

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2022.01.016

铝锂合金超塑成形/扩散连接技术研究进展

王增宇¹ 李媛² 王斌³ 李升³ 李细锋^{1*} 梁承锵⁴

(1. 上海交通大学, 上海 200030; 2. 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094;

3. 北京星航机电装备有限公司, 北京 100074; 4. 东莞市横沥模具科技产业发展有限公司, 东莞 523460)

摘要: 轻量化材料与结构是现代航空航天工业的发展方向。铝锂合金密度小, 比强度、比弹性模量高, 是理想的航空航天材料。采用超塑成形/扩散连接工艺成形的空心夹层结构零件具有整体性好、设计自由度大、成形精度高、无残余应力等优点, 而且能够大幅减重、降低成本, 广泛应用于航空航天领域。针对航空航天领域对新一代复杂多层结构件整体化和轻量化的迫切需求, 回顾了国内外铝锂合金的发展历程, 介绍了国内外铝锂合金超塑成形、扩散连接以及超塑成形/扩散连接组合技术的发展现状及其在航空航天领域的应用, 指出铝锂合金表面致密稳定氧化膜是阻碍其扩散连接接头质量提升的瓶颈问题, 讨论去除铝锂合金表面的氧化层以及防止新的氧化层再生的相关工艺与机理, 最后展望了铝锂合金超塑成形/扩散连接技术在航空航天领域的应用前景以及未来研究方向。

关键词: 铝锂合金; 超塑成形; 扩散连接; 氧化膜

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

OSID:



0 引言

目前轻质金属材料在生产生活上的应用日益广泛, 如航空航天、汽车及轨道交通、船舶、电子电器等, 这使得工业领域对轻质材料的需求更为迫切, 质量要求也更为提高。满足航空航天要求的金属材料一般需要具备高强度、低密度的特性, 铝锂合金满足以上条件, 而且比弹性模量较高, 是理想的航空航天材料。目前铝锂合金已经被用来制造飞机的机身框架、襟翼翼肋、电子设备盖板、飞机检修舱门等重要结构^[1]。锂元素是最轻的金属元素, 铝锂合金中的锂元素含量每提高 1%, 合金密度就会降低 3%, 同时弹性模量会提高 6%, 这大大提高了材料的拉伸强度、塑性和抗疲劳性能^[2]。但铝锂合金的成形性差, 容易开裂, 各向异性比传统铝合金更明显, 因此采用传统的成形方式效果不好。超塑成形技术 (Superplastic forming, 简称 SPF) 是一种铝锂合金薄

壁中空构件的制造工艺, 它是通过形变热处理的方式获得细晶组织, 从而实现铝锂合金的超塑性。这种成形方式不仅能够降低成本, 减轻重量, 还能够提高结构件的稳定性和可靠性, 因此可以为我国的航空航天工业带来巨大的经济效益^[3]。

超塑成形技术是指在特定温度和应变速率条件下的材料会呈现超塑性, 利用气压差将材料压入模具内部实现成形的一种加工工艺^[4]。扩散连接 (Diffusion bonding, 简称 DB) 技术是指相互接触的表面在高温和压力的作用下, 被连接表面相互靠近, 局部发生塑性变形, 经过一定的时间后结合层原子间相互扩散, 形成整体的可靠连接的过程^[5]。SPF/DB 工艺就是两种技术的相互结合, 可以充分发挥两种成形工艺的优势, 成形复杂的中空结构件^[6]。该技术可以减轻结构件的整体重量, 使一些复杂的结构整体化, 提高其整体的稳定性, 而且大大缩短了制造周期, 降低了制造成本。SPF/DB 工艺在钛合

基金项目: 上海市国际科技合作基金项目 (项目编号: 19110712700)

* 通信作者: E-mail: lixifeng@sjtu.edu.cn

引用格式: 王增宇, 李媛, 王斌, 等. 铝锂合金超塑成形/扩散连接技术研究进展[J]. 民用飞机设计与研究, 2022(1): 138-144.

WANG Z Y, LI Y, WANG B, et al. Research progress of Al-Li alloy superplastic forming/diffusion bonding technique [J]. Civil Aircraft Design and Research, 2022(1): 138-144 (in Chinese).

金中的应用范围较大,在铝锂合金的应用范围较小。根本原因在于,室温下铝锂合金表面极易形成一层致密稳定的氧化膜,且在扩散连接过程中氧化膜既不解 散也不溶解于基体,严重阻碍铝原子的相互扩散^[7]。因此对铝锂合金扩散连接的研究已成为当前的学术研究热点之一。

铝锂合金 SPF/DB 工艺的难点主要在扩散连接。铝锂合金的扩散连接与钛合金有所不同,钛合金表面较薄的氧化膜可在高温下溶解于基体中,使得钛合金的 SPF/DB 过程容易进行,而铝锂合金表面的氧化膜却极稳定,具有“旧膜难去,新膜易生”的特点^[8]。对铝锂合金表面进行有效处理,消除氧化膜对扩散连接过程的不利影响,获得可靠的扩散连接界面是铝锂合金 SPF/DB 技术亟待解决的关键问题。

1 铝锂合金超塑成形技术研究现状

1.1 国外铝锂合金超塑成形技术发展历程

铝锂合金的超塑性研究经历了从理论积累到工业化应用的发展转变,国外研究机构已经实现对工业用铝锂合金超塑性材料制备的突破。上世纪 80 年代初,PANDEY^[9]等最先研究 Al-Li 系合金的超塑性,探究在 450℃ 下两种成分几乎相同的铝锂合金的超塑性变形行为,一种通过铸锭冶金(Ingot metallurgy,简称 IM)生产,另一种通过快速凝固粉末冶金(Rapid solidification powder metallurgy,简称 PM)生产。通过对比发现,IM 合金表现出更高的超塑性变形行为,延展性也优于 PM 合金。1991 年英国宇航公司应用 SPF 技术生产制造 EAP 战斗机的起落架舱门,舱门采用 8090 铝锂合金材料,使零件数量大大减少,减重 20%^[11]。美国麦道公司用铝锂合金板材制造 C-17 运输机货舱的地板梁、襟翼副翼蒙皮等结构,用量达 2.8 t,比用普通铝合金减重 208 kg。日本住友金属公司与三菱公司采用铝锂合金超塑成形技术,制造出飞机隔板门整体结构件。2001 年加拿大曼尼托巴大学 FAN^[10]等在 530℃ 下,观察到 8090 铝锂合金超塑板材在整个厚度横截面包含不同微观结构和微观纹理,通过对全厚度、近表面和中间厚度层的试样进行拉伸测试,研究了超塑性行为与其微观结构演变的关系,发现全厚度、近表面和中心材料的应变率敏感指数最大值分别为 0.82、0.6 和 0.56,在 $\epsilon = 1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时,相应的延伸率为 475%、420% 和 286%。

1.2 国内铝锂合金超塑成形技术发展历程

我国对超塑性铝锂合金的研究开始于上世纪八十年代末,东北大学、北京科技大学和中南大学等单位做了大量相关研究工作。东北大学刘志义^[11]首次将电致塑性和电致迁移理论应用于超塑变形,通过施加脉冲电流使 2091 铝锂合金的变形速率提高了 40 倍。北京科技大学任学平^[12]等通过在 350℃ ~ 430℃ 下的拉伸试验,研究了轧制 2A97 铝锂合金在多种应力状态下的超塑成形性能。研究发现,提高超塑成形温度可以改善成形零件的厚度分布,但可能会导致过度空化,而且 2A97 铝锂合金超塑性成形极限的确定不能简单地用成形极限图来表示,需要考虑内部空化的附加指标。中南大学的刘晓东^[13]等采用微观分析技术研究了具有初始带状晶粒的 Al-Mg-Li 合金超塑性变形行为和微观组织演变过程。结果表明,在拉伸过程中,初始带状晶粒转变为等轴晶,并伴随着动态再结晶。动态再结晶细化了晶粒尺寸,增加了大角度晶界并减少了织构。在超塑性变形初期,位错积累明显,抵消了动态再结晶引起的软化效应。中南大学李红萍^[14]等研究了细晶 2050Al-Cu-Li 铝锂合金在高温和慢应变速率下的变形行为和显微组织演变。结果表明,扩散蠕变是超塑性变形过程的主导机制,晶界滑动作为协调机制参与其中,铝锂合金的扩散传输主要通过晶界完成,晶内扩散的影响不显著。

1.3 铝锂合金超塑成形技术应用

铝锂合金具有优异的超塑特性,延伸率高,作为商用金属材料具有广阔的应用前景。通过对多种牌号铝锂合金的超塑性能进行研究,所得结果如表 1 所示^[15]。研究表明不同成分的铝锂合金材料在不同的超塑性变形温度和应变速率作用下,最终得到的延伸率也不同,这体现出了铝锂合金超塑性变形的复杂性。

表 1 典型的铝锂合金超塑性^[15]

牌号	组成/wt%	SPF 变形 温度/℃	应变速 率/s ⁻¹	延伸 率/%
1420	Al-1.8Li-4.2Mg-0.08Zr	480	3×10^{-4}	550
2090	Al-2.3Li-2.5Cu-0.12Zr	530	$\sim 10^{-3}$	~ 500
2091	Al-2.0Li-2.0Cu-1.3Mg-0.1Zr	515	8×10^{-4}	>500
8090	Al-2.4Li-1.2Cu-0.7Mg-0.1Zr	530	5×10^{-4}	1 000

铝锂合金材料属于细晶超塑性,晶粒组织的细化及其热稳定性对于铝锂合金的超塑性十分重要。王建^[16]等发现相比于粗晶(平均晶粒尺寸 16 μm)板材,细晶(平均晶粒尺寸 8 μm)板材的空洞长大及空洞体积分数的增长较为缓慢,往往能够得到更高的延伸率,如图 1 所示。因此,晶粒细化是铝锂合金细晶超塑性的重要基础,晶粒尺寸大小对于铝锂合金超塑性影响显著。

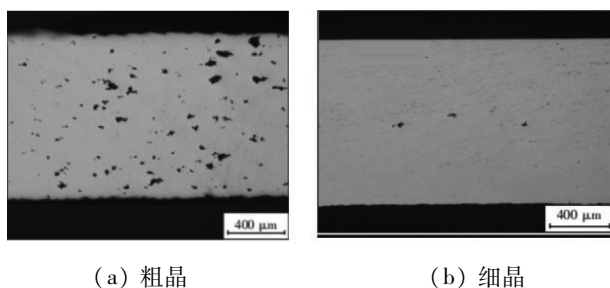


图 1 变形量为 200% 时细晶与粗晶板材空洞分布情况^[16]

发展铝锂合金的超塑成形技术不仅可以有效节约成本,而且满足航空航天对结构件轻量化的要求。目前,国内外已经可以成形出各种各样形状复杂的航空航天结构件。图 2 为使用 2090 铝锂合金和 2091 铝锂合金制作的超塑成形结构件^[17]。

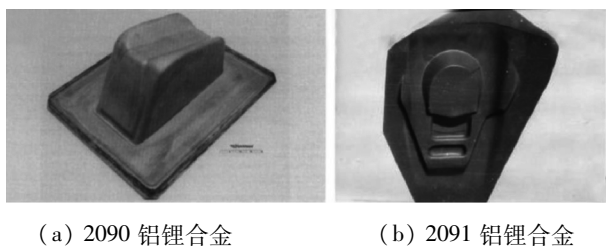


图 2 超塑成形结构件^[17]

铝锂合金具有比模量高、低温强度高和韧性强,以及优异的抗疲劳裂纹扩展能力等特点,可以用于航



图 3 用 SPF 制造的 2195 圆柱形罐^[18]

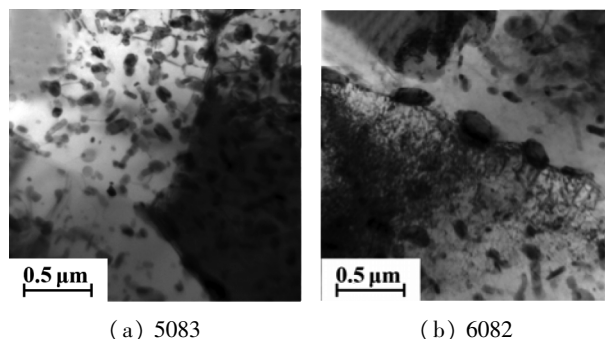
天发射器的低温液氧和氢燃料罐的制造。LEE^[18]等采用超塑性成形技术,使用 2195 铝锂合金制造用于航空航天的半球形低温罐,如图 3 所示。

2 铝锂合金扩散连接研究现状

铝锂合金表面致密的氧化膜严重阻碍扩散连接过程中界面两侧原子的相互扩散。因此,对铝锂合金扩散连接的研究重点在于去除表面的氧化膜以及防止再生。针对铝锂合金扩散连接技术的研究主要集中在两方面:一是扩散连接的工艺参数,如扩散连接温度、压力、时间、气氛等,这些因素之间会相互影响和制约,在进行扩散连接实验前应进行综合考虑和选择;二是铝锂合金连接件的表面状态,如对表面进行物理化学处理、添加中间层、涂覆保护剂等,这些处理的目的是为了降低氧化层带来的不利影响。

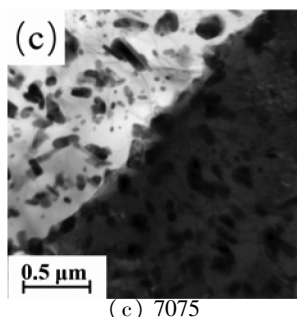
2.1 温度对铝锂合金扩散连接的影响

在上述提到的扩散连接工艺影响参数中,扩散连接温度是最重要的。因为在任何热激活过程中,温度增加所引起的动力学变化会远大于其它参数^[19],同时温度还会影响材料的相变、第二相析出以及再结晶过程,即温度的变化会带来一系列材料的物理、化学、力学及冶金性能变化。VENUGOPAL^[20]等对三种铝合金(5083、6082、7075)的扩散连接过程进行研究,发现高温能够使第二相颗粒的分布更均匀,并且能够减少接头处的孔洞等缺陷,进而提高连接界面的强度,如图 4 所示。WU Fan^[21]等在 Gleeble-3500 热模拟机上进行了加纯铝中间层的 1420 铝锂合金在不同参数下的扩散连接,结果表明连接温度对 1420 铝锂合金的界面微观结构和键合强度有直接影响。热量输入(通过连接温度)提高了 1420 铝锂合金基材和纯铝箔的变形性能,并促进了接头界面处合金元素的相互扩散。



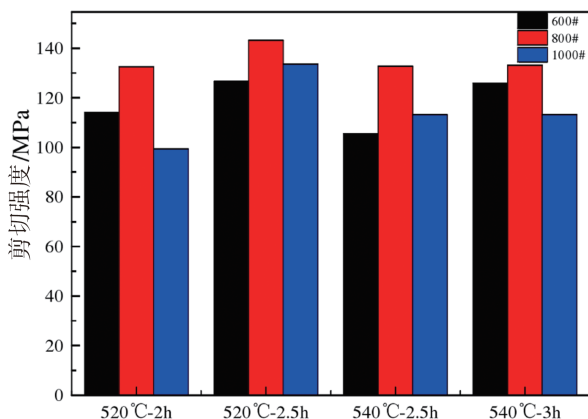
(a) 5083

(b) 6082

图4 520℃接头处金属间化合物的形貌^[20]

2.2 表面粗糙度对铝锂合金扩散连接的影响

表面粗糙度会影响连接件的扩散连接强度,表面过于粗糙或者光滑都不利于获得高质量的接头。ZURUZI^[22]等研究了表面粗糙度对 6061 铝锂合金接头性能的影响,结果表明,相对于用 1 000#砂纸研磨的样品,研磨到 180#的样品扩散连接接头完整性更好,因此可以通过研磨来调控金属的表面粗糙度,从而获得具有更高强度的扩散连接接头。王瑞卓^[15]对 5A90 铝锂合金表面分别进行 600#、800#和 1 000#砂纸打磨处理,发现经 800#砂纸打磨处理后,试样的扩散连接强度更高。如图 5 所示,在 520℃、2.5 h 的扩散连接条件下,接头剪切强度可以达到 143 MPa。

图5 不同表面粗糙度条件下扩散接头剪切强度^[15]

2.3 表面保护剂对铝锂合金扩散连接的影响

表面保护剂的涂覆能够避免经过氧化层去除处理的新鲜试样表面再度被氧化。HUANG Yan^[23]等利用丙酮、苯乙烯和聚苯乙烯制备而成的有机溶剂涂覆在被清理过氧化膜的清洁试样表面,有效防止表面再度被氧化,并且有机溶剂在达到连接温度后能够完全挥发。吴翼贻^[24]等采用液态膜保护法(化学腐蚀处理后将铝锂合金板状试样浸泡于无水乙醇

或类似物中形成保护液膜)在非真空条件下实现了 8090 铝锂合金的扩散连接。李维伟^[25]在用物理和化学方法去除铝锂合金表面氧化膜之后,为了避免新鲜的表面接触空气再次被氧化,在被处理过的试样上涂覆了一层二乙二醇二甲醚保护剂,有效保护了焊接试样的表面。

2.4 中间层对铝锂合金扩散连接的影响

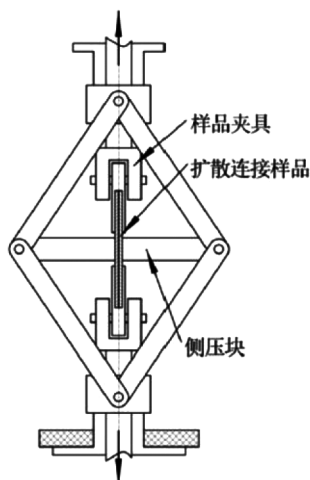
采用在铝锂合金扩散连接过程中加中间层的方法,可以改善界面接触,加快原子扩散,提高焊接效率和质量。SUNWOO^[26]研究了铜、锌中间层对 8090 铝锂合金扩散连接的影响,结果表明,在相同的夹层厚度和粘合参数下,铜夹层试样的抗拉强度明显高于裸露表面和锌夹层试样的抗拉强度。UREÑA^[27]等将 2024 铝铜合金中间层材料通过溅射镀在铝锂合金的扩散连接结合面上,获得了质量良好的扩散连接接头。邵杰^[28]等研究铜作为中间层的 1420 铝锂合金扩散连接工艺,发现铜中间层完全均匀地弥散分布在 1420 铝锂合金基体中,生成的接头新相为 ϵ -Cu₃Al₂ 相和 Al₂Cu 相,界面扩散连接质量良好,接头剪切强度可达 80 MPa;但此工艺得到的接头力学性能较差,热剥离强度低。

3 铝锂合金 SPF/DB 技术研究现状

轻质高强、耐用、易于加工等是飞机结构合金材料必须具备的特性^[29],采用 SPF/DB 制造的整体结构具有成形性好、设计自由度大、成形精确、无残余应力、零件数量少等优点,在减轻飞行器结构重量、降低生产成本等方面展示出巨大的技术经济效益。这些优点对于造价昂贵的航空件来说具有重要意义,目前此类工件已渐渐由次承载构件向主承载构件过渡^[30]。

3.1 国外铝锂合金 SPF/DB 技术发展历程

在国外,自二十世纪末以来,以生产轻质航空航天结构件为目标的铝锂合金 SPF/DB 技术的研究,在世界一些工业先进国家中已经进行。英国 BAE 公司在 1991 年采用 SPF/DB 技术制造出首个铝锂合金小尺寸演示件,并研究铝锂合金 SPF/DB 技术用于军用飞机电子设备二层板舱门的制造^[8]。SUNWOO^[31]等通过改造拉伸机设计一套同步扩散连接/超塑成形装置,如图 6 所示,对 7475 铝合金进行了超塑成形同步扩散连接,在氩气气氛保护下得到了无氧化层且塑性的扩散界面,证明了超塑变形

图6 同步扩散连接/超塑变形实验装置^[31]

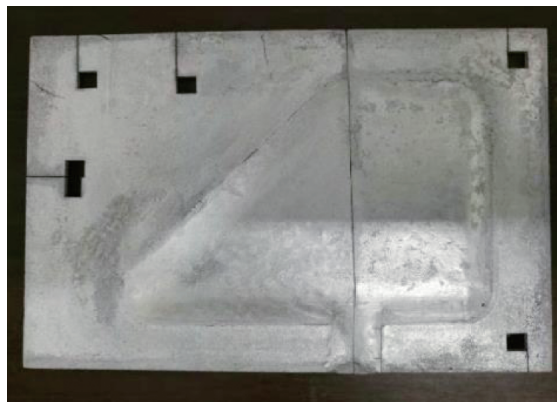
有利于提高铝合金的扩散连接性能,但此方法会明显地减薄原始材料,降低外观结构特性,需要在合理的结构中利用此方法,比如在四层 SPF/DB 结构中,芯板和蒙皮的减薄是在设计范围内。

3.2 国内铝锂合金 SPF/DB 技术发展历程

在国内,陈闽子^[32]等采用浸镀金属锌对硬铝 LY11 合金表面进行改性和调整,在无中间合金层、无保护气氛下能够实现 SPF/DB 工艺。结果表明,硬铝 LY11 合金 SPF/DB 的最佳工艺条件是 470℃, 36 MPa, 4 h。王长文^[33]等在研究 2091 铝锂合金的 SPF/DB 组合工艺时,采用等离子喷涂 Ag 作中间夹层的手段进行了两层板波纹件的超塑成形与扩散连接复合工艺试验研究,分析了中间层材料、厚度对扩散连接质量的影响。王瑞卓^[15]等对 5A90 铝锂合金中空双层结构件 SPF/DB 组合工艺进行了试验研究,确定了最佳工艺参数:540℃, 2.5 h, 800#, 得到成形质量良好的中空双层结构件,如图 7 所示。

7 5A90 铝锂合金 SPF/DB 中空双层结构件^[15]

蒋少松^[34]等采用 SPF/DB 工艺制备了 5A90 铝锂合金的中空双层结构,发现接头的焊合率随着扩散连接温度和保温时间的增加而提高,合适的表面粗糙度对扩散界面上氧化铝层的局部破碎至关重要。张建威^[35]利用 SPF/DB 工艺得到了质量良好的 2B06 铝合金双层结构件,如图 8 所示,扩散连接区域剪切强度达到 79 MPa,超塑成形区域的壁厚最大减薄小于 20%。

图8 2B06 铝合金双层结构件^[35]

4 结论

铝锂合金多层中空结构的 SPF/DB 技术已经成为推动现代航空航天结构设计概念和突破传统钣金成形的先进制造方法,该技术的发展水平已经成为衡量一个国家航空航天结构件生产能力和发展潜力的标志。但目前我国自主研发的铝锂合金类型较少,产量也不高,配套的钣金、加工装备以及热处理等相关关键技术还较为缺乏。因此,针对新一代航空航天结构件整体化、轻量化和高效化等迫切需求,需要在以下方面进行深入系统研究:

1) 研究铝锂合金细晶的超塑变形行为与特性,解决工业化生产的铝锂合金板厚板晶粒组织粗大,无法实现超塑性变形的问题。

2) 研究铝锂合金扩散连接技术,解决铝锂合金表面致密稳定氧化膜阻碍其扩散连接接头质量提升的瓶颈问题,实现铝锂合金扩散连接界面强度和焊合率的显著提高。

3) 充分利用铝锂合金的高比刚度、比强度等优异性能以及 SPF/DB 技术在减轻构件质量、提高结构整体性和疲劳性能、降低生产成本等方面的优越性,突破第三代铝锂合金板多层结构 SPF/DB 关键技术,制造出高精度整体轻质构件,促进我国航空航天工业的发展。

参考文献:

- [1] 李红萍,叶凌英,邓运来,等. 航空铝锂合金研究进展[J]. 中国材料进展, 2016, 35(11): 856-862.
- [2] 徐进军,康唯,都昌兵. 航空航天铝锂合金及其成形技术的研究现状和发展趋势[J]. 兵器材料科学与工程, 2017, 40(3): 132-137.
- [3] 张凌云,祁桂根. 铝锂合金在航空业的应用及 SPF/DB 工艺进展[J]. 金属成形工艺, 2001, 19(3): 1-3.
- [4] 彭鹏. Mg-Gd-Y-Zn-Zr 稀土镁合金蜂窝结构超塑成形/反应扩散连接成形工艺研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.
- [5] 吴凡. 1420/7B04 异种铝合金扩散连接界面组织及性能研究[D]. 大连:大连理工大学, 2019.
- [6] 王国峰,张建威,张晓巍,等. 2B06 铝合金双层结构件 DB&SPF 组合工艺研究[J]. 锻压技术, 2020, 45(7): 187-192.
- [7] 牛涛,侯红亮,王耀奇,等. 镓中间层 1420 铝锂合金扩散连接界面组织与性能[J]. 塑性工程学报, 2014, 21(6): 112-116.
- [8] 毛文锋,宋飞灵,朱义元. 铝锂合金 DB/SPF 技术研究[J]. 航空制造工程, 1996(7): 17-19.
- [9] PANDEY M C, WADSWORTH J, MUKHERJEE A K. Superplastic deformation behavior in ingot and powder metallurgically processed Al-Li-based alloys[J]. Materials Science and Engineering, 1986, 80(2): 169-179.
- [10] FAN W, KASHYAP B P, CHATURVEDI M C. Effect of layered microstructure and its evolution on superplastic behaviour of AA 8090 Al-Li alloy[J]. Materials Science and Technology, 2001, 17(4): 439-445.
- [11] 刘志义. 铝锂合金电致高速超塑性[D]. 沈阳:东北大学, 1993.
- [12] JIA L, REN X P, ZHANG Y L, et al. Forming-limits analysis of the superplastic 2A97 Al-Li alloy[J]. Materiali in Tehnologije, 2020, 54(3): 397-405.
- [13] LIU X D, YE L Y, TANG J G, et al. Superplastic deformation mechanisms of an Al-Mg-Li alloy with banded microstructures[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 805: 140545.
- [14] LI H P, LIU X D, SUN Q, et al. Superplastic deformation mechanisms in fine-grained 2050 Al-Cu-Li alloys[J]. Materials, 2020, 13(12): 2705.
- [15] 王瑞卓. 5A90 铝锂合金中空双层结构 SPF/DB 组合工艺[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015.
- [16] 王建,李光宇,杨文静,等. 7B04 铝合金超塑变形空洞研究[J]. 材料与冶金学报, 2018, 17(4): 293-299.
- [17] XUN Y W, ZHUN Y Y, MAO W F, et al. Superplastic forming technology of aircraft structures for Al-Li alloy and high-strength Al alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 72(2): 183-187.
- [18] LEE H S, YOON J H, YOO J T. Manufacturing titanium and Al-Li alloy cryogenic tanks[J]. Key Engineering Materials, 2020, 837: 64-68.
- [19] PALANISAMY D, BRITTO A S F, BINOJ J S, et al. Statistical optimization of parameters for enhanced properties of diffusion bonded AA6061 and AA 7075 aluminium alloys[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 39: 388-397.
- [20] VENUGOPAL S, MAHENDRAN G. Effect of the microstructure on diffusion bonded AA5083, AA6082 and AA7075 aluminium alloys[J]. Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 2019, 100(4): 617-626.
- [21] WU F, CHEN W, ZHAO B, et al. Diffusion bonding of 1420 Al-Li alloy assisted by pure aluminum foil as interlayer[J]. Materials, 2020, 13(5): 1103.
- [22] ZURUZI A S, LI H, DONG G. Effects of surface roughness on the diffusion bonding of Al alloy 6061 in air[J]. Materials Science and Engineering: A, 1999, 270(2): 244-248.
- [23] HUANG Y, RIDLEY N, HUMPHREYS F J, et al. Diffusion bonding of superplastic 7075 aluminium alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 1999, 266(1-2): 295-302.
- [24] WU Y E, LO Y L. Surface protection for AA8090 aluminum alloy by diffusion bonding[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2002, 38(1): 71-79.
- [25] 李维伟. 5083 铝合金扩散焊接工艺研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2007.
- [26] SUNWOO A. Diffusion bonding of aluminium alloy, 8090[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1994, 31(4): 407-412.
- [27] UREÑA A, Gómez J M S, Martín J J. TEM characterization of diffusion bonding of superplastic 8090 Al-Li alloy[J]. Scripta materialia, 1996, 34(4): 617-623.
- [28] 邵杰,郭和平,李志强,等. 铜中间层 1420 铝锂合金扩散连接工艺[J]. 航空制造技术, 2007(8): 85-87.
- [29] 汤炜. 5A90 铝锂合金薄板成形工艺研究[D]. 太原:中北大学, 2009.
- [30] 方赫. Ti-22Al-24Nb 合金超塑性能及 SPF/DB 工艺研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
- [31] SUNWOO A, LUM R. Superplastic deformation en-

- hanced diffusion bonding of aluminum alloy 7475 [J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1995, 33(4): 639-644.
- [32] 陈闽子, 廖波, 张春玲, 等. 硬铝 LY11 的 SPF/DB 工艺研究和机理探讨[J]. 稀有金属, 1998, 22(2): 70-72.
- [33] 王长文, 张凯锋, 王仲仁. Al-Li2091 合金超塑成形/扩散连接工艺研究[J]. 塑性工程学报, 1998, 5(4): 4-9.
- [34] JIANG S S, JIA Y, LU Z, et al. Superplastic forming/diffusion bonding without interlayer of 5A90 Al-Li alloy hollow double-layer structure [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(9): 4265-4273.
- [35] 张建威. 2B06 铝合金双层结构件 SPF/DB 成形工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.

作者简介

王增宇 男, 博士。主要研究方向: 铝合金超塑成形/扩散连接工艺与机理。E-mail: 15908931149@163.com

李媛 女, 本科, 工程师。主要研究方向: 轻质高强板材塑性成形工艺与工程应用。E-mail: annli00@126.com

王斌 男, 博士, 研究员。主要研究方向: 轻质高强板材塑性成形工艺与工程应用。E-mail: binwang76@163.com

李升 男, 博士, 工程师。主要研究方向: 轻质高强板材塑性成形工艺与工程应用。E-mail: lishengsir@163.com

李细锋 男, 博士, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 轻质高强板材塑性成形工艺与工程应用。E-mail: lixifeng@sjtu.edu.cn

梁承镨 男, 本科, 助理工程师。主要研究方向: 轻质高强板材塑性成形工艺与工程应用。E-mail: liangcq402@163.com

Research progress of Al-Li alloy superplastic forming/diffusion bonding technique

WANG Zengyu¹ LI yuan² WANG Bin³ LI Sheng³ LI Xifeng^{1*} LIANG Chengqiang⁴

(1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China; 2. Beijing Satellite Manufacturing Co., Ltd., Beijing 100094, China;

3. Beijing Xinghang Electro-Mechanical Equipment Co., Ltd, Beijing 100074, China;

4. Dongguan Hengli Die & Mold Technological Industry Development Company Ltd., Dongguan 523460, China)

Abstract: Lightweight materials and structures are the development direction of the modern aerospace industry. Aluminum-lithium alloy is a kind of ideal aerospace material due to low density, high specific strength and high specific elastic modulus. The hollow sandwich structure parts formed by the superplastic forming/diffusion bonding process have the advantages of good integrity, large design freedom, high forming accuracy, no residual stress. Furthermore, the weight and cost can be significantly reduced and they are widely used in the aerospace field. In response to the urgent need for the integration and lightweight of the new generation of complex multi-layer structural parts in the aerospace industry, the development history of aluminum-lithium alloys at home and abroad are reviewed. The state of the art in aluminum-lithium alloy superplastic forming, diffusion bonding and superplastic forming/diffusion bonding combined processes and their applications in the aerospace field are introduced. The dense and stable oxidation film on the surface of aluminum-lithium alloy hinders the quality improvement of its diffusion bonding joint and becomes the bottleneck problem. The related technology and mechanism of removing the oxide layer on the surface of the aluminum-lithium alloy and preventing the regeneration of the new oxide layer are analyzed. Finally, the application prospect of the aluminum-lithium alloy superplastic forming/diffusion bonding technology in the aerospace field and the research topics in the future are forecasted.

Keywords: aluminum-lithium alloy; superplastic forming; diffusion bonding; oxidation film

* Corresponding author. E-mail: lixifeng@sjtu.edu.cn