

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.04.006

疲劳载荷对17CrNiMo6喷丸强化层残余应力与组织的影响*

孙寒骁, 朱有利, 侯 帅, 王燕礼, 王 伟

(装甲兵工程学院 装备维修与再制造工程系, 北京 100072)

摘 要: 高强度渗碳钢17CrNiMo6常用喷丸强化工艺来改善抗疲劳性能, 但疲劳载荷会使喷丸强化层的残余应力与组织发生改变, 削弱了强化效果。采用X射线衍射方法研究了其残余应力、半高宽和残余奥氏体随疲劳载荷周次的变化规律, 同时研究了喷丸前后表面形貌、硬度和组织的变化。结果表明, 喷丸与二次喷丸强化层残余应力场在疲劳载荷前100周次内发生了应力松弛, 松弛幅度分别为50%与33%, 之后基本保持稳定。半高宽随载荷周次的增加分别下降了5%与7%, 而残余奥氏体含量变化不大。此外, 喷丸处理增加了材料表层残余压应力, 细化了晶粒尺寸, 使疲劳寿命提高了11%; 二次喷丸可进一步增加材料表层残余压应力, 细化晶粒尺寸并改善表面形貌使材料疲劳寿命提高了23%。因此在评估喷丸工艺强化效果, 预测喷丸处理后零部件的疲劳寿命时, 宜采用松弛后的残余应力作为衡量参数。

关键词: 喷丸; 17CrNiMo6; 残余应力; 应力松弛; 组织结构; 疲劳载荷

中图分类号: TG668

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2016)04-0043-06

Effects of Fatigue Load on Residual Stress and Microstructure of 17CrNiMo6 Shot Peening Strengthened Layer

SUN Han-xiao, ZHU You-li, HOU Shuai, WANG Yan-li, WANG Wei

(Faculty of Maintenance and Remanufacture Engineering, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

Abstract: High-strength carburized steel 17CrNiMo6 is often strengthened by shot peening to enhance its fatigue resistance. However, the effects of shot peening can be diminished by fatigue load which can change the residual stress and microstructure of the shot peening strengthened layer. The variations in the residual stress, the full width at half maximum (FWHM) and the retained austenite were investigated by XRD under the fatigue load, and the variations in the surface roughness, hardness and microstructure before and after the shot peening were also studied. Results show that 50% of stress relaxation occurs in the shot peening strengthened layer and 33% in the re-shot peening strengthened layer during the first 100 cycles. Then the residual stress stays stable in the following circles. The FWHM declines by 5% and 7% with the increase of load cycles, but the content of the residual austenite changes slightly. While the shot peening enhances the surface compressive residual stress, refines the grain size and increases the fatigue life by 11%, the re-shot peening can further enhance the surface compressive residual stress, refine the grain size, reduce the surface roughness, and increase the fatigue life by 23%. Therefore, it is appropriate to use the residual stress after relaxation as a parameter to evaluate the effects of shot peening and to forecast the fatigue life of the parts strengthened by shot peening.

Keywords: shot peening; 17CrNiMo6; residual stress; stress relaxation; microstructure; fatigue load

收稿日期: 2016-03-21; 修回日期: 2016-07-05; 基金项目: *北京市自然科学基金(3093027)

通讯作者: 朱有利(1962—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 表面强化技术和疲劳与断裂理论; Tel: (010)6671 7168; E-mail: zhuyi2011@sina.com

网络出版日期: 2016-07-21 12:00; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20160721.1200.012.html>

引文格式: 孙寒骁, 朱有利, 侯帅, 等. 疲劳载荷对17CrNiMo6喷丸强化层残余应力与组织的影响[J]. 中国表面工程, 2016, 29(4): 43-48. SUN H X, ZHU Y L, HOU S, et al. Effects of fatigue load on residual stress and microstructure of 17CrNiMo6 shot peening strengthened layer[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(4): 43-48.

0 引言

17CrNiMo6是一种德国研发的高强度渗碳齿轮用钢, 目前已被广泛应用于采矿、运输、锻造等工业领域^[1], 但仍未纳入国标, 许多基本性能资料缺乏^[2], 亟待进一步的研究。特别是该钢用于重载齿轮轴时所受载荷幅值较大, 对其抗疲劳性能有较高的要求, 因此常采用喷丸工艺提高其抗疲劳性能, 但尽管如此, 断轴现象仍时有发生。

喷丸强化技术的强化机理主要有引入残余应力和改善材料组织结构两个方面, 但有研究表明^[3]在外载荷的作用下残余应力会发生大幅衰退, 用施加载荷前的残余应力来计算材料的疲劳寿命明显高于试验结果, 而采用松弛后的残余应力来计算却符合的较好, 即残余应力松弛削弱了其抗疲劳强化效果并对寿命预测造成干扰。目前, 学者们对喷丸强化的研究主要集中在喷丸工艺的优化^[4]、残余应力场以及组织结构变化上^[5], 对喷丸强化件在服役中的性能变化关注较少; 对17CrNiMo6钢的研究主要集中在热处理工艺^[6]、组织结构优化^[7]及失效分析^[8]上, 有关17CrNiMo6喷丸强化层受疲劳载荷影响文献较少。因此, 文中对17CrNiMo6钢喷丸强化后随载荷循环周次变化的残余应力、半高宽和残余奥氏体变化开展了研究和分析, 同时对比了不同喷丸工艺下该钢的表面形貌、硬度与组织变化情况, 为该材料作为高速重载齿轮材料的喷丸强化应用提供依据。

1 试验材料与方法

试验材料17CrNiMo6齿轮钢的成分如表1所示, 热处理制度为920 ℃强渗、扩散两段法渗碳处理, (855±15) ℃淬火, (190±20) ℃回火。其力学性能为: 抗拉强度1 410 MPa, 屈服强度1 300 MPa, 延伸率12%, 收缩率58%, 冲击韧性 A_{KV} =96 J。如图1所示按照GB/T 3075—2008要求加工成长106 mm, 工作直径 Φ =5 mm, 表面粗糙度0.4 μ m的棒状疲劳试样。

表 1 17CrNiMo6齿轮钢的化学成分				
Table 1 Chemical component of 17CrNiMo6				(w%)
Element	C	Si	Mn	P
Content	0.15-0.20	≤0.40	0.40-0.60	≤0.035
Element	S	Cr	Mo	Ni
Content	≤0.035	1.50-1.80	0.25-0.35	1.40-1.70

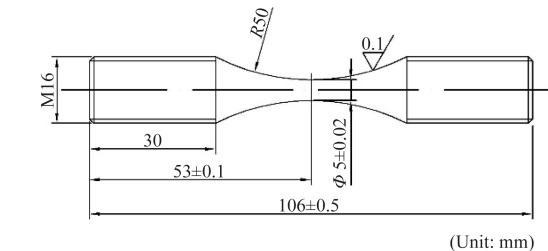


图 1 17CrNiMo6疲劳试样示意图
Fig. 1 Schematic diagram of 17CrNiMo6 fatigue specimen

将疲劳试样通过气动喷丸机进行喷丸强化, 弹丸为钢丝切丸, 直径为0.8 mm, 硬度为55~60 HRC。使用X-350A型残余应力测试仪进行残余应力、残余奥氏体、半高宽的测量。测量方法为: 采用Cr靶 K_{α} 辐射, 管电压28 kV, 电流8 mA, 应力常数-318 MPa, 测量采用侧倾固定 Ψ 法, 定峰使用交相关定峰法, 扫描角度 2θ 角为铁素体 161° 至 151° 、奥氏体 134° 至 124° , 步距 0.1° , 计数时间0.5 s, 衍射晶面分别为(211)与(220)面, 准直管直径1 mm, 选择 0° 、 24° 、 35° 和 45° 这4个 Ψ 角防止织构对测量准确性的干扰。在室温下使用PWS-100疲劳试验机进行疲劳试验, 最大应力750 MPa, 应力比0.1。用记号笔在疲劳试样工作段直径最小处一环绕一周对称标记若个点, 当试样在疲劳试验机上分别经历了4, 16, 64, 100, 500, 2 000, 10 000和50 000周次的循环载荷时, 将试样取下置于残余应力测试仪对标记位置进行表面残余应力、半高宽、残余奥氏体的测量。然后重新夹装于疲劳试验机上继续进行疲劳试验。采用饱和氯化钠溶液通过电解抛光的方法对试样表面固定位置剥层, 利用尖头螺旋测微器与残余应力测试仪测量沿深度方向残余应力场的分布。

使用MICROMET-6030显微硬度计沿径向从表面到基体测量显微硬度, 加载载荷0.1 kg, 保持时间15 s。使用Mahr MarSurf PS1粗糙度测量仪、Olympus金相显微镜测量表面粗糙度, 观察金相。

2 分析与讨论

图2、图3分别为17CrNiMo6疲劳试样表层残余应力场随疲劳循环载荷周次增加的变化情况以及试样经历不同循环载荷周次后残余应力场的分布情况。其中喷丸试样所受喷丸强度为0.6 A, 表面覆盖率为125%, 二次喷丸试样为在一次喷丸工艺的基础上继续施加0.4 A的喷丸强度, 覆盖率

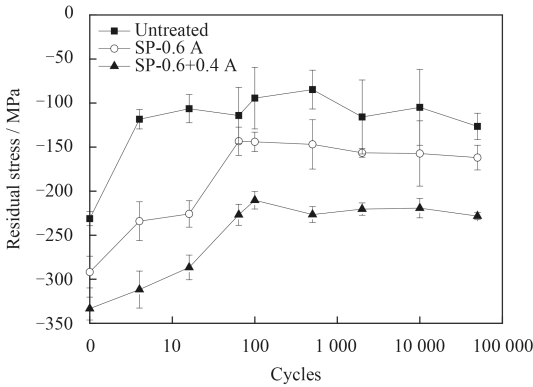


图 2 循环载荷周次作用下试样表面残余应力的变化

Fig. 2 Surface residual stress changes with fatigue loading cycles for specimens

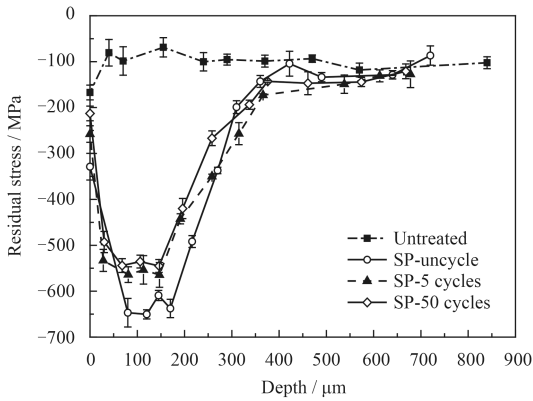


图 3 不同周次下试样残余应力与层深的变化

Fig. 3 Variation of residual stress with depth for different fatigue cycles number

100%。喷丸处理前后的表面残余压应力平均值分别为-220和-290 MPa，二次喷丸后为-330 MPa。疲劳试样在制作过程中为取得较低的表面粗糙度而经历了打磨抛光等机加过程故而使原始试样表面产生一定幅值但深度较浅的残余压应力层^[9]。但由图3可见其压应力场深度仅为约50 μm且最大应力值位于表面，而喷丸后的残余压应力最大可达-650 MPa且位于距表层约100 μm深处。由图2和图3可以看出，一次、二次喷丸试样表层残余压应力在加载初期迅速下降，直到约100周次后保持稳定。而磨削试样的表层残余压应力下降的更快，约4周次之后便保持稳定。一次喷丸试样松弛后的残余应力约为-150 MPa，二次喷丸后约为-220 MPa，磨削试样为-100 MPa，分别相对于各自初始状态松弛了约50%、33%、50%。喷丸试样的最大残余应力亦由初始的-650 MPa松弛至5周次的-565 MPa以及50周次的-545 MPa，即整个喷丸强化层的残

余应力场都在随载荷循环次数的增加而松弛。这种加载初期的残余应力松弛被称作静载松弛^[10]，对材料的抗疲劳性能有非常不利的影响。试样由于有各种缺陷而存在应力集中系数较大的“薄弱区”，这些区域的微观屈服强度 σ_{ms} 远小于材料整体的屈服强度 σ_b ，当材料受到的外力小于 σ_b 但大于 σ_{ms} 时，材料整体上未屈服但在“薄弱处”已经局部屈服^[11]。喷丸处理后的残余应力松弛就是由于材料在疲劳载荷的作用下在局部屈服区产生了微观裂纹，残余压应力在微观裂纹处释放，造成了残余应力松弛^[12]。即这种残余应力的静载松弛是一种损伤性松弛，它不仅会降低材料表面的残余压应力，其所产生的微裂纹往往还是疲劳裂纹萌生源，会减少裂纹萌生寿命，这都对喷丸强化件的抗疲劳效果有不利影响。此外，相较于一次喷丸，二次喷丸引入的残余压应力幅值更大且松弛幅度较低。这是由于多了一道喷丸工艺使材料发生了更剧烈的塑性变形，因此残余压应力幅值更大。此外，二次喷丸选取的喷丸强度较低，有利于改善试样表面形貌，原始试样表面粗糙度为 $Ra=0.155\text{ }\mu\text{m}$ ，喷完后粗糙度升高到 $Ra=2.903\text{ }\mu\text{m}$ ，经二次喷丸后又降低到 $Ra=1.794\text{ }\mu\text{m}$ 。较低的表面粗糙度能够降低试样表面的应力集中水平^[13]，使试样在受到循环载荷时更不易产生微观裂纹，因而更不易松弛。

图4为循环载荷作用下疲劳试样表面半高宽随循环次数的变化，一般而言加工硬化程度增加，位错密度增大，微观残余应力增大，晶粒细化都会导致半高宽增加^[14]。由图可知试样表面半高宽由未喷丸的3.4°增加到喷丸后的3.8°和二次喷丸后

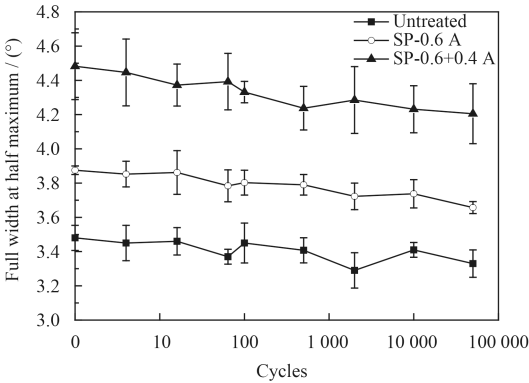


图 4 循环载荷作用下疲劳试样表面半高宽变化

Fig. 4 Surface full width at half maximum changes with fatigue cycles for fatigue specimens

的4.5°, 分别增加了10%和30%。这表明喷丸使试样表面产生了塑性变形使位错密度增加、晶粒细化、微观残余应力增大, 二次喷丸更加剧了这些变化, 这有利于改善材料的抗疲劳性能。此外, 随着循环次数的增加, 半高宽呈现出轻微的下降趋势, 喷丸试样由3.8°逐步降低至3.6°, 二次喷丸试样由4.5°降低至4.2°, 未喷丸试样由3.5°降低至3.3°, 分别下降了5%、7%、6%。由于疲劳载荷仅为750 MPa, 远低于材料屈服强度, 很难使材料产生大塑性变形或者改变材料的晶粒尺寸, 所以半高宽的降低应从位错密度、微观残余应力的变化来考虑。位错密度 De 与半高宽 β 存在如下关系^[15]:

$$De = \frac{\beta^2}{9b} \quad (1)$$

式中 b 为伯氏矢量。因此半高宽的降低反映出试样的位错密度随循环次数的增加而逐步降低。这是由于一方面在疲劳载荷的作用下, 位错发生移动, 异号位错相互抵消; 另一方面位错在移动后塞积于晶界、夹杂物等处, 在载荷的作用下产生微裂纹, 使工件表层造成损伤^[15], 即位错的湮灭与微裂纹的产生导致了半高宽随疲劳循环次数的增加而减小, 这与图2残余压应力随疲劳循环次数增加而松弛的现象相吻合。

喷丸试样经过不同循环周次后半高宽沿层深的变化如图5所示, 半高宽沿层深先减少, 于约100 μm 深处达到最小值, 然后逐渐增加至400 μm 深度保持稳定。这是由于表层与次表层都发生了塑性应变, 但次表层应变幅较低, 只发生了循环软化, 表层塑性应变幅值较高, 在发生循环软化之后又发生了循环硬化, 造成了半高宽先减小后

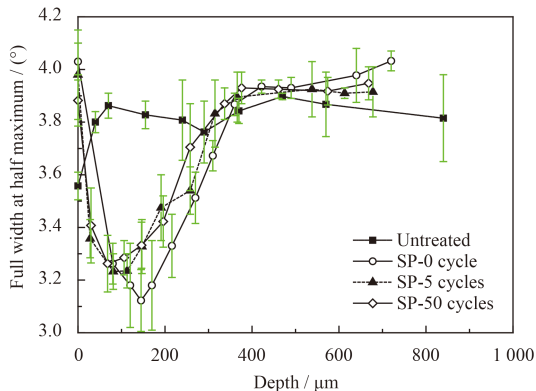


图5 不同周次下试样半高宽与层深的变化

Fig. 5 Variation of full width at half maximum with depth for different fatigue cycles number

增大的现象^[16]。

奥氏体相作为一种不稳定相在受到塑性变形时会转变为马氏体, 喷丸导致的塑性变形就使疲劳试样表面残余奥氏体平均含量由喷丸前的7.09%降低至喷丸后的5.61%, 平均降低了约20%。如图6所示为残余奥氏体随疲劳载荷的变化图, 可以看出残余奥氏体含量在疲劳载荷加载的过程中几乎没有明显的改变, 这是由于材料表面经喷丸强化所产生的细晶层组织结构较为稳定, 即使在大应力的疲劳载荷作用下仍然不会发生较大改变^[17]。这表明经喷丸强化后的材料在服役过程中尽管残余压应力会发生松弛, 但表层组织强化层始终会起到抑制裂纹扩展的作用。

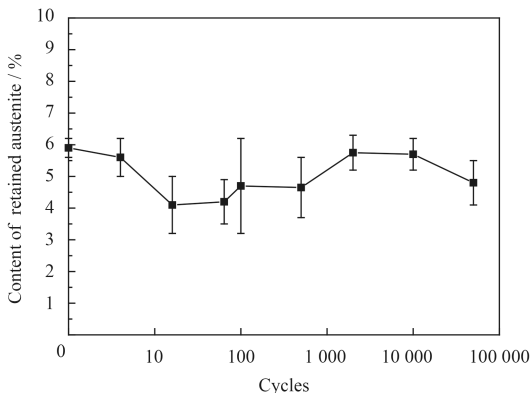


图6 循环载荷作用下疲劳试验表面残余奥氏体变化

Fig. 6 Surface retained austenite changes with fatigue cycles for fatigue specimens

此外, 残余奥氏体测量设备只能测量X射线光斑范围内的奥氏体含量, 受奥氏体分布的影响较大, 经喷丸处理后的17CrNiMo6中奥氏体含量只有5%左右, 需要设备具有较高的精度, 造成了所测得的奥氏体含量有所波动。

将原始疲劳试样、喷丸和二次喷丸试样沿径向切开, 测得的硬度沿层深变化情况如图7所示。喷丸与二次喷丸硬度最大值分别为500、520 $\text{HV}_{0.1}$ 且均处于表面并沿深度方向逐渐减小, 最终在约0.3~0.4 mm深度附近稳定在430 $\text{HV}_{0.1}$ 左右, 表层硬度较基体分别提高了约15%、20%。硬度的提高是由于材料的塑性变形, 晶粒细化造成的, 二次喷丸由于塑性应变幅值更大而获得了更大的硬度。图中硬度是在约300~400 μm 深处保持稳定, 这说明喷丸强化层影响深度约为300~400 μm , 这与图3、图5中残余应力、半高宽在约400 μm 深度

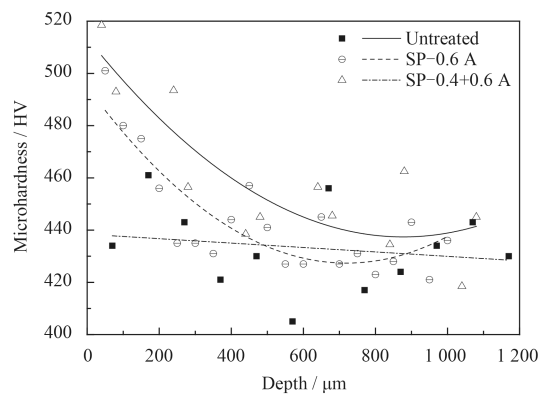
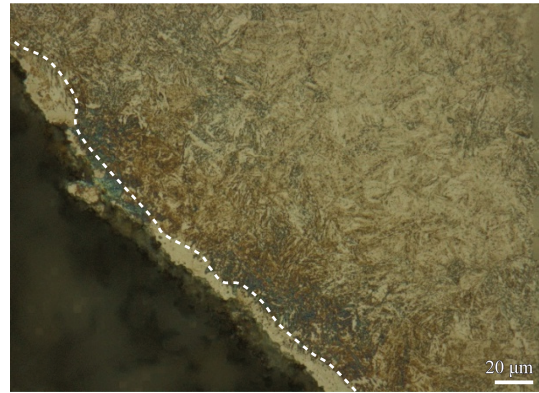


图 7 显微硬度沿疲劳试样的层深变化

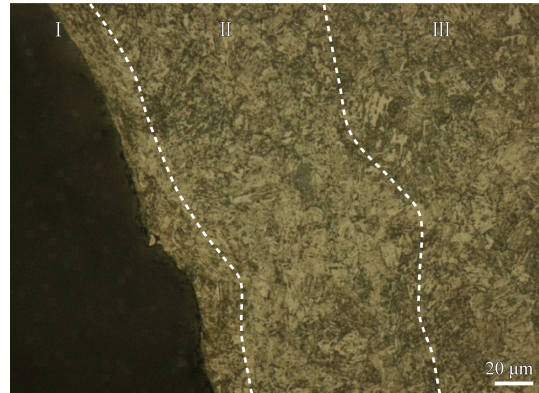
Fig. 7 Microhardness changes with depth of fatigue specimens

后保持稳定的情况相吻合。

图8为喷丸前后材料沿径向剖开后的金相图，可以看到，喷丸前的材料表层较为平滑，晶粒大小较为均匀，且有一层白亮层，白亮层是试样在机加过程中磨削抛光所产生的。而喷丸后的表面则起伏凹凸不平，这是由于喷丸时弹丸冲击使材料产生塑性变形所留下的弹坑并使白亮层消失。此外，喷丸后材料的组织结构由表面沿深度方向



(a) Before shot peening



(b) After shot peening

图 8 17CrNiMo6表层金相组织

Fig. 8 Surface microstructure of 17CrNiMo6

可大致分为 I 强化区、II 过度区、III 基体区 3 个区域。基体区域组织结构与未喷丸试样无异，强化区约 20 μm，区域内的晶粒尺寸比基体小很多，并沿过渡区逐渐变大直到基体区恢复原本的晶粒尺寸。这与前文残余应力、半高宽沿层深的分布情况大致吻合。并且该区域晶粒尺寸、位错密度等较为稳定^[17]，文中半高宽与奥氏体随循环周次的变化情况亦佐证了这一观点。

图9为通过最大应力为750 MPa应力比0.1的拉-拉疲劳试验对比了未喷丸、一次喷丸、二次喷丸 3 种工艺处理的17CrNiMo6疲劳寿命，结果表明：相对于未喷丸，喷丸与二次喷丸疲劳寿命分别提高了约11%与28%。喷丸工艺引入的残余压应力场与组织强化提高了17CrNiMo6疲劳寿命，二次喷丸因能够强化一次喷丸的残余压应力场、组织结构与表面形貌能进一步提高疲劳寿命。

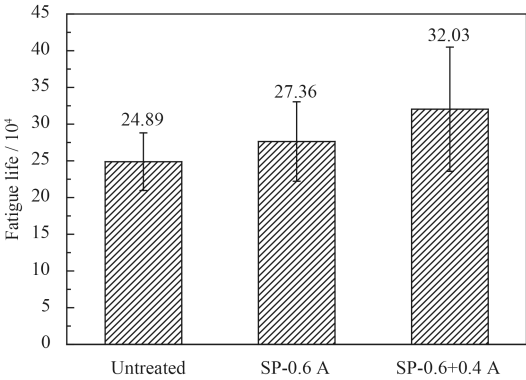


图 9 不同工艺处理17CrNiMo6疲劳试样的疲劳寿命

Fig. 9 Fatigue life of 17CrNiMo6 specimens with different treatment

上述表明，喷丸强化工艺可在17CrNiMo6表层形成一层兼具残余压应力场与组织细化的喷丸强化层，达到提高疲劳寿命目的。其中组织细化层较为稳定，外部疲劳载荷仅能对其中的位错密度产生轻微影响。但残余应力场受其影响巨大，不论喷丸还是二次喷丸工艺，喷丸强化层的残余应力均在早期就迅速松弛了。因此在喷丸强化试样的整个疲劳寿命周期内起到主要抗疲劳作用的是始终稳定的组织细化层与松弛后的残余压应力。在评估17CrNiMo6轮齿轴喷丸工艺强化效果以及对其疲劳寿命进行预测时，一方面要采用齿轮轴服役一段时间后松弛稳定的残余应力数值而非松弛前的残余应力作为参数；另一方面组织细化的强化效果同样不可忽略。

3 结 论

(1) 17CrNiMo6喷丸后的整个残余压应力场在循环载荷的作用下都会发生应力松弛, 松弛主要发生在前100周次内, 松弛幅值约为50%, 100周次后基本保持稳定。因此应采用稳定后的残余应力作为评价喷丸工艺及寿命预测的参数。

(2) 喷丸处理后的17CrNiMo6半高宽沿层深先减小后增大, 在疲劳循环载荷的作用下表层随循环次数的增加而略微减小。

(3) 喷丸强化会使17CrNiMo6表层部分奥氏体转变为马氏体, 强化层组织结构较为稳定, 在疲劳循环载荷作用下奥氏体含量没有明显变化。

(4) 对17CrNiMo6进行喷丸强化处理能引入较高的残余压应力场, 并使材料表层产生晶粒细化, 从而提高材料的疲劳寿命。二次喷丸能够在一次喷丸的基础上进一步改善残余压应力场、组织结构与表面形貌, 从而进一步提高疲劳寿命。

参考文献

- [1] PANG Z R, YU S J, XU J W. Study of effect of quenching deformation influenced by 17CrNiMo6 gear shaft of carburization[J]. Physics Procedia, 2013, 50: 103-112.
- [2] 阎承沛. 我国齿轮热处理技术概况及发展趋势[J]. 热处理, 2002, 17(1): 14-25.
YAN C P. General situation and progress tendency for gear heat treatment technology in China[J]. Heat Treatment, 2002, 17(1): 14-25 (in Chinese).
- [3] WANG S W, NISHIDA S, HATTORI N, et al. Effect of plastic deformation by roller-working on fatigue strength of notched specimen[J]. JSME International Journal A, 2000, 43(4): 415-422.
- [4] UNAL O, VAROL R. Surface severe plastic deformation of AISI 304 via conventional shot peening, severe shot peening and repeening[J]. Applied Surface Science, 2015, 351: 289-295.
- [5] FU P, ZHAN K, JIANG C H. Micro-structure and surface layer properties of 18CrNiMo7-6 steel after multistep shot peening[J]. Materials and Design, 2013, 51: 309-314.
- [6] PANG Z R, YU S J, XU J W. Study of effect of quenching deformation influenced by 17CrNiMo6 gear shaft of carburization[J]. Physics Procedia, 2013, 50: 103-112.
- [7] WANG C F, WANG M Q, SHI J, et al. Effect of microstructure refinement on the strength and toughness of low alloy martensitic steel[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2007, 23(5): 659-664.
- [8] OST W, BAETS P D, QUINTELIER J. Investigation of a failed axle of a reduction gearbox [J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14: 1194-1203
- [9] GENZEL C, KLAUS M, DENKS I, et al. Residual stress fields in surface-treated silicon carbide for space industry—comparison of biaxial and triaxial analysis using different X-ray methods[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 390: 376-384.
- [10] 高玉魁. 超高强度钢喷丸表面残余应力在疲劳过程中的松弛规律[J]. 材料热处理学报, 2007, 28(s1): 102-105.
GAO Y K. Shot-peened surface residual stress relaxation during fatigue for ultra-high strength steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2007, 28(s1): 102-105 (in Chinese).
- [11] 王宏伟, 马晋生, 南俊马, 等. 表面微观屈服强度与疲劳极限的关系[J]. 金属学报, 1991, 27 (5): 365-369.
WANG H W, MA J S, NAN J M, et al. Surface yield strength versus fatigue limit for steels[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1991, 27(5): 365-369 (in Chinese).
- [12] 李淑明, 刘贤锋, 胡永会. 7075铝合金表面喷丸残余应力松弛的实验研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(14): 27-33.
LI S M, LIU X F, HU Y H. Experiment study on residual stress relaxation of shot peened 7075 Al alloy[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(14): 27-33 (in Chinese).
- [13] WIESNER C, ILSCHNER B. Characterization of the topography of turned surfaces and its influence on the fatigue life of Al-7075[J]. Materials Science and Engineering A, 1991, 145: 151-158.
- [14] 王欣, 李臻熙, 陆峰, 等. 喷丸对钛合金TC4磨削加工表面完整性的影响[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(S1): 107-109.
WANG X, LI Z X, LU F. Effect of shot peening on grinding surface integrity of TC4 titanium alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(S1): 107-109 (in Chinese).
- [15] 邱琼, 王仁智. 关于残余应力的静载松弛与最佳喷丸残余应力场的研究[J]. 金属科学与工艺, 1988, 7(1): 1-7.
QIU Q, WANG R Z. Static roading relaxation of residual stress and the optimum residual stress field induced by shot peening[J]. Metal Science & Technology, 1988, 7(1): 1-7 (in Chinese).
- [16] WANG R Z. Investigation on the microstructure in shot-peening surface straining layer of materials[C]. Proceedings of 1st International Conference on Shot Peening, Paris: Pergamon Press, 1981: 185-192.
- [17] ALTENBERGER I, SCHOLTES B, MARTIN U, et al. Cyclic deformation and near surface microstructures of shot peened or deep rolled austenitic stainless steel AISI304[J]. Materials Science and Engineering A, 1999, 264: 1-16.