第卷
 第期

 年
 月

https://doi.org/10.12442/j.issn.1002-185X.20240637

2A97/5A06 异种铝合金搅拌摩擦对焊板不均匀组织 及高温协调变形行为

秦中环^{1,2},吴爱萍¹,殷宏亮³,李保永²,刘奇²,武永³

(1清华大学机械工程系,北京 100084)(2北京航星机器制造有限公司,北京 100013)(3南京航空航天大学机电学院,江苏南京 210016)

摘 要:本文围绕 2A97/5A06 异种铝合金搅拌摩擦对焊板不均匀组织及高温协调变形行为开展研究。对焊后接头各区域进行 微观组织观察,并对接头各区域及整体高温性能开展研究。发现焊后 2A97 与 5A06 的焊核区晶粒细小,2A97 侧各区域晶粒 尺寸较小且基本接近,5A06 侧各区域晶粒尺寸略大且差别较明显。2A97 与 5A06 母材在 430℃、10⁻³ s⁻¹条件下高温性能较好,延伸率分别达到 278.8%和 118.6%。接头焊核区强度和延伸率分别为 18.4MPa 和 176.1%,均介于 2A97 与 5A06 之间,强度约为 2A97 母材的 2 倍,延伸率约为 5A06 母材的 1.5 倍,整体性能呈现出明显的叠加原理。各区域变形抗力不同,垂直焊缝拉伸时在 2A97 热力影响区集中变形后发生断裂,修正后流动应力略高于母材而延伸率基本接近母材。焊后各区域晶粒尺寸与流动应力符合蠕变方程规律,晶粒尺寸越细小,流动应力也会相应降低。

关键词: 异种铝合金; 搅拌摩擦焊; 不均匀组织; 协调变形; 流动应力

中图法分类号: TG??? 文献标识码: A 文章编号: 1002-185X(xxxx)0?-0???-0?

铝合金具有比强度高、耐蚀性好、易加工和回收等 优良性能,广泛应用于航空航天、交通运输等领域^[1,2]。 而将异种合金进行对焊,可以更好地适应航空航天和汽 车部件的轻量化以及同一部件不同部位的性能要求,进 一步达成减重目标,具有广阔的工程应用前景^[3,4]。搅拌 摩擦焊(FSW)属于固相焊接技术,因其焊接特点,可 以完全避免铝合金熔焊时出现的各种冶金缺陷,显著提 高接头性能^[5]。异种铝合金搅拌摩擦焊过程中接头各区 域经历不同热力状态影响,形成的微观组织及相应力学 性能均存在明显差异。

搅拌摩擦焊后高温拉深或超塑成形能够实现异种材 料复杂零件的制备,为更好的指导拼焊板的高温成形, 关键在于接头各区域的高温变形行为研究。Dong^[6]研究 了 7003 和 6060 异种铝合金搅拌摩擦焊后接头各区域的 组织变化,发现焊核区组织为连续动态再结晶形成细小 等轴晶,热影响区主要发生静态回复,晶粒尺寸略有增 加,而 7003 前进侧热力影响区发生动态回复和部分再结 晶,形成混合晶粒结构。Zou^[7]使用 2.5 mm 厚的细晶 2A97 铝合金板在 430℃和 2×10⁻³ s⁻¹的初始应变速率条件下 拉伸时,获得最大延伸率超过 650%。Xu^[8]对 2024-7075 拼焊板接头进行单向拉伸测试,发现拉伸过程中焊核区 的应力和应变经历了几次突变,在 2024 和 7075 微结构 的混合焊核区中, 屈服强度高的 AA7075 会对屈服强度 低的 AA2024 产生抑制和保护作用, 抑制了 AA2024 的 变形, 异种搅拌摩擦焊 AA2024-7075 接头的不均匀微观 结构导致严重的不均匀变形, 从而降低了延伸率。 Sorgente^[9]对搅拌摩擦焊后的铝合金板进行自由胀形实 验,发现接头与母材变形存在明显的不均匀行为, 通过 控制工艺参数进而控制不同的微观组织能够减少这种不 均匀性。

2A97 铝锂合金作为我国自主研发的第三代 Al-Cu-Li系合金,以其轻质高强特性,在航空航天领域 展现出广阔应用前景^[10]。5A06 为 Al-Mg 系防锈铝,是 航空航天、汽车船舶最理想的结构材料之一^[11]。为了进 一步减轻航空航天飞行器结构重量,逐渐采用 2A97 等 铝锂合金代替 5A06 铝合金。采用传统减材方式制造铝 锂合金壁板等构件,材料利用率仅为百分之五左右,成 本高昂。壁板等结构主要承载部位为加强筋位置,在壁 板加强筋位置采用高强高刚度的铝锂合金,而壁板蒙皮 部位仍采用铝合金,通过搅拌摩擦焊实现壁板加强筋与 蒙皮的连接,通过高温成形实现壁板加强筋的成形,极 大地提升材料利用率,大幅降低制造成本,显著缩短制 造周期,在高性能低成本航空航天飞行器制造上有广泛 应用前景。因此 2A97 与 5A06 板的搅拌摩擦焊接接头高

收到初稿日期:

基金项目:国家重点研发计划资助项目(项目号 2023YFB3407000)

作者简介:秦中环,男,1989年生,硕士,正高级工程师,北京航星机器制造有限公司,北京100013,电话:010-88103660, qinzh20@mails.tsinghua.edu.cn

温变形行为亟待研究。

本文围绕2A97/5A06 异种铝合金搅拌摩擦对焊板不 均匀组织及高温协调变形行为开展研究。观察接头各区 域微观组织并分析不同区域变形情况与晶粒组织关系。 研究母材在400~520℃、应变速率为10⁻³~10⁻¹ s⁻¹范围 条件下高温变形行为,择优选取变形条件沿接头方向各 区域高温拉伸研究不同区域高温变形行为。沿垂直焊缝 方向切取试样高温拉伸研究接头及母材整体变形行为。

1 实验

1.1 实验材料与制备

本实验材料选用退火态细晶 2A97 板材和工业退火 态 5A06 轧制板材,尺寸为 1000 mm×800 mm×1.8 mm。 搅拌摩擦焊实验采用航天工程装备(苏州)有限公司 (AEE)HT-JM16×8/1 龙门式焊机。将 2A97 和 5A06 板材切割为 200 mm(TD)×75 mm(RD)矩形试片。 用砂纸打磨试片待焊区,用无水乙醇清洗擦拭,并快速 固定至焊接工作台。焊接倾角为 2.5°,焊接时主轴逆时 针旋转,2A97 板材位于焊接前进侧,5A06 板材置于焊 接后退侧。采用锥形螺纹搅拌针,搅拌针长 1.75 mm, 轴肩直径 10 mm,根部与顶部直径分别为 3.35 mm 与 2.2 mm。搅拌摩擦工艺选取转速为 1000 r/min,焊接速度选 取 300 mm/min。

如图1所示为2A97/5A06搅拌摩擦焊后板材拉伸试 样与金相取样位置。为研究 2A97 与 5A06 母材(BM) 高温成形性能,在温度为400~520℃,应变速率为10-3~ 10⁻¹ s⁻¹的范围内进行拉伸实验,分析不同温度及应变速 率下的变形行为。异种铝合金由于两侧材料不相同,搅 拌摩擦焊后接头可划分为焊核区(NZ)、2A97 热力影响 区 (TMAZ)、2A97 热影响区 (HAZ)、5A06 热力影响 区和 5A06 热影响区。为了解焊接接头不同区域的力学 性能,在不同焊接区域平行于焊接方向取拉伸试样(图 a)进行试验,分析不同区域搅拌摩擦焊后性能变化。为 了研究焊后接头及母材整体变形行为,在垂直焊缝方向 取试样(图b),探究接头及母材整体变形行为。拉伸试 样尺寸如图所示,试样标距长度为15mm,宽度为4mm。 试样表面喷涂氮化硼防止氧化,放入高温拉伸设备保温 5 min 后开始实验,目的是保证试样各处温度均达到设 定值。拉伸结束后将试样迅速放入水中冷却保留高温组 织。

对搅拌摩擦焊后不同区域及母材进行金相试样制备,电解抛光后进行 EBSD 表征,采用 Aztec Crystal 软件进行数据处理,研究搅拌摩擦焊后不同区域微观组织形貌。



Fig.1 (a)Parallel and (b)vertical specimens after friction stir welding and (c)dimension diagram of tensile specimens

2 结果与讨论

2.1 搅拌摩擦焊后各区域微观组织

图 2 为 2A97/5A06 搅拌摩擦焊后焊缝横截面组织形 貌及各区域试样位置。两侧飞边之间即为焊缝区域,焊 缝上层有一层较薄的 2A97,中下层界面整体曲折交错, 整体与水平呈一定角度。其中 NZ 试样位于焊缝正中心, 试样标距段混合了 2A97 与 5A06,截面中 5A06 面积占 比略高于 2A97。NZ 试样左右两侧至飞边处分别为 5A06 与 2A97 的热力影响区试样,飞边外侧分别为各自热影 响区试样位置。

1.2 拉伸实验与组织表征



稀有金属材料与工程 RARE METAL MATERIALS AND ENGINEERING



图 2 搅拌摩擦焊后界面组织及拉伸试样切割位置

Fig.2 Interface microstructure and cutting position of tensile specimens after friction stir welding

如图 3 所示为 2A97/5A06 搅拌摩擦焊后各区域及母 材微观组织。图(a)为 2A97 母材,可以观察到母材晶粒 细小,平均晶粒尺寸为1.8 µm,大部分晶粒沿轧制方向 拉长,内部具有较多的小角度晶界,同时也有较多的细 小等轴晶分布在大尺寸晶粒周围。图(b)所示的 5A06 母 材中平均晶粒尺寸为 19.0 µm, 晶粒同样沿轧制方向拉 长。图(c)(d)分别为 2A97 与 5A06 的 NZ 微观组织形貌, 可以观察到 NZ 均由细小的等轴晶组成, 平均晶粒尺寸 分别为2.2 μm 和2.7 μm, 细晶有利于材料超塑成形^[12,13]。 这是由于在搅拌摩擦过程中,搅拌针在焊核区剧烈摩擦 生热致使材料软化,同时搅拌针高速旋转,带动焊核区 材料发生剧烈塑性变形,原始异种铝合金板材的轧制态 组织被破碎后发生连续动态再结晶,形成极其细小的等 轴晶^[14]。在部分 5A06 晶界处仍能观察到大量细小晶核。 图(e)为 2A97 的 TMAZ, 此区域晶粒在 FSW 过程中被旋 转和拉伸,同时还观察到新形核的细小等轴再结晶。图 (g)所示为 2A97 的 HAZ, 部分晶粒受热影响发生长大, 同时晶界处存在细小的等轴晶,大小晶粒尺寸相差较大。

图(f)所示为 5A06 的 TMAZ,观察到大量细小的等 轴晶,同时存在沿轧制方向拉长的大尺寸晶粒。TMAZ 在搅拌摩擦焊接过程中受搅拌区热传导同样达到一定温 度,在轴肩顶锻力作用下,位错运动在晶界及晶内积累 了大量畸变能,部分晶粒完全被等轴再结晶取代。另一 部分晶粒受热影响发生一定程度长大,形成细小等轴晶 包围大尺寸柱状晶的微观组织。搅拌摩擦工艺过程中, 前进侧 TMAZ 较后退侧相对变形剧烈,热量较高,发生 再结晶的条件更加充分^[15,16]。图(h)所示 5A06 的 HAZ 微 观组织与母材形貌相似,整体沿轧制方向拉长,晶粒尺 寸略有长大。

2A97/5A06 搅拌摩擦焊后接头各区域微观组织较母 材有明显差异,焊核区受搅拌针搅动发生剧烈塑性变形, 微观组织均由细小等轴晶组成。热影响区受热作用影响, 晶粒尺寸均有所增加。热力影响区受热力耦合作用,由 于材料差异及焊接前进后退侧工艺选择导致 2A97 侧形 成细小的等轴晶,而 5A06 侧形成细小等轴晶环绕大尺 寸晶粒组织。可见 2A97/5A06 异种铝合金搅拌摩擦焊后 接头微观组织存在明显的不均匀性,焊接板材在高温变 形过程中必然存在性能差异,因而对焊后不同区域性能 展开研究。



收到初稿日期:

基金项目:国家重点研发计划资助项目(项目号 2023YFB3407000) 作者简介:秦中环,男,1989 年生,硕士,正高级工程师,北京航星机器制造有限公司,北京100013,电话:010-88103660, qinzh20@mails.tsinghua.edu.cn





图 3 2A97/5A06 搅拌摩擦焊后接头微观组织及晶粒尺寸分布图

Fig.3 Microstructure and grain size distribution diagram of 2A97/5A06 friction stir welded joint: (a)(b)BM, (c)(d)NZ, (e)(f)TMAZ, (g)(h)HAZ

2.2 母材高温拉伸变形行为

如图 4 所示为 2A97 母材在 400~520℃高温拉伸真 应力真应变曲线,发现随实验温度的升高,材料的强度 明显下降。在同一温度下,应变速率越高,对应曲线的 峰值应力越大,表明应变速率对材料强化作用显著。当 应变速率为 10⁻³ s⁻¹时,温度从 400℃升高至 430℃,延 伸率由 231.3%增加至 278.8%。但随温度进一步增加, 延伸率逐渐下降,温度为 520℃时,延伸率仅为 54.3%, 此时较慢的应变速率不利于材料的高温成形,主要是由 于温度过高,晶粒长大速度较快,位错运动积累的变形 能被迅速消耗,不利于动态再结晶的发生^[17]。因此,2A97 母材在温度为 430℃、应变速率为 10⁻³ s⁻¹的条件下更有 利于高温成形。





Fig.4 High temperature tensile stress-strain curve of 2A97 base material: (a)400°C, (b)430°C, (c)460°C, (d)490°C, (e)520°C

5A06 母材高温拉伸结果如图 5 所示。曲线具有明显 的高温拉伸特点,在弹性变形后材料发生屈服,随即迅 速应变硬化达到峰值应力,之后流动应力下降,直至材 料发生断裂。流动应力随温度的升高而降低,随应变速 率的增加而增大。而延伸率并未一直随应变速率的降低 而增加,在温度为 400℃条件下,三种应变速率下拉伸 得到的延伸率接近,最高为 10⁻³ s⁻¹时的 145.8%。当拉伸 温度升高时,较慢的应变速率获得的延伸率最低,这是



图 5 5A06 母材高温拉伸真应力应变曲线图

Fig.5 High temperature tensile stress-strain curve of 5A06 base material: (a)400°C, (b)430°C, (c)460°C, (d)490°C, (e)520°C 如图 6 所示,在 400~520°C、应变速率 10⁻³~10⁻¹ s⁻¹ 范围条件下拉伸时,2A97 母材的峰值应力始终小于 5A06, 随拉伸温度的增加, 两者峰值应力差值逐渐减小, 应变速率为 10⁻¹ s⁻¹ 时,峰值应力差距较大。当温度为

由于应变速率较慢,保温时间较长,5A06 晶粒尺寸长大

430℃, 2A97 与 5A06 延伸率均保持较高水平, 在应变 速率为 10⁻³ s⁻¹ 条件下, 2A97 母材拉伸应力明显低于 5A06,5A06峰值应力为22.1MPa,而2A97仅为9.2 MPa。 但 2A97 的延伸率达到 278.8%, 远高于 5A06 的 120.6%。

s⁻¹条件下获得的延伸率最高,为259.5%。





Fig.6 Comparison of high temperature tensile properties of 2A97/5A06 base materials: (a)flow stress, (b)elongation

2.3 接头各区域高温拉伸变形行为

选取 430℃, 10⁻³ s⁻¹条件对平行于焊缝试样进行高 温拉伸实验,结果如图7所示。对比不同区域试样高温 拉伸性能发现, 2A97 侧 TMAZ 与 HAZ 峰值应力基本与 母材接近,且TMAZ 延伸率较母材明显增加,TMAZ 区 延伸率达到 407.8%,约为母材的 1.5 倍,表明 FSW 工 艺对 2A97 的超塑性能有明显提升作用。5A06 侧 TMAZ 试样峰值应力基本与母材相同,观察拉伸曲线发现试样 屈服后进入应变硬化阶段逐渐达到峰值应力,此时应变 约为0.4。而后发生应变软化,当应力约为15 MPa时发 生断裂。5A06 侧 HAZ 试样峰值应力明显高于母材及 TMAZ 试样,达到 23.6 MPa。HAZ 试样拉伸过程中弹 性变形结束后迅速达到峰值,随后进入应变软化阶段, 随应变增加应力下降速率较快直至断裂,延伸率仅为 $107.5\% _{\circ}$

NZ 拉伸试样峰值应力和延伸率分别为 18.4 MPa 和 176.1%,介于 2A97 与 5A06 所有区域的性能之间,符 合材料性能的叠加原则。NZ 试样由两种材料机械混合 搅拌而成,微观上局部位置仍保留原有材料特征,其性能兼具两者特点。拉伸峰值应力高于 2A97 母材但小于 5A06 母材,而延伸率则相较于 5A06 有明显提升但仍小于 2A97。按照性能叠加原则 $\sigma = \sum_{i=1}^{n} A_i \sigma_i$ 计算,其中 A_i

为第 i 种组分的横截面积占比, σ_i为第 i 种组分应力。计 算结果与实验结果误差仅为 8%。NZ 拉伸试样表面观察 到大量平行裂纹,这是材料拉伸过程中多段均匀变形的 典型特征,对比其他区域试样并未出现明显相关特征, 且试样标距段更加均匀,表明 NZ 区具有较好的协调变 形能力^[18]。

2A97 焊后各区域均保持较小的晶粒尺寸,因而在高 温拉伸变形过程中强度较低而延伸率较高,且各区域性 能较为接近。而 5A06HAZ 与母材微观组织形貌接近, 但晶粒尺寸略有增加,因此拉伸峰值应力较母材略高, 5A06TMAZ 区晶粒尺寸相差较大,大尺寸晶粒高温拉伸 变形抗力较高,而细小等轴晶粒高温下变形应力较低, 两者变形应力相互平衡抵消,因而拉伸峰值应力基本与 母材接近。NZ 由 5A06 与 2A97 的细小等轴晶混合而成, 拉伸过程中具有较高的协同性,因而在提升 2A97 强度 的同时延伸率较 5A06 也有明显增加。



Fig.7 (a)High temperature tensile curves, and (b)specimens in different regions after friction stir welding

2.4 垂直接头拉伸试样高温变形行为

如图 8(a)所示为搅拌摩擦焊后垂直试样 430℃时的 拉伸真应力真应变曲线。发现随应变速率的增加,拉伸 试样峰值应力增大,而延伸率逐渐下降,其中应变速率 为10⁻³ s⁻¹时的延伸率最高,达到 69.6%。观察图 8(b)中 断后试样发现,最终试样断裂位置均在焊缝相邻的 2A97 热力影响区,表明此处抗拉强度较低但高于焊接界面的 高温结合强度。当应变速率为 10⁻³ s⁻¹时,试样断裂附近 发生明显颈缩,可知 2A97 热力影响区整体软化效果明 显,流动应力较低,形成集中变形,试样标距段各区域 性能差异较大。随应变速率的增加,试样颈缩现象减弱, 说明高应变速率能一定程度缓解颈缩,促进材料的均匀 变形。本质上为高应变速率对材料的强化作用更加明显, 局部应变速率较高时材料迅速强化,进而促使材料均匀 变形。

观察图 8(b)垂直焊缝试样可以发现,高温拉伸过程 中5A06侧基本不发生变形,仅有2A97侧为有效变形段, 因而将高温拉伸曲线进行修正得到有效真应力真应变曲 线,表1为对应有效峰值应力及有效延伸率。有效峰值 应力高于平行试样,这是由于有效变形长度较短,实际 应变速率高,因而应力较高。而延伸率明显低于平行试 样,主要因为2A97 侧各区域组织仍存在一定差异,致 使垂直试样各区域性能不均匀,观察拉伸试样发现,垂 直试样颈缩明显,主要在2A97TMAZ 区集中变形,而 平行焊缝的拉伸试样较为均匀,容易获得较高的延伸率。



Fig.8 (a)High temperature tensile curves, and (b)specimen of vertical specimen after friction stir welding

表1 垂直试样有效力学性能

温度 T(℃)	应变速率 ϵ (s ⁻¹)	有效峰值应力 σ_p (MPa)	有效延伸率 δ (%)
430°C	10-3	12.0	139.2
	10 ⁻²	33.2	100.8
	10-1	48.9	44.8

NZ 均由细小的等轴再结晶组成,在高温拉伸变形 过程中,通常认为晶界滑动是主要变形机制^[19]。利用公 式(1)可以计算材料在高温拉伸过程中晶粒尺寸与流动 应力的定量关系^[20]。

$$\sigma = n \sqrt{\frac{\varepsilon kT}{ADGb} \left(\frac{d}{b}\right)^{\frac{p}{n}}} G \tag{1}$$

其中 n 为应力指数 (n=1/m), ε 为应变速率, k 为 玻尔兹曼常数, T 为热力学温度, A 为无量纲的材料常 数, D 为扩散系数, G 为剪切模量, d 为平均晶粒尺寸, b 为柏式矢量, p 为晶粒影响关系因子。

搅拌摩擦焊后 2A97 侧材料晶粒尺寸基本接近,因 而呈现出的流动应力基本相同。而 5A06 侧 NZ 晶粒尺 寸细小,流动应力较低,尽管 NZ 区为 2A97 与 5A06 混 合形成,但 5A06 整体强度较高于 2A97,强度主要取决 于 5A06。HAZ 晶粒尺寸较母材明显长大,因而峰值应 力有所增加。TMAZ 区晶粒组织形貌为细小等轴晶包围 长大晶粒,平均晶粒尺寸与母材接近,拉伸过程中峰值 应力基本接近。

3 结论

本文围绕2A97/5A06 异种铝合金搅拌摩擦对焊板不 均匀组织及高温协调变形行为开展研究。观察接头各区 域微观组织并分析不同区域变形情况与晶粒组织关系。 研究母材在400~520℃、应变速率为10⁻³~10⁻¹ s⁻¹范围 条件下高温变形行为,选取430℃、10⁻³ s⁻¹条件沿接头 焊缝方向各区域高温拉伸研究不同区域高温变形行为。 沿垂直焊缝方向切取试样高温拉伸研究接头整体变形行为。主要结论如下:

1. 2A97/5A06 搅拌摩擦焊后 NZ 晶粒组织细小,晶 粒尺寸分别为 2.2 μm 与 2.5 μm, 2A97 侧各区域平均晶 粒尺寸较小且基本接近,明显小于 5A06 侧各区域晶粒 尺寸,5A06 侧母材晶粒尺寸为 25.1 μm,各区域微观组 织差异明显。

2. 2A97 与 5A06 母材在 430℃下呈现出良好的变形 能力,应变速率为 10⁻³s⁻¹时分别达到 278.8%和 118.6%。 在 400℃~520℃温域范围内,整体上 2A97 较 5A06 流 动应力低而延伸率高。

3.2A97 侧各区域流动应力均低于 5A06 侧,但延伸 率明显高于 5A06 侧,而 NZ 区强度和延伸率分别为 18.4MPa 和 176.1%,均介于 2A97 与 5A06 之间,强度 约为 2A97 母材的 2 倍,延伸率约为 5A06 母材的 1.5 倍, 整体性能呈现出明显的叠加原理。

4. 搅拌摩擦焊后垂直焊缝高温拉伸变形时,各区域 由于变形抗力差异发生不均匀变形,在 2A97TMAZ 处 集中变形后发生断裂,修正后有效应力略高于母材而延 伸率基本接近母材。

参考文献 References

- Khalid M Y,Umer R,Khan K A. Results in Engineering[J],2023,20:101372
- [2] Wu Guohua(吴国华),Sun Jiangwei(孙江伟),Zhang Liang(张亮) et al. Nonferrous Metals Science and Engineering(有色金属科学 与工程)[J],2019,10(2):31
- [3] Zhang Chuanchen(张传臣), Zhang Tiancang(张田仓), Ji Yajuan(季

亚娟) et al. Rare Metal Materials and Engineering[J],2023,52(3):834

- [4] Patel V,Li W,Wang G et al. Metals[J],2019,9(3):270
- [5] Li Piao(李飘),Yao Weixing(姚卫星). Advances in Aeronautical Science and Engineering(航空工程进展)[J],2019,10(1):12
- [6] Dong Jialiang, Zhang Datong, Luo Xicai et al. Journal of Materials Research and Technology[J], 2020,9(3):4309
- [7] Zou Guotong, Xu Yaqi, Li Jun et al. Materials Science and Engineering: A[J], 2024, 891:145972
- [8] Xu Wenbin, Zhang Jiaheng, Pang Qiu et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [J], 2023, 128(5-6):2689
- [9] Sorgente D,Campanelli S L,Stecchi A et al. Journal of Manufacturing Processes[J],2016,23:287
- [10] Shao Yingkai(邵盈恺), Chen Li(陈俐), Li Zhiyong(李志勇) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)[J], 2024, 53(9): 2678
- [11] Song Kuijing(宋奎晶), Ji Yukai(季雨凯), Wei Yong(韦勇) et al.
 Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(10): 3461

- [12] Liu Xiaodong, Ye Lingying, Tang Jianguo et al. Materials Science and Engineering: A[J], 2022, 848:143403
- [13] Cheng Donghai(程东海), Zhang Futing(张夫庭), Liu Shiwei(刘 士伟) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材 料与工程[J], 2023, 52(12): 4361
- [14] Zhang Zhongke(张忠科),Li Xuanbai(李轩柏),Jiang Changmin
 (蒋 常 铭) et al. Rare Metal Materials and Engineering[J],2022,51(9):3443
- [15] Moradi M M,Aval H J,Jamaati R et al. Journal of Manufacturing Processes[J],2018,32:1
- [16] Li Shuai, Hou Xiaotong, Yan Dejun et al. Materials Today Communications [J], 2024, 39:109194
- [17] Li Qun, Ning Jian, Chen Lei et al. Journal of Alloys and Compounds[J], 2020, 848:156515
- [18] Texier D,Zedan Y,Amoros T et al. Materials & Design[J],2016,108:217
- [19] Masuda H,Sato E. Acta Materialia[J],2020,197:235
- [20] Vysotskiy I,Kim K,Malopheyev S et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China[J],2022,32(4):1083

Non-uniform Microstructure and High Temperature Coordinated Deformation Behavior of 2A97 / 5A06 Dissimilar Aluminum Alloy Friction Stir Butt Welded Plate

Qin Zhonghuan^{1,2}, Wu Aiping², Yin Hongliang³, Li Baoyong¹, Liu Qi¹, Wu Yong³

(1.Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2.Beijing Hangxing Machinery Manufacturing Co., Ltd, Beijing 100013, China)

(3.College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In this paper, the non-uniform microstructure and high temperature coordinated deformation behavior of 2A97 / 5A06 dissimilar aluminum alloy friction stir welded plate were studied. The microstructure of each area of the welded joint was observed, and the high temperature mechanical properties of each area and the whole joint was studied. It was found that the grains in the weld nugget zone of 2A97 and 5A06 were fine. The grain size of each region on the 2A97 side was small and basically close, and the grain size of each region on the 5A06 side was slightly larger and the difference was obvious. Under the process parameter of $430 \,^{\circ}$ C and $10^{-3} \, {\rm s}^{-1}$, the high temperature properties of 2A97 and 5A06 base metals are better, and the elongations are $278.8 \,^{\circ}$ and $118.6 \,^{\circ}$, respectively. The strength and elongation of the nugget zone of the joint are $18.4 \,^{\circ}$ MPa and $176.1 \,^{\circ}$, respectively, which are between 2A97 and 5A06. The strength is about 2 times that of the 2A97 base metal, and the elongation is about 1.5 times that of the 5A06 base metal. The overall performance shows an obvious superposition principle. The deformation resistance of each region is different. The vertical weld specimen fractured after concentrated deformation in the 2A97 thermo-mechanically affected zone. After correction, the flow stress was slightly higher than that of the base metal and the elongation was close to that of the base metal. The grain size and flow stress of each region after welding meet the creep equation. The smaller the grain size, the lower the flow stress.

Key words: dissimilar aluminum alloy; friction stir welding; non-uniform microstructure; coordinated deformation; flow stress

Corresponding author: Qin Zhonghuan, Master, Senior Engineer, Beijing Hangxing Machinery Manufacturing Co., Ltd, Beijing 100013, P. R. China, Tel: 010-88103660, E-mail: qinzh20@mails.tsinghua.edu.cn

桥桥桥桥桥桥桥桥桥桥桥桥桥桥桥桥桥桥桥桥

亲爱的编辑和审稿人:

非常感谢编辑和审稿人对稿件的审阅以及提出的宝贵意见和建议。在对您的意见进行认真阅读分析后,针对文章做出的修改已在文 中标记为蓝色。关于您的具体问题回复如下:

文章围绕 2A97/5A06 异种铝合金搅拌摩擦焊的试件组织及高温协调变形行为开展研究,详细阐述了晶粒尺寸和分布对试件高温协调 变形行为的影响。文章具有一定的创新性,且内容聚焦文章主题,但是依然存在一些问题需要作者解释或修改。如下:

 文章第三段中描述了 2A97 铝锂合金和 5A06 铝镁合金的研究背景,但是缺少对两者结合的意义及研究背景的阐述,建议补充。 非常感谢您对引言中 "2A97 与 5A06 异种铝合金结合意义与研究背景"的建议,已在对应位置补充完善。

为了进一步减轻航空航天飞行器结构重量,逐渐采用 2A97 等铝锂合金代替 5A06 铝合金。采用传统减材方式制造铝锂合金壁板等构件,材料利用率仅为百分之五左右,成本高昂。壁板等结构主要承载部位为加强筋位置,在壁板加强筋位置采用高强高刚度的铝锂合金, 而壁板蒙皮部位仍采用铝合金,通过搅拌摩擦焊实现壁板加强筋与蒙皮的连接,通过高温成形实现壁板加强筋的成形,极大地提升材料利用率,大幅降低制造成本,显著缩短制造周期,在高性能低成本航空航天飞行器制造上有广泛应用前景。

 2. 文章第三段中"选取 430℃、10⁻¹s⁻³ 条件沿接头方向各区域高温拉伸研究不同区域高温变形行为。"通读全文才知这是较优参数, 放在前言中不合理,建议此处重新组织语言。

非常感谢您对引言中研究内容总述的建议,在引言中确实无法了解到接头最优高温变形参数,具体应在后续研究过程中发现。已在 文中对应位置修改。

3. 在"1 实验"中,建议实验设备、实验材料和实验流程分别叙述,目前的介绍中三部分内容混为一起,条理不清晰,逻辑较乱。比 如在介绍拉伸试样尺寸时,集中进行介绍。

非常感谢您关于实验部分叙述流程的建议,文中对应部分已将"实验"部分分为"实验材料与制备""拉伸实验与组织表征"两部分。 本文对于实验设备内容涉及较少,因而将实验材料与设备合成为一段叙述,采用 2A97 与 5A06 作为原材料,使用航天工程装备(苏州) 有限公司(AEE)HT-JM16×8/1 龙门式焊机进行搅拌摩擦焊实验,第一部分交代了原始板材的制备方法。第二部分主要围绕具体研究内 容展开,又可分为两个主要部分,一是平行于接头研究不同区域的力学性能差异,二是垂直于接头整体性能研究。

关于拉伸试样尺寸部分介绍已集中至1.2小结段尾。

4. 在"2.1 搅拌摩擦焊后各区域微观组织"中,图2不清晰,标注不清楚,其中飞边、热影响区和热力影响的区分不明显。

非常感谢您对图 2 相关问题的建议,已将图片在对应位置修改。图 2 为搅拌摩擦焊后整体截面组织,已尽最大可能提升图清晰度,可以看出 2A97 与 5A06 搅拌摩擦焊后界面形貌,但各区域分界无法判断,实际区域判断借鉴了不同区域微观组织形貌差异,各区域具体 微观组织如图 3 所示。因此,本图标注的焊核区试样、热力影响区试样、热影响区试样指的是拉伸试样取样位置,与各区域划分并不完 全相同。

从宏观来看,焊核区及搅拌针插入搅拌的区域,位于焊缝正中心,尺寸基本与搅拌针大小相同;焊核区两侧至飞边处,同时受顶锻 力和热作用影响,热力影响区拉伸试样即选取飞边至焊核区试样边界;紧邻飞边外侧试样在焊接过程中仅受热作用影响,热影响区试样 从飞边开始至外侧取样。

5. 在 "2.1 搅拌摩擦焊后各区域微观组织"中图 3 的 a,b,c ··· 标注太不明显,建议放大并且加深颜色;建议统一比例尺;建议在图 3 中补充晶粒尺寸分布图。

非常感谢您对图 3 微观组织作图相关建议,已将 2.1 节中图 3 进行修改。

图中字符大小已按照期刊规定要求修改,同时为显示清楚加了白色背景作为底色,对比明显。

2A97 侧微观组织比例尺均一致,5A06 侧母材 (BM)、热力影响区 (TMAZ)、热影响区 (HAZ) 微观组织比例尺统一为 50 μm, 5A06 焊核区 (NZ) 晶粒细小,尺寸与 2A97 焊核区接近,因此比例尺选用与 2A97 侧相同的 10 μm。

图 3 中针对微观组织图已补充晶粒尺寸分布图。

6. 图 3 中 (f) 晶粒分布及尺寸很奇怪,建议解释清楚,图中的大尺寸晶粒是在什么条件下形成的,是正常的还是非正常的? 非常感谢您关于图 3 中 5A06 热力影响区大尺寸晶粒形成条件的疑问。

此区域受摩擦热与顶锻力耦合作用影响,部分晶粒在热影响下发生一定程度长大,属于正常长大。类似结果在文献中也有相关报道^[15,16]。

7. "显微组织"和"微观组织"意思相同,建议作者通篇统一用词,精简语句。

非常感谢您关于专业词汇表述问题的建议。已将全文"显微组织"统一表述为"微观组织"

 修改时,若 2023年以来《稀有金属材料与工程》中英文版有合适相关文献,建议更新替换并请在当前论文及后续研究中积极推广 新的修改稿中增加替换了4篇2023年以来贵期刊合适的相关文献,分别为参考文献[3][10][11][13]。