

纵梁数控等离子切割质量研究

毕宝鹏 范坤

(陕西重型汽车有限公司, 西安 710200)

摘要:为改善纵梁数控等离子切割外观质量,以精益六西格玛DMAIC模型为研究框架,对导致纵梁数控等离子切割外观不合格的影响因素进行分析,建立试验模型,并通过MINITAB软件进行数据分析和结果预测,确定了导致纵梁数控等离子切割外观质量异常的关键因子,制定了纵梁数控等离子切割加工参数设定方案,现场试生产结果表明,优化方案能够有效降低纵梁数控等离子切割外观的不合格率,提升了重型载货汽车车架纵梁的生产质量。

关键词:六西格玛 车架纵梁 等离子切割 外观质量 加工参数

中图分类号:U466 **文献标志码:**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20230403

Research on NC Plasma Cutting Quality of Longitudinal Beam

Bi Baopeng, Fan Kun

(Shaanxi Heavy Truck Co., Ltd., Xi'an 710200)

Abstract: To improve numerical control plasma cutting appearance quality of longitudinal beam, the Lean Six Sigma DMAIC model is used as the research framework to analyze the factors leading to unqualified appearance quality of longitudinal beam numerical control plasma cutting. A test model is established, and data analysis and result prediction are carried out through MINITAB software to identify the key factors leading to the abnormal appearance quality of longitudinal beam numerical control plasma cutting. The processing parameter setting scheme of longitudinal beam numerical control plasma cutting is determined. Trial production on the production site indicates that the optimization scheme can effectively reduce the unqualified rate of longitudinal beam numerical control plasma cutting appearance, and improve the production quality of longitudinal beam of heavy truck frame.

Key words: Six sigma, Longitudinal beam, Plasma cutting, Appearance quality, Machining parameters

1 前言

目前,某主机厂部分重型载货汽车车架纵梁加工流程如下:纵梁平板料冲孔、切割纵梁外形、6 000 t压型、纵梁合梁或折弯、纵梁铆接车架。平板等离子数控切割机是专门用于车架纵梁外形切割的数控设备,切割速度为800~2 900 mm/min,可切割纵梁厚度范围为4~15 mm,能适应多品种柔性化生产,具有精度高、可靠性高、价格低、操作维护简单的优点。纵梁外形切割精度及外观质量对整车装配及后续安全使用至关重要。

等离子切割是利用高温等离子电弧的热量使工件切口处的金属局部熔化(和蒸发),并借高速等离子的动量排出熔融金属以形成切口的一种加工方法。等离子切割机配合不同的工作气体可以切割各种采用氧气切割技术难以切割的金属,对有色金属(不锈钢、铝、铜、钛、镍)的切割效果更佳,其主要优点是在切割厚度小的金属时速度快,尤其在切割普通碳素钢薄板时,速度可达到氧切割法的5~6倍,且切割面光洁、热变形小、热影响区少^[1-2]。某主机厂使用的是SH-2002AH/ST等离子切割线,配合使用压缩空气。空气等离子切割机可以兼顾氧、氮等离

作者简介:毕宝鹏(1989—),男,高级工程师,硕士学位,研究方向为汽车制造工艺。

参考文献引用格式:

毕宝鹏,范坤.纵梁数控等离子切割质量研究[J].汽车工艺与材料,2024(8):33-38.

BI B P, FAN K. Research on NC Plasma Cutting Quality of Longitudinal Beam[J]. Automobile Technology & Material, 2024(8): 33-38.

子切割机的优点,适用于汽车零部件切割。判定纵梁外形切割质量的维度有切割斜角的大小、切割断面波纹深度以及切割熔渣量等^[3-4]。

由于平板料质量不佳,存在镰刀弯、长度尺寸超差等问题,工件在切割时易造成凸台、切不断、切割面波浪纹等。为保证切割质量,需对已加工纵梁进行返修,工作量大且返修质量无法保证。本文通过使用精益六西格玛质量工具对数控等离子平板切割机加工过程进行分析,优化加工参数,提高数控等离子平板切割外观质量,降低返修率。

2 等离子切割质量提升过程

DMAIC 是六西格玛管理中最重要、最经典的改进模式,主要侧重在已有流程的质量改善。DMAIC 代表六西格玛质量改进活动不同阶段,即:定义(Define)阶段(D)、测量(Measure)阶段(M)、分析(Analyze)阶段(A)、改善(Improve)阶段(I)、控制(Control)阶段(C),如图 1 所示。

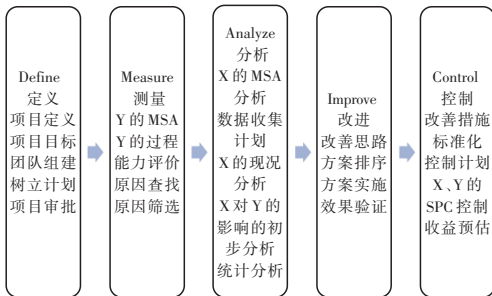


图 1 等离子切割质量提升过程 DMAIC 流程

本文运用 DMAIC 流程梳理纵梁切割工序生产过程,查找不增值步骤,采用因果矩阵表找出影响纵梁数控等离子切割不合格率的因素,实施改进。

2.1 定义阶段(D阶段)

项目团队需要通过定义阶段明确问题,确定不合格率 Y 的标准。本文统计了纵梁数控等离子切割工序切割后外观不合格件,2020 年 6 月 ~ 12 月纵梁数控等离子切割外观不合格率如图 2 所示,纵梁平板切割外观不合格率最高达 31.17%,且呈上升趋势。

使用 SIPOC 宏观流程图分解纵梁加工过程,确定项目数控等离子切割机加工前准备、加工参数设定、加工过程及打磨飞溅毛刺为重点关注项。纵梁数控等离子切割外观的主要缺陷为切割波

纹、切割斜角及切割熔渣^[5-7],2020 年 6 月 ~ 12 月纵梁数控等离子切割外观主要缺陷及比例如表 1 所示。使用失效模式的帕累托(Pareto)图分析纵梁数控等离子切割外观不合格品,如图 3 所示,发现由切割波纹、切割斜角引起的失效在总的故障模式中占比 90%,因此,切割波纹和切割斜角引起的失效为主要失效模式,从而纵梁数控等离子切割外观不合格率可转化为切割波纹不合格率 Y_1 和切割斜角不合格率 Y_2 。现阶段纵梁数控等离子切割外观不合格率为 30%,通过分析基线及最好加工水平,确定合理项目目标为 9%,预计改善后 6 个月节约的费用为:

$$Q = S \cdot H \cdot H_r \cdot (r_H - r_Q) \quad (1)$$

式中: Q 为节约的费用, S 为纵梁数量, H 为打磨工时, H_r 为小时费率, r_Q 、 r_H 分别为改善前、后的不良率。

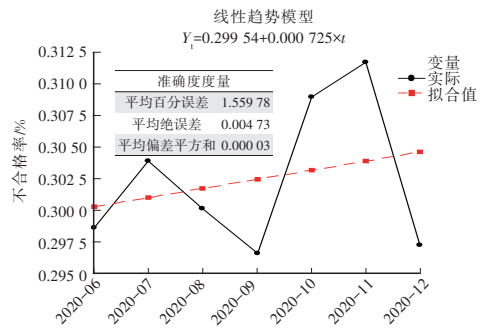


图 2 纵梁数控等离子切割外观不合格率

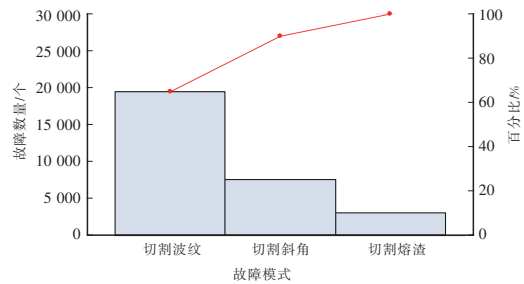


图 3 引起纵梁数控等离子切割外观失效模式的 Pareto 图

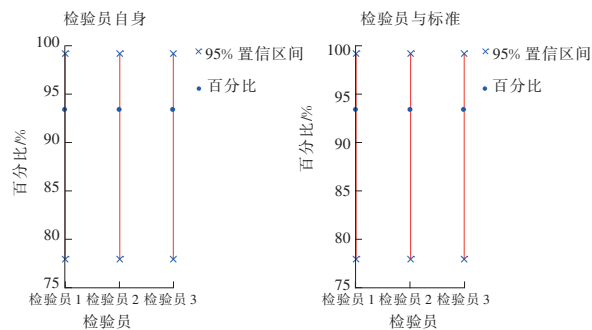
表 1 纵梁数控等离子切割外观主要缺陷及比例

缺陷	数量/个	比例/%
切割波纹	19 469	65.0
切割斜角	7 488	25.0
切割熔渣	2 995	10.0

经计算,改善后 6 个月节约的费用约为 111 620.92 元。项目团队成员包括工艺主管、工艺人员、加工人及检验人员。

2.2 测量阶段(M阶段)

测量阶段的目的是对当前能力进行分析,查找及筛选潜在原因。测量系统的波动主要是量具和检验员的变化引起的,为了确保测量系统的稳定性,使用计数型测量系统对Y的数据真实性进行验证,如图4所示,发现检验员与标准一致性 $K_{appa}=0.932\ 985>0.9$,可见本项目检验员对纵梁平板外观不合格品类型判定准确,测量结果可靠。



所有检验员与标准

评估一致性

检 # 相

验数 符数 百分比 95% 置信区间

30 24 80.00 (61.43, 92.29)

相符数: 所有检验员的评估与已知的标准一致。

Fleiss 的 Kappa 统计量

响应	Kappa	Kappa 标准误差	Z	P(vs > 0)
不合格	0.932985	0.0745356	12.5173	0.0000
合格	0.932985	0.0745356	12.5173	0.0000

图4 检验员测量数据真实性验证

分析纵梁数控等离子切割外观不合格率过程稳定性,图5所示的控制图中,点都是随机分布在控制极限之间,无红点判异表明纵梁数控等离子切割过程稳定且受控。在改进纵梁数控等离子切割外观不合格率之前,需要深入了解纵梁平板切割外观不合格率问题现状及其过程能力。在六西格玛管理活动中,为与属性值数据进行横向比较,可以使用西格玛水平Z来评价过程能力,它与过程的不合格品率是一一对应的。如图6、表2所示,采用二项过程能力分析对纵梁等离子切割不合格率过程能力进行分析,纵梁数控等离子切割过程能力指数Z值为0.5170,表明纵梁等离子切割过程能力较差,需要改进。

2.3 分析阶段(A阶段)

分析阶段是DMAIC各阶段中最难以预见的

阶段,所用方法取决于问题及数据的特点。

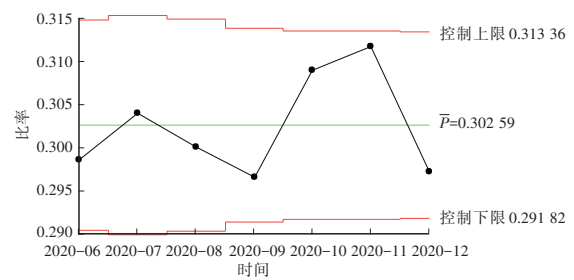
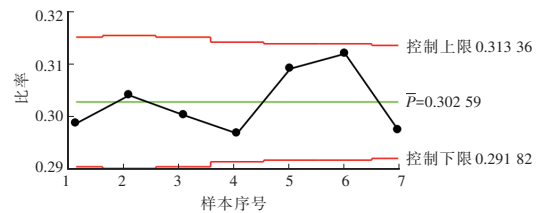
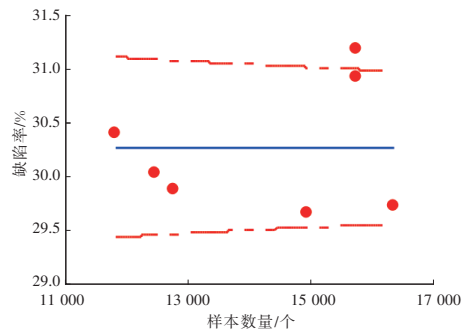


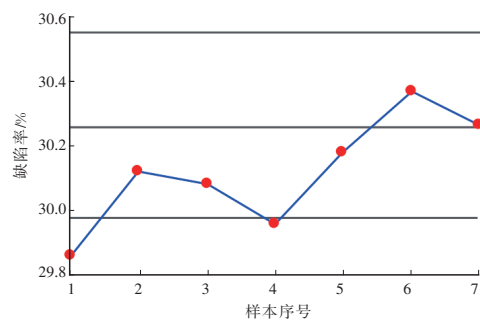
图5 不合格率的P控制图



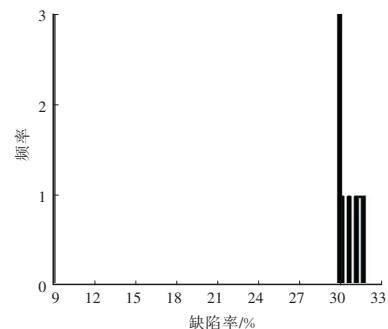
(a)P控制图



(b)缺陷率



(c)累积缺陷



(d)直方图

图6 不合格率的过程能力分析

项目	数值
缺陷/%	30.26
置信区间下限/%	29.97
置信区间上限/%	30.55
目标/%	9.00
缺陷/ $\times 10^{-6}$	302 590
置信区间下限/ $\times 10^{-6}$	299 741
置信区间上限/ $\times 10^{-6}$	305 450
过程 Z	0.517 0
置信区间下限	0.508 8
置信区间上限	0.525 1

使用流程变量图和因果矩阵对 41 个影响纵梁数控等离子切割质量的因子逐一打分,从中筛选出了切割电流、切割速度、角磨机、操作人员、打磨速度及钢板尺等 9 个分值最高的输入因子。通过因果矩阵及相关性分析,从中筛选出前 80% 分值最高的 4 个输入因子:切割电流、切割速度、角磨机、操作人员。最后利用故障模式与影响分析(Fault Modes and Effect Analysis, FMEA)方法,从 4 个输入因子中筛选出了风险顺序数(Risk Priority Number, RPN)前 80% 的 2 个输入因子,即切割电流、切割速度,如图 7 所示。

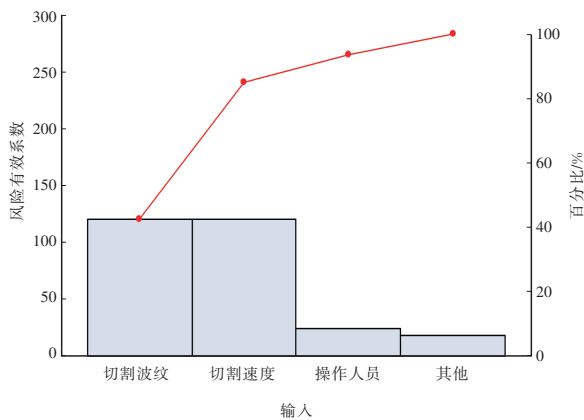


图 7 通过失效及后果分析筛选关键因子

分别针对 M 阶段分析出的 2 个因子设计验证计划和收据收集计划,如表 3、表 4 所示。运用多变量分析分别对切割波纹不合格数 Y_1 和切割斜角不合格数 Y_2 进行二进制逻辑回归分析。 Y_1 的切割电流和切割速度 P 值分别为 0.023 和 0.025,均小于决定显著性水平 0.05,可见切割电流和切割速度是影响切割波纹不合格率的关键

因子。同理, Y_2 的切割电流和切割速度 P 值分别为 0.022 和 0.048,均小于决定显著性水平 0.05,可见切割电流和切割速度是影响切割斜角不合格率的关键因子。

序号	不合格数量 Y	影响因子 X	Y 的数据类型	X 的数据类型	检验工具
1	Y_1 :切割波纹不合格数	X_1 :切割电流	离散	连续	二进制逻辑回归分析
2	Y_1 :切割波纹不合格数	X_2 :切割速度	离散	连续	二进制逻辑回归分析
3	Y_2 :切割斜角不合格数	X_1 :切割电流	离散	连续	二进制逻辑回归分析
4	Y_2 :切割斜角不合格数	X_2 :切割速度	离散	连续	二进制逻辑回归分析

切割波纹合格情况	切割电流 X_1/A	切割速度 $X_2/mm \cdot min^{-1}$
不合格	80	2 200
合格	80	2 400
不合格	80	2 600
合格	95	2 300
合格	95	2 200
不合格	95	2 900
合格	100	2 600

2.4 改善阶段(I 阶段)

改善阶段的主要目的是将上一阶段得出的显著因子进行改善方案的输出和筛选,并且展开实施,验证其改善效果。由于 Y_1 和 Y_2 的影响因素均为切割电流和切割速度,因此,对切割电流和切割速度更改时需要关注切割波纹和切割斜角的变化。

由于等离子切割机更新换代,按照原工艺设定的切割速度和切割电流加工已不能满足质量要求,且生产效率低。根据现场加工经验及设备使用说明书,采用正交试验法将等离子切割设备的电弧电流分别设定为 80 A、85 A、90 A、95 A、100 A,切割速度分别设定为 2 200 mm/min、2 300 mm/min、2 400 mm/min、2 500 mm/min、2 600 mm/min、2 700 mm/min、2 800 mm/min、2 900 mm/min。经过试验对比,当切

割电流为95 A、切割速度为2 700 mm/min时,切割面外观质量光滑平整,无明显切割波纹及切割斜角,且平板等离子切割加工生产效率高,图8为改善前、后纵梁数控等离子切割不合格率的P控制图。

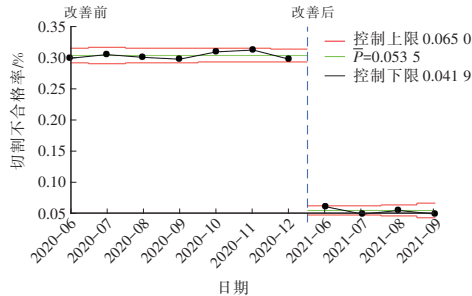


图8 改善前后不合格率的P控制图

2.5 控制阶段(C阶段)

为保持改进的效果,需要将改进阶段对流程的修改纳入作业标准和受控的文件体系,建立过程控制系统。根据流程图确定纵梁等离子切割外观质量关键控制点是加工过程中的切割速度及切割电流。通过分析,可以在作业准备和切割外形过程中对关键控制点进行改善,如表5所示,分别将控制计划、过程流程图以及工艺文件中的切割电流及切割速度标准化。文件要求每班前切割外形环节,校对切割工艺参数以保证纵梁数控等离子切割外观不合格率,如表6所示。通过分析改善后的不合格数的二项过程能力,可见纵梁数控等离子切割过程能

表5 控制对象的标准化

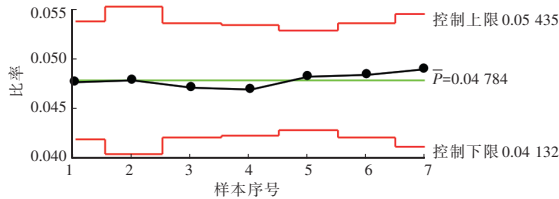
流程	改善点	以前的问题描述	新方法描述	实施日期	新标准编号	文件类型
作业准备	检查切割工艺参数	电弧电流 80 ~ 130 A; 切割速度 800 ~ 1 000 mm/min	电弧电流 80 ~ 100 A; 切割速度 800~1 000 mm/min(双层), 2 200~2 900 mm/min(单层)	2022-08-20	CP-平板数控等离子切割-2022-028	控制计划
切割外形	检查切割工艺参数	电弧电流 80 ~ 130 A; 切割速度 800 ~ 1 000 mm/min	电弧电流 80 ~ 100 A; 切割速度 800 ~ 1 000 mm/min(双层), 2 200 ~ 2 900 mm/min(单层)	2022-08-20	CP-平板数控等离子切割-2022-028	控制计划
作业准备	过程特性	电弧电流 80 ~ 130 A; 切割速度 800 ~ 1 000 mm/min	电弧电流 80 ~ 100 A; 切割速度 800 ~ 1 000 mm/min(双层), 2 200 ~ 2 900 mm/min(单层)	2022-08-20	PFD-平板等离子数控切割机	过程流程图
切割外形	过程特性	电弧电流 80 ~ 130 A; 切割速度 800 ~ 1 000 mm/min	电弧电流 80 ~ 100 A; 切割速度 800 ~ 1 000 mm/min(双层), 2 200 ~ 2 900 mm/min(单层)	2022-08-20	PFD-平板等离子数控切割机	过程流程图
作业准备	检查切割工艺参数	电弧电流 80 ~ 130 A; 切割速度 800 ~ 1 000 mm/min	电弧电流 80 ~ 100 A; 切割速度 800 ~ 1 000 mm/min(双层), 2 200 ~ 2 900 mm/min(单层)	2022-08-20	20CJZH2022BD0024	工艺文件
切割外形	过程特性	电弧电流 80 ~ 130 A; 切割速度 800 ~ 1 000 mm/min	电弧电流 80 ~ 100 A; 切割速度 800 ~ 1 000 mm/min(双层), 2 200 ~ 2 900 mm/min(单层)	2022-08-20	20CJZH2022BD0024	工艺文件

表6 加工参数的控制计划

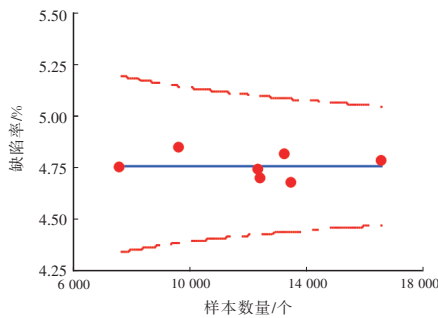
流程	流程步骤	输入	输出	过程规格	量具	样本量	抽样频次	控制方法	反应计划
作业准备	检查切割工艺参数	切割电流 切割速度	1.切割波纹合格 2.切割斜角合格	电弧电流:80 ~ 100 A 切割速度: 800 ~ 1 000 mm/min(双层), 2 200 ~ 2 900 mm/min(单层)	目测	1	1次/班	目测	重新设置
切割外形	检查切割工艺参数	切割电流 切割速度	1.切割波纹合格 2.切割斜角合格	电弧电流:80 ~ 100 A 切割速度: 800~1 000 mm/min(双层), 2 200 ~ 2 900 mm/min(单层)	目测	1	1次/班	目测	重新设置

力指数 Z 由更改之前的 0.517 0 提高至 1.666 2, 过程能力显著提升, 如图 9、表 7 所示。预计改善后 6 个月节约费用约 162 989.6 元, 超过预期目标。

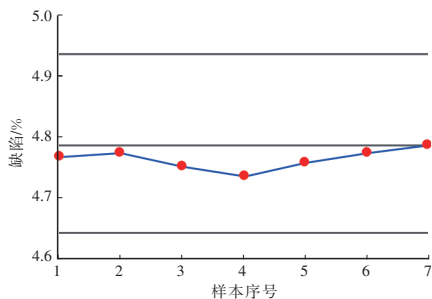
综上所述, 通过使用精益六西格玛 DMAIC 方法分析纵梁数控等离子切割外观不合格率的影响因素, 并确定最后优化方案, 降低了纵梁数控等离子切割外观不合格率, 提升了生产效率。



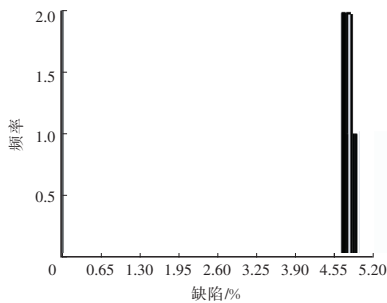
(a) P控制图



(b) 缺陷率



(c) 累积%缺陷



(d) 直方图

图 9 改善后不合格率的过程能力分析

表 7 改善后不合格率过程能力分析汇总统计(95%置信)

项目	数值
缺陷/‰	30.26
置信区间下限/‰	29.97
置信区间上限/‰	30.55
目标/‰	9.00
缺陷/ 10^{-6}	302 590
置信区间下限/ 10^{-6}	299 741
置信区间上限/ 10^{-6}	305 450
过程 Z	0.517 0
置信区间下限	0.508 8
置信区间上限	0.525 1

3 结束语

本文针对车架纵梁平板等离子切割外观不合格率高的问题, 通过完整的六西格玛流程分析, 使用精益六西格玛 DMAIC 方法, 对纵梁数控等离子切割外观不合格率的影响因素进行分析, 建立试验模型, 并通过 MINITAB 软件进行了数据分析和结果预测, 得到了最优的等离子切割加工参数方案, 最终通过生产现场的试生产, 验证了优化方案的准确性。通过对数据统计、分析, 找到了影响该问题的关键因子, 提高了车架纵梁切割外观的一次合格率, 使车架整体的质量得到了提升。

参考文献:

- [1] 曹自洋, 许威, 潘杰, 等. 电火花线切割制备金属超疏水表面的研究进展[J]. 热加工工艺, 2023(11): 59-62.
- [2] 董超, 赵颖. 数控等离子切割与火焰切割综合分析[J]. 制造技术与机床, 2020(12): 25-26+31.
- [3] 桑辉. 基于六西格玛的 W 公司 A 项目质量管理改进[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [4] 蒙耀华, 王彦祥, 吕建会, 等. 高锰耐磨钢板等离子切割面裂纹成因与控制[J]. 宽厚板, 2023, 29(5): 37-41.
- [5] 张睿铭, 马殿光, 赖晓阳, 等. 精细等离子切割的控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2019, 53(8): 67-69+73.
- [6] 董汉伟, 赵洪波, 于丹, 等. 正交试验法优化精细等离子引入引出参数研究[J]. 新技术新工艺, 2015(1): 34-36.
- [7] 闫红英. 等离子切割常见缺陷和控制方法[J]. 科技创新与应用, 2020(20): 105-106.