

2219铝合金拉锻式摩擦塞补焊 工艺研究*

卢 鹏¹, 崔 雷¹, 王惠苗^{1,2}, 陈永亮¹, 王东坡¹, 孙转平^{1,3}, 宋健岭³, 张忠平³

(1. 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350;

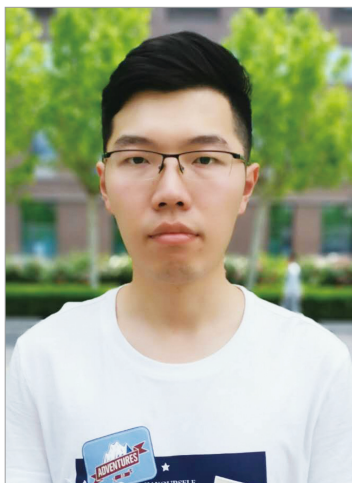
2. 首都航天机械公司, 北京 100044;

3. 天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300462)

[摘要] 针对6~8mm厚2219-T87铝合金拉锻式摩擦塞焊工艺进行了研究。结果表明,塞棒/塞孔及砧板成形孔结构及轴向载荷、焊接转速、进给速度等焊接工艺参数均对焊接质量有重要影响。采用圆弧形塞棒、圆柱形塞孔、阶梯锥形底孔的砧板能够改善塞孔附近材料的流动方向和受力条件,进而消除未焊合缺陷。焊接转速7000r/min、焊接压力20~30kN、轴向拉锻力20~30kN、进给速度1.5mm/s是较优的焊接工艺范围。焊接接头中母材侧的热力影响区软化最为明显,硬度值为79.9HV。在优化参数下,焊接接头的抗拉强度可达365MPa,延伸率6%。

关键词: 铝合金;拉锻式摩擦塞补焊;焊接工艺;焊接成形;微观组织;力学性能

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.12.055



卢 鹏

硕士研究生,研究方向为航天铝合金的搅拌摩擦焊和摩擦塞焊。

提升进入空间能力是我国航天事业发展的重要目标,这对火箭运载能力提出了更高要求^[1-2]。推进剂贮箱是运载火箭主要承载部件,采用高强铝合金制造,其尺寸巨大、壁厚薄、刚性弱,焊接质量难以控制,焊接和装配过程中难以避免会产生各种焊接缺陷^[3]。采用传统TIG焊进行修补会导致焊接区域软化,残余应力和变形增加,进一步降低结构完整性^[4]。拉锻式摩擦塞补焊(Friction Pull Plug Welding, FPPW)是利用消耗性金属棒(塞棒)在高速旋转和轴向载荷作用下与待补焊工件的预制孔(塞孔)实现连接,焊接过程不需要刚性支撑、补焊失强小,且具有焊接残余应力和变形小等优点,被认为是贮箱结构补焊的最优方案。近年来,搅拌摩擦焊技术已广泛应用于贮箱焊接,而且大

/重型火箭贮箱拟采用“全位置搅拌摩擦焊接”工艺,为妥善解决搅拌摩擦焊缺陷和匙孔补焊问题,亟需突破FPPW技术和解决相关工艺问题^[5-7]。

20世纪90年代至今,美国NASA对火箭贮箱FPPW技术进行了研究,并成功用于重型运载火箭贮箱及航天飞机外部贮箱补焊,大幅降低了制造成本、提高了承载能力^[8-9],如图1^[10]和图2^[11]所示。近年来,我国在火箭贮箱搅拌摩擦焊技术领域取得了重要进展,但FPPW发展较为缓慢,加之美国对我国实施了技术封锁,目前国内FPPW工艺稳定性和接头性能仍未完全达到火箭使用要求,已经成为制约我国大/重型火箭研制的重要障碍^[5]。

FPPW过程中,塞棒与塞孔发生摩擦使界面温度迅速上升,造成局部

* 基金项目: 国家自然科学基金(51875401)。

失稳、塑性流动不易控制,容易形成未焊合缺陷^[12]。焊接成形与焊接转速、轴向载荷/位移/速度等工艺参数密切相关,同时受塞棒、塞孔几何形状和尺寸的限制,在多因素耦合影响下很难建立合适的焊接工艺窗口^[12-15]。

对于热处理、冷变形强化铝合金, FPPW 可导致焊接热影响区软化,但 FPPW 接头的强度仍可达到原始搅拌摩擦接头的强度水平^[16-17]。NASA 称,对于 2195 铝合金,在含有缺陷的 FPPW 部位,局部安全裕度系数为 1.4 时可满足贮箱室温和超低温环境下的强度要求^[18]。由于 FPPW 接头中仍可能存在微观缺陷,导致疲劳试验结果具有较大分散性^[19]。此外, FPPW 接头的拉伸试验结果与试样尺寸密切关系,当平行段宽度增加至 8 英寸(20.3cm)以上时,极限抗拉强度结果的分散性显著增加,且整体呈下降趋势^[20]。

近年来,国内航天企业、科研院

所和各大高校针对 FPPW 技术展开了相关研究。赵衍华等^[21]研究了 4mm 厚 2014 铝合金搅拌摩擦焊接头的 FPPW 工艺,发现塞棒与母材连接界面处存在大量细小等轴再结晶组织,在合适的焊接工艺参数下塞焊接头的抗拉强度可达到 330MPa;文献[7]介绍了一种基于惯性摩擦焊原理的 FPPW 技术,并且在 4-6mm 厚 2014 铝合金上取得了较好的试验效果。崔雷等^[22]研究了轴向载荷对 2219 铝合金 FPPW 成形及性能的影响,优化参数下 X 射线探伤中无缺陷,接头强度为 332MPa。然而,目前国内外的对铝合金 FPPW 工艺研究的公开文献数量较少。

本文采用 6~8mm 厚 2219-T87 铝合金为试验材料,研究 FPPW 过程中塞棒/塞孔及砧板成形孔结构及主要焊接工艺参数(轴向载荷、焊接转速、进给速度)对焊接成形的影响,对接头的微观组织、力学性能

进行分析,以此为我国运载火箭铝合金贮箱摩擦塞补焊的应用提供理论依据和技术支撑。

试验及方法

本文焊接试验所用母材和塞棒材料分别为 2219-T87 铝合金板材和 2219-T6 铝合金棒材。2219-T87 铝合金板材的屈服强度、抗拉强度和延伸率分别为 352MPa、455MPa、10%。2219-T6 棒材抗拉强度为 368MPa,延伸率为 8.9%。焊接工艺试验在天津大学研制的 FPPW 设备上,如图 3 所示。试验过程中设计了不同的塞棒、塞孔、砧板结构,并采用了不同焊接转速、轴向载荷、轴向加载速度等,为得到优化的焊接工艺窗口提供基本依据。

焊接试验完成后,切去剩余塞棒,采用线切割获得金相试样,金相试样经砂纸打磨、抛光后用凯勒试剂腐蚀约 10s,在 OLYMPUS GX51 型光学显微镜下进行金相组织观察。使用 432SVD 型维氏显微硬度测试仪测量焊接接头截面的硬度分布,施加载荷为 1000g,加载时间为 10s,测点间距为 0.15mm。将表面成形较好的焊接接头切去顶部飞边和底部挤出金属,打磨平整,进行 X 射线探伤,探伤设备型号为 XXQ-2005,执行标准为 NB/T47013.2—2015,曝光时间为 0.4min,管电压为 100kV,管电流为 5mA。探伤后,对其进行拉伸性能测试,拉伸试样尺寸如图 4 所示。拉伸试验在 MTS-E45 电液伺服万能试验机上进行,参考标准为 GB T 228—2010,试验机的最大力为 100kN,加载速度为 3mm/min。拉伸试验后,对断口试样进行 SEM 断口形貌观察和分析。

结果与讨论

1 焊接工艺过程分析

如图 5 所示,一个完整的 FPPW 工艺过程经历了预热、轴向力增加、

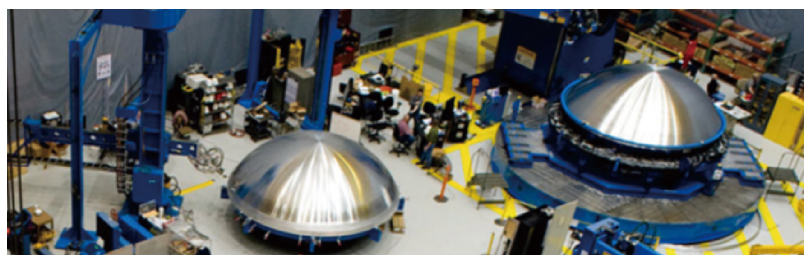


图1 NASA的拉辘式摩擦塞补焊设备

Fig.1 Friction pull plug welding equipment in NASA

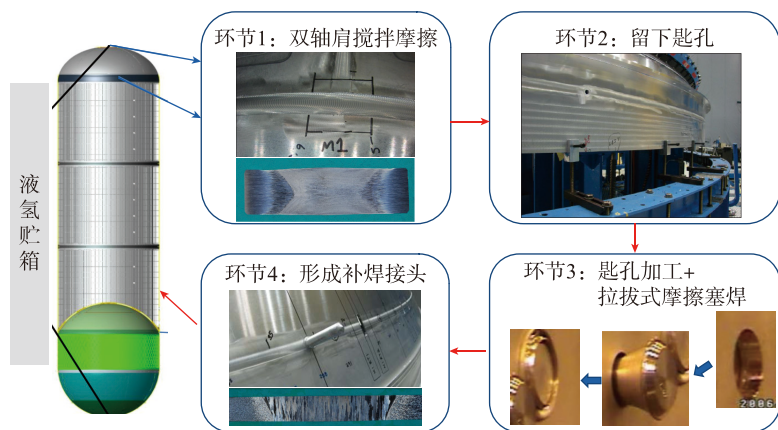


图2 火箭贮箱全位置搅拌摩擦焊技术路线

Fig.2 Technical route of all position friction stir welding for rocket storage tank

恒定轴向力焊接、拉锻 4 个主要阶段。预热阶段的主要作用是避免塞棒与工件接触初期扭矩过大而造成堵转。经短时间预热后,轴向力开始持续上升,直至达到设定的轴向力后,进入恒定轴向力焊接阶段。恒定轴向力焊接过程中,塞棒保持转速和持续的轴向进给,塞棒完全填充塞孔,且界面附近材料流动充分后转速迅速降低至零,之后立即施加拉锻力,完成焊接过程。

为更深入理解 FPPW 过程中的摩擦产热与材料的塑性流动行为,采用 Deform-3D 软件对 2219 铝合金 FPPW 过程进行了有限元模拟。图 6 为 2219 铝合金 FPPW 过程的有限元模拟结果。如图 6 (a) 和 (b) 所示,在预热和轴向力上升阶段,摩擦界面温度仍较低,摩擦界面附近材料并未发生明显的塑性变形和流动,但在轴向力增加至一定范围时,焊接温度场分布趋于均匀。到达恒定轴向力焊接阶段后,摩擦界面温度明显升高,塞孔附近母材流动范围明显增加,可完全充满底部砧板成形孔,以形成连续的焊接接头,如图 6 (c) 所示。后续拉锻过程有助于塞棒与母材界面间发生扩散和实现冶金连接。

2 几何参数对焊接成形的影响

2.1 塞棒结构的影响

为探讨塞棒几何形状对 FPPW 焊接成形质量的影响,选用 6mm 厚的 2219-T87 铝合金板材,设计了圆



图3 拉锻式摩擦塞补焊设备

Fig.3 Friction pull plug welding equipment

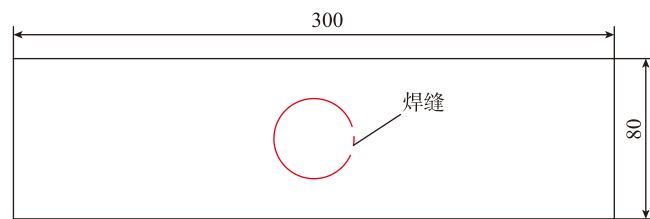


图4 拉伸试样尺寸

Fig.4 Dimensions of tensile specimen

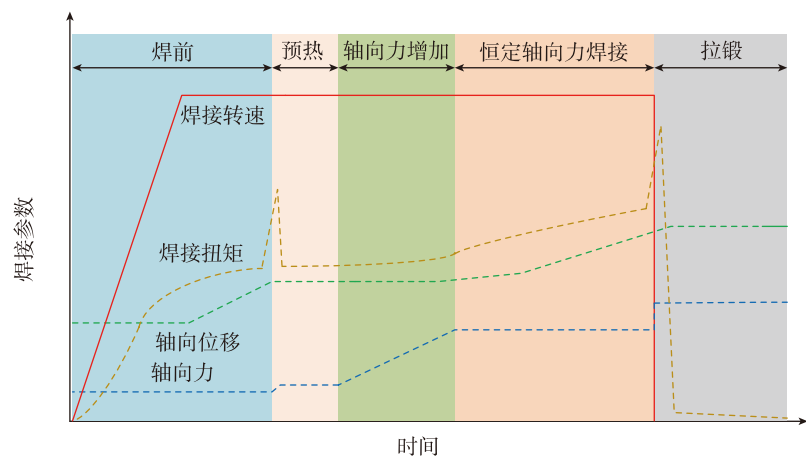


图5 FPPW过程参数变化示意图

Fig.5 Schematic diagram of FPPW process parameter change

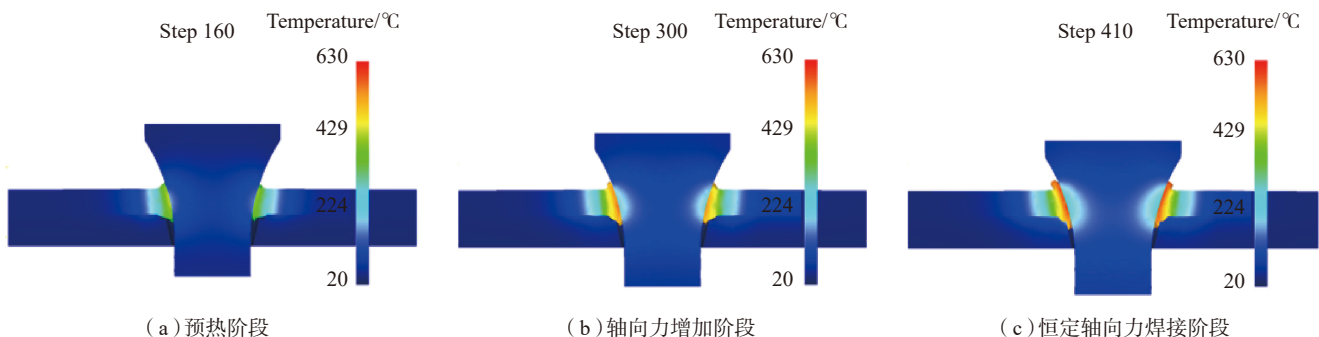


图6 2219铝合金FPPW过程有限元模拟结果

Fig.6 Finite element simulation results of 2219 aluminum alloy FPPW process

锥形和圆弧形两种塞棒结构,塞孔结构采用锥角为 55° 的锥孔,具体结构如图 7 所示。试验选用的焊接工艺参数为:焊接转速 $7000\text{r}/\text{min}$,轴向拉力 $15\sim 20\text{kN}$,拉锻力 20kN ,拉锻保持时间 5.0s ,轴向进给量 6mm 。

图 8 为焊接转速 $7000\text{r}/\text{min}$ 、轴向拉力 15kN 焊接参数下,圆锥形塞棒焊接接头的宏观截面形貌及未焊接缺陷。如图 8 (b)和(d)所示,靠近焊接接头的上表面位置存在较大缝隙,说明该位置塞棒与母材未能实现有效结合,而靠近底部砧板部位的连接情况良好,如图 8 (c)所示。

图 9 为焊接转速 $7000\text{r}/\text{min}$ 、轴向拉力 20kN 时,分别采用圆锥形塞棒和圆弧形塞棒在相同焊接工艺下焊接接头的宏观截面形貌。观察发现,采用圆锥形塞棒时焊接接头内部沿结合界面存在明显的未焊接缺陷,而靠近焊接接头上表面缝隙较大。采用圆弧形塞棒可获得结合良好的焊接接头,金相观察中未发现明显的焊接缺陷。

采用 Deform-3D 有限元模拟软件对不同塞棒结构下焊接成形过程进行仿真。设置工件的对象形式为塑性体,塞棒、垫板为刚体,摩擦形式为剪切摩擦,网格数量为 70000 个。有限元模拟结果如图 10 所示。模拟结果显示,采用圆锥形塞棒时塞棒与母材摩擦界面处的峰值温度在 600°C 以上,且有大量母材金属向下流入砧板成形孔内,向母材上表面方向流动的金属较少(图 10 (a))。采用圆弧形塞棒时,产热主要集中在塞孔与塞棒的摩擦界面,温度场分布和材料流动比较均匀(图 10 (b))。

上述结果表明,圆锥形塞棒接头由于向母材上表面流动金属较少,容易产生上表面未焊接缺陷;圆弧形塞棒温度场分布和塑性金属流动均匀,更容易得到无缺陷的接头,仿真结果与实际情况较为符合。

2.2 塞孔结构的影响

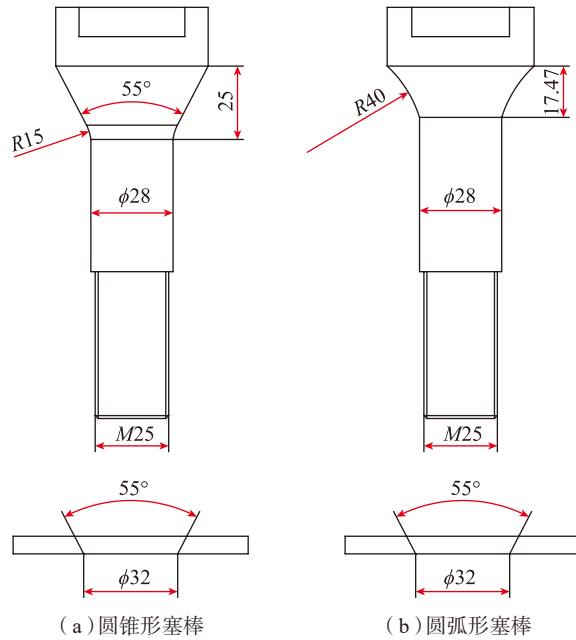


图7 塞棒和塞孔的几何参数
Fig.7 Geometry parameters of hole and plug



(a) 圆锥形塞棒焊接接头宏观截面形貌



(b) 左上处 (c) 左下处 (d) 右上处

图8 圆锥形塞棒焊接接头宏观截面形貌及未连接缺陷细节

Fig.8 Cross-section morphology of taper plug welded joint and details of lack of bonding defect



(a) 圆锥形塞棒接头



(b) 圆弧形塞棒接头

图9 圆锥形和圆弧形塞棒接头截面形貌

Fig.9 Cross-section morphology of taper plug joint and circular arc-shaped plug joint

为讨论塞孔形状和尺寸对焊接质量的影响,针对 8mm 板材设计了圆锥形和圆柱形两种塞孔结构,如图 11 所示。焊接试验参数为:焊接转速 7000r/min,轴向拉力 20kN,拉锻力 25kN,拉锻保持时间 5.0s,轴向进给量 10mm。

图 12 为不同塞孔结构焊接接头的宏观截面形貌。采用圆弧形塞棒焊接锥形孔结构时,当板材厚度增加至 8mm 时仍可能在焊缝上表面处产

生未焊合缺陷。而采用圆柱形孔结构则可避免未焊合缺陷的形成。分析认为,由于焊接过程中圆柱形孔上表面与塞棒率先接触,母材上表面温度较高,塑性金属流动性好,在轴向载荷的作用下与塞棒紧密结合,不易产生顶端缺陷,并且与锥形塞孔相比,圆柱形塞孔的金属流动性更好、填充量更大,材料易于向上表面流动,形成美观均匀的顶部飞边,有利于消除未焊合缺陷。

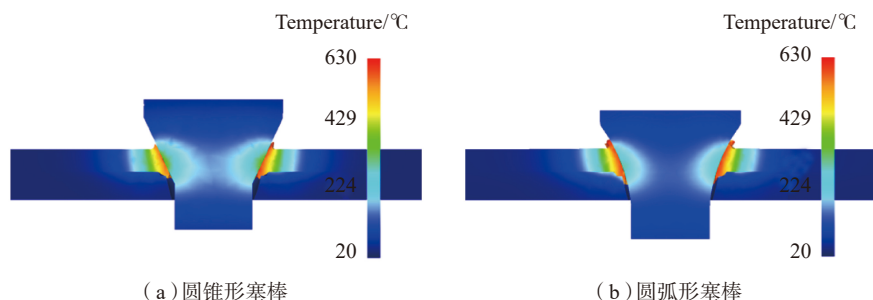


图10 圆锥形塞棒和圆弧形塞棒接头有限元模拟结果

Fig.10 Finite element simulation results of taper plug joint and circular arc-shaped plug joint

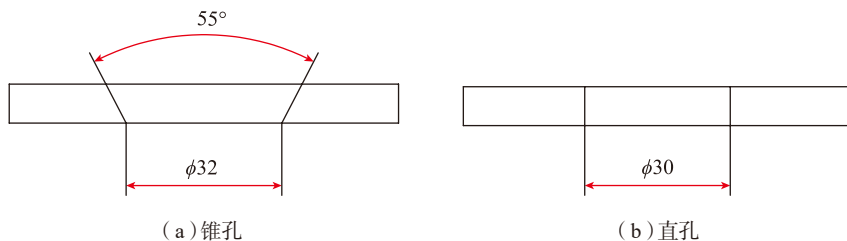


图11 塞孔的几何参数

Fig.11 Geometry parameters of hole



图12 圆锥形塞孔和圆柱形塞孔接头截面形貌

Fig.12 Cross-section morphology of taper plug hole joint and cylindrical plug hole joints

2.3 砧板成形孔结构的影响

为了讨论砧板成形孔形状对焊接质量的影响,设计了锥形底孔砧板、阶梯锥形底孔(较浅)砧板和阶梯锥形底孔(较深)砧板,对比在3种不同砧板情况下焊缝成形情况。图 13 所示为 6mm 厚 2219 板材在采用不同砧板成形孔结构时,焊接接头外观及 X 射线探伤结果。所用焊接工艺参数为:焊接转速 7000r/min,轴向拉力 15kN,拉锻力 20kN,拉锻保持时间 5.0s,轴向进给量 6mm。

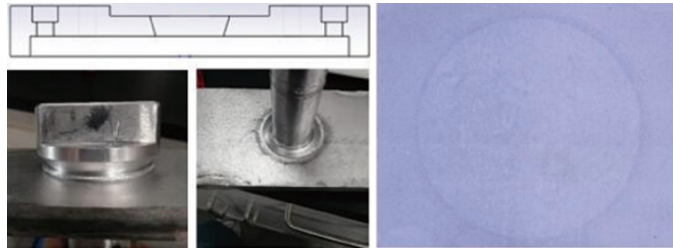
试验结果表明,在相同的焊接工艺参数下,采用锥形砧板成形孔容易在焊缝下表面产生缺陷(图 13(a))。采用阶梯型成形孔(较浅)砧板,有助于减少底部未焊合缺陷,但由于上锥孔深度较小,塑性金属填充空间不足,仍会产生部分底部未焊合缺陷(图 13(b))。采用阶梯型成形孔(较深)砧板深度适宜,塑性金属流动充分,可消除底部未焊合缺陷(图 13(c))。

分析认为,在合适的成形孔尺寸下,阶梯面将为塞棒的压力提供受力支点,使得轴向拉力作用在塞棒与母材的摩擦界面上,有利于实现优质的连接。研究发现,阶梯孔直径的大小将影响热塑性材料的支撑点位置,孔径较小时,支撑点靠近摩擦界面底端,导致上部压力较小,结合性较差,造成顶端未焊合缺陷;孔径较大时,支撑点靠近摩擦界面顶端,导致下部压力较小,结合性较差,造成底端未焊合缺陷。

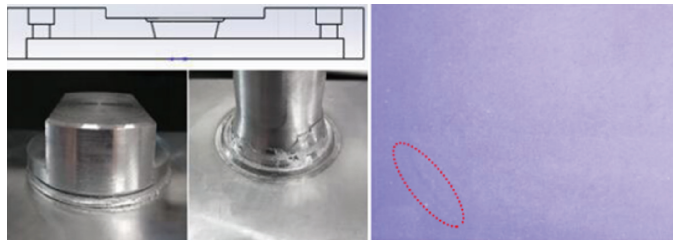
3 焊接工艺参数对焊接成形的影响

3.1 焊接转速的影响

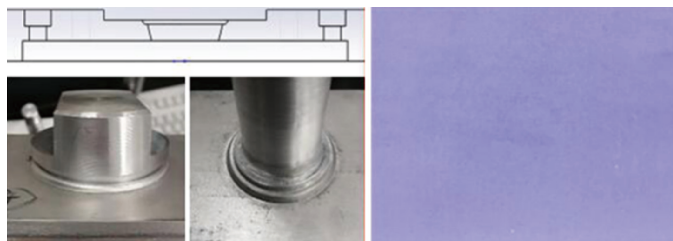
采用 6mm 厚 2219 母材,在焊接压力为 20kN、拉锻力为 20kN、拉锻保持时间为 5.0s、轴向进给量为 6mm 及不同焊接转速(6000r/min 和 7000r/min)下所得焊接接头的外观和 X 射线探伤结果如图 14 所示。在 6000r/min 焊接转速下,焊缝外观成形良好,X 射线探伤结果显示沿摩擦界面存在严重的未焊合缺陷;在



(a) 锥形底孔



(b) 阶梯锥形底孔(较浅)



(c) 阶梯锥形底孔(较深)

图13 不同砧板成形孔结构下焊接接头外观及X射线探伤结果
Fig.13 Appearance of welded joints and X-ray inspection results under different forming hole structure

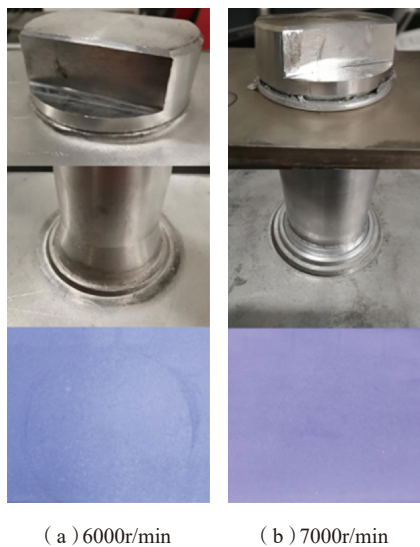
7000r/min 焊接转速下,焊缝外观成形良好,焊接接头中未发现缺陷。

上述结果表明,在其他焊接参数不变的情况下,提高转速能够减少焊接缺陷的产生。一方面,提高转速能够提高焊接的热输入,使摩擦界面区域的温度升高,促进金属的塑性流动;另一方面,在较高的热输入下,可以适当降低焊接所需轴向拉力,在保证材料塑性流动充分的同时减小焊接时塞棒与塞孔摩擦所产生的扭矩,进而提高焊接稳定性,避免未焊合缺陷的产生。

3.2 轴向载荷的影响

选用 8mm 厚 2219 母材,在焊接转速为 7000r/min,拉锻保持时间为 5.0s,轴向进给量为 6mm 条件下,分别将轴向载荷(焊接压力/拉锻力)设置为 20kN/25kN、20kN/20kN 和 20kN/15kN。所得焊接接头的宏观截面形貌如图 15 所示。

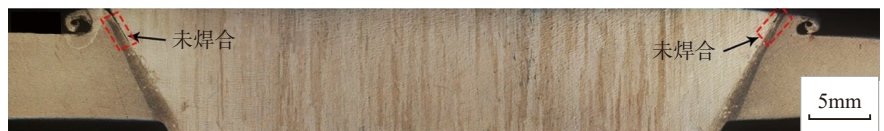
如图 15 (a) 所示,当使用了比焊接压力高 5kN 的 25kN 拉锻力时,在焊缝上表面可以观察到明显的未焊合缺陷。如图 15 (b) 所示,当焊接压力和拉锻力均为 20kN 时,得到



(a) 6000r/min (b) 7000r/min

图14 不同转速下焊接接头外观及X射线探伤结果

Fig.14 Appearance of welded joints and X-ray inspection results under different rotational speed



(a) 焊接压力 20kN、拉锻力 25kN



(b) 焊接压力 20kN、拉锻力 20kN



(c) 焊接压力 20kN、拉锻力 15kN

图15 不同轴向载荷下焊接接头的宏观截面形貌

Fig.15 Cross-section morphology of welded joint under different axial force

了良好的无缺陷的焊接接头。如图 15 (c) 所示, 当使用比焊接压力低 5kN 的 15kN 拉锻力时, 在焊缝下表面处形成了未焊合缺陷。以上结果表明, 施加合适的拉锻力有助于消除焊接缺陷。当拉锻力大于焊接压力时, 母材侧的受摩擦被加热材料的流动应力低于拉锻力引起的加载应力, 在摩擦界面附近的母材侧会发生多余的塑性变形, 容易产生顶端缺陷。母材侧底部金属由于最后与塞棒接触, 温度较低, 容易产生底端缺陷。当拉锻力小于焊接压力时, 由于加载应力较低, 产生缺陷的部分金属不能被挤出, 因此导致了底部未焊合缺陷的产生。为了实现高质量无缺陷的焊接, 建议使用等于焊接压力的拉锻力。

3.3 轴向进给速度的影响

轴向进给速度是指在 FPPW 过程中, 在恒定轴向拉力焊接阶段的平均进给速度, 体现为塑性流动材料应变速率, 可通过主轴油缸的流量加以控制。为探讨轴向加载速度对焊接质量的影响, 选用 8mm 厚 2219 铝合金, 在焊接转速为 7000r/min、焊接压力为 20kN、拉锻力为 20kN、拉锻保持时间为 4.0s、轴向进给量为 11mm 条件下, 分别将轴向进给速度设置为 0.5mm/s、1.2mm/s、1.5mm/s 和 1.7mm/s。所得焊接接头的宏观截面形貌如图 16 所示。

如图 16 (a) 和 (d) 所示, 当轴向进给速度为 0.5mm/s 和 1.7mm/s 时, 焊接接头的底部存在少量未焊合缺陷。如图 16 (b) 所示, 当轴向进给速度为 1.2mm/s 时, 焊接接头的中部和底部均存在未焊合缺陷。当进给速度为 1.5mm/s 时, 焊接接头中未发现缺陷, 如图 16 (c) 所示。

当进给速度过小时, 材料塑性流动充分, 伴随着塞棒向下运动, 塑性金属更容易被挤出焊缝形成飞边, 接头底端塑性金属较少, 容易产生底部未焊合缺陷。当进给速度过大时, 材料流动不充分, 将导致焊接初始阶段

扭矩过大导致塞棒振动, 焊接过程不稳定; 还会导致塞棒底端母材金属的温度较低, 塑性金属流动不充分, 容易产生底部未焊合缺陷。当采用 1.5mm/s 的进给速度焊接时, 焊接速度适中, 热输入量适中, 塞棒和板材之间可以紧密接触, 焊接过程稳定, 能够得到无缺陷的焊接接头。

4 显微组织

如图 17 所示, 2219 铝合金 FPPW 焊接接头可分为 5 个区域: 母材区、

塞棒区、结合界面、热力影响区和热影响区。观察可知, 母材侧的热力影响区材料流动剧烈, 以底部砧板支撑位置为分界点, 分别向上下两个方向流动, 而塞棒未发现明显的塑性变形特征。

图 18 为 2219 铝合金 FPPW 接头不同区域的金相组织照片。如图 18 (a) 和 (b) 所示, 母材区和塞棒区均保留了原始挤压态的组织特征, 晶粒沿挤压方向明显被拉长。如图 18

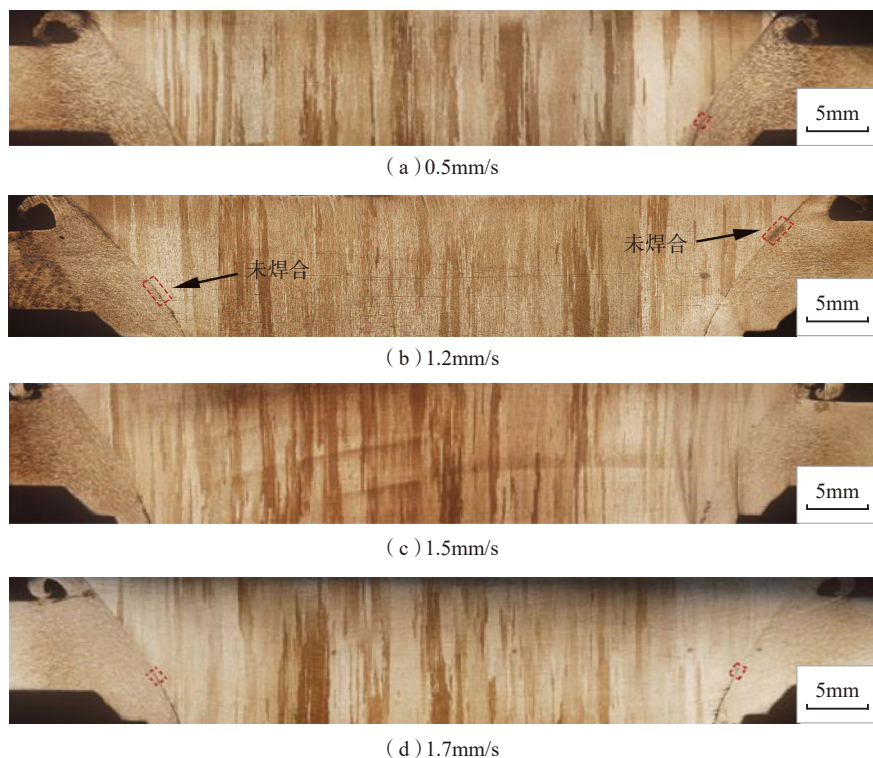


图 16 不同轴向进给速度下焊接接头的宏观截面形貌

Fig.16 Cross-section morphology of welded joint under different axial feed speed

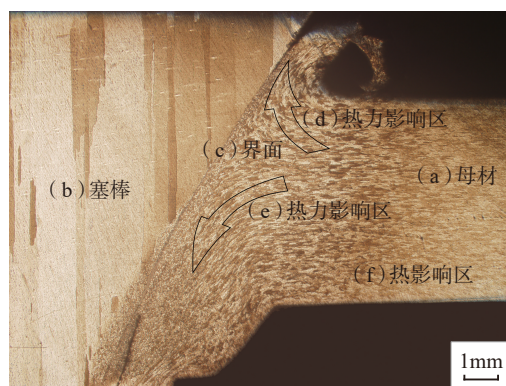


图 17 典型 FPPW 接头宏观形貌

Fig.17 Macro observations of typical FPPW joint

(c)所示,毗邻结合界面热力影响区中存在宽度为200 μm 的等轴晶带。分析认为,这是由于塞棒高速旋转,摩擦界面处母材金属受到严重的塑性变形发生动态再结晶所致。对于有缺陷的焊缝,界面处的再结晶带与母材和塞棒之间可以观察到明显的界限,而无缺陷焊接接头的摩擦界面可作为再结晶形核位置,因此无明显分界线。如图18(d)和(e)所示,在热力影响区中,由于塞棒对母材金属的挤压作用,沿着材料流动方向晶粒被明显拉长。在焊接热影响区,如图18(f)所示,晶粒由于远离塑性变形区域,而仅受焊接热过程的影响,晶粒尺寸明显大于母材区,说明在焊接过程中焊接热影响区晶粒发生了长大。

5 力学性能

图19为典型FPPW接头焊缝截面的硬度分布。硬度结果显示,由于FPPW焊接时间短、峰值温度低,焊接热影响区的宽度较小。结合界面附近的热力影响区硬度值最低($\approx 79.9\text{HV}$),说明该区域软化严重。硬度最低点位于黏合界面0.4~0.5mm处。其主要原因是时效处理+冷作硬化的2219-T87铝合金,在焊接过程中加工硬化效果被削弱,同时发生 θ' 相回溶或转变为粗大相所致。

图20为不同轴向拉力下,2219铝合金FPPW接头拉伸性能试验结果。当轴向拉力为15kN时,由于焊接接头中存在少量缺陷,其抗拉强度为315MPa;轴向拉力为20kN时,焊接接头的抗拉强度为330MPa,延伸率3%;进一步增加轴向拉力,焊接接头的抗拉强度和延伸率均显著提升,分别可达到365MPa和6%以上,相当于2219-T87铝合金母材强度的80%,与塞棒材料等强。

图21为无缺陷和有缺陷FPPW接头的断裂照片、宏观断口和微观断口形貌。无缺陷接头和有缺陷接头

的断裂位置均为结合界面附近的热力影响区处(图21(a)和(b))。无缺陷接头断口具有大量的等轴状韧窝,表明拉伸过程中塑性变形较大,冶金结合较好(图21(e))。有缺

陷的接头断口具有大量断续的黑色带状物质,与宏观断口中的白色发亮区域对应(图21(d)和(f))。分析认为,该带状物质为FPPW过程中黏附在塞棒表面的部分塑性体母



图18 2219铝合金FPPW接头上不同区域的金相组织

Fig.18 Microstructure observed under optical microscope for different regions on FPPW joint

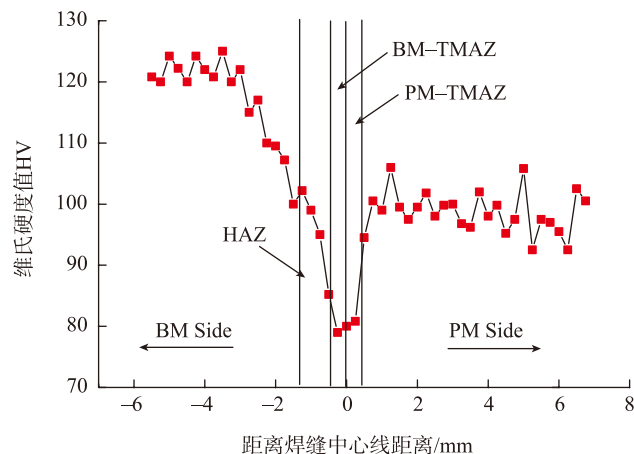


图19 典型的硬度分布

Fig.19 Typical hardness distribution

材,由于未焊合或弱结合等缺陷,塞孔与塞棒间的相对摩擦较小,该部分材料未经受较大的压力作用,没有发生冶金结合,在显微镜下呈条带状黏附在基体上。

结论

(1) FPPW 工艺过程经历了预热、轴向力增加、恒定轴向力焊接、拉锻等阶段。FPPW 过程中母材与塞

棒在摩擦热和拉锻力的耦合作用下达到塑性流动状态,实现冶金连接。

(2) 塞棒、塞孔等几何参数会对摩擦塞补焊(FPPW)成形质量产生显著影响。采用圆弧形塞棒、圆柱形塞孔、阶梯锥形底孔的砧板能够改善母材的流动方向和受力条件,消除未焊合缺陷。

(3) 焊接转速、轴向载荷、轴向加载速度等焊接工艺参数会对 FPPW 成形质量产生影响。焊接转速 7000r/min、焊接压力 20~30kN、轴向拉锻力 20~30kN、进给速度 1.5mm/s 是较优的焊接工艺范围。

(4) 2219-T87 铝合金 FPPW 接头母材侧的热力影响区软化最为明显。接头断裂位置发生在结合界面附近的热力影响区处。在优化参数下,焊接接头的抗拉强度可达 365MPa,延伸率 6%。

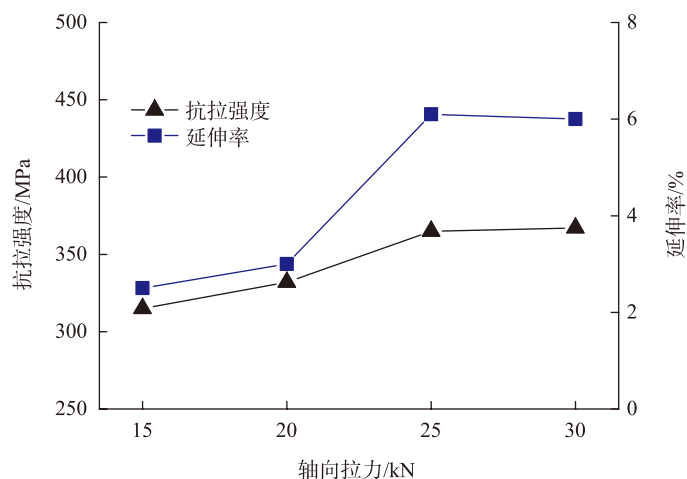


图20 不同轴向拉力下FPPW接头的拉伸性能

Fig.20 Tensile properties of FPPW joints under different axial force

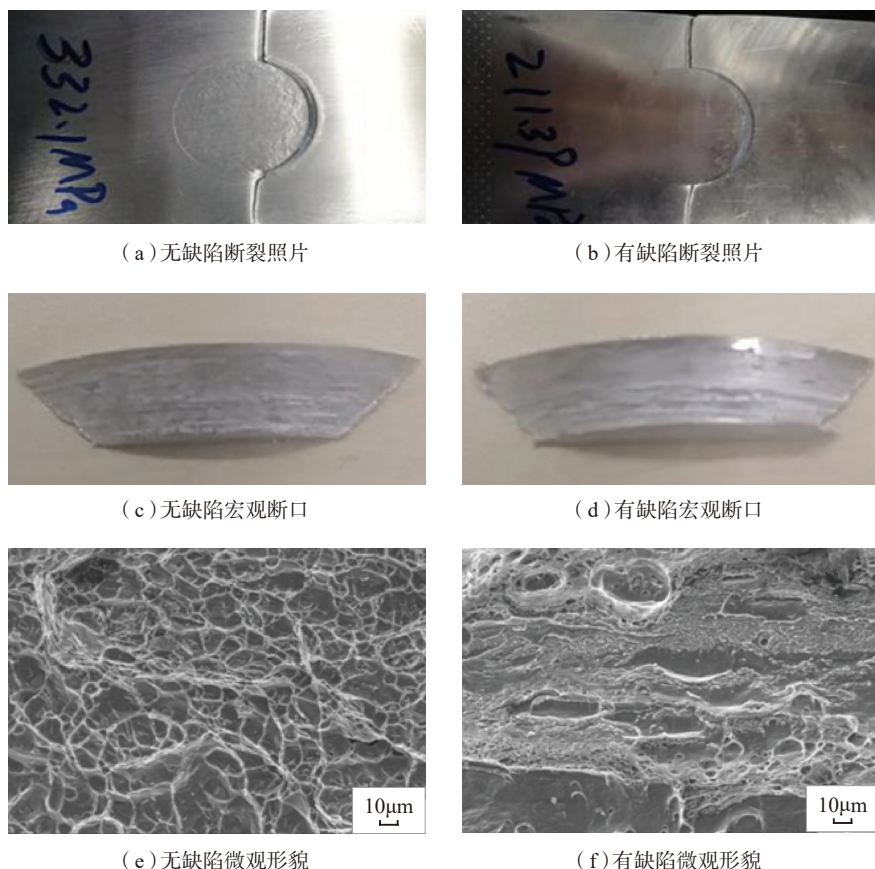


图21 无缺陷和有缺陷FPPW接头的断裂照片、宏观断口和微观断口形貌

Fig.21 Fractures photographs, fracture surface observation and micro-fracture morphology of defect-free FPPW joint and the joint with lack of bonding defect

参考文献

- [1] 鲁宇. 中国运载火箭技术发展[J]. 宇航总体技术, 2017, 1(3): 1-8.
LU Yu. Space launch vehicle's developmet in China[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2017, 1(3): 1-8.
- [2] 张智, 容易, 秦瞳, 等. 重型运载火箭总体技术研究[J]. 载人航天, 2017, 23(1): 1-7.
ZHANG Zhi, RONG Yi, QIN Tong, et al. Research on overall technology of heavy launch vehicle[J]. Manned Spaceflight, 2017, 23(1): 1-7.
- [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(3): 1-5.
LI Dong, WANG Yu, HE Wei, et al. The general scheme and key technologies of CZ-5 launch vehicle[J]. Missiles and Space Vehicles, 2017(3): 1-5.
- [4] 刘志华, 尚育如, 宁立芹, 等. 新一代运载火箭贮箱焊接工艺评价的概念及应用[J]. 导弹与航天运载技术, 2009(4): 30-34.
LIU Zhihua, SHANG Yuru, NING Liqin, et al. Conception and application of welding processing evaluation for tanks in new generation launch vehicle[J]. Missiles and Space Vehicles, 2009(4): 30-34.
- [5] 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.

[6] SCHNEIDER J A, NUNES JR A C, BRENDEN M S. The influence of friction stir weld tool form and welding parameters on weld structure and properties: nugget bulge in self-reacting friction stir welds[C]//8th International Symposium on Friction Stir Welding. Timmendorfer Strand, 2010.

[7] 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.

[8] COLETTA E R, CANTRELL M A. Friction plug weld repair geometric innovations[R/OL]. [2019-03-19]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20000112928.pdf>.

[9] ZUO Q K, NUNES A C JR. Mechanics model of plug welding[R/OL]. [2019-03-19]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20150019530.pdf>.

[10] NASA. Large-Scale Manufacturing facilities[EB/OL]. [2019-03-19]. <http://www.nasa.gov/sites/default/files/files/LargeScaleMfg.pdf>.

[11] MCGILL P, BURKHOLDER J. Damage tolerance behavior of friction stir welds in aluminum alloys[R/OL]. [2019-03-10]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20120015226.pdf>.

[12] COLETTA E R, CANTRELL M A. Friction pull plug welding: chamfered heat sink pull plug design: United States Patent 6460750[P]. 2002-10-08.

[13] COLETTA E R, CANTRELL M A. Friction pull plug welding: chamfered heat sink pull plug design: United States Patent 6880743[P]. 2005-04-19.

[14] BEAMISH K A, PICK J R, THREADGILL P L. Influence of hole and plate geometries on friction taper plug welding of AA6082-T6[R]. TWI Industrial Member Report Summary 868/2007, 2017.

[15] TAKESHITA R, HIBBARD T L. Friction plug welding: United States Patent, 6213379[R]. 2001-04-10.

[16] DU B, CUI L, YANG X Q, et al. Weakening mechanism and tensile fracture behavior of AA 2219-T87 friction plug welds[J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 693: 129-135.

[17] HORTON K R. Microhardness, strength and strain field characterization of self-reacting friction stir and plug welds of dissimilar aluminum alloys[D]. Tuscaloosa: University of Alabama, 2011.

[18] MCGILL P, BURKHOLDER J. Damage tolerance assessment of friction pull plug welds[R/OL]. [2019-03-19]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20120015226.pdf>.

[19] METZ D F, WEISHAUP T E R, BARKEY M E, et al. A microstructure and microhardness characterization of a friction plug weld in friction stir welded 2195 Al-Li[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2012, 134(2): 021005.

[20] NASA. Friction pull plug welding in aluminum alloys[EB/OL]. [2019-03-19]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20120014529.pdf>.

[21] 赵衍华, 刘景铎, 张丽娜, 等. 2014 铝合金搅拌摩擦焊缝的拉锻式摩擦塞补焊[J]. 航空材料学报, 2010, 30(1): 41-46.

ZHAO Yanhua, LIU Jingduo, ZHANG Lina, et al. Study on friction plug welding of 2014 aluminum alloy FSW joint[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30(1): 41-46.

[22] CUI L, LU P, LI W K, et al. Influence of axial force parameters to the quality of friction pull plug welding for 2219-T87 aluminium alloy sheets[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2019: 24(1): 27-35.

通讯作者: 崔雷, 博士、讲师, 研究方向为搅拌摩擦焊、摩擦塞补技术与装备, E-mail: leicui@tju.edu.cn.

Friction Pull Plug Welding Process of 2219 Aluminum Alloy

LU Peng¹, CUI Lei¹, WANG Huimiao^{1,2}, CHEN Yongliang¹, WANG Dongpo¹, SUN Zhuanping^{1,3}, SONG Jianling³, ZHANG Zhongping³

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

2. Capital Aerospace Machinery Corporation, Beijing 100044, China;

3. Tianjin Long March Launch Vehicle Manufacturing Co. Ltd., Tianjin 300462, China)

[ABSTRACT] In the study, friction pull plug welding (FPPW) process of 6-8mm thick 2219-T87 aluminum alloy was discussed. The results show that the structure of the plug and hole, the forming hole and the main welding parameters (axial load, welding speed and feed speed) have important influence on the weld formation. The use of circular arc-shaped plug rod, cylindrical plug hole and stepped tapered bottom hole can improve the flow direction and stress conditions of the base material and eliminate the unwelded defects. The welding speed is 7000r/min, the welding pressure is 20kN, the axial forging force is 20-30kN, and the feeding speed is 1.5mm/s. In the welded joint, the softening in the thermal mechanically affect zone on the base material side is the most obvious, and the hardness value is 79.9HV. Under the optimized parameters, the tensile strength of the welded joint can reach 365MPa, and the elongation is 6%, which is equivalent to 80% of the base metal.

Keywords: Aluminum alloy; Friction pull plug welding; Welding process; Welding forming; Microstructure; Mechanical property (责编 逸飞)