

纯水射流间接强化对 18CrNiMo7-6 钢 表面粗糙度和残余应力的影响

孙俊杰, 邓重启, 屈臣鸣, 王文涛

(郑州大学 机械工程学院, 郑州 450001)

摘 要: **目的** 减小高压水射流强化中冲蚀现象对材料表面的影响。**方法** 选择水射流喷射压力、喷射靶距和覆盖小钢珠直径为可变参数, 对 18CrNiMo7-6 渗碳合金钢进行高压水射流强化单因素试验。运用三维表面形貌测量系统和 X 射线残余应力分析仪对试验后的材料进行测量分析。**结果** 随着压力的增大, 表面粗糙度增加, 残余应力最大可达 693 MPa, 但继续增大喷射压力反而会使残余压应力减小。随着靶距的增加, 表面残余应力几乎直线减小, 表面粗糙度则在靶距为 110 mm 时达到最小值 0.77 μm 。随着小钢珠直径的增加, 表面残余压应力先增大后减小, 最大值为 782 MPa; 表面粗糙度先变小后增大, 最小值为 0.76 μm 。**结论** 水射流喷射压力、喷射靶距和覆盖小钢珠直径对 18CrNiMo7-6 钢的表面粗糙度和残余应力影响明显。同时, 每个参数在不同的变化范围, 对材料表面主要的影响方式不同, 对材料的表面粗糙度和表面残余压应力的影响也存在着差异。

关键词: 水射流; 喷射压力; 喷射靶距; 钢珠直径; 粗糙度; 残余压应力

中图分类号: TG147 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)07-0173-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.07.024

Effects of Indirect Strengthening by Pure Water Jet on Surface Roughness and Residual Stress of 18CrNiMo7-6 Steel

SUN Jun-jie, DENG Chong-qi, QU Chen-ming, WANG Wen-tao

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

ABSTRACT: The work aims to reduce the effects of erosion phenomenon on material surface in high-pressure water jet strengthening technology. Single factor test was applied to 18CrNiMo7-6 carburizing alloy steel by selecting water jet pressure, jet target distance and covering small steel ball diameter as variable parameters. The tested materials were measured and analyzed by means of three dimensional surface morphology measurement system and X-ray residual stress analyzer. Surface roughness increased as the pressure increased, and the maximum residual stress was 693 MPa. However, residual compressive stress decreased as injection pressure further increased. With the increase of target distance, surface residual stress decreased almost linearly, the surface roughness reached the minimum value of 0.77 μm at the target distance of 110 mm. As small steel ball diameter increased, the surface residual compressive stress first increased and then decreased, and the maximum value was 782 MPa; the surface roughness first decreased and then increased, and the minimum value was 0.76 μm . Both surface roughness and residual stress of 18CrNiMo7-6 steel are obviously affected by water jet injection pressure, injection target distance and covering small steel ball diameter. Meanwhile, each parameter has different influence mode on material surface in different vari-

收稿日期: 2018-03-23; 修订日期: 2018-05-25

Received: 2018-03-23; Revised: 2018-05-25

作者简介: 孙俊杰 (1965—), 男, 副教授, 主要研究方向为抗疲劳制造。

Biography: SUN Jun-jie (1965—), Male, Associate professor, Research focus: anti-fatigue manufacturing.

ation range, and different influence on surface roughness and residual compressive stress of materials.

KEY WORDS: water jet; injection pressure; jet target distance; steel ball diameter; roughness; residual compressive stress

18CrNiMo7-6 是一种含有铬镍钼元素的优质合金渗碳钢^[1-2]。这种钢具有高强度、良好的韧性和淬透性等优点,因此广泛应用于航空、船舶、铁路、汽车和工程机械等领域,作为制造齿轮、轴套筒、链轮等重载零件的主要材料^[2-3]。然而,经过渗碳淬火和机械加工后,材料表面往往会产生细微的裂纹,这些裂纹会对由 18CrNiMo7-6 制造的机械零件的疲劳强度和工作寿命产生较大的影响^[4]。因此,对 18CrNiMo7-6 进行表面强化常常作为用来提高其表面质量,进而提高零件抗疲劳寿命的方法。

随着大型化、智能化、专用化的高压水射流装备的迅速发展,高压水射流技术已经广泛地应用于航空航天、工业清洗、机械工程、石化采矿、市政工程等众多领域^[5]。高压水射流强化技术是随着水射流迅速发展而形成的一项新的强化技术,基本原理就是以水为工作介质,将携带巨大能量的水射流以某种特定的方式高速喷射到金属零件表面,使零件表层材料在再结晶温度下产生塑性形变,呈现理想的组织结构和残余应力分布,从而达到提高金属零件疲劳抗力的目的^[6-8]。

随着国内外对高压水射流的研究,许多研究者发现,高压水射流对金属进行喷丸强化的同时,由于水

中携带的大量微小气泡在金属表面溃灭产生了很高的冲击波,以及水流、水团以及水射流动压的作用,水射流喷丸强化对金属强化表面的冲蚀作用比较严重^[9-13]。德国凯泽斯劳滕大学的 Azmir Azhari 和 Christian Schindler 等人通过对不同金属进行实验发现,随着射流次数和射流压力的增加,表面残余应力和表面硬度增加,同时表面冲蚀在金属表面产生大量潜在的裂纹萌生点,导致表面粗糙度增加,疲劳强度降低^[12-13]。高压水射流对金属表面的冲蚀机理非常复杂,因此避免水射流冲蚀成为了一个新的研究方向。文中采用水射流间接冲击 18CrNiMo7-6 钢,对其表面进行强化,避免水射流直接对材料表面的冲蚀,进而研究水射流参数对 18CrNiMo7-6 钢表面残余应力和表面粗糙度的影响。

1 试验

试验所用到的材料是经过 920 °C 渗碳+800 °C 淬火+180 °C 回火并磨削处理的 18CrNiMo7-6 渗碳合金钢,试验试件的尺寸为 30 mm×30 mm×28 mm,其主要化学成分及力学性能见表 1 和表 2^[14]。

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

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.

表 2 18CrNiMo7-6 渗碳合金钢的力学性能
Tab.2 Mechanical properties of 18 CrNiMo7-6 carburized alloy steel

Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation/%	Reduction of area/%
1220	1016	16	96

试验所用高压水射流发生装置的最低输出压力为 70 Pa, 最高输出压力为 410 MPa, 宝石喷嘴直径为 0.3 mm。试验过程中,先将试件固定于一个容器底部,用四层一定直径的小钢珠将试件覆盖,然后用水射流发生装置以喷射角度为 90°的直线循环喷射方法对试件正上方喷射一个面积为 20 mm×20 mm 的区域,试验方法如图 1 所示。喷嘴移动速度固定为 200 mm/min,每次偏移 0.6mm。试验中所用到的小钢珠为普通碳钢加工后电镀制成。

试验原理: 高压水射流先喷射到小钢珠上,然后小钢珠受力后和试件相互作用,从而达到表面强化的效果。试验避免了水射流直接作用于试件表面造成严

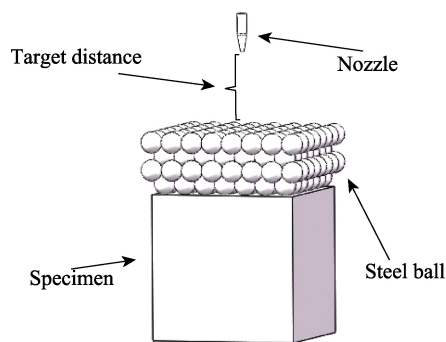


图 1 试验方法模型

Fig.1 Model of test method

重的表面冲蚀。为了避免试验过程中水在容器中积存,所用容器四周钻有直径为 2 mm 的小孔。采用软连接将容器和水刀喷嘴连接形成一个密闭容器,防止试验过程中小钢珠飞出容器影响试验效果。试验分为三组,在进行每组喷射试验时,除喷射压力、喷射靶距和小钢珠直径以外,其余试验条件均不发生变化,试样喷射条件见表 3。

表 3 三组喷射试验的喷射条件
Tab.3 Injection conditions of three groups of injection test

Injection pressure/MPa	Target distance/mm	Steel ball diameter/mm
80、130、180、230、280、330	110	4.0
280	70、90、110、130、150	4.0
280	110	2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0、5.5

试验后，对每个试样经过处理的表面取三个点，利用加拿大 Proto 高速大功率 X 射线残余应力分析仪测量残余应力，采用三维表面形貌测量系统测出表面粗糙度 Ra 值，分别求出每个试件三个点的残余应力和粗糙度的平均值。试验前，测得初始试样的表面粗糙度为 $1.36\text{ }\mu\text{m}$ ，残余应力值为 109.6 MPa ，表现为残余拉应力。采用超景深三维显微系统，选择放大倍数为 $500\times$ 拍摄试样表面二维形貌。

2 试验结果和分析

2.1 喷射压力的影响

图 2 为各条件下试件的表面形貌。由图 2a 可以看出，原始试件表面有明显的划痕，且部分划痕较深。图 2b、c、d、e 较图 2a 处理痕迹明显，且图 2b 较图 2a 表面平整度大大提升，图 2c 和图 2d 表面相差不大。图 2c、d、e 表面出现黑色区域，说明在试验处理中，表面产生了明显的去除量。图 2e 中黑色区域面积较大（其中表面较亮是保存试件表面的油引起的），表明在压力 330 MPa 的条件下，去除量迅速增加。

经过不同喷射压力处理后对应的表面粗糙度如图 3 所示。在其他喷射条件不变的情况下，试件表面

粗糙度随着喷射压力的增大而增大。表面粗糙度的最大值为 $1.05\text{ }\mu\text{m}$ ，最小值为 $0.68\text{ }\mu\text{m}$ 。对比未经处理过的初始试件，经处理过后的试件表面粗糙度变小。同时，在 $130\sim 280\text{ MPa}$ 之间，试件表面粗糙度变化较小，基本维持在 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 。从图 2 中可以看出，图 2c 和图 2d 表面确实相差不大。由此可知，在这个喷射压力范围内，喷射压力对表面粗糙度的影响较小。而在 330 MPa 的喷射压力下，粗糙度迅速增大，和图 2e 显示的表面形貌也完全符合。

试件表面残余应力随喷射压力增大的变化曲线如图 4 所示。喷射处理后，试件表面由较小的残余拉应力（正 150 MPa ）变为残余压应力，残余压应力的变化范围在 $450\sim 700\text{ MPa}$ 之间。根据变化曲线，在 $80\sim 280\text{ MPa}$ 的喷射压力范围内，试件表面获得的残余应力随着喷射压力的增大而增大，在 280 MPa 以后，残余压应力又变小。小钢珠对试件表面的作用力随着喷射压力的增大而增大，因而造成残余压应力随之增大。喷射压力超过 280 MPa 后，小钢珠对试件表面的作用力继续增加，造成试件表面的去除量增加，使得试件表面残余压应力变小。图 3 中 280 MPa 以后表面粗糙度迅速增大，也说明了压力超过一定值以后去除量迅速增加对试件表面的影响。

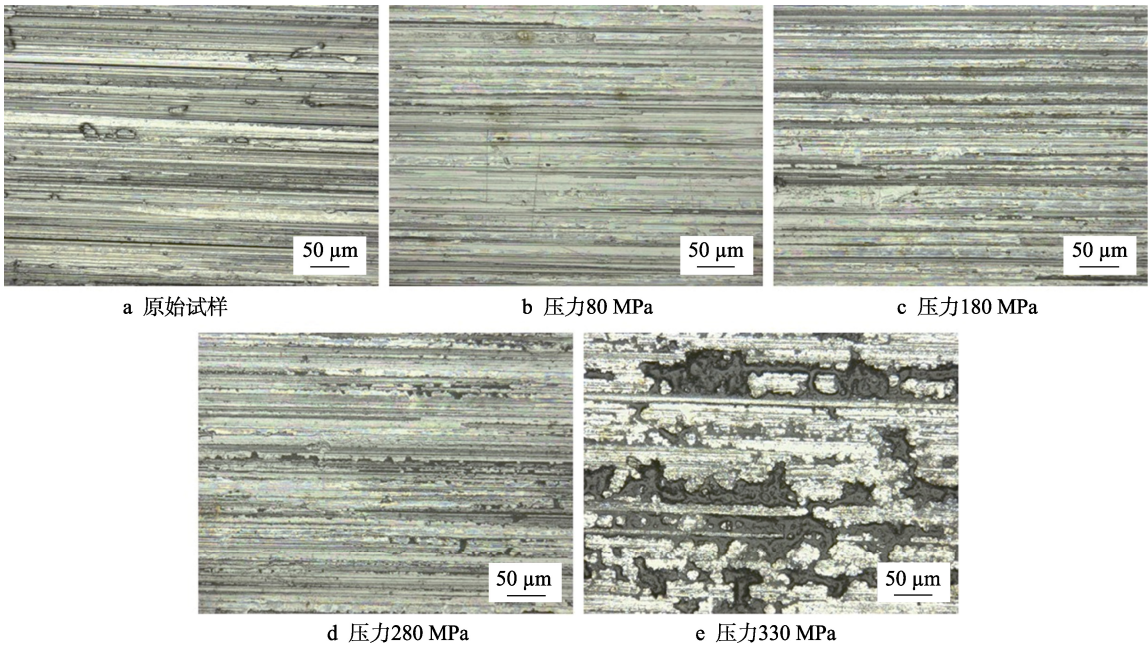


图 2 试样表面形貌
Fig.2 Surface morphology of sample surface

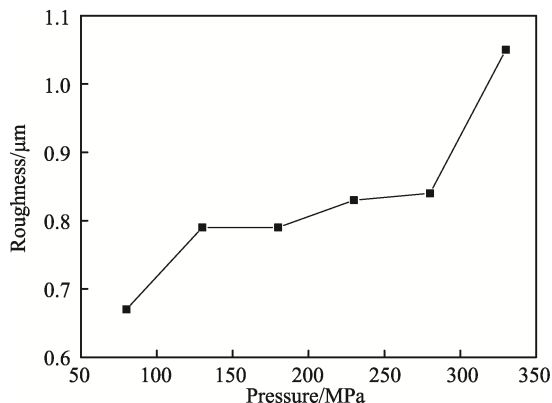


图3 粗糙度随喷射压力变化曲线

Fig.3 Variation curve of roughness with injection pressure

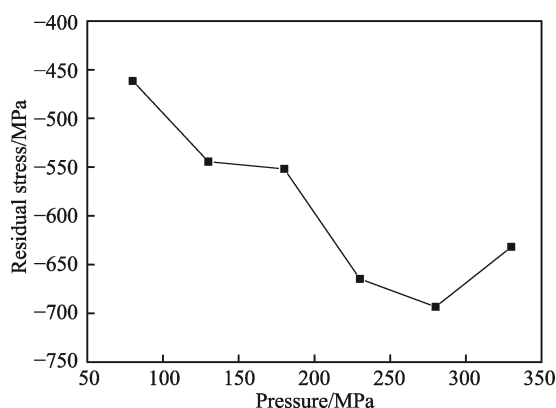


图4 表面残余应力随喷射压力变化曲线

Fig.4 Variation curve of surface residual stress with injection pressure

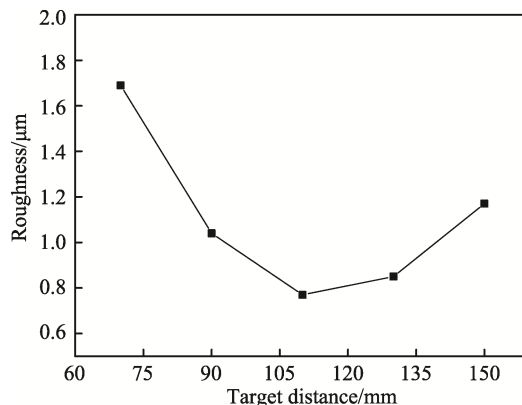


图5 粗糙度随喷射靶距变化曲线

Fig.5 Variation curve of roughness with target distance

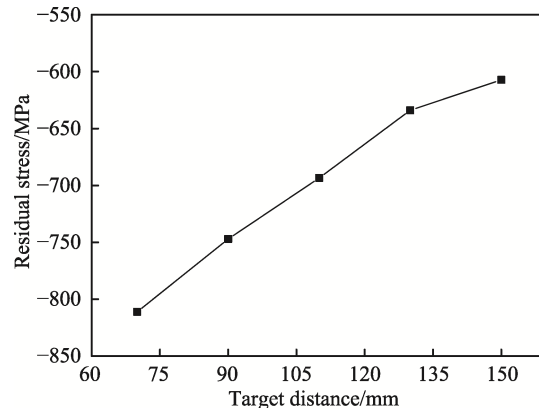


图6 表面残余应力随喷射靶距变化曲线

Fig.6 Variation curve of surface residual stress with target distance

2.2 喷射靶距

图5和图6分别为试件表面粗糙度和表面残余压应力随喷射靶距的变化曲线。从图5可知,随着喷射靶距的增大,处理试件的表面粗糙度先变小后增大。在靶距为70 mm时,表面粗糙度最大,达到1.69 μm ,超过了初始试件的表面粗糙度。图6显示随着靶距的增大,试件表面残余压应力几乎呈直线减小。在喷射靶距为70 mm时,试件表面残余压应力超过了800 MPa,而靶距为150 mm的情况下,试件表面残余压应力也达到了600 MPa,说明喷射靶距对表面残余应力的影响非常明显。

对于试件表面残余应力,在喷射压力相同的情况下,水流初始能量一样。随着喷射靶距的增加,高速水流克服空气阻力做功增加,促使水流喷射到小钢珠表面时能量减小,小钢珠对试件表面的作用随之减小,导致表面残余压应力随靶距增加而减小。对于试件表面粗糙度,减小靶距和增大喷射压力相似,小钢珠对试件表面的作用力增大,导致去除量增加,使得表面粗糙度较大。随着靶距的增加,表面粗糙度变小。水流从喷嘴喷出以后会有发散的效果,所以靶距的增加同样使得喷射出来的水流与小钢珠接触时的面积增加,单个小钢珠对试件表面作用效果变小,因此在

喷射靶距超过110 mm后,靶距增加使得小钢珠对试件表面的粗糙度影响变小,会越来越接近初始试样。

2.3 小钢珠直径

图7和图8分别为处理后的表面粗糙度和表面残余压应力在覆盖不同直径小钢珠下的变化情况。图7显示,随着覆盖在试件表面小钢珠直径的增大,表面粗糙度先变小后变大。在喷射压力和喷射靶距不变的情况下,小钢珠直径越小,曲率越大,受力后与试件表面的接触面积较小,对试件表面的点作用更明显,表面粗糙度较大。小钢珠直径增加到3.5 mm以后,小钢珠的质量成为影响小钢珠对试件表面作用的主要原因。小钢珠直径继续增加导致惯性增大,使得水射流对小钢珠的冲击力不够,小钢珠对试件作用减小,试件表面粗糙度增大至1.32 μm ,越来越接近初始试件的表面粗糙度(1.36 μm)。

对于试件表面残余压应力,小钢珠对表面的冲击力是主要的影响因素。如图8所示,在小钢珠直径小于3.5 mm的情况下,小钢珠对试件表面的冲击会随着小钢珠直径的增加而增加,表面残余压应力增加;直径大于3.5 mm以后,小钢珠直径增加对表面残余压应力的影响和对表面粗糙度的影响相似,水流对质量较大的小钢珠冲击力减小,进而导致表面获得的残

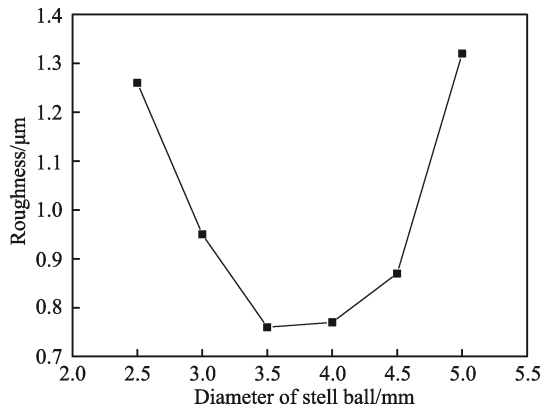


图 7 粗糙度随钢珠直径变化曲线

Fig.7 Variation curve of roughness with steel ball diameter

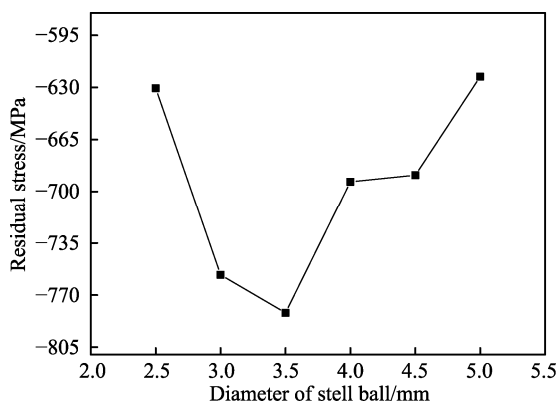


图 8 表面残余应力随钢珠直径变化曲线

Fig.8 Variation curve of surface residual stress with steel ball diameter

余压应力减小。图 7 和图 8 曲线的变化情况也说明了小钢珠直径对表面残余压应力和表面粗糙度的影响存在一个临界值,但是由于试验中,直径间隔为 0.5 mm,因此无法确定这个直径临界值是否为 3.5 mm。

3 结论

1) 试件表面覆盖小钢珠的纯水射流表面强化技术对 18CrNiMo7-6 渗碳合金钢的表面作用明显。随着喷射压力的增大,18CrNiMo7-6 渗碳合金钢表面粗糙度逐渐增大,但喷射压力在 130~280 MPa 之间,试件表面粗糙度变化较小。表面残余应力则是在一定喷射压力范围内,随着压力的增大而增大。当喷射压力超过一定值后,表面去除量增加成为影响试件表面质量的主要因素,导致表面残余压应力减小。

2) 在其他喷射条件不变的情况下,较小喷射靶距可以提高该材料表面的残余压应力,材料表面的粗糙度则随着喷射靶距的增加而先变小后变大。

3) 覆盖小钢珠的直径存在一个临界值。小钢珠直径小于该临界值时,材料表面粗糙度随小钢珠直径的增加而减小,材料的表面残余压应力随小钢珠直径的增加而增加;小钢珠直径大于该临界值时,材料表

面粗糙度随钢珠直径的增加而增加,材料的表面残余压应力随小钢珠直径的增加而减小。

参考文献:

- [1] 高红梅, 颜力, 章正晓, 等. 18CrNiMo7-6 钢韧脆转变温度的研究[J]. 机车车辆工艺, 2017(1): 1-3.
GAO Hong-mei, YAN Li, ZHANG Zheng-xiao, et al. A Study of the Ductile-brittle Transition Temperature of 18CrNiMo7-6 Steel[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2017(1): 1-3.
- [2] FU P, JIANG C. Residual Stress Relaxation and Micro-structural Development of the Surface Layer of 18CrNiMo7-6 Steel after Shot Peening during Isothermal Annealing[J]. Materials & Design, 2014, 56(4): 1034-1038.
- [3] 陈世杰, 孙维, 汪开忠, 等. 18CrNiMo7-6 齿轮钢带状组织控制及其对力学性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(9): 76-80.
CHEN Shi-jie, SUN Wei, WANG Kai-zhong, et al. Control of Banded Structure and Its Effect on the Mechanical Properties of 18CrNiMo7-6 Gear Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2016, 28(9): 76-80.
- [4] FU P, ZHAN K, JIANG C. Micro-structure and Surface Layer Properties of 18CrNiMo7-6 Steel after Multistep Shot Peening[J]. Materials & Design, 2013, 51(5): 309-314.
- [5] 杨林, 唐川林, 张凤华. 高压水射流技术的发展及应用[J]. 洗净技术, 2004, 2(1): 9-14.
YANG Lin, TANG Chuan-lin, ZHANG Feng-hua. Development and Application of High Pressure Water Jet Technology[J]. Cleaning Technology, 2004, 2(1): 9-14.
- [6] 吉春和, 张新民. 高压水射流喷丸技术及发展[J]. 热加工工艺, 2007, 36(24): 86-89.
JI Chun-he, ZHANG Xin-min. Shot Peening Technology of High Pressure Water Jet and Its Development[J]. Hot Working Technology, 2007, 36(24): 86-89.
- [7] 董星, 段雄. 高压水射流喷丸强化技术[J]. 表面技术, 2005, 34(1): 48-49.
DONG Xing, DUAN Xiong. Technology of Water Jet Shot Peening at High Pressure[J]. Surface Technology, 2005, 34(1): 48-49.
- [8] AZHARI A, SCHINDLER C, GODARD C, et al. Effect of Multiple Passes Treatment in Water Jet Peening on Fatigue Performance[J]. Applied Surface Science, 2015, 388: 468-474.
- [9] 刘欢, 赵秀娟, 刘鹏涛, 等. 空化水射流冲蚀纯铜的表面空蚀损伤[J]. 机械工程材料, 2017, 41(5): 68-73.

- LIU Huan, ZHAO Xiu-juan, LIU Peng-tao, et al. Cavitation Damage on Surface of Pure Copper by Cavitation Water Jet Erosion[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41(5): 68-73.
- [10] 康学勤, 孙智, 杨春敏, 等. 空化水射流对黄铜表面强化性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(8): 140-145.
- KANG Xue-qin, SUN Zhi, YANG Chun-min, et al. Influence of Water Jet Peening on Surface Hardening of Brass[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010, 31(8): 140-145.
- [11] MIESZALA M, TORRUBIA P L, AXINTE D A, et al. Erosion Mechanisms during Abrasive Waterjet Machining: Model Microstructures and Single Particle Experiments[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 247: 92-102.
- [12] AZHARI A, SCHINDLER C, HILBERT K, et al. Influence of Water Jet Peening and Smoothing on the Material Surface and Properties of Stainless Steel 304[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 258: 1176-1182.
- [13] AZHARI A, SCHINDLER C, NKOUMBOU J, et al. Surface Erosion of Carbon Steel 1045 during Waterjet Peening[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2014, 23(5): 1870-1880.
- [14] 刘昱范, 王栋, 陈鑫. 高速磨削 18CrNiMo7-6 磨削力和比磨削能试验研究[J]. 制造技术与机床, 2016(8): 94-97.
- LIU Yu-fan, WANG Dong, CHEN Xin. Experimental Study on the Grinding Force and Specific Grinding Energy of 18CrNiMo7-6 under High-speed Grinding[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016(8): 94-97.