

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20161221001

# 磨料水射流喷丸对渗碳GDL-1钢表面完整性及疲劳性能的影响

邹 雄<sup>1,2</sup>, 梁益龙<sup>1,2</sup>, 吴泽丽<sup>1,2</sup>, 秦少杰<sup>1,2</sup>, 胡君杰<sup>1,2</sup>

(1. 贵州大学 材料与冶金学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学 贵州省材料结构与强度重点实验室, 贵阳 550025)

**摘要:** 为研究后混合磨料水射流喷丸对渗碳后GDL-1钢表面完整性及疲劳性能的影响规律, 利用X射线应力衍射仪、粗糙度仪、显微硬度仪、金相显微镜、扫描电镜、透射电镜等分析了水射流喷丸强化对试样表面残余应力场、粗糙度、硬度、形貌、组织的变化规律, 并用升降法测定了抛光及抛光+水喷丸两种状态下渗碳GDL-1钢拉压疲劳性能。结果表明: 试样经水喷丸处理后, 表面粗糙度有所增加, 并且有磨料撞击形成的小凹坑及在表面残留有玻璃磨料, 但同时表层脱碳层大部分被去除, 硬度得到显著提升、残留奥氏体含量降低, 晶粒得到细化, 并且在表面形成一定深度的残余应力层。经水喷丸处理的试样, 其较未经水喷丸的疲劳极限提高了19%, 且疲劳源全部在远离表面接近1/2R位置形成, 这说明水射流喷丸在表层产生的高残余应力和晶粒细化可以显著提高渗碳钢的疲劳性能。

**关键词:** GDL-1钢; 磨料水射流喷丸; 表面完整性; 疲劳性能

中图分类号: TG668

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)02-0041-07

## Effects of Abrasive Waterjet Peening on Surface Integrity and Fatigue Properties of Carburizing GDL-1 Steel

ZOU Xiong<sup>1,2</sup>, LIANG Yi-long<sup>1,2</sup>, WU Ze-li<sup>1,2</sup>, QIN Shao-jie<sup>1,2</sup>, HU Jun-jie<sup>1,2</sup>

(1. College of Materials and Metallurgy, University of Guizhou, Guiyang 550025; 2. Key Laboratory of Material Structure and Strength of Guizhou Province, University of Guizhou, Guiyang 550025)

**Abstract:** To study the influence of post-mixed AWJP on the surface integrity and fatigue properties of carburizing GDL-1 steel. Residual stress, roughness, hardness, morphology and microstructure of the AWJP surface were characterized by X-ray diffraction, roughness tester, micro hardness tester, metallurgical microscope, SEM and TEM. Based on the method of changing strength, the tension-compression fatigue properties of carburizing GDL-1 steel of polishing and polishing+AWJP was studied. The results show that the surface roughness is increased. Many small pits were formed and some glass abrasives are found on the AWJP surface. The most decarburized layer are removed. The hardness of the surface layer was remarkably improved, the residual austenite content is decreased, the grain size is refined, and a certain depth of residual compressive stress layer is formed. The fatigue limit of the AWJP treated specimens is increased by 19% compared with that of the polished specimen and all the fatigue sources are formed close to the 1/2R position from the surface, which indicates that the high residual compressive stress and refined gain produced by AWJP can significantly improve the fatigue properties of carburizing steel.

**Keywords:** GDL-1 steel; abrasive waterjet peening; surface integrity; fatigue properties

收稿日期: 2016-12-21; 修回日期: 2017-03-06

网络出版日期: 2017-03-10 08:11; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170310.0811.004.html>

通讯作者: 梁益龙(1955—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 新型金属材料及热加工装备; E-mail: liangyilong@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(51671060); 贵州省科技计划项目(黔科合JZ字[2014]2003, 黔科合重大专项字[2014]6012)

**Fund:** Supported by National Natural Science Foundation of China (51671060) and Science and Technology Program of Guizhou Province (Guizhou Scientific Cooperation JZ Word[2014]2003, Guizhou Scientific Cooperation Major Project Word (2014) 6012)

引文格式: 邹雄, 梁益龙, 吴泽丽, 等. 磨料水射流喷丸对渗碳GDL-1钢表面完整性及疲劳性能的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(2): 41-47.

ZOU X, LIANG Y L, WU Z L, et al. Effects of abrasive waterjet peening on surface integrity and fatigue properties of carburizing GDL-1 steel[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(2): 41-47.

## 0 引言

GDL-1钢是一种以Mn, Si为主加元素的新型贝氏体钢<sup>[1]</sup>, 渗碳后空冷即可完成表面硬化, 同时心部保持高强韧性, 有效避免了工件渗碳淬火变形大的问题, 广泛应用于钎具, 汽车齿轮等构件上。

目前国内外已对磨料水射流喷丸技术(AWJP)进行了一定的研究和应用, 证实了它作为一种新的表面强化工艺的可行性, AROLA等人<sup>[2]</sup>采用后混合磨料水射流喷丸对Ti6Al4V钛合金进行喷丸强化, 得出水射流喷丸所引入的残余压应力主要受磨料尺寸和水压的影响, 并且在最佳的参数下, Ti6Al4V钛合金的疲劳强度提高了25%。在国内, 董星等人在后混合磨料水射流喷丸的基础上探索了前混合水射流喷丸技术<sup>[3-4]</sup>, 并用前混合磨料水射流技术对45钢及2A11铝合金进行了喷丸强化, 得到45钢及2A11铝合金疲劳寿命分别提高了18.56倍和25.31倍, 有别于前混合, 后混合磨料水射流装置中磨料与水流的混合在喷嘴之后, 喷嘴磨损小, 可靠性高<sup>[5]</sup>。由于水射流喷丸过程中, 磨料粒子对工件有冲蚀, 剪切, 磨损作用, 会实现材料的部分去除<sup>[6-7]</sup>, 因而对于硬度较低的材料, 如铝合金, 钛合金和低碳钢等, 经过磨料水射流喷丸后, 虽然在表层引入了较大的残余压应力, 但同时材料表面变的十分粗糙, 可能出现疲劳性能下降的现象<sup>[8]</sup>, 而对于表面硬度较高的材料, 如经过渗碳渗氮处理的钢, 粉末冶金制品等, 经磨料水射流喷丸处理后, 不仅能在表层引入相当大的残余压应力层, 而且表面去除的少, 粗糙度较低, 因而针对高硬度材料进行磨料水射流喷丸强化是十分有意义的, 但从查阅的文献情况来看, 国内外对这方面研究的不多。

此外当前较少涉及渗碳钢的拉压疲劳性能研究, 而主要研究渗碳钢的接触和弯曲疲劳性能, 但事实上很多渗碳工件如钎杆, 螺栓等部分是因拉压疲劳而断裂失效的, 故研究表面强化工艺对渗碳钢拉压疲劳性能是十分必要的。表面完整性是零部件加工后表面几何和物理性质的总称<sup>[9]</sup>, 涵盖了表面粗糙度、几何形状、微观组织、残余应力等参数, 其与材料的疲劳性能是紧密相关的, 合理的表面强化工艺, 可以有效改善金属的表面完整性, 进而提升金属材料的抗疲劳性能。文中研究了磨料水射流喷丸对渗碳GDL-1钢表面完整性

及疲劳性能的影响, 为促进和实现工程构件的水射流喷丸强化提供一定的指导作用。

## 1 材料与方法

试验所用的材料为Φ 60 mm的GDL-1钢棒材, 其化学成分(质量分数, %)为: 0.21C, 1.1Si, 2.05Mn, 0.21Mo, 0.05V, 0.012S, 0.011P, 余量Fe。室温下钢的拉伸性能为:  $\sigma_{0.2}=985$  MPa,  $\sigma_b=1\,300$  MPa,  $\delta=18.2\%$ ,  $\psi=62.4\%$ 。改锻为Φ 26 mm的样后, 经900 °C退火3 h, 参照GBT-3075-2008以及QBG-200高频疲劳试验机的要求, 设计的疲劳试样尺寸如下图1所示, 再将疲劳试样进行渗碳处理, 渗碳工艺为: (炉温910 °C, 碳势1.05)×2 h强渗→(910 °C, 碳势0.85)×9 h扩散→炉冷至880 °C→出炉风冷→290 °C×3 h回火。

渗碳后, 所有试样均先用砂纸进行打磨和抛光, 去掉周向的划痕。再将试样分成两部分, 一部分直接用升降法在疲劳试验机上进行应力比 $R=-1$ 的拉压疲劳试验, 另一部分先用直线喷射的方式对中间曲面部分进行磨料水射流喷丸强化, 经超声酒精溶液清洗后, 再进行疲劳试验, 后混合磨料水射流喷丸设备示意图和工艺参数分别如图2和表1所示。磨料为0.1 mm的圆形玻璃磨料。

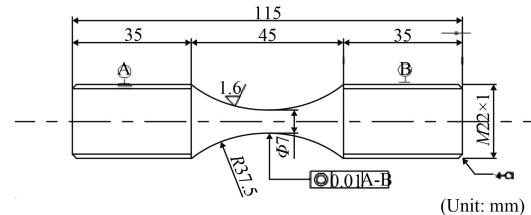


图1 疲劳试样的尺寸

Fig.1 Size of fatigue specimen

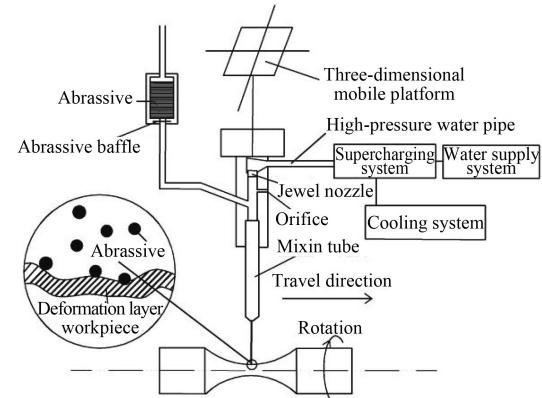


图2 后混合磨料水射流喷丸设备示意图

Fig.2 Diagram of post-mixed abrasive waterjet peening equipment

表1 水喷丸工艺参数

Table 1 Parameters of waterjet peening progress

Parameters	Values
Nozzle diameter / mm	0.33
Angle / (°)	90
Pressure / MPa	200
Stand-off distance / mm	10
Feed rate / (mm·min <sup>-1</sup> )	12
Rotation rate / (r·min <sup>-1</sup> )	30
Abrasive flow rate / (g·min <sup>-1</sup> )	120~180

表面粗糙度和残余应力的测定位置, 形貌和组织的观察位置, 硬度的取样位置等均在疲劳试样的最小直径处。用NDT-150表面粗糙度仪来测量水喷前后试样的粗糙度Ra, 每个试样选取5个不同位置沿轴向进行测量, 结果取平均值, 取样长度为0.8 mm, 评定长度n=3。用徕卡DMI5000M金相显微镜观察水喷前后试样表层金相组织, 用SUPRA-40型场发射扫描电子显微镜观察试样的表面形貌以及水喷前后试样的疲劳断口, 用HVS-1000数显显微硬度仪测水喷前后试样表面硬度变化, 载荷0.98 N, 保持10 s。用电解剥层法在X-350A应力衍射仪上测残留奥氏体以及残余应力随层深的变化情况, 残余应力测定采用倾侧固定ψ法, 交相关法定峰, 测试参数为: 辐射Cr Kα, ψ角分别为0°、24.2°、35.3°和45°, 管压20 kV, 管电流为5 mA, 扫描范围147°~167°, 步距为0.1°。

为方便透射样的制取, 先用线切割从2根疲劳试样中间位置切出长宽均为3 mm的平面, 经渗碳后, 一根经抛光处理, 另一根经抛光加水喷丸处理, 再分别从平面位置切取0.4 mm厚的薄片, 先单面磨至约70 μm, 再从强化面磨去20~30 μm, 经单面离子减薄后, 用Tecnai G2 F20 S-TWIN(200 kV)型透射电子显微镜观察晶粒和组织的变化。

## 2 结果与分析

### 2.1 表面形貌

图3为3种不同表面处理后的试样形貌, 左边为未抛光的试样, 可见表面有许多车削加工的痕迹, 这些车痕若不经处理, 会给疲劳裂纹的萌生和扩展提供有利条件, 从而急剧降低试样的疲劳强度。中间为经过抛光处理的试样, 其表面十分光滑, 加工痕迹被去除, 而右边为粗抛+水喷丸处

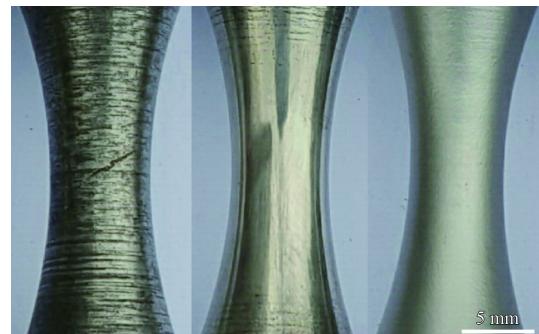
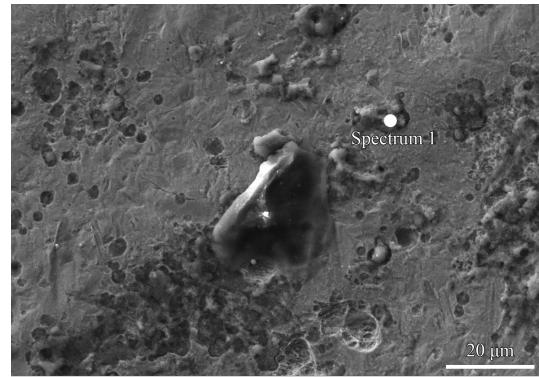


图3 不同表面处理后的试样形貌

Fig.3 Morphology of specimens by different surface treatment

理后的试样, 其表面形貌类似传统喷丸, 呈细颗粒状。从左往右三种状态下表面粗糙度Ra分别为1.78、0.68和1.65 μm, 可见试样经水喷丸处理后, 其粗糙度较抛光试样有所增加, 但增加幅度不大。

图4(a)为水喷处理后试样的表面SEM形貌, 可以看到表面有许多1~3 μm的圆形凹坑, 这是由于水射流喷丸过程中高能磨料撞击金属表面所形成的, 凹坑里面及附近有部分残留物, 对残余物进行EDS分析, 其主要元素如图4(b)所示, 通过对比



(a) Morphology

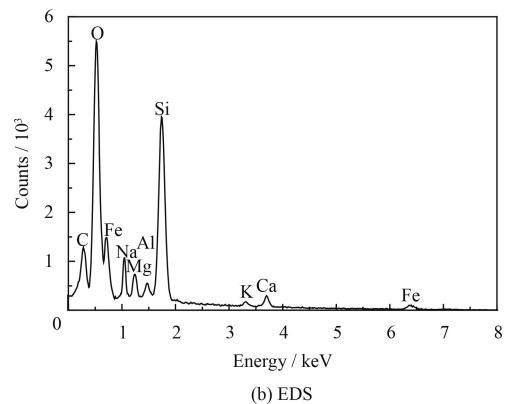


图4 水喷处理后试样的表面形貌和EDS能谱

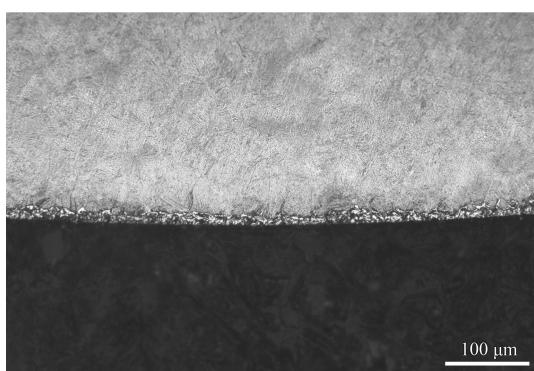
Fig.4 Morphology and energy spectrum of specimens after AWJP

玻璃磨料的主要成分(主要为 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 等), 可以确定这些残留物即为破碎的玻璃磨料, AROLA等人在磨料水喷丸实验中也观察到有磨料残留在金属表面<sup>[10]</sup>。此外从该SEM形貌中还能看到表面存在一些夹杂物, 可能是受磨料的去除作用, 使次表面的夹杂物裸露出来。

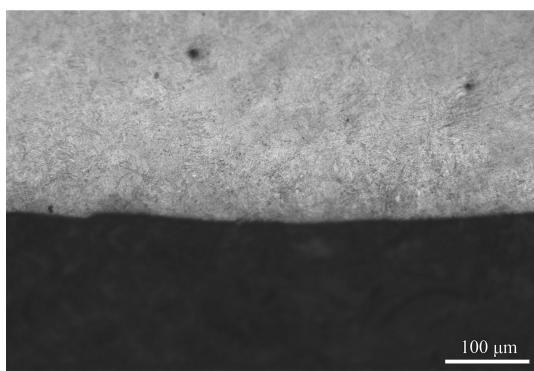
## 2.2 表层组织

图5为抛光和水喷丸处理试样的表层金相组织, 两试样表层均以针状马氏体组织为主, 但图5(a)中可以看到试样表面有脱碳层的存在, 而从图5(b)可知, 经过水喷丸后, 试样表面脱碳层被去除, 圆滑的表面有一定的起伏, 验证了水喷后表面粗糙度的增加。

通过千分尺测得磨料水射流喷丸后试样最窄处半径减少了110  $\mu\text{m}$ 。而水喷过程中, 表层残留奥氏体含量会因形变而发生改变, 在绘制残留奥氏体含量随表面距离的变化曲线时必须要考虑尺寸减少所带来的影响, 故水喷后曲线以110  $\mu\text{m}$ 位置为起点作图更合适, 对应的两纵坐标之差即为残留奥氏体体积分数的减少量。由图6可见, 抛光



(a) Polished



(b) Polished + AWJP

图5 水喷前后试样表层金相组织

Fig.5 Microstructure of surface layer before and after AWJP

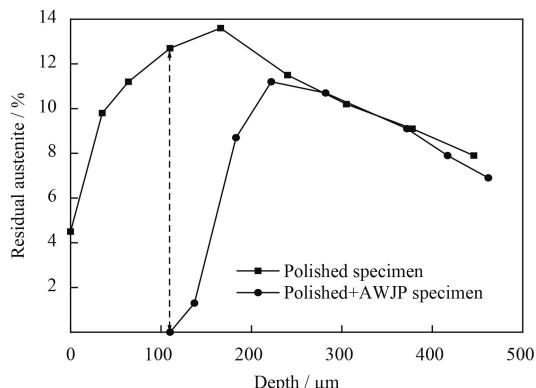


图6 残留奥氏体含量随层深分布曲线

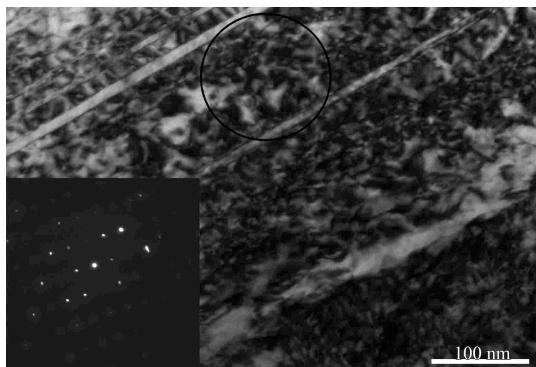
Fig.6 Curves of residual austenite content distribution with distance

试样残奥含量呈先增后减的变化趋势, 这是受表面脱碳的影响, 而水喷后, 残奥含量也呈先增后减的变化规律, 且最表面残奥含量为0, 且残奥转变量最大的位置在最表面附近, 这是由于最表面塑性变形程度最大, 形变诱发马氏体转变最充分。

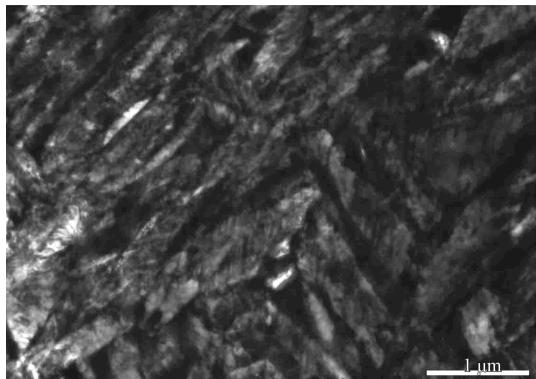
为了更微观了解水喷前后材料组织和晶粒的变化情况, 通过透射电镜来观察和分析。图7(a)为抛光试样距表面20~30  $\mu\text{m}$ 的TEM形貌, 该处只含有少量孪晶, 主要受表面脱碳的影响, 使得针状马氏体含量低, 对应的选区衍射图谱为单晶衍射斑点, 标定为马氏体组织。图7(b)(c)(d)为水喷试样距表面20~30  $\mu\text{m}$ 不同区域的TEM形貌, 由图7(a)(b)可知, 该处主要为细长的针状马氏体组织, 同时在该位置存在较多孪晶, 据前面的分析可知, 这主要是由于水喷后, 表面脱碳层被部分去除, 剩下部分碳含量高所致。从图7(c)可以看到, 试样经水喷丸处理后, 表层位错密度增加, 产生大量的位错胞和亚晶, 条界变的模糊, 同时选区的衍射图谱为不连续的多晶衍射环, 说明选区内有许多沿特定方向的晶粒和亚晶存在, 可以说经过高压水射流喷丸后, 表层晶粒得到明显细化。而晶粒越细化, 晶界就越多, 对短裂纹的阻碍作用就越强<sup>[11-13]</sup>, 从而增加试样的疲劳寿命。

## 2.3 表层硬度

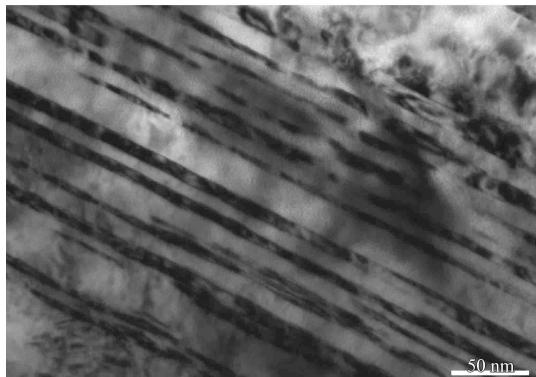
图8为材料硬度随表面距离的变化曲线, 试样由于空冷以及本身含硅量高, 使得表层存在较厚的脱碳层, 只经过粗抛的试样, 脱碳层去除的少, 故试样表层硬度呈先增后减的变化规律, 而经过水喷丸处理的试样, 表层的脱碳层大部分被去除, 使组织以针状马氏体为主, 此外表层产生



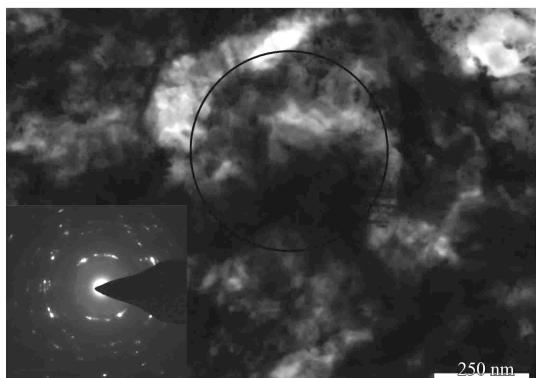
(a) Polished



(b) Polished + AWJP



(c) Polished + AWJP



(d) Polished + AWJP

图7 水喷前后试样距表面20~30 μm的TEM形貌

Fig.7 TEM micrographs of specimens with 20~30 μm from the surface before and after AWJP

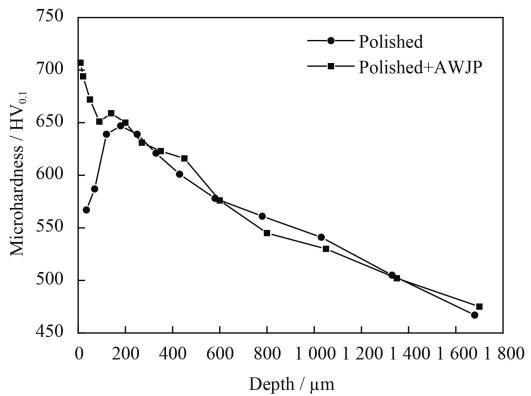


图8 显微硬度随层深的分布曲线

Fig.8 Curves of microhardness distribution varied with distance

加工硬化、残留奥氏体诱发转变为马氏体、且表层晶粒得到细化，这些因素都会使表层的硬度得到提升，最表面的硬度更是达到了约710 HV<sub>0.1</sub>。

## 2.4 残余应力场

从图9可知，未抛光的试样最表面为35 MPa的拉应力，这是受表面脱碳的影响。脱碳使得表面和心部的组织存在差异，表面形成的低碳马氏体比容比心部小，从而在表面出现拉应力。经过抛光处理的试样，在表面产生了约50 μm的压应力层，这是在抛光过程中所引入的。而经过水喷丸处理的试样，在表层产生了约380 μm的残余压应力层，残余应力呈“钩”形分布，且残余压应力最大值约为-1 510 MPa，在距表面25 μm处。表面强化所产生的残余压应力不仅可以抑制疲劳裂纹的萌生，而且可以增加裂纹的闭合效应从而减小短裂纹的扩展速率<sup>[14-15]</sup>，有助于提高试样的疲劳性能。

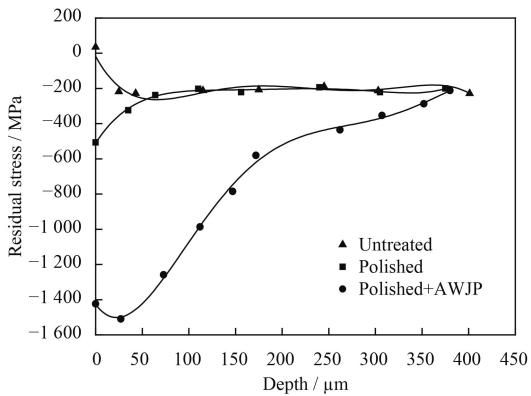


图9 残余应力随层深的变化曲线

Fig.9 Curves of residual stress distribution varied with depth

## 2.5 疲劳性能

图10为渗碳GDL-1钢抛光及抛光+水喷丸处理

两种状态的S-N曲线。通过升降法测得抛光试样的疲劳极限为442 MPa，而抛光+水喷丸处理的试样疲劳极限为526 MPa，可知经过水喷处理的试样，其疲劳极限提高了19%，说明磨料水喷丸可以有效提高渗碳钢的疲劳性能。

对所有疲劳试样断口进行统计分析，发现抛光试样疲劳源有的在表面，有的在次表面，而经过水喷丸处理的试样，其疲劳源全部在远离表面接近 $1/2R$ 位置形成，距表面约1.5~2.5 mm，且基本都由内部夹杂物引起，其夹杂物为氧化钙为主的球状氧化物。**图11**给出了抛光试样(**图11(a)(b)(c)**)及抛光+水喷丸处理试样(**图11(d)(e)(f)**)对应的断口形貌。抛光试样在440 MPa应力下循环了 $2.1 \times 10^6$ 周次，而抛光+水喷丸处理试样在520 MPa应力下循环了 $7.8 \times 10^6$ 周次。从**图11(a)(b)(c)**可知，该试样疲劳扩展区较小，瞬断区所占的面积较大，且疲劳条纹间距较大，说明试样循环周次较少，裂纹扩展速率较快。沿着疲劳条纹垂直的方向可以在试样最表面找到疲劳源，由前面分析可知，试样经过抛光处理后，在较低的表面粗糙度条件下，疲劳源还在表面形成，主要是受表面脱碳的影响，使得表面硬度和残余压应力低，进而裂纹易在表面萌生并迅速扩展。从**图11(d)(e)(f)**可知，试样的

疲劳源在距表面约2.1 mm处，呈典型的“鱼眼”形状貌，鱼眼中心有一个孔洞，是夹杂物脱落所形成的，说明疲劳破坏起源于夹杂物处。疲劳扩展区所占面积较大，且疲劳条纹间距较小，说明试样循环次数较多，裂纹扩展速率较慢。同样由前面的分析可知，试样经过水喷丸处理后，在表面质量有所降低的情况下，如表面粗糙度增加，表面有残留的磨料碎片和凹坑等，疲劳源却在接近 $1/2R$ 位置形成，主要是水喷后在表面产生了很高的残余压应力，且表面晶粒得到细化，使裂纹在表面萌生和扩展变困难，位置往心部薄弱区域转移，有效提高了试样的疲劳性能。

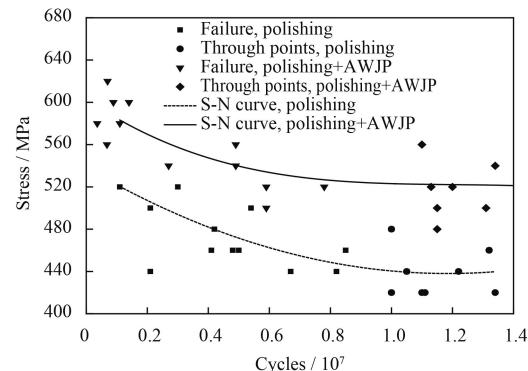


图 10 水喷前后试样的S-N曲线

Fig.10 S-N curves of specimens before and after AWJP

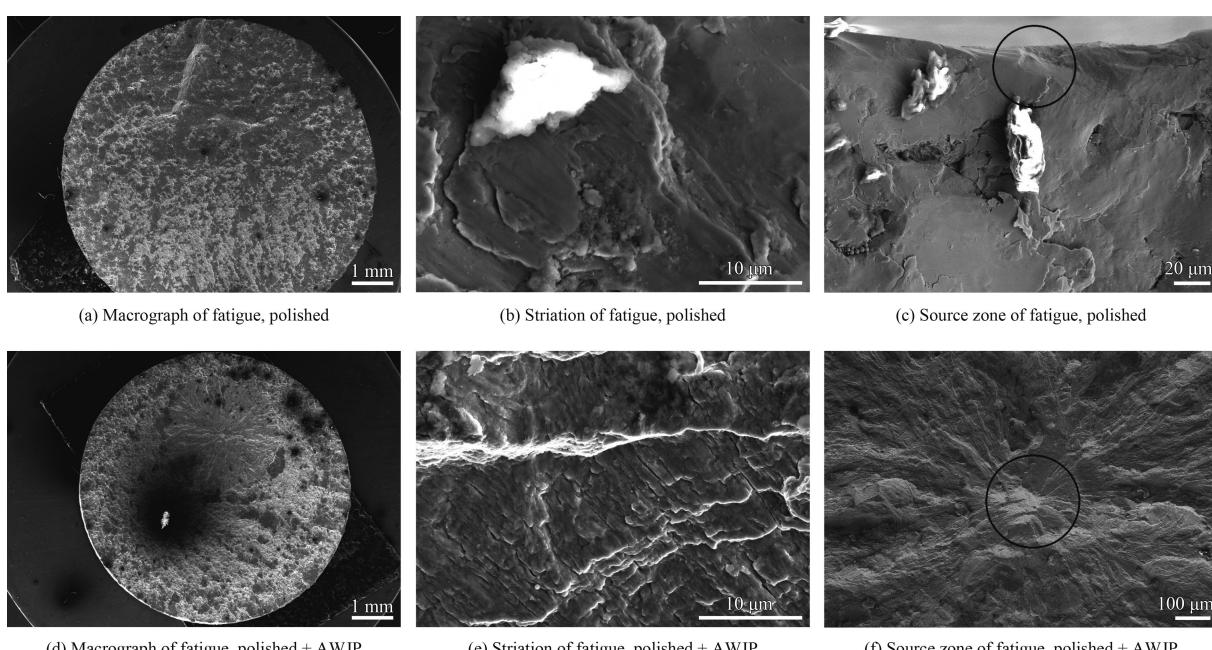


图 11 水喷前后试样的疲劳断口形貌

Fig.11 Fatigue fracture morphologies of specimens before and after AWJP

### 3 结 论

(1) 未抛光的试样表面存在较厚的脱碳层, 经抛光后, 表面粗糙度有所减小, 但脱碳层去除的少, 使表层的硬度和残余压应力较低, 而抛光试样经过磨料水射流喷丸后, 脱碳层大部分被去除, 表层硬度得到显著提升, 残留奥氏体含量降低, 晶粒得到细化, 并且形成一定深度的残余压应力层, 但同时表面粗糙度有所增加, 并且有磨料撞击形成的小凹坑及在表面残留有玻璃磨料。

(2) 抛光试样经过磨料水射流喷丸后, 疲劳极限达526 MPa, 较水喷前的提高了19%, 且疲劳源全部在远离表面接近 $1/2R$ 位置形成, 这主要归结于水射流喷丸产生的高的残余压应力和晶粒细化, 说明磨料水射流喷丸可以有效提升渗碳钢的疲劳性能。

### 参考文献

- [1] 梁益龙, 雷昊, 陈伦军, 等. 稀土对GDL-1型贝氏体钢的显微组织及力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2006, 27(6): 95-98.
- LIANG Y L, LEI M, CHEN L J, et al. Effects of rare earth on microstructure and mechanical properties[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2006, 27(6): 95-98.
- [2] AROLA D, ALADE A E, WEBER W, et al. Improving fatigue strength of metals using abrasive waterjet peening[J]. Machining Science and Technology, 2006, 10(2): 197-218.
- [3] 董星, 王瑞红, 段雄. 前混合水射流喷丸表面粗糙度的试验研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(10): 1410-1415.
- DONG X, WANG R H, DUAN X. Test research of premixed water jet shot peening surface roughness[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(10): 1410-1415 (in Chinese).
- [4] 董星, 郭睿智, 段雄. 前混合水射流喷丸强化表面力学特性及疲劳寿命试验[J]. 机械工程学报, 2011, 47(14): 164-170.
- DONG X, GUO R Z, DUAN X. Surface mechanical characteristics and fatigue life experiments of premixed water jet peening strengthening[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(14): 164-170 (in Chinese).
- [5] 李增强, 赵佩杰, 宋雨轩, 等. 微磨料水射流加工技术研究现状[J]. 纳米技术与精密工程, 2016, 14(2): 134-144.
- LI Z Q, ZHAO P J, SONG Y X, et al. Research status of micro abrasive water jet machining technology[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2012, 48(23): 167-177 (in Chinese).
- [6] 张成光, 张勇, 张飞虎, 等. 磨料水射流加工去除模型研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(7): 164-170.
- ZHANG C G, ZHANG Y, ZHANG F H, et al. Study on removal model of abrasive waterjet machining[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(7): 164-170 (in Chinese).
- [7] MOHAMED H. A modeling study of metal cutting with abrasive waterjets[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1984, 106: 88-100.
- [8] LIEBLICH M, BARRIUSO S, IBANEZ J, et al. On the fatigue behavior of medical Ti6Al4V roughened by grit blasting and abrasiveless waterjet peening[J]. Machining Science and Technology, 2016, 63: 390-398.
- [9] 王仁智. 工程金属材料/零件的表面完整性及其断裂抗力[J]. 中国表面工程, 2011, 24(5): 55-57.
- WANG R Z. Surface integrity and fracture resistance of engineering metallic materials and components[J]. China Surface Engineering, 2011, 24(5): 55-57 (in Chinese).
- [10] AROLA D, MCCAIN M L, KUNAPORN S, et al. Waterjet and abrasive waterjet surface treatment of titanium: a comparison of surface texture and residual stress[J]. Wear, 2001, 249(10): 943-950.
- [11] 汝继刚, 李超, 王亮, 等. 喷丸强化对7A12铝合金微观组织和疲劳性能的影响[J]. 航空材料学报, 2013, 33(6): 51-56.
- RU J G, LI C, WANG L, et al. Effect of shot peening on microstructure and fatigue life of 7A12 aluminum[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013, 33(6): 51-56 (in Chinese).
- [12] 回丽, 杨林青, 王磊, 等. 超声强化2D12铝合金疲劳断裂过程的微观分析[J]. 中国表面工程, 2016, 29(6): 15-22.
- HUI L, YANG L Q, WANG L, et al. Micro-analysis of fatigue behavior in ultrasonic strengthened 2D12 aluminum alloy[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(6): 15-22 (in Chinese).
- [13] 聂祥樊, 何卫锋, 臧顺来, 等. 激光喷丸提高TC11钛合金高周疲劳性能的试验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 76-82.
- NIE X F, HE W F, ZANG S L, et al. Experimental study on improving high-cycle fatigue performance of TC11 titanium alloy by laser shock peening[J]. Chinese Journal of Laser, 2013, 40(8): 76-82 (in Chinese).
- [14] 高玉魁. 喷丸对TC18钛合金拉-拉疲劳性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(9): 1000-1002.
- GAO Y K. Influence of shot peening on tension-tension fatigue properties of TC18 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(9): 1000-1002 (in Chinese).
- [15] 吕鹤婷, 王建明, 刘兴睿. 喷丸残余应力对裂纹闭合效应影响的数值仿真[J]. 中国表面工程, 2016, 29(2): 102-110.
- LV H T, WANG J M, LIU Y R. Micro-analysis of fatigue behavior in ultrasonic strengthened 2D12 aluminum alloy[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(2): 102-110 (in Chinese).