

铝锂合金的焊接技术研究进展

Progress in Welding Technology of Al-Li Alloy

中国工程物理研究院机械制造工艺研究所 狄 欧

[摘要] 综述了铝锂合金的各种焊接方法的特点、关键技术、研究成果及其优点和局限性。

关键词: 铝锂合金 焊接方法 研究成果

[ABSTRACT] The characteristics, key techniques, research achievements as well as advantages and limitations of various welding methods of Al-Li alloy are summarized.

Keywords: Al-Li alloy Welding method Research achievement

铝锂合金是一种低密度、高性能的新型结构材料,它比常规铝合金的密度低10%,而弹性模量却提高了10%,其比强度和比刚度高,低温性能好,还具有良好的耐腐蚀性能和非常好的超塑性。随着航空航天工业的迅猛发展,铝锂合金也得到了日益广泛的应用,用铝锂合金取代常规的铝合金可使结构质量减轻10%~15%,刚度提高15%~20%。用2195铝锂合金作为航天飞机外贮箱的材料,结构质量比原来采用2219材料减轻质量7%,有效载荷增加10%~15%^[1]。采用铝锂合金制造大型运载器的低温推进剂贮箱,可以降低结构质量,提高运载能力,从而获得显著的经济效益^[2]。航天结构件间往往采用连接体的形式,用焊接工艺代替传统的铆接结构可以减轻结构质量,减少装配时间,这就产生了铝锂合金的连接问题^[1-2]。

1 弧焊

在航天工业中,铝合金焊接中应用较广的是TIG和MIG工艺,TIG焊又有交流氩弧焊和直流正接氩弧焊2种工艺。保护气体采用氩气和氦气,应用氩气较多。氦和氩相比,其最小电离能高,在其他条件和参数相同时,电弧电压较高。因此,氦弧焊电弧温度高,焊接热输入量大,具有更高的能量密度,与氩弧焊相比熔深较大,焊接缺陷特别是气孔较少。为了利用氦气电弧热高的优点并避免纯氦带来的缺点,国外采用气脉冲(Ar+He)TIG和MIG技术焊接铝合金,可大大减少气孔缺陷。

借鉴国外的经验,近几年开始进行气脉冲TIG焊接技术研究,初步试验表明,采用气脉冲(Ar+He)TIG焊接

工艺焊接S147铝合金在抑制气孔缺陷方面有明显的效果,不开坡口可一次焊透7mm平板,且表面光泽与氩弧焊相同,避免了直流正接氩弧焊焊缝表面发暗的现象;焊接工艺性、可操作性也与氩弧焊无异,弧长也无特别限制。这对于对气孔较敏感的2195铝锂合金有极大的应用价值。在2091铝锂合金的TIG焊中,在焊态下接头强度系数只有64%;然而,经焊后人工时效处理,强度系数能达到89%,只是接头塑性较低。焊后固溶加时效处理,强度系数几乎达到98%,但是由于焊缝的枝状晶结构,接头延伸率只是略有提高^[3]。

用经过净化的氩气,在拖罩保护下用氩弧焊焊接铝锂合金,焊缝表面光滑,无裂纹与气孔,试样靠垫板一面仍保持原来的金属光泽。显微组织金相照片显示,试样中黑色氧化物明显减少,焊缝呈细等轴晶形态;而用普通的氩弧焊工艺焊接的接头焊缝与基体过渡显著,焊缝与母材有一条分界线,机械性能不是连续过渡的。8090铝锂合金母材自然时效抗拉强度499MPa,延伸率2%;普通工艺氩弧焊接头经固溶时效处理抗拉强度为216MPa,延伸率1%;氩气净化、带拖罩保护的氩弧焊接头固溶时效后抗拉强度324MPa,延伸率2.63%。可见用经净化的氩气、带拖罩保护的氩弧焊试样的抗拉强度明显高于用普通工艺得到的氩弧焊试样^[4]。

1978年,美国NASA宇航局马歇尔宇航中心决定用变极性等离子弧焊技术部分取代钨极氩弧焊工艺焊接航天飞机外贮箱。航天飞机外贮箱材料为2219铝合金,共焊接了6400m焊缝,经100% X射线检测,未发现任何内部缺陷,焊缝质量比TIG多层焊明显提高。

变极性等离子焊接用于铝合金焊接,单道焊接铝合金厚度可达25.4mm。其工艺特点是:在焊接过程中熔池中心存在一穿透的小孔,在实际生产中常采用立向上焊工艺,既有利于焊缝的正面成形,又有利于熔池中氩的逸出,减少气孔缺陷,因此被称为“零缺陷焊接”。

“八五”期间,在引进国外某公司的变极性等离子焊接系统的基础上,进行了LF6和LD10铝合金平板(10mm×6mm×3mm)焊接工艺试验。“九五”期间,国内多家单位联合开展了变极性等离子焊接技术研究,研制了变极性等离子焊接设备样机,并进行了LF6和

LD10铝合金板材(12mm×5mm×3mm)焊接工艺试验,完成了带有纵缝和环缝的贮箱模拟件焊接,解决了环缝焊接时起弧打孔和收弧填孔及焊缝首尾相接难题,焊接模拟件通过了液压试验,将变极性等离子焊接技术的工程应用向前推进了一大步。随着2219铝合金的应用,在未来中厚度的大型贮箱焊接生产中,变极性等离子焊接技术有着广阔的应用前景。对于2195合金来说,其TIG焊强度系数只有50%左右,需要进一步研究^[5]。

2 铝锂合金的SPF/DB

铝锂合金的超塑成形/扩散连接(SPF/DB)是90年代超塑性应用领域中的一项富有挑战性的课题,铝锂合金SPF/DB组合工艺的难点是扩散连接。铝锂合金表面的氧化膜极其稳定,具有旧膜难去、新膜易生的特点,必须采用特殊方法实现铝锂合金的扩散连接。经过铝锂合金扩散连接技术的不断发展,在严格的工艺条件下铝锂合金扩散连接接头的剪切强度几乎达到了母材强度。早期的铝锂合金扩散连接研究重点见表1。

表1 早期的铝锂合金扩散连接方法及其特点^[6]

扩散连接方法	工艺特点
以Ag为中间层的固态扩散连接,Ag通过电镀、溅射或滚轧包覆于Al、Al-Li合金表面	利用Ag的氧化膜在300℃分解的特点,可在空气中实现扩散连接,但由于软界面及Ag和Al的化合物存在,接头强度极低
以Zn为中间层的TLP扩散连接,Zn用电镀或溅射的方法加入	可在空气和氩气的混合物中进行扩散连接,接头强度较高,但热剥离强度和接头耐腐蚀性差
以Cu为中间层的TLP扩散连接,两块板表面溅射Cu膜,再加入Cu箔	在真空中Al-Cu共晶温度下实现扩散连接,接头室温强度较高,但热剥离强度低,接头晶粒粗大
以纯Al为中间层的滚轧连接	接头强度低,母材因晶粒拉长而几乎丧失超塑性

近期有前途的DB方法有3种:氩气中大变形量扩散连接;真空扩散连接;MBB公司开发的复合中间层(Al/Al+Si/Cu/Ag)TLP扩散连接。超塑成形(SPF)是利用材料在特殊条件下所表现出的超强变形能力,对形状复杂、精度高、用常规工艺方法难以加工或难以满足要求的薄壁零件采用吹塑胀形等方法进行成形的过程,它是一种几乎无余量、低成本、高效的特种成形方法。多层板金属连接结构是当代飞机设计的重要内容之一,在各种航空连接技术中,DB是最为有效的无辅件

的连接技术。它与SPF组合,能加工出结构效率高、重量轻、整体性能好的空心整体构件,如飞机的舱门、襟翼、舱盖等。目前,钛合金的SPF/DB工艺已经趋于成熟,而铝锂合金的DB工艺仍较为困难,原因是铝锂合金在加热时很容易在材料表面形成一种坚固的氧化膜,因此DB过程必须在完全绝氧的环境下进行,这给扩散连接造成了很大的障碍。但铝锂合金多层板结构上的优势以及潜在的巨大经济效益促使人们对这种工艺进行了大量的研究和探索^[7-9]。

3 电子束焊和激光焊

与弧焊相比,电子束焊和激光焊采用低热输入,有利于裂纹和气孔的消除以及接头软化区的减小。前苏联已成功采用局部真空电子束焊焊接1460铝锂合金,制造了“能源号”运载火箭低温贮箱。以激光和电子束2种方法焊接8090Al-Li合金,并将其焊后微观组织和力学性能作对比,在焊缝深度均为5mm时,电子束焊接试样的强度和断裂韧性比采用激光焊接的分别高7%和24%。在电子束试样中的晶粒尺寸和沉淀相均比激光焊接试样的小,这是由于电子束焊接时所吸收的热输入小的缘故。激光焊与电子束焊相比,既可采用填充焊丝,也可不加填充材料,且还不受真空室限制。

激光焊接因热输入低和变形小,焊接速度快及激光系统柔性好而广泛应用于金属板材结构的焊接。发展铝合金板材的激光焊接技术能够减轻结构重量,因此在航空、汽车、交通、船舶、建筑等领域的应用前景广阔。但铝合金表面反射率、导热率高,低沸点合金元素易挥发,从而导致未焊透、气孔及裂纹等缺陷。有研究表明,当增加激光光板的功率密度至超过铝合金激光焊接的阈值(CO_2 激光约 $4 \times 10^6 \text{W}/\text{cm}^2$,Nd:YAG激光为 $1.5 \times 10^6 \text{W}/\text{cm}^2$)时,就能很好地产生小孔效应,实现激光深熔焊。北京航空制造工程研究所用国产5kW的 CO_2 激光设备对1420铝锂合金进行了激光焊接试验,发现在激光功率密度未达到一般铝合金激光深熔焊阈值时,2024铝合金不能有效地进行焊接,却可以较好地实现1420铝锂合金的深熔焊。用激光焊获得的较好的1420铝锂合金深熔焊接头,纵向和横向焊接接头抗拉强度相近,分别达到母材的70%~80%和80%~90%^[6]。

用YAG激光焊接铝锂合金焊缝热影响区窄,试样表面保持原金属光泽,表面平整,无电弧焊和气焊那种起弧缺口,一般单面焊能焊透的深度0.7mm。母材、热影响区、焊缝成分几乎无变化,焊接接头氧化物甚

微。若工艺不合理,焊接接头结合处有明显界限,表明结合不良,仅有部分区域结合良好,焊缝组织粗大且有焊接裂纹,裂纹几乎沿晶界扩展,这说明铝锂合金易产生热裂,也说明合理的激光焊接工艺可获得高质量的铝锂合金焊接接头^[9]。

4 钎焊

由于铝锂合金的熔点比常规铝合金低,故钎焊时对温度很敏感,硬钎焊时极易产生过烧组织,使钎焊接头性能变差。为了解决这一问题,工程上一般多从降低钎料熔点入手,但这往往会降低钎缝强度。可见,在过烧温度下采用硬钎料钎焊是铝锂合金钎焊连接技术的关键。西北工业大学采用了2090Ce铝锂合金板材通过对铝锂合金钎焊时钎剂组元系的试验研究,发现反应钎剂的冶金作用有助于降低钎料温度,从而避免产生过烧组织,使钎焊接头性能得以改善^[10]。

南昌航空工业学院采用俄罗斯进口的1420Al-Li合金板材,用抗拉强度为497MPa的钎焊金属进行了钎焊试验研究,试验结果表明,低温软钎焊时钎料对Al-Li合金的润湿性极差,熔化的钎料以球珠状团聚在试样上,不能铺层。中温及高温软钎焊时,钎料对Al-Li合金的润湿性较好。硬钎焊时钎料在试样上也有较好的润湿性,但是,由于Al-Li合金的固相线温度较低,当钎焊温度过高时,会造成母材过烧。例如采用HL400在560 温度下试验时,在钎料还未熔化的情况下,母材已产生了局部熔化现象,因而硬钎焊时必须严格控制钎焊温度。Al-Li合金在高温软钎焊和硬钎焊时均能较好地形成接头,而中温软钎焊时接头的形成能力极差,钎料熔化后很难往钎缝间隙内渗透。用高温软钎料和硬钎料钎焊Al-Li合金可以获得较高的接头强度,若在钎料中添加微量的稀土元素,可使接头强度提高10%~15%,此外,稀土元素还有减弱钎料对母材的溶蚀作用^[11]。

5 搅拌摩擦焊

最近,一种新型的固相连接方法——搅拌摩擦焊(FSW)连接引起了许多人的关注,这种焊接方法是由英国焊接研究所1991年提出的。与常规摩擦焊一样,搅拌摩擦焊也利用摩擦热作为焊接热源。不同之处在于,搅拌摩擦焊焊接过程是由一个圆柱体形状的搅拌头伸入工件的接缝处,通过搅拌头的高速旋转,使其与焊接工件材料摩擦,从而使连接部位的材料温度升高软

化,同时对材料进行搅拌摩擦来完成焊接的。在焊接过程中,工件要刚性固定在背垫板上,搅拌头一边高速旋转一边沿工件的接缝移动。搅拌针伸进材料内部进行摩擦和搅拌,搅拌头的肩部与工件表面摩擦生热,并用于防止塑性状态材料的溢出,同时可以起到清除表面氧化膜的作用,图1为搅拌摩擦焊示意图。

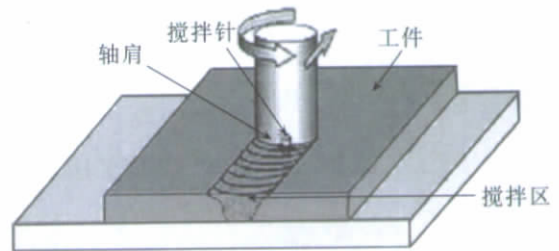


图1 搅拌摩擦焊示意图^[12]

Fig.1 Friction stir welding^[12]

通过搅拌摩擦焊焊接接头的金相分析及显微硬度分析可以发现,搅拌摩擦焊接头的焊缝组织可分为4个区域:A区为母材区,无热影响也无变形;B区为热影响区,没有受到变形的影响,但受到了从焊接区传导过来的热量的影响;C区为热机影响区,该区既受到了塑性变形的影响,又受到了焊接温度的影响;D区为焊核,经过了动态再结晶^[13],是两块焊件的共有部分,如图2所示。

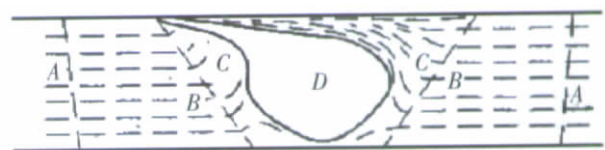


图2 搅拌摩擦焊焊缝分区示意图^[13]

Fig.2 Weld partition of friction stir welding^[13]

目前,飞行器等结构大量采用高强铝合金。由于铝合金材料的熔焊焊接性能差,不得不采用点焊、铆接或机械连接结构,大大降低了性能重量比,限制了铝合金在飞机、汽车、船舶等结构中的应用。英国焊接研究所研究开发的搅拌摩擦焊工艺为这类问题的解决提供了一个新思路。搅拌摩擦焊连接方法用于飞行器上的高强铝合金(如硬铝、铝锂合金等)材料的连接,可大大提高产品的性能和制造水平^[14]。同熔焊相比,搅拌摩擦焊焊接铝合金有以下几个明显的优点:焊接中厚板时,焊前不需要开V形或U形坡口,也不需进行复杂的焊前准

备;焊后试件的变形和内应力非常小;焊接过程中没有辐射、飞溅及有害气体产生;焊接接头性能优良,焊缝中无裂纹、气孔及收缩等缺陷,可实现全方位焊接。搅拌摩擦焊最突出的优点是可焊接那些不推荐采用熔焊焊接方法的高强铝合金。从焊接材料的角度来说,目前研究较多的是铝合金的焊接。铝合金是一种高比强度的材料,将其用于飞机、汽车、船舶等结构中,可以减轻这些结构的重量,提高它们的综合性能。但是,由于其熔点、比重较低,热传导系数大,熔焊时易产生气孔、裂纹、变形等缺陷。利用搅拌摩擦焊技术,可以克服熔焊时的缺陷,且焊接接头的性能不会降低,现已可以用该方法焊接厚度达75mm的铝合金板材。铝锂合金是一种比强度更高、综合性能更好的轻型结构材料,用搅拌摩擦焊方法焊接铝锂合金也取得了很好的效果^[15-17]。

激光辅助搅拌摩擦焊是一种新型的搅拌摩擦焊方法。激光辅助搅拌摩擦焊用激光能源加热工件,而搅拌头的主要作用是搅拌和连接工件两部分(图3)。激光辅助搅拌摩擦焊是一种相对简单和廉价的方法。

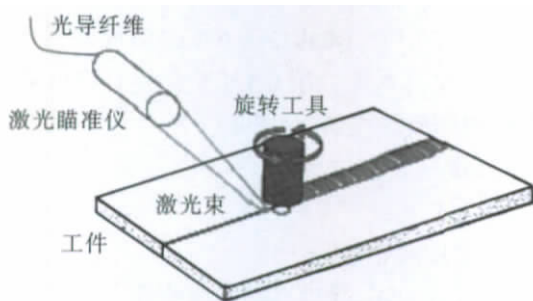


图3 激光辅助搅拌摩擦焊原理

Fig.3 Principle of laser-aided friction stir welding

激光辅助搅拌摩擦焊的焊接工艺已经被认可,使用激光预热工件,可以降低搅拌摩擦焊接时的压力,从而降低了对焊接工装夹具的要求;这种复合热源的方法还可以提高焊接速度,从而提高焊接生产效率。

6 结束语

铝锂合金的熔焊易产生热裂纹^[18],易氧化并形成气孔,同时还存在因接头软化而导致接头强度系数降低等问题,所以铝锂合金的弧焊、激光焊及电子束焊等焊接方法均存在一定的局限性,由于铝锂合金扩散焊工艺较为困难和铝锂合金的钎焊接头强度较低,铝锂合金的扩散焊和钎焊等固相连接方法也不是很理想。搅拌摩擦焊虽然是近十几年才发展起来的新型固相连接方法,但是目前在许多领域已经得到了很好的应用,

搅拌摩擦焊在铝锂合金的焊接上具有很大优势,是未来铝锂合金连接的一个主要发展方向。

参 考 文 献

- 1 Immarigeon J P, Holt R T, Koul A K, et al. Lightweight materials for aircraft applications. *Materials Characterization*, 1995, 35(1): 41-67
- 2 熊 焕. 低温贮箱及铝锂合金的应用. *导弹与航天运载技术*, 2001(6): 33-46
- 3 Pickens J R. Gas tungsten arc welding studies on similar and dissimilar combinations of Al-Zn-Mg alloy RDE and Al-Li alloy 1441. *Proc 1st United States Japan Symp On Advances in Welding Metallurgy San Francisco, CA, USA, Yoko. hama, Japan*. 1990(6): 103
- 4 Liu Wei, Ding Hua, Cui Jianzhong. Effect of solution treatment in an electric field on mechanical properties and microstructure of 2091 Al-Li alloy. *Acta metallurgica. Sinica, series B. Process Metallurgy & Miscellaneous*. 1994, 7(3): 208-214
- 5 周国兴, 赵后良. 铝锂合金的氩弧焊工艺. *航空工程与维修*, 1998(1): 22-23
- 6 毛文锋, 宋飞灵, 朱义元. 铝锂合金DB/SPF技术研究. *航空制造工程*, 1996(7): 17-19
- 7 于尔靖, 郝传勇, 应慧筠, 等. 铝锂合金焊缝凝固组织特征. *焊接学报*, 1996(1): 1-2
- 8 Westwood A R C. New materials for aerospace industry. *Materials Science and Technology*, 1990(6): 958-961
- 9 邹世坤, 段爱琴. 1420铝锂合金激光焊特性研究. *焊接技术*, 2001,30(4):13-14
- 10 王忠平, 贺 勇, 贺运佳. 稀土铝锂合金钎焊性研究. *机械科学与技术*, 1997, 16(2): 299-302
- 11 孙德超. 铝锂合金的钎焊性研究. *南昌航空工业学院学报*, 1999, 13(3): 21-24
- 12 Colligan K J, Konkol P J, Fisher J J, et al. Friction stir welding demonstrated for combat vehicle construction. *Welding Journal*, 2003, 82(3): 34-39
- 13 张田仓, 郭德伦, 栾国红, 等. 固相连接新技术——搅拌摩擦焊技术. *航空制造技术*, 1999(2): 35-39
- 14 柯黎明, 邢 丽, 刘鹤平. 搅拌摩擦焊工艺及其应用. *焊接技术*, 2000, 29(2): 7-8
- 15 Wuett Y L. Overheat of Al-Li-Cu-Mg-Zr Alloy. *Materials Science and Technology*, 1993(9): 114-117
- 16 任家烈, 吴爱萍. 先进材料的连接. 北京: 机械工业出版社, 2000,43(8): 743-749
- 17 郝长岭, 亢世江, 陈学广. 不断发展的固态焊接技术. *焊接技术*, 2002,31(5):18-19
- 18 夏德顺. 国外铝锂合金工艺性研究. *航天工艺*, 1998(4): 26-40

(责编 七丁)