

董 星,王瑞红,段 雄.水射流喷丸强化的试验研究[J].煤炭学报,2014,39(3):568-573. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2013.0449  
Dong Xing, Wang Ruihong, Duan Xiong. Test research of water jet peening strengthening[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(3):  
568-573. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2013.0449

## 水射流喷丸强化的试验研究

董 星<sup>1</sup>,王瑞红<sup>2</sup>,段 雄<sup>3</sup>

(1. 黑龙江科技大学 机械工程学院 黑龙江 哈尔滨 150022; 2. 黑龙江科技大学 计算机与信息工程学院 黑龙江 哈尔滨 150022; 3. 中国矿业大学 机电工程学院 江苏 徐州 221008)

**摘 要:** 为获得水射流喷丸强化对材料表面力学特性和疲劳寿命的影响规律,选择喷丸压力、移动速度和靶距为影响因素,应用水射流对 2A11 铝合金和 45 钢进行喷丸试验;采用显微硬度计和 X 射线应力分析仪分别测定喷丸表面显微硬度和表面残余应力,利用扫描电子显微镜进行疲劳断口形貌观察,应用能谱仪进行内部疲劳源区夹杂物成分分析,获得水射流喷丸强化增益效果及疲劳裂纹萌生机理,指出水射流喷丸可以提高两种材料的表面显微硬度、表面残余压应力和疲劳寿命,并存在最大表面显微硬度靶距和最大表面残余压应力靶距。在试验条件下,2A11 铝合金和 45 钢喷丸疲劳试样比未喷丸疲劳试样的疲劳寿命分别最大提高 1.74 倍和 2.67 倍,且水射流喷丸疲劳裂纹萌生位置的机制与传统喷丸相同。

**关键词:** 水射流; 喷丸强化; 疲劳寿命; 显微硬度; 残余压应力

**中图分类号:** TQ639.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0253-9993(2014)03-0568-06

## Test research of water jet peening strengthening

DONG Xing<sup>1</sup>, WANG Rui-hong<sup>2</sup>, DUAN Xiong<sup>3</sup>

(1. Institute of Mechanical Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China; 2. College of Computer and Information Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** In order to obtain the effect laws of water jet peening strengthening effect on peened material surface mechanical properties and fatigue life, chosen peening pressure, movement velocity, target distance as effect factors, did peening test to 2A11 aluminum alloy and 45 steel by water jet. The micro hardness tester and X-ray stress analyzer were used to respectively determine peened surface micro hardness and surface residual stress. The scanning electron microscope was used to observe the fatigue fracture morphology, the energy dispersive spectrometer was used to analyze inclusions composition in the area of internal fatigue source, got the water jet peening strengthening amplification effect and fatigue crack initiation mechanism. It is indicated that water jet peening can improve the surface micro hardness, surface residual press stress and fatigue life of both materials, the biggest surface micro hardness target distance and the biggest surface residual press stress target distance exist. Under test conditions, the fatigue life of peened samples on 2A11 aluminum alloy and 45 steel, respectively, increases 1.74 times and 2.67 times at most than that of initial samples, moreover, the mechanism of the fatigue crack initiation position with water jet peening is the same to traditional peening.

**Key words:** water jet; peening strengthening; fatigue life; micro hardness; residual press stress

收稿日期: 2013-04-10      责任编辑: 许书阁

基金项目: 哈尔滨市科技创新人才研究专项资金资助项目(2012RFXXG095)

作者简介: 董 星(1964—),男,河北滦平人,教授,博士。Tel: 0451-88036728, E-mail: dongxingwrh@163.com

水射流喷丸强化是20世纪80年代末发展起来的一项湿法喷丸强化新技术<sup>[1]</sup>,是高压水射流技术相对较新的应用领域。其工作原理就是以水为工作介质,将携带巨大能量的水射流连续不断地高速喷射到金属零件表面上,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,达到提高金属零件疲劳抗力的目的<sup>[2]</sup>。

水射流喷丸强化的主要特点是喷丸表面粗糙度值增加小、无热影响区、易于控制、绿色环保,目前在海外得到了快速发展,并已应用于工业领域<sup>[3-9]</sup>。我国高压水射流喷丸强化技术起步较晚,现主要侧重于空化水射流和前混合水射流的喷丸强化研究<sup>[2,10-15]</sup>,而在水射流喷丸强化方面的研究还很少<sup>[16]</sup>。

本文选用2A11铝合金和45钢为试验材料,选择工艺参数中对喷丸性能起主要作用的喷丸压力、移动速度和靶距为影响因素,研究表面显微硬度、表面残余压应力随喷丸工艺参数的变化规律,探索喷丸对两种材料疲劳寿命的增益效果,以期为该技术在我国的快速发展进一步提供技术支持。

## 1 试验材料

选择2A11铝合金和45钢(调质处理)为试验材料。采用XJP-3A型双目金相显微镜做材料显微组织分析,其2A11铝合金试样金相显微组织中基体为 $\alpha$ 相,晶粒呈等轴状,在 $\alpha$ 相基体上弥散分布着黑色点状的 $\theta$ 相( $Al_2Cu$ )和S相( $Al_2CuMg$ )。45钢试样金相组织为回火索氏体。采用MTS 810 Material Test system做材料单向拉伸试验,其室温强度指标如下: $\sigma_{0.2} = 346$  MPa,  $\sigma_b = 474$  MPa(2A11铝合金);  $\sigma_s = 705$  MPa,  $\sigma_b = 830$  MPa(45钢)。

2A11铝合金和45钢的喷丸试样采用小圆试样,试样的拟喷丸表面经电解抛光;疲劳试样选用4点加力的光滑圆柱形试样,按国标GB 4337—84要求设计结构和尺寸。

## 2 试验装置与试验方法

水射流喷丸试验装置如图1所示。试验选择对喷丸性能起主要作用的喷丸压力、喷嘴移动速度和靶距3个影响因素进行喷丸试样的喷丸试验,因素水平为3~7级。射流喷丸表面覆盖率为100%。

喷丸试样和疲劳试样的喷丸条件分别见表1和表2,喷丸过程如图2所示。

按GB 4337—84要求进行疲劳试验,试验中采用成组试验法,应力振幅采用3级应力水平,每级应力

水平测3个试样的数据,然后根据疲劳寿命试验数据绘制S-N曲线的有限寿命。

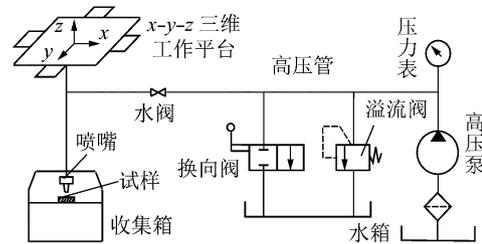


图1 水射流喷丸试验装置

Fig. 1 Test equipment of water jet peening

表1 喷丸试样的喷丸条件

Table 1 Peening condition of peening specimens

参数	数值
喷嘴直径 $d/mm$	0.33
喷丸角度 $\alpha/(^\circ)$	90
喷丸方法	直线喷射
2A11 铝合金喷丸压力 $p/MPa$	80, 100, 120, 140, 160, 180, 200
45 钢喷丸压力 $p/MPa$	140, 160, 180, 200, 220
喷嘴移动速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$	198, 297, 396, 495, 594
喷丸时间 $t/s$	0.100, 0.067, 0.050, 0.040, 0.033
靶距 $l/mm$	10, 25, 40
喷嘴移动轨迹间距 $b/mm$	0.33

表2 疲劳试样的喷丸条件

Table 2 Peening condition of fatigue specimens

参数	数值
喷嘴直径 $d/mm$	0.33
喷丸角度 $\alpha/(^\circ)$	90
喷丸方法	沿轴线方向直线喷射
喷丸压力 $p/MPa$	120(2A11 铝合金), 200(45 钢)
试样转速 $n/(r \cdot min^{-1})$	20
喷嘴轴向移动速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$	6.6
喷嘴移动速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$	596(2A11 铝合金), 471(45 钢)
喷丸时间 $t/s$	0.033(2A11 铝合金), 0.042(45 钢)
靶距 $l/mm$	10
喷嘴移动轨迹间距 $b/mm$	0.33

## 3 试验结果及分析

### 3.1 喷丸对表面显微硬度的影响

采用MHV2000数显显微硬度计测定试样表面显微硬度,施加的试验力为0.490 4 N,试验力施加方法为自动加卸试验力,试验力保持时间为10 s,每个面测5个点的 $HV_{0.05}$ ,以其均值作为该面的硬度。测得的未喷丸试样表面显微硬度分别为121 $HV_{0.05}$

(2A11 铝合金) 和 273HV<sub>0.05</sub>(45 钢)。

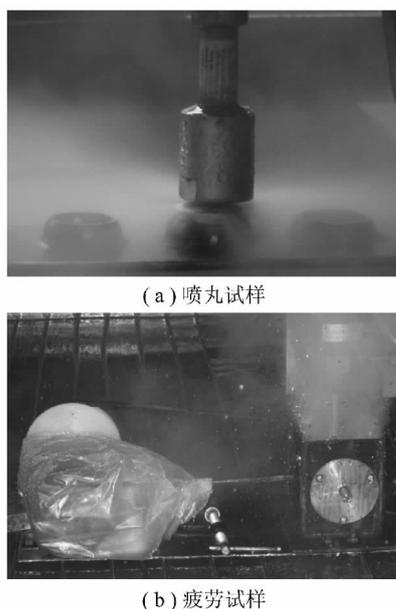


图 2 喷丸过程

Fig. 2 Peening process

距从 10 mm 增加至 40 mm 时, 2A11 铝合金和 45 钢的喷丸表面显微硬度分别由 122HV<sub>0.05</sub> 增大到 137HV<sub>0.05</sub> 和由 319HV<sub>0.05</sub> 增大到 323HV<sub>0.05</sub>。根据非淹没水射流的技术特性计算可知, 由直径 0.33 mm 喷嘴喷射形成的水射流最大核心段长度为 44.55 mm, 因此, 当靶距在 10~40 mm 之间变化时, 射流工作在核心段; 可以预测, 随着靶距的继续增加, 射流工作将逐渐进入基本段, 射流的轴向速度将逐渐衰减。因此, 一定存在一个最大显微硬度靶距(包括 40 mm), 在该靶距位置, 喷丸表面显微硬度将达到最大。

### 3.2 喷丸对表面残余压应力的影响

采用 XSTRESS3000 X-ray Stress Analyzer 测定试样表面残余应力, 测得的未喷丸试样表面残余压应力分别为 -40.1 MPa(2A11 铝合金) 和 -36.1 MPa(45 钢)。

图 4 为喷丸压力、移动速度和靶距对喷丸表面残余压应力的影响曲线。由图 4 可见, 喷丸可以显著提高 2A11 铝合金和 45 钢两种材料的表面残余压应力, 且表面残余压应力随喷丸压力和靶距的增加而迅速增大, 随移动速度的增加而减小。

如图 4(a) 所示, 对 2A11 铝合金和 45 钢, 当压力分别从 80 MPa 增加至 200 MPa 和从 140 MPa 增加至 220 MPa 时, 其喷丸表面残余压应力分别由 -46.2 MPa 增大到 -137.8 MPa 和由 -40.0 MPa 增大到 -79.4 MPa。

如图 4(b) 所示, 当移动速度从 198 mm/min 增至 594 mm/min 时, 2A11 铝合金和 45 钢两种材料的

图 3 为喷丸压力、移动速度和靶距对喷丸表面显微硬度的影响曲线。由图 3(a) 可见, 随着喷丸压力的增加, 2A11 铝合金和 45 钢两种材料的喷丸表面显微硬度均逐渐增大。对于 2A11 铝合金, 当压力从最初的 80 MPa 增加至 100 MPa 时, 显微硬度基本没有变化, 之后增大的也很缓慢, 当压力增加至 200 MPa 时, 显微硬度仅增大到 130HV<sub>0.05</sub>; 对于 45 钢, 当压力为 140 MPa 时, 显微硬度为 305HV<sub>0.05</sub>, 之后增大得也较快, 当压力增加至 220 MPa 时, 显微硬度增大到 327HV<sub>0.05</sub>。

如图 3(b) 所示, 对 2A11 铝合金, 在试验的速度范围内, 显微硬度基本没有变化; 对 45 钢, 随着速度的增加, 显微硬度缓慢减小, 当速度从 198 mm/min 增加至 594 mm/min 时, 显微硬度由 319HV<sub>0.05</sub> 减小到 294HV<sub>0.05</sub>。

另外, 两种材料喷丸表面显微硬度均随靶距的增加而增大, 但两者增大的程度不同(图 3(c))。当靶距喷丸表面残余压应力分别由 -64.1 MPa 减小到 -43.3 MPa 和由 -67.2 MPa 减小到 -39.4 MPa。

如图 4(c) 所示, 当靶距从 10 mm 增加至 40 mm 时, 2A11 铝合金和 45 钢的喷丸表面残余压应力分别由 -64.1 MPa 增到 -108.3 MPa 和由 -67.2 MPa 增到 -219.2 MPa。根据非淹没水射流的技术特性, 可以预测, 随着靶距的继续增加, 在靶距的变化范围内(包括 40 mm 靶距)一定存在一个最大残余压应力靶距, 在该靶距位置, 喷丸表面残余压应力将达到最大。

### 3.3 喷丸对疲劳寿命的影响

图 5 给出了 2A11 铝合金和 45 钢未喷丸与采用水射流喷丸的疲劳试样有限寿命  $S-N$  曲线。

由图 5 可见, 在试验应力振幅条件下, 经水射流喷丸的疲劳试样的疲劳寿命比未喷丸疲劳试样的疲劳寿命均有一定程度的提高, 且随着应力振幅的减小, 疲劳寿命提高的幅度增大, 两种材料相比, 随着应力振幅的减小, 45 钢喷丸疲劳试样的疲劳寿命提高的幅度好于 2A11 铝合金。

对 2A11 铝合金, 在试验的 3 级应力振幅水平中, 喷丸疲劳试样的疲劳寿命比未喷丸疲劳试样的疲劳寿命最大提高 1.74 倍, 出现在 155.7 MPa 应力振幅水平, 其疲劳寿命由未喷丸时的  $2.857 \times 10^5$  次提高到喷丸时的  $4.964 \times 10^5$  次; 而当疲劳寿命为  $2.857 \times 10^5$  次时, 喷丸疲劳试样的应力振幅由未喷丸时的 155.7 MPa 提高到 170.4 MPa, 增大了 1.09 倍。

对 45 钢, 在试验的 3 级应力振幅水平中, 喷丸疲劳试样的疲劳寿命比未喷丸疲劳试样的疲劳寿命最大提高 2.67 倍, 出现在 282 MPa 应力振幅水平, 其疲

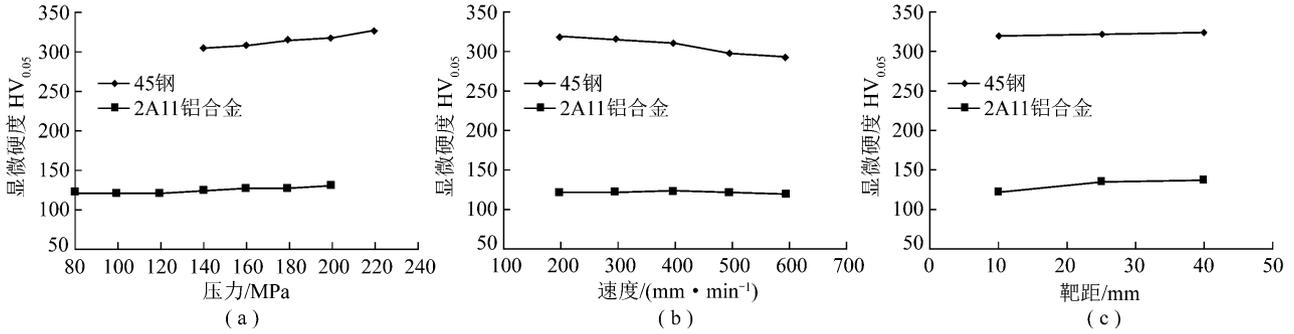


图 3 显微硬度与压力、速度和靶距的关系

Fig. 3 Relationship of micro hardness ,pressure ,velocity and target distance

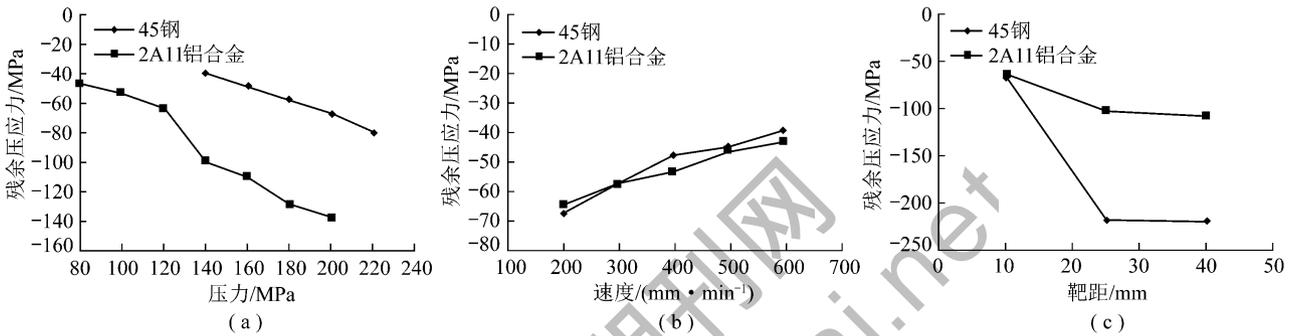


图 4 残余压应力与压力、速度和靶距的关系

Fig. 4 Relationship of residual press stress ,pressure ,velocity and target distance

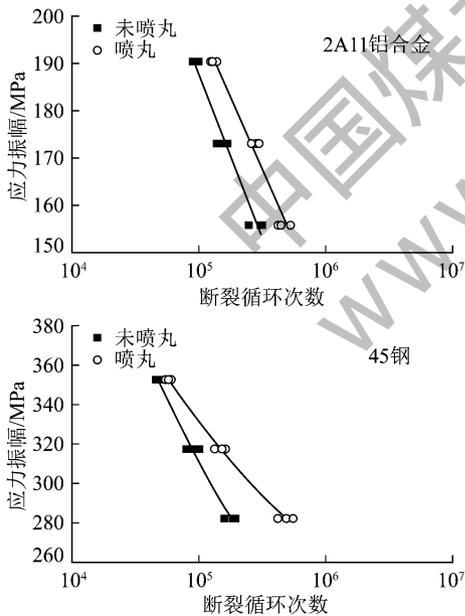


图 5 2A11 铝合金和 45 钢的有限寿命曲线

Fig. 5 Limited life curves of 2A11 aluminum alloy and 45 steel

寿命由未喷丸时的  $1.888 \times 10^5$  次提高到喷丸时的  $5.046 \times 10^5$  次; 而当疲劳寿命为  $1.888 \times 10^5$  次时, 喷丸疲劳试样的应力振幅由未喷丸时的 282 MPa 提高到 309.2 MPa, 增大了 1.1 倍。

### 3.4 疲劳断口分析

为确定经水射流喷丸的 2A11 铝合金和 45 钢疲劳试样在应力疲劳条件下的疲劳裂纹萌生和扩展过程, 采用 MX2600FE Turbo Pumped Scanning Electron Microscope 观察分析疲劳断裂试样的断口形貌, 以确定断裂机制, 采用能谱仪对断裂试样内部疲劳源区夹杂物进行成分分析。疲劳断口形貌观察发现, 喷丸的 2A11 铝合金疲劳试样, 有的疲劳裂纹萌生于试样内部, 有的疲劳裂纹萌生于试样表面; 而喷丸的 45 钢疲劳试样, 疲劳裂纹萌生于试样表面。

图 6 给出了经水射流喷丸的 2A11 铝合金疲劳试样在 190.3 MPa 应力振幅条件下形成的疲劳断口形貌。由图 6(a) 可见, 疲劳裂纹萌生于试样内部的夹杂物处, 且在断口表面出现多个疲劳源, 最近疲劳源距试样表面的距离约 150 μm; 能谱分析表明, 引起缺陷的夹杂物为氧化物。由图 6(b) 可以看到疲劳裂纹扩展过程中形成的疲劳条带, 在条带表面附有大量的球状氧化物。

图 7 给出了经水射流喷丸的 45 钢疲劳试样在 282 MPa 应力振幅条件下形成的疲劳断口形貌。由图 7(a) 可见, 经水射流喷丸的 45 钢疲劳试样没能消除试样表面缺陷的影响, 将疲劳源挤到试样内部, 疲劳裂纹仍然萌生于试样表面缺陷处并以穿晶方式扩展,

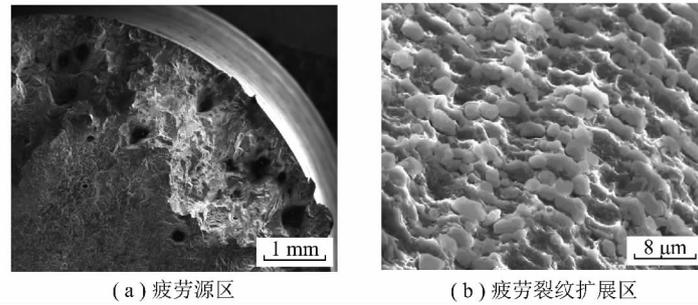


图 6 2A11 铝合金疲劳断口形貌

Fig. 6 Fatigue fracture topography of 2A11 aluminum alloy

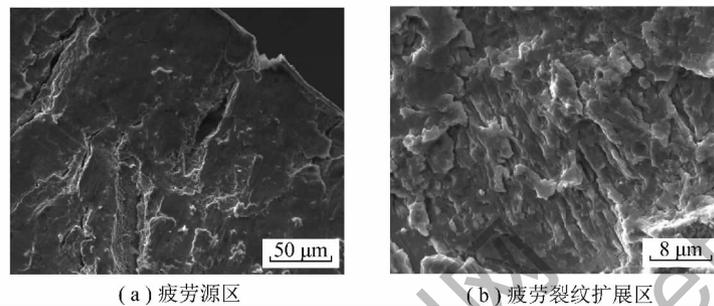


图 7 45 钢疲劳断口形貌

Fig. 7 Fatigue fracture topography of 45 steel

在断口表面出现明显的擦伤痕迹和解理台阶; 由图 7 (b) 可以看到平行于疲劳条带的细小二次裂纹。

#### 4 结 论

(1) 水射流喷丸表面显微硬度随喷丸压力和靶距的增加而增大, 并存在最大表面显微硬度靶距, 且在试验移动速度范围内 2A11 铝合金的表面显微硬度基本没有变化, 45 钢的表面显微硬度随移动速度的增加缓慢减小。

(2) 水射流喷丸可以提高 2A11 铝合金和 45 钢的表面残余压应力、疲劳寿命和应力振幅, 其喷丸表面残余压应力随喷丸压力和靶距的增加而迅速增大, 随移动速度的增加而减小, 并存在最大表面残余压应力靶距, 且在试验条件下, 喷丸疲劳试样比未喷丸疲劳试样的疲劳寿命、应力振幅分别最大提高 1.74 倍、1.09 倍(2A11 铝合金) 和 2.67 倍、1.1 倍(45 钢)。

(3) 疲劳断口形貌观察发现, 水射流喷丸疲劳裂纹萌生位置的机制与传统喷丸相同; 能谱分析表明, 2A11 铝合金喷丸试样内部引起裂纹的夹杂物为氧化物。

#### 参考文献:

- [1] Zafred P R. High pressure water shot peening [P]. Europe Patent: 0218354B1, 1990-11-07.
- [2] 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.
- [3] Dong Xing, Guo Ruizhi, Duan Xiong. Surface mechanical characteristics and fatigue life experiments of premixed water jet peening strengthening [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(14): 164-170.
- [4] Rajesh N, Ramesh Babu N. Empirical modelling of water-jet peening of 6063-T6 aluminium alloy [J]. IE(I) Journal - PR, 2005, 86: 22-26.
- [5] Rajesh N, Ramesh Babu N. Multidroplet impact model for prediction of residual stresses in water jet peening of materials [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2006, 21: 399-409.
- [6] Chillman A, Ramulu M, Hashish M. Waterjet peening and surface preparation at 600 MPa: A preliminary experimental study [J]. Journal of Fluids Engineering, 2007, 129: 485-490.
- [7] Hitoshi Soyama, Yuichi Sekine, Yosuke Oyama. Improvement of the fatigue strength of stainless steel SUS316L by a cavitating jet with an associated water jet in water [J]. ISIJ International, 2008, 48(11): 1577-1581.
- [8] Azhari A, Schindler C, Kerscher E, et al. Improving surface hardness of austenitic stainless steel using waterjet peening process [J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2012, 63: 1035-1046.
- [9] Azhari A, Schindler C, Li B. Effect of waterjet peening on aluminum alloy 5005 [J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., DOI: 10.1007/s00170-012-4522-4.
- [10] Sadasivam B, Arola D. An examination of abrasive waterjet peening with elastic pre-stress and the effects of boundary conditions [J]. Machining Science and Technology, 2012, 16: 71-95.
- [11] 曾元松, 李耐锐, 郭和平. 高压水冲击强化技术的研究现状及发展 [J]. 塑性工程学报, 2008, 15(1): 97-103.
- [12] Zeng Yuansong, Li Nairui, Guo Heping. Research status and development of water jet peening technologies [J]. Journal of Plasticity

- Engineering 2008, 15(1):97-103.
- [11] 张 罡. 16MnR 焊接接头表面强化的研究[D]. 大连: 大连交通大学 2010: 39.  
Zhang Gang. Experimental study on surface peening technology to 16MnR welded joint[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University 2010: 39.
- [12] 康学勤, 杨春敏, 孙 智, 等. 空化射流喷丸对 45 钢表面性能的影响[J]. 北京工业大学学报 2011, 37(4): 554-558.  
Kang Xueqin, Yang Chunmin, Sun Zhi, et al. Influencing of water jet cavitation on the surface strengthening of 45 steel[J]. Journal of Beijing University of Technology 2011, 37(4): 554-558.
- [13] 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 Ruihong, Duan Xiong. Study of premixed water jet critical shot peening pressure[J]. Journal of China Coal Society 2008, 33(4): 462-466.
- [14] 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 Xing, Wang Ruihong, Duan Xiong. Test research of premixed water jet shot peening surface roughness[J]. Journal of China Coal Society 2009, 34(10): 1410-1415.
- [15] 吕国庆, 张新民. 前混合水射流强化技术及发展[J]. 机械工程与自动化 2010(3): 215-216.  
Lü Guoqing, Zhang Xinmin. Water-jet shot-blasting technology with pre-mixed abrasive and its development[J]. Mechanical Engineering & Automation 2010(3): 215-216.
- [16] 董 星, 张海录, 段 雄. 水射流喷丸强化残余应力场的有限元模拟[J]. 机械工程学报 2010, 46(18): 189-194.  
Dong Xing, Zhang Hailu, Duan Xiong. Finite element simulation of residual stress field with water jet peening strengthening[J]. Journal of Mechanical Engineering 2010, 46(18): 189-194.

## 欢迎订阅 2014 年《International Journal of Coal Science & Mining Engineering》杂志

《International Journal of Coal Science & Mining Engineering》(《国际煤炭科学与采矿工程学报》,简称 JCSME) 是由中国煤炭学会主办、面向国内外公开发行的英文版煤炭科学技术方面的综合性学术刊物。主要刊载煤田地质与勘探、煤矿开采、矿山测量、矿井建设、煤矿安全、煤矿机械工程、煤矿电气工程、煤炭加工利用、煤矿环境保护、煤炭经济研究等方面的科研成果和学术论文。

JCSME 是向世界传播我国煤炭科技的重要媒体,对加强中外科学技术交流,宣传我国煤炭科技成就,提高我国煤炭科学技术的国际地位将起到重要的作用。2009 年与国际著名的出版商德国 Springer 公司正式进行版权合作,由其独家代理海外发行。本刊被英国机电工程师学会(IEE)出版的 INSPEC 文摘数据库收录(Ei InspecWeb,工程索引网络版),也被 Elsevier 公司的二次文献数据库 Scopus 收录。2012 年获中国科协“学会能力提升专项优秀国际科技期刊奖”资助。

JCSME 为季刊,每期 112 页,每册国内订价 28 元,全年总订价 112 元。订阅者可直接和本编辑部联系,编辑部随时办理订阅手续。

本刊地址:北京市和平里煤炭科学研究总院内《煤炭学报》编辑部 邮政编码:100013

联系电话:(010)84262930-808

联系人:郑红瑞

E-mail: zhenghongrui@chinacs.org.cn, mtxb@vip.163.com