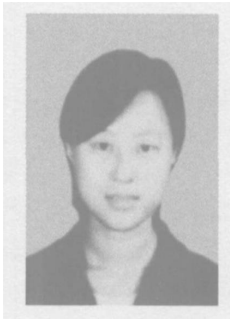


高强铝锂合金炉中钎焊及接头组织分析

张 玲， 薛松柏， 韩宗杰， 黄 翔
(南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 南京 210016)



张 玲

摘 要: 采用 CsF - AlF₃ 钎剂和 Ag - Al - Cu - Zn 钎料, 实现了高强铝锂合金的炉中钎焊。结果表明, 在氮气保护的条件下, 钎焊接头的抗拉强度最高可达到 390 MPa, 强度系数接近 0.89, 抗剪强度最高可达到 380 MPa, 强度系数约为 0.86, 均高于现有文献报道的高强铝锂合金的焊接接头强度系数值。对试验结果的理论分析表明, 在 530 ℃左右有效地去除铝锂合金表面的氧化膜是实现钎焊连接的关键, 而氮气保护则是改善和提高钎缝力学性能的有效手段。
关键词: 高强铝锂合金; 炉中钎焊; 强度系数; 断口形貌
中图分类号: TG454 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2006)08-0711-04

0 序 言

锂(Li)是自然界最轻的金属, 在铝合金中每添加质量分数为 1% 的 Li, 就能降低合金密度 3%, 提高弹性模量 6%。采用铝锂合金取代常规的铝合金, 可使构件质量减轻 10% ~ 15%, 刚度提高 15% ~ 20% 左右, 因此, 铝锂合金被认为是 21 世纪航空航天工业最理想的轻质高强结构材料^[1]。

由于铝锂合金表面氧化膜一般由简单的 Li₂O, Al₂O₃ 等氧化物和复杂的 LiOH, LiAlO₂, Li₂CO₃ 等化合物组成^[2], 因此, 通常认为铝锂合金难以进行焊接。如熔化焊时, 容易产生气孔、夹渣、裂纹等焊接缺陷^[3], 且铝锂合金焊接接头的强度系数偏低, 如 8090 铝锂合金, 其氩弧焊焊接接头的强度系数不超过 0.65^[4]; 1460 铝锂合金手工氩弧焊、自动氩弧焊, 采用不同的焊丝, 其焊接接头的强度系数也都不超过 0.75^[5]。钎焊时, 必须选择活性极强的钎剂, 才能去除表面氧化膜, 完成钎焊。但钎焊接头的强度系数更低, 如 2090Ce 铝锂合金钎焊接头的强度系数不超过 0.5^[6]。

铝锂合金焊接接头的强度系数偏低, 限制了铝锂合金的应用, 使得其优异的综合性能无法发挥。采用 CsF-AlF₃ 钎剂和 Ag-Al-Cu-Zn 钎料, 研究探索在氮气保护下实现高强铝锂合金炉中钎焊的可行性, 为高强铝锂合金在航空航天领域的应用打下基础。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料与母材及钎料处理工艺

1.1.1 试验材料

试验用母材的成分与 1460 铝锂合金成分接近 (见表 1), 轧制后的试板厚度为 2.36 mm。试板先经过 520 ℃-10 min 固溶处理, 之后水淬, 预拉伸 4%, 再经 160 ℃人工时效处理 24 h, 此时测得试板的抗拉强度为 440 MPa, 伸长率为 11%。

钎剂选用 CsF-AlF₃ 钎剂, 钎料为 Ag-Al-Cu-Zn 钎料。为进一步提高 CsF-AlF₃ 钎剂的活性, 加入了微量活性成分, CsF-AlF₃ 钎剂的熔化温度为 460 ~ 480 ℃。Ag-Al-Cu-Zn 钎料的抗拉强度为 550 MPa, 固相线温度为 455 ℃, 液相线温度为 485 ℃, 与 CsF-AlF₃ 钎剂的熔化温度范围 460 ~ 480 ℃接近。母材和钎料的化学成分如表 1 所示。

1.1.2 母材及钎料处理工艺

钎焊前对铝锂合金试板和钎料表面进行如下处理: 先用丙酮去除表面油污, 再用 15% NaOH 溶液处理, 溶液温度为 50 ~ 60 ℃, 时间 15 s 左右。然后用蒸馏水冲洗, 再用 1:3 的稀硝酸溶液处理, 时间 10 s 左右, 之后用蒸馏水冲洗, 再用乙醇清洗, 自然晾干备用。

1.2 试验设备及工艺

所有的钎焊试验均在可充保护气的钎焊炉中进行。根据试验需要, 可以调节保护用氮气的流量。详细的设备原理图见文献[7]。

钎焊接头形式分为对接接头和搭接接头两种,

收稿日期: 2006-05-25
基金项目: 兰州理工大学甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室开放基金资助项目 (K2005-04)

表 1 铝锂合金和钎料的化学成分(质量分数, %)
Table 1 Chemical compositions of Al-Li alloy and filler metal

材料	Li	Cu	Mg	Sc+Zr	Ag	Zn	Al
母材	1.6	3.9	0.5	0.3	—	—	余量
1460 合金	2.0~2.4	2.6~3.3	0.05	Sc 0.05~0.14 Zr 0.08~0.13	Ti 0.01~0.05		余量
钎料	—	12.2	—	—	24.0	39.9	余量

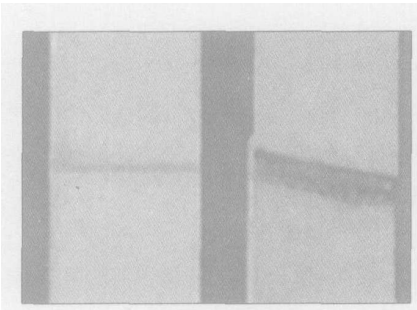
搭接接头的搭接宽度为 3 mm。经过试验摸索, 确定的最佳钎焊温度为 530 ℃, 保温 3 min。具体钎焊步骤为, 当炉温升到钎焊温度(530 ℃)后, 把装配好的待焊试件放入炉中, 再加温到 530 ℃保温 3 min, 随炉冷至 450 ℃, 空冷至室温, 随后在室温下进行自然时效处理。

1.3 钎焊接头试验

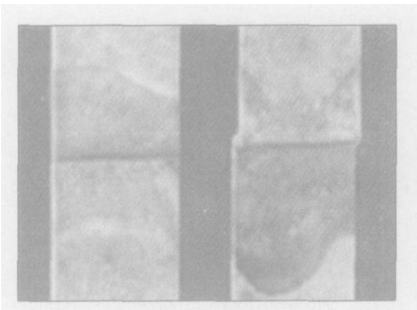
采用 SANS 型电子万能试验机测试钎焊接头的强度; 采用 Quanta2000 型扫描电镜观察钎焊接头的断口形貌。

2 试验结果

钎焊试件经过 96 h 自然时效后, 测定其抗拉强度和抗剪强度。钎焊接头外观如图 1 所示, 抗拉强度和抗剪强度结果如表 2 所示。



(a) 加氮气保护



(b) 不加氮气保护

图 1 钎焊接头外观照片

Fig. 1 Appearance of brazed joints

表 2 钎焊接头的抗拉强度和抗剪强度

Table 2 Tensile and shear strengths of brazed joints

试件 编号	接头 形式	抗拉强度 R_m /MPa	抗剪强度 τ /MPa	强度 系数	断裂 位置	焊接 气氛
1	对接	380	—	0.86	钎 缝	加 氮 气 保 护
2		390	—	0.89		
3		380	—	0.86		
平均值		385	—	0.88		
4	搭接	—	358	0.81	母 材	
5		—	370	0.84		
6		—	352	0.80		
7		—	380	0.86		
8	对接	—	350	0.80	钎 缝	不 加 氮 气 保 护
平均值		—	360	0.82		
9		60	—	0.14		
10		54	—	0.12		
平均值	搭接	57	—	0.13	钎 缝	
11		—	66	0.15		
12		—	62	0.14		
平均值		—	64	0.15		

3 分析与讨论

3.1 铝锂合金钎焊性分析

铝锂合金中 Li 的化学活性极强, 且易向表面富集, 与空气中的氧和水蒸气发生反应, 铝锂合金表面氧化膜的存在形式是在原有的非晶态 Al_2O_3 氧化膜上形成一层含 Li 的化合物, 如 Li_2CO_3 , $LiOH$, $LiAlO_2$, Li_2O 等, 使得钎焊非常难以进行。因为钎焊温度既不能低于铝锂合金的固溶处理温度 520 ℃, 又不能太高, 否则会使母材“过烧”。温度高于 530 ℃时, 随着温度的升高, 铝锂合金表面氧化非常严重, 并易产生“起泡”现象, 因此, 在 530 ℃左右(即略高于固溶处理温度 520 ℃)能否有效地去除铝锂合金表面的氧化膜是实现钎焊连接的关键。选用 $CsF-AlF_3$ 钎剂, 为进一步提高 $CsF-AlF_3$ 钎剂的活性, 加入了微量活性成分, 使 $CsF-AlF_3$ 钎剂的熔化温度控制在 460~480 ℃, 并具有足够的活性。

$CsF-AlF_3$ 钎剂在 530 ℃的钎焊温度下, 分解出的 HF 可以有效地除去铝锂合金表面氧化膜中的 Li_2CO_3 , Li_2O , $LiOH$, $LiAlO_2$ 等锂的化合物^[3], 同时生成的 $CsAlF_4$ 与氧化膜中的 Al_2O_3 反应, 生成 $Al_2O_3 \cdot CsAlF_4$ 复合盐^[8], 该复合盐熔体均匀地覆盖在铝锂合金试板的表面, 保护新生的铝锂合金表面不被氧

化,并促进液态钎料的漫流与铺展。由于 Ag—Al—Cu—Zn 钎料在铝合金上具有很好的润湿性和铺展性,其固相线温度为 455 ℃,液相线温度为 485 ℃,与 CsF—AlF₃ 钎剂的熔化温度范围 460 ~ 480 ℃接近,因此,在铝锂合金上的润湿和铺展也非常好(图 1),从而得到了良好的钎焊接头。

钎焊试件的外观如图 1 所示。采用氮气保护钎焊时,钎缝成形好,试件外观美观(图 1a);不加氮气保护,在空气中进行炉中钎焊时,母材氧化严重,钎缝成形较差(图 1b)。

3 2 钎缝力学性能分析

将钎焊温度控制在 530 ℃左右时,既可避免母材的过烧,同时又高于其固溶处理温度 520 ℃,保证母材的组织 and 强度变化不大。从表 2 的结果可以看出,在氮气保护条件下,炉中钎焊对接接头试件的平均抗拉强度为 385 MPa,最低为 380 MPa,最高为 390 MPa,接头的强度系数在 0.86 ~ 0.89 范围;搭接接头试件的平均抗剪强度为 360 MPa,最低为 350 MPa,最高为 380 MPa,接头的强度系数在 0.80 ~ 0.86 范围。无氮气保护条件下,炉中钎焊对接接头试件的最高抗拉强度仅为 60 MPa,接头的强度系数只有 0.14;搭接接头试件的最高抗剪强度为 66 MPa,接头的强度系数只有 0.15。分析比较表 2 中的强度值可知,有无氮气保护,对铝锂合金炉中钎焊接头的强度影响很大。采用氮气保护时,可以获得令人满意的接头强度值,而不采用氮气保护时,钎焊接头

的强度很低,远远达不到使用的要求。研究结果表明,采用氮气保护是改善和提高铝锂合金炉中钎焊接头力学性能的有效手段之一。

比较熔化焊和在氮气保护条件下铝锂合金炉中钎焊的结果可以看出,无论是对接还是搭接接头的接头强度系数,钎焊接头的强度系数不仅高于采用手工氩弧焊焊接的 1460 铝锂合金的接头强度系数 0.7 ~ 0.75 (其中选用含 Zr、Sc 元素的 C_B 1217 焊丝,抗拉强度为人工时效状态下的抗拉强度)^[5],也大大高于 8090 铝锂合金氩弧焊的接头强度系数(0.65)^[4]以及 2090Ce 铝锂合金炉中钎焊和真空钎焊接头的强度系数(0.5)^[6]。由于熔化焊时,存在热影响区软化现象,而热影响区往往是整个焊接接头的薄弱部位,因此影响了整个焊接接头的强度。采用炉中钎焊试件整体加热,没有热影响区存在,钎焊加热温度相对熔化焊较低,对母材组织和性能的影响较小,且选用的 CsF—AlF₃ 钎剂与 Ag—Al—Cu—Zn 钎料配合得当,从而使钎焊接头达到了较高的强度。

3 3 接头断口形貌分析

图 2 是钎焊接头断口形貌的 SEM 照片。图 2a 是钎焊前母材断口形貌照片,图 2b 是氮气保护条件下对接接头试件的断口形貌照片,图 2c 是氮气保护条件下搭接接头试件的断口形貌照片,图 2d 是无氮气保护时对接接头试件的断口形貌照片,图 2e 是无氮气保护时搭接接头试件的断口形貌照片。

从图 2a 可以看出,钎焊前母材断口呈纤维网

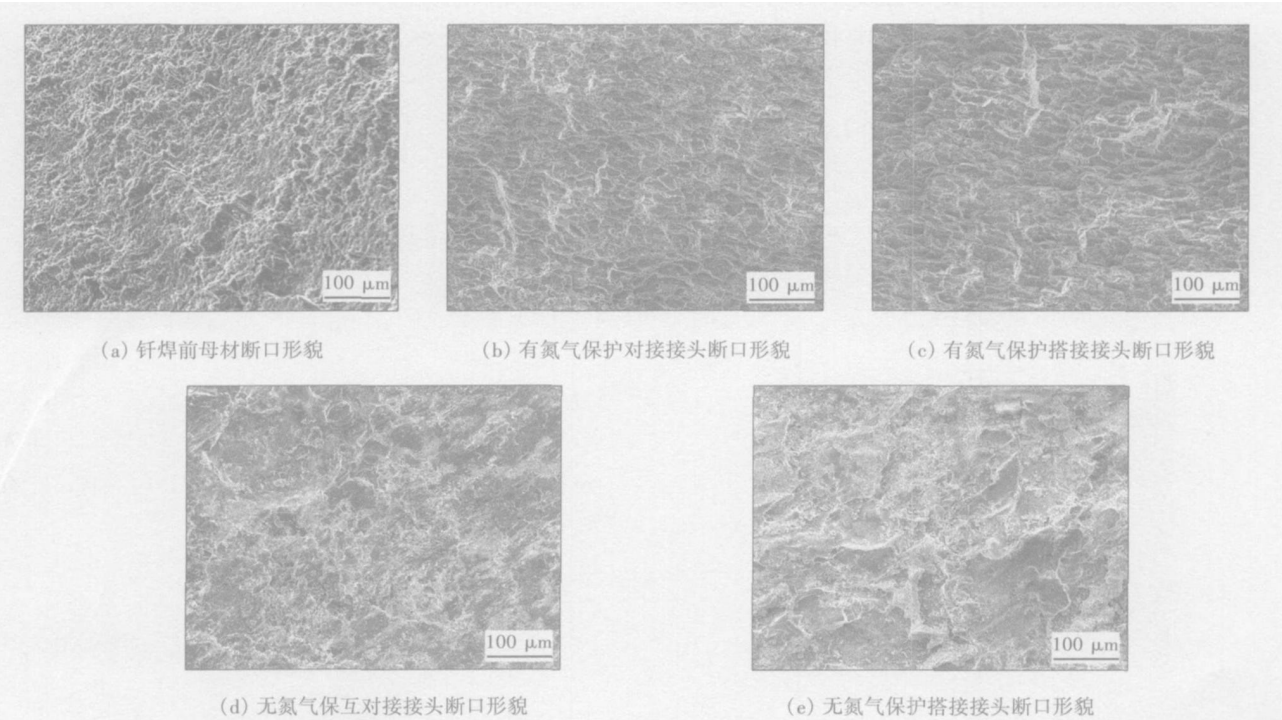


图 2 钎焊接头断口形貌
Fig. 2 SEM fractographs of brazed joints

状,断口上有大量的小韧窝存在,断口呈现明显的韧性断裂特征;图 2b 为对接接头的断裂形貌,其断裂位置为钎缝,从断口照片中可以看出,钎缝的组织均匀,没有夹杂、气孔、未渗透等缺陷存在,说明钎缝组织致密、均匀,断口呈网状,有大量的韧窝存在;从图 2c 可以看出,其断口形貌与图 2b 相似,断口呈网状,有大量的韧窝存在,组织均匀。但与图 2a 相比,显微组织没有钎焊前母材的组织细小,说明试验条件下的钎焊温度对母材的显微组织仍有一定的影响。

从图 2d 可以看出,断口呈现明显的脆性断裂特征,图 2e 的断口形貌与图 2d 的相似,断口亦呈现明显的脆性断裂特征,宏观结果表现为无氮气保护条件下钎焊接头的强度较低,显微组织的特征与表 2 中的强度结果吻合,但是为什么在无氮气保护条件下,钎焊接头的显微组织较有氮气保护时会有如此大的变化,从而导致钎焊接头的强度大幅下降,有待进一步研究和探讨。

4 结 论

(1) 采用 CsF—AlF₃ 钎剂和 Ag—Al—Cu—Zn 钎料,氮气保护炉中钎焊,获得了令人满意的钎焊接头。

(2) 在氮气保护的条件下,对接接头的抗拉强度最高达到 390 MPa,强度系数接近 0.89,搭接接头的抗剪强度最高达到 380 MPa,强度系数约为 0.86,不加氮气保护的强度系数只有 0.14 和 0.15,说明采

用氮气保护炉中钎焊高强铝锂合金的方法是可行的。

(3) 在 530 ℃左右, CsF—AlF₃ 钎剂有效地去除铝锂合金表面的氧化膜是实现钎焊连接的关键,而氮气保护则是改善和提高钎缝力学性能的有效手段。

参考文献:

[1] 周昌荣,潘青林,朱朝明,等. 新型铝锂合金的研究和发展[J]. 材料导报, 2004, 18(5): 30—32.

[2] Strohmeier B R, Schrahl D M. Ion scattering analysis of speckles appearing on solution heat-treated Al-Li alloys[J]. Materials Letters, 1998, 37(6): 366—370.

[3] 李 艳,邓继雄,魏祚伟. 1420 合金板材氧化膜对氩弧焊缝中气孔的影响[J]. 焊接学报, 2001, 22(6): 81—84.

[4] 周国兴,赵后良. 铝锂合金的氩弧焊工艺[J]. 航空制造工程, 1998(1): 22—23.

[5] 沃夫琴尼柯夫 B B, 德尼兹 A M, 克内莫娃 T B. 铝锂合金飞机构件的焊接特点[J]. 航空精密制造技术, 1998, 34(6): 26—28.

[6] 曾 磊. 稀土铝锂合金钎焊性研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2002.

[7] 薛松柏,董 健,吕晓春,等. LY12 铝合金中温钎焊技术[J]. 焊接学报, 2003, 24(3): 21—22.

[8] 薛松柏,陈文华,吕晓春,等. LY12 铝合金氧化膜与钎剂的反应机制[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(4): 543—547.

作者简介: 张 玲,女,1975 年 12 月出生,硕士研究生。主要研究方向为新型焊接材料及新工艺。

Email: zhangling508@126.com

ty, which makes the Young's modulus increase. It was found that the spraying orientation has effect on Young's modulus of coating which takes on the anisotropic property. In addition, interface fracture toughness was also introduced, which mainly include the 4-point bend test to measure interface critical strain energy rate, improved tensile test and local approach based on Weibull criterion.

Key words: coatings; Young's modulus; three-point bending; two-side coated specimen; interface fracture toughness

Analysis of plasma-MIG arc signal based on LabVIEW BAI Yan, GAO Hongming, Lu Hao, Shi Lei (State Key Lab of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p59—62

Abstract: The arc electrical signals were collected the data acquisition system in the plasma-MIG welding process, and the U-t, I-t, U-I diagrams analyzed with the Labview software were obtained. The difference of arc characteristic between plasma-MIG arc and MIG arc was studied and the effect of increase of MIG current on the electric signals of the Plasma-MIG arc was analyzed. The unstable arc electrical signals of Plasma-MIG were gathered and the result indicates that some contacts exist between inner arc and outer arc.

Key words: plasma-MIG; MIG; arc signal; LabVIEW

Mechanical properties of CO₂-laser and TIG aluminium alloy welded joint ZHOU Qinglin, QIAO Jisen, CHEN Jianhong, ZHU Liang (State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China). p63—66

Abstract: The mechanical properties of Al-alloy 5A02 and its welded joint of CO₂ laser welding and TIG welding were studied. And rolling—orientation and rolling—uprightness orientation mechanical properties were measured. In addition, series load experiments were used to study properties of weld and base metal. This study considered that material anisotropy affects welded-joint mechanical properties which is relate to each area materials mechanical properties of welded joint, will provide the theoretical bases for investigation of welded joint, as well as provide the local mechanical properties experimental data for crash simulation of Al-alloy automobile components.

Key words: CO₂ Laser welding; TIG welding; welded joint; anisotropy; curve fitting.

Extension of ductile fracture based on micro-plastic damage ZHU Zhijun, JING Hongyang, XU Lianyong, HUO Lixing (School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China). p67—70

Abstract: Considering the inner micro plastic damage, using the finite element method (the computational cell model) and compiling the program to get parameters controlled ductile crack growth, the process of ductile fracture was simulated. The parameters to con-

troll ductile crack growth were gotten from the simulating uniaxial tension test, which means that tests of the same material can be forecasted each other based the cell model. The results indicate that the prediction is in a good agreement with the experiment, and the cell model gives a good description of ductile crack growth. The prediction between different tests of the same material is reasonable.

Key words: plastic damage; finite element numerical simulation; experiment; ductile fracture

Analysis on high strength Al-Li alloy joints brazed in furnace ZHANG Ling, XUE Songbai, HAN Zongjie, HUANG Xiang (College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China). p71—74

Abstract: High strength Al-Li alloy was brazed in furnace by using Ag-Al-Cu-Zn filler metal with CsF-AlF₃ flux. The results show that under the condition of N₂ atmosphere, the tensile strength of butt joint is up to about 390 MPa with the strength factor of 0.89 and the shear strength of lap joint is up to about 380 MPa with the strength factor of 0.86, which all the strength factors are higher than those of fusion welding and brazed joints of high strength Al-Li alloy reported. The experimental results and theoretical analyses show that, effectively destroying and removing the complex oxide films on the surface of Al-Li alloy under the temperature of about 530 °C is the key factor to the brazing process and the protection of N₂ is an important way to improve mechanical properties of the braze metal.

Key words: high strength Al-Li alloy; furnace brazing; strength factor; fractograph

Methods of safe assessment for offshore pipeline LIU Mingliang, ZHANG Yufeng, HUO Lixing, DENG Caiyan (School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 30072, China). p75—78

Abstract: Given crack size and load, two methods of Structure Integrity Assessment Procedure (SINTAP) sponsored by the European Commission and BS910 were applied to assessment for welded joints of the API 5LX65 pipeline steel with surface flaw at the weld toe. The assessment was carried out according to Limit Load Solutions and the CTOD (Crack Tip Opening Displacement) test result. The failure lines of level 0 and level 1 (level 1 and level 2 of BS7910) of the weld were derived from the tensile test results. The assessment showed that the assessment point is located within the failure line of analysis level 0 and level 1 (level 1 and level 2 of BS7910). So welded joint of the pipeline is safe and the values obtained by using the two methods are very similar. Analysis of these two methods gives a help to use different methods for pipeline structure assessment. This study laid the foundation of choosing different methods of pipeline structure assessment.

Key words: offshore pipeline; structural integrity; failure assessment diagram