

文章编号:0253-9993(2009)10-1410-06

前混合水射流喷丸表面粗糙度的试验研究

董 星¹, 王瑞红², 段 雄³

(1. 黑龙江科技学院 机械工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150027; 2. 黑龙江科技学院 计算机与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150027; 3. 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘 要: 选择喷丸压力、喷嘴扫描速度、靶距为影响因素, 选用直径为 0.25 mm 的玻璃弹丸, 应用前混合水射流对 45 钢和 2Al1 铝合金材料进行喷丸试验; 采用针描法测量喷丸表面粗糙度, 利用扫描电镜观察喷丸表面宏观形貌特征。结果表明, 前混合水射流喷丸会使受喷材料的表面粗糙度明显增大, 且表面粗糙度随着喷丸压力的增加而增大, 随着扫描速度的增加而减小, 并存在最大表面粗糙度靶距; 在整个喷丸表面上出现宽度近似相等的“垄沟”状条形变形带, 并布满了无数个形状不规则的无间隙的冲击凹坑, 粗糙度曲线呈现“锯齿”形状, 它与喷丸表面“垄沟”状形貌特征十分吻合。

关键词: 水射流; 喷丸强化; 表面粗糙度; 针描法; 表面形貌

中图分类号: TD421.59 **文献标识码:** A

Test research of premixed water jet shot peening surface roughness

DONG Xing¹, WANG Rui-hong², DUAN Xiong³

(1. Institute of Mechanical Engineering, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China; 2. College of Computer and Information Engineering, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Chosen shot peening pressure, nozzle scanning velocity, target distance as effect factors, chosen glass pill whose diameter was 0.25 mm, did shot peening test to 45 steel and 2Al1 aluminum alloy material by premixed water jet. Adopted stylus method for measuring shot peening surface roughness, observed macroscopically shape character of shot peening surface by scanning electron microscope. The result indicates that the surface roughness of peened material obviously augments because of premixed water jet shot peening, and surface roughness augments as the increase of shot peening pressure and minishs as the increase of scanning velocity, the biggest surface roughness target distance exists. The bar distortion area which is “furrow” shape with approximatively equal width appears on the whole shot peening surface, and countless non clearance impacting concave whose shape is anomalous bestrewns on the whole shot peening surface, roughness curve presents “saw tooth” shape, it quite inosculates with “furrow” shape character on shot peening surface.

Key words: water jet; shot peening strengthening; surface roughness; stylus method; surface shape

前混合水射流喷丸强化是笔者近几年提出的湿法喷丸强化新工艺, 它充分利用了前混合磨料射流喷射技术优势, 与传统喷丸强化工艺相比, 具有技术先进, 适应性强, 强化效果好, 高效、节能、安全、环保

收稿日期: 2008-10-29 责任编辑: 许书阁

基金项目: 黑龙江省教育厅科学技术研究资助项目 (11511337)

作者简介: 董 星 (1964—), 男, 河北滦平人, 教授, 博士。Tel: 0451-86919951, E-mail: dongxingwrh@163.com

等优点^[1-5]。喷丸表面粗糙度是影响喷丸强化效果的重要因素之一，其大小取决于材料的硬度、原始表面粗糙度和喷丸工艺参数；当表面粗糙度偏高时，疲劳源易萌生于喷丸件表面，并导致零件疲劳强度下降^[6-14]。因此，对确定的受喷材料及原始表面粗糙度，优化喷丸工艺参数，有效控制喷丸表面粗糙度，是保证喷丸强化效果的重要措施。为此，笔者选用工程中具有代表性的黑色金属 45 钢和有色金属 2Al1 铝合金为试验材料，选择工艺参数中对喷丸性能起主要作用的喷丸压力、喷嘴扫描速度和靶距为试验因素，探索喷丸表面粗糙度随喷丸工艺参数的变化规律。

1 试验装置与试验方法

1.1 试验装置

前混合水射流喷丸试验装置如图 1 所示。装置主要由水箱、高压泵、压力表、控制阀组、高压管、 $x-y-z$ 三维工作平台、喷嘴、试样和收集箱等几部分组成。工作原理：由高压泵来的高压水分 2 股：第 1 股高压水经水阀 1 和切向管进入供丸室，形成向下的螺旋流，同时，通过弹丸粒子间的缝隙向上做渗流运动，弹丸在自重和螺旋流的作用下经供丸器流入混合室，然后经浆料阀向下流动；第 2 股高压水经水阀 2 通到浆料阀下端，与流入的弹丸在高压管内混合流向喷嘴，经喷嘴加速后以近于水射流的速度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（冷作硬化层），呈现理想的组织结构（组织强化）和残余应力分布（应力强化），从而达到提高零件周期疲劳强度和抗应力腐蚀能力的目的。

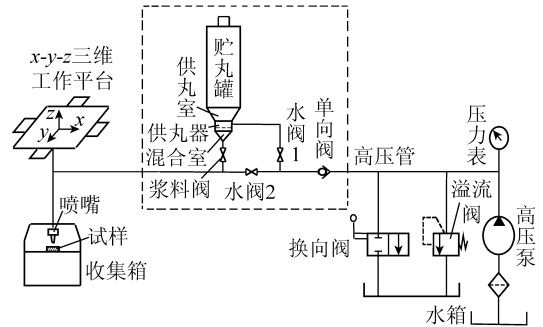


图 1 前混合水射流喷丸试验装置

Fig. 1 Test equipment of premixed water jet peening

1.2 试验材料

试验选用的 45 钢和 2Al1 铝合金的化学成分见表 1。其中，钢为热轧态供货，坯料为 $\phi 25$ 圆钢；铝合金为热挤态供货，坯料为 $\phi 28$ 棒材。45 钢进行调质处理，并按 GB6397-86 标准规定加工 45 钢和 2Al1 铝合金单向拉伸试样，按 GB228-87 标准规定，采用 MTS 810 Material Test system 做 2 种金属材料的单向拉伸试验，测得金属的室温力学性能指标见表 2。

表 1 试验用金属的化学成分

Table 1 Chemical composition of metals investigated

%

金属	化学成分(质量分数)												
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Cu	Ni	Mg	Zn	Ti	Fe	Al
45 钢	0.45	0.27	0.65	0.03	0.03	0.20	0.20	0.21				余量	
2Al1 铝合金		0.70	0.60				4.30	0.10	0.60	0.30	0.15	0.70	余量

表 2 金属的室温拉伸力学性能

Table 2 Mechanical properties of tested metals

45 钢强度指标		45 钢塑性指标		2Al1 铝合金强度指标		2Al1 铝合金塑性指标	
σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	Ψ /%	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	Ψ /%
705	830	20	54	346	474	19	20

1.3 试样尺寸

45 钢的喷丸试样为经调质处理的 $\phi 25$ mm、高 15 mm 的圆试样，2Al1 铝合金的喷丸试样为采用

FANUC ROBOCUT α - DiB 型数控电火花慢走丝线切割机床切断得到的 $\phi 28$ mm、高 15 mm 的圆试样；之后使用由粗到细的 1~7 号金相砂纸将试样表面逐级磨光，再经电解抛光从表面去除 40 μm 的一层，以消除切割加工应力和磨光过程的附加应力。

1.4 表面粗糙度的测量方法

表面粗糙度属于表面微观形状误差，表面越粗糙，对应力集中越敏感。特别是在交变载荷作用下形成的交变应力，在零件表面微观不平处产生应力集中，最终形成疲劳微裂纹，导致零件疲劳破坏。因此，本文在表面粗糙度评定参数的选择上，一个是选用现今世界各国普遍采用的轮廓算术平均偏差 R_a ，另一个是选用对因应力集中而导致疲劳破坏的表面常用的轮廓最大高度 R_y 。

表面粗糙度的测量方法采用针描法。测量仪器使用 SJ-201 Surface Roughness Tester，测量采用中线制，取样长度依据估计的被测试样表面粗糙度值，从符合“表面粗糙度参数及其数值 (GB/T 1031 - 1995)”规定的标准系列取样长度中选取。在取样长度 l 内，轮廓算术平均偏差 R_a [15] 为

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx. \quad (1)$$

评定长度 l_n 为 5 倍的取样长度 l ，即 $l_n = 5l$ 。测量时带导头的传感器和连接器处于浮动状态。

由于试样喷丸后的表面粗糙度与喷丸前试样表面原有的粗糙度密切相关，因此，为了真实反映试样喷丸后的表面粗糙度变化，对试样喷丸前的原始表面粗糙度和试样喷丸后的表面粗糙度均进行了测量；并且，测量试样喷丸后的表面粗糙度时，使测量头的往复运动方向与射流在试样表面上形成的喷丸轨迹方向相垂直。

同时，采用 MX2600FE Turbo Pumped Scanning Electron Microscope 对喷丸试样表面进行高倍宏观观察，以获得喷丸表面形貌特征信息。

1.5 试验方法

试验采用一次只考查一个因素对喷丸性能影响的试验方法，试验顺序按水平由低到高的次序进行。影响因素选择对喷丸性能起主要作用的工艺参数：喷丸压力、喷嘴扫描速度、靶距，因素的水平为 5 级。射流喷丸后的试样表面覆盖率为 100%，喷丸时间

$$t = d/v, \quad (2)$$

式中， d 为喷嘴直径； v 为喷嘴扫描速度。

前混合水射流喷丸条件见表 3，喷丸过程如图 2 所示。

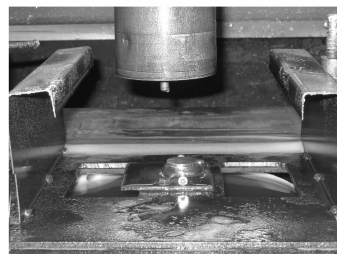
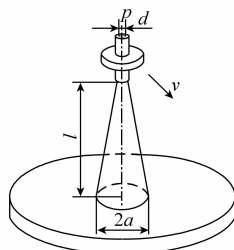


图 2 喷丸过程

Fig. 2 Peening process

a ——冲击半径

表 3 前混合水射流喷丸条件

Table 3 Condition of premixed water jet peening

参 数	喷丸条件	
喷嘴直径 d/mm	2.2	
弹丸材料	玻璃珠	
弹丸直径/ mm	0.25	
弹丸流量/ $(\text{kg} \cdot \text{min}^{-1})$	1.0	
喷丸角度/ $(^\circ)$	90	
喷丸方法	直线喷射	
喷丸压力 p/MPa	2Al1 铝合金	1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0
	45 钢	4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0
喷嘴扫描速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	110, 220, 330, 440, 550	
喷丸时间/s	1.20, 0.60, 0.40, 0.30, 0.24	
靶距 l/mm	10, 25, 40, 55, 70	
喷嘴扫描轨迹间距/ mm	2.2	

试验内容：① 不同喷丸压力下的喷丸效果；② 不同喷嘴扫描速度下的喷丸效果；③ 不同靶距下的喷丸效果。

2 试验结果

试样喷丸前原始表面粗糙度试验数据：2Al1 铝合金的 $R_a = 0.16 \sim 0.20 \mu\text{m}$, $R_y = 1.45 \sim 1.92 \mu\text{m}$ ；45 钢的 $R_a = 0.18 \sim 0.24 \mu\text{m}$, $R_y = 1.54 \sim 2.03 \mu\text{m}$ 。

前混合水射流对 2Al1 铝合金和 45 钢材料喷丸表面粗糙度试验数据见表 4。

表 4 2Al1 铝合金喷丸和 45 钢喷丸表面粗糙度试验数据

Table 4 Test data of 2Al1 aluminum alloy peening and 45 steel peening surface roughness

2Al1 铝合金喷丸					45 钢喷丸				
喷丸压力/MPa	扫描速度/(mm · min ⁻¹)	靶距/mm	表面粗糙度/ μm		喷丸压力/MPa	扫描速度/(mm · min ⁻¹)	靶距/mm	表面粗糙度/ μm	
			R_a	R_y				R_a	R_y
1.0			1.56	10.20	4.0			1.16	7.26
1.5			1.72	11.94	5.0			1.33	8.18
2.0	330	10	1.92	16.47	6.0	330	10	1.43	9.21
3.0			3.61	22.25	7.0			1.51	9.76
4.0			5.02	27.40	8.0			1.73	11.50
	110		4.65	26.87		110		3.97	20.43
	220		2.52	15.79		220		2.74	14.20
1.5	330	10	1.72	11.94	6.0	330	10	1.43	9.21
	440		1.65	11.39		440		1.31	8.30
	550		1.59	10.70		550		1.28	8.18
		10	1.72	11.94			10	1.43	9.21
		25	1.92	13.36			25	1.84	10.76
1.5	330	40	1.76	12.15	6.0	330	40	1.68	10.13
		55	1.70	11.14			55	1.39	9.57
		70	1.58	10.57			70	1.34	9.39

3 试验结果

将喷丸表面粗糙度试验数据（表 4）与喷丸前原始表面粗糙度试验数据进行比较可知，前混合水射流对 2Al1 铝合金和 45 钢喷丸会使受喷材料表面粗糙度明显增大，且表面粗糙度受喷丸工艺参数的影响较大。

3.1 不同喷丸压力下的表面粗糙度

图 3 给出了 2Al1 铝合金和 45 钢的表面粗糙度 R_a , R_y 与喷丸压力的变化关系曲线。由图 3 可知，2Al1 铝合金和 45 钢的 R_a 和 R_y 随着喷丸压力的增加而增大。参照表 4 可知，对于 2Al1 铝合金，当压力由 1.0 MPa 增加到 4.0 MPa 时， R_a 和 R_y 分别由 1.56 和 10.20 μm 增大到 5.02 和 27.40 μm ，分别增加了 3.22 倍和 2.69 倍；对于 45 钢，当压力由 4.0 MPa 增加到 8.0 MPa 时， R_a 和 R_y 分别由 1.16 和 7.26 μm 增大到 1.73 和 11.50 μm ，分别增加了

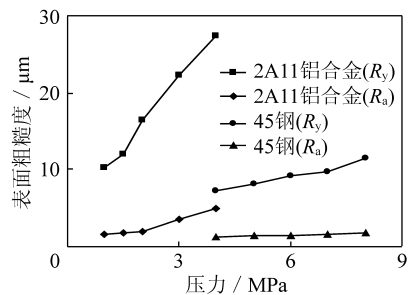


图 3 表面粗糙度与压力的关系

Fig. 3 Relationship between surface roughness and pressure

1.49 倍和 1.58 倍.

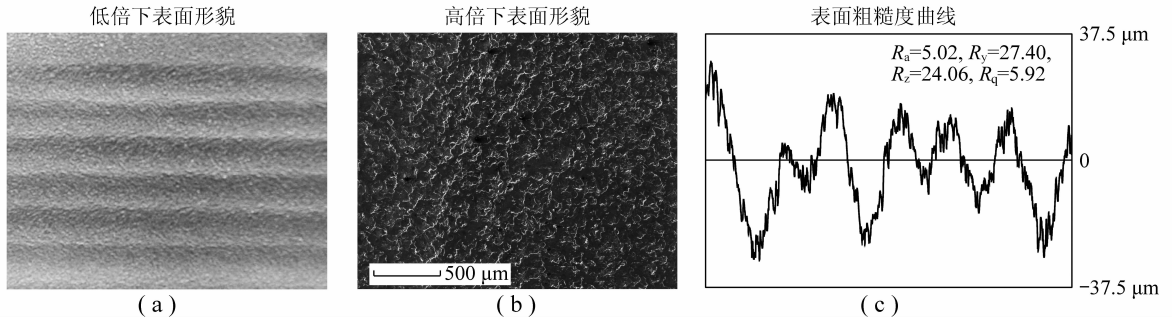


图 4 4.0 MPa 压力时 2A11 铝合金喷丸表面形貌和表面粗糙度曲线

Fig. 4 2A11 aluminum alloy peening surface topography and roughness curve under 4.0 MPa pressure

图 4 给出了前混合水射流喷丸压力为 4 MPa 时, 2A11 铝合金喷丸表面形貌和表面粗糙度曲线.

由图 4 (a) 可知, 在 2A11 铝合金喷丸表面上可以看到一条条很宽的、宽度近似相等的“垄沟”状条形变形带; 由图 4 (b) 可知, 在整个喷丸表面上布满了无数个形状不规则的冲击凹坑, 大量无间隙的凹坑形成了一个包络面, 喷丸表面覆盖率达到 100%. 由图 4 (c) 可知, 粗糙度曲线呈现“锯齿”形状, 在整个评定长度上, 每个“锯齿”口的宽度近似相等, “锯齿”的深度有所差异, 它与图 4 (a) 给出的喷丸表面“垄沟”状形貌十分吻合.

3.2 不同扫描速度和靶距下的表面粗糙度

图 5 给出了 2A11 铝合金和 45 钢的表面粗糙度 R_a , R_y 与扫描速度和靶距的变化关系曲线. 由图 5 可知, 2A11 铝合金和 45 钢的 R_a 和 R_y 随着扫描速度的增大而减小, 并且, 随着扫描速度增大的程度, 亦即随着喷丸时间减小的程度, 先是迅速减小, 然后是缓慢减小; 2A11 铝合金和 45 钢的 R_a 和 R_y 随着靶距的增加先增大, 然后减小, 当靶距为 25 mm 时, R_a 和 R_y 达到最大. 因此, 前混合水射流喷丸存在最大表面粗糙度靶距, 在该靶距位置处, 弹丸粒子的速度被加到最大, 对喷丸表面产生最大的冲击作用, 使受喷材料的表面粗糙度达到最大.

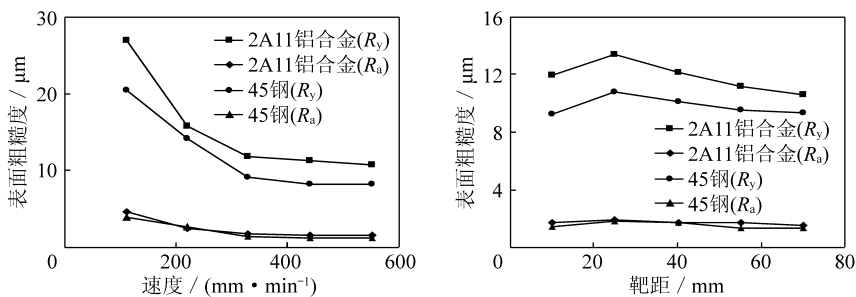


图 5 表面粗糙度与速度和靶距的关系

Fig. 5 Relationship among surface roughness, velocity and target distance

4 结 论

- (1) 前混合水射流喷丸会使受喷材料表面粗糙度明显增大, 增大的程度与喷丸工艺参数密切相关.
- (2) 表面粗糙度随着喷丸压力的增加而增大, 随着扫描速度的增加而减小, 且前混合水射流喷丸存在最大表面粗糙度靶距, 在该靶距位置处, 受喷材料的表面粗糙度达到最大值.
- (3) 受喷材料表面呈现宽度近似相等的“垄沟”状条形变形带, 并在整个表面上布满了无数个形状不规则的冲击凹坑, 大量无间隙的凹坑形成了一个包络面, 喷丸表面覆盖率达到 100%.
- (4) 粗糙度曲线呈现“锯齿”形状, 在整个评定长度上, 每个“锯齿”口的宽度近似相等, “锯齿”

的深度有所差异, 它与喷丸表面条形变形带形貌特征十分吻合.

参考文献:

- [1] 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 shop peening at high pressure [J]. Surface Technology, 2005, 34 (1): 48-49.
- [2] Dong Xing, Duan Xiong. The research of continuous water jet critical shot peening pressure [A]. Proceedings of ICMEM 2005 [C]. Monmouth Junction: Science Press USA Inc., 2005: 1 359-1 363.
- [3] Dong Xing, Wang Ruihong, Duan Xiong. The academic research of continuum water jet core section critical shot peening pressure [A]. Proceedings of ICSFT 2006 [C]. Sydney: Frontiers of Design and Manufacturing, 2006: 511-518.
- [4] 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.
Zeng Yuansong, Li Nairui, Guo Heping. Research status and development of water jet peening technologys [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15 (1): 97-103.
- [5] 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.
- [6] 王仁智. 表面喷丸强化机制 [J]. 机械工程材料, 1988 (5): 19-23.
Wang Renzhi. On the strengthening mechanism of shot peening [J]. Materials for Mechanical Engineering, 1988 (5): 19-23.
- [7] 李金魁, 王长利, 姚 枚, 等. 喷丸件表面粗糙度及其对疲劳极限的影响 [J]. 金属科学与工艺, 1991, 10 (3): 11-18.
Li Jinkui, Wang Changli, Yao Mei, et al. Surface roughness of shot-peened specimens and its influence on fatigue limits [J]. Metal Science & Technology, 1991, 10 (3): 11-18.
- [8] Danewicz S R, Cummings S D. Characterization of water peening process [J]. Transaction of the ASME, 1999, 121: 336-341.
- [9] Kunaporn S, Ramulu M, Hashish M, et al. Ultra high pressure water jet peening part- I : surface texture [A]. 2001 WJTA American Waterjet Conference [C]. Madison: Omnipress, 2001.
- [10] Dan Odhiambo, Hitoshi Soyama. Cavitation shotless peening for improvement of fatigue strength of carbonized steel [J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25: 1 217-1 222.
- [11] Arola D, McCain M L, Kunaporn S, et al. Water jet and abrasive water jet surface treatment of titanium: a comparison of surface texture and residual stress [J]. Wear, 2002, 249: 943-950.
- [12] Tonshoff H K, Kroos F, Marzenell C. High-pressure water peening - a new mechanical surface-strengthening process [J]. Annals of the CIRP, 1997, 46 (1): 113-116.
- [13] Ramulu M, Jenkins M, Kunaporn S, et al. Fatigue performance of water jet peened aluminum alloy: preliminary results [A]. Ryoji Kobayashi. Proceedings of the International Symposium on New Applications of Water Jet Technology [C]. Tokyo: The Water Jet Technology Society of Japan, 1999: 347-351.
- [14] 高玉魁, 殷源发, 李向斌, 等. CH909 合金喷丸强化残余应力场的研究 [J]. 材料工程, 2002 (4): 40-42.
Gao Yukui, Yin Yuanfa, Li Xiangbin, et al. Research on residual stress field of GH909 alloy by shot peening [J]. Journal of Materials Engineering, 2002 (4): 40-42.
- [15] 周富臣, 周鹏飞, 张 改. 机械制造计量检测技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 453.
Zhou Fuchen, Zhou Pengfei, Zhang Gai. Mechanical manufacture measurement detect technical manual [M]. Beijing: China Machine Press, 2000: 453.