

# 表面完整性对 30CrMnSiNi2A 钢疲劳极限的影响

高玉魁, 刘天琦, 殷源发, 李向斌

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 采用喷丸强化和振动冲击强化两种表面形变强化方法改变 30CrMnSiNi2A 钢的表面完整性, 用升降法测定了  $10^7$  循环周次下光滑试样的疲劳极限。试验结果表明, 振动强化使疲劳极限提高 11%, 喷丸强化使疲劳极限提高 16%。

关键词: 表面完整性; 疲劳极限; 喷丸强化; 振动强化

中图分类号: TG111.8; TG178

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2002)02-0021-03

表面改性技术具有投入少、收效大、适应性强等特点, 受到了国内外学者和专家的青睐, 并在工程上得以广泛应用。表面改性主要是通过改善表面完整性提高材料和构件的疲劳断裂抗力和应力腐蚀开裂抗力以及抗高温氧化等使用性能<sup>[1]</sup>。金属材料的疲劳、应力腐蚀、高温氧化等力学、物理和化学性能, 很大程度上取决于材料的表面完整性。所谓表面完整性是指表面粗糙度、表层残余应力、表层显微组织、表层致密度和表面类裂纹等状态的完好程度<sup>[2]</sup>。30CrMnSiNi2A 钢是航空工业上广泛使用的低合金超高强度钢, 具有很好的塑性和韧性, 并有良好的抗疲劳性能, 主要用于制造重要的承力结构件<sup>[3]</sup>。本文采用喷丸强化和振动强化方法改变 30CrMnSiNi2A 钢的表面完整性, 并研究了表面完整性对疲劳极限的影响。

## 1 材料和试验方法

试验采用 30CrMnSiNi2A 钢, 化学成分 (wt%) 为: C 0.32, Mn 1.08, Si 1.08, S 0.002, P < 0.015, Ni 1.63, Cr 1.11, Mo 0.16, V 0.09, Fe 余量。热处理规范为: 900 °C 保温 40min, 230 °C 等温 60min, 230 °C 回火 150min。用 5 倍拉伸试样在室温下进行拉伸试验, 试验结果为:  $\sigma_{0.2} - 1141$  MPa,  $\sigma_b - 1653$  MPa,  $\delta_5 - 14.6\%$ ,  $\psi - 47.4\%$ 。

在 BVK-2500 设备上振动强化试验, 在气动式喷丸机上进行表面喷丸强化试验。振动强化工艺参数: 振幅 4.7mm, 频率 21Hz, 对比试样挠度 1.0mm; 喷丸强化工艺参数: 喷丸强度  $f_A = 0.30$ mm, 表面覆盖率 100%。表面强化处理试样

和磨加工后试样的残余应力在 X-3000 应力测定仪上进行测定, 测定条件是采用 CrK $\alpha$  靶, X 光管管压 30kV, X 光管管流 6.6mA, 准直器直径  $\phi 2$ mm, 衍射晶面为 (211)。用 X-300 衍射仪测定了表面的残余奥氏体含量。

三点弯曲疲劳试样尺寸为 150mm  $\times$  25mm  $\times$  8mm, 在 PLG-100C 高频疲劳机上进行疲劳试验, 试验振动频率 110Hz, 应力比  $R = 0.1$ , 用升降法<sup>[4]</sup>测定  $10^7$  循环周次下的疲劳极限。表面形貌在 JSM-5600LV 扫描电镜上进行观察, 表面粗糙度在 TL-10 型表面轮廓测量仪上进行测定。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 表面强化处理表面粗糙度和表面形貌

表面振动强化和表面喷丸强化以及磨加工的表面粗糙度如表 1 所示。喷丸强化略增加表面的显微起伏, 表面振动强化降低了表面的显微起伏程度。表面磨加工、表面振动强化和表面喷丸强化的表面形貌如图 1 所示。表面粗糙度对材料的静强度几乎没有多大影响, 但对疲劳强度却有非常明显的影响, 疲劳强度和疲劳寿命随表面粗糙度的降低而增高。此外表面粗糙度对疲劳强度的影响还与材料的强度有关, 材料强度越高, 表面粗糙度对疲劳强度的影响越大。

表 1 表面粗糙度

Table 1 Variation of surface roughness

Surface treatment	Surface roughness Rz/ $\mu$ m
Grinding	1.60~ 2.50
Vibration peening	1.48~ 2.10
Shot peening	2.23~ 2.50

### 2.2 表面强化处理表面层残余应力场

磨加工和表面强化处理试样的残余应力沿表面层的分布如图 2 所示。磨加工试样表面层的残

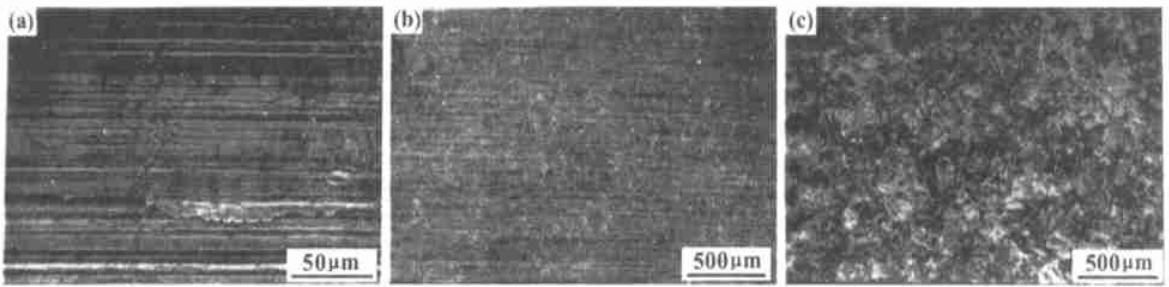


图 1 表面形貌

(a) 磨加工试样表面; (b) 振动强化试样表面; (c) 喷丸强化试样表面

Fig. 1 Surface topography

(a) grinded specimen; (b) vibration peened specimen; (c) shot peened specimen

余应力场深度较浅且残余压应力数值较低, 而振动强化和喷丸强化的残余应力场比较深而且残余压应力数值较大。喷丸强化与振动强化相比残余应力场比较深, 数值比较大, 这有利于提高疲劳极限和改善疲劳性能<sup>[5]</sup>。残余应力场特征参数有表面残余应力  $\sigma_{r,s}$ , 最大残余应力  $\sigma_{r,max}$ ,  $\sigma_{r,max}$  距表面的深度  $\delta_c$  和残余压应力深度  $\delta_0$  (表 2)。由图 2 和表 2 可知, 表面处理规范不同所产生的残余应力场特征迥然不同: 表面磨加工虽然存在残余压应力但残余压应力场深度很浅, 仅为 20 $\mu\text{m}$  左右。表面振动强化和表面喷丸强化后表面残余压应力分别增加到 740MPa 和 846MPa, 而且残余压应力场深度增加到 200 $\mu\text{m}$  以上。

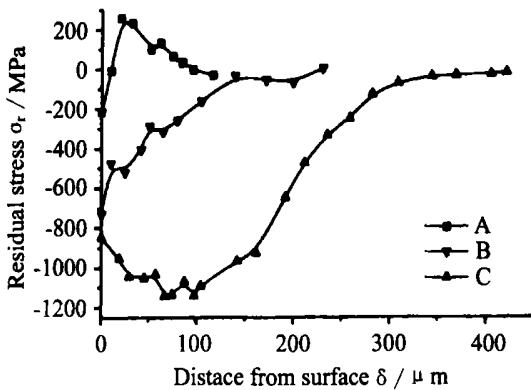


图 2 残余应力场分布

Fig. 2 Residual stress distribution along surface layer of specimens

表 2 残余应力曲线的特征值

Table 2 Characteristics of residual stress curves

	$\sigma_{r,s}$ / MPa	$\sigma_{r,max}$ / MPa	$\delta_c$ / $\mu\text{m}$	$\delta_0$ / $\mu\text{m}$
A	- 215	- 215	0	13
B	- 740	- 740	0	300
C	- 846	- 1158	78	500

### 2.3 疲劳性能

采用升降法测定了不同表面强化规范  $10^7$  周次下的疲劳极限(图 3)。

由升降图计算各种规范下疲劳试样在  $10^7$  周

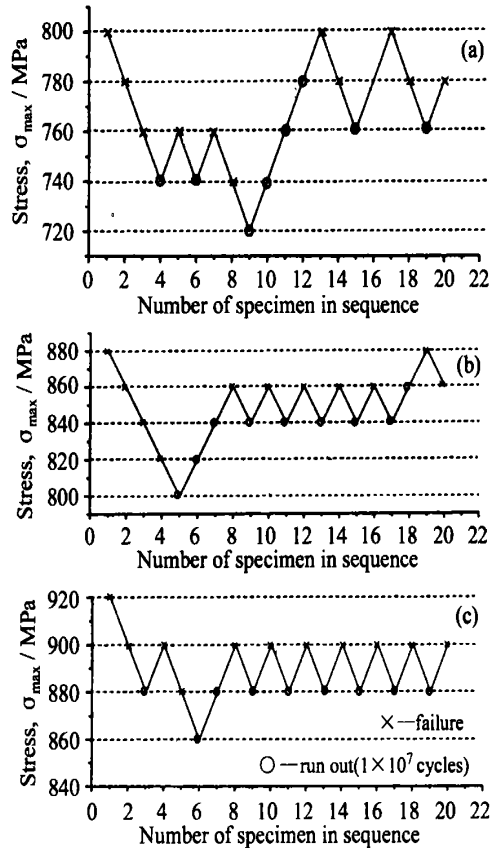


图 3 升降法测定的  $1 \times 10^7$  周次下的疲劳极限 (a) 磨加工试样; (b) 振动强化试样; (c) 喷丸强化试样

Fig. 3 Fatigue limit for  $1 \times 10^7$  cycles determined by up-and-down method (a) grinded specimen; (b) vibration peened specimen; (c) shot peened specimen

次下的疲劳极限如下:

(1) 表面磨加工试样的疲劳极限为  $\sigma_w = 763 \text{ MPa}_0$

(2) 表面振动强化试样的疲劳极限为  $\sigma_w = 847 \text{ MPa}_0$

(3) 表面喷丸强化试样的疲劳极限为  $\sigma_w = 887 \text{ MPa}_0$

表面振动强化使疲劳极限提高了 11%, 表面喷丸强化使疲劳极限提高了 16%。另外由图 3 还可以看出, 三条曲线试验数据的分散性大不相同, 表面磨加工试样的分散性最大, 表面振动强化试样的分散性次之, 而表面喷丸强化试样的分散性最好。试验数据的相对分散性用变异系数  $\gamma$  来表示:

$$\gamma = S / \bar{X} \quad (1)$$

其中  $S$  表示疲劳极限的标准差,  $\bar{X}$  表示疲劳极限的平均值。  $\gamma$  越大, 分散性越大。三条曲线测定的疲劳极限的相对分散性变异系数  $\gamma$  分别为 0.0377, 0.0232 和 0.0085。由此可见, 喷丸强化不仅可以提高疲劳寿命和疲劳极限, 而且分散性较小, 可显著提高可靠性。

此外, 表面形变强化如喷丸强化和振动强化等可使表面层产生形变从而诱发或促使表面层发生相变, 如亚稳态的奥氏体转变为马氏体。本文采用 X 射线衍射方法测定了表面的残余奥氏体含量, 磨加工试样表面残余奥氏体 8%, 振动强化表面 5%, 喷丸强化表面 4%。由于马氏体具有比奥氏体高的强度, 所以表面层马氏体转变属于组织强化。

表面完整性是体现表面状态的一个综合参数, 疲劳性能的提高是表面完整性得以改善的体现。以上是表面完整性对疲劳性能影响的定性分析, 关于表面完整性对疲劳性能的定量化研究, 需要采取一定的方法(数学、金属学和晶体学)和计算机模拟将各个因素单独的影响作用因子定量化才能进行深入细致的研究。这方面工作有待进行深入研究。

### 3 结 论

(1) 表面完整性的改善是提高疲劳极限的主要原因, 通过引入表层残余压应力和改善表面粗糙度及发生相变, 疲劳性能得以改善。

(2) 振动强化使 30CrMnSiNi2A 材料在  $10^7$  循环周次下的疲劳极限提高 11%, 喷丸强化使疲劳极限提高 16%。

#### 参考文献:

- [1] 高玉魁. 化学热处理对结构钢表面疲劳极限影响的定量化研究[D]. 河北: 燕山大学, 2000.
- [2] 李金桂. 现代表面工程设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [3] 赵振业. 合金钢设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [4] COLLINS J N. Failure of materials in mechanical design [M]. New York, 1981.
- [5] 高玉魁, 殷源发, 李向斌, 等. 喷丸强化对 0Cr13Ni8Mo2Al 钢疲劳性能的影响[J]. 材料工程, 2001(12): 46-48.

## Influence of surface integrality on fatigue limit for 30CrMnSiNi2A steel

GAO Yu-kui, LIU Tian-qi, YIN Yuan-fa, LI Xiang-bin

(Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract:** The changes of surface integrality caused by shot peening and vibration peening were investigated and its influence on fatigue limit of 30CrMnSiNi2A steel for  $10^7$  cycles was determined. Due to the local plastic deformation, residual stresses are developed and the surface topography is changed. Results on the influence of shot peening and vibration peening on 30CrMnSiNi2A steel are compared. The results indicate that the fatigue endurance limit of the shot-peened specimens is higher than the corresponding limit of the virgin specimens by about 16% and the fatigue limit of vibration-peened specimens is higher than that of virgin specimens by about 11%. The reason why fatigue limit is improved is that surface integrality is modified by mechanical surface treatment such as shot peening and vibration peening.

**Key words:** surface integrality; fatigue limit; shot peening; vibration peening