

304 不锈钢水射流强化工艺的多目标优化设计

邹云^{1,2}, 桑振宽^{1,2}, 李大磊^{1,2}, 李阳^{1,2}

(1. 郑州大学 机械工程学院, 郑州 450001; 2. 抗疲劳制造技术河南省工程实验室, 郑州 450001)

摘要: **目的** 得到水射流强化技术工艺参数(水压、靶距、速度、进给量)对 304 不锈钢表层性能指标(残余应力、硬度和粗糙度)的影响程度。**方法** 采用 X 射线残余应力分析仪、三维形貌仪和显微硬度计, 分别测试 304 不锈钢水射流后表面的残余应力、粗糙度和显微硬度值。利用显著性方法分析正交试验结果, 并通过多目标优化设计对不同水射流工艺参数下的强化效果进行综合性研究。**结果** 影响 304 不锈钢表层性能指标的水射流工艺参数由强到弱的顺序依次为: 进给量、水压、速度和靶距。经过多目标优化设计, 得到了 304 不锈钢水射流强化工艺参数的最佳组合: 水压 300 MPa, 靶距 15 mm, 速度 400 mm/min, 进给量 0.125 mm。**结论** 水射流工艺参数的制定主要考虑进给量和水压两者的影响, 而速度和靶距对表层性能指标的影响较小。

关键词: 水射流; 304 不锈钢; 正交试验; 多目标优化设计; 残余应力; 粗糙度

中图分类号: TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)02-0025-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.02.005

Multi-objective Optimal Design of Enhancing Technology for 304 Stainless Steel by Water Jet Peening

ZOU Yun^{1,2}, SANG Zhen-kuan^{1,2}, LI Da-lei^{1,2}, LI Yang^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan Province Engineering Laboratory for Anti-fatigue Manufacturing Technology, Zhengzhou 450001, China)

ABSTRACT: The work aims to explore effects of process parameters (water pressure, target distance, speed and feed) of water jet peening enhancing technology on performance indicators (residual stress, hardness, roughness) of 304 stainless steel surface. The residual stress, roughness and microhardness of the surface receiving water jet peening were tested with XRD stress analyzer, optical profilometer and microhardness tester, respectively. Orthogonal test results were analyzed in significance approach, and enhancing effects provided with different water jet peening process parameters were comprehensively studied based upon multi-objective optimal design. It was found that feed rate had the greatest effect on the mechanical properties, then water pressure and speed, and finally target distance. Based upon the multi-objective optimal design, the best parameter combination for 304 stainless steel enhanced by water jet peening was obtained: water pressure as 300 MPa, target distance as 15 mm, speed as 400 mm/min and feed rate as 0.125 mm. Effects of feed rate and water pressure are mainly considered to determine water jet peening process parameters while those of speed and target distance can be neglected.

KEY WORDS: water jet peening; 304 stainless steel; orthogonal test; multi-objective optimal design; residual stress; roughness

收稿日期: 2017-07-24; 修订日期: 2017-08-20

Received: 2017-07-24; Revised: 2017-08-20

通讯作者: 李阳 (1988—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为无损检测。

Corresponding author: LI Yang (1988—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: NDT.

304 不锈钢作为一种常用的工程材料,具有优异的塑性和韧性,广泛应用于工程领域的零部件^[1]。金属材料的表面完整性对疲劳性能有很大影响。通常情况下,材料的失效一般发生在材料表层。因此,材料性能的提高依赖于其表层性能^[2]。近年来,国内外对于利用表面形变强化方法来改善材料力学性能和抗疲劳性能的研究已经取得诸多成果。形变强化技术通过某种机械手段使材料表层发生一定程度的塑性变形,从而使材料表层形成一定深度的变质层,最终改善材料表面的整体性能^[3]。水射流强化技术就是一种基于形变强化机制的金属表面强化技术。20 世纪 80 年代,Zafred 首次提出水射流强化技术^[4],随着该领域研究的不断深入,水射流技术将会越来越成熟,进而会普遍地应用到国民生产中的各个领域^[5-6]。

基于不均匀的塑性变形和冷作硬化理论,水射流技术会使材料表层的应力状态和硬度均得到一定程度的改善,残余应力的引入和硬度的提高有利于抑制和延缓裂纹的萌生及早期的扩展,使材料的疲劳性能得到改善^[7-8]。但是,在水射流冲击作用下,材料表层由于发生冲蚀而被破坏,表面粗糙度增加,材料的疲劳性能有一定程度的下降^[9]。前人已经做了比较多的工作,但基本停留在单个工艺参数的影响研究上^[7,10-11],而对水射流强化工艺参数的多因素影响及影响程度的研究较少。因此,本文采用正交试验法,研究水射流工艺参数对残余应力、硬度和粗糙度三项力学性能指标的综合影响,并对影响因素水平进行显著性分析,优选出适合 304 不锈钢水射流强化技术的工艺参数,为水射流表面强化技术在 304 不锈钢表面强化中的应用奠定基础。

1 实验

1.1 设备及方法

试验材料选用冷轧奥氏体 304 不锈钢板材,其化学成分(以质量分数计)为: C 0.068%, Si 0.58%, Mn 1.65%, P 0.024%, S 0.004%, Cr 18.86%, Ni 8.35%, Fe 余量。水射流实验前,先将 304 不锈钢板材进行固溶处理,固溶工艺为 1090 °C 下保温 60 min。然后将板材制备成 20 mm×20 mm×10 mm 试验样品,经砂纸精磨处理后再进行水射流强化技术处理。

水射流处理试验设备选用南京大地水刀有限公司 DWJ1525-FC 型数控水刀,机床主要性能指标:台面尺寸 1.5 m×2.5 m,喷嘴移动速度小于 8 m/min,系统最高压力 350 MPa,最低压力 80 MPa。试验处理示意图如图 1 所示。

采用正交试验方法对影响强化效果的试验工艺参数作出科学的分析。对水射流强化效果起主要作用的 4 个因素为水压、靶距、速度和进给量^[12],其中各试验因素均安排 4 个水平量,因素和水平如表 1 所示。

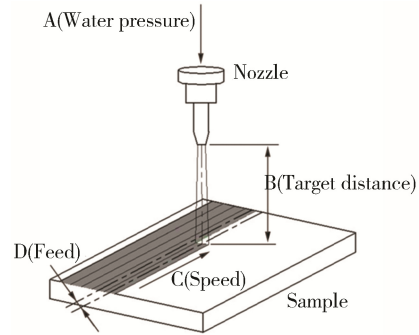


图 1 水射流处理示意图

Fig.1 Schematic diagram of water jet peening treatment

表 1 因素水平

Tab.1 Factors and levels

Levels	Water pressure (A) /MPa	Target distance (B) /mm	Speed (C) / (mm·min ⁻¹)	Feed (D) /mm
1	150	5	400	0.125
2	200	10	600	0.250
3	250	15	800	0.500
4	300	20	1000	1.000

基于 4 因素 4 水平,选用 $L_{16}(4^5)$ 正交表。试样经强化处理后,其力学性能指标,包括残余应力、硬度和粗糙度,都发生了一定程度的改变,并且它们在一定程度上都影响着材料的疲劳性能^[11]。因此,试验性能指标为材料表面残余应力、表面硬度和表面粗糙度。

采用 PROTO 公司 Proto LDR 标准型高速 X 射线残余应力分析仪,测定水射流处理后材料表面的应力状态,测试时选用侧倾法,扫描方式选用固定 ψ 角方式, ψ 角取 0°、11.8°、-11.8°、17.48°、-17.48°、25°、-25°。采用 HV-1000 型显微硬度计,测定水射流处理后材料的表面硬度,载荷为 0.490 N,载荷保持 15 s,每组样品测 5 次,取平均值。利用 Bruker Nano Inc 公司 NPFLE 型三维表面形貌测量系统测定材料的表面粗糙度 (R_a),每组样品测 5 次,取平均值。

1.2 数据分析方法

表面残余压应力和硬度值越大,越有利于抑制疲劳裂纹的萌生及进一步的扩展,因此残余压应力和硬度可以使材料的疲劳性能有所改善,但是粗糙度值越大,应力集中现象越严重,这样会使材料的疲劳性能有所下降^[8-9]。为了更好地表征水射流技术的强化效果,也为了综合考虑水射流对强化后试样的表面残余应力、表面硬度和表面粗糙度的影响,本文采用多指标公式评分法对表面残余应力、表面硬度和表面粗糙度进行评估,综合表征水射流技术的强化效果^[14]。该方法的具体步骤如下:对于表面残余应力,14 号试样为 -644.5 MPa,效果最好,评 10 分;4 号试样为 -194.5 MPa,效果最差,评 1 分。对于表面粗糙度,

1 号试样为 0.238 μm ，效果最好，评 10 分；14 号试样为 0.558 μm ，效果最差，评 1 分。对于表面硬度，14 号试样为 399.62HV_{0.5}，效果最好，评 10 分；5 号试样为 246.66HV_{0.5}，效果最差，评 1 分。对其余试样各项指标的分数，参考其与最优结果的差值按比例

给定分数。考虑到表面残余应力指标较另两项指标更为重要，取表面残余应力指标权数为 2，其余两项指标权数为 1，因此其评分公式为：评分=2×表面残余应力得分+表面硬度得分+表面粗糙度得分^[14]。试验测定结果及评分如表 2 所示。

表 2 正交试验结果
Tab.2 Results of orthogonal test

Test number	Residual stress/MPa	Score 1	Hardness (HV _{0.5})	Score 2	Roughness/ μm	Score 3	Total score
1	-320.0	3.5	281.72	3.1	0.239	10.0	20.1
2	-252.5	2.1	268.56	2.3	0.268	9.2	15.7
3	-300.5	3.1	273.12	2.6	0.269	9.2	18.0
4	-194.5	1.0	255.48	1.5	0.311	8.0	11.5
5	-306.8	3.2	246.66	1.0	0.258	9.5	16.9
6	-342.0	4.0	267.82	2.2	0.246	9.8	20.0
7	-365.3	4.4	312.80	4.9	0.258	9.4	23.1
8	-348.3	4.1	289.50	3.5	0.264	9.3	21.0
9	-315.3	3.4	278.46	2.9	0.310	8.0	17.7
10	-297.5	3.0	276.94	2.8	0.242	9.9	18.7
11	-524.8	7.6	349.28	7.0	0.282	8.8	31.0
12	-600.5	9.1	341.54	6.6	0.350	6.9	31.7
13	-406.5	5.2	320.22	5.3	0.269	9.1	24.8
14	-644.5	10.0	399.62	10.0	0.558	1.0	31.0
15	-320.3	3.5	284.14	3.2	0.308	8.0	18.2
16	-426.3	5.6	339.76	6.5	0.302	8.2	25.9

2 结果与分析

2.1 直观分析

为更好地反映出试验参数对试验结果的影响，首先作直观分析。把每一列每一水平对应的试验结果的均值放在相应的位置，可以得到各列的极差，即每列均值中最大值与最小值的差值。极差大小反映其对应因素对试验结果影响的大小。计算得到因素 A（水压）、因素 B（靶距）、因素 C（速度）、因素 D（进给量）的极差分别是 8.650、2.700、4.725、9.625，如表 3 所示，表中均值 1、均值 2、均值 3、均值 4 分别用 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 表示，极差用 R 表示。由此得出初步结论：因素 D（进给量）对水射流强化效果的影响最大，因素 A（水压）次之，因素 C（速度）再次，因素 B（靶距）最小。获得最好强化效果的最优组合为：水压 300 MPa，靶距 15 mm，速度 400 mm/min，进给量 0.125 mm。

通过正交试验数据分析得到各因素对水射流强化效果的曲线效应图，如图 2 所示。根据正交试验设

计的特性，对于上述每个因素的 4 个水平来说，每个水平的试验条件完全一样（综合可比性），可进行直接比较。比如：对于水压的 4 个水平，即对于 A1、A2、A3、A4 来说，A1 的影响反映在第 1、2、3、4 号试验中，A2 的影响反映在第 5、6、7、8 号试验中，A3 的影响反映在第 9、10、11、12 号试验中，A4 的影响反映在第 13、14、15、16 号试验中，综合比较之后可以发现，对于 A1、A2、A3、A4 来说，它们的试验条件完全一样，可以进行直接比较，如果水压因素 A 对试验指标无影响，那么水压因素 A 对应的 4 个均值（ k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 ）应该相等，但处理文中数据后发现， k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 实际上不相等，说明水压因素 A 的水平变动对试验的强化效果有影响。从图 2 可知，水压对强化效果的影响是先从 150 MPa 开始，随着水压的增大，强化效果急剧增大，但到了 250 MPa 左右时，水压对水射流强化效果的影响程度开始降低，随着水压的增大，强化效果趋于平缓。同样可以看出，靶距、速度对水射流强化效果的影响并不明显，进给量对强化效果的影响是随着进给量的增大而急剧减小。

表 3 极差分析
Tab.3 Range analysis

Factors	Column					Test results
	1 (Water pressure)	2 (Target distance)	3 (Speed)	4 (Feed)	5 (Error column)	
1	1	1	1	1	1	20.1
2	1	2	2	2	2	15.7
3	1	3	3	3	3	18.0
4	1	4	4	4	4	11.5
5	2	1	3	3	4	16.9
6	2	2	4	4	3	20.0
7	2	3	1	1	2	23.1
8	2	4	2	2	1	21.0
9	3	1	3	4	2	17.7
10	3	2	4	3	1	18.7
11	3	3	1	2	4	31.0
12	3	4	2	1	3	31.7
13	4	1	4	2	3	24.8
14	4	2	3	1	4	31.0
15	4	3	2	4	1	18.2
16	4	4	1	3	2	25.9
k_1	16.325	19.875	24.250	26.475	19.500	
k_2	20.250	21.350	20.625	23.125	20.600	
k_3	24.775	22.575	21.925	19.875	23.625	
k_4	24.975	22.525	19.525	16.850	22.600	
R	8.650	2.700	4.725	9.625		

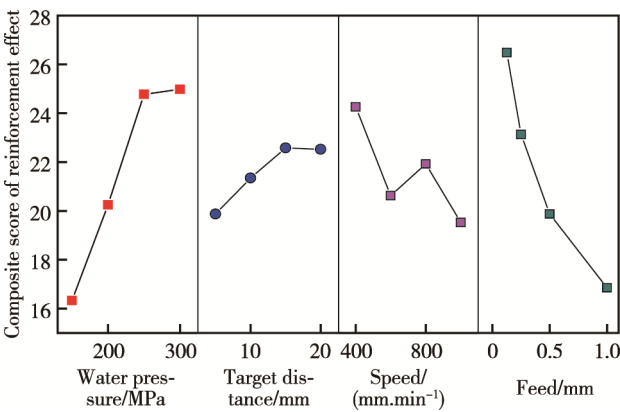


图 2 各因素的水射流强化效果效应图
Fig.2 Effect plot of water jet peening enhancing effect of every factors

2.2 方差分析

直观分析法虽然可以得到一些结果,但不能判断是水平不同还是试验误差导致对应试验结果的差别^[15]。因此,有必要进一步作方差分析,方差分析如表 4 所示。

j 列因素的水平变化引起的平均偏差平方和 (MS_j)与误差 (e)波动引起的平均偏差平方和 (MS_e)之比记为 F_j ,具体公式如下^[16]:

$$F_j = \frac{MS_j}{MS_e} = \frac{SS_j/f_j}{SS_e/f_e} \quad (1)$$

表 4 方差分析
Tab.4 Variance analysis

Factors	SS	f	MS	F	Saliency
Water pressure	204.47	3	68.16	6.66	**
Target distance	19.37	3	6.46	0.63	
Speed	49.53	3	16.51	1.61	
Feed	206.51	3	68.84	6.73	**
e	42.03	3	14.01		
E	61.4	6	10.23		

注: **表示影响显著

$$SS_j = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^m K_{ij}^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n} \dots\dots (j = 1, 2, 3, 4) \quad (2)$$

式中: SS_j 为第 j 列因素因为水平变化而得到的偏差平方和; f_j 为 j 列的自由度; SS_e 为误差列因素因为水平变化而得到的偏差平方和; f_e 为误差列的自由度; r 为每个水平重复的次数; n 为试验总次数; m 为每个因素的水平数; K_{ij} 为各因素各水平对应试验结果之和; x_i 为每组试验的结果值。

为了得到灵敏度更高的显著性分析,首先比较各因素的平均偏差平方和与误差的平均偏差平方和。若存在某因素的平均偏差平方和比误差的平均偏差平方和的 2 倍还小,可分别将两项的偏差平方和、自由

度进行合并处理, 结果分别记为修正误差 (E) 的偏差平方和 (SS_{e^A})、自由度 (f_{e^A}), 因此显著性分析通过误差的偏差平方和与自由度的放大, 实现检验精确度的提高。最终通过比较 F_j 最大值的大小来判断对应因素对试验结果影响程度的大小, 比值越大意味着影响越大。参考 F 分布表得到临界值 $F_{\alpha}(n_1, n_2)$, 其中 $n_1=f_j$, $n_2=f_{e^A}$, α 取 0.05、0.1, 有 $F_{0.05}(3, 6)=4.76$, $F_{0.1}(3, 6)=3.29$ 。对于进给量和水压分别为 $F=6.73>F_{0.05}(3, 6)$ 、 $F=6.66>F_{0.05}(3, 6)$, 所以进给量和水压的水平改变对实验结果影响显著, 记为“**”; 对于速度和靶距分别为 $F=1.61<F_{0.1}(3, 6)$ 、 $F=0.63<F_{0.1}(3, 6)$, 所以速度和靶距的水平改变对实验结果没有多大影响, 不做标记。由方差分析得出最终结论: 进给量对水射流强化效果的影响幅度最大, 水压次之, 速度和靶距对水射流强化效果的影响显著性较小, 与直观分析的结论相同。

3 结论

1) 通过分析工艺参数的数据, 得出工艺参数对水射流强化效果影响程度的显著性由大到小依次为进给量、水压、速度、靶距。

2) 从强化效果效应图可以看出, 速度对试验结果的影响为非线性, 因此在探究水射流工艺参数对试验结果的影响时, 不能单调性考虑。

3) 在本文所研究的试验范围内, 获得的最优工艺参数组合为: 水压 300 MPa, 靶距 15 mm, 速度 400 mm/min, 进给量 0.125 mm。

参考文献:

- [1] ZHANG Qun-li, ZHOU Ming-zhao, CHEN Zhi-jun, et al. Technique of Non-penetration Laser Lap Welding on Galvanized Steel and AISI 304 Stainless Steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6): 0603012.
- [2] LIU G, WANG S C, LOU X F, et al. Low Carbon Steel with Nanostructured Surface Layer Induced by High-energy Shot Peening[J]. Scripta Materialia, 2001, 44(44): 1791-1795.
- [3] 许正功, 陈宗帖, 黄龙发. 表面形变强化技术的研究现状[J]. 装备制造技术, 2007(4): 69-71.
XU Zheng-gong, CHEN Zong-tie, HUANG Long-fa. Research on the Outline of Strengthening Technology of Surface Deformation[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2007(4): 69-71.
- [4] ZAFRED P R. High Pressure Water Shot Peening: EP, EP0218354 A1[P]. 1986-08-28.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] AROLA D, ALADEA E, WEBER W. Improving Fatigue Strength of Metals Using Abrasive Waterjet Peening[J]. Machining Science & Technology, 2006, 10(2): 197-218.
- [8] 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.
- [9] 夏明莉, 刘道新, 杜东兴, 等. 喷丸强化对 TC4 钛合金表面完整性及疲劳性能的影响[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(8): 151-155.
XIA Ming-li, LIU Dao-xin, DU Dong-xing, et al. Effects of Shot Peening on Surface Integrity and Fatigue Properties of TC4 Titanium Alloy[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(8): 151-155.
- [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 Strengthening of Brass[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010, 31(8): 140-145.
- [11] 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, 25(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 & Engineering, 2007, 25(5): 750-754.
- [12] 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.
DONG Xing, WANG Rui-hong, DUAN Xiong. Test Research of Water Jet Peening Strengthening[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(3): 568-573.
- [13] 苑玉凤. 多指标正交试验分析[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2005, 19(4): 53-56.
YUAN Yu-feng. Analysis of Multi-target Orthogonal Experiment[J]. Journal of Hubei Automotive Industries Institute, 2005, 19(4): 53-56.
- [14] 孙建国, 李胜, 何镇盐, 等. 激光微织构用吸光涂层正交工艺试验研究[J]. 激光技术, 2016, 40(6): 907-911.
SUN Jian-guo, LI Sheng, HE Zhen-yan, et al. Study on Orthogonal Processing Experiment of Light Absorbing Coating for Laser Micro-dimple[J]. Laser Technology, 2016, 40(6): 907-911.
- [15] 俞忠原. 实验设计与数据分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1991.
YU Zhong-yuan. Experimental Design and Data Analysis[M]. Harbin: Harbin Institute of Marine Engineering Press, 1991.
- [16] 李贤平. 概率论与数理统计[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2003.
LI Xian-ping. Probability and Statistics[M]. Shanghai: Fudan University Press, 2003.