DOI: 10.3901/JME.2021.20.117

轴向拉力对铝合金拉拔式摩擦塞焊接头 组织及力学性能的影响*

邵震^{1,2} 崔雷^{1,2} 王东坡^{1,2} 杨君³ 高彦军³

(1. 天津大学材料科学与工程学院 天津 300350;

2. 天津大学天津市现代连接技术重点实验室 天津 300350;

3. 首都航天机械有限公司 北京 100076)

摘要: 拉拔式摩擦塞补焊是一种固相连接技术, 具有接头强度高, 焊后残余应力和变形小等优点, 在航天领域具有潜在的应用前景。研究轴向拉力对 2A70 铝合金拉拔式摩擦塞焊接成形及接头性能的影响, 并分析焊接缺陷、微观组织及断口形貌特征。结果表明, 轴向拉力在 20~30 kN 范围内能够得到良好的焊缝成形; 轴向拉力为 20 kN 时, 结合界面存在未焊合缺陷; 轴向拉力提高至 22 kN 及以上, 未焊合缺陷完全消除; 轴向拉力提高至 28~30 kN 时, 塞棒与母材形成完好的冶金结合, 焊接接头的抗拉强度可达到 376 MPa, 接头系数为 83.6%。当轴向拉力较低时(22~25 kN), 结合界面上易出现弱结合缺陷, 微观特征为沿结合界面断续分布的微孔, 可导致接头抗拉强度和断后伸长率下降; 焊接接头中, 塞棒侧热影响区硬度值最低, 分析表明该区域的晶粒形态和尺寸未发生明显变化, 但 θ' 相部分溶解, θ 相发生粗化, 导致局部强度下降; 断口形貌显示, 在优化参数下断口呈现韧性特征。研究结果可为铝合金拉拔式摩擦塞补焊工艺及机理分析提供借鉴和参考价值。

关键词: 铝合金; 拉拔式摩擦塞焊; 轴向拉力; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG156

Influence of Axial Force on the Microstructure and Mechanical Properties of 2A70 Aluminum Alloy Friction Pull Plug Welding

SHAO Zhen^{1,2} CUI Lei^{1,2} WANG Dongpo^{1,2} YANG Jun³ GAO Yanjun³

(1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350;

2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin University, Tianjin 300350;

3. Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing 100076)

Abstract: Friction pull plug welding is a kind of solid phase joining technique, which has obvious advantages, such as high strength of welding joint, small residual stress and distortion. Friction pull plug welding has a potential application for aerospace field. The influence of axial force on the forming and joint properties of 2A70 aluminum alloy friction pull plug welding is studied. The welding defects, microstructure and fracture morphology are analyzed. The results show that good weld forming can be obtained with axial force in the range of 20-30 kN. When the axial force is 20 kN, the lack of bonding can be observed on the bonding interface. When the axial force is increased to 22 kN or above, the lack of bonding is completely eliminated. And the axial force is increased to 28-30 kN, the tensile strength of the welded joint can reach 376 MPa and the joint coefficient is 83.6%. When the axial force is low (20 kN), the bonding interface has weak bonding defects. The microscopic characteristic is micropores along the interface. The weak bonding defects are important reason for the tensile strength and elongation decline. In the welding joint, the hardness of the heat affected zone on the side of the plug is the lowest, and the analysis show that the morphology and size of the grain don't change significantly, while the θ' phase dissolves and the θ phase coarsens, leading to a decrease of local strength. The fracture morphology shows that the fracture has toughness characteristics under the optimized parameters. The research can provide a good reference for the analysis of

* 国家自然科学基金资助项目(51875401, 52075376)。20200907 收到初稿,
20210113 收到修改稿

the welding process and mechanism of aluminum alloy friction pull plug welding.

Key words: 2A70 aluminum alloy; friction pull plug welding; axial force; microstructure; mechanical properties

0 前言

拉拔式摩擦塞补焊(Friction pull plug welding, FPPW)是一种固相焊接和修复技术,如图 1 所示,利用消耗性金属棒(塞棒)在高速旋转和轴向拉力作用下与待焊工件上的预制孔(塞孔)内壁摩擦生热,摩擦界面附近材料在热耦合作用下达到热塑性状态,待材料流动充分后塞棒立即停转并施加拉拔力,使塞棒与工件形成冶金连接^[1]。由于 FPPW 具有焊接峰值温度低、残余应力和变形小、接头强度高优点,且 FPPW 过程不需要刚性支撑和其他装卡机构,工艺实施更加便捷、高效,特别适用于火箭贮箱等大型铝合金构件搅拌摩擦焊钥匙孔补焊和焊接缺陷修复,因此在航天领域获得广泛关注^[2]。

图 1 拉拔式摩擦塞补焊原理图

近年来,国内外 FPPW 技术研究取得了明显进展。美国国家航空航天局(NASA)研制了多套 FPPW 设备,系统地研究了 2195、2219、2014 等高强铝合金焊接工艺,评价了接头性能,大幅度提高了航天铝合金贮箱制造水平,并已于 21 世纪初将该技术用于战神 I 号火箭贮箱和航天飞机外舱的焊接^[3]。国内,航天一院研制了惯性 FPPW 设备,研究了 4~6 mm 厚 2219 铝合金的焊接工艺^[4]。近期,天津大学研制了恒力控制 FPPW 设备,开发了 2219、5A06 铝合金及其典型焊接接头等的焊接工艺,研究了 FPPW 接头的微观组织和力学性能^[5-6]。与美国 NASA 相比,我国 FPPW 技术水平比较落后,不能满足现役火箭贮箱制造及未来重型火箭开发需求。

研究发现,在铝合金 FPPW 过程中,一般采用较高的焊接转速(>5 000 r/min),同时施加合适的轴向拉力,才能保证塞棒与母材界面实现良好的冶金结合^[7]。对于高强铝合金,界面结合

质量对焊接参数更加敏感,由于母材变形抗力的增加使成形更加困难,而且界面上的应力分布不均匀,容易导致界面局部形成弱结合^[8]。研究表明,2195 铝锂合金 FPPW 接头的抗拉强度相当于原始搅拌摩擦焊接头强度的 98%~102%,当结合界面上存在弱结合缺陷时,接头强度下降 20%~30%^[9-12]。适当地提高轴向拉力有助于改善界面结合质量,但轴向拉力的提高增加了界面上应力场的不均匀性,而且过大的轴向拉力可能导致塞棒径缩或拉穿。此外,对于 2219 铝合金,提高轴向加载速率明显缩短了焊接加热时间,一定程度上抑制了热影响区的 θ 相粗化,从而提高 FPPW 接头的抗拉强度^[13]。可见,轴向拉力的变化对铝合金 FPPW 焊缝成形、界面结合及接头强度均有重要影响。

本文以 2A70 铝合金为试验材料,采用不同轴向拉力进行 FPPW 焊接工艺试验,主要研究铝合金 FPPW 轴向拉力对焊接接头的宏观成形、焊接缺陷、结合界面组织特征及力学性能的影响规律,并结合微观组织演变、硬度分布、拉伸断裂行为和断口分析,揭示其内在机制。

1 试验

试验选用母材为 2A70-T6 铝合金,塞棒为 2219-T6 铝合金,二者的化学成分如表 1 所示。试验前,测试了 2A70-T6 板材和 2219-T6 棒材的力学性能,如表 2 所示。两种材料的典型金相组织分别如图 2 所示,其中 2A70-T6 板材的晶粒较为细小,2219-T6 棒材的晶粒粗大,而且晶粒沿轧制或挤压方向均匀明显的拉长特征。

表 1 母材(2A70-T6)及塞棒(2219-T6)的

化学成分(质量分数)

%

材料	Cu	Mn	Fe	Mg	Zn	Al
2A70-T6	2.0~2.6	<0.1	0.9~1.4	1.2~1.8	0.3	余量
2219-T6	5.8~6.8	0.2~0.4	<0.3	<0.02	0.1	余量

表 2 母材(2A70-T6)及塞棒(2219-T6)的力学性能

材料	硬度 HV	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率(%)
2A70-T6	145	280	450	15.8
2219-T6	109	305	378	8.9

图2 母材和棒材的金相组织

将 2A70-T6 板材切制成 270 mm×80 mm 试片, 在试片中心加工出直径为 30 mm 的预制孔, 保证孔内壁平整、光洁; 将 2219-T6 棒材加工成塞棒, 其具体形状和尺寸如图 3 所示。在焊接试验前, 利用砂纸打磨塞棒表面, 去除氧化膜, 并用丙酮清洗塞棒表面, 去除表面油污。将试片装卡在试验工装上, 确保塞孔轴心与主轴同心。然后, 安装塞棒, 塞棒与刀柄通过螺纹进行连接, 并通过塞棒外圆与刀柄内孔之间的配合保证同轴度。

图3 塞棒尺寸示意图

焊接工艺试验在天津大学研制的拉拔式摩擦塞焊设备上进行, 该设备主轴最高转速为 8 000 r/min、最大轴向承载力为 60 kN、轴向行程为 80 mm, 可满足 4~12 mm 厚铝合金拉拔式摩擦塞焊工艺试验要求。试验采用的焊接工艺参数为: 焊接转速 7 000 r/min、轴向进给量 11 mm, 塞棒初始进给速度 2.5 mm/s, 塞棒与工件接触后采用恒拉力控制方式焊接, 轴向拉力分别设置为 20 kN、22 kN、25 kN、28 kN 和 30 kN, 拉锻力与轴向拉力相等, 为便于讨论将上述轴向拉力下所获得的焊接接头分别编号为 1#、2#、3#、4#、5#, 见表 3。

表3 焊接工艺参数

编号	焊接转速/(r/min)	轴向进给量/mm	轴向拉力/kN
1#	7 000	11	20
2#			22
3#			25
4#			28
5#			30

采用线切割切取尺寸为 40 mm×70 mm 的金相试样, 然后进行机械研磨抛光, 采用凯勒试剂(2 mL HF, 3 mL HCl, 5 mL HNO₃, 190 mL H₂O)蚀刻试样表面, 时间为 10 s。腐蚀后利用 OLYMPUS GX51 型光学显微镜进行金相组织观察。利用 JSM-7800F 型扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)观察和分析结合界面特征及第二相分布规律, 所用加速电压为 15 kV。在焊接接头典型区域切取透射试样, 利用砂纸机械研磨后, 对样品进行双喷减薄, 使用 TecnaiG2F30 透射电子显微镜(Transmission electron microscope, TEM)表征晶粒及析出相微观结构, 并对析出相进行能谱测定。使用 HV1000A 型显微硬度计对焊接接头的硬度分布进行测试, 参数为: 9.8 N 载荷, 保载时间 10 s, 测量点间距 0.5 mm。拉伸试验使用的试样为整板拉伸试样(图 4), 即去除接头两边多余的塞棒后, 沿试板长度方向进行拉伸试验。未使用标准试样是因为考虑到塞补焊接头应作为一个整体焊接结构进行拉伸性能测试, 以探究塞棒、塞补焊缝与母材在拉伸过程中的协同变形能力。拉伸试验在 MTS-E45 电液伺服万能试验机上进行, 采用的加载速度为 3 mm/min。最后, 用 JSM-7800F 型扫描电子显微镜对拉伸断口进行观察。

图4 整板拉伸试样尺寸示意图

2 结果与讨论

2.1 宏观成形

图 5 为所有试验参数下焊接接头的宏观截面形貌。在焊接转速为 7 000 r/min、轴向拉力为 20~30 kN 范围内, 均得到良好的焊接成形。如图 5a 所

示,轴向拉力为 20 kN(1#)时,焊接接头上部存在少量未焊合缺陷,轴向拉力升高至 22 kN 及以上时(2#~5#)焊接接头中未发现未焊合缺陷。

图 5 不同轴向拉力下焊接接头宏观截面形貌

如图 5 所示,塞棒周围母材发生了较大的塑性变形,并且有明显的沿塞棒轴向流动迹象,但塞棒几乎未发生变形。在焊接过程中,由于塞棒与母材的剧烈摩擦产生高温,塞棒周围材料在轴向拉力的作用下达达到热塑性状态。热塑性材料不仅随着塞棒旋转而产生环向流动,在轴向挤压作用下也会产生轴向流动。结合界面周围的母材在圆弧形塞棒的轴向挤压作用下,流入母材与垫板之间的空腔。空腔被填满后,刚性的背部垫板将限制材料的向下流动。圆弧形塞棒持续进给对其周围材料的挤压作用进一步增强,使热塑性材料体积增加,同时使一部分热塑性材料向上流动而形成飞边。

2.2 微观组织特征

根据焊接接头金相组织特征的不同,本文将 2A70 铝合金 FPPW 焊接区划分为 6 个区域,如图 6a 所示,分别为:母材区、母材侧热影响区、母材侧热机械影响区、再结晶区、塞棒热影响区和塞棒区,由于塞棒在结合界面附近的晶粒未产生明显的塑性变形和流动,固塞棒侧未定义热机械影响区。

上述区域的金相组织如图 6b~6g 所示,母材区(图 6b)和塞棒区(图 6g)的金相组织均保留了 2A70-T6 板材和 2219-T6 棒材的挤压组织特征。母材侧焊接热影响区(图 6c)的金相组织与母材类似,在靠近结合界面和热机械影响区的区域出现了晶粒长大。如图 6d 所示,母材侧热机械影响区在塞棒挤

压作用下发生了明显的塑性流动,其晶粒沿塞棒圆弧方向被明显拉长。在母材侧热机械影响区与结合界面之间,存在宽度约 100 μm 的等轴晶区域(图 6e),这是由于该区域在焊接过程中受到塞棒旋转剪切和轴向挤压作用最大,发生了充分的动态再结晶,称之为再结晶区。如图 6h 所示,根据 EBSD 分析结果,再结晶区的晶粒均为细小等轴晶,平均晶粒尺寸约 13 μm 。如图 6e 所示,在焊接接头下部的结合界面附近,热机械影响区材料向下流动特征更加明显,而且有明显的晶粒长大,其原因一方面是由于该区域在焊接过程中持续受到摩擦热作用,再者背部垫板被持续加热导致冷却速度较慢,因此该区域的高温停留时间较长,发生了晶粒长大。

图 6 4#接头不同区域的微观组织图

图 7a、7b 分别为 2#和 4#试样结合界面的 SEM 形貌。如图 7a 所示,当轴向拉力为 22 kN 时(2#接头),结合界面上存在断续分布的弱结合缺陷(方框内),长度为 3~4 μm ,而且可见细小的第二相沿结

合界面均匀地分布。如图 7b 所示, 轴向拉力为 28 kN(4#接头)时, 结合界面上未发现弱结合缺陷, 但有细小第二相颗粒及由于金相试样蚀刻所致的腐蚀坑沿结合界面均匀分布。

图 7 焊接接头结合界面的 SEM 照片

上述结果表明, 在较低轴向拉力下虽能获得较好的焊缝成形, 但结合界面上存在断续分布的弱结合缺陷, 说明塞棒与母材之间并未形成完备的冶金结合; 增加轴向拉力后, 结合界面组织更加致密、弱结合缺陷完全消除, 从而显著提高了界面结合质量。此外, 焊接过程中塞棒与母材的持续摩擦和挤压, 使粗大的第二相粒子发生破碎, 形成细小的第二相粒子, 沿结合界面均匀分布。

2.3 析出相特征

图 8 为 4#焊接接头结合界面附近母材侧热机械影响区组织的 TEM 形貌, 以及典型第二相和对应的衍射花样。如图 8a 所示, 晶粒内部可观察到位错在析出相处塞积, 这是由于在焊接过程中热机械影响区的晶粒发生了剧烈的塑性变形, 晶粒内部的位错在运动过程受到析出相的阻碍作用而停止运动, 形成了位错塞积。对图 8a 中不同种类析出物进行能

图 8 4#接头母材侧热机械影响区 TEM 照片

谱分析表明(图 9a), 较小尺寸析出相的主要化学成分为 Mg、Al、Cu, 由晶格间距(图 8c)判断该析出相为 S 相(Al_2CuMg)。S 相是 Al-Cu-Mg 系合金的主要析出相之一, 其聚集倾向性小, 在高温下比较稳定, 但与基体不共格, 没有弹性应力场^[14]。除 S 相外, 母材侧热机械影响区还存在一种尺寸较大的析出相, 其能谱分析表明(图 9b), 该析出相主要化学成分为 Al、Fe、Cu, 由电子衍射花样(图 8d)可知, 该析出相为 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ 。

图 9 4#接头热机械影响区第二相能谱分析

如图 8b 所示, 在母材侧热机械影响区, 三叉晶界处存在粗大第二相, 其内部呈网状特征。分析表明(图 9c), 该粗大第二相化学成分为 Al、Cu、Mg。分析

认为, 粗大网状相为 2A70 铝合金母材在熔炼过程中所形成的低熔点共晶相。在焊接过程中受到摩擦热的作用, 发生了局部熔化, 因此其内部呈网状特征。

图 10a 为塞棒区组织的 TEM 形貌。分析发现, 在塞棒区存在有两种不同特征的析出相, 分别为 θ' 相和 θ 相, 其能谱分析结果, 显示二者化学成分均为 Al_2Cu , 如图 10c、10d 所示。图 10b 为塞棒侧热影响区组织的 TEM 形貌。相比于塞棒区, 塞棒侧热影响区中的 θ' 相基本消失, 同时 θ 相尺寸增加。上述结果表明, 由于塞棒侧热影响区在焊接过程中受到焊接热的影响较大, 亚稳态的 θ' 相发生了回溶或 $\theta' \rightarrow \theta$ 转变, 即: 一部分 θ' 相溶解于 Al 基体, 另一部分 θ' 相则向更加稳定的 θ 相转化。与此同时, 在塞棒侧热影响区中, 原始较粗大的 θ 相也将发生

一定程度的粗化^[13]。需要指出, 细小的 θ' 相析出是时效态 2219 铝合金的主要强化方式之一, 塞棒侧热影响区 θ' 相的回溶或向粗大的 θ 相转变将导致该区域的强度下降。

2.4 硬度分布

图 11 为 4#接头截面上硬度分布。由图 11 可知, 2A70 铝合金 FPPW 接头的不同区域在焊后产生不同程度的软化。在结合界面附近(2A70 母材侧)再结晶区的硬度值范围为 130~135 HV, 说明该区域软化程度较低, 晶粒细化对保持再结晶区的硬度发挥了重要作用。在母材侧热机械影响区, 最低硬度值 120 HV, 较母材降低了 20%~25%。2A70-T6 铝合金的主要强化相为细小的 S' 相, S' 相为亚稳态相, 与基体部分共格。 S' 相的附近存在一个晶格畸变区, 对位错运动的阻碍增大^[15]。结合如图 7 所示的 TEM 分析结果可知, 2A70 母材侧热机械影响区中的析出相发生了明显长大, 而且细小的析出相数量较少。说明在焊接过程中发生了 $S' \rightarrow S$ 相的转变, 原来 S' 相附近的晶格畸变区消失, 对位错运动的阻碍效果减弱, 即该区域发生过时效, 导致硬度降低。

图 10 4#接头塞棒侧区及塞棒侧热影响区 TEM 照片以及能谱分析 TEM 照片及能谱分析

图 11 4#接头横截面硬度分布

1. 母材区 2. 母材侧热影响区 3. 母材侧热机械影响区
4. 再结晶区 5. 塞棒侧热影响区 6. 塞棒区

毗邻结合界面的塞棒侧热影响区的硬度范围为 79~84 HV, 为焊接接头中的最低硬度值。这是由于焊接热循环导致塞棒侧热影响区中的 θ' 相部分溶解, θ 相发生粗化, 析出强化效应大幅下降; 同时塞棒原始晶粒较为粗大, 而且该区域在焊接过程中未发生再结晶而是晶粒细化, 因此硬度下降较明显。塞棒区硬度值在 89~103 HV, 与其在焊接前的硬度值接近。

2.5 拉伸性能

图 12 为 1#~5#焊接接头的拉伸性能测试结果。由图 12 可知, 轴向拉力为 20~28 kN 范围内, 焊接

接头的抗拉强度随轴向拉力的上升而提高, 当轴向拉力达到 28 kN 时, 焊接接头的抗拉强度为 376 MPa, 断后伸长率为 6.2%。进一步提高轴向拉力至 30 kN, 焊接接头的拉伸性能略微下降, 抗拉强度为 367 MPa, 断后伸长率为 6.5%。这表明, 对于 2A70 铝合金 FPPW, 采用 2219-T6 塞棒时, 轴向拉力的提高有助于提高接头强度和塑性, 当轴向拉力为 28 kN 时, 接头系数可达到母材的 83.6%, 而进一步提高轴向拉力, 接头的拉伸性能不再明显提高。

图 12 不同轴向拉力下接头的拉伸性能

图 13 为 1#~5#试样拉断后的表面形貌。由图 13 可知, 1#接头断口较光滑, 试样断裂区域及其附近未发现塑性变形特征, 其抗拉强度仅为 282 MPa, 断后伸长率约 2%。结合图 5 的分析结果可知, 在 1#接头中存在明显的未焊合缺陷, 导致接头强度和伸长率较低, 裂纹在缺陷处形成并沿结合界面拓展,

图 13 1#~5#试样拉断后表面照片

断口较为整齐。相比于 1#接头, 2#、3#接头抗拉强度明显提高, 而且在拉断后试样表面可观察到塞棒发生了塑性变形, 但是断裂路径仍为塞棒与母材的结合界面。对于 4#、5#接头, 从断裂试样表面可见塞棒及其周围区域发生了明显的塑性变形, 断裂位置为毗邻结合界面的塞棒侧热影响区, 体现了优良的拉伸性能。

利用 SEM 对 1#、4#接头断口的微观形貌进行观察, 其结果分别如图 14a、14b 所示。由图 14 可知, 1#试样断口表面存在较为平整, 在局部区域有少量韧窝和撕裂棱, 1#接头中塞棒与母材未完全实现冶金结合。对于 4#接头, 断口表面存在大量细小韧窝, 在韧窝底部可见第二相颗粒, 说明试样在拉伸过程中塞棒及塞棒热影响区的塑性变形导致铝基体与硬脆相粒子分离, 从而形成微小孔洞, 微洞逐渐聚集形成裂纹, 断口呈明显的韧性特征。

图 14 拉伸断口 SEM 照片

综上所述, 当轴向拉力为 20 kN 时, 由于塞棒与母材未能实现完整的冶金结合, 在 FPPW 接头上部存在明显的未焊合区域, 导致接头性能降低。轴向拉力为 22~25 kN 时, 虽然界面结合质量和接头性能有明显提升, 但由于结合界面局部存在弱结合, 焊接接头的抗拉强度达到 339 MPa, 接头系数为 75.1%。对 2#接头结合界面特征的 SEM 分析结果显示, 如图 7a 所示, 弱结合缺陷主要由沿结合界面断续分布的微小孔洞构成, 其主要成因是由于焊接过程中塞棒与母材摩擦界面上的应力分布不均匀, 使结合界面局部应力达不到冶金结合的条件。在较高的轴向拉力下 (28 kN), 结合界面上未发现弱结合缺陷, 表明塞棒与母材实现了较完备的冶金结合, 此时焊接接头的强度和塑性均较好。由于 2219 塞棒原始强度较低, 而且塞棒热影响区在焊接过程中发生了软化, 因此在实现良好冶金结合的前提下, 本研究中所获得焊接接头的最高强度为 376 MPa (4#接头), 为原始母材强度的 83.6%。

3 结论

(1) 当轴向拉力为 20 kN 时, 接头中含有未焊合缺陷; 轴向拉力在 22~25 kN 时, 未焊合缺陷消失, 但结合界面上存在弱结合缺陷; 轴向拉力提高至 28~30 kN, 弱结合缺陷消失。

(2) 随轴向拉力升高, 接头的抗拉强度呈现上升趋势; 含未焊合缺陷的 FPPW 接头抗拉强度为 282 MPa, 接头系数为 62.7%; 含弱结合缺陷的 FPPW 接头抗拉强度为 318~339 MPa, 接头系数为 70.6%~75.3%; 无缺陷 FPPW 接头的最高抗拉强度为 376 MPa, 接头系数为 83.6%。

(3) 毗邻结合界面母材侧存在再结晶区, 由于细晶强化, 该区域硬度值较高; 在塞棒侧热影响区发生了过时效, 形成了粗大的 θ 相, 导致硬度下降明显, 拉伸过程中接头在该处断裂。

参 考 文 献

- [1] 王国庆, 张丽娜, 朱瑞灿, 等. 摩擦塞补焊技术研究现状及展望[J]. 电焊机, 2017, 47(1): 17-25.
WANG Guoqing, ZHANG Lina, ZHU Ruican, et al. Present state and perspective on friction plug welding[J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(1): 17-25.
- [2] 历吴恺. 拉拔式摩擦塞焊设备控制系统设计及焊接工艺试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
LI Wukai. Design on the control system of friction plug pull welding equipment and study on the welding experiment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [3] 李东, 王珏, 何巍, 等. 长征五号运载火箭总体方案及关键技术[J]. 导弹与航天运载技术, 2017, 269(3): 2, 5-9.
LI Dong, WANG Jue, HE Wei, et al. The general scheme and key technologies of CZ-5 launch vehicle[J]. Missiles and Space Vehicles, 2017, 269(3): 2, 5-9.
- [4] 刘欣, 王国庆, 李曙光, 等. 重型运载火箭关键制造技术发展展望[J]. 航天制造技术, 2013(1): 1-6.
LIU Xin, WANG Guoqing, LI Shuguang, et al. Forecasts on crucial manufacturing technology development of heavy lift launch vehicle[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2013(1): 1-6.
- [5] CUI Lei, LU Peng, LI Wukai, et al. Influence of axial force parameters to the quality of friction pull plug welding for 2219-T87 aluminium alloy sheets[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2018, 24(26): 1-9.
- [6] GAO Jinyong, YANG Lijun, CUI Lei, et al. Improving the weld formation and mechanical properties of the AA-5A06 friction pull plug welds by axial force control[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 33(9): 828-838.
- [7] 刘现伟, 钱炜. 拉拔式塞补焊焊接工艺参数优化的研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2017, 55(5): 74-77.
LIU Xianwei, QIAN Wei. Research parameters on optimization of friction plug welding[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2017, 55(5): 74-77.
- [8] 卢鹏, 崔雷, 王惠苗, 等. 2219 铝合金拉拔式摩擦塞补焊工艺研究[J]. 航空制造技术, 2019, 62(12): 55-64.
LU Peng, CUI Lei, WANG Huimiao, et al. Friction pull plug welding process of 2219 aluminum alloy[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2019, 62(12): 55-64.
- [9] RACHEL C. New plug designs for improved mechanical properties in Al2195 friction pull plug welds[J]. Undergraduate Research Journal, 2011, 7(1): 4-12.
- [10] HORTON K R. Microhardness, strength and strain field characterization of self-reacting friction stir and plug welds of dissimilar aluminum alloys[J]. Dissertation Abstracts International, 2011, 73(2): 1067.
- [11] PRESTON M G, JONATHAN B. Damage tolerance assessment of friction pull plug welds[C]//9th International Symposium on Friction Stir Welding. The US Gov. Public, 2012: M12-1640.
- [12] PRESTON M G, JONATHAN B. Damage tolerance behavior of friction stir welds in aluminum alloys[C]//National Space and Missile Materials Symposium. The US Gov. Public, 2012: M11-1017, M11-1324.
- [13] DU Bo, CUI Lei, YANG Xinqi, et al. Weakening mechanism and tensile fracture behavior of AA 2219-T87 friction plug welds[J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 693: 129-135.
- [14] 马春雨, 李智, 刘常升. 人工时效对 2A70 耐热铝合金组织与性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2004(1): 40-43.
MA Chunyu, LI Zhi, LIU Changsheng. Effect of artificial

aging on the microstructure and properties of 2A70 Al alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2004(1): 40-43.

- [15] 马春雨. 热处理对 2A70 耐热铝合金组织性能的影响[D]. 沈阳: 东北大学, 2002.

MA Chunyu. Effect of heat treatment on microstructure

and properties of 2A70 heat-resistant aluminum alloy[D]. Shenyang: Northeastern University, 2002.

作者简介: 邵震, 男, 1995 年出生。主要研究方向为铝合金摩擦塞补焊。
E-mail: shaoz@tju.edu.cn

崔雷(通信作者), 男, 1985 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为搅拌摩擦焊及摩擦塞焊。

E-mail: leicui@tju.edu.cn