

# 螺纹滚压强化疲劳断口的分析

张秀林<sup>1)</sup> 金铮<sup>2)</sup>

1)北京科技大学应用科学学院,北京,100083 2)北京科技大学材料科学与工程学院

**摘要** 利用(SEM)观察了30CrMnSiNi<sub>2</sub>A钢经螺纹滚压的疲劳断口与未经螺纹滚压的疲劳断口,研究和分析螺纹滚压强化对30CrMnSiNi<sub>2</sub>A钢制造的零件螺纹部位疲劳寿命的影响.结果表明,该钢滚压后的疲劳极限提高了58.6%,疲劳源减少,疲劳扩展区明显增大,疲劳条带间距变窄.初步探讨了滚压强化的机理.

**关键词** 螺纹滚压强化,疲劳断口,30CrMnSiNi<sub>2</sub>A钢

**中图分类号** TB302.3

螺纹滚压强化是利用钢的弹塑性变形性质,使用一个与螺纹根部圆角的形状与几何尺寸完全相同的滚轮,在零件旋转时,对螺纹根部圆角处施加一定的压力,使该处金属表面产生一个弹塑性变形层而达到强化螺纹的1种方法<sup>[1]</sup>.滚压后的变形层内由于形变造成很高的宏观残余压应力,在变形层内位错密度升高和位错组态的改变,以及滚压后螺纹根部圆角表面粗糙度的降低,致使零件承受交变载荷时,疲劳强度大幅度提高,断口的形貌发生变化,从而延长了工件的使用寿命<sup>[2~4]</sup>.

## 1 试验方法

试验钢的化学成分为(质量分数/%) : C-0.3, Mn-1.17, Si-1.11, P-0.113, S-0.007, Cr-1.10, Ni-1.66, Fe平衡.

试验钢主要力学性能为:  $\sigma_b = 1\ 659\ \text{MPa}$ ,  $\sigma_s = 1\ 306\ \text{MPa}$ ,  $\delta = 11.6\%$ ,  $\Psi = 47.4\%$ . 试样加工前,材料先经过预备热处理( $620 \pm 10$ ) $^{\circ}\text{C}$ , 50 min, 随炉升温到 $900\ ^{\circ}\text{C}$ 保温1 h再在硝酸盐槽内 $230\ ^{\circ}\text{C}$ 等温处理1 h,空冷.最后将其加工成带螺纹疲劳试样.

螺纹滚压强化是在北京航空材料研究所自制的滚压机上进行的,滚压工艺参数是利用对比疲劳优选法求出.滚压与未滚压对比疲劳试验是在MTS疲劳试验机上进行的.试验条件为 $f = 10\ \text{Hz}$ ,  $R = 0.1$ , 试验温度为室温.疲劳试验后利用S-360扫描电镜观察了断口.

## 2 试验结果与分析

(1)图1给出了30CrMnSiNi<sub>2</sub>A钢螺纹滚压与未滚压疲劳 $S - \lg N$ 曲线.由图可以看出:从高应力到低应力螺纹滚压强化的疲劳寿命比未滚压的疲劳寿命均得到大幅度提高,疲劳强度

极限 ( $\sigma_{0.1}$ ) 从未经滚压的 280 MPa 提高到滚压强化后的 460 MPa, 提高了 58.6%; 在低应力条件下的滚压效果更明显。

(2) 疲劳断口的特征: (a) 图 2 为疲劳断口的全貌, 图中 A, B, C 为未滚压从高应力到低应力的断口, a, b, c 为滚压强化后从高应力到低应力的断口. 由图可见: 宏观断口的特征表现为两组断口上均有明显的 3 个区域即疲劳源区、疲劳裂纹扩展区、瞬时断裂区. 随着外加应力载荷的减少, 在疲劳断口上疲劳裂纹扩展区所占的面积增大, 而在相同应力条件下经螺纹滚压强化的断口上疲劳扩展区的面积与未经螺纹滚压的相比增大了, 相应的瞬时断裂区所占面积

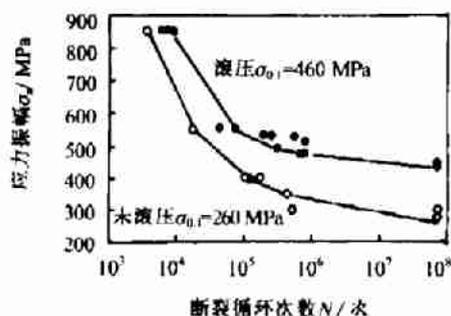


图1 试样滚压与未滚S-N曲线

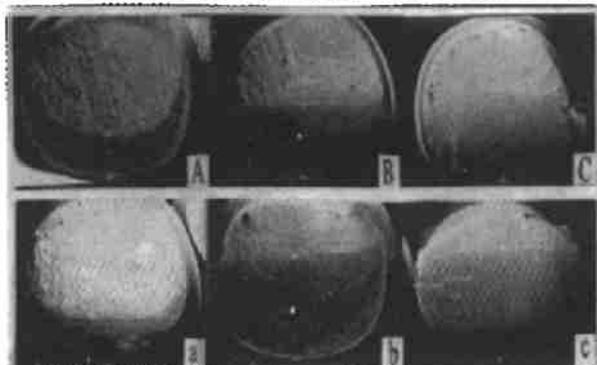


图2 疲劳断口全貌  
A, B, C为未滚压, a, b, c为滚压

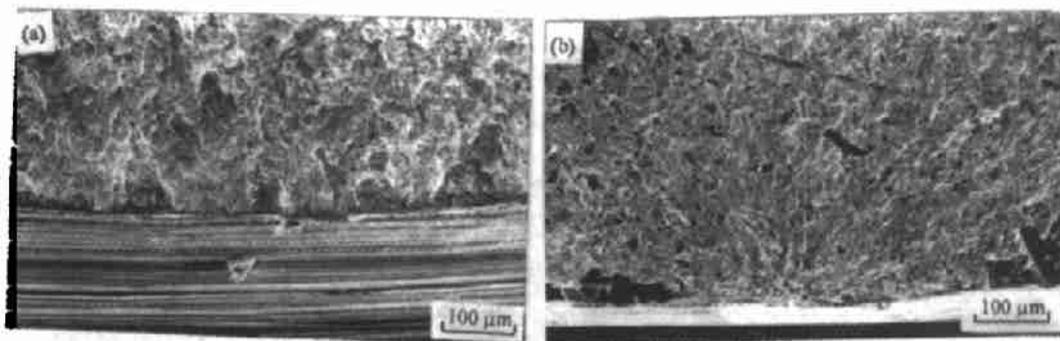


图3 疲劳源的形貌  
a高应力下的多疲劳源; b低应力疲劳源数目明显减少

减小了, 见表 1. (b) 疲劳源区的观察, 经螺纹滚压强化和未经滚压强化的断口均为多疲劳源. 随着外加应力载荷的增加疲劳源的数目逐渐增多, 见图 3. 经过多个样品的观察我们发现在相同应力条件下经滚压强化的断口疲劳源的数目要少些. 疲劳源多数产生于加工刀痕处, 或产生于次表面处. (c) 在强化层内距断口边缘 0.35 mm 的相同距离处观察各断口的疲劳条带的特征如图 4 所示. 图中 A, a 是在高应力下滚压强化与未滚压强化断口疲劳条带的形貌, B, b 是中应力下, C, c 是在低应力的对比照片. 由照片可以看出滚压后的断口疲劳条带的间距窄, 疲劳裂纹的深度浅, 应力越低, 这一现象越明显. (d) 在疲劳断口瞬时断裂区, 经螺纹滚压强化的试样与未经螺纹滚压强化的试样均具有切窝特征, 见图 3.

疲劳断口的特征表明, 螺纹滚压强化以后裂纹源的数目减少, 疲劳扩展区的面积增大, 疲劳条带间距变窄等, 这些都意味着在滚压强化后, 裂纹萌生的时间延长, 裂纹扩展速率降低,

延长了疲劳寿命,这与疲劳试验  $S-\lg N$  曲线是相一致的.

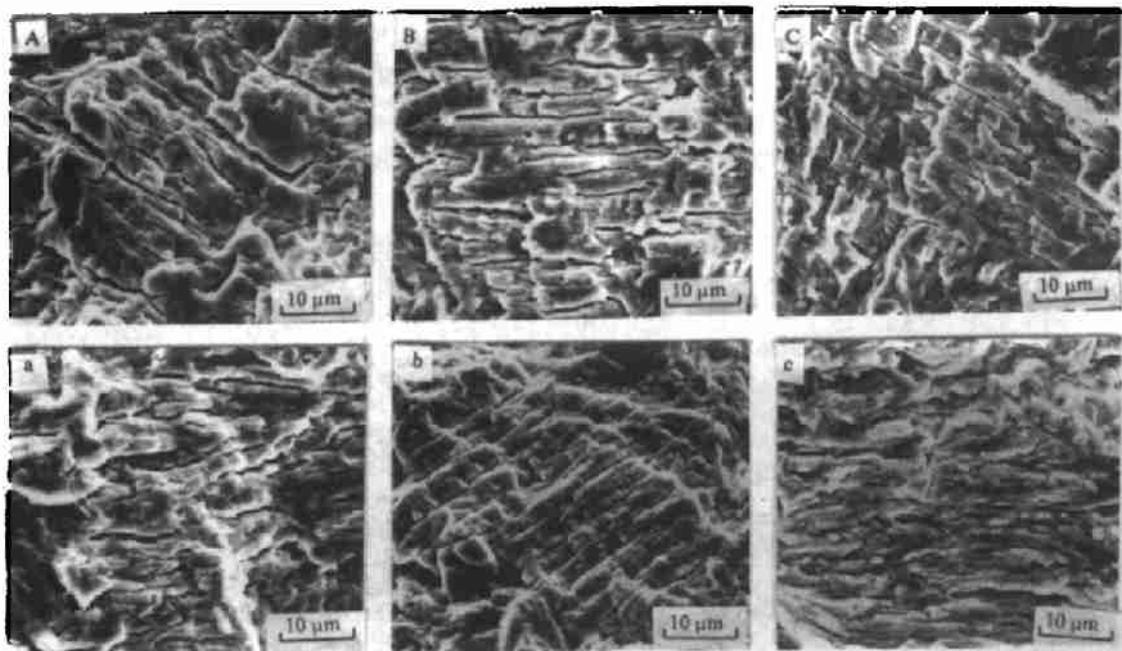


图4 疲劳扩展区的疲劳条纹比较  
A, a为高应力; B, b为中应力; C, c为低应力下滚压

表1 疲劳扩展区宽度 mm

试样	应力振幅 $\sigma_a$ / MPa		
	850	550	320
未滚压试样	2.29	3.80	4.77
滚压试样	2.33	5.38	5.85

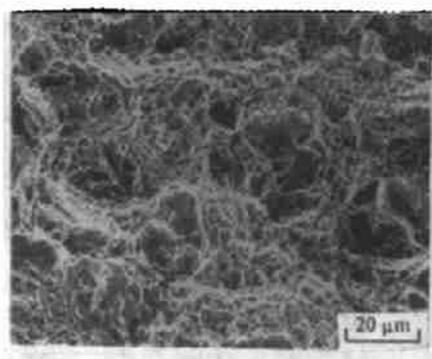


图5 瞬间区韧窝断口

### 3 讨论

(1)在疲劳断裂过程中,大多数情况下疲劳裂纹开始发生在构件表面应力集中处,如微裂纹,界面等,成为疲劳裂纹源.螺纹表面进行滚压处理后改善了表面的粗糙度,减少了疲劳裂纹源,提高了材料对疲劳裂纹的形核抗力,从而提高了疲劳寿命.

(2)螺纹表面滚压处理后,产生的残余应力叠加到疲劳载荷上,残余应力对材料疲劳性能的影响与叠加在循环应力幅上的静机械应力的影响方式相同,如果表面的残余应力是压缩的可以提高疲劳抗力,而螺纹滚压在强化层内正是产生压应力,因此有利于疲劳性能提高.

(3)微观组织结构对疲劳性能的影响,在螺纹滚压强化过程中,由于表面金属强烈变形,引起金属表层位错的增殖,位错的运动以及位错之间的交互作用,并形成很大的微观内应力,

提高了强化层内的屈服强度. 疲劳过程是金属晶体往复滑移过程, 屈服强度增加就意味着滑移困难, 表面不容易形成挤出和侵入沟, 更不容易萌生裂纹. 当有裂纹存在时, 裂纹是通过裂纹尖端锐化和钝化过程向前扩展, 当裂纹深度不超过强化层深度时, 在裂纹尖端存在的高密度位错和很高微观内应力阻碍裂纹的锐化和钝化, 因而起到了降低裂纹扩展的作用, 提高了材料的疲劳寿命.

## 4 结论

经滚压强化的螺纹与未经滚压强化的螺纹的疲劳断口分析表明, 滚压后的螺纹断口、疲劳扩展区明显增大, 疲劳条带间距变小, 正是由于这些微观特征的变化, 才导致了宏观疲劳寿命的提高.

### 参考文献

- 1 宋德玉, 高文, 赵振业, 张伟. 内螺纹滚压强化对超高强度钢疲劳性能的影响. 航空学报, 1995, 16(5): 619
- 2 余宗森, 田中卓. 金属物理. 北京: 冶金工业出版社, 1982. 338
- 3 胡世兴. 机械失效分析手册. 成都: 四川科技出版社, 1989. 314
- 4 何家文, 胡奈赛, 张定铨. 残余应力集中及其对疲劳极限和短裂纹扩展的影响. 金属学报, 1992, 28(9): A404

## Analysis of Screw Rolling Strengthening on Fatigue

Zhang Xiulin<sup>1)</sup> Jin Zheng<sup>2)</sup>

1) Applied Science School, UST Beijing, Beijing 100083, China 2) Material Science and Engineering School, USTB

**ABSTRACT** The effect of roll press strengthening on the fatigue fracture of bolts which made of 30CrMnSiNi<sub>2</sub>A steel was studied. The experimental result shows that the endurance limit of the bolts is increased about 58.6% by roll press strengthening, the fatigue fracture appearance is changed, the number of the origin region of the fatigue crack is reduced, the area of the crack growth zone is increased, and the width of the fatigue striation is decreased. Finely, the mechanism of roll press strengthening was discussed.

**KEY WORDS** screw rolling strengthening, fatigue fracture, 30CrMnSiNi<sub>2</sub>A steel