

一体化压铸铝合金螺柱焊接技术的开发

何绍勇¹ 万里^{1,2} 梁汉广¹ 黄志垣² 卢涛² 钟宇毅² 赖影惠² 林宇飞¹

(1. 广东鸿图科技股份有限公司, 肇庆 526108; 2. 广东鸿图汽车零部件有限公司, 广州 510700)

摘要 介绍了铝螺柱焊的工作原理及工艺要求, 包括拉弧式螺柱焊接的5个阶段以及对焊接位置、外观、强度要求等。阐述了铝螺柱焊接技术开发及工艺参数优化, 涉及设备、材料、保护气选用、接地设计和检测等方面, 并通过试验得出最优焊接区间。分析了常见缺陷及改善途径, 如漏焊、焊偏等缺陷, 并提出相应解决方法。最后介绍了螺柱焊在自动化设备上的两种应用场景及注意事项, 包括“机器人抓焊枪”和“机器人抓工件”的优劣对比。

关键词 一体化压铸; 结构件; 铝螺柱焊接; 工艺参数优化

中图分类号 TG249.2; TG453.3 **文献标志码** A **DOI**: 10.15980/j.tzzz.Z20240026

Technical Development of Stud Welding for Integrated Die-casting Aluminum Alloy

HE Shaoyong¹, WAN Li^{1,2}, LIANG Hanguang¹, HUANG Zhiyuan², LU Tao², ZHONG Yuyi², LAI Yinghui², LIN Yufei¹

(1. Guangdong Hongtu Technology Co., Ltd., Zhaoqing 526108; 2. Guangdong Hongtu Automotive Parts Co., Ltd., Guangzhou 510700)

Abstract: The working principle and process requirements of aluminum stud welding were introduced, including different stages of arc welding as well as requirements for welding position, appearance and strength. The development of aluminum stud welding technology and optimization of process parameters were expounded, including equipment, materials, protective gas selection, grounding design and inspection, and the optimal welding interval was obtained through experiments. Common defects and improvement methods, such as solder skips and welding deviations were also analyzed, and corresponding solutions were proposed. Application scenarios and precautions of stud welding on automation equipment were clarified, including comparison of advantages and disadvantages of "robot grabbing welding gun" and "robot grabbing workpiece".

Key Words: Integrated Die-casting, Structural Parts, Aluminum Stud Welding, Process Parameter Optimization

随着新能源汽车的迅速发展, 轻量化成为关键需求^[1-2]。铝合金以其高性能和低成本等优势成为极具性价比的轻量化材料。目前, 白车身采用铝合金一体化压铸已成为趋势^[3], 这一技术变革不仅推动了汽车制造工艺的进步, 也带来了新的技术挑战。其中, 一体化压铸铝合金螺柱焊接技术成为新的研究课题^[4-9]。本研究深入探讨一体化压铸铝合金螺柱焊接技术的开发, 包括工作原理、工艺要求、技术开发、参数优化、常见缺陷及改善途径, 以及在自动化设备上的应用场景和注意事项, 旨在为该技术的应用提供参考。

1 铝螺柱焊的工作原理及工艺要求

1.1 螺柱焊工作的原理

螺柱焊(Stud welding)是将螺柱一端与板件(或管件)表面接触, 通电引弧, 待接触面熔化后给螺柱一定压力完成焊接的方法。根据工作原理可分为储能式螺柱焊机和拉弧式螺柱焊机, 而铝合金一体化压铸零件与铝螺柱焊之间的连接采用拉弧式螺柱焊接。焊接工作原理主要分为5个阶段: ①接触阶段, 焊接工艺的前提条件是焊接螺柱接触工件表面, 以便焊接回路随着启动命令的发出通过螺柱和工件产生电气

收稿日期: 2024-09-12; 修订日期: 2024-10-31

基金项目: 国家工信部高质量发展资助项目(2340STCZB1927)

第一作者简介: 何绍勇, 男, 1991年出生, 工程师, E-mail: hsy@ght-china.com

通信作者: 万里, 男, 1970年出生, 教授级高工, E-mail: wanli@ght-china.com

引用格式: 何绍勇, 万里, 梁汉广, 等. 一体化压铸铝合金螺柱焊接技术的开发[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(5): 668-673.

HE S Y, WAN L, LIANG H G, et al. Technical development of stud welding for integrated die-casting aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(5): 668-673.

短路;②引弧阶段,起始电源稳定后,焊枪的电磁线圈使螺柱离开工件,引燃起始电流的电弧,用以引燃主电弧;③熔化阶段,螺柱提升至预设回程高度后,主焊接电流接通,形成高强度电弧,电弧热能使铝制螺柱端面及工件表面迅速熔化,生成熔池;④植入阶段

段,电弧在工件上以及螺柱端面生成一个熔池过程中,电磁线圈断电,螺柱通过一个压缩弹簧压入熔池;⑤凝固阶段,随着螺柱浸入熔池,电弧熄灭使得均匀的熔体凝固,并且焊枪可以在焊接电流关断之后离开螺柱。螺柱焊工作原理见图1。

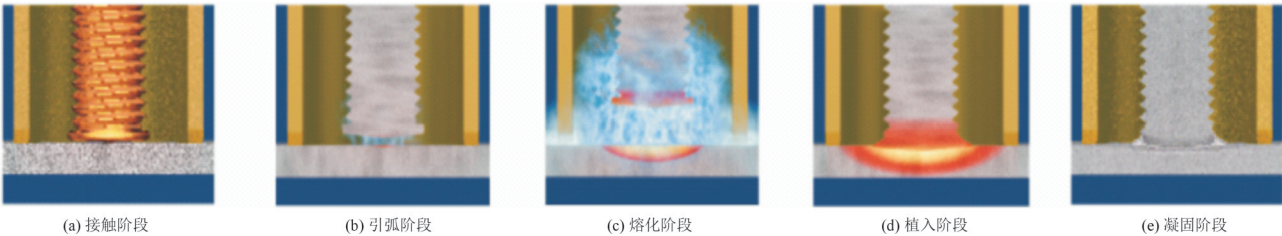


图1 螺柱焊工作原理图

Fig.1 Working principle diagram of stud welding

1.2 螺柱焊的工艺要求

铝合金焊接螺柱(M6×13、M6×16、M6×20)的种

类及数量较多,铝焊钉焊接后需要达到相对零件BC基准孔(零件尺寸加工的参考基准孔)位置 $\phi 3\text{ mm}$ 的位置度要求,以前机舱为例,铝螺柱焊的点位图见图2。

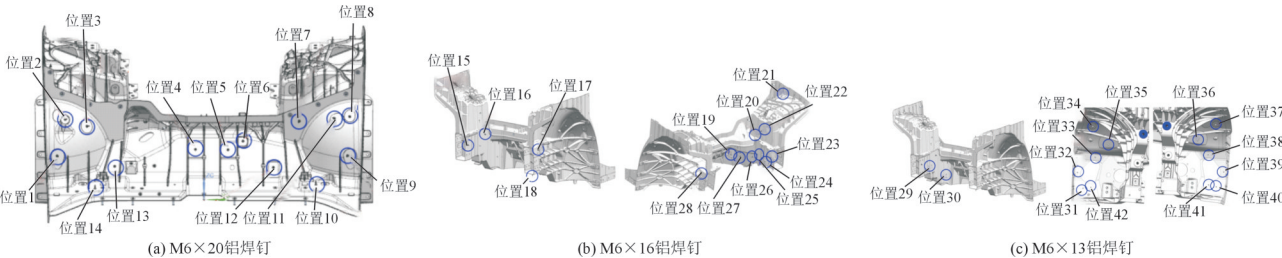


图2 前机舱螺柱焊的点位图

Fig.2 Point map of front cabin stud welding

铝焊钉焊接质量包含外观、强度以及部分焊钉的尺寸要求,评定标准见表1^[10]。

表1 铝螺柱质量的工艺要求

Tab.1 Process requirements for quality of aluminum studs

规格	外观要求	静态 扭矩/ (N·m)	破坏 扭矩/ (N·m)	焊口拉 脱力/N	尺寸要求
M6×13 铝焊钉	不能虚焊、不能 熔池过大、不能 焊穿、螺柱不能 倾斜、螺纹不能	2.5± 0.25	>3.75	>500	熔池小于 9 mm,焊后凸 出高度为 11.7~12.9 mm。
M6×16 铝焊钉	损坏、螺柱完全 插入熔池,螺柱	3.5± 0.5	>3.75	>1 000	无
M6×20 铝焊钉	周围焊接均匀。	3.5± 0.5	>3.75	>1 000	无

2 铝螺柱焊接技术开发及工艺参数优化

2.1 铝螺柱焊接的技术开发

2.1.1 螺柱焊的设备

螺柱焊接采用全自动焊接设备^[11],零件固定在工装治具上,螺柱焊枪安装在机器人上,机器人带着焊枪

变换不同姿态及角度,接触到零件完成各个铝焊钉工艺点位的螺柱焊接工作。使用的螺柱焊设备为永创ALUPRO1800i 铝合金螺柱焊接系统,配置一拖一M6×13自动焊枪以及一拖二M6×13/M6×20自动焊枪。设备原理为直流输出方式焊接,通过电路板在引弧阶段增大引弧电流和引弧时间,在主弧阶段前把工件和螺钉表面氧化层清除,此时熔化母材与螺柱形成熔池,实现铝螺柱与母材连接。图3为设备原理图。

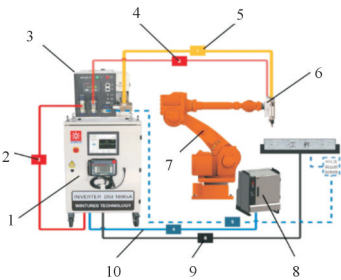


图3 铝螺柱焊接自动化设备原理图

Fig.3 Principle diagram of automation equipment for aluminum stud welding

- 1.焊接电源 2.焊接转接电缆 3.送料器 4.焊接电缆与控制电缆
5.送钉管 6.自动螺柱焊枪 7.焊接机器人 8.机器人控制器 9.地
线 10.通信电缆

2.1.2 铝螺柱焊材料

焊接铝合金螺柱材料牌号为 5019, 相关的规格要求见表 2。结构件材料牌号为 C611 合金, 相关铸件见图 4。

表 2 焊接螺钉的规格要求

Tab.2 Specification requirements for welding screws

铝焊钉规格	断面直径/mm	螺柱长度/mm
M6×13	70.00±0.20	13.0~13.6
M6×16	80.00±0.25	16.0~16.5
M6×20	80.00±0.25	20.0~20.5

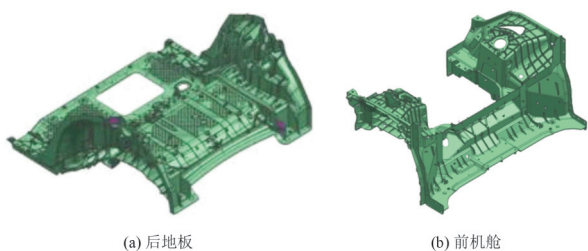


图 4 一体化压铸铝合金件

Fig.4 Integrated die casting aluminum alloy parts

2.1.3 保护气选用

保护气选择高纯度氩气(质量分数>99.99%), Ar 阴极雾化作用强, 有利于铝合金表面氧化膜破碎清理, 采用混合气体(75% 的 Ar+25% 的 He, 体积分数), 保护气流量为 8~12 L/min。焊接面为曲面(弯曲半径≥300 mm)时, 必须使用保护气罩, 防止保护气溢出, 见图 5。同时, 可以装备保护气的流量监控功能, 能有效识别保护气是否处于正常状态。

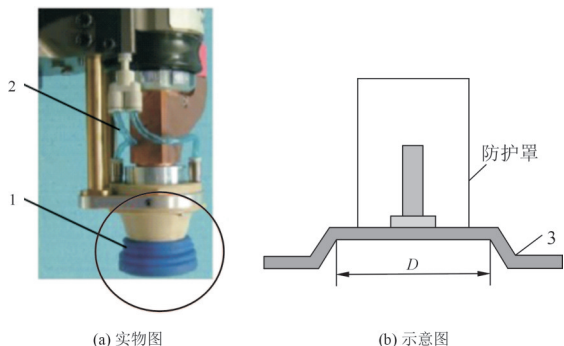


图 5 铝螺柱焊接保护气罩

Fig.5 Protective gas cover for aluminum stud welding

1. 保护气管 2. 保护气罩 3. 工件

2.1.4 接地设计

每台焊机接地数量至少 2 个, 大件需 4 个以上, 且相对螺柱位置对称分布。分线排至各接地极的线缆长度相等。每台焊机必须单独接地, 不能共用接地极。接地极底座与夹具间须做绝缘处理, 保证焊接电流直接通过接地线缆形成回路, 优先选用 $\phi 70 \sim \phi 95$ mm 的

地线, 长度控制在 35 m 以内。图 6 为螺柱焊系统接地示意图。

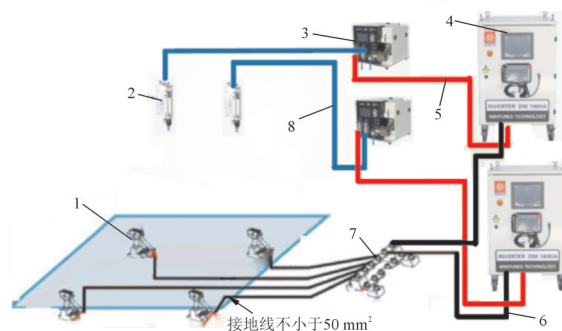


图 6 螺柱焊系统接地示意图

Fig.6 Schematic diagram of grounding for stud welding system

1. 接地极 2. 螺柱焊枪 3. 送料器 4. 焊接电源 5. 焊接转接电缆
6. 地线 7. 接地排 8. 焊接电缆与控制电缆

2.1.5 铝螺柱焊工艺评定

铝螺柱焊接相关工艺评定试验^[12]主要包含静态扭矩、破坏扭矩以及推拉力测试。试验采用弯矩扳手进行弯矩检测, 采用数显游标卡尺进行破坏扭矩检测, 采用推拉力测试仪进行拉脱力检测, 见图 7。主要评价指标有: 静态弯矩, 即螺柱保持不弯曲的最大弯矩; 变形弯矩, 即螺柱发生弯曲但未被破坏的最大扭矩; 破坏弯矩, 即螺柱弯曲至接头断裂的最大扭矩; 焊口拉脱力, 即使用推拉力测试仪拉拔固定好的焊接螺柱焊钉, 记录铝螺柱焊钉承载的最大拉脱力。

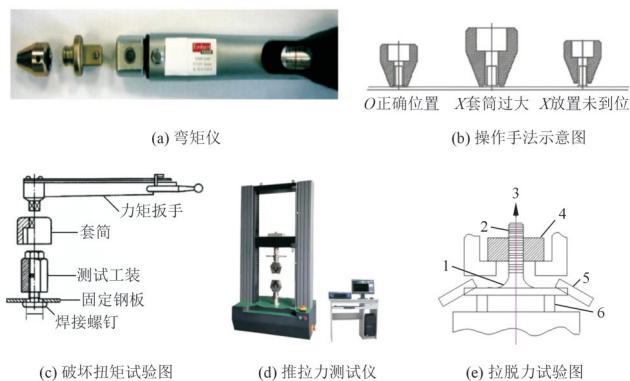


图 7 弯矩、破坏扭矩以及拉脱力检测的工具及示意图

Fig.7 Tools and schematic diagrams for detecting bending moment, failure torque and pull-out force

1. 母材 2. 螺柱焊钉 3. 拉拔 4. 锁紧螺母 5. 压块 6. 支撑座

2.2 工艺参数优化

铝螺柱焊钉熔化量与焊接电流、焊接时间、提升高度均为正相关关系^[13]: 焊接电流越大, 焊接时间越长, 提升高度越高, 植入深度越高, 焊钉熔化量越多。根据曲线斜率判断, 影响因素由大到小依次为: 焊接时间>焊接电流>提升高度≈植入深度, 见图 8。

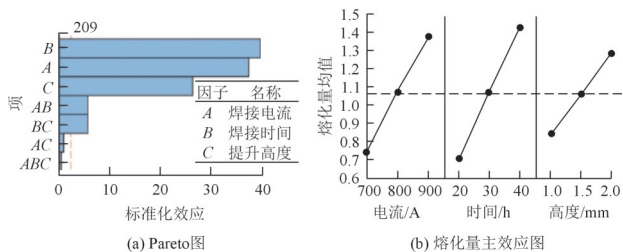


图8 铝螺柱熔化量与焊接电流、焊接时间、提升高度参数关系图

Fig.8 Parameter relationship between melting amount of aluminum stud and welding current, welding time or lifting height

在焊机的参数设置中,通常情况下提升高度及植入深度相对固定。当将提升高度设定为1 mm,植入深度设置为7 mm时,能够通过调整焊接电流和焊接时间来满足铝螺柱焊钉的质量要求。

为了验证不同规格铝螺柱在一体化压铸铝合金零件上的焊接性能,进行了多组试验。试验对象是厚度为2.5~3 mm的一体化压铸铝合金零件,其铸铝材料为

C611。所测试的铝螺柱规格包括 M6×13、M6×16 和 M6×20。

对于 M6×13 螺柱焊钉,其静态弯矩可达 3 N·m,破坏弯矩大于 3.75 N·m,焊口拉脱力大于 500 N,焊后高度为 11.7~12.9 mm,焊池直径小于 9 mm。M6×16 螺柱焊钉的静态弯矩可达 4 N·m,破坏弯矩大于 4.5 N·m,焊口拉脱力大于 1 000 N。M6×20 螺柱焊钉同样具有良好的性能,静态弯矩可达 4 N·m,破坏弯矩大于 4.5 N·m,焊口拉脱力大于 1 000 N,测试情况见图 9。

综上,在特定的焊机参数设置下,即提升高度为 1 mm、植入深度为 7 mm 时,通过调整焊接电流和焊接时间,可以使 M6×13、M6×16、M6×20 规格的铝螺柱在厚度为 2.5~3.0 mm 的一体化压铸铝合金零件(铸铝材料为 C611)上表现出良好的焊接性能。这为该领域的实际应用提供了较好的参考依据,同时也为进一步优化铝螺柱焊接工艺提供了方向。

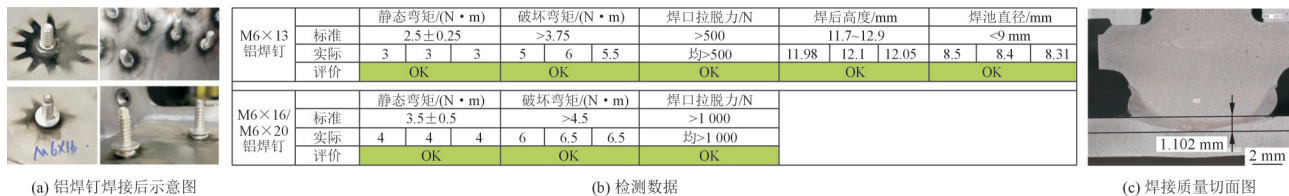


图9 铝焊钉焊接质量测试数据

Fig.9 Welding quality test results for aluminum welding nails

以 M6×13 铝螺柱焊接为例,采用铸铝材料 C611 进行一体化压铸铝合金零件的铝螺柱焊接试验,见图 10。

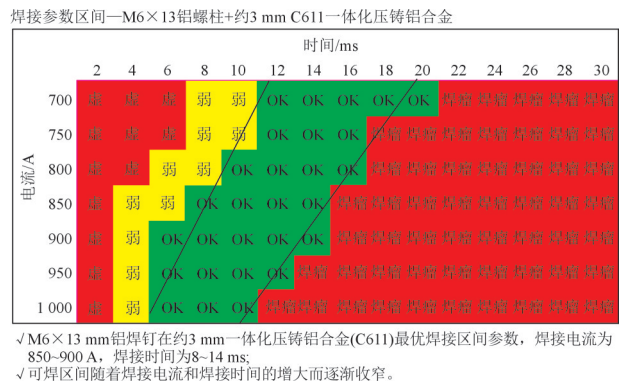


图10 焊接参数区间

Fig.10 Welding parameter interval



图11 铝螺柱焊接常见的缺陷

Fig.11 Common defects in aluminum stud welding

表 3 铝螺柱焊接常见的缺陷解决办法
Tab.3 Solutions for common defects in aluminum stud welding

缺陷	说明	产生原因及解决方法
漏焊	铝螺柱焊在零件上出现部分焊钉漏焊的情况。	使用自动化的放错装置,比如 PLC 的焊钉数量统计,焊接 ok 的完成信号监控等。
焊偏	铝螺柱焊接在铝合金铸件上,位置超出要求的质量范围,导致对手件装配时无法安装。	使用固定夹具或自动化的焊接方法,可以有效降低人工焊接偏移的风险。
错焊	不同规格的铝螺柱焊钉,出现焊接到错误位置上,导致对手件装配时无法安装。	可以采用机械防错对相似焊钉进行筛选避免混料,比如震动盘的料槽筛选等。
螺柱倾斜	螺柱与板材平面不垂直,要求角度 α 不大于 5° 。	铝螺柱与板材平面保证垂直贴合,可以使用自动化焊接的方法降低人工焊接导致不垂直的风险。 1.由于吹弧效应,金属偏向一方。可以通过调整接地线,在工件边缘设置补块,或转动焊枪(如果电缆在工件外)来解决。 2.提升高度太大或没有陶瓷环保护都会加剧吹弧效力。 3.焊接过程焊钉与焊接表面不垂直,超出角度要求的 3° 以内,需要重新调试对准垂直度。 4.保护气流量过大也会加剧吹弧效力。
焊瘤	焊缝过大,存在影响对手件装配的凸起。	排查是否能量过大,适当降低焊接电流或焊接时间。
焊穿	焊接的母材存在穿孔现象。	配件商设备防错,来料进行检验。
螺纹损坏	铝螺柱焊钉螺纹损坏,导致对手件无法安装。	1.支脚组合块上的陶瓷环与螺柱不同心,导致陶瓷环与螺柱产生摩擦。 2.焊接飞溅(能量太大)。 3.由于提升高度太小,导致熔滴短路。 4.焊枪故障或缓冲器设置过大。
虚焊或冷焊	螺柱插入阻滞导致的“冷焊”只有通过机械强度测试才能发现。如果弯曲一个小角度,会在焊缝位置产生断裂,在螺柱周围或焊接区会出现虚焊点(熔化不足)	

4 螺柱焊在自动化应用场景及注意事项

4.1 应用场景

螺柱焊技术应用在一体化压铸零件生产的自动化设备中,主要体现为两种应用场景,分别是“机器人抓焊枪”以及“机器人抓工件”的螺柱焊自动化设备^[15]。

(1)机器人抓焊枪焊接的自动化设备 零件固定在工装夹具上,螺柱焊枪安装在机器人上,机器人带着

焊枪变换不同姿态及角度,接触到零件各个螺柱焊工艺点位上实施焊接。

(2)机器人抓工件焊接的自动化设备 零件由机器人进行抓取,焊枪安装在固定支架上,零件各个工艺点的螺柱焊连接是通过机器人变换零件的不同姿态及角度,移动至支架固定的焊枪处与其接触实施焊接。

4.2 注意事项

综合两种应用场景总结有以下优劣对比,见表 4。

表 4 两种应用场景的注意事项
Tab.4 Precautions for different application scenarios

特点	场景 1: 机器人抓焊枪	场景 2: 机器人抓工件
优点	1. 机器人吨位小,焊接位置精度更好保证; 2. 维护与保养难度降低,后期维护成本低; 3. 方便调试,恢复时间短; 4. 占地面积相对会更小一些。	1. 投入的焊枪数量比较少; 2. 焊接的可达性更高。
缺点	1. 投入的焊枪数量比较多,设备成本会更高; 2. 多个角度焊枪姿态,送钉管容易折损,需要定期维护。 3. 焊接姿态的可达性受限。	1. 机器人型号更大,负载重,保养不到位容易出现误差的累积; 2. 调试难度大,抓手、机器人、焊枪均影响焊接位置度与质量; 3. 需要腾空机器翻转姿态的空间,占地面积会更大些; 4. 换型切换所需成本会高些。
差异	1. 机器人负载相对较小; 2. 焊接的零件工装夹具要做绝缘处理。 3. 产品固定,焊枪活动。	1. 受零件影响,一般选用的机器人负载较大; 2. 夹持产品的抓手需要与工件做绝缘处理。 3. 焊枪固定,产品活动。

5 结 语

主要介绍了一体化压铸铝合金螺柱焊接技术的开发。随着新能源汽车发展,铝合金一体式压铸车身结构件成趋势,铝螺柱焊接技术成为新课题。阐述了铝螺柱焊的工作原理及工艺要求,包括拉弧式螺柱焊接的 5 个阶段和对焊接位置度、外观、强度等方面的要求。

介绍了铝螺柱焊接技术开发及工艺参数优化,涉及设备、材料、保护气选用、接地设计、检测等方面的内容,并通过多组试验得出最优焊接区间。分析了螺柱焊接的常见缺陷及改善途径,最后介绍了螺柱焊在自动化设备上的应用场景。

参 考 文 献

[1] 于永初.《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》引领中国汽车产业发展[J].汽车工艺师,2020(11):8-10.