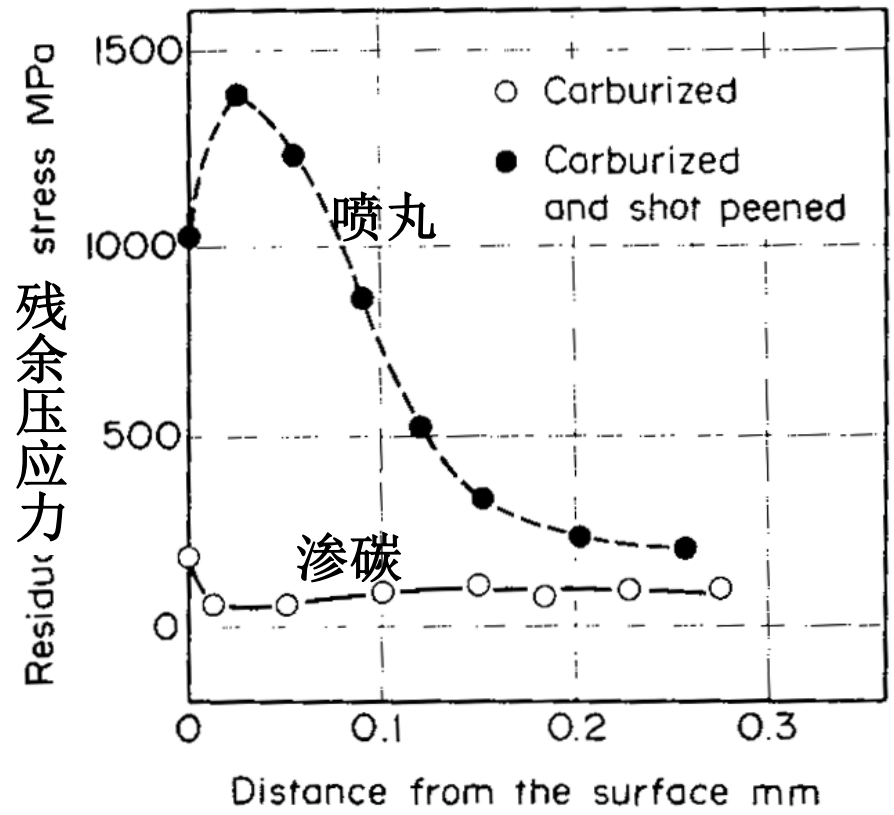


0.6-0.8mm喷丸效果

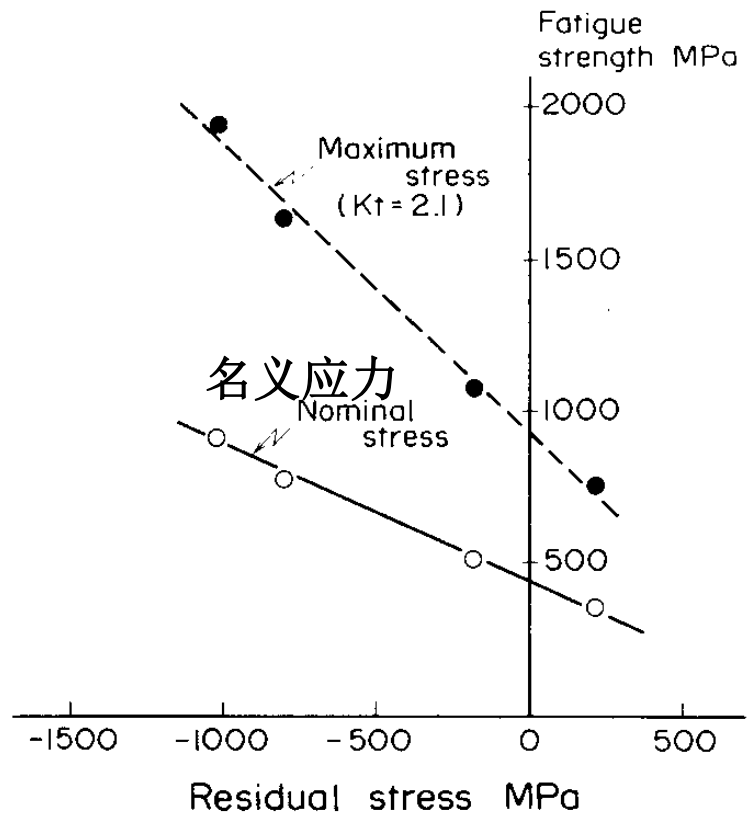
$m=0.35$

缺口旋转弯曲疲劳

缺口应力集中系数 $k_t=2.1$
0.6mm钢丸，HRC55



极大值：1400MPa



名义应力计算

$m=0.39$

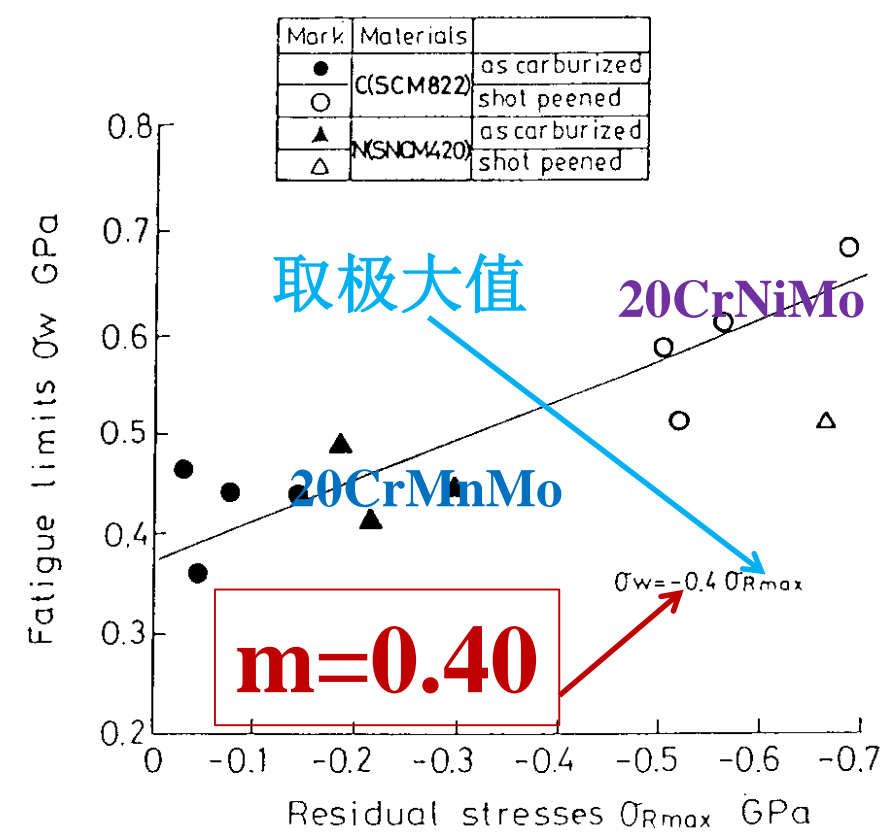
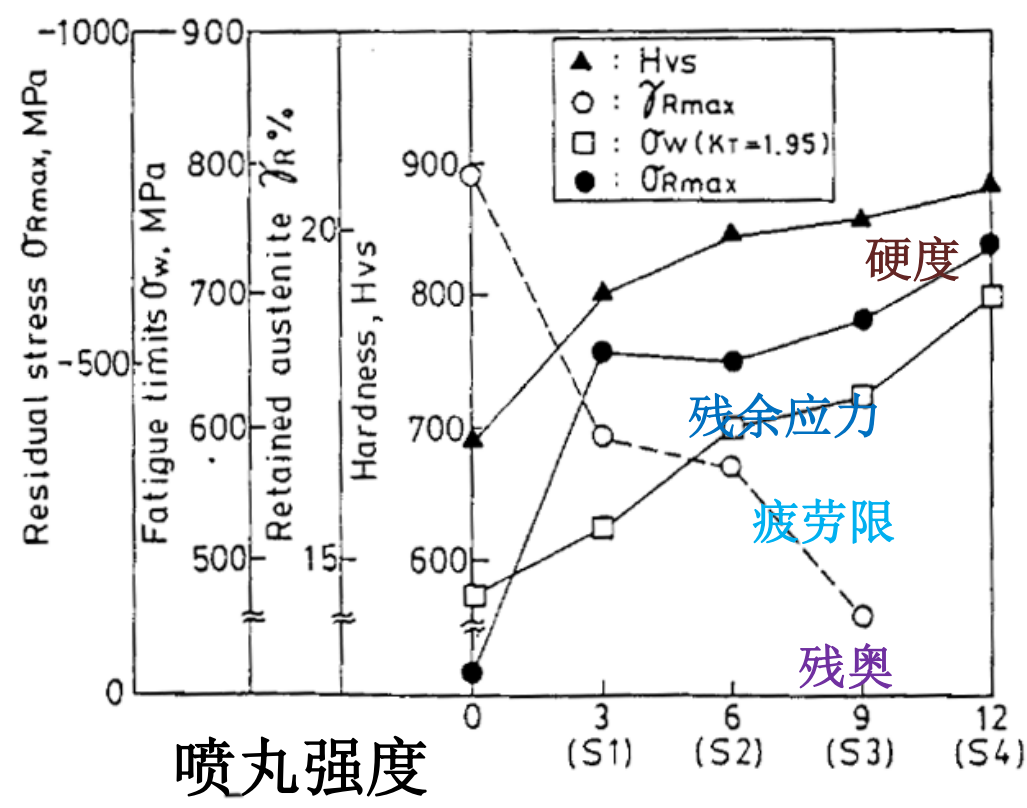
缺口 $k_t=1.95$ 旋转弯曲疲劳

20CrMnMo

20CrNiMo

- 4种喷丸强度0.31A-0.43A
- 同时测定残奥，硬度

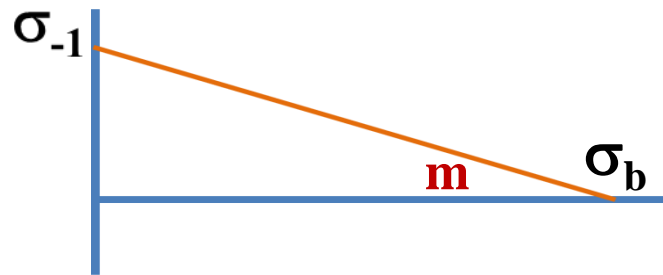
不同钢的疲劳限和残余应力可成线性



教科书数据

无关残余应力

	铁素体	珠光体	奥氏体	马氏体	索氏体
σ_{-1}/σ_b	0.57-0.63	0.38-0.41	0.35-0.45	0.23-0.47	0.56-0.60
中值	0.60	0.40	0.40	0.35	0.58



作者	德	神户	住友	小松	日钢
m值	0.46	0.39	0.40	0.35	0.45

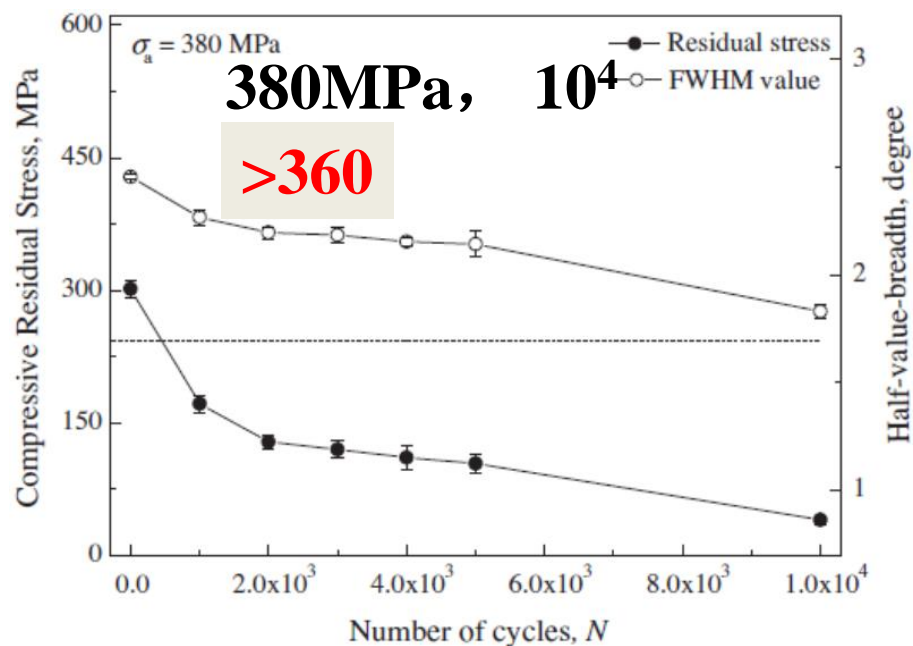
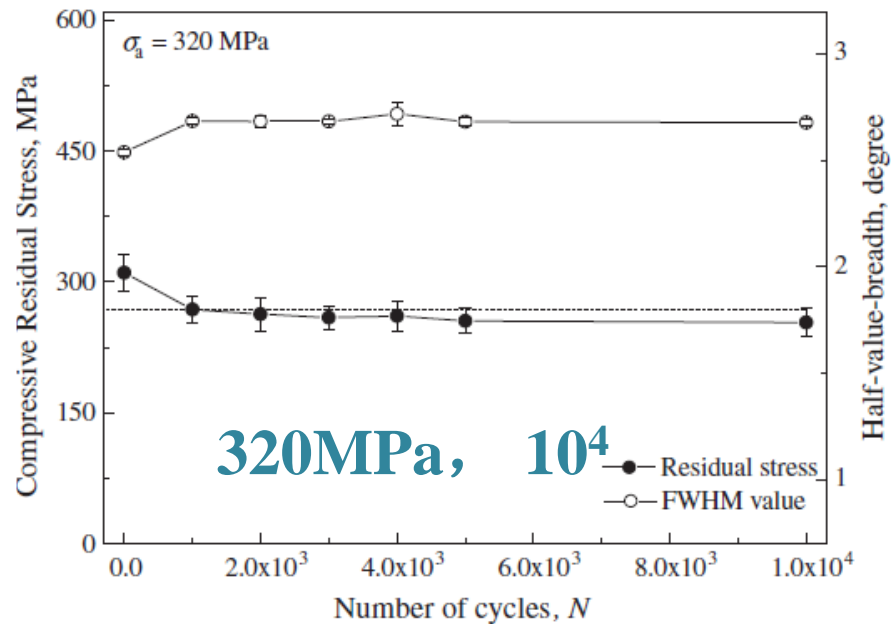
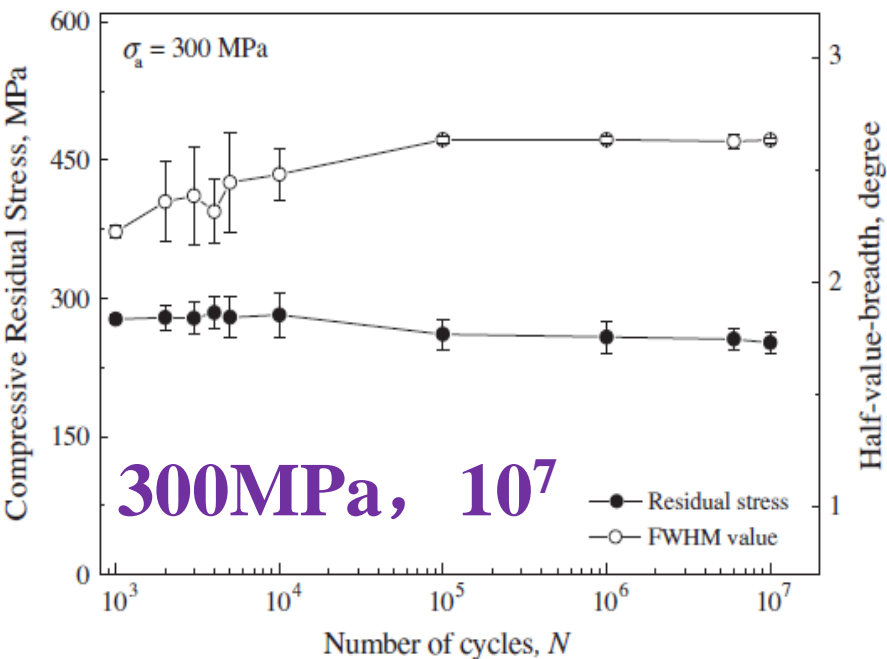
含残余应力

不同源数据相符

2013, 日

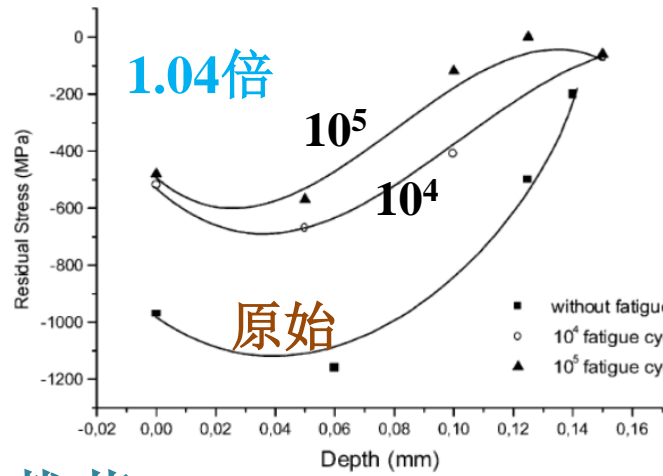
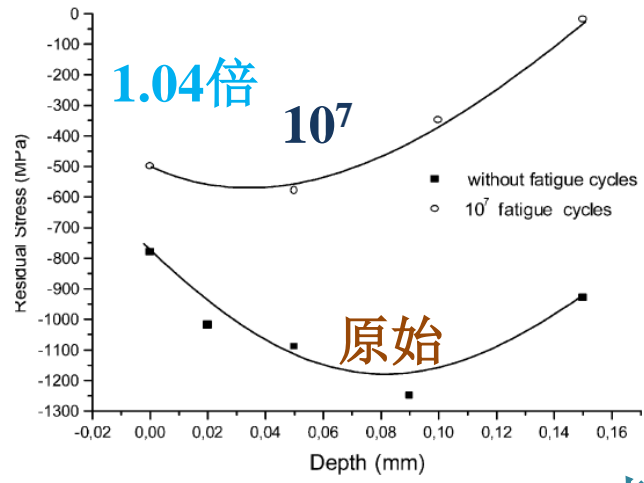
运行中残余应力衰减

- 45Mn旋转弯曲疲劳
- 屈服强度**360MPa**
- 喷丸强度**0.36A**

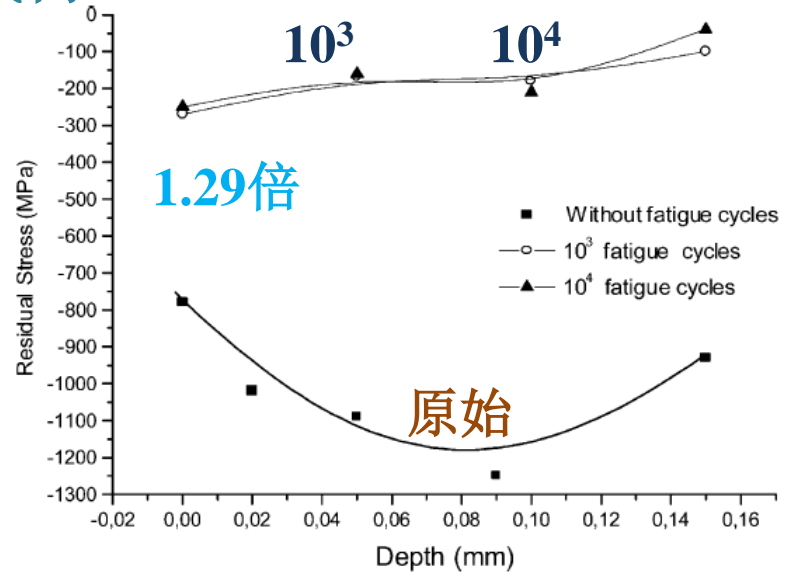
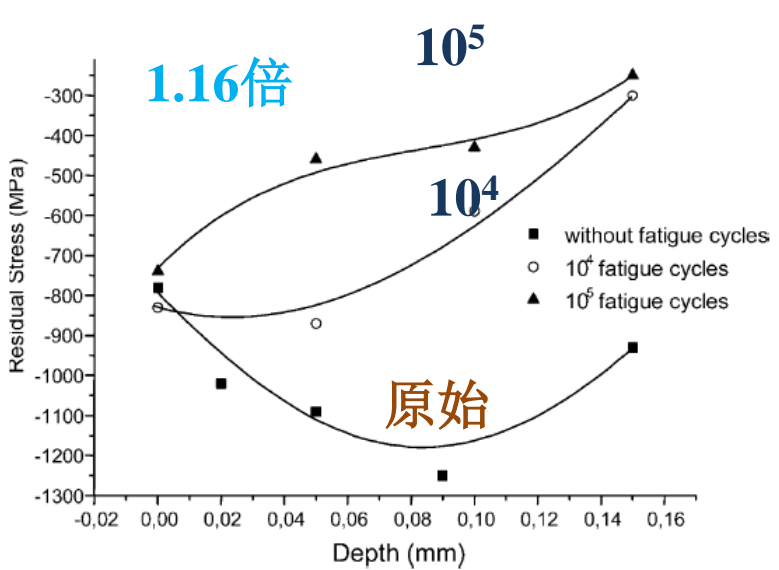


超过疲劳限的衰减

低温回火钢HRC53疲劳限800MPa



0.141A喷丸载荷830MPa



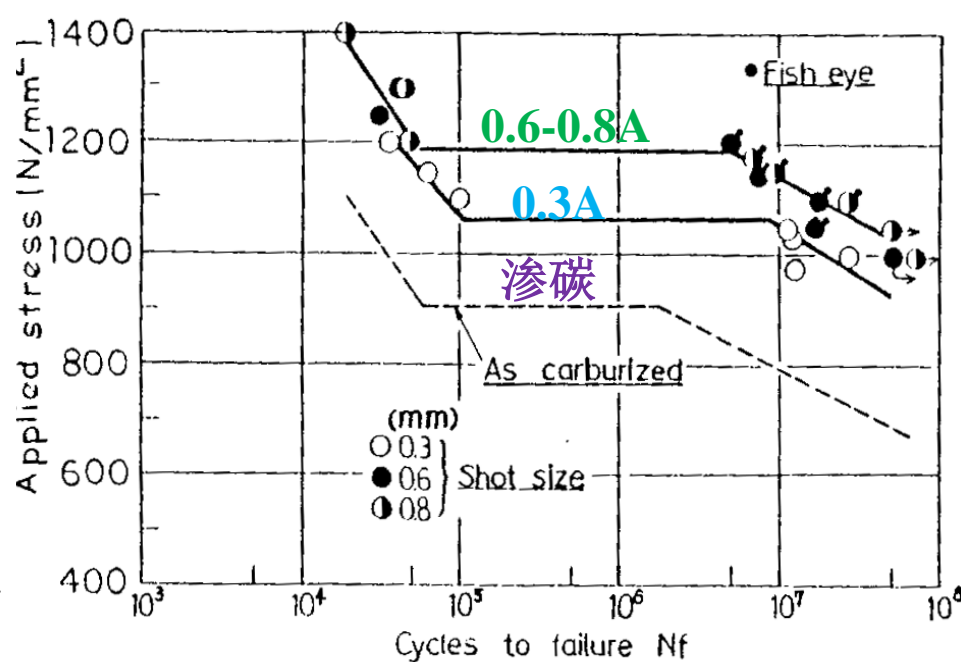
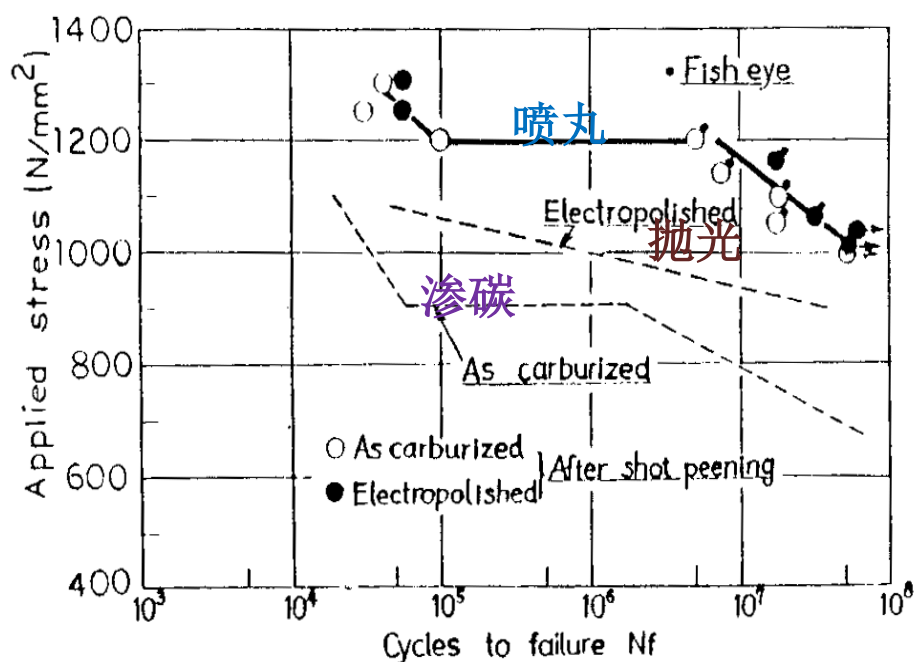
0.141A喷丸, 载荷931MPa

0.141A喷丸, 载荷1035MPa

20CrMnMo黑色组织 30μ

电抛光，0.3mm喷丸
可以减少非马影响

0.6mm, 0.8mm喷丸
完全消除非马影响



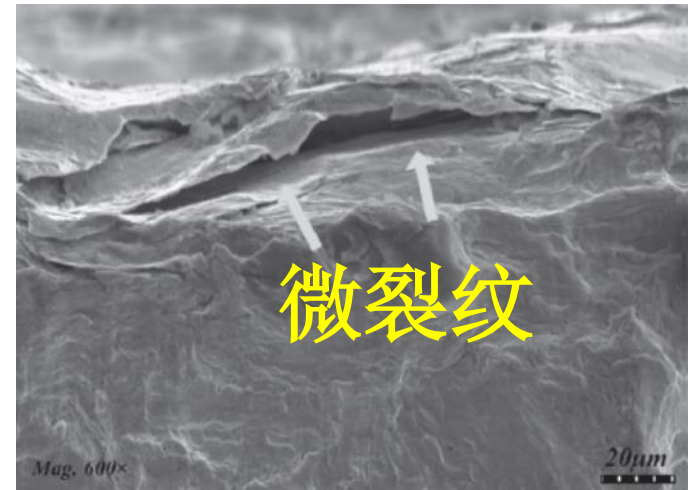
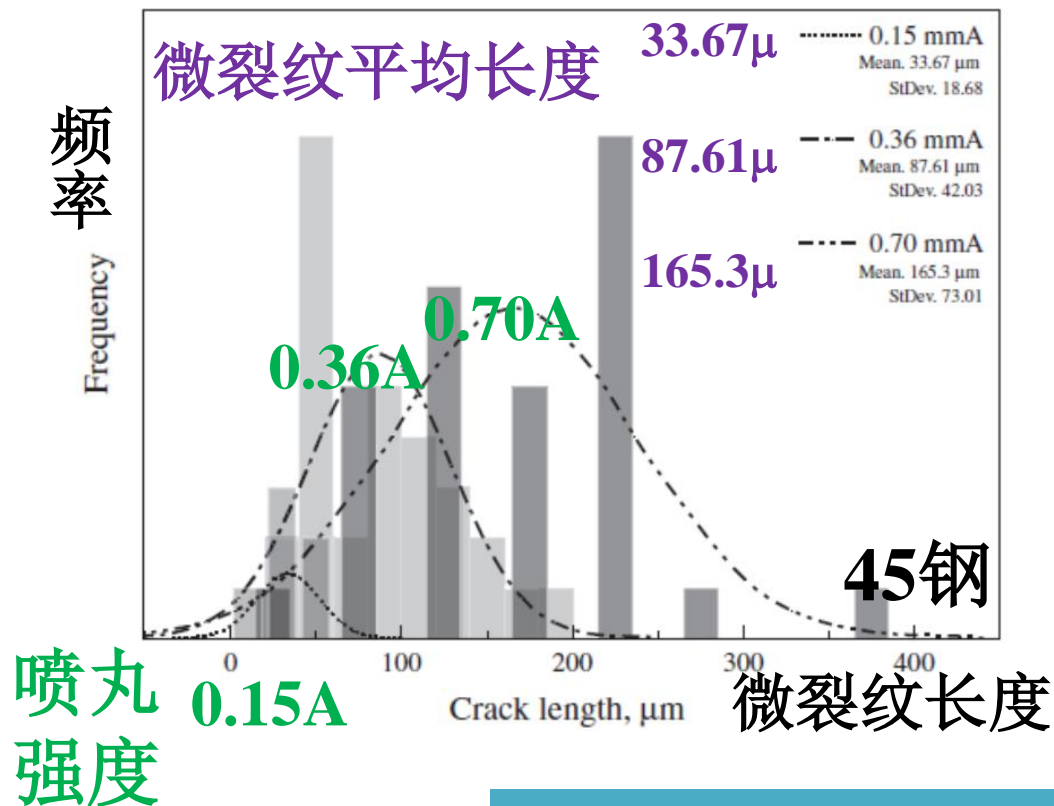
抛后再喷丸，0.3A即可

0.6A-0.8A喷丸，无需抛光

黑色组织可视作表面缺陷

强化伴随损伤

- 喷丸强度高，残余压应力高，损伤大
- 低强度喷丸也难以避免微裂纹



限制残余压应力上限

归 纳

□ 渗碳取300MPa → 喷丸提高到1000MPa

如 $m=0.4$ ，疲劳限 ↑ 280MPa

疲劳限 MPa	ML	MQ	ME
	320	450-500	550

差距230MPa

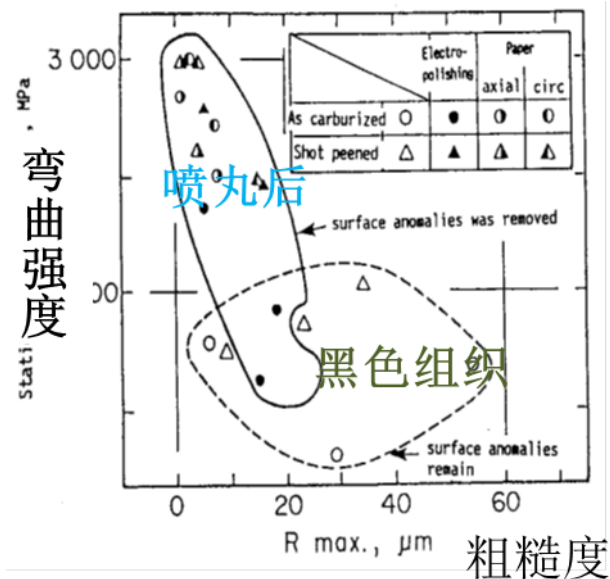
原材料

- 钢坯成分，均匀性
- 夹杂物，含氧量
- 锻造比，晶粒度

渗碳层

- 表面硬度
- 含碳量及深度
- 析出碳化物
- 残留奥氏体
- 黑色组织
- 淬火缺陷

□ 消除、抑制黑色组织影响



□ 主导因素是残余应力，非组织结构

喷丸控制：残余应力和损伤，粗糙度间优化



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