

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.039

自适应技术在多工位机器人点焊中的应用研究

柯世金, 韩伟, 朱小明, 李业谦

(广州城市理工学院 机械工程学院, 广东 广州 510850)

摘要:针对多工位作业形式的轿车前轮盖板机器人点焊生产中,不同工位的板材装夹条件变化和机器人频繁变换焊点带来的质量控制难题,分析点焊熔核形成的热力学过程及多工位作业容易发生的质量问题,探究如何运用自适应技术生成样本曲线,对电流、电压和电极压力参数组合进行瞬时动态调整。通过控制伺服焊枪的循环冷却水路开闭,实现点焊过程热量增长平衡控制;通过电极压力调整实现软接触,从而减少飞溅、变形和虚焊等缺陷现象,保证前轮盖板点焊的质量稳定。

关键词:机器人;多工位点焊;动态调整;样本曲线;热量增长

中图分类号:TP242.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)06-0214-04

Research on Application of Adaptive Technology in Multi-station Robot Spot Welding

KE Shijin, HAN Wei, ZHU Xiaoming, LI Yeqian

(School of Mechanical Engineering, Guangzhou City University of Technology, Guangzhou 510850, China)

Abstract: Regarding the quality control challenges caused by the change of clamping conditions of sheets in different stations and frequent transformation of welding points of robots in the multi-station robot spot welding production of car front wheel covers, this paper analyzes the thermodynamic process of spot welding nugget formation and the quality problems prone to occur in multi-station operations, and explores how to use adaptive technology to generate sample curves and instantaneously adjust the combination of current, voltage, and electrode pressure parameters. The opening and closing of the circulating cooling water circuit of the servo welding gun are controlled to achieve balanced control of heat growth during the spot welding process, and the electrode pressure is adjusted to have soft contact, so as to reduce defects such as spatter, deformation, and false welding and ensure the stable quality of spot welding of the front wheel cover.

Keywords: robot; multi-station spot welding; dynamic adjustment; sample curve; heat growth

0 引言

为适应汽车制造向轻量化发展的趋势和快速生产的节奏,采用多工位机器人点焊进行汽车钣金件大批量制造已经成为广泛应用的生产模式。图 1 所示为某汽车零部件生产厂的轿车前轮盖板点焊机器人工作站,对 2 层厚度为 0.8 mm 的 DP590 高强度双相钢材料进行焊接。为了提高效率采用了 3 个工位连续作业的形式,机器人在其中一个工位进行点焊作业时,另外两个工位进行人工装夹和辅助准备工作。由于由 3 个不同的工人进行板材装夹定位操作,容易出现夹具预紧力差别。同时机器人在 3 个不同工位连续变换点焊作业,焊枪角度的频繁变化带来电极力变化以及连续长时间作业后的电极温度过高等情况,容易造成飞溅、扭曲和虚焊等缺陷^[1]。

因此需要根据具体的工位变化,及时进行相匹配的焊接工艺参数调整变化。实践中运用 BOSCH-UIR 点焊自适应技术进行动态检测控制,通过样本曲线优化应用、电极预压软接触和参数的动态调整等,使每个焊点都能达到热量增长和电极增压同步控制的目标,减少工位频繁变化造成飞溅、变形和虚焊等缺陷现象^[2],具体详述如下。

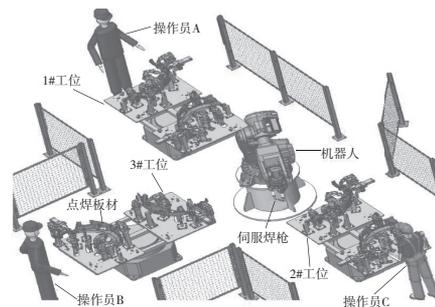


图 1 多工位机器人点焊工作站布局图

基金项目:2023 年度广东省普通高校特色创新项目(自然科学)(2023KTSCX211);2024 年度广东省高等教育教学改革项目(J1225007)

第一作者简介:柯世金(1989—),男,广东惠州人,实验师,本科,研究方向为焊接技术及装备自动化,375735074@qq.com。

1 焊核成形分析及多工位点焊工作站设计

由于多工位点焊的板材匹配情况差异较大,设备点焊过程中力、热、电多因素物理场耦合综合作用将更加复杂,焊核的形成又处于无法直接观测封闭状态^[3]。因此需要动态监测电阻焊的电流、电极压力和通电时间参数并进行瞬时参数调整才能获得稳定可靠的点焊质量^[4]。

1.1 点焊熔核成型过程热力学分析

在高速连续的多工位机器人点焊过程中,伺服焊枪在电极与工件板材接触瞬间,释放电流及施加压力,在焊点的接触面位置及邻近区域产生的电阻热和大量塑性变形能量,上、下板材的结合面处受到电极力锻压生成足够数量的共同晶粒而接合成为焊点熔核,此过程可分为焊枪到位、电极预压、释放电流、电极压力维持和休止等几个阶段^[5],具体的循环过程如图2所示。

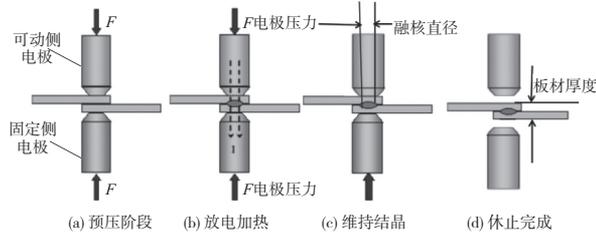


图2 点焊循环熔核形成过程示意图

熔核形成时需要吸收大量的相变潜热,形成足够尺寸的熔核直径才能使上、下板材在电极压力作用形成牢固的连接金属键^[6]。此时如果电极压力波动则容易产生板材扭曲变形和压痕过深等缺陷,板材的变形又同步影响着热传导效果,使上、下板材结合面的扭曲应变增量继续扩大。板材的应变增量 $\Delta\varepsilon$ 与电极压力、板材受力面积和板材与电极接触受力表面的法向矢量有关,并可用下式表示:

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_e + \Delta\varepsilon_p + \Delta\varepsilon_{th} \quad (1)$$

式中: $\Delta\varepsilon_e$ 为板材弹性应变增量; $\Delta\varepsilon_p$ 为板材塑性应变增量; $\Delta\varepsilon_{th}$ 为放电产生的热应变增量。其中板材应力增量 $\Delta\sigma$ 与应变增量 $\Delta\varepsilon$ 之间的关系满足

$$\int_s \frac{\partial \sigma}{\partial n} dS = F_e \quad (2)$$

式中: S 为板材受力面积, m^2 ; F_e 为电极压力, N ; n 为板材与电极接触受力表面的法向矢量。

机器人焊枪在不同工位连续变换作业时,焊点位置不断变化,随着板材曲面形状的变化,作用

在上、下板材上的电极锻压力方向角度不断变化,会带来应变增量的波动和失衡现象,造成熔核发生偏移或变形^[7]。如图3所示,上、下板材间由于应变增量不平衡而出现变形和翘曲趋势。严重时电极将有一部分压入工件,从而在工件表面产生压痕缺陷。

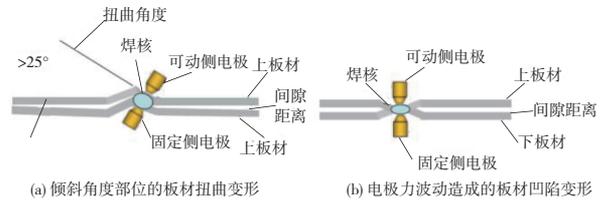


图3 板材形状变化和电极压力波动造成的点焊变形缺陷图

1.2 多工位点焊工作站结构及质量因素分析

图4所示为汽车前轮盖板上、下板材连接点焊工作站结构设计,上、下板材均为0.8 mm厚度高强度双相钢板,采用端面直径为8 mm的锥形铜铬合金电极,标定的焊接规范参数取电流为9 800 A,焊接时间为0.6 s。为提高生产效率采用一台机器人在3个工位间轮番进行点焊作业。

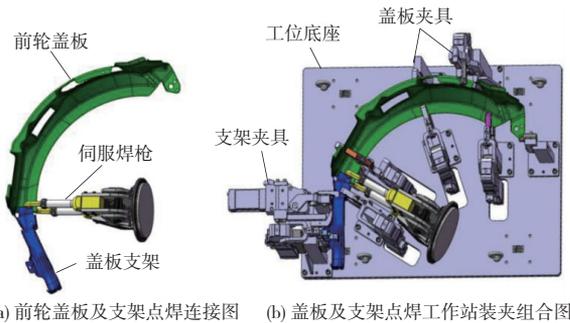


图4 前轮盖板及支架点焊装夹组合图

在机器人点焊连续变换工位作业时,3个工位由3个不同工人进行装夹操作,人为因素和体力状态的差异必然会使板材装夹的力度出现不一样的情况,因此出现上、下板材装夹的间隙差异化。同时,焊枪在3个工位快速变换时,焊枪角度变化,电极与板材接触的位置也在不断变化,电极与钣金工件的实际接触面积不断波动,将使焊点熔核的理论直径与实际成形尺寸偏离,导致个别位置焊点熔核直径大小差异,影响点焊的热量析出,容易造成气孔、飞溅和虚焊等缺陷,质量波动趋势增加^[8]。因此需要根据每个焊点不同位置的板材情况,对工艺参数进行瞬时动态精准检测并快速调整,保证每个焊点质量一致和稳定。

2 自适应技术的参数动态监控及调整

BOSCH-UIR 自适应技术能动态监控不同焊点的电流密度、电极压力、焊点温度、熔核直径和动态电阻变化。根据样本曲线柔性快速调整焊接工艺参数,控制热量增长和电极压力增长曲线,提高焊枪对板材工艺条件变化的柔性适应能力。

2.1 焊点参数动态信息的瞬时监控

BOSCH-UIR 是针对点焊在线质量控制而开发的软件,通过传感器对点焊的电流、热量、电阻和电极压力等参数变化进行实时监控,并与事先设定的标定参数值进行比较,从而判断焊点质量的稳定与合格^[9]。如图 5 所示,自适应系统由中频逆变器、传感器、传感器电缆和 BOSCH-UIR 软件组成。工作时首先通过电流传感器和焊钳上、下电极之间的电压测量传感器,动态采集次级电流信号和次级电压信号,动态监控电流、电压、电阻和热量变化并生成 PSF、UIP 和 FQF 3 种工艺参数变化。再将这些参数与系统内事先储存标准的样本曲线工艺参数值进行比较,从而判定当前焊点使用的电流、电压和电极压力是否偏离预设的参数规范,并予以瞬时动态自适应调整优化^[10]。

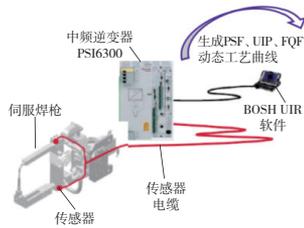


图 5 自适应系统构成

2.2 基于自适应技术的工艺参数调整

在正式点焊生产前,先通过 BOSCH-UIR 软件的恒功率 CCR 模式实验建立标准样本曲线。如表 1 所示,前轮盖板使用 DP590 高强度钢厚度为 0.8 mm 上、下板材组合试样,使用 PSI6300 型的中频逆变器,在恒功率模式下,采用表 1 中的 3 种工艺规范参数,进行前轮盖板点焊的 15~20 个焊点的焊接实验。

表 1 前轮盖板板材点焊规范实验参数

焊接规范	焊接电流/A	焊接时间/s	电极压力/N
1	8 000	0.80	2 300
2	9 000	0.60	2 800
3	10 000	0.46	3 000

对使用上述工艺规范得到的点焊试样用超声波和破坏性方法进行检测,检测是否形成熔核、压痕深度以及熔核大小等情况^[11]。如果焊点质量不理想,则重新修改参数组合,直到得到合格的焊点。记录每个合格焊点的动态电阻变化曲线,再进行工艺曲线修改优化^[12]。如图 6 所示,样本曲线的修改优化遵循恒功率控制原则,删除有飞溅和其它缺陷的曲线,保留正常合格的 3 根曲线,再使用 BOSCH-UIR 软件的 Average curve 功能求出这 3 根曲线的平均值曲线,并存储在控制器中,作为前轮盖板厚度为 0.8 mm 板材点焊时的样本曲线。

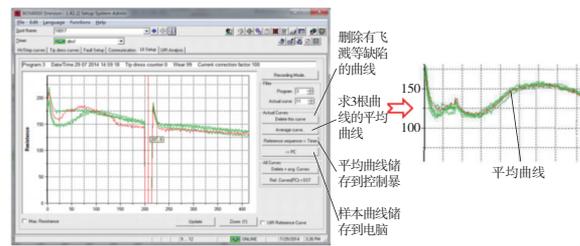


图 6 BOSCH-UIR 自适应标准样本曲线的建立

3 焊枪热量增长控制和电极压力调整

连续高速的点焊作业必然使电极自身的温度持续上升,对点焊的热变形控制产生不利影响^[13]。BOSCH-UIR 软件通过宏程序控制伺服焊枪水冷系统开闭,及时降低电极温度。同时还通过电极上的压力传感器诊断和调整电极压力,减轻电极压力波动对板材造成的压痕和板材应力变形缺陷^[14]。

3.1 焊枪电极热量增长控制

连续高速的点焊必然使电极温度持续上升,使焊枪电极温度常常高于预设的温度,容易发生局部板材熔化飞溅,使热量析出紊乱引起板材热变形^[15]。BOSCH-UIR 系统在点焊预压阶段接收传感器检测瞬时焊枪的温度变化,并提前设定好相应的温度上限值,对电流递增和热量递增进行监控和调整^[16-17],使每个焊点的热量增长过程符合或接近图 7 所示的理想曲线。

自适应系统在点焊循环预压阶段前,触发宏程序控制焊枪的循环冷却水路开闭,控制电极与板材接触面的热量增长^[18],焊枪循环冷却水控制程序如下:

DO[42] = (ON)//系统启动;

! Anforderung Wasserabsaugung Aus//循环水准备;

```

DO[ 80 ] = ( ON ) // 循环水打开;
WAIT ( ! DI[ 545 ] AND ! DI[ 66 ] AND ! DI[ 69 ] ) // 等待
电极正常信号;
WAIT ( DI[ 552 ] OR F[ 14 ] OR DI[ 65 ] ) // 等待电流和电压
检测信号;
WAIT ( DI[ 549 ] AND ! DI[ 550 ] AND ! DI[ 556 ] AND ! DI
[ 557 ] AND DI[ 554 ] OR F[ 14 ] ) // 等待焊接控制器连接和电极
压力正常信号;
DO[ 545 ] = ( ! F[ 14 ] ) // 如果电极温度正常就发出焊接启
动信号;
F[ 440 ] = ( DI[ 179 ] AND DO[ 177 ] ) // 循环水打开和流量
正常;
DO[ 80 ] = PULSE, 0.5 sec // 等待循环水打开时间;
F[ 110 ] = ( OFF ) // 焊接启动关闭;
DO[ 545 ] = ( OFF ) // 循环水启动关闭。

```

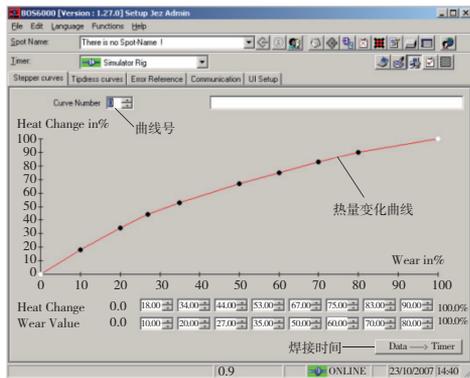


图 7 点焊过程热量增长理想曲线

3.2 电极压力增长柔性控制

自适应系统通过在伺服焊钳上安装压力传感器,采集测量伺服焊钳的实时力矩变化。实时输入到焊接控制器接口,生成每个焊点的动态压力曲线并及时调整焊枪电极压力,如图 8 所示。通过电极压力诊断补偿和动态调整,使电极在接触到工件的瞬间,由高速调整到低速形成电极对工件软接触,减轻电极压力过冲对板材造成的压痕、压力波动和板材应力变形缺陷^[19-20]。

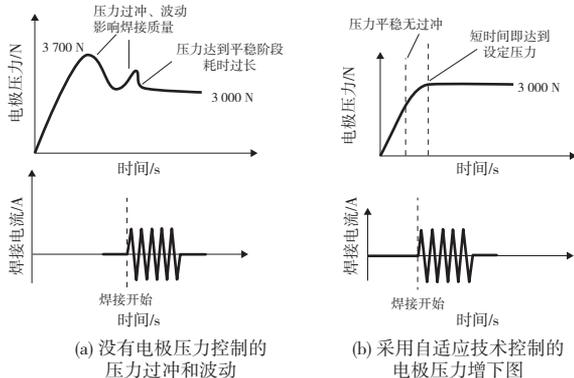


图 8 电极压力柔性增长控制

4 结语

在多工位点焊高速生产过程中,板材形状、位置和电极压力等的不断变化将导致热应力的不均衡,从而造成点焊的扭曲和变形等缺陷。本文应用 BOSCH-UIR 自适应技术进行动态电阻和焊核直径实时监控,并根据样本曲线进行瞬时工艺参数动态调整优化,同时对焊枪热量递增进行监控和冷却控制,以及对电极压力增长进行软接触控制,从而实现机器人点焊过程的精细化质量控制。

参考文献:

- [1] 王瑜,舒乐时,耿韶宁,等. 汽车车身激光焊接技术的现状与发展趋势[J]. 中国激光,2022,49(12):184-201.
- [2] 梁其民,韦艳平,何世润,等. 铁素体和马氏体不锈钢薄板的电阻点焊技术研究现状[J]. 热处理,2024,39(3):1-6.
- [3] 王艳,熊志林,宁朝阳,等. 铝/钢异种金属磁力脉冲焊接多物理场耦合有限元分析[J]. 钢铁钒钛,2024,45(3):188-194.
- [4] 古惠南,郑纯麒,钟剑,等. 电阻点焊数字化在线监控技术在白车身焊接领域的研究及应用[J]. 焊接技术,2019,48(11):36-39.
- [5] 刘倩雯,张南峰,阮洁珊,等. 电阻点焊质量检测技术研究现状[J]. 精密成形工程,2022,14(5):83-93.
- [6] 邱飒蔚,蒋家传,叶拓,等. AA7075-T6 铝合金电阻点焊工艺参数优化研究[J]. 材料导报,2024,38(17):258-265.
- [7] 童洲,韩伟,谈毅,等. 机器人点焊电极磨损的视觉检测补偿应用研究[J]. 制造技术与机床,2022(9):111-116.
- [8] 周晓松,邹莹. 双相不锈钢大熔深 TIG 焊接头疲劳裂纹扩展数值模拟[J]. 机械设计与制造工程,2022,51(10):11-14.
- [9] 徐开源,徐学谦,杨洪刚,等. 基于机器视觉的电阻点焊焊点外观质量检测[J]. 焊接技术,2024,53(12):104-108.
- [10] 卓文波,谭国笔,陈秋任,等. 基于代理模型和 NSGA-II 的超高强钢电阻点焊工艺参数多目标优化[J]. 焊接学报,2024,45(4):20-25,130.
- [11] 赵新玉,陈一淳,张佳莹. 电阻点焊熔核质量的超声原位监测[J]. 无损检测,2024,46(12):1-5.
- [12] 唐威,郑峰. 点焊参数对铝/钢异种金属焊接接头组织与性能的影响[J]. 热加工工艺,2023,52(9):61-65,71.
- [13] 王薇,许永仕,杨志斌,等. 电极带对不锈钢电阻点焊温度场影响的数值模拟[J]. 电焊机,2024,54(12):96-100.

(下转第 238 页)

14.32%,动态特性效率大幅上升了14.02%。和优化前比较,结构的1阶固有频率变化可以忽略不计,都处于较高水平,因此实现了优化目标。

上述试验和分析过程,为桁架机器人滑台的轻量化设计提供了参考。

参考文献:

- [1] 赵雪. 米饭生产线的无线远程监控系统设计与应用[J]. 粮食与饲料工业,2016(4):37-39.
- [2] 张晓龙,艾学崇,李海南,等. 伺服滑台的精度控制[J]. 汽车工艺与材料,2021(12):57-60.
- [3] 崔新霞,赵明,江红祥,等. 堆垛机器人末端执行机构轻量化设计[J]. 机械设计与制造,2024(11):335-340,345.
- [4] 何睿. 基于多学科多目标的车架结构轻量化设计[J]. 噪声与振动控制,2022,42(2):173-178.
- [5] 信桂锁,薄瑞峰,冯超,等. 基于多岛遗传算法和响应面模型的机床床身的轻量化设计[J]. 机械设计与研究,2017,33(5):102-106.
- [6] 龙江启,周平,郑金品,等. 考虑多工况刚度和模态灵敏度的全地形车车架轻量化设计[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版),2022,36(7):109-118.
- [7] 许风华,向正新,施雷,等. 基于偏载作用下的齿轮齿条啮合仿真研究[J]. 石油机械,2019,47(5):50-55.
- [8] 裴彬,米洁,杨庆东. 磨床导轨的动态特性分析及结构优化设计[J]. 机械设计与研究,2020,36(6):110-113,119.
- [9] 陈桂平. 高速磨床动态特性及结构优化设计研究[D]. 长沙:湖南大学,2018.
- [10] FU Z, LIU G. Simulative analysis for static and dynamic behaviour of QT8002 ductile iron crankshaft [J]. Optoelectronics and Advanced Materials - Rapid Communications, 2014, 8(1): 115-120.
- [11] PALANIVELU S, NARASIMHA RAO K V, RAMARATHNAM K K. Determination of rolling tyre modal parameters using Finite Element techniques and Operational Modal Analysis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2015,64:385-402.
- [12] 周诗雨,安鲁陵,赵聪,等. 几何因素对蜂窝夹层构件固化变形的影响研究[J]. 机械制造与自动化,2023,52(4):96-100.
- [13] HAN Y, MI L H, SHEN L, et al. Numerical study on optimal structural parameters of train wind barrier based on orthogonal design [J]. Journal of Central South University,2022,29(8):2706-2718.
- [14] LI Y R, CHEN X, LIU A, et al. Preparation of aerogels from corn stalks and research on their properties and gelation behavior [J]. Industrial Crops and Products, 2023,203:117211.
- [15] 李华雄,王晖,刘璇,等. 响应面法多目标优化 FDM 工艺 ABS-GF 参数与力学性能[J]. 塑料科技,2025,53(4):145-150.
- [16] 陈佳明,朱涛,肖守讷,等. 地铁车辆蜂窝式防爬器的结构设计及优化[J]. 机械科学与技术,2023,42(5):657-664.
- [17] 陶厚永,曹伟. 多项式回归与响应面分析的原理及应用[J]. 统计与决策,2020,36(8):36-40.
- [18] 吴佳敏. 基于响应面分析法的斜齿轮齿廓修形研究及其动力学特性分析[D]. 合肥:合肥工业大学,2022.
- [19] 卢一铭,金成哲,王俊杰,等. 基于 Box-Behnken 设计的增材制造 TC4 铣削参数优化[J]. 组合机床与自动化加工技术,2025(4):157-160.
- [20] 高志彬,陈守佳,刘志红,等. 汽车排气系统吊钩位置优化[J]. 机械设计与制造,2023(12):45-48.
- [21] 王若平,李文武. 基于 MIMO 模态实验法对某 MPV NVH 性能研究[J]. 机械制造与自动化,2017,46(5):122-125.

收稿日期:2023-10-23

(上接第 217 页)

- [14] 付玉鹏,李取浩,臧云飞. 电极直径对连续点焊熔核的影响[J]. 金属加工(热加工),2025(4):79-86.
- [15] 张志春,王晓庆,吴明海,等. 加热模式对 Cu-Al 微电阻点焊过程中电极烧损行为的影响[J]. 材料导报,2025,39(4):122-130.
- [16] 袁荣,方军,张涛,等. 工艺参数对高温合金电阻点焊熔核尺寸及变形的影响研究[J]. 热加工工艺,2023,52(17):131-135,146.
- [17] 沈绍嵘,彭星艺,郭子蒙. 高强钢电阻点焊动态电阻信号标准化研究[J]. 机械设计与研究,2025,41(2):116-121.
- [18] 叶铭海. 电阻焊工艺对掺钾钨棒焊点性能的影响[J]. 福建冶金,2024,53(1):62-66.
- [19] 李娅娜,简志松,刘嘉浩,等. SUS301L 不等厚薄板点焊熔核与残余应力[J]. 焊接,2021(12):7-11,16,63.
- [20] 罗家元,李鑫,谭超. 焊接残余应力对高强钢点焊接头裂纹扩展及疲劳性能的影响[J]. 机械强度,2024,46(2):439-445.

收稿日期:2024-04-09