

后混合水射流喷丸工艺对 18CrNiMo7-6 渗碳钢 表面性能的影响

吴政协, 马泳涛, 龚军振, 赵乐川

(郑州大学 机械工程学院, 郑州 450001)

摘 要: **目的** 探究不同后混合水射流喷丸工艺对 18CrNiMo7-6 渗碳钢表面性能的影响。**方法** 运用超景深三维显微系统、三维表面形貌测量系统、X 射线残余应力分析仪及 HV-1000 显微硬度计等, 对后混合水射流喷丸前后试样的表面形貌、表面粗糙度、残余应力及显微硬度随层深的变化情况进行分析。**结果** 后混合水射流喷丸时, 弹丸和水会对试样表层产生一定的冲蚀、磨损、剪切作用, 使试样表面产生新的凹坑。表面粗糙度 Ra 值随着喷射压力 P 及喷射靶距 H 的增加而增大, 随着喷嘴移动速度 v 的增加而减小。试样显微硬度最大值都出现在表面, 且随层深的增加, 硬度值逐渐减小, 喷射压力 $P=300$ MPa 时, 表面硬度值达到 62.8HRC, 比试样初始表面硬度值增加了 7.35%。试样材料所能引入的残余压应力具有固有最大值 σ_{mirs} , 当引入的残余压应力未达到 σ_{mirs} 时, 所产生的最大残余压应力值 σ_{mcrs} 随喷射压力 P 的增加而增大, 但随喷射靶距 H 和喷嘴移动速度 v 的改变变化不大。当引入的残余压应力达到 σ_{mirs} 时, 所产生的最大残余压应力值 σ_{mcrs} 即为 σ_{mirs} , 不再改变, 但是最大残余压应力距表面距离值 z_m 仍会随着喷射压力 P 的增加而增大。**结论** 后混合水射流喷丸后, 试样表面粗糙度变化较大, 表层显微硬度有一定提高。残余应力的分布主要与喷射压力 P 有关, 而与喷射靶距 H 和喷嘴移动速度 v 关系不大。

关键词: 后混合水射流喷丸; 表面形貌; 表面粗糙度; 显微硬度; 残余应力

中图分类号: TG176 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)09-0147-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.09.023

Effects of Post-mixed Water Jet Shot Peening Process on Surface Properties of 18CrNiMo7-6 Carburizing Steel

WU Zheng-xie, MA Yong-tao, GONG Jun-zhen, ZHAO Le-chuan

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

ABSTRACT: The work aims to explore effects of post-mixed water jet shot peening process on surface properties of 18CrNiMo7-6 carburizing steel. Changes in surface morphology, surface roughness, residual stress and microhardness of the specimen before and after post-mixed water jet shot peening as layer depth varied were analyzed with 3D microscope system, 3D surface morphology measuring system, X-ray residual stress analyzer and HV-1000 micro-hardness meter. During the

收稿日期: 2017-04-05; 修订日期: 2017-05-10

Received: 2017-04-05; Revised: 2017-05-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51305408); 河南省高等学校重点科研项目 (15A460030)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51305408), Henan Province Higher Universities Key Research Project (15A460030)

作者简介: 吴政协 (1988—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为抗疲劳制造。

Biography: WU Zheng-xie (1988—), Male, Master graduate student, Research focus: anti-fatigue manufacturing.

通讯作者: 马泳涛 (1975—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为抗疲劳制造。

Corresponding author: MA Yong-tao (1975—), Male, Ph. D., Lecturer, Research focus: Anti-fatigue manufacturing.

post-mixed water jet shot peening, projectile and water would have erosion, wear and shearing effects on specimen surface, produces new pits on the surface. The surface roughness Ra increased as injection pressure P and injection target distance H increased, and it decreased as nozzle velocity v increased. The maximum microhardness appeared on the specimen surface, and the microhardness decreased as layer depth increased. When the injection pressure P was 300 MPa, the surface microhardness reached 62.8HRC, 7.35% higher than initial surface hardness value of the specimen. Residual compressive stress had a maximum inherent value σ_{mirs} . When the introduced residual compressive stress was below σ_{mirs} , the maximum residual compressive stress σ_{mcrs} increased as the injection pressure P increased, but changed slightly as jet standoff distance H and nozzle movement speed v varied. However, when the introduced residual compressive stress reached σ_{mirs} , the produced maximum residual compressive stress σ_{mcrs} equaled σ_{mirs} , but distance z_m between the maximum residual compressive stress and the specimen surface still increased as the injection pressure P increased. After post-mixed water jet shot peening, specimen surface roughness changes greatly, microhardness increases to a certain degree, and the distribution of residual stresses is mainly related to the injection pressure P instead of jet standoff distance H and nozzle movement speed v .

KEY WORDS: post-mixed water jet shot peening; surface morphology; surface roughness; microhardness; residual stress

表层改性强化技术是提高零件抗疲劳性能的重要方法之一,其主要是通过改善材料表层的显微组织,在材料表面塑性变形层内引入较大的残余压应力场,从而提高材料的疲劳性能。目前,喷丸强化技术比较成熟,已应用于众多工业领域^[1-2]。传统喷丸强化是利用气流形成高速运动的弹丸流喷射到材料表面,从而使材料表层发生塑性变形^[3]。传统喷丸强化的压力由压缩空气提供,其最大压力一般在 1 MPa 以下,因此限制了传统喷丸中弹丸的冲击能量。材料经过传统喷丸后,表面粗糙度会大大增加,甚至出现表面开裂、脱层等表面损伤,阻碍了疲劳性能的提高^[4]。随着科技的发展,近些年出现了一些有别于传统喷丸强化技术的新型喷丸加工方法。其中,高压水射流喷丸强化技术的发展和应用得到了广泛重视和关注。

后混合水射流喷丸是高压水射流喷丸强化技术的一个重要分支,是 20 世纪 80 年代末问世的一项湿法喷丸强化新技术^[5],其具有纯水喷丸和传统气动喷丸的特点^[4]。其强化原理是:由高压泵产生的高压水通过喷头(如图 1 所示)的宝石喷嘴喷出形成高压水射流,弹丸由供丸装置送入混合室,与高压水射流在混合室内发生剧烈碰撞和动量交换,最后一起经弹丸喷嘴喷出,形成弹丸射流并喷射到试样材料表面上,使材料表层在再结晶温度下产生塑性变形,呈现出理

想的组织结构(组织强化)和残余应力分布(应力强化),从而达到提高材料周期疲劳强度和抗应力腐蚀能力的目的^[6-10]。

目前,国内外对高压水射流喷丸强化技术已经进行了一定的研究。Arola 等人^[11]采用后混合水射流喷丸强化技术对 AISI304 和 Ti6Al4V 进行研究,指出水射流喷丸后材料残余压应力的分布主要与喷射压力和弹丸尺寸有关。刘海霞等人^[12]研究了淹没水射流对铝合金冲蚀效果的影响,得出低压时其对材料表面未产生明显冲蚀现象,但强化作用明显。不过,目前混合水射流喷丸强化技术离工程实际应用尚有一定的距离,其主要原因是混合水射流喷丸工艺的机理及优化问题尚在探索阶段,仍需进一步开展相关试验的研究。

1 试验

试验材料为 18CrNiMo7-6 渗碳合金钢,化学成分如表 1 所示。所有试样(30 mm×30 mm×20 mm)经过 920 °C 渗碳+800 °C 淬火+180 °C 回火,最后再进行磨削处理。高压水射流发生装置采用商用水刀,其最高输出压力 413 MPa,宝石喷嘴直径 0.3 mm。试验过程中,将供丸装置与水刀进砂口相连,在供丸装置中放入适量的喷射弹丸(直径 $d=0.2$ mm,材质为 410 不锈钢)。利用弹丸自重及高压水射流喷射时产生的负压使弹丸进入混砂室,从而形成弹丸射流并通过弹丸喷嘴喷射到试样表面。

表 1 18CrNiMo7-6 渗碳合金钢的化学成分
Tab.1 Chemical composition of 18CrNiMo7-6 carburizing alloy steel

wt%								
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Fe
0.15~0.21	0.4	0.50~0.90	≤0.035	≤0.035	1.50~1.80	1.40~1.70	0.25~0.35	Bal.

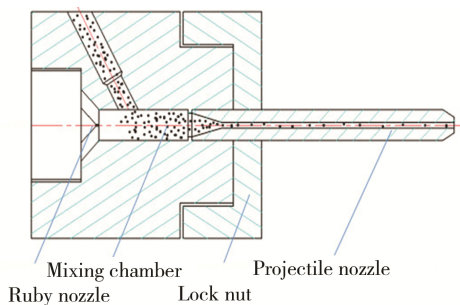


图 1 喷头结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of nozzle structure

采用加拿大 Proto 高速大功率 X 射线残余应力分析仪对试样进行残余应力的测量。其测量原理为通过 X 射线衍射, 根据布拉格定律 $2d \sin \theta = n\lambda$ (d 为晶界间距, λ 为 X 射线波长, θ 为布拉格角, 其值为衍射角的 $1/2$) 和弹性理论可得公式 $\sigma = K \frac{\partial(2\theta)}{\partial \sin^2 \psi}$ (K 为应力常数, ψ 为衍射晶面方位角), 即通过衍射角 2θ 随衍射晶面方位角 ψ 变化而变化的快慢程度来直接反映出应力值的大小。测量时, 管电压为 30 V, 管电流为 25 A, 铬靶 K-Alpha 辐射, Fe (211) 衍射。X 射线弹性常数为: $1/2S_2=5.92 \times 10^{-6}/\text{MPa}$ 、 $S_1=1.28 \times 10^{-6}/\text{MPa}$ 。

每个面测三个点, 以其平均值作为该面的残余应力测量值。Gao Y K 等人^[13]将传统喷丸残余应力场的特征曲线归纳为 5 个特征参量: 表面残余应力 σ_{sr} 、最大残余压应力 σ_{mcr} 、最大残余拉应力 σ_{mtr} 、最大残余压应力距表面距离 z_{m} 和残余压应力场深度 z_0 , 如图 2 所示。

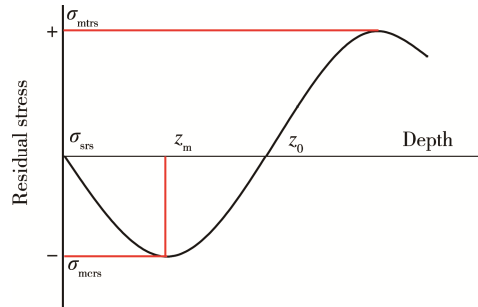


图 2 喷丸残余应力场特征曲线

Fig.2 Characteristic curve of shot peening residual stress field

采用 HV-1000 型显微硬度计测定试样的显微硬度, 施加试验力为 9.8 N, 施加试验力速度为 0.05 mm/s, 自动加卸载试验力, 试验力保荷时间 10 s。卸载完成后通过压痕测量长度换算出显微硬度值, 每个面测五个点, 以其平均值作为该面的显微硬度测量值。采用电化学腐蚀方法对试样进行逐步剥层, 从而进行残余应力及显微硬度沿层深方向的测量, 剥层深度通过千分表测量。采用三维表面形貌测量系统测定试样的表面粗糙度 R_a 值, 测量时, 选取扫描拼接面积为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。采用超景深三维显微系统拍摄试样表面二维形貌, 选择放大倍数为 500 \times 。

试验采用喷射角度为 90° 的直线循环喷射方法, 以喷射压力、喷射靶距和喷嘴移动速度为变量, 通过单因素变量法来研究其对材料表面性能的影响。试样喷射条件如表 2 所示。

表 2 试样的喷射条件
Tab.2 Jetting condition of specimen

喷射压力 P/MPa	喷射靶距 H/mm	喷嘴移动速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$
200、250、300、350	10	200
250	10、50、90	200
250	10	200、500、800

2 结果与分析

2.1 表面形貌和粗糙度

图 3a 为初始试样表面形貌。由图可知, 试样初始表面较为平整, 磨削痕迹清晰可见, 有少量磨削时产生的凹坑。图 3b、3c、3d 为改变喷射压力 P 时, 后混合水射流喷丸后试样表面形貌。由图可知, 喷丸后原有磨削痕迹被消除。喷射压力 $P=200 \text{ MPa}$ 时, 试样表面最为平整, 只有少量凹坑。但随着喷射压力 P 的增加, 凹坑的数量增多, 直径增大。说明在后混合水射流喷丸过程中, 弹丸会对试样表层产生一定的冲蚀、磨损、剪切作用, 从而使试样表面产生一定的去除量^[4,14]。此外, 随着喷射压力 P 的增加, 弹丸获得的能量增大, 对试样表层产生的去除量增大。

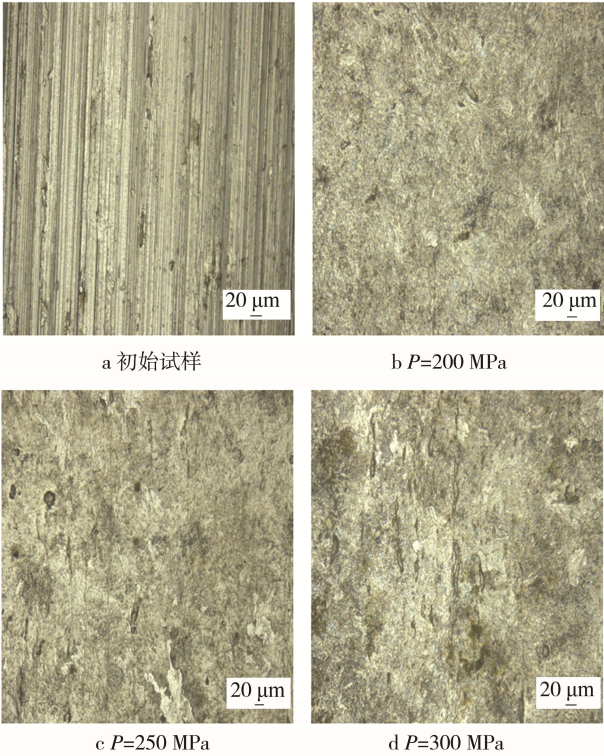


图 3 试样表面形貌

Fig.3 Appearance of sample surface: a) original specimen, b) $P=200 \text{ MPa}$, c) $P=250 \text{ MPa}$, d) $P=300 \text{ MPa}$

图 4 为后混合水射流喷丸后试样表面粗糙度 R_a 与工艺参数的关系。由图可知, 随着喷射压力 P 和喷射靶距 H 的增加, R_a 增大。随着喷嘴移动速度 v 的增加, R_a 减小。其中, 当喷射压力 $P=200 \text{ MPa}$ 时, 试样表面粗糙度 R_a 约为 $0.97 \mu\text{m}$, 比初始试样表面粗糙度 R_a ($1.2 \mu\text{m}$) 有所减小, 说明后混合水射流喷丸在一定条件下可降低试样的表面粗糙度。

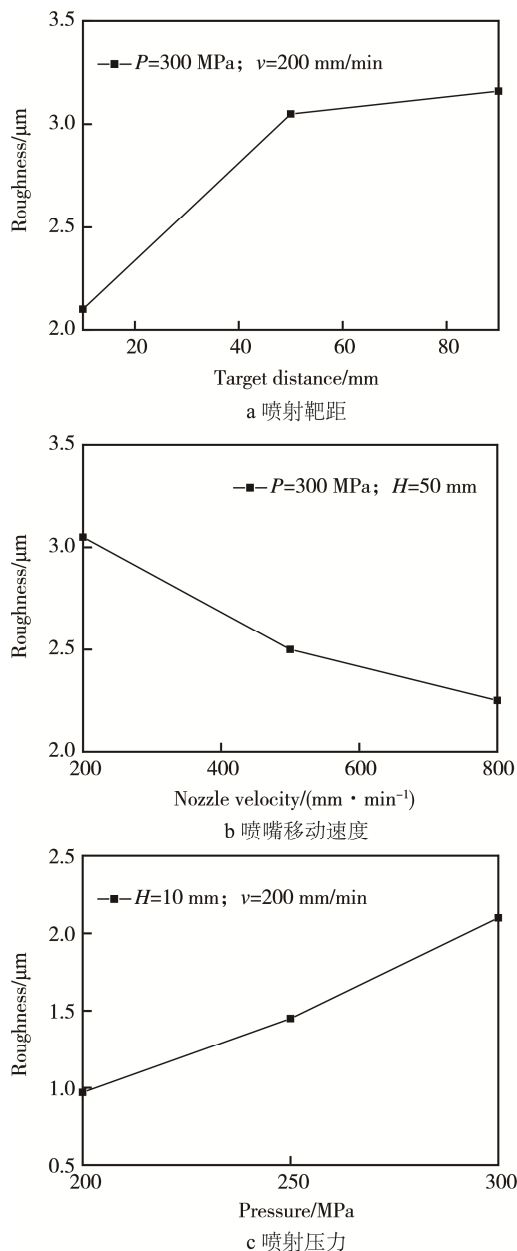


图4 试样表面粗糙度曲线

Fig.4 Curve of specimen surface roughness: a) target distance, b) nozzle velocity, c) pressure

2.2 显微硬度

图5为初始试样及改变喷射压力 P 时,后混合水射流喷丸处理后试样的显微硬度沿层深的变化曲线。由图可知,初始试样表面硬度较低,约为58.5HRC。经过后混合水射流喷丸处理后,试样表层硬度有所提高,最大值都出现在表面。当喷射压力 P 越大时,试样表面硬度值也越大。其中,喷射压力 $P=300$ MPa时,表面硬度值约为62.8HRC,比初始试样表面硬度值增加了7.35%。随着层深的增加,试样硬度值都逐渐减小,最终在800 μm 处达到初始试样的硬度值。说明后混合水射流喷丸强化技术对试样表层具有硬化作用,且越靠近表面,硬化效果越明显。

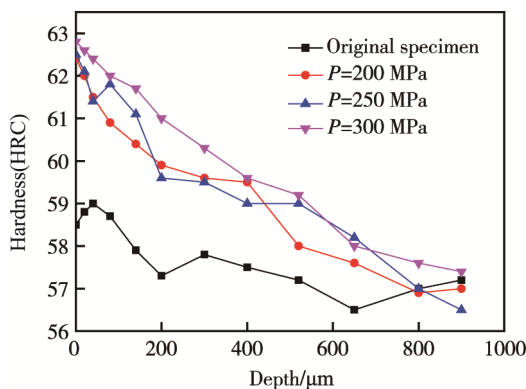


图5 试样显微硬度沿层深变化曲线

Fig.5 Curve of specimen microhardness along the layer depth

2.3 残余应力

传统气动喷丸后,试样残余压应力沿层深都是先增大后减小,呈现勺子形分布。这是喷丸时材料表层和内部塑性变形程度不均匀所致。当层深增加到一定程度时,材料只会发生弹性变形,喷丸过程结束后,弹性变形区域会有恢复到原来状态的趋势。因此,材料内部对表层产生约束,从而产生残余压应力,而无数凹陷或压痕的重叠形成了较均匀的残余压应力层^[15]。

图6a为初始试样的残余应力沿层深变化曲线。由图可知,初始试样 σ_{srs} 约为-258 MPa,随着层深的增加,残余应力先变为拉应力,之后又变为压应力,最后稳定在-180 MPa左右。这是由于试样经过渗碳淬火后,材料表面和心部的组织存在差异,产生了不均等的塑性变形,从而形成了残余压应力层,而试样在磨削处理过程中,接近表层处的残余压应力又发生了部分释放所致。

图6b为改变喷射压力 P 时,后混合水射流喷丸后试样残余应力沿层深的变化曲线。由图可知,当喷射压力 P 从200 MPa增加到300 MPa时,试样的 σ_{srs} 、 σ_{mcrrs} 及 z_m 都是随着压力的增加而增大,但是喷射压力 P 从300 MPa增加到350 MPa时,试样 σ_{srs} 和 σ_{mcrrs} 却几乎不再变化,而 z_m 略有增加,此时 σ_{srs} 为 (-700 ± 20) MPa, σ_{mcrrs} 为 (-1320 ± 10) MPa, z_m 分别约为120、130 μm 。

图6c、6d分别为改变喷射靶距 H 和喷嘴移动速度 v 时,后混合水射流喷丸后试样残余应力沿层深的变化曲线。由图可知,随着喷射靶距 H 及喷嘴移动速度 v 的增加,试样残余应力随层深的变化曲线近似重合。此时 σ_{srs} 分别为 (-450 ± 20) MPa和 (-520 ± 20) MPa, σ_{mcrrs} 都为 (-1250 ± 10) MPa, z_m 都约为120 μm 。说明后混合水射流喷丸工艺对该材料试样所能引入的残余压应力存在固有最大值 σ_{mirs} ,且 σ_{mirs} 不以喷丸工艺的改变而改变,而是由材料的性能参数所决定的。

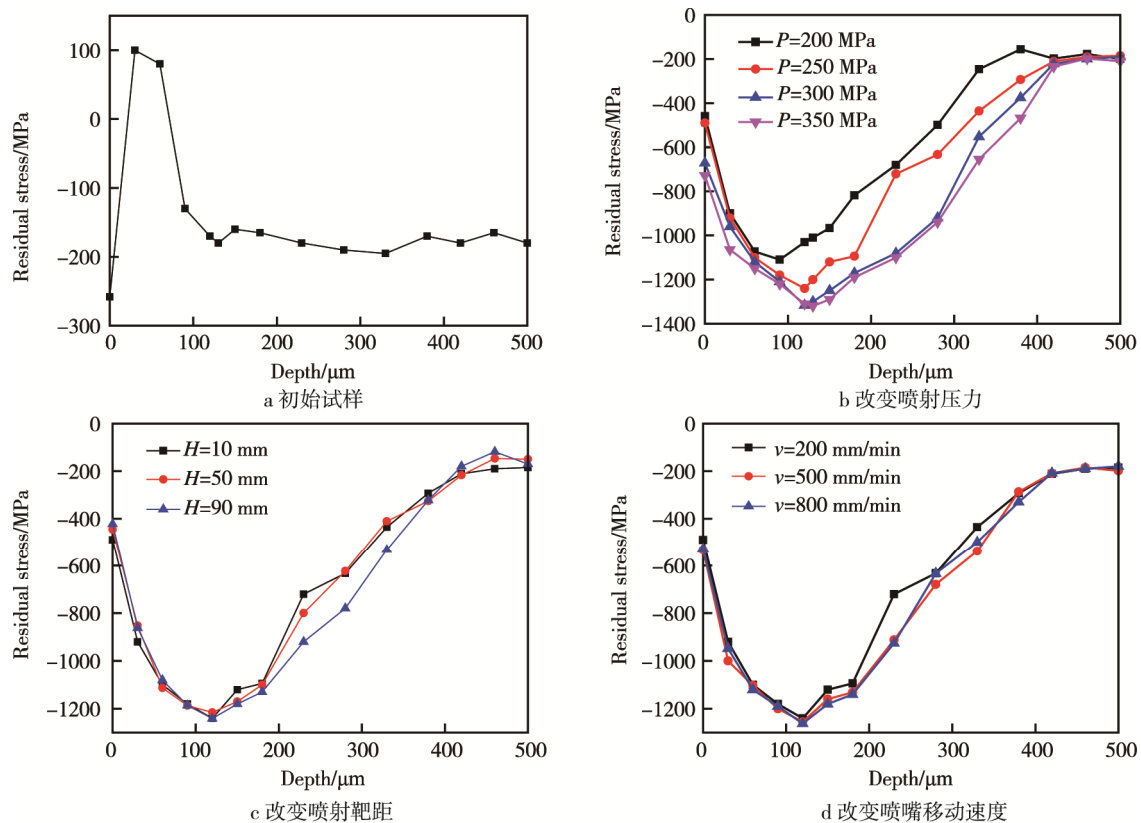


图 6 试样残余应力沿层深变化曲线

Fig.6 Curve of specimen residual stress along the layer depth: a) original specimen, b) change pressure, c) change target distance, d) change nozzle velocity

高玉魁在文献[16]中也发现了类似结果。当所引入的残余压应力未达到 σ_{mirs} 时,所产生的最大残余压应力值随喷射压力 P 的增加而增大,但随喷射靶距 H 和喷嘴移动速度 v 的改变而变化不大,说明后混合水射流喷丸后试样残余应力的分布主要与喷射压力 P 有关,而与喷射靶距 H 和喷嘴移动速度 v 关系不大。当引入的残余压应力达到 σ_{mirs} 时,所产生的最大残余压应力值 σ_{mcrs} 即为 σ_{mirs} ,不再改变。但是, z_m 值仍会随着喷射压力 P 的增加而增大。

3 结论

1) 经过后混合水射流喷丸后, 18CrNiMo7-6 渗碳合金钢试样表面产生了一定的去除量。弹丸和水碰撞试样表面的过程中,形成新凹坑的数量及大小与喷射压力 P 正相关。试样表面粗糙度 Ra 随着喷射压力 P 及喷射靶距 H 的增加而增大,随着喷嘴移动速度 v 的增加而减小,且在一定条件下,后混合水射流喷丸对试样表面具有抛光作用。试样表层 800 μm 内,显微硬度都有所增加,即对试样表层产生硬化作用,且越靠近表面,硬化效果越明显。

2) 该试样材料经过后混合水射流喷丸后,残余压应力都是先增大后减小,呈现勺子形分布,并且所

能引入的残余压应力具有固有最大值 σ_{mirs} 。当所引入的残余压应力未达到 σ_{mirs} 时,所产生的最大残余压应力值 σ_{mcrs} 随喷射压力 P 的增加而增大,但随喷射靶距 H 和喷嘴移动速度 v 的改变变化不大,即后混合水射流喷丸后试样残余应力的分布主要与喷射压力 P 有关,而与喷射靶距 H 和喷嘴移动速度 v 关系不大。当引入的残余压应力达到 σ_{mirs} 时,所产生的最大残余压应力值 σ_{mcrs} 即为 σ_{mirs} ,不再改变,但是最大残余压应力距表面的距离值 z_m 仍随着喷射压力 P 的增加而增大。

参考文献:

- [1] 张炜, 曹亮, 高国强, 等. 国内外航空喷丸技术与装备发展[J]. 航空制造技术, 2013, 437(17): 32-35.
ZHANG Wei, CAO Liang, GAO Guo-qiang, et al. Development of Shot Peening Technology and Equipment in Aviation Industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 437(17): 32-35.
- [2] RAJESH N, VEERARAGHAVAN S, BABU N R. A Novel Approach for Modelling of Water Jet Peening[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44(7): 855-863.
- [3] 张兴权, 戴亚春, 杜为民, 等. 金属零件表面改性的喷丸强化技术[J]. 电加工与模具, 2005(2): 30-32.
ZHANG Xing-quan, DAI Ya-chun, DU Wei-min, et al.

- Strengthening Technologies of Shot Peening on Metal Part Surface Modification[J]. Electrical Machining and Molds, 2005(2): 30-32.
- [4] 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 Xiong, LIANG Yi-long, WU Ze-li, et al. Effect of Abrasive Waterjet Peening on Surface Integrity and Fatigue Properties of Carburizing GDL-1 Steel[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(2): 41-47.
- [5] ZAFRED P R. High Pressure Water Shot Peening: EP, EP19860306633 B1[P]. 1986-08-28.
- [6] 胡正云, 李满福, 谢兰生. TB6 钛合金激光喷丸与机械喷丸残余应力场有限元模拟[J]. 航空材料学报, 2013, 33(4): 37-42.
HU Zheng-yun, LI Man-fu, XIE Lan-sheng. TB6 Titanium Alloy Laser Shot Peening and Mechanical Shot Peening Residual Stress Field Finite Element Simulation[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013, 33(4): 37-42.
- [7] 董星, 王瑞红, 段雄. 前混合水射流临界喷丸压力的研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(4): 462-466.
DONG Xing, WANG Rui-hong, DUAN Xiong. Study of Premixed Waterjet Critical Shot Peening Pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(4): 462-466.
- [8] RAMULU M, KUNAPORN S, JENKINS M G, et al. Fatigue Performance of High-pressure Waterjet-peened Aluminum Alloy[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2002, 124(1): 118-123.
- [9] AROLA D D, MCCAIN M L. Abrasive Waterjet Peening: A New Method of Surface Preparation for Metal Orthopedic Implants[J]. China Surface Engineering, 2000, 53(5): 536-546.
- [10] 付鹏. 高强双相钢喷丸强化及其 XRD 表征[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- FU Peng. Study on Shot Peening and XRD Characterization of High-strength Dual Phase Steel[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [11] AROLA D, ALADE A E, WEBER W. Improving Fatigue Strength of Metals Using Abrasive Waterjet Peening[J]. Machining Science & Technology, 2006, 10 (2): 197-218.
- [12] 刘海霞, 李秀阁, 张桃, 等. 射流压力对淹没水射流冲击与空蚀效果的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(12): 104-110.
LIU Hai-xia, LI Xiu-ge, ZHANG Tao, et al. Effects of Jet Pressure on Impingement and Cavitation Erosion Effects of Submerged Water Jet[J]. Surface Technology, 2016, 45(12): 104-110.
- [13] 高玉魁. TC18 超高强度钛合金喷丸残余压应力场的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(11): 1209-1212.
GAO Yu-kui. Residual Compressive Stress Field in TC18 Ultra-high Strength Titanium Alloy by Shot Peening[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(11): 1209-1212.
- [14] 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 (7): 188-196.
ZHANG Cheng-guang, ZHANG Yong, ZHANG Fei-hu, et al. Study on Removal Model of Abrasive Waterjet Machining[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015(7): 188-196.
- [15] GAO Yu-kui, MEI Yao, LI Jin-kui. An Analysis of Residual Stress Fields Caused by Shot Peening[J]. China Surface Engineering, 2002, 33(6): 1775-1778.
- [16] SOADY K A, MELLOR B G, REED P A S. Life Assessment Methodologies Incorporating Shot Peening Process Effects: Mechanistic Consideration of Residual Stresses and Strain Hardening Part 2—Approaches to Fatigue Life after Shot Peening[J]. Materials Science and Technology, 2013, 29(6): 652-664.