

喷丸强化对 0Cr13Ni8Mo2Al 钢疲劳性能的影响

Influence of Shot Peening on Fatigue Property for 0Cr13Ni8Mo2Al Steel

高玉魁，殷源发，李向斌，刘天琦（北京航空材料研究院，北京 100095）

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

（Institute of Aeronautical Materials，Beijing 100095，China）

摘要：研究了表面喷丸强化后表面残余应力、表面粗糙度和表面层残余压应力场对 0Cr13Ni8Mo2Al 钢疲劳性能的影响。结果表明：0Cr13Ni8Mo2Al 钢经喷丸强化后，在表面层残余压应力场的作用下疲劳裂纹源由表面被“驱赶”到表面强化层下，疲劳寿命得到显著提高。

关键词：喷丸；残余应力；疲劳裂纹源

中图分类号： TG 142 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-4381 (2001) 12-0046-03

Abstract: The influence of surface residual stress, surface roughness and residual compressive stress field induced by shot peening on fatigue properties of 0Cr13Ni8Mo2Al steel was studied. The results reveal that the shot peening improves the fatigue properties, and the fatigue crack sources are pushed to the region beneath the hardened layer, and fatigue life is significantly increased.

Key words: shot peening; residual stress; fatigue crack sources

0Cr13Ni8Mo2Al 是沉淀强化马氏体不锈钢，具有高强度和高硬度以及优良的抗腐蚀性能，而且塑性好以及无明显的各向异性等优良特性，在航空工业上具有广阔的应用前景，可用来制造高强度的大截面尺寸构件^[1]。机械零部件在使用过程中经常发生失效事故，其主要表现为疲劳断裂和应力腐蚀开裂^[2,3]，因此必须通过表面强化改善材料的疲劳性能和提高其应力腐蚀抗力。工程上已有了多种表面强化工艺，如表面冷作变形、表面化学热处理、表面离子注入、表面激光处理等^[4]，其中应用最广泛的是表面喷丸强化，它具有设备简单、操作方便、节能省时、成本低廉和效果显著适应面广等优点。本工作研究 0Cr13Ni8Mo2Al 钢表面喷丸强化优化工艺和表面喷丸强化对疲劳性能的影响。

1 试验材料与试验方法

试验材料采用 0Cr13Ni8Mo2Al 马氏体不锈钢，热处理规范为 925 ℃×1h 固溶+ 540 ℃×4h 空冷。其化学成分（质量分数，%）为 0. 031C，< 0. 10Mn，0. 10Si，0. 0072P，0. 0016S，12. 44Cr，8. 53Ni，2. 24Mo，1. 06Al，< 0. 10Cu，0. 0018N，余为 Fe。室温拉伸性能：σ_b 为 1481MPa，σ_{0.2} 为 1432 MPa，ψ 为 57.9 %，δ₅ 为 11.2 %。

喷丸强化规范如表 1 所示，对不同强化规范下喷丸处理后的表面粗糙度进行测定。在室温下进行光滑

试样旋转弯曲疲劳试验，试验机型号为 PQ 6-2，频率为 3000r/ min，在 900MPa 应力水平下对比经不同喷丸强化规范进行表面强化处理后的疲劳寿命。在室温下用 JSM-5600LV 型电子扫描显微分析仪观察疲劳断口形貌并确定疲劳裂纹源位置。

表 1 喷丸强化工艺参数

Table 1 Shot peening regime

工艺序号	喷丸强度 f _A	弹丸材料和名义尺寸	表面覆盖率和喷丸时间
喷 A	0. 30mm	铸钢，Φ0. 79mm	100%，40s
喷 B1	0. 20mm	铸钢，Φ0. 50mm	100%，40s
喷 B2	0. 20mm	铸钢，Φ0. 50mm	200%，120s
喷 C1	0. 15mm	玻璃，Φ0. 35mm	100%，40s
喷 C2	0. 15mm	玻璃，Φ0. 35mm	200%，120s
喷 D	0. 10mm	玻璃，Φ0. 15mm	100%，60s

未喷丸试样表面的机加工残余应力层用电解抛光法加以去除，喷丸强化试样采用逐层电解抛光，并在 300 型 X 射线应力仪上测定残余应力沿层深的分布，试验测试条件：Cr-Kα 靶，衍射面（211），管流 3mA，管压 25kV，转角 0~45°，采用半高宽法定峰。

2 试验结果与讨论

喷丸强化前后表面粗糙度的变化如下表 2 所示，经喷丸后表面粗糙程度有所增加，而且随着弹丸名义

尺寸和喷丸强度的增加表面粗糙度 R_a 值明显增加, 但名义尺寸最小的弹丸喷出的试样的表面粗糙度 R_a 值与磨加工试样表面非常接近。

表 2 表面粗糙度试验结果

Table 2 Surface roughness

规范	未喷 U	喷 A	喷 B1	喷 B2	喷 C1	喷 C2	喷 D
$R_a/\mu\text{m}$	0.9~1.1	3.5~4.8	1.8~2.3	2.1~2.25	1.25~1.4	1.2~1.35	0.8~1.3

喷丸强化前后的残余应力如图 1 所示。可知喷丸前试样仅在 $40\mu\text{m}$ 内存在残余压应力而且最大压应力为 -196MPa , 经喷丸强化后表面层残余应力不仅均为压应力而且残余压应力场比较深。采用大弹丸高强度喷丸时残余压应力场较深(约 $230\mu\text{m}$), 而小弹丸低强度喷丸时残余压应力场深度变小(约 $100\mu\text{m}$)。另外喷丸强化试样的最大残余压应力数值接近为一常数(-1220MPa), 与喷丸强化规范无关。

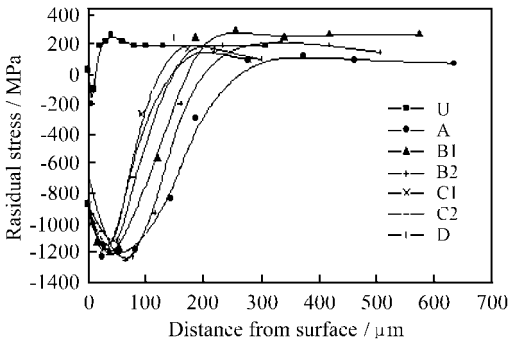


图 1 试样喷丸强化前后的残余应力场
Fig. 1 Residual stress field of specimens before and after shot peening

不同喷丸强化规范处理后光滑试样在 900MPa 应力水平下的室温疲劳寿命试验结果如表 3 所示。由表可知喷丸强化效果最佳工艺规范为 D 规范, 在此规范下喷丸强化的试样疲劳寿命比未喷丸强化试样的寿命提高了 2 个数量级。

喷丸强化和未喷丸强化试样疲劳断裂断口形貌示于图 2。可以看出, 未喷丸强化试样的疲劳裂纹源多个而且位于试样表面, 经喷丸强化后疲劳裂纹源为单源且位于次表面层。

喷丸强化时在表面层产生了激烈的变形, 一方面在表面层引入了残余压应力场, 另一方面引起表面粗糙度的变化, 这些变化对疲劳性能均有影响。

无论采用何种喷丸强化规范进行强化, 其疲劳寿命都得到了提高(表 3)。喷丸强化后表面粗糙度 R_a 数值的增加应该降低疲劳寿命, 所以喷丸强化提高疲劳

寿命的原因应归于表面层有利的残余压应力场。

未喷丸强化疲劳试样的疲劳裂纹源在表面而且

表 3 寿命对比疲劳试验结果

Table 3 Results of fatigue test

试样规范	未喷 U	喷 A	喷 B1	喷 B2
循环周次	2.73×10^4	1.05×10^5	1.83×10^5	2.79×10^5
试样规范	喷 C1	喷 C2	喷 D	
循环周次	6.27×10^5	1.24×10^6	2.13×10^6	

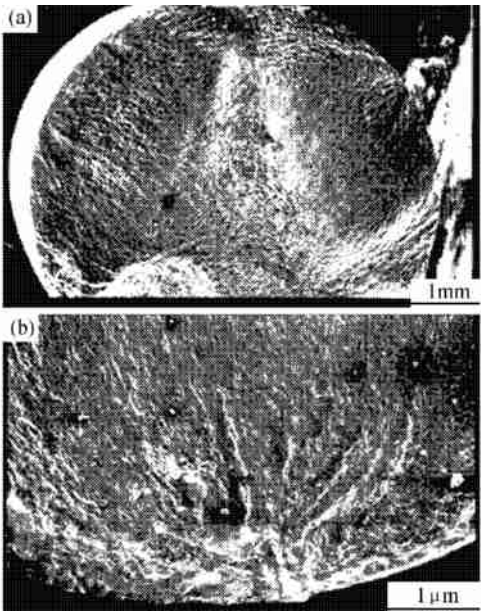


图 2 未喷丸 (a) 和喷丸 (b) 强化试样的疲劳断口
Fig. 2 Fractographs of fatigue fracture surfaces
(a) unpeened specimen; (b) peened specimen

多元化, 喷丸强化后疲劳试样的疲劳裂纹源在表面层下的拉应力区而且为单源(见图 2)。文献[5]指出了表面强化后疲劳裂纹源在次表面层的主要原因是表面层残余压应力场的作用, 因为表面层残余压应力的存在使得外加拉应力与残余压应力叠加后的最大“有效拉应力”不在表面而在次表面层的残余拉应力区。但疲劳裂纹源要在最大“有效应力”处的次表面层萌生其临界应力比在表面萌生时要大, 因为表面晶粒内位错受约束小容易滑移和开动, 而在次表面层位错受周围晶粒约束和需要周围晶粒的协调所以不易开动故临界应力高。疲劳裂纹源萌生于表面层下时的临界应力被称为内部疲劳极限(σ_{wi}), 相对而言疲劳裂纹源在表面产生时的临界应力称为表面疲劳极限(σ_{ws}), 研究表明两者存在着如下的关系^[5-7]:

$$\sigma_{wi} = (1.35 \sim 1.40) \sigma_{ws} \tag{1}$$

喷丸强化引入的表面层残余压应力对改善疲劳

性能来说非常有利,属于强化因素;但喷丸强化时造成的表面粗糙度增加却是不利的,是弱化因素。表面粗糙度的增加相当于增加了缺口的敏感度,加剧了材料局部的应力集中,这会大大降低材料的疲劳性能。

由表 2 和表 3 可知,喷丸强化后表面粗糙度对 0Cr13Ni8Mo2Al 钢疲劳性能的影响比较大,喷丸强化后 R_a 数值越大疲劳寿命越低,不同的喷丸强化规范下疲劳寿命相差一个数量级,因此表面粗糙度的改善对提高该材料的疲劳寿命非常重要。另外残余压应力场深(如 A 和 B 规范)的试样的疲劳寿命因为表面粗糙度较大反而降低,这表明材料的塑性较好表面粗糙度对喷丸强化规范敏感,表面粗糙度对疲劳性能的影响大,因此对该材料进行喷丸强化时必须综合考虑表面层残余压应力和表面粗糙度的影响。

3 结论

(1) 0Cr13Ni8Mo2Al 钢喷丸强化须兼顾表面层残余压应力和表面粗糙度的影响,喷丸强度低时喷丸强化效果较好。

(2) 喷丸强化引入的残余压应力场将疲劳裂纹源由表面“驱赶”到次表面层,显著提高了疲劳寿命。

参考文献

- [1] 赵振业.合金钢设计[M].北京:国防工业出版社,1999.
- [2] 刘锁.金属材料的疲劳性能与喷丸强化工艺[M].北京:国防工业出版社,1977.
- [3] 束德林.金属力学性能[M].北京:机械工业出版社,1987.
- [4] 朱荆璞.金属表面强化技术[M].北京:机械工业出版社,1989.
- [5] 高玉魁.化学热处理对结构钢件表象疲劳极限影响的定量化研究[D].燕山大学硕士学位论文,2000.
- [6] 李金魁.金属喷丸强化理论研究[D].哈尔滨工业大学博士学位论文,1989.
- [7] 王声平.表面强化金属疲劳极限的研究[D].哈尔滨工业大学博士学位论文,1994.

收稿日期:2001-04-16 修订日期:2001-09-28

作者简介:高玉魁(1973-),男,硕士,助理工程师.联系地址:北京市 81 信箱 4 分箱(邮编 100095)

(上接第 31 页)

(2) 由于受 Al 熔化及热量的产生和耗散的影响,燃烧波蔓延模式在 Fe 含量为 20wt% 时出现复杂的多点波动燃烧;随着 Fe 含量增加,波动程度减弱。

参考文献

- [1] Margolis S B. The transition to nonsteady deflagration in gasless

combustion[J].Prog Energy Comb Sci,1991,17:135-162.

- [2] Munir Z A. Mechanism and characteristics in the process of reaction synthesis[J].Metal Trans,1992,23A:7-12.
- [3] Strunin D V, Strunina A G, Rumanon E N, et al. Chaotic reaction wave with fast diffusion of activator[J].Physi Lett,1994,192A:361-363.
- [4] Munir Z A. Self-propagating exothermic reaction[J].Mater Sci Rep,1989,3:277-358.
- [5] 张卫方.自蔓延高温合成 TiC-Al₂O₃-Fe 金属陶瓷及梯度功能材料研究[D].哈尔滨工业大学博士学位论文,1999:25-40.
- [6] 张卫方,韩杰才,陈贵清,等. Fe 含量对燃烧合成 TiC-Al₂O₃-Fe 复合材料的影响[J].中国有色金属学报,1999,9(Suppl.):178-182.

收稿日期:2001-08-03

作者简介:赵爱国(1970-),男,博士后,高级工程师.联系地址:北京市 81 信箱 4 分箱(邮编 100095)。

激光冲击强化提高构件疲劳强度

美国空军研究实验室材料和制造分部的试验表明,一种典型的风扇叶片高循环疲劳强度为 690MPa,受小的外来物损伤其疲劳强度降低到 140MPa。然而,这种叶片进行激光冲击强化(LSP)后,受到较大的外来物损伤后其疲劳强度仍保持为 690MPa。据称,GE 公司已为 B-1 轰炸机 F101 发动机的 20000 多片叶片及 F-16 战斗机 F110 发动机的 2000 多片叶片进行 LSP 处理,结果叶片失效率、检验周期和维修成本降低,效果明显。

(全宏声)

冷喷涂技术的特点和应用

冷喷涂技术也称为气体动力喷涂,最初由前苏联在 20 世纪 80 年代中期发展,美国于 20 世纪 90 年代中期开始研究。其主要特点是:喷射温度低于被喷射材料的熔化和软化温度;被喷射材料颗粒尺寸在 1~50μm 范围;颗粒速度在 300~1200m/s 范围。普遍认为其冶金原理是高速冲击使颗粒和底层表面的薄金属氧化物膜破碎实现原子结构结合。实际操作中,颗粒借助于马赫数 2~4,滞止压力 1~3MPa 的超音速喷气流(空气、氮、氩或其混合物)进行喷射。冷喷涂主要优点为:避免氧化和不希望的相,保持颗粒材料原有性能,残余应力低,可喷涂热敏材料及异种材料,高密度,高热导率和高电导率,喷射速度高等。2000 年, Ktech Corp 推出了美国第一个商用计算机控制的冷喷涂机。美国多家公司计划用冷喷涂技术生产汽车和飞机用的新型韧性涂层,在梯度涂层中连接异种金属,制造小型层合件,以及进行低温涂覆。

(全宏声)