喷砂工艺参数对 45 钢表面粗糙度的影响及优化研究

李作锋
(洛阳双瑞精铸钛业有限公司，河南 洛阳 471003)

[摘 要]为精准把控 45 钢喷砂预处理表面质量,适配后续涂层结合工艺要求,以 36、46 目棕刚玉为磨料,通过单因素试验与正交试验,探究喷砂压力、磨料粒径、喷砂距离、喷砂时间对 45 钢表面粗糙度的影响规律,并完成工艺参数优化。结果表明:各参数对粗糙度影响程度依次为磨料粒径>喷砂压力>喷砂时间>喷砂距离;表面粗糙度随喷砂压力、喷砂时间增大而升高,随喷砂距离增大而降低,36 目棕刚玉粗化效果优于 46 目棕刚玉。经混合水平正交试验极差分析确定最优工艺组合:喷砂压力 0.5 MPa、36 目棕刚玉、喷砂距离 120 mm、喷砂时间 40 s,该工艺下算术平均偏差 Ra=5.32 μm、标准差 0.08 μm、均方根粗糙度 Rq=5.41 μm,粗糙度均匀稳定,可满足工程应用需求。

[关键词]喷砂工艺;表面粗糙度;45 钢;棕刚玉;参数优化;表面预处理
[中图分类号] TB42 [文献标识码] A doi: 10.26935/j.issn.2097-5317.2026.0009
[文章编号] 2097-5317(2026)02-0030-05

Study on Influence and Optimization of Sandblasting Process Parameters on Surface Roughness of 45 Steel

LI Zuofeng
(Luoyang Sunrui Titanium Precision Casting Co., Ltd., Luoyang 471003, China)

Abstract: To accurately control the surface quality of 45 steel after sandblasting pretreatment and meet the process requirements of subsequent coating adhesion, brown corundum of 36 and 46 mesh was adopted as the abrasive. Single-factor tests and orthogonal tests were conducted to explore the influence laws of sandblasting pressure, abrasive particle size, sandblasting distance and sandblasting time on the surface roughness of 45 steel, and the process parameters were optimized. The results showed that the influence degree of each parameter on surface roughness followed the order: abrasive particle size > sandblasting pressure > sandblasting time > sandblasting distance. The surface roughness increased with the increase of sandblasting pressure and sandblasting time, while decreased with the increase of sandblasting distance. The roughening effect of 36 mesh brown corundum is superior to that of 46 mesh brown corundum. The optimal process combination was determined by range analysis of mixed-level orthogonal tests: sandblasting pressure 0.5 MPa, 36 mesh brown corundum, sandblasting distance 120 mm, and sandblasting time 40 s. Under this process, the arithmetic mean deviation Ra was 5.32 μm, the standard deviation was 0.08 μm, and the root mean square roughness Rq was 5.41 μm. The surface roughness was uniform and stable, which can meet the requirements of engineering application.

收稿日期: 2026-03-30
Received: 2026-03-30
通信作者: 李作锋(1976-),高级工,研究领域:表面处理,E-mail:649412470@qq.com
Corresponding Author: LI Zuofeng (1976-), Senior Technician, Research Focus:Surface Treatment, E-mail: 649412470@qq.com

Key words: sandblasting technology; surface roughness; 45 steel; brown corundum; parameter optimization; surface pretreatment

0 前 言

喷砂是借助高速气流带动磨料冲击工件表面,实现除锈、粗化、强化的高效表面预处理技术,在机械构件加工、防腐工程中应用广泛[1]。45 钢力学性能优良,是轴类、结构连接件的常用材料,其喷砂后的表面粗糙度直接决定涂层附着力、装配精度与服役寿命,粗糙度把控不当易引发涂层脱落、应力集中等问题。研究喷砂的目的是获得粗糙度适中、均匀性优良的表面形貌,提升涂层结合强度,保证工件长期稳定服役。

棕刚玉硬度高、切削性好,是 45 钢喷砂常用磨料,36、46 目粒度适配多数常规预处理场景[2]。当前相关研究多聚焦单一参数分析,多参数耦合优化的系统性研究不足。基于此,本工作以 45 钢为研究对象,系统分析关键喷砂参数对粗糙度的影响机制,通过正交试验优化工艺,为 45 钢喷砂加工提供量化参考。

本工作旨在通过正交试验分析,建立多参数耦合的预测模型,揭示表面形貌演化机制。不仅能为 45 钢在汽车、工程机械等领域的精密制造提供科学的工艺指导,还能推动表面工程技术向高效化方向发展,对提升中国制造产品质量具有积极的现实意义。

1 试 验

1.1 试验材料与设备

试验基体为 45 钢,试样尺寸 50 mm×50 mm×5 mm,退火态硬度 180~200 HB,试验前用无水乙醇擦拭烘干,消除表面杂质干扰。磨料选用 36、46 目棕刚玉,Al_2O_3 含量≥95%(质量分数),显微硬度 2 200~2 400 HV,棱角锋利且切削性能稳定[3]。试验采用常压手动喷砂设备,硬质合金喷嘴直径 8 mm;表面粗糙度采用 TR200 手持式粗糙度检测仪检测,以算术平均偏差 Ra 为评价指标,测量精度±0.01 μm[4],微观形貌采用日立 SU3900 扫描电子显微镜观察[5]。

1.2 试验方案设计

试验采用单因素变量试验+混合水平正交试验结合的方式。单因素试验固定其余参数,分别探究喷砂压力(0.4、0.5、0.6 MPa)、磨料粒径(36、46 目)、喷砂距离(100、120、140 mm)、喷砂时间(20、30、40 s)对 45 钢粗糙度的影响,每组重复 3 次取平均值。

本研究磨料粒径为 2 水平,其余因素为 3 水平,属于混合水平试验设计,选取 4 个因素为研究对象,以 Ra 为评价指标,通过极差分析确定影响显著性与最优组合[6],因素水平见表 1。

表 1 正交试验因素水平表

Table 1 The factors and levels of orthogonal tests

水平	因素 A 喷砂压力/MPa	因素 B 磨料粒径/目	因素 C 喷砂距离/mm	因素 D 喷砂时间/s
1	0.4	36	100	20
2	0.5	46	120	30
3	0.6	-	140	40

注:本研究磨料粒径仅设置 36、46 目两个水平,“-”表示未设置该水平。

1.3 试样处理与检测

喷砂后用无水乙醇清洗试样表面,去除磨料残留与碎屑,恒温烘干后在表面均匀选取 3 个测点,用 TR200 手持式粗糙度检测仪检测 Ra 与均方根粗糙度 Rq,剔除异常数据后取平均值,Rq 为偏差的均方根值,对峰值与谷值更为敏感,可更好地表征表面能量分布。两者均依据现行国家标准 GB/T 3505-2009 测得,数值关系满足 $Rq=(1.11\sim1.15)\times Ra$。试验数据采用混合水平极差分析法处理,判断各参数影响主次。

2 试验结果与分析

2.1 单因素对表面粗糙度的影响

2.1.1 磨料粒径的影响

磨料粒径是调控粗糙度的核心因素,相同工艺下,36 目棕刚玉(粒径 0.500~0.600 mm)处理后的 45 钢表面粗糙度远高于 46 目棕刚玉(粒径 0.355~0.400 mm)处理的,磨料粒径越大,表面粗糙度越高。36 目磨料颗粒尺寸更大,高速冲击时对钢材表面的切削深度与塑性变形作用更强,表面峰谷差更明显;46 目磨料粒径小,冲击痕迹浅,表面形貌更细腻[7],可见磨料粒径直接决定磨料冲击作用形式,是影响粗糙度的关键变量。图 1 中的散点对应数据为实验平均值,不同标记用于区分 36 目与 46 目磨料类别。

2.1.2 喷砂压力的影响

在 0.4~0.6 MPa 的喷砂压力范围内,45 钢表面粗糙度随喷砂压力升高呈线性上升趋势,压力是调控粗糙度的关键参数,压力每提升 0.1 MPa,粗糙度增幅达 0.6~0.8 μm。喷砂压力越大,磨料获得的冲击动能越强,对钢材表面的压入、切削作用越显著,表面微观凹

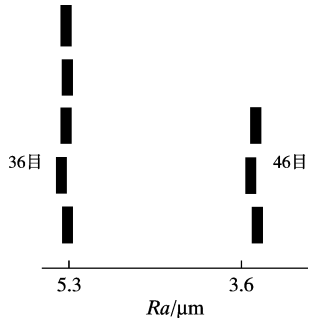


图 1　不同磨料粒径对 45 钢表面粗糙度 *Ra* 的影响
Fig. 1　Effect of different abrasive particle sizes on surface roughness *Ra* of 45 steel

凸结构更突出[8]。压力超过 0.6 MPa 易出现磨料散射、表面过喷损伤,因此 0.4~0.6 MPa 为适宜压力区间。图 2 中数据点为不同喷砂压力下 *Ra* 的平均值,误差棒用于表征实验数据的离散程度。

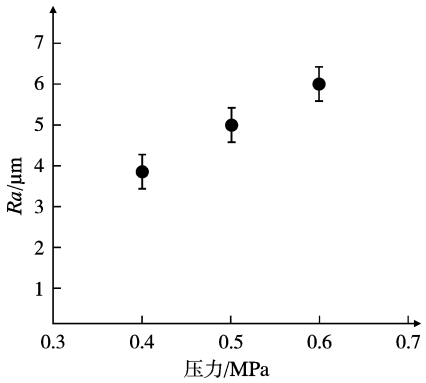


图 2　喷砂压力与 45 钢表面粗糙度的关系
Fig. 2　The relationship between sandblasting pressure and surface roughness of 45 steel

2.1.3　喷砂距离的影响

喷砂距离增大,磨料束发散程度加剧,动能快速衰减,表面粗糙度逐步降低。距离 100 mm 时,磨料束集中但局部冲击过度,表面均匀性差;距离 120 mm 时,磨料冲击动能均匀,粗糙度数值稳定且表面形貌规整;距离超过 120 mm,粗化效果大幅减弱,故 120 mm 为最优喷砂距离。图 3 中散点为不同喷砂距离下 *Ra* 的平均值,误差棒表示标准偏差。

2.1.4　喷砂时间的影响

20~30 s 内,粗糙度随喷砂时间延长快速上升,此时试样表面氧化皮完全去除,磨料持续冲击基体形成稳定粗糙结构;30~40 s 时,粗糙度增长趋于饱和,继续延长时间对粗糙度无明显提升[9],仅能小幅优化表面均匀性,还会降低生产效率,因此 30~40 s 为适宜喷砂时间。图 4 中散点为不同喷砂时间下 *Ra* 的平均值,误差棒为实验标准偏差。

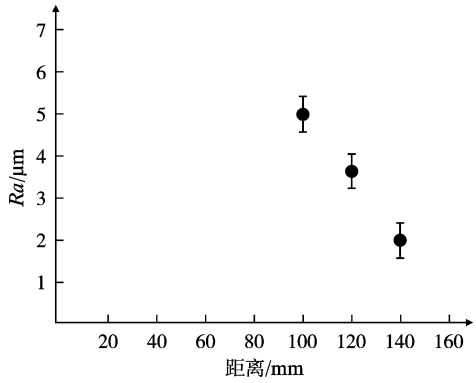


图 3　喷砂距离与 45 钢表面粗糙度的关系
Fig. 3　The relationship between sandblasting distance and surface roughness of 45 steel

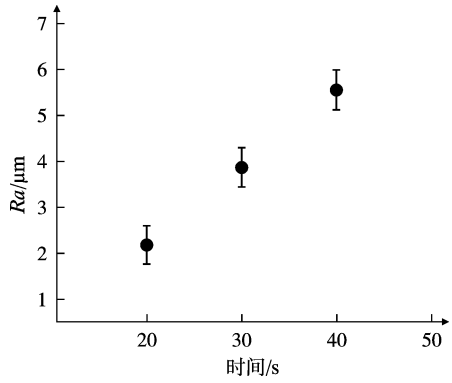


图 4　喷砂时间与 45 钢表面粗糙度的关系
Fig. 4　The relationship between sandblasting time and surface roughness of 45 steel

2.2　正交试验结果与深度优化分析

以表面粗糙度 *Ra* 为评价指标,正交试验方案及结果见表 2,极差分析结果见表 3(极差 *R* 越大,表明该因素对粗糙度的影响越显著)。

表 2　45 钢正交试验方案及结果

Table 2　The scheme and results of 45 steel orthogonal tests

试验号	因素 A 喷砂压力/MPa	因素 B 磨料粒径/目	因素 C 喷砂距离/mm	因素 D 喷砂时间/s	*Ra*/ μm
1	0.4	36	100	20	4.71
2	0.4	46	120	30	3.08
3	0.4	46	140	40	2.73
4	0.5	36	120	40	5.30
5	0.5	46	140	20	3.27
6	0.5	36	100	30	4.93
7	0.6	36	140	30	5.85
8	0.6	46	100	40	3.60
9	0.6	46	120	20	3.23

表 3 正交试验极差分析结果

Table 3 The analysis results of orthogonal test

分析项目	因素 A 喷砂压力	因素 B 磨料粒径	因素 C 喷砂距离	因素 D 喷砂时间
*K*1	10.52	16.01	13.24	11.21
*K*2	13.50	12.91	11.61	13.86
*K*3	12.68	–	11.85	11.63
极差 *R*	2.98	3.10	1.63	2.65

由极差分析可知,各因素对 45 钢表面粗糙度的影响显著性排序为:磨料粒径(B)>喷砂压力(A)>喷砂时间(D)>喷砂距离(C),该结果与单因素试验结论一致,验证了试验数据的可靠性。磨料粒径极差最大,影响最为突出,其粒度变化直接改变磨料冲击接触面积与塑性变形程度,从本质上决定表面微观形貌;喷砂压力通过调控磨料动能影响粗糙度,是次要核心因素;喷砂时间通过增加冲击次数强化粗化效果,喷砂距离仅影响动能衰减,影响程度最弱。

以粗糙度适配后续涂层结合、表面均匀稳定、兼顾生产效率为优化目标,综合各因素水平效应:喷砂压力选 A_2(0.5 MPa),磨料粒径选 B_1(36 目),喷砂距离选 C_2(120 mm),喷砂时间选 D_3(40 s),最终确定最优工艺组合为 $A_2B_1C_2D_3$。最优工艺下试样表面形貌见图 5,表面结构清晰、无过喷与微裂纹、整体均匀性良好。对该组合进行 3 组重复验证试验,测得 *Ra* 平均值为 5.32 μm,标准差仅 0.08 μm,*Rq* = 5.41 μm,粗糙度均匀稳定,完全满足后续涂装、喷涂前处理的质量要求。

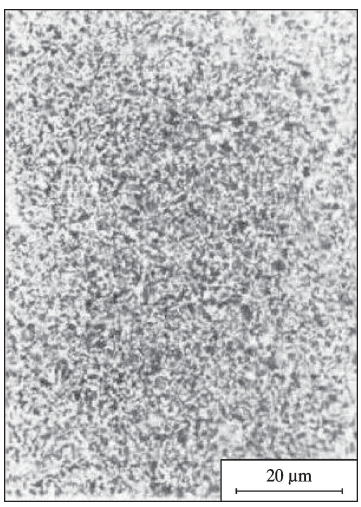


图 5 最优工艺下 45 钢表面微观形貌

Fig. 5 Surface micromorphology of 45 steel under optimal process

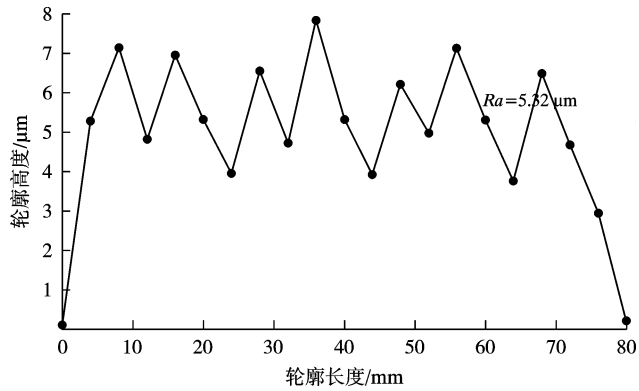


图 6 45 钢表面粗糙度轮廓曲线

Fig. 6 Surface roughness profile curve of 45 steel

2.3 工艺优化机理阐释

喷砂加工本质是磨料对 45 钢表面冲击、切削、塑性变形的耦合作用过程,最优工艺下各参数协同适配:36 目棕刚玉保证足够的粗化能力,形成适宜的表面峰谷结构;0.5 MPa 喷砂压力避免动能过高造成表面微裂纹;120 mm 喷砂距离减少磨料散射与动能衰减,保证冲击均匀性;40 s 喷砂时间让表面粗糙度达到饱和状态,避免过度加工。多参数匹配实现了粗糙度与表面质量的平衡,是 45 钢喷砂预处理的理想工艺方案。

基于冲蚀理论,喷砂过程中高速磨粒对 45 钢表面连续冲击的本质是动能转化为塑性变形能与表面能的动态过程。磨粒入射产生的压应力与切向剪切应力共同作用,使表层发生屈服,出现局部塑性压陷、滑移挤压与微切削效应。在循环冲击下,材料内部位错大量增殖、缠结并形成硬化,塑性应变持续累积,最终形成凹凸不均的微观形貌[10]。

工艺参数通过改变磨粒冲击动能与作用频率,直接调控塑性变形程度与表面损伤特征:压力增大、磨粒加粗会加剧塑性变形,使粗糙度上升;距离与时间则通过影响冲击均匀性,改变表面形貌演化规律[11]。整个过程以冲蚀作用为外部驱动,以塑性变形为内在核心,二者耦合决定 45 钢表面粗糙度的形成与发展规律。

3 45 钢喷砂工艺应用优化原则

结合试验结论与工业生产实际,总结 45 钢喷砂工艺优化实操原则:其一,优先根据粗糙度需求选定磨料,高粗化、除锈选 36 目棕刚玉,精细预处理选 46 目棕刚玉;其二,以喷砂压力为核心调控参数,0.5

MPa 为最优基准值,可小幅微调适配需求;其三,固定喷砂距离 120 mm,兼顾粗糙度与表面均匀性;其四,喷砂时间控制在 30~40 s,确保粗糙度达标且提升加工效率;其五,批量生产前做小样验证,实时检测粗糙度,保证工艺稳定性。

4 结 论

(1)以 36、46 目棕刚玉为磨料,四大喷砂参数对 45 钢表面粗糙度的影响显著性为:磨料粒径>喷砂压力>喷砂时间>喷砂距离,磨料粒径是最核心影响因素。

(2)45 钢表面粗糙度随喷砂压力、喷砂时间增大而升高,随喷砂距离增大而降低,36 目棕刚玉的粗化效果显著优于 46 目棕刚玉。

(3)经正交试验优化得到最优喷砂工艺:喷砂压力 0.5 MPa、36 目棕刚玉、喷砂距离 120 mm、喷砂时间 40 s,该工艺下算术平均偏差 Ra=5.32 μm、均方根粗糙度 Rq=5.41 μm、标准差 0.08 μm,粗糙度均匀稳定,实用性强。

(4)本研究针对 45 钢开展系统化参数优化,研究内容聚焦、数据精准,可为机械行业 45 钢构件喷砂预处理提供直接的工艺参考。

[参 考 文 献]

[1] 李钦奉. 喷砂技术及其表面清理效率的研究[J]. 中国修船, 2000(3): 15-17.
LI Q F. Studying of sand spraying technique and efficiency of its surface clearance[J]. China Shiprepair, 2000(3): 15-17.

[2] 李 星, 杨 敏, 李苏杰, 等. 棕刚玉在不锈钢表面处理中应用[J]. 中国水运(下半月), 2015, 15(24): 337-338.
LI X, YANG M, LI S J, et al. Application of brown fused alumina in stainless steel surface treatment[J]. China Water Transport, 2015, 15(24): 337-338.

[3] 全国磨料磨具标准化技术委员会(SAC/TC 139). 普通磨料 棕刚玉:GB/T 2478-2022[S]. 北京: 中国标准出版社,2022.
National Technical Committee 139 on Abrasives of Standardization Administration of China (SAC/TC 139). Conventional abrasive—Brown fused alumina: GB/T 2478-2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.

[4] 高海霞. 表面粗糙度测量方法综述[J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57(9): 145-146.
GAO H X. Review of Surface Roughness Measurement Methods [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2021, 57(9): 145-146.

[5] 翟彦飞. 机械加工表面微观形貌测量和表面摩擦系数测量[J]. 产业与科技论坛, 2020, 19(7): 50-52.
ZHAI Y F. Measurement of microscopic topography and surface friction coefficient of machined surface[J]. Industrial & Science Tribune, 2020, 19(7): 50-52.

[6] 温 超, 周 杰, 夏 添, 等. 基于正交实验方法的分配器优化设计[J]. 设备管理与维修, 2025(7): 18-20.
WEN C, ZHOU J, XIA T, et al. Optimization design of distributor based on orthogonal experiment method[J]. Plant Maintenance Engineering, 2025(7): 18-20.

[7] 郭 瑞, 周存龙, 刘旭东, 等. 磨料种类和粒径对钢板表面的形貌影响[J]. 重型机械, 2019(4): 22-25.
GUO R, ZHOU C L, LIU X D, et al. Study on the effect of abrasive type and size on the morphology of steel surface [J]. Heavy Machinery, 2019(4): 22-25.

[8] 王晶晶. 面向扫砂工艺的钢板表面喷砂处理特性试验[J]. 造船技术, 2022, 50(2): 73-77.
WANG J J. Steel Plate Surface Sand Blasting Treatment Characteristics Test Towards Sand Sweeping Technology [J]. Marine Technology, 2022, 50(2): 73-77.

[9] 杨海龙, 谢金标, 周 健, 等. 金属结构复材粘接修理的喷砂表面处理工艺研究[J]. 中国胶粘剂, 2025, 34(8): 38-47.
YANG H L, XIE J B, ZHOU J, et al. Study on sandblasting surface treatment technology for bonding repair of metal structure composite materials[J]. China Adhesives, 2025, 34(8): 38-47.

[10] 李 力, 魏天酬, 刘明维, 等. 冲蚀磨损机理及抗冲蚀涂层研究进展[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(8): 70-74.
LI L, WEI T C, LIU M W, et al. Research progress on erosion wear mechanism and anti-erosion coatings[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2019, 38(8): 70-74.

[11] 王 瑞, 侯荣国, 张玉龙, 等. 喷砂工艺参数对不锈钢表面环氧涂层结合力的影响[J]. 电镀与涂饰, 2022, 41(19): 1 410-1 414.
WANG R, HOU R G, ZHANG Y L, et al. Effects of sandblasting conditions for stainless steel on adhesion of epoxy coating painted thereon[J]. Electroplating & Finishing, 2022, 41(19): 1 410-1 414.

[编校:陈 鸣]