

# 深层滚压加工对高碳铬轴承钢超长寿命疲劳行为的影响\*

鲁连涛

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 成都 610031)

盐泽和章

(富山大学工学部, 富山 930-8555, 日本)

姜燕

(成都市公共交通集团公司, 成都 610041)

**摘要** 深层滚压加工对高碳铬轴承钢超长寿命疲劳行为的研究表明: 与深层滚压加工前相同, 在高应力幅短寿命区, 疲劳裂纹萌生于试样表面; 由于表面压缩残余应力的影响, 疲劳强度有所提高. 在低应力幅长寿命区, 疲劳裂纹萌生位置从未经深层滚压加工试样的次表面向深层滚压加工试样内部没有压缩残余应力和硬化层的位置转移; 因弯曲应力梯度的影响, 疲劳强度有了较大的提高. 深层滚压加工可以提高高碳铬轴承钢在超长寿命区的旋转弯曲疲劳强度.

**关键词** 超长寿命疲劳, 滚压加工, S-N 曲线, 残余应力, 轴承钢

**中图分类号** TG111, TG135 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2006)05-0515-06

## INFLUENCE OF DEEPLY ROLLING PROCESS ON ULTRA-LONG LIFE FATIGUE BEHAVIOR OF HIGH CARBON-CHROMIUM BEARING STEEL

LU Liantao

State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031

SHIOZAWA Kazuaki

Department of Mechanical and Intellectual System Engineering, Toyama University, Toyama 930-8555, Japan

JIANG Yan

Chengdu City Public Transportation Group Company, Chengdu 610041

Correspondent: LU Liantao, associate professor, Tel: (028)87634355, E-mail: luliantao@hotmail.com

Supported by National Natural Science Foundation of China (Nos.50471047 and 50323003)

Manuscript received 2005-05-18, in revised form 2005-11-20

**ABSTRACT** Influence of deeply rolling process on fatigue behavior of high-carbon chromium bearing steel was investigated in ultra-long life regime. The results are as follows: (1) in the region of short fatigue life and high stress amplitude level, the fatigue cracks initiate at the specimen surface as the same as that before deeply rolling. In this case, fatigue strength is improved little due to the effect of compressive residual stress in the specimen surface layer; (2) in the region of long fatigue life and low stress amplitude level, the fatigue crack initiation sites transfer from subsurface in the specimens before processing to interior in the rolled specimens, where the compressive residual stress and hardened layer vanished. In this case, fatigue strength is improved much more; (3) fatigue strength of the tested bearing steel in ultra long life regime under rotating-bending load can be improved by deeply rolling process.

**KEY WORDS** ultra-long life fatigue, roller processing, S-N curve, residual stress, bearing steel

表面改性处理赋予材料表面硬化层和压缩残余应力层, 因而抑制了材料表面萌生疲劳裂纹, 并减缓了疲劳裂纹的扩展, 可以达到改善材料疲劳强度的效果, 在工业上

被广泛的应用. 近十几年来开展的超长寿命疲劳研究发现, 高强度钢、铸铁、钛合金及铝合金等金属材料不存在传统的疲劳极限<sup>[1,2]</sup>, 而实际应用中机械和结构承受的交变载荷大多超过 $10^7$ 次, 但到目前为止, 对超过 $10^7$ 次应力循环的超长寿命区的表面改性材料疲劳行为的研究却很少<sup>[3]</sup>. 因此, 从保证机械和结构长期服役的安全性和使用的经济性的角度考虑, 研究改善超长寿命区疲劳强度的表面改性方法是一项重要的课题.

\* 国家自然科学基金资助项目 50471047 和 50323003

收到初稿日期: 2005-05-18, 收到修改稿日期: 2005-11-20

作者简介: 鲁连涛, 男, 1965年生, 副教授, 博士

本工作研究了对高碳铬轴承钢<sup>[4]</sup>和两种喷丸处理的高碳铬轴承钢<sup>[5]</sup>在超过 $10^7$ 次应力循环的旋转弯曲加载下的超长寿命的疲劳行为. 结果表明: 未经表面改性的高碳铬轴承钢具有两条 S-N 曲线, 一条是表面裂纹萌生型的 S-N 曲线, 它位于高应力幅短寿命区; 另一条是次表面裂纹萌生型 S-N 曲线, 它位于低应力幅长寿命区. 当对该材料实施丸粒 $55\ \mu\text{m}$ 的浅层和丸粒 $500\ \mu\text{m}$ 的深层喷丸处理后, 在未经表面改性材料的表面裂纹萌生型 S-N 曲线的疲劳极限以上的应力幅区, 疲劳裂纹萌生位置由材料表面分别向材料次表面和内部转移, 疲劳强度获得了提高; 但是, 在疲劳极限以下的应力幅区, 疲劳强度没有得到改善. 这是由于浅层喷丸未能引起疲劳裂纹萌生位置向材料内部转移; 而深层喷丸虽然引起疲劳裂纹萌生位置向材料内部转移, 但在材料内部裂纹萌生位置处产生了较大的拉伸残余应力, 抵消了弯曲应力梯度对旋转弯曲疲劳性能的改善.

本研究使用了在材料内部不引起较大拉伸残余应力的深层滚压方法, 对高碳铬轴承钢进行了滚压加工, 研究了深层滚压加工效果对高碳铬轴承钢超长寿命疲劳行为的影响. 比较了表面改性前、后的实验结果, 讨论了深层滚压残余应力对内部裂纹萌生、扩展行为的影响和表面改性能否改善内部破坏的疲劳性能.

## 1 实验方法

### 1.1 实验材料

高碳铬轴承钢(日本工业标准编号: SUJ2)的成分(质量分数, %)为: C 1.01, Si 0.23, Mn 0.36, Cr 1.45, Cu 0.06, Ni 0.04, Mo 0.02, P 0.012, S 0.007. 砂漏形状疲劳试样的挟持部直径为 $10\ \text{mm}$ 、最小断面的圆弧半径为 $7\ \text{mm}$ 、直径为 $3\ \text{mm}$ . 热处理条件为:  $1108\ \text{K}$ ,  $2.4\ \text{ks}$  淬火,  $353\ \text{K}$  油冷,  $453\ \text{K}$ ,  $7.2\ \text{ks}$  回火后空冷. 材料为回火马氏体组织, 原始 $\gamma$ 相晶粒粒径平均值为 $5.8\ \mu\text{m}$ , 碳化物的粒径为 $0.2\text{--}1.5\ \mu\text{m}$ . 试样经 100 号磨石研削加工达到实验要求的形状尺寸. 该试样称为未经表面改性处理试样(Untreated). 除表面研削硬化层外, 试样的内部硬度均匀, Vickers 硬度 $\text{HV}=750\pm 13.4$ , 最大抗拉强度为 $2316\ \text{MPa}$ .

1.1.1 深层滚压加工条件 疲劳实验前使用日本速技能机械有限公司生产的 Superroll 深层滚压工具对磨石研削试样表面进行了深层滚压加工. 深层滚压加工的条件是, 使用通用的数控机床, HG6 型球形点式深层滚压头, 水乳性加工液, 转速 $1600\ \text{r/min}$ , 液压 $40\ \text{MPa}$ . 本文在以后的图中用 Superroll 表示深层滚压加工试样的实验结果.

1.1.2 表面粗糙度 图 1 给出了深层滚压加工前、后试样表面的粗糙度曲线. 以 $0.8\ \text{mm}$ 为基准长度, 经 6

次测量得到深层滚压加工前、后试样轮廓的最大高度 $R_y$ , 其平均值分别为 $1.92$ 和 $1.28\ \mu\text{m}$ . 可见, 深层滚压加工后, 材料研削加工面的表面粗糙度有所降低.

1.1.3 残余应力分布 对深层滚压加工试样表面先进行电解研磨, 逐次去除试样表面硬化层, 同时使用 $\text{CrK}\alpha(\text{Fe}(211))$ 面, 在 $40\ \text{kV}$ 管电压、 $40\ \text{mA}$ 管电流、 $100\ \mu\text{m}$ 视准直径的条件下, 利用 PSPC(position sensitive proportional counter) 型检出器的 $\sin^2\psi$ 法测定残余应力. 图 2 所示为使用 X 射线测得的深层滚压加工前、后残余应力 $\sigma_r$ 沿试样深度方向的分布结果. 深层滚压加工前, 试样的表面约有 $600\ \text{MPa}$ 的压缩残余应力存在, 压缩残余应力的深度约为 $13\ \mu\text{m}$ . 深层滚压加工后, 试样表面的残余应力值无较大的增加, 但残余应力的分布深度大幅度增加, 达到了 $200\ \mu\text{m}$ . 另外, 通过力的平衡关系可以求出深层滚压加工试样内部的拉伸残余应力值为 $35\ \text{MPa}$ .

1.1.4 表面层的硬度分布 图 3 所示为深层滚压

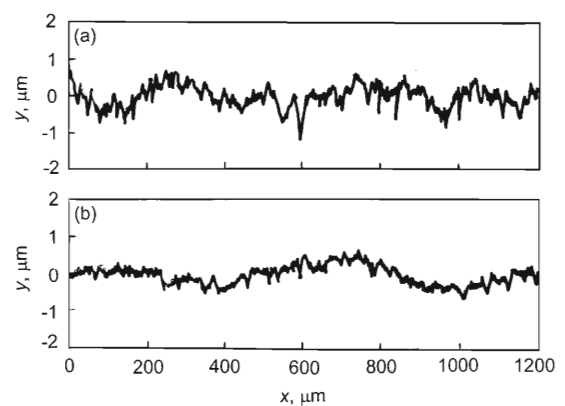


图 1 深层滚压加工前、后试样的表面粗糙度曲线

Fig.1 Roughness profiles of the surface of the bearing steel sample before (a) and after (b) deeply rolling

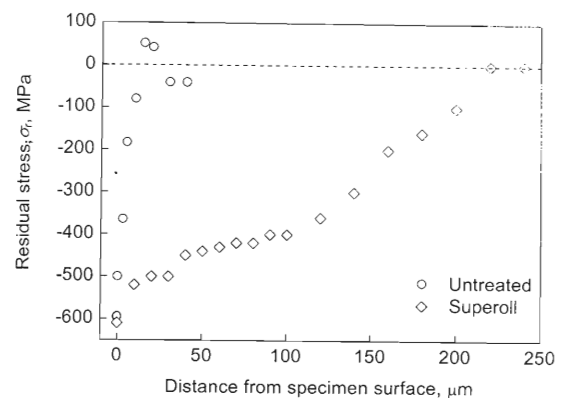


图 2 深层滚压加工前、后试样内残余应力的分布

Fig.2 Residual stress distributions in the specimens before and after deeply rolling

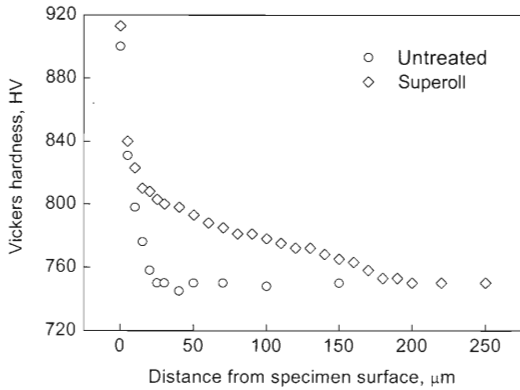


图 3 深层滚压加工前、后试样表面层的 Vickers 硬度分布  
Fig.3 Vickers hardness distributions in surface layer of the specimens tested

加工前、后试样的 Vickers 硬度沿试样深度方向的分布。深层滚压加工前，试样表面的 Vickers 硬度最大，表面硬化层的厚度为 20 μm。深层滚压加工后，试样的表面硬度几乎没有增加，但表面硬化层的厚度大幅度增加，达到 200 μm。

1.2 实验方法

疲劳实验使用了日本材料强度概率模型研究会开发的四连式悬臂梁型旋转弯曲疲劳试验机，在室温空气中进行，加载频率为 52.5 Hz。实验进行到 10<sup>9</sup> 次应力循环。试样折断后，使用扫描电子显微镜 (SEM) 对试样断口上裂纹萌生位置进行观察，使用图像处理设备对内部裂纹的面积进行测量。

2 实验结果

2.1 S-N 曲线

图 4 为深层滚压加工试样的 S-N 曲线。为了与深层滚压加工前的结果进行比较，图中同时给出了深层滚压加工前试样的 S-N 曲线 [4]。如图 4 所示，在高应力幅短寿命区，深层滚压加工试样的 S-N 曲线由裂纹萌生于试样

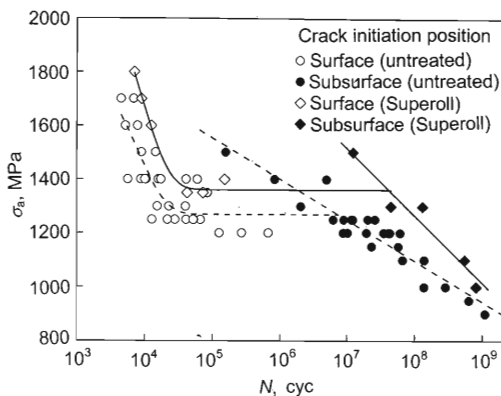


图 4 深层滚压加工前、后试样的 S-N 曲线  
Fig.4 S-N curves for the specimens before [4] and after deeply rolling

表面的实验点 (用◇表示) 拟合而成；在低应力幅长寿命区，深层滚压加工试样的 S-N 曲线由裂纹萌生于试样内部的实验点 (用◆表示) 拟合而成的。两种不同的裂纹萌生机制分别对应着表面和内部破坏的两条 S-N 曲线。其表面破坏的 S-N 曲线向内部破坏转移的应力幅 (表面破坏的疲劳极限) 约为 1350 MPa。在本实验的寿命范围内，没有出现内部破坏的疲劳极限。与深层滚压前的试样相比，深层滚压加工后，萌生表面裂纹试样的疲劳强度有所提高，萌生内部裂纹试样的疲劳强度有较大的提高。

2.2 断口观察

图 5 所示为深层滚压加工试样在高应力幅短寿命区萌生的表面裂纹和该试样断口附近残存的表面研削伤痕。比较图 5a,b 可以判断，表面裂纹的萌生是由试样表面残存的研削伤痕引起的。图 6a 所示为深层滚压加工试样在低应力幅长寿命区出现的内部裂纹。该裂纹呈现为外边界未到达试样表面的椭圆形的“鱼眼”，这一点与未经深层滚压加工试样的断口鱼眼不同，后者一般呈圆形，且鱼眼的外边界直达试样表面 [4]。图 6b 为图 6a 中鱼眼内部的放大图。从图可以看出，疲劳裂纹萌生于试样内部的夹杂物，夹杂物的周围为白色粗糙颗粒区，文献 [4] 将其命名为 GBF (granular-bright-facet)。鱼眼内部的裂纹

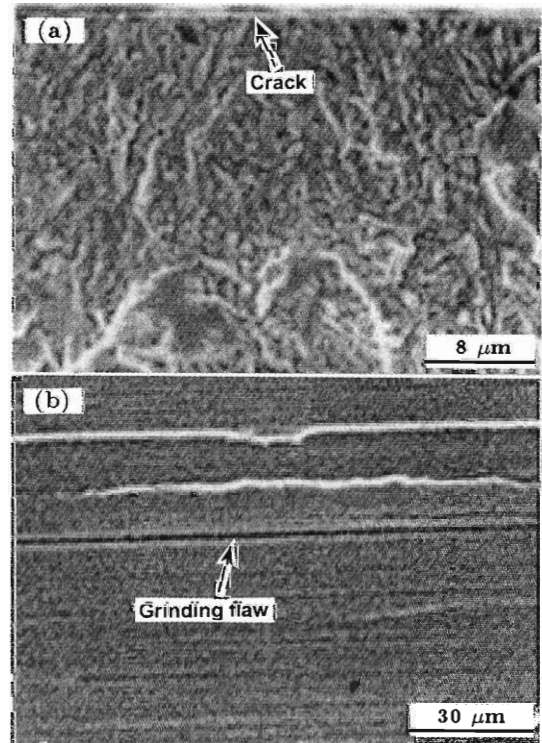


图 5 试样断口处的裂纹及断口附近试样表面上的研削伤痕  
Fig.5 SEM images showing a crack initiated on fracture surface (a) and a grinding flaw near the fracture surface (b) ( $\sigma_a=1600$  MPa,  $N_f = 1.2 \times 10^4$  cyc)

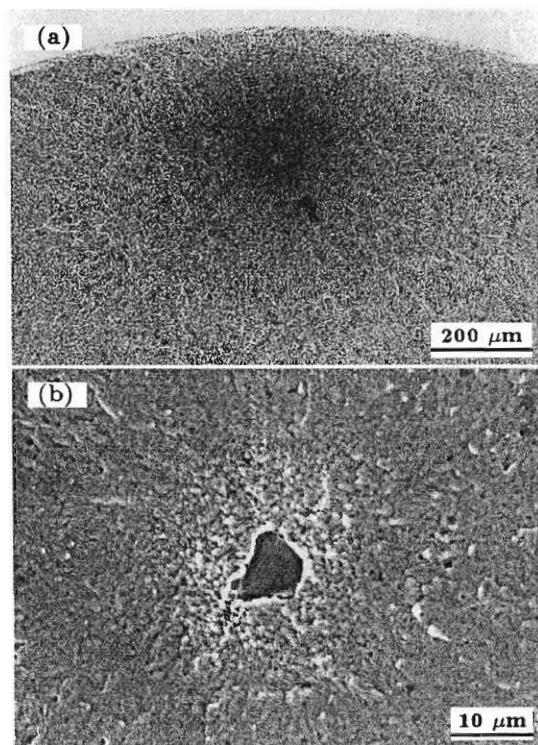


图6 深层滚压试样内部裂纹萌生位置的断口形貌

Fig.6 Fractograph of the deeply rolling sample crack initiated at a fish-eye zone of the interior of sample (a) and high magnified image of the fish-eye zone, showing an inclusion and granular-bright-facet (GBF) zone around the inclusion (b) ( $\sigma_a=1300$  MPa,  $N_f = 4.5 \times 10^7$  cyc)

萌生特征与未经深层滚压加工试样<sup>[4]</sup>的相同。

### 3 内部裂纹萌生位置及初期裂纹尺寸参数

图7为鱼眼的示意图. 为了阐明残余应力和表面硬化层对内部裂纹的萌生和扩展的影响, 对图7内的参量进行了测量, 比较了它们在深层滚压加工前、后的变化.

图8所示为内部裂纹萌生位置处夹杂物的深度  $d_{inc}$  和失效循环数  $N_f$  的关系. 深层滚压加工前, 试样的  $d_{inc}$  在 20—240  $\mu\text{m}$  的范围内分布; 深层滚压加工后,  $d_{inc}$  分布范围变为 280—400  $\mu\text{m}$ , 且裂纹萌生位置向试样内部较深处转移. 两种试样的  $d_{inc}$  与  $N_f$  间没有关联性. 深层滚压加工使试样的裂纹萌生起点向内部转移, 这是由于试样表面附近存在着较深的压缩残余应力分布和硬化层. 将前面测得的残余应力分布深度 200  $\mu\text{m}$  和表面硬化层 200  $\mu\text{m}$  与  $d_{inc}$  分布 (280—400  $\mu\text{m}$ ) 比较后可以看出, 试样的内部裂纹是在压缩残余应力和表面硬化层消失的位置处萌生的. 图9给出了夹杂物深度  $d_{inc}$  与鱼眼高度  $2b$  的关系. 根据断口观察的结果, 深层滚压加工前试样的  $c$  值为零, 深层滚压加工后,  $c$  值在 40—65  $\mu\text{m}$  的范围内分布, 与  $N_f$  无关, 表现为定值. 如图9所示, 深层滚压加

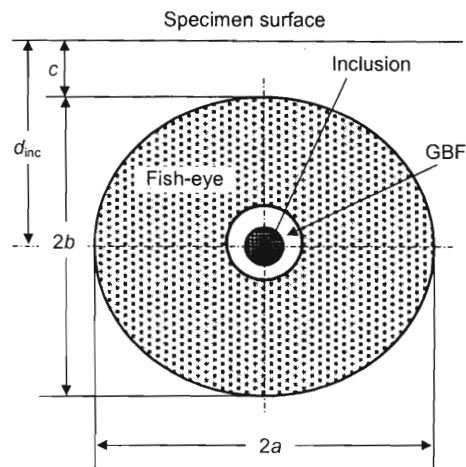


图7 鱼眼尺寸的定义

Fig.7 Definition for size and dimension of fish eye

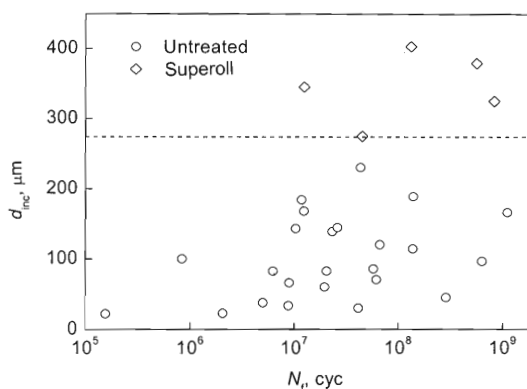


图8 夹杂物的深度  $d_{inc}$  和失效循环数  $N_f$  的关系

Fig.8 Experimental relation between  $d_{inc}$  and  $N_f$

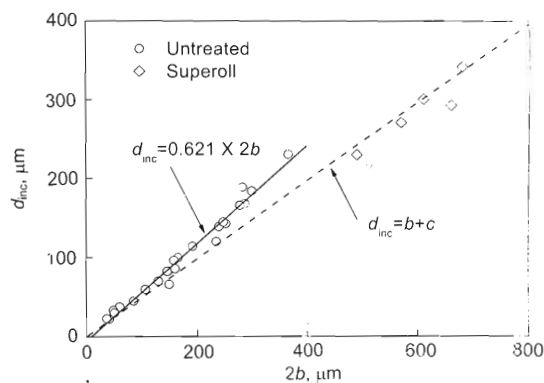


图9 夹杂物的深度  $d_{inc}$  和鱼眼高度  $2b$  的关系

Fig.9 Experimental relationship between  $d_{inc}$  and  $2b$

工试样的  $2b$  值在 490—680  $\mu\text{m}$  的范围分布, 比深层滚压前的  $2b$  (30—370  $\mu\text{m}$ ) 范围的值高, 它随着  $d_{inc}$  值的增加而增加. 另外, 深层滚压加工前萌生次表面裂纹的夹杂物位于鱼眼中心的内侧 (图中虚线的上侧), 深层滚压加工后萌生内部裂纹的夹杂物位于鱼眼的中心 (图中虚线的

位置). 这是由于从夹杂物萌生的裂纹, 受到表面层压缩残余应力的抑制由表面向内部扩展的结果. 以上结果说明表面层压缩残余应力的存在改变了萌生裂纹的位置, 也抑制了裂纹向表面方向的扩展.

图 10 所示为萌生内部裂纹的夹杂物的尺寸参数  $\sqrt{A_{inc}}$  ( $A_{inc}$  是夹杂物的面积) 与应力幅  $\sigma_a$  间的关系. 深层滚压前、后夹杂物的尺寸参数都在 6—15  $\mu\text{m}$  的范围内离散地分布, 平均值约为 9  $\mu\text{m}$ , 可知深层滚压加工对萌生内部裂纹的夹杂物的大小没有影响. 从图 6b 可见, 萌生内部裂纹的夹杂物周围存在 GBF, 将 GBF 看作裂纹, 求出 GBF 的尺寸参数  $\sqrt{A_{GBF}}$  ( $A_{GBF}$  是包括夹杂物在内的 GBF 的面积), 并绘入图 10. 由图可见, 深层滚压前、后 GBF 的大小无明显差异, 均随应力幅的降低而单调地增加. 这说明内部裂纹的萌生阶段不受深层滚压加工的影响.

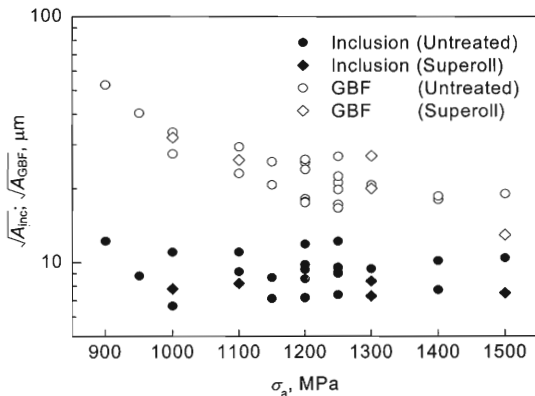


图 10 夹杂物或 GBF 的尺寸参数与应力幅的关系

Fig.10 Experimental relationship between size parameters of inclusion  $\sqrt{A_{inc}}$ , or GBF,  $\sqrt{A_{GBF}}$ , and stress amplitude ( $A$  representing the area)

## 4 讨论

### 4.1 深层滚压前后内部裂纹的萌生和扩展条件

深层滚压前的疲劳破坏是从高应力幅萌生表面裂纹的破坏向低应力幅萌生次表面裂纹的破坏转移<sup>[4]</sup>. 深层滚压加工后, 这种转移现象仍然存在. 不过, 转移后萌生内部裂纹型的疲劳强度显著提高. 通过断裂力学的方法, 可讨论深层滚压加工前、后内部裂纹的萌生和扩展条件.

内部裂纹盟生于夹杂物时, 夹杂物位置处的应力强度因子  $\Delta K$  由式 (1)<sup>[6]</sup> 求出

$$\Delta K = 0.5\sigma_{at}\sqrt{\pi^2 A} \quad (1)$$

式中,  $\sigma_{at}$  为夹杂物位置处的应力幅值,  $\sigma_{at} = \sigma_b - \Delta\sigma_g + \sigma_r$  (其中,  $\sigma_b$  为作用于试样表面的弯曲应力);  $\Delta\sigma_g$  为弯曲应力梯度的变化引起的裂纹萌生位置处的应

力降低量;  $\sigma_r$  为深层滚压加工引起的夹杂物位置处的拉伸残余应力, 约为 35 MPa. 得到  $\Delta K$  与  $N_f$  的关系如图 11 所示. 用同样的方法, 可求出夹杂物周围 GBF 的应力强度因子值  $\Delta K_{GBF}$ , 并绘入图 11 中 (图中的虚线范围对应于文献 [4] 报道的 SUJ2 钢的表面裂纹扩展门槛值  $\Delta K_{th}$ ).

如图 11 所示, 深层滚压加工试样的  $\Delta K_{inc}$  的值在 3—2 MPa·m<sup>1/2</sup> 的范围内分布, 并随  $N_f$  的增加而单调地减少, 与深层滚压加工前的  $\Delta K_{inc}$  相比没有差别. 且该值小于  $\Delta K_{th}$ , 说明内部裂纹是在表面裂纹萌生型的疲劳极限以下的低应力幅的作用下萌生. 另一方面, 深层滚压加工试样的  $\Delta K_{GBF}$  与深层滚压加工前的  $\Delta K_{GBF}$  值同样在 4—5 MPa·m<sup>1/2</sup> 的范围内分布, 表现为定值. 这个值与文献 [5] 报道的 SUJ2 钢在 10<sup>6</sup> 周次前的短寿命区萌生内部裂纹且周围没有 GBF 的夹杂物的  $\Delta K_{inc}$  的值相同 (本文有一例, 图 11 中  $N_f = 1.56 \times 10^5$  的实验点), 这说明深层滚压加工前、后, 在长寿命区, 由夹杂物萌生的内部裂纹经过成长后形成 GBF, 当  $\Delta K_{GBF}$  达到 4—5 MPa·m<sup>1/2</sup> 的范围后, 疲劳裂纹开始扩展. 深层滚压加工前、后, 疲劳裂纹的萌生和扩展条件没有差别. 萌生内部裂纹型的疲劳强度显著地提高, 与深层滚压前、后疲劳裂纹的萌生和扩展条件无关.

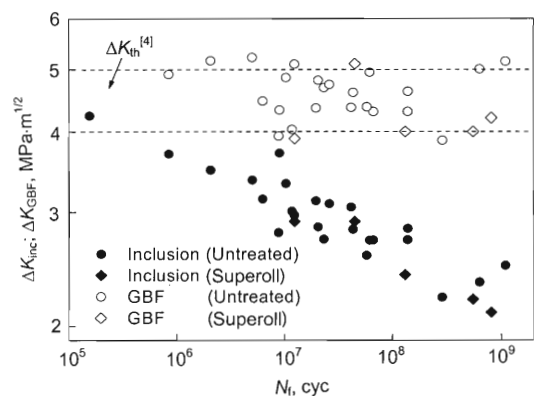


图 11 夹杂物、GBF 的应力强度因子与失效循环数的关系

Fig.11 Experimental relationships between stress strength factor of inclusion,  $\Delta K_{inc}$ , and that of GBF,  $\Delta K_{GBF}$ , and fracture cycle numbers  $N_f$

### 4.2 应力梯度对疲劳强度的影响

图 4 所示的 S-N 曲线图的纵坐标轴是以试样表面的名义应力  $\sigma_a$  表示的, 它不能反映弯曲应力梯度对 S-N 曲线的影响程度. 在只考虑弯曲应力梯度, 而不考虑 35 MPa 的拉伸残余应力影响时, 萌生内部裂纹的夹杂物位置处的应力  $\sigma_{at} - \sigma_r$  与失效循环数  $N_f$  的关系, 如图 12 所示. 深层滚压加工前、后, 材料的疲劳寿命几乎一致. 因此,

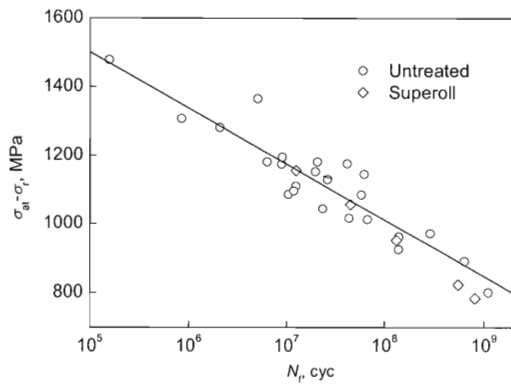


图 12 考虑弯曲应力梯度影响后的 S-N 曲线

Fig.12 S-N curve obtained by considering the effect of bending stress gradient

深层滚压加工带来的超长寿命疲劳强度的提高,主要是弯曲应力梯度引起的.这说明对于轴向加载,深层滚压加工并不能改善实验材料的超长寿命疲劳强度.

#### 4.3 残余应力对裂纹萌生和扩展的影响

从图 4 的 S-N 可以看出,深层滚压加工后,表面裂纹萌生型的疲劳强度有所提高,这是由于表面残余应力层减缓了表面裂纹扩展的结果.分析结果表明,尽管残余应力层的存在抑制了鱼眼向表面的成长,但内部裂纹萌生型的疲劳强度的提高与残余应力层对裂纹扩展的减缓几乎无关.这可能是由于内部裂纹萌生型的疲劳寿命的绝大部分由裂纹萌生阶段占有的缘故<sup>[7]</sup>.

表面改性处理使材料表面层产生压缩残余应力,同时也引起材料内部出现拉伸残余应力.不同的表面改性处理方法,引起不同的残余应力分布.以丸粒 500 μm 的深层喷丸的实验结果为例<sup>[5]</sup>,当表面改性处理在材料内部引起较大的拉伸残余应力时,拉伸残余应力会促进内部裂纹的萌生和扩展,降低内部破坏的疲劳寿命,对于高强度钢,较好的表面改性方法是在材料内部引起较小的拉伸残

余应力值,同时在材料表面产生应力幅值不高的较深的残余应力分布.尽管如此,此种表面改性方法,也只能使裂纹萌生位置向材料内部转移,提高弯曲和旋转弯曲加载下的疲劳强度,而不能从根本上抑制裂纹萌生和有效的减缓裂纹扩展,从而提高材料的疲劳强度.在工业上,对具有表面和内部两种破坏机制的高强度钢施行表面改性处理时,这一点非常重要.

#### 5 结论

(1) 深层滚压加工后与加工前一样,在高应力幅短寿命区发生表面裂纹萌生的疲劳破坏,在低应力幅长寿命区发生内部夹杂物引起的内部裂纹萌生的疲劳破坏,这两种破坏形式对应着两条 S-N 曲线.与加工前相比,表面裂纹萌生型的疲劳强度有些提高;内部裂纹萌生型的疲劳强度有较大的提高.

(2) 深层表面改性使长寿命区的疲劳裂纹萌生位置向没有压缩残余应力和表面硬化层影响的区域转移,在这个区域里,存在着弯曲应力梯度和拉伸残余应力,它们分别使旋转弯曲的疲劳强度有增加或降低的趋势.当拉伸残余应力较小时,弯曲应力梯度可以改善旋转弯曲的疲劳强度.

#### 参考文献

- [1] Bathias C. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 1999; 22: 559
- [2] Bathias C, Drouillac L, Le Francois P. *Int J Fatigue*, 2001, 23 (Suppl): 143
- [3] Ochi Y, Msaki K, Matsumura T. *Int J Fatigue*, 2001; 23: 441
- [4] Shiozawa K, Lu L T, Ishihara S. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 2001; 24:781
- [5] Shiozawa K, Lu L T. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 2002; 25: 813
- [6] Murakami Y, Endo M. *Int J Fatigue*, 1994; 16: 163
- [7] Lu L T, Shiozawa K, Morii Y, Nishino S. *Acta Metall Sin*, 2005; 41: 1066  
(鲁连涛, 盐泽和章, 森井佑一, 西野精一. 金属学报, 2005; 41: 1066)