

铝锂合金搅拌摩擦焊研究现状

杨海峰^{1,2}, 刘德博³, 王非凡³, 周利^{1,2}, 赵洪运²

(1. 哈尔滨工业大学, 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学(威海), 山东省特种焊接技术重点实验室, 山东 威海 264209;

3. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 铝锂合金具有低密度、高比强度和比刚性、优良的低温性能、良好的耐腐蚀性能和超塑性等优点, 是理想的航空航天结构材料。搅拌摩擦焊作为一种新型的固相连接方法, 应用于铝锂合金焊接时展现出制造成本低、环境污染小和接头力学性能好等一系列优点。为进一步提升搅拌摩擦焊在铝锂合金焊接领域的应用, 文章从铝锂合金搅拌摩擦焊接头组织性能方面的国内外研究现状进行了综述, 并对未来铝锂合金搅拌摩擦焊的研究方向进行展望。

关键词: 铝锂合金; 搅拌摩擦焊; 组织性能

中图分类号: TG453.9

0 前言

铝锂合金具有低密度、高比强度、高比刚性、超塑性和良好的耐腐蚀性能, 相比于常规铝合金结构, 质量可减少 10% ~ 15%。使用铝锂合金对飞机上使用的传统铝合金进行替代, 可以继续使用之前铝合金的加工工艺和装备, 而且与复合材料相比, 铝锂合金的成形、维修等都较为方便, 成本也得到了极大的节省。因此, 铝锂合金被认为是一种拥有广阔的应用前景的航空航天结构材料, 在航空航天领域得到了广泛的关注, 国内相关部门机构也着重支持其研制工作^[1-6]。国外许多国家对于铝锂合金的研制研发工作相对于国内开始较早, 美国、俄罗斯等航空航天工业发达的国家都先后将其作为航空航天飞行器结构材料的重要内容来进行重点研究, 并且已经取得了一些重大进展。

铝锂合金采用传统熔焊工艺焊接时, 接头强度极难达到要求, 同时其表面的氧化膜结合牢固难以去除, 需要进行复杂的焊接预处理工艺, 才能解决焊接过程中产生的气孔、热裂纹等缺陷, 对铝锂合金在实际工业生产上的广泛应用产生了严重的制约^[7]。

搅拌摩擦焊 (Friction Stir Welding, FSW) 是由英国焊接研究所 (TWI) 发明的一种新型固态连接技

术^[8]。搅拌摩擦焊技术的出现有效地解决了在铝锂合金焊接过程中所出现的问题, 并且能够提高焊接接头性能。由于搅拌摩擦焊在焊接过程中产生的热量较低, 使得焊接材料在没有达到熔点温度就已经熔化。这样不仅防止了合金中锂元素的挥发, 而且也不容易产生脆性相和热裂纹, 焊接接头处的内部残余应力较低, 焊接后的强度系数高, 材料性能稳定, 接头质量比较高。并且搅拌摩擦焊有助于简化焊接工艺流程, 降低成本。基于以上优点, 使得搅拌摩擦焊在国内外的铝锂合金焊接中得到了普遍的应用和迅猛的发展, 同时其他的各个领域也得到了广泛的应用^[9-20]。

文章结合近年来铝锂合金的发展历程及焊接方面工作的研究进展, 详细综述了搅拌摩擦焊在铝锂合金焊接过程中取得的成效, 并对以后搅拌摩擦焊的发展趋势进行了展望。

1 铝锂合金发展历程

铝锂合金在航空航天领域展现出广阔的应用前景, 采用铝锂合金替代传统铝合金结构材料, 可以在较大程度提高刚度的同时减轻构件的质量^[21-22]。铝锂合金的研发至今已有 80 多年的历史, 其发展历程可以分为四个阶段。

第一阶段: 美国 Alcoa 铝业公司的 2020 合金成功研制, 然而这一时期铝锂合金延性低和韧性差, 无法满足航空工业对材料的性能要求。

第二阶段: 随着航空航天工业的迅猛发展, 各

国分别成功研制出了包括前苏联的中强度 Al-Mg-Li 合金系列 (1420, 1423) 和美国研制出的 2090, 8090A 合金等。然而, 这些铝锂合金制造成本高, 各向异性严重, 难以经济有效地应用于航空航天领域零部件中。

第三阶段: 通过降低 Li 含量, 开发出了一批在性能水平上较以往铝锂合金综合性能有着较大幅度提升的新型铝锂合金: 1460 和 Weldalite 系列合金、高韧的 2097, 2197 合金, 以及高抗疲劳的 C-155 合金等, 已分别应用于各国航空航天飞行器中。

第四阶段 (现阶段): 人们提出了第四代铝锂合金初步构想: 在保持第三代铝锂合金产品在弹性模量、疲劳性能及裂纹扩展速率方面良好性能的基础上, 欲将其所含锂 (Li) 元素的含量降到更低, 以求开发出更高

强度和断裂韧性的第四代铝锂合金。

2 铝锂合金熔化焊

铝锂合金在航空航天等领域的地位越来越重要, 应用也日趋广泛, 其相应的焊接技术也在不断的进步, 国内外学者对其焊接工艺的研究工作也越来越多, 包括传统的激光焊、双光束激光焊及其复合焊、熔化极氩弧焊 (MIG)、变极性等离子弧焊 (VPPA)、真空电子束焊接、TIG 焊等熔化焊方法, 取得了一定的成果^[23-24]。然而利用传统的铝锂合金熔化焊方法获得的焊接接头总是存在不同程度的锂元素烧损、接头软化、气孔、热裂纹等问题, 不能获得优质的铝锂合金焊接接头, 限制了铝锂合金在工业领域的应用。传统方法的铝锂合金熔化焊特点主要表现见表 1。

表 1 铝锂合金熔化焊焊接方法特点

焊接方法	焊接特点
熔化极氩弧焊 (MIG)	焊丝的熔化速度快, 熔敷速度高, 熔深大, 焊接接头的强度高。
变极性等离子弧焊 (VPPA)	优点在于精准的阴极清理作用并能实现小孔焊接, 既有利于焊缝的正面成形, 又有利于熔池中氢的逸出。
钨极氩弧焊 (TIG)	TIG 焊技术较为成熟, 具有低成本、通用性好、操作灵活、工作条件受限少等优点, 被广泛应用于国内外的铝锂合金焊接, 通常用于焊接 3 mm 以下的薄板。
激光焊 (LBW)	激光焊利用高能量密度的激光束作为热源熔化金属形成焊接接头, 它具有能量密度高、不受电磁力的影响、热输入小、热影响区小和焊接变形小、接头的残余应力低等优点; 铝锂合金由于自身材料的原因, 其对激光束具有较大的反射率, 因此对于激光深熔焊接过程中能量的吸收较少, 这导致焊接过程中稳定性普遍较差以及焊接效率低下等一系列问题。
真空电子束焊接 (EBW)	真空电子束焊接 (EBW) 作为高能密度焊接的一种, 其能量密度仅次于激光焊, 相较于激光焊其显著特点是焊缝相对较窄且热影响区较小, 焊后得到的组织较母材更为细小, 在铝锂合金深熔焊中更为适用。

3 铝锂合金搅拌摩擦焊

3.1 接头温度场

王大勇等人^[25]针对铝锂合金搅拌摩擦焊接过程中的温度场分布进行了研究, 研究中发现搅拌摩擦焊过程中, 对于焊件上任意一点来说, 若该点与搅拌头行进过程中所处的点连成的直线与焊缝垂直, 则此时该点达到最大热循环温度值, 并在之后因搅拌头远离而迅速下降。而焊缝的起点与终点, 分别由于搅拌头的扎入过程和提起过程的影响, 导致两端点的热循环温度低于焊缝其它部位。除焊缝两端点之外, 焊缝材料均受稳定热循环作用。其中, 焊接热循环温度最高点在

焊缝中心, 为 415 ℃。而焊缝两侧的热循环作用不一致, 后退侧略低于前进侧 7 ~ 12 ℃。

3.2 接头组织特征

姚友强^[26]在研究中发现 2060 铝锂合金 FSW 接头上表面的组织特征。搅拌区 (SZ) 组织为等轴晶粒组织; 热力影响区 (TMAZ) 的金属塑性变形比较明显, 晶粒发生扭曲拉长, 而且部分晶粒发生再结晶现象; 热影响区 (HAZ) 的金属因为在焊接过程中只是受到一定的热循环作用, 晶粒没有明显变化。搅拌摩擦焊搭接焊接时, 搅拌针的尺寸选择不当, 焊缝中容易出现缺陷, 有时甚至使得焊缝不能成形。梁佩等人^[27]采用搅拌摩擦焊 (FSW) 对 1.4 mm 厚 2A97 铝锂合金的搭接接头的

组织性能进行了研究,研究了搅拌针的长度对接头的组织性能的影响。研究中发现,搅拌针长度对搭接接头结合界面两侧钩状缺陷的影响较大,而转速对其影响甚微;钩状缺陷会影响有效承载板厚,进而影响搭接接头强度;搅拌针长 1.5 mm,转速为 1 200 r/min,获得的搭接接头钩状缺陷高度最小,有效承载板厚最大,如图 1 所示。

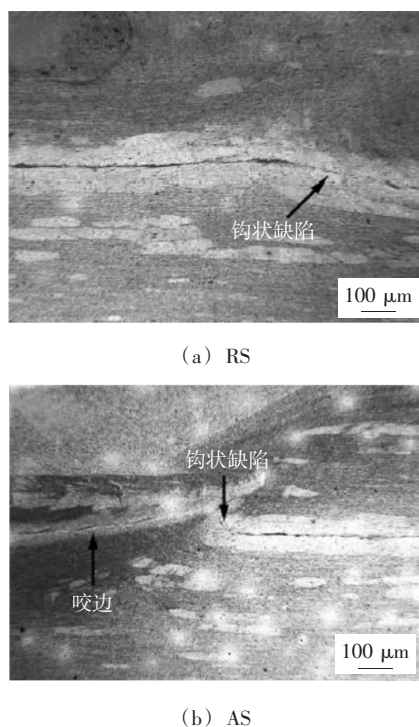


图 1 搅拌针长 1.5 mm 时钩状缺陷照片

蔡彪^[28]和 Ho-Sung Lee^[29]等人的研究中均发现铝锂合金搅拌摩擦焊接头焊核区内本来基材中存在的 T_1 相和 θ'' 相等强化相,由于搅拌和高温的作用发生了溶解;热力影响区内 T_1 相、 θ'' 相和 S' 相完全溶解,导致了硬度值的下降;热影响区内 T_1 相、 θ'' 相仍然存在,硬度的下降可能是由于经历了复杂的沉淀相溶解,粗化现象如图 2 所示。

国内外的很多专家学者为使获得的铝锂合金的搅拌焊接头的组织性能更为优良,对传统的搅拌焊设备的焊具以及焊接环境进行改良和优化,对接头组织性能的改善进行了有益的尝试。Jannik Goebel 等人^[30]采用半固定轴肩的方式 SSUBT-FSW(一个轴肩旋转,另外一个轴肩固定)研究了 2198-t851 铝锂合金的搅拌摩擦焊接性能,如图 3 所示。在研究中发现,焊接接头形成的宏观组织是不对称的沙漏型;接头在 SZ 区发生断裂原因是由于热循环的影响引起的,发生在 HAZ 区的断裂是较大的塑性变形和热循环的共同作用引起的,如图 4 所示。

沈浩然等人^[31]主要研究了 2197 铝锂合金蒙皮结构静止轴肩搅拌摩擦焊技术(SSFSW),实现了基于轴肩静止的焊缝表面与母材几无差异的搅拌摩擦焊焊接;研究表明采用 SSFSW 技术,焊缝表面光洁,厚度无减薄,内部无缺陷,如图 5 所示;采用 SSFSW 技术获得的焊接接头组织部分与常规搅拌摩擦焊接头组织对比有一定的区别:①轴肩影响区无法观测到;②焊缝区域宽度较小,几乎很难看到;③热影响区晶粒度比常规 FSW 大,晶粒却尺寸小,如图 6 所示。

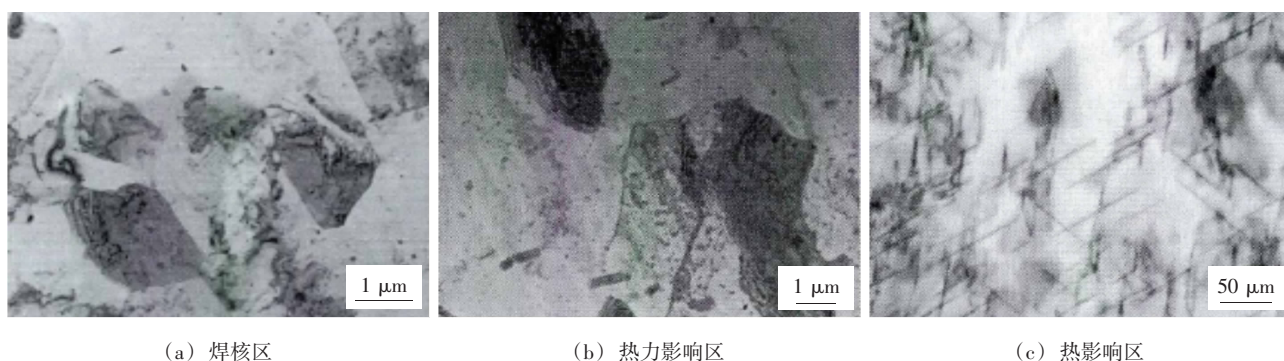


图 2 搅拌焊接头各区域 TEM 组织照片

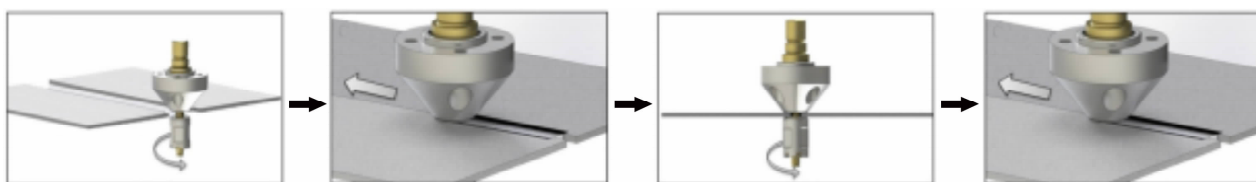


图 3 SSUBT-FSW 焊接过程

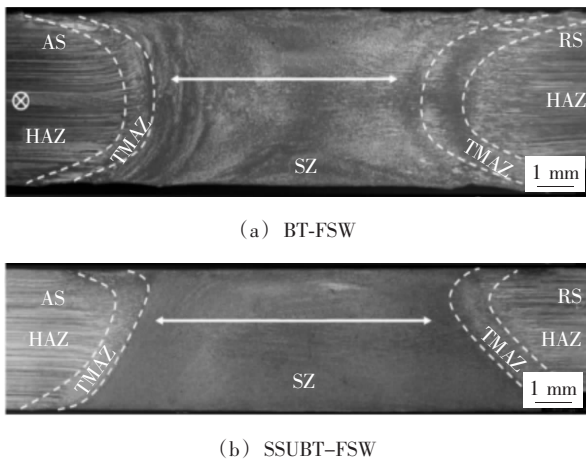


图4 BT-FSW 和 SSUBT-FSW 两种接头的显微组织照片

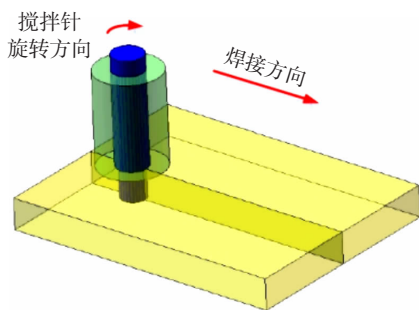
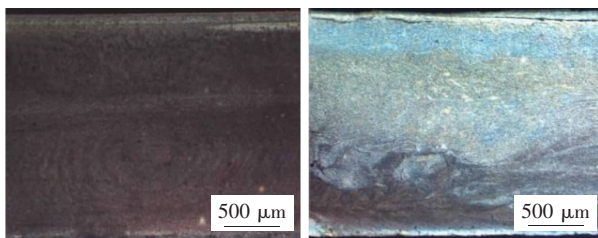


图5 静止轴肩 FSW 示意图



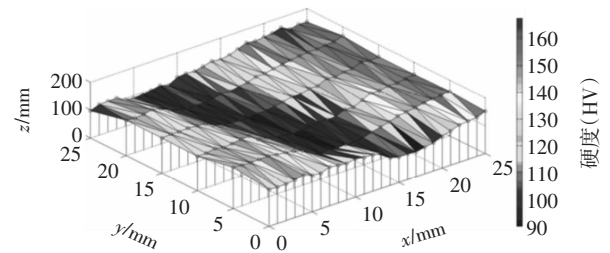
(a) SSFSW 焊核区 (b) FSW 焊核区

图6 对接接头焊核区形貌

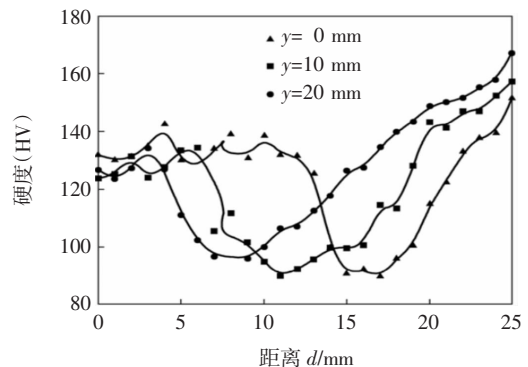
3.3 接头力学性能

搅拌摩擦焊的工艺参数对接头的力学性能产生较大的影响。张华等人^[32]采用不同搅拌摩擦焊接工艺参数对 2A97 铝锂合金的焊接性能进行了研究。研究表明:接头抗拉强度和断后伸长率随焊接旋转速度的提高而降低,随焊接速度的提高先增后减;FSW 接头拉伸试验断口位置基本都发生在焊核(NZ)区;焊核区和热力影响区中沉淀相大部分溶解,只有少数存留,热力影响区沉淀密度高于焊核区。蔡彪等人^[33]对厚度为 25 mm 的 T851 态 2A97 铝锂合金进行搅拌摩擦焊对接接头进行了研究。研究表明:接头基材硬度最高,热影响区和热力影响区硬度降低,焊缝中心

硬度又升高,硬度最低位置在热影响区;焊核区发生动态再结晶,形成细小等轴的晶粒;热影响区的 T_1 相部分溶解, S' 相全部溶解,析出 θ'' 相、 δ' 相和 δ'/β' 的复合相,如图 7 所示。



(a) 焊缝沿厚度方向的显微硬度面分布

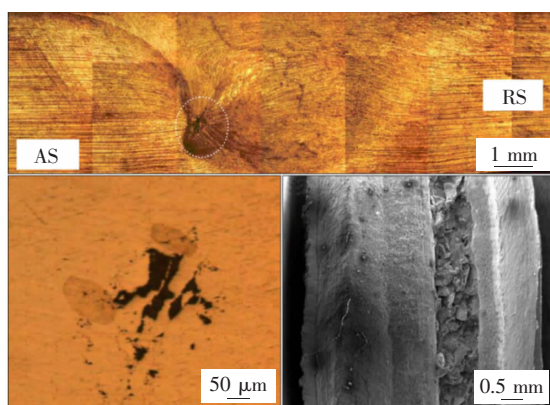


(b) 水平方向硬度线分布

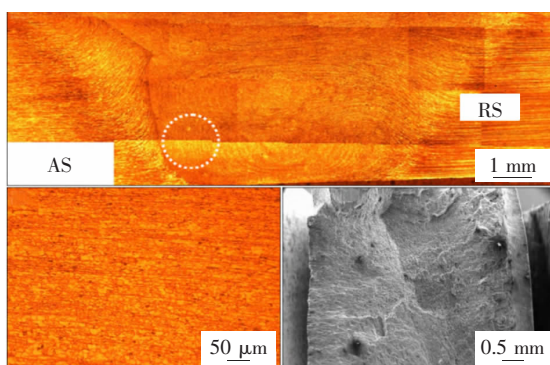
图7 搅拌头硬度分布

陈永来等人^[34]采用圆柱形搅拌头和带螺纹搅拌头研究了 2195-T8 铝锂合金摩擦搅拌焊接头的强度关系。研究表明,采用带螺纹搅拌头可以消除贯穿整个接头的隧道型缺陷(连续孔洞)接头的缺陷,有效提高接头抗拉强度,如图 8 所示。美国德克萨斯大学 Harpreet Sidhar 等人^[35]采用搅拌摩擦焊方法对 1424 铝-镁-锂合金进行焊接,试验过程中采用转速 800 mm/min,焊接速度 305 mm/mm 的焊接参数。采用不同的冷却介质制备了两种不同热状态的焊缝。在该工具中的温度记录每个焊缝中心。焊后热处理后,完全恢复在热影响区和焊接熔核处观察到强度,接头强度高达母材的 97%。

F. F. Wang 等人^[36]采用搅拌摩擦焊方法成功地焊接了第三代铝锂合金 AA2198,研究中发现,焊缝接头搅拌区呈沙漏状,由再结晶的 Al 颗粒和残留在溶液中的沉淀物组成。在焊缝厚度方向上得到了对称的硬度分布,表明接头具有均匀的贯穿厚度力学性能。接头的抗拉强度随转速的增大而增大,最大强度效率达到 80%;观察到接头有三种断裂模式:搅拌区、热影响区、



(a) 圆柱搅拌头横截面金相照片及拉伸断口 SEM 图像



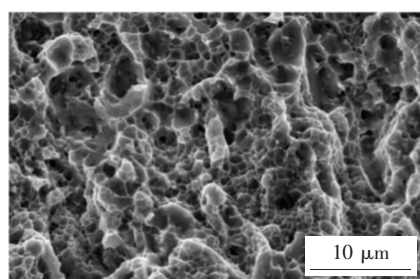
(b) 螺纹搅拌头横截面金相照片及拉伸断口 SEM 图像

图 8 摩擦搅拌焊接头横截面金相照片及拉伸断口 SEM 图像

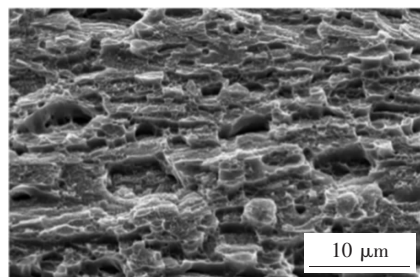
热力影响区与搅拌区交界处。如图 9 所示。而且研究人员还发现^[37],在焊接速度低于 100 mm/min 时,接头断裂模式为沿晶 + 穿晶混合型断裂;焊接速度提高到 200 mm/min 时,接头断裂模式为韧脆混合型断裂;当焊接速度大于 200 mm/min 时,随着焊接速度的提高,接头断口形貌由存在部分塑性断裂特征变化到完全为脆性断裂特征,但接头整体断裂模式为沿晶 + 穿晶混合型断裂。力学性能测试结果表明,随着焊接速度的提高,断后伸率先增加,并在焊接速度等于 200 mm/min 时达到最大值,继续提高焊接速度,断后伸长率下降。

虽然在大部分铝锂合金的搅拌摩擦焊接头的拉伸试验断裂位置发生在焊核区的最低硬度部位,然而,2198-T8 态的搅拌摩擦焊接头的断裂位置却发生在搅拌针过渡区,Y. Tao 等人^[38]在研究中发现,在焊核区细分的过渡区时再结晶晶粒粗大以及在焊核区细分的过渡区晶界锂元素偏析富集,容易发生沿晶断裂,是造成搅拌摩擦焊接头的拉伸试验断裂在搅拌针过渡区的原因所在。

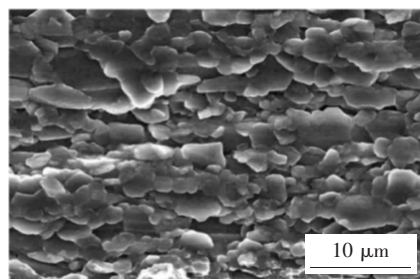
马玉娥等人^[39]对 2198-T8 铝锂合金机身整体壁板



(a) 搅拌区



(b) 热影响区



(c) 热力影响区与搅拌区交界处

图 9 搅拌摩擦焊接头典型断裂模式下的断口照片

的搅拌摩擦焊接头进行疲劳试验。结果表明,疲劳寿命会因为焊缝位置的不同而不同,尺寸相同的双焊缝试件与单焊缝试件进行对比,发现前者的疲劳寿命为后者的 5 倍。因此,在设计整体焊接壁板时,可以活用这一特点来提高其性能。产生不同疲劳寿命的原因是因为单焊缝两侧残余应力均为拉应力,而双焊缝的焊缝周围残余应力为压应力,从而使得疲劳载荷比 R 等疲劳参数发生改变,进而影响疲劳寿命。随着裂纹的扩展,残余应力重新分布, K_{res} 与残余应力有着相似分布趋势。

4 结束语

现代制造业的重要基础是先进材料及其和它相匹配的制造工艺,在航空航天等诸多高技术领域尤为突出。铝锂合金是一种轻质高强结构材料,它具有广泛的应用前景;未来的发展趋势可以通过不断优化合金本身的化学成分,使其结构设计更加合理,并且深入研

究其焊接工艺和焊接性,以实现铝锂合金构件在实际应用中的安全可靠。

目前,各国学者对铝锂合金的搅拌摩擦焊做了较多研究工作,也取得了较好的成果,但发现在应用中仍然存在一些不足:如只适用于直缝、环缝,不能进行形状不规则的曲面加工;焊接效率不高;需切除焊缝末端遗留的孔洞;增加工序浪费材料;搅拌头磨损较为严重,且铝锂合金在 FSW 中易与搅拌头粘连,需及时修复,影响效率。随着搅拌摩擦焊技术的研究和展,搅拌摩擦焊的应用领域逐渐扩大。作为一种全新的绿色连接技术,搅拌摩擦焊在未来的铝锂合金焊接上必然会被广泛应用。

参考文献

- [1] 高恩志,王杰,李作成,等. 5A90 铝锂合金搅拌摩擦搭接焊接头组织与性能分析[J]. 热加工工艺, 2018(11): 22-24.
- [2] 郭顺,彭勇,周琦,等. 2195 铝锂合金和 TC4 钛合金异种金属电子束焊接行为研究[J]. 真空科学与技术学报, 2018(2): 81-86.
- [3] 樊琦. 5A90 铝锂合金焊接接头组织及性能研究[D]. 南昌:南昌航空大学硕士学位论文,2015.
- [4] 尹登峰,郑子樵. 铝锂合金研究开发的历史与现状[J]. 材料导报, 2003, 17(2): 18-20.
- [5] Tayon, Wesley A, Domack, et al. Texture evolution within the thermomechanically affected zone of an Al-Li alloy 2195 friction stir weld[J]. Metallurgical & Materials Transactions Part A, 2013, 44(11): 4906-4913.
- [6] Agilan M, Anbukarasi R, Venkateswaran T, et al. Studies on friction stir welding of Al-Cu-Li (AA2195) alloy[J]. Materials Science Forum, 2015, 830-831: 274-277.
- [7] Shu B, Guo X M, Zhang C X. Microstructures and properties of friction-stir welded joint of 2195 Al-Li alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30(4): 12-15.
- [8] Mishra R S, Ma Z Y. Friction stir welding and processing[J]. Materials Science and Engineering: Reports, 2010, 50(1-2): 1-78.
- [9] Lee Y R, Jung H H, Yoon J H, et al. A study on mechanical properties of friction stir welded and electron beam welded AA2195 sheets[J]. Advanced Materials Research, 2015, 1105: 178-181.
- [10] Lee H S, Yoon J H, Yoo J T, et al. Friction stir welding process of aluminum-lithium alloy 2195[J]. Procedia Engineering, 2016, 149: 62-66.
- [11] Zhang J, Feng X S, Gao J S, et al. Effects of welding parameters and post-heat treatment on mechanical properties of friction stir welded AA2195-T8 Al-Li alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(1): 219-227.
- [12] 郭晓娟,李光,董春林,等. 1420 铝锂合金搅拌摩擦焊接力学性能[J]. 焊接学报, 2009, 30(4): 45-48.
- [13] 束彪,国旭明,张春旭. 2195 铝锂合金搅拌摩擦焊接头组织及性能[J]. 航空材料学报, 2010(4): 12-15.
- [14] 王大勇,冯吉才,王攀峰. 铝锂合金搅拌摩擦焊研究[J]. 材料科学与工程学报, 2005, 23(3): 369-372.
- [15] 张华,孔德跃,陈雪峰,等. 2A97 铝锂合金搅拌摩擦焊[J]. 焊接学报, 2012, 33(5): 41-44.
- [16] 邢丽,宋晓,柯黎明,等. 2198 和 C24S 异种铝锂合金搅拌摩擦焊接头的显微组织和力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(7): 1714-1720.
- [17] 蔡彪,郑子樵,孙景峰,等. 2A97 铝锂合金搅拌摩擦焊焊缝的微观组织特征[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2012, 17(2): 147-152.
- [18] 回丽,王岩,王磊,等. 铝锂合金搅拌摩擦焊接头性能研究[C]. 福建 厦门:全国疲劳与断裂学术会议会议程序册,2012.
- [19] 颜敏. 2 系铝锂合金搅拌摩擦焊接工艺研究[D]. 沈阳:东北大学硕士学位论文,2013.
- [20] 王非凡. Al-Li 合金双轴肩搅拌摩擦焊成形机制及性能研究[D]. 西安:西北工业大学博士学位论文,2016.
- [21] Karabin L M, Bray G H, Rioja R J, et al. Al-Li-Cu-Mg-(Ag) products for lower wing skin applications[M]. ICAA13 Pittsburgh. Springer International Publishing, Germany, 2012.
- [22] Magnussen P E, Mooy D C, Yocum L A, et al. Development of high toughness sheet and extruded products for airplane fuselage structures[J]. Icaa13 Pittsburgh, 2012: 535-540.
- [23] 李志远,钱乙余. 先进连接方法[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [24] 周利,李高辉,刘朝磊,等. 铝锂合金焊接技术的研究现状[J]. 焊接, 2017(1): 7-12.
- [25] 王大勇,冯吉才,刘会杰. Al-Li-Cu 合金搅拌摩擦焊与 TIG 焊接头组织及力学性能分析[J]. 焊接, 2004(11): 12-14.
- [26] 姚友强. 2060 铝锂合金搅拌摩擦焊接头组织及腐蚀行为[D]. 河北 秦皇岛:燕山大学硕士学位论文,2013.
- [27] 梁佩,陈海燕,刘奋军,等. 2A97 铝锂合金搅拌摩擦搭接焊界面形貌研究[C]. 兰州:全国焊接学术会议,2015.
- [28] 蔡彪. C24S 铝锂合金搅拌摩擦焊接工艺、组织和性能研究[D]. 长沙:中南大学硕士学位论文,2011.

- [29] Lee H S, Yoon J H, Yoo J T, et al. Friction stir welding process of aluminum-lithium alloy 2195[J]. Procedia Engineering, 2016, 149:62–66.
- [30] Goebel J, Reimann M, Norman A, et al. Semi-stationary shoulder bobbin tool friction stir welding of AA2198-T851[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 245:37–45.
- [31] 沈浩然, 贾洪德, 姚君山, 等. 2197 铝锂合金蒙皮结构焊缝静止轴肩搅拌摩擦焊工艺研究[C]. 南昌:中国机械工程学会焊接学会全国焊接学术会议, 2013.
- [32] 张华, 孔德跃, 陈雪峰, 等. 2A97 铝锂合金搅拌摩擦焊[J]. 焊接学报, 2012, 33(5):41–44.
- [33] 蔡彪, 郑子樵, 孙景峰, 等. 2A97 铝锂合金搅拌摩擦焊焊缝的微观组织特征[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2012, 17(2):147–152.
- [34] 陈永来, 李劲风, 张绪虎, 等. 2195 铝锂合金摩擦搅拌焊接头组织[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(5):964–972.
- [35] Sidhar H, Martinez N Y, Mishra R S, et al. Friction stir welding of Al-Mg-Li 1424 alloy[J]. Materials & Design, 2016, 106:146–152.
- [36] Wang F F, Li W Y, Shen J J, et al. Effect of tool rotational speed on the microstructure and mechanical properties of bobbin tool friction stir welding of Al-Li alloy[J]. Materials & Design, 2015(86):933–940.
- [37] 王大勇, 冯吉才, 刘会杰. 焊接速度对铝锂合金搅拌摩擦焊接头断裂特性的影响[J]. 焊接, 2003(10):16–19.
- [38] Tao Y, Ni D R, Xiao B L, et al. Origin of unusual fracture in stirred zone for friction stir welded 2198-T8 Al-Li alloy joints[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 693:1–13.
- [39] 马玉娥, 刘宝琪, 赵振强. 铝锂合金 2198-T8 机身整体搅拌摩擦焊接壁板的疲劳性能研究[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(1):98–102.

第一作者简介: 杨海峰, 1988 年出生, 博士研究生, 工程师; 主要研究方向为轻质合金连接及材料表面改性。

[上接第 20 页]

- [2] Kwok C T, Cheng F T, Man H C. Laser surface modification of UNS S31603 stainless steel using NiCrSiB alloy for enhancing cavitation erosion resistance[J]. Surface and Coatings Technology, 1998, 107: 31–40.
- [3] Schopphoven T, Gasser A, Wissenbach K, et al. Investigations on ultra-high-speed laser material deposition as alternative for hard chrome plating and thermal spraying[J]. Journal of Laser Applications, 2016, 28(10): 022501.
- [4] Lei K Y, Qin X P, Liu H M, et al. Analysis and modeling of melt pool morphology for high power diode laser cladding with a rectangle beam spot[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 110: 89–99.
- [5] Muvvala G, Karmakar D P, Nath A K. Online monitoring of thermo-cycles and its correlation with microstructure in laser cladding of nickel based superalloy[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 88: 139–152.
- [6] Tanigawa D, Abe N, Tsukamoto M, et al. The effect of particle size on the heat affected zone during laser cladding of Ni-Cr-Si-B alloy on C45 carbon steel[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 101: 23–27.
- [7] Liu J Q, Yu H J, Chen C Z. Research progress of laser cladding self-fluxing alloy coatings on titanium alloys[J]. China Welding, 2018, 27(2): 45–51.
- [8] 马群双, 李亚江, 王娟, 等. 宽束激光熔覆 Ni60/WC 复合层显微组织及抗剪强度[J]. 焊接学报, 2016, 37(12): 49–52.
- [9] 李美艳, 韩彬, 蔡春波, 等. 激光熔覆镍基合金温度场和应力场数值模拟[J]. 焊接学报, 2015, 36(5): 25–28.
- [10] Li R F, Li Z G, Huang J, et al. Effect of Ni-to-Fe ratio on structure and properties of Ni-Fe-B-Si-Nb coatings fabricated by laser processing[J]. Applied Surface Science, 2011, 257: 3554–3557.
- [11] Qu C C, Li J, Bai L L, et al. Effects of the thickness of the pre-placed layer on microstructural evolution and mechanical properties of the laser-clad coatings[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015(644): 450–463.
- [12] Gedda H, Kaplan A, Powell J. Melt-solid interactions in laser cladding and laser casting[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2005, 36: 683–689.

第一作者简介: 胡方勤, 1979 年出生, 硕士, 高级工程师; 主要从事表面工程研究; 已发表论文 20 余篇。

通讯作者简介: 张青科, 1985 年出生, 博士, 副研究员; 主要从事焊接与表面工程研究; 已发表期刊论文 60 余篇。