基于高压纯水射流的 45 钢表面强化研究

叶峰[a,b]，武美萍[a,b]，缪小进[a,b]，宋磊[a,b]
（江南大学 a.机械工程学院 b.江苏省食品先进制造装备技术重点实验室，江苏 无锡 214122）

摘 要：目的 对高压纯水射流强化后的 45 钢表面进行研究，分析工艺参数对强化表面残余压应力与表面粗糙度的影响。**方法** 采用正交试验法研究射流压强、靶距、横移速度、进给量和循环次数对强化质量的影响。利用 Minitab 软件对试验结果进行分析，研究其影响规律，并探究最佳工艺组合。**结果** 工艺参数对纯水射流强化表面残余压应力影响程度的主次顺序依次为：循环次数>进给量>压强>横移速度>靶距；工艺参数对纯水射流强化表面粗糙度影响程度的主次顺序依次为：压强>循环次数>进给量>横移速度>靶距；工艺参数对纯水射流强化表面质量影响程度的主次顺序依次为：压强>靶距>进给量>循环次数>横移速度。综合强化表面残余压应力与表面粗糙度，得到最优工艺参数：射流压强 200 MPa、靶距 10 mm、进给量 0.5 mm、循环次数 2 次、横移速度 100 mm/min。**结论** 高压纯水射流对 45 钢的表面强化效果显著，所得强化表面残余压应力提升明显，但表面粗糙度提升不明显，表面粗糙度值低于 1.1 μm。

关键词：纯水射流；表面强化；正交实验；工艺参数；残余压应力；表面粗糙度
中图分类号：TG668 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2019)01-0147-07
DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.01.019

Study on Surface Strengthening of 45 Steel Based on High Pressure Pure Water Jet

YE Feng[a,b], *WU Mei-ping*[a,b], *MIAO Xiao-jin*[a,b], *SONG Lei*[a,b]

(a.College of Mechanical Engineering, b.Jiangsu Province Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The work aims to study on the surface of 45 steel strengthened by high pressure pure water jet, and analyze the influence of technological parameters on the strengthening surface residual compressive stress and surface roughness. The orthogonal experimental method was used to study the influence of jet pressure, standoff distance, transverse speed, feed rate and cycle times on the surface quality. Minitab software was used to analyze the test results, study the influence law, and explore the best process combination. From the research, the order of influence of process parameters on residual compressive stress is as follows: times > feed > pressure > traverse speed > standoff distance. The order of influence on surface roughness is pressure > times > feed > traverse speed > standoff distance. As to the surface quality, the order is pressure > standoff distance > feed > times > traverse speed. The optimal process parameters are obtained: jet pressure 200 MPa, standoff distance 10 mm, feed rate

收稿日期：2018-07-16；修订日期：2018-09-21
Received：2018-07-16；**Revised**：2018-09-21
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51575237）；教育部预研资助项目（62501036035）
Fund：Supported by National Natural Science Foundation of China (51575237) and the Pre-research Funding Project of the Ministry of Education (62501036035)
作者简介：叶峰（1995—），男，硕士研究生，主要研究方向为先进制造和射流制造技术。
Biography：YE Feng (1995—), Male, Master, Research focus: advanced manufacturing and jet manufacturing technology.
通讯作者：武美萍（1970—），女，博士，教授，主要研究方向为数字化设计与制造、复杂装备智能化制造。邮箱：1959918656@qq.com
Corresponding author：WU Mei-ping (1970—), Female, Doctor, Professor, Research focus: digital design and manufacturing, intelligent manufacturing equipment complex. E-mail: 1959918656@qq.com

0.5 mm, cycle times 2 and transversal speed 100 mm/min. In a few words, the effect of high pressure pure water jet on the surface hardening of 45 steel is remarkable. The surface residual compressive stress is improved obviously while the surface roughness does not increase obviously, and the surface roughness is lower than 1.1 μm.

KEY WORDS: pure water jet; surface strengthening; orthogonal experiment; technological parameters; residual compressive stress; surface roughness

随着高端制造装备的发展，关键核心零部件的性能要求越来越高。为了提高产品耐磨性与接触疲劳强度，抑制疲劳裂纹的产生，以传统喷丸强化为代表的表面强化技术得到了广泛应用，激光熔覆、超声强化等新型表面强化技术也愈益成熟[1-4]。其中，高压纯水射流强化作为一种低成本、高效率的表面强化技术，凭借其强化范围全覆盖、强化表面质量好、无污染等优点[5-7]，被越来越多的生产制造企业应用于关键核心零部件（如齿轮、曲轴、轴承等）、各类高端制造装备以及多领域关键区域的表面强化处理中。

目前，虽然国内外诸多专家学者对高压水射流表面强化展开研究[8-13]，但仍待完善。以色列理工大学的 Xie. J 和 Rittel. D[14]对纯水射流强化进行了理论研究，提出了一种纯水射流强化表面粗糙度预测模型，模拟结果与液体冲击理论吻合较好。诺丁汉大学的 Huang. L 等人[15]对超高压水射流冲击钛合金损伤机理进行了深入的研究，分析了钛合金微观结构对初始损伤模式的影响。马来西亚彭亨大学的 Azhari. A 等人[16]研究了水射流对 304 不锈钢表面硬度和粗糙度的影响，发现采用多步强化有助于提高表面硬度和降低表面粗糙度，但缺少对表面残余压应力的研究。郑州大学的邹云[17]研究了水射流强化技术工艺参数对 304 不锈钢表层性能指标的影响程度，并且经过多目标优化设计得到了最佳工艺参数组合。目前，对高压纯水射流的研究大多比较局限，多为理论研究和单因素分析，且少数学者在研究纯水射流表面强化工艺参数优化时，所选取的工艺参数研究对象不够全面，对衡量表面质量的关键因素研究较为片面。综上，本文针对 45 钢，建立强化表面质量评价指标，采用正交试验法，探究 5 种工艺参数对纯水射流强化表面质量的影响规律，并选择最优工艺参数组合，以期对高压纯水射流强化 45 钢具有借鉴意义。

1　纯水射流强化原理

低压水经高压水发生系统的喷嘴射出，携带巨大动能冲击金属零部件表面，使材料表层产生塑性变形，得到理想的组织结构和残余压应力分布，从而达到提高零部件在交变载荷下的疲劳强度和抗应力腐蚀的能力[2]。将高压纯水射流视作一个个水团作用于工件表面，如图 1 所示。高速水团携带巨大动能冲击工件表面，使接触表层区域产生塑性变形，随着作用时间增加，塑性变形区域逐步扩展，同时水团开始向四周溃散，在已发生塑性变形的区域边缘位置产生少量剪切作用，在增加强化表面残余压应力的同时，表面粗糙度增大，导致质量下降。

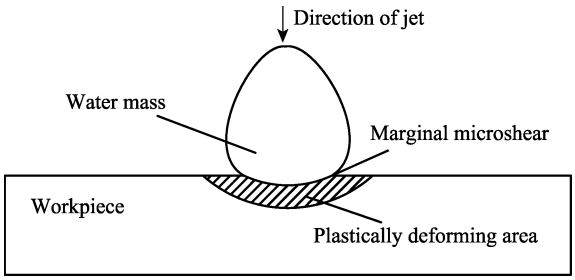


图 1　纯水射流强化原理
Fig.1 Principle of pure water jet strengthening

2　实验研究

实验平台为 DWJ3020-BB-X5 龙门式数控水射流加工机床，如图 2 所示。机床主要性能见表 1，其主要由高压水发生系统、数控系统、二维加工实验平台、冷却系统等组成。实验材料选用 45 钢，其主要性能参数如表 2 所示。

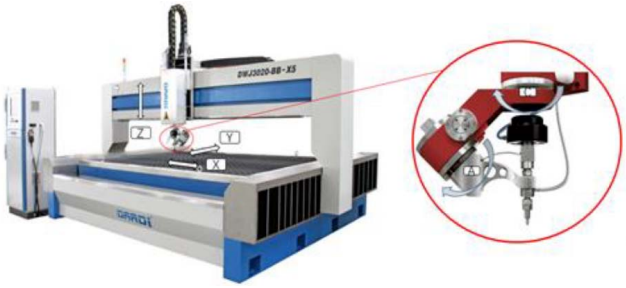


图 2　DWJ3020-BB-X5 水射流加工机床
Fig.2 DWJ3020-BB-X5 water jet machine

表 1　DWJ3020-BB-X5 机床主要性能
Tab.1 Main parameters of DWJ3020-BB-X5

Parameters	Value
X-Axis travel/mm	3000
Y-Axis travel/mm	2000
Z-Axis travel/mm	210
Control accuracy/mm	±0.01
Repeatable accuracy/mm	±0.025
Maximum speed/(m·min^{-1})	15

表 2　45 钢性能参数
Tab.2 Performance parameters of 45 steel

Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Hardness (HRC)	Density /(g·cm^{-3})
600	355	55	7.85

采用正交试验法分析射流压强、靶距、横移速度、进给量、循环次数等因素对强化表面质量的影响。选用 $L_{16}(4^5)$表格，此次试验对 45 钢进行了共 16 组、重复 4 次的表面强化实验。实验因素与水平以及实验结果如表 3、4 所示。表面质量评价值 W 如式 1 所示：

$$W=T/R \tag{1}$$

式中：T 为表面残余压应力（MPa）；R 为表面粗糙度（μm）。

表 3　工艺参数因素与水平
Tab.3 Factors and levels of technological parameters

Factors	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
Pressure/MPa	100	150	200	300
Feed/mm	0.1	0.2	0.5	1
Standoff distance /mm	5	7	10	20
Traverse speed /(mm·min^{-1})	100	200	400	800

表 4　正交实验结果
Tab.4 Orthogonal experiment results

Test Numbers	Pressure /MPa	Feed/mm	Standoff distance/mm	Traverse speed /(mm·min^{-1})	Times	Residual compressive stress/MPa	Surface roughness /μm	Surface quality W
1	100	0.1	5	100	1	518	0.758	683
2	100	0.2	7	200	2	492	0.695	708
3	100	0.5	10	400	3	432	0.614	704
4	100	1	20	800	4	409	0.562	728
5	150	0.1	7	400	4	645	0.926	697
6	150	0.2	5	800	3	541	0.763	709
7	150	0.5	20	100	2	470	0.626	751
8	150	1	10	200	1	334	0.514	650
9	200	0.1	10	800	2	602	0.812	741
10	200	0.2	20	400	1	406	0.582	698
11	200	0.5	5	200	4	571	0.871	656
12	200	1	7	100	3	601	0.865	695
13	300	0.1	20	200	3	660	1.015	650
14	300	0.2	10	100	4	672	1.096	613
15	300	0.5	7	800	1	398	0.702	567
16	300	1	5	400	2	512	0.821	624

3　实验结果及分析

由于使用不同的工艺参数条件，纯水射流强化表面的残余压应力和表面粗糙度存在显著差异。使用 Mini-Tab 软件对正交实验结果进行分析，通过分析残余压应力、表面粗糙度和表面综合质量的均值和信噪比，研究工艺参数对其的影响规律，探究最优工艺参数组合。

3.1　工艺参数对残余压应力的影响

由表 5、6 可知，工艺参数对纯水射流强化表面残余压应力影响程度的主次顺序为：循环次数>进给量>压强>横移速度>靶距。

表 5　残余压应力均值响应值（望大）
Tab.5 Mean response table of residual compressive stress (Larger the better)

Levels	Pressure	Feed	Standoff distance	Traverse speed	Times
1	462.8	606.3	535.5	565.3	414.0
2	497.5	527.8	527.8	514.3	514.3
3	545.0	467.8	510.0	498.8	558.5
4	560.5	464.0	486.3	487.5	574.3
Delta	97.8	142.3	49.3	77.8	160.3
Patch	3	2	5	4	1

表 6　残余压应力信噪比响应值

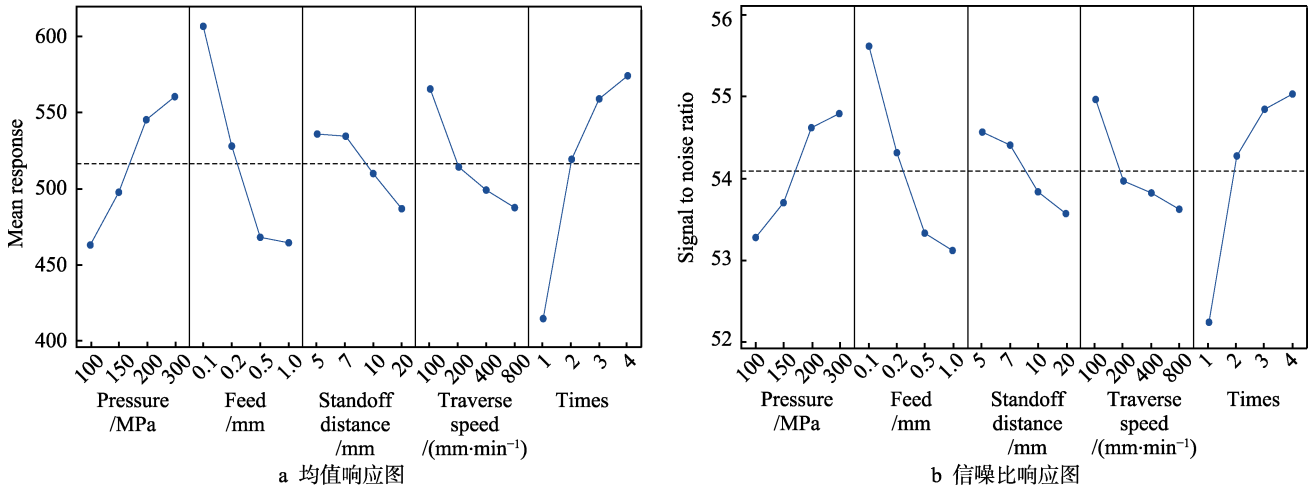
Tab.6 Residual compressive stress signal table-to-noise ratio

Levels	Pressure	Feed	Standoff distance	Traverse speed	Times
1	53.27	55.62	54.57	54.96	52.23
2	53.69	54.31	54.40	53.96	54.26
3	54.62	53.32	53.83	53.81	54.84
4	54.78	53.12	53.56	53.62	55.03
Delta	1.51	2.50	1.01	1.34	2.79
Patch	3	2	5	4	1

经由 MiniTab 软件制成的残余压应力响应图（图 3）可知：1）随着射流压强增大，射流强化表面残余压应力增大，但强化效率不断降低，当强化表面残余应力达到一定值后，强化效果不显著。2）随着射流进给量增大，射流强化表面残余应力减小。如图 4 所示，当采用大进给量时，相邻两道强化射流的核心强化区域没有重合，强化表面存在强化“盲区”；采用中等进给量时，仅存在少部分强化重复区域，且强化重复区域位于核心强化区边缘位置，残余压应力值较高；当采用小进给量时，两道强化射流的核心强化区域大范围重合，残余压应力值最高。3）随着射流横移速度增大，射流强化表面残余压应力减小，且当以足够低横移速度纯水射流冲击 45 钢时，靶材表面经历的冲击时间更长，产生的塑性变形更为剧烈。4）多次循环强化所获得的表面残余压应力更大，但强化效率（见式 2）随次数增加而降低，残余压应力值增加不显著，可以预测，当循环次数达到较高水平时，残余压应力将达到一定值。

$$\eta=T_n/n \tag{2}$$

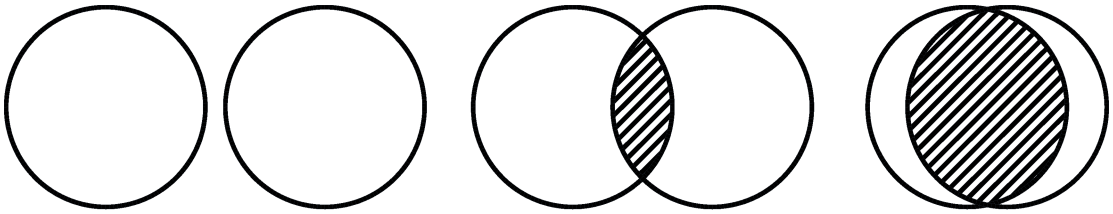
式中：η 为强化效率；n 为循环次数；T_n 为 n 次循环强化后表面残余压应力（MPa）。



a 均值响应图　　b 信噪比响应图

图 3　残余压应力响应图（望大）

Fig.3 Residual compressive stress response diagram (larger the better): a) mean response diagram; b) signal diagram to noise ratio



a 大进给量　　b 中等进给　　c 小进给量

图 4　进给量对射流核心强化区域重合区域的影响

Fig.4 Influence of feed rate on the region of overlapping area of jet core: a) large feed; b) medium feed; c) little feed

3.2　工艺参数对表面粗糙度的影响

由表 7、8 可知，工艺参数对纯水射流强化表面粗糙度影响程度的主次顺序为：压强>循环次数>进给量>横移速度>靶距。

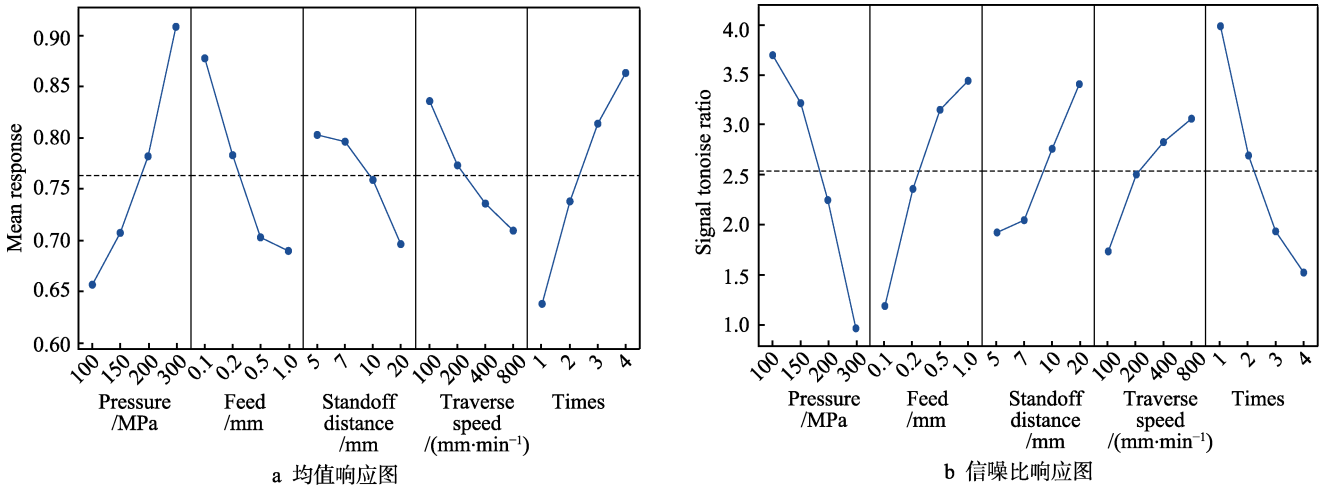
由表面粗糙度响应图（图 5）可知：1）随着射流压强增大，射流强化表面粗糙度增大。这是因为射流压强越大，其携带的动能也越大，对 45 钢表面的冲蚀作用越显著。2）随着射流进给量增大，射流强化表面粗糙度减小。当采用大进给量时，射流的核心强化区域没有重合，靶材只经历单次冲蚀；采用中等进给量时，仅存在少部分强化重复区域，强化重复区域位于核心强化区边缘位置，且重复冲蚀区域小、冲蚀能量不高；当采用小进给量时，两道强化射流的核

表 7　表面粗糙度均值响应值（望小）
Tab.7 Mean response table of surface roughness (Smaller the better)

Levels	Pressure	Feed	Standoff distance	Traverse speed	Times
1	0.6572	0.8778	0.8033	0.8362	0.6390
2	0.7072	0.7840	0.7970	0.7737	0.7385
3	0.7825	0.7032	0.7590	0.7357	0.8142
4	0.9085	0.6905	0.6963	0.7098	0.8638
Delta	0.2512	0.1873	0.1070	0.1265	0.2248
Patch	1	3	5	4	2

表 8　表面粗糙度信噪比响应值
Tab.8 Surface roughness signal table-to-noise ratio

Levels	Pressure	Feed	Standoff distance	Traverse speed	Times
1	3.7022	1.1885	1.9172	1.7346	3.9905
2	3.2166	2.3538	2.0403	2.5028	2.6877
3	2.2424	3.1445	2.7575	2.8298	1.9291
4	0.9652	3.4397	3.4115	3.0592	1.5191
Delta	2.7370	2.2512	1.4943	1.3246	2.4714
Patch	1	3	4	5	2



a 均值响应图　　b 信噪比响应图

图 5　表面粗糙度响应图（望小）
Fig.5 Surface roughness response diagram (smaller the better): a) mean response diagram; b) signal diagram to noise ratio

心强化区域大范围重合，重复冲蚀区域大且冲蚀能量高。3）随着射流横移速度增大，射流强化表面粗糙度减小，且当以足够低的横移速度纯水射流冲击 45 钢时，靶材表面经历的射流冲蚀时间更长，冲蚀效果显著。4）表面粗糙度值随着循环次数的增加而增大。

3.3　表面综合质量分析

由表 9、10 可知，工艺参数对纯水射流强化表面综合质量影响程度的主次顺序为：压强>靶距>进给量>循环次数>横移速度。

以残余压应力和表面粗糙度作为衡量表面质量的两个指标，残余压应力与表面质量正相关，表面粗糙度与表面质量负相关，定义其比值作为表面质量评价值 W（式 1）。分析单因素对表面质量的影响（见图 6）与典型因素交互作用下的表面质量（见图 7）可得，当选用 200 MPa 压力、10 mm 靶距、0.5 mm 进给量、2 次循环强化、100 mm/min 横移速度的工艺参数条件时，所获得的纯水射流强化效果最优。

表 9　表面质量均值响应表（望大）
Tab.9 Mean response table of surface quality (Larger the better)

Levels	Pressure	Feed	Standoff distance	Traverse speed	Times
1	1090.5	802.0	836.0	865.8	1043.3
2	1036.0	926.5	845.5	919.3	972.8
3	917.0	976.5	970.5	964.3	879.8
4	692.0	1030.5	1083.5	986.3	839.8
Delta	398.5	228.5	247.5	120.5	203.5
Patch	1	3	2	5	4

表 10　表面质量信噪比响应表
Tab.10 Surface quality signal table-to-noise ratio

Levels	Pressure	Feed	Standoff distance	Traverse speed	Times
1	60.67	57.99	58.40	58.43	60.22
2	60.12	59.01	58.48	58.97	59.64
3	59.10	59.61	59.34	59.48	58.69
4	56.71	60.00	60.38	59.74	58.06
Delta	3.96	2.00	1.98	1.31	2.15
Patch	1	3	4	5	2

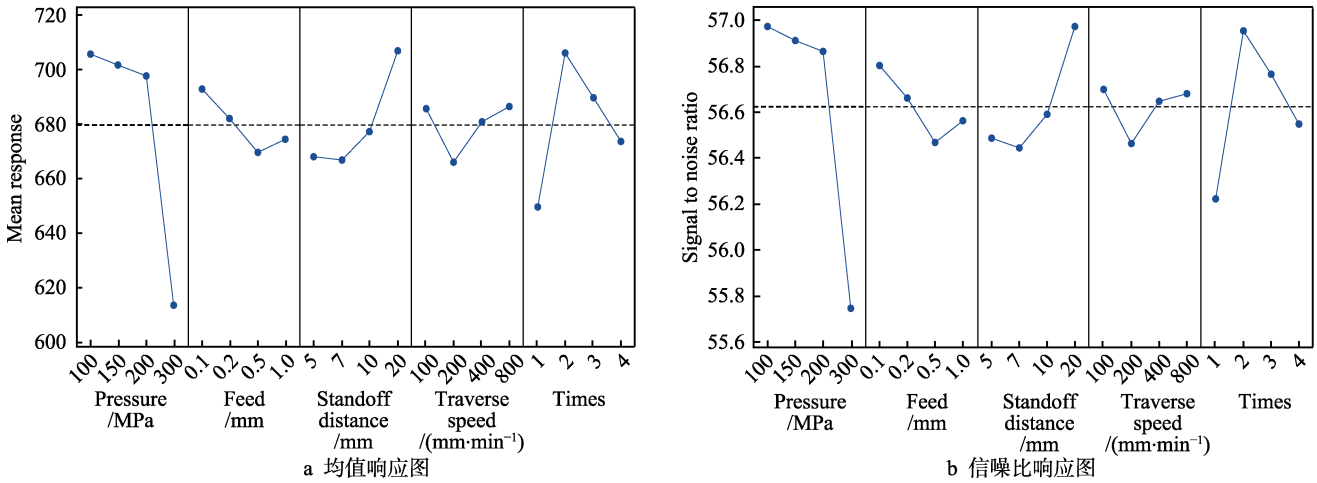


图 6　表面质量响应图（望大）

Fig.6 Surface quality response diagram (larger the better): a) mean response diagram; b) signal diagram to noise ratio

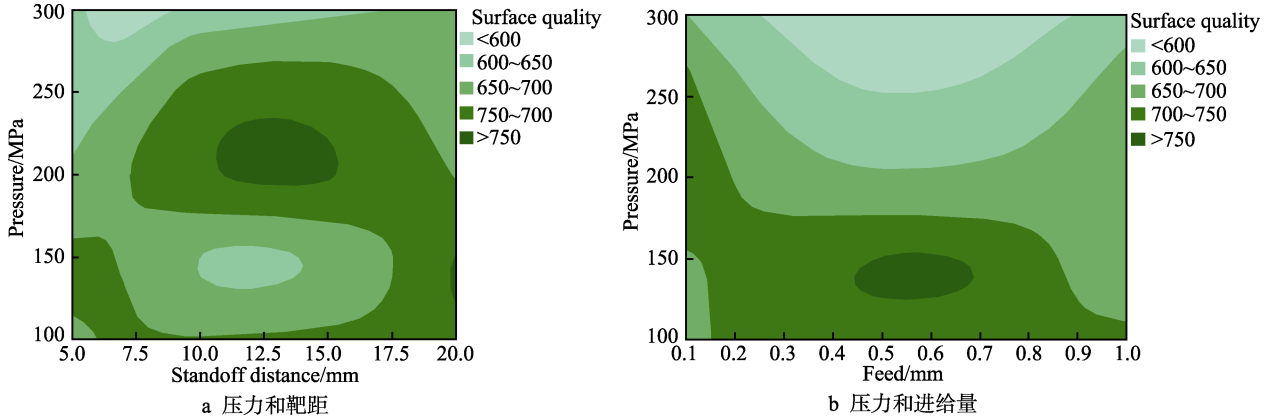


图 7　表面质量等值线图

Fig.7 Contour map of surface quality: a) pressure and standoff distance; b) pressure and feed

4　结论

1）通过正交实验研究，得到工艺参数对纯水射流强化表面综合质量影响程度的主次顺序为：压强>靶距>进给量>循环次数>横移速度；对残余压应力影响程度的主次顺序为：循环次数>进给量>压强>横移速度>靶距；对表面粗糙度影响程度的主次顺序为：压强>循环次数>进给量>横移速度>靶距。

2）循环次数、压强与表面粗糙度值、残余压应力值正相关；进给量、横移速度、靶距与表面粗糙度值、残余压应力值负相关。

3）纯水射流强化 45 钢表面的最优工艺参数组合为：压力 200 MPa，靶距 10 mm，进给量 0.5 mm，循环次数 2 次，横移速度 100 mm/min。

参考文献：

[1]　NAITO A, TAKAKUWA O, SOYAMA H. Development of peening technique using recirculating shot accelerated by water jet[J]. Materials science & technology, 2012, 28(2): 234-239.

[2]　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(1): 97-103.
ZENG Yuan-song, LI Nai-rui, GUO He-ping. Research status and development of waterjet peening technologys[J]. Journal of plasticity engineering, 2008(1): 97-103.

[3]　范航京. 等离子氮化及表面强化对 42CrMo 齿轮钢接触疲劳性能的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017.
FAN Hang-jing. Influence of plasma nitriding and surface hardening composite treatment on contact fatigue properties of 42CrMo gear steel[D]. Guiyang: Guizhou University, 2017.

[4]　范航京, 梁益龙, 邹雄, 等. 42CrMo 钢等离子氮化和水射流喷丸复合处理[J]. 中国表面工程, 2016, 29(6): 23-29.
FAN Hang-jing, LIANG Yi-long, ZOU Xiong, et al. Composite treatment of water jet shot peening combined with plasma nitriding on 42CrMo steel[J]. China surface engineering, 2016, 29(6): 23-29.

[5]　沈言锦, 李雪丰, 唐利平. 超声功率对激光熔覆 WC 强化 Fe 基复合涂层组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(5): 168-172.

SHEN Yan-jin, LI Xue-feng, TANG Li-ping. Effect of ultrasonic power on microstructure and properties of laser-clad WC strengthened Fe-based composite coating[J]. Metal heat treatment, 2018, 43(5): 168-172.

[6] 张大. 高压水射流冲击材料表面强化的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
ZHANG Da. Investigation on surface strengthening of high pressure waterjet peening[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.

[7] 张大, 李耐锐, 曾元松, 等. 高压水射流参数对材料表面强化性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2007(5): 750-754.
ZHANG Da, LI Nai-rui, ZENG Yuan-song, et al. Influencing of high pressure waterjet peening parameter on surface strengthening properties[J]. Journal of materials science and engineering, 2007(5): 750-754.

[8] 曾元松, 黄遐. 铝合金 7075T651 高压水喷丸强化工艺试验研究[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(5): 219-225.
ZENG Yuan-song, HUANG Xia. Experimental research on the high pressure water jet peening process for aluminum alloy 7075T651[J]. Journal of plasticity engineering, 2017, 24(5): 219-225.

[9] 雷晓. 空化水射流喷丸 316 不锈钢的试验研究与有限元模拟[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
LEI Xiao. Experimental study and finite element simulation of water-jet cavitation peening 316 stainless steel[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.

[10] 邹雄. 磨料水射流喷丸对两种渗碳钢表面完整性及疲劳性能的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017.
ZOU Xiong. Effect of abrasive water jet peening on surface integrity and fatigue properties of two kinds of carburizing steel[D]. Guizhou: Guizhou University, 2017.

[11] 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 Xing, GUO Rui-zhi, 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.

[12] 吕国庆. 前混合水射流喷丸强化数值模拟与试验研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2010.
LYU Guo-qing. The simulation and experimental study of pre-mixed water jet shot peening technology[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2010.

[13] DONG X, GUO R Z, SONG S W, et al. Water jet shot peening strengthening surface roughness[J]. Advanced materials research, 2013, 670: 174-179.

[14] XIE J, RITTEL D. Three-dimensional stochastic modeling of metallic surface roughness resulting from pure water jet peening[J]. International journal of engineering science, 2017, 120: 241-253.

[15] HUANG L, FOLKES J, KINNELL P, et al. Mechanisms of damage initiation in a titanium alloy subjected to water droplet impact during ultra-high pressure plain water jet erosion[J]. Journal of materials processing technology, 2012, 212(9): 1906-1915.

[16] 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.

[17] 邹云, 桑振宽, 李大磊, 等. 304 不锈钢水射流强化工艺的多目标优化设计[J]. 表面技术, 2018, 47(2): 25-29.
ZOU Yun, SANG Zhen-kuan, LI Da-lei, et al. Multi-objective optimal design of enhancing technology for 304 stainless steel by water jet peening[J]. Surface technology, 2018, 47(2): 25-29.