2219铝合金搅拌摩擦焊缝Al_2Cu相聚集行为特征分析

李　超[1]　　赵英杰[1]　　孙转平[1]　　纪文学[1]　　李晓光[2]

（1　天津航天长征火箭制造有限公司，天津　300462）

（2　首都航天机械有限公司，北京　100076）

文　摘　对2219C10S状态铝合金进行搅拌摩擦焊接试验，发现焊缝中存在聚集物的异常聚集现象，聚集相在X光检测中显示为亮白色聚集物，主要形态分为团块状、线状和指状三种，聚集相处焊缝的力学性能与无聚集相焊缝的力学性能基本相同。各形态聚集相的分布位置受搅拌头焊接影响区域的不同而不同，团块状聚集相主要存在于焊核中心或偏焊缝上表面位置处，线状和指状聚集相主要存在于焊核中心或偏焊缝根部位置处。对异常聚集相进行能谱分析知，聚集相主要组成元素为Al和Cu，原子百分比近似为2∶1，确定聚集相主要成分为Al_2Cu。对聚集相的成因进行分析认为，聚集相的产生主要受搅拌摩擦焊接热输入及搅拌头机械搅拌作用的影响，在焊接过程中，塑态软化金属中的Al_2Cu在填补搅拌针后方空腔的过程中出现了聚集行为，随着塑态金属的凝固，聚集行为开始变得缓慢并结束。

关键词　2219铝合金，搅拌摩擦焊，Al_2Cu聚集相，搅拌头

中图分类号：TG444　　DOI：10.12044/j.issn.1007-2330.2020.01.015

Analysis of Al_2Cu Aggregation Behavior Characteristics in 2219 Aluminum Alloy Friction Stir Welding Seam

LI Chao[1]　　ZHAO Yingjie[1]　　SUN Zhuanping[1]　　JI Wenxue[1]　　LI Xiaoguang[2]

（1　Tianjin Long March Launch Vehicle Manufacturing Co. Ltd，Tianjin　300462）

（2　Capital Space Machinery Co. Ltd，Beijing　100076）

Abstract　The friction stir welding test was performed on the 2219C10S aluminum alloy. It was found that there was abnormal aggregation of aggregates in the weld. The aggregated phase was shown as bright white aggregates on X-ray inspection. The main forms were divided into clumps，lines and fingers，and the mechanical properties of the welds in the aggregate phase were basically the same as those of the welds without the aggregate phase. The distribution position of each form of aggregated phase is different depending on the area affected by the welding of the mixing head. The agglomerate aggregate phase mainly existed at the center of the weld or the upper surface of the weld，and the linear and finger-like aggregates mainly existed in the weld center or the position of the weld root. The energy spectrum analysis of the abnormal aggregate phase shows that the main constituent elements of the aggregate phase are Al and Cu，and the atomic percentage is approximately 2∶1. It is determined that the main component of the aggregate phase is Al_2Cu. Analyzing the causes of the aggregate phase，the generation of aggregate phase is mainly affected by the welding heat input and the mechanical agitation of the mixing head. During the welding process，Al_2Cu in the plastic softened metal shows aggregation behavior in the process of filling the cavity behind the stirring needle，solidification with metal，aggregation behavior begins to slow down and ends.

Key words　2219 Aluminum alloy，Friction stir welding，Al_2Cu aggregate phase，Mixing head

0　引言

一种新的焊接技术，从发明到原理验证，从技术实现到在航天工业中的应用，往往要经过几十年的时间，而搅拌摩擦焊技术（FSW）却是个特例。从1991年由英国焊接技术研究所（TWI）发明搅拌摩擦焊接技术到1999年美国在Delta运载火箭中间舱段焊接生产中的首次应用，仅经过了8年时间，可见搅拌摩擦焊接技术在航天产品工程应用中备受青睐，目前已在在航空航天、轨道交通、汽车及船舶制造等领域得到了广泛的应用[1-2]。作为一项独具创新性

收稿日期：2019-06-30

第一作者简介：李超，1986年出生，硕士，工程师，主要从事运载火箭燃料贮箱焊接工作。E-mail：15201229964@163.com

的连接技术，搅拌摩擦焊在焊接科学技术应用发展史上具有里程碑的意义[3]。

搅拌摩擦焊技术是一种基于微区锻造的绿色固态焊接工艺[2]，目前主要应用于铝合金、镁合金等轻金属合金产品的焊接生产[4]。相对于传统熔焊焊接工艺，搅拌摩擦焊技术具有接头力学性能优良、产品变形小、生产过程绿色无污染等诸多优点，同时，由于搅拌摩擦焊属于固相连接工艺，其焊缝组织特征、缺陷形态及影响因素等也与传统熔化焊接工艺有着本质的不同。搅拌摩擦焊技术在运载火箭燃料贮箱的焊接生产中最先得到广泛的应用。燃料贮箱是运载火箭中最重要的组成部分之一，目前，中国新一代运载火箭燃料贮箱的主要材料为2219铝铜系铝合金。本文针对2219铝铜合金，进行了一系列搅拌摩擦焊接试验，研究了2219铝铜合金搅拌摩擦焊缝的微观组织特性，并重点对焊缝中出现的亮白色聚集物异常聚集现象进行分析。

1　试验材料与方法

采用10 mm厚度的2219铝合金，材料状态为C10S，采用平板对接焊方式，试验板材规格为600 mm×150 mm，2219铝合金主要化学成分及力学性能如表1和表2所示。

表1　2219铝合金主要化学成分

Tab. 1　Main chemical composition of 2219 aluminum alloy

%（质量分数）

Cu	Mn	Ti	Zr	Si	Fe	Al
6.38	0.32	0.064	0.18	0.084	0.18	–

表2　2219铝合金基材力学性能

Tab. 2　Mechanical properties of 2219 aluminum alloy

抗拉强度R_m/MPa	屈服强度R_{eL}/MPa	断后伸长率A/%
455	372	11

搅拌头采用高温合金加工制造，焊接试验前，对搅拌针长度进行修磨，使搅拌针长度小于试片最小板厚0.15~0.25 mm，搅拌头形貌如图1所示。



图1　搅拌头形貌

Fig. 1　Morphology of mixing head

焊接前，使用汽油对焊接工装及待焊板材焊接区进行擦拭除油，并对待焊板材正、反面待焊区域及对接端面区域进行打磨和刮削清理，对搅拌头使用酒精清洗。试验焊接参数如表3所示。

表3　2219铝合金焊接试验参数

Tab. 3　2219 aluminum alloy welding test parameters

主轴转速/min	焊接速度 mm/min	主轴倾角/(°)
800	150	2.5°

为得到充足的聚集相样本，进行了多组焊接试验，焊接完成后，剔除正面焊缝的飞边，并对焊缝进行打磨圆滑处理，之后对焊缝背面进行打磨处理，打磨深度0.15~0.25 mm，去除未连接及弱结合缺陷。打磨处理完成后，对焊缝进行超声相控阵检测和X光检测，对无聚集相焊缝及存在聚集相的位置处焊缝分别选取3个拉伸子样，在MTS-810电子拉伸试验机上进行拉伸试验。根据无损检测结果，对不同形貌的焊缝聚集相进行剖切截取金相试样，用混合酸（1mL HF+1.5mL HCl+2.5mL HNO_3+95mL H_2O）溶液对抛光后的试样进行腐蚀，在OLYM-PUS光学显微镜下进行典型区域金相组织分析，并对聚集相进行能谱分析。

2　焊缝力学性能及无损检测分析

2.1　焊缝的力学性能

无聚集相搅拌摩擦焊缝和聚集相位置处的搅拌摩擦焊缝力学性能如表4所示。无聚集相位置处焊缝平均抗拉强度为333.7 MPa，平均断后伸长率为6.7%，聚集相存在位置处焊缝平均抗拉强度为329 MPa，平均断后伸长率为6.3%。无聚集相处和有聚集相处焊缝的力学性能差别不大，抗拉强度均达到母材强度的70%以上，断后伸长率均达到6.0%以上，焊缝具有良好的塑性。

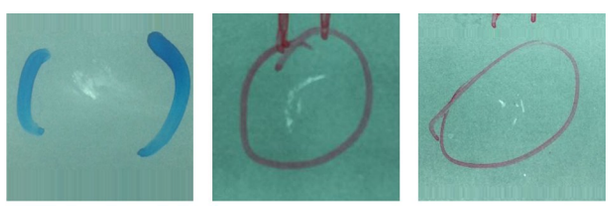
表4　有无聚集相位置焊缝力学性能

Tab. 4　Mechanical properties of welded joints without aggregate phase

焊缝状态	抗拉强度R_m/MPa	断后伸长率A/%
无聚集相处焊缝	333.7	6.7
聚集相位置焊缝	329	6.3

2.2　焊缝的无损检测分析

通过对焊缝聚集相样本进行无损检测分析后得出，聚集相的形态主要分为团块状、线状和指状三种，图2为聚集相的X光透视图像。



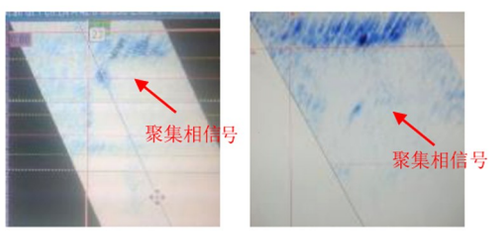
(a) 团块状　(b) 线状　(c) 指状

图2　聚集相X光透视形貌

Fig. 2　X-ray view of the aggregate phase

可看出显示为亮白色聚集物，部分聚集相边界明显。受搅拌针机械搅拌作用的影响，大部分线状和指状聚集相的分布存在一定方向性，呈现环形分布的趋势。

图3为团块状及线状聚集相超声相控阵检测信号，聚集相与铝基体因存在明显界面，在检测中会出现超声波的反射信号。因聚集相密度与铝基体密度相差不大，相控阵检测的信号强度要小于异质金属夹杂及空腔缺陷的信号强度。团块状聚集相在相控阵检测中可观察到较为明显的信号反映，信号图像一般呈现圆形的团状，较大的线状聚集相在相控阵检测中也可观察到信号反应，信号图像多为点状，且信号强度比较微弱，较小的线状聚集相及指状聚集相则无法在相控阵检测中观察到信号反映。



（a） 团块状 （b） 线状

图3 聚集相超声相控阵信号

Fig3 Aggregated phase ultrasonic phased array

3 焊缝的显微组织分析

3.1 母材的显微组织及能谱分析

2219C10S状态铝合金母材为10%变形量的轧制板材，图4为母材晶粒的显微组织形貌，晶粒沿轧制方向呈板条状分布，铝基体上弥散分布着大量聚集相。

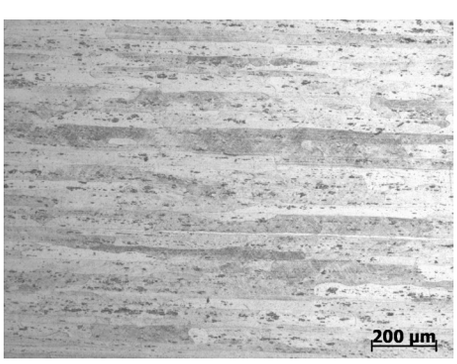


图4 母材显微组织形貌

Fig. 4 Microstructure of base material

图5为2219C10S状态铝合金母材的SEM图像，图中亮白色聚集物为聚集相，并沿晶粒轧制方向分布，其余部分为铝基体。对聚集相位置进行了能谱分析，聚集相位置处Al和Cu的原子百分比接近2.5∶1，O原子占比约为10%，另外还存在少量的Fe原子，如表5所示。聚集相位置的主要成分为Al_2O_3和Al_2Cu，Al_2O_3主要来自于母材表面的氧化膜，因此聚集相的主要成分为Al_2Cu。

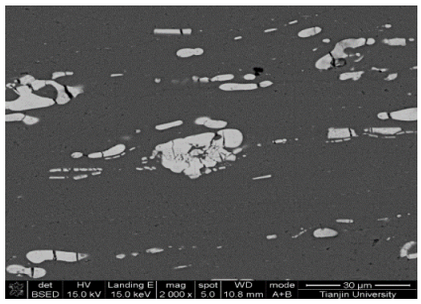


图5 母材SEM图像

Fig. 5 SEM image of base material

表5 聚集相各元素原子分数

Tab. 5 Aggregate phase elements and content percentage

%（原子分数）

O	Cu	Al	Fe	总量
9.89	25.03	63.87	1.22	100.00

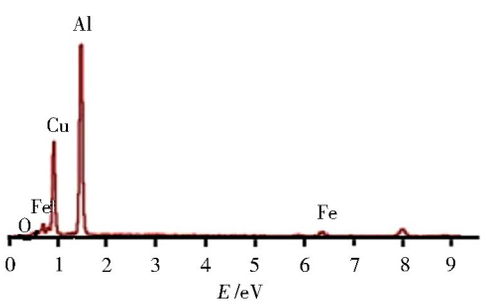


图6 母材聚集相位置能谱分析

Fig. 6 Energy spectrum analysis of aggregate phase of base material

3.2 焊缝聚集相的微观形貌及能谱分析

对焊缝聚集相进行金相观察及能谱分析，发现可以明显观察到团块状、线状和指状聚集相的截面形态，与周围的铝基体存在明显的界面，聚集相仅存在于搅拌摩擦焊缝焊核区，在搅拌针搅拌作用下部分呈破碎状。对聚集相的成因分析认为，聚集相的产生及不同的形态特点主要受搅拌摩擦焊接热输入及搅拌头机械搅拌作用的影响。在焊接过程中，塑态软化的金属在搅拌头旋转搅拌的作用下向搅拌针后方的空腔进行流动填充，在金属保持塑态软化的状态下Al_2Cu相出现了聚集行为，随着塑态金属的凝固，聚集行为开始变得缓慢并结束。在焊缝截面方向上由于从搅拌头轴肩到搅拌针端头热输入呈逐渐减小的趋势，因此聚集相的尺寸从搅拌头轴肩到搅拌针端头也呈逐渐减小的趋势。对聚集相尺寸的测量如表6所示。

团块状聚集相尺寸大于线状和指状聚集相，主体聚集相形状较为规则，且与周围Al基体界面清晰，在搅拌头的机械搅拌作用下，部分呈破碎状，分散在一块团状区域内，如图7所示。在焊接过程中，搅拌头轴肩的热输入大于搅拌针的热输入，且搅拌针为锥形结构，从端头到轴肩搅拌针直径逐渐增大，机械搅拌作用更强，

搅拌后的空腔更大，塑态金属的流动作用也更为剧烈。因此，尺寸较大的团块状聚集相主要存在于焊核中心或焊核偏焊缝上表面（轴肩影响区）位置处。能谱分析表明聚集相主要组成元素为Al和Cu，原子百分比近似为2∶1，可以确定聚集相的主要成分为Al_2Cu。

表6　典型聚集相尺寸

Tab. 6　Typical aggregate phase size

聚集相状态	长度/μm	宽度/μm
团块状	2050	472
线状	662	121
指状	392	109

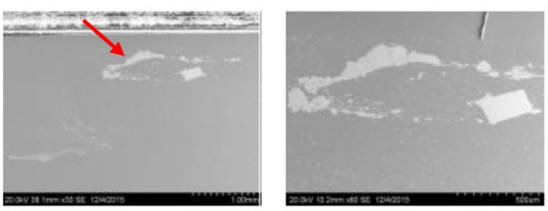


图7　团块状聚集相

Fig. 7　Agglomerated aggregate phase

线状聚集相主要呈细长的条状，长度一般不超过1 mm，在超声相控阵检测中特征信号微弱或无信号显示，在X光射线检测中呈亮白色线形特征，如图8所示。聚集相与周围Al基体界面清晰，受搅拌针机械搅拌作用和搅拌针热输入的影响，尺寸较小的线状聚集相主要存在于焊核中心或焊核偏焊缝根部位置处。能谱分析表明聚集相主要组成元素为Al和Cu，原子百分比近似为2∶1，确定为Al_2Cu相聚集形成。

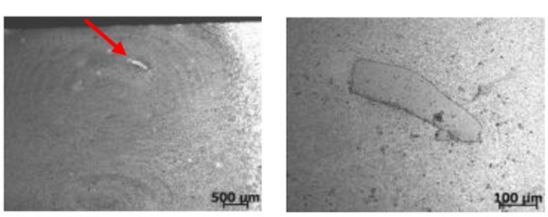


图8　线状聚集相

Fig. 8　Linear aggregation phase

指状聚集相主要呈短棒状，长度一般不超过0.5 mm，一般情况下指状聚集相周围会弥散分布若干破碎的点状聚集相，如图9所示。

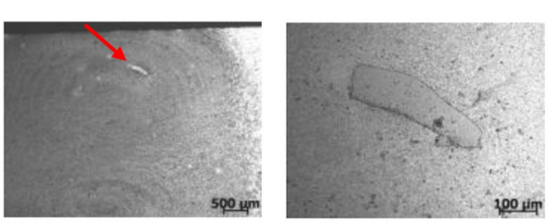


图9　指状聚集相

Fig. 9　Finger aggregate phase

在超声相控阵检测中无特征信号显示，在X光射线检测中呈亮白色短棒状特征。指状聚集相受搅拌针端头部分机械搅拌作用和搅拌针热输入的影响较大，主要存在于焊核中心偏焊缝根部位置处。能谱分析表明聚集相主要组成元素及原子百分比与团块状和线状聚集相相同，确定为Al_2Cu聚集相。

4　结论

（1）聚集相是母材基体中的Al_2Cu相在焊接热循环和搅拌头机械搅拌的综合作用下产生的聚合行为；

（2）对2219C10S状态铝合金搅拌摩擦焊缝无聚集相位置和有聚集相位置进行力学性能分析，结果表明无聚集相处和有聚集相处焊缝的力学性能差别不大，抗拉强度均达到母材强度的70%以上，断后伸长率均达到6.0%以上；

（3）聚集相的形态主要分为团块状、线状和指状三种，在X光射线透视照片中显示为亮白色聚集物，在超声相控阵检测中，团块状聚集相可观察到信号反映，而线状和指状聚集相特征信号微弱或无信号显示；

（4）团块状聚集相尺寸大于线状和指状聚集相，部分聚集相尺寸可超过1 mm，受搅拌头结构及机械搅拌作用影响，团块状聚集相主要分布在焊核中心或偏焊缝上表面位置处，线状和指状聚集相主要分布在焊核中心或偏焊缝根部位置处；

（5）对聚集相进行能谱分析表明，聚集相主要组成元素为Al和Cu，原子百分比近似为2∶1，与2219铝合金母材中的聚集相成分相同，可以确定为Al_2Cu聚集相。

参考文献

[1] 范平章. 摩擦塞焊研发与关键问题[J]. 航天制造技术，2007(2)：37-40.

[2] 邢美源，姚君山，刘杰. 新一代运载贮箱搅拌摩擦焊应用研究[J]. 上海航天，2006(4)：39-43.

XING Mei yuan，YAO Jun shan，LIU Jie. Application research of fsw welding process for joining propellant tanks in new generation launch vehicle[J]. Aerospace Shanghai，2006(4)：39-43.

[3] 宋建岭，李超. 搅拌摩擦焊在运载火箭贮箱制造中的应用与发展[J]. 焊接，2018(5)：21-27.

SONG Jian ling，LI Chao. The Application and development of FSW technology in the manufacture of launch vehicle fuel tank [J]. Welding & Joining，2018(5)：21-27.

[4] RAO C V，REDDY G，RAO K S. Microstructure and pitting corrosion resistance of AA2219 Al-Cu alloy friction stir welds-effect of tool profile[J]. Defence Technology，2015(11)：123-131.