

2090Ce 铝锂合金的焊缝热裂纹敏感性 及接头力学性能^①

贺 勇 林德超 王忠平 贺运佳

(西北工业大学焊接教研室, 西安 710072)

摘 要 采用焊缝合金化手段, 通过设计新型焊丝向焊缝中添加 Li、Zr 和 Ce 等合金化元素, 研究了 2090Ce 稀土铝锂合金焊缝金属的热裂纹敏感性; 探讨了合金元素对接头力学性能的影响及作用规律; 进而研究了适用于焊接 2090Ce 合金的焊丝合金成分。试验结果表明, 向焊缝金属中添加适量的合金元素 Li、Zr 和 Ce, 能够细化晶粒; 增加焊缝中的共晶数量并改善其分布形态, 从而有助于降低焊缝金属的热裂纹敏感性。另外, 适量的 Li、Zr 和 Ce 等合金元素还能够在不降低接头塑性的同时, 明显改善接头的强度; 但 Li 和 Ce 含量过多则会对接头性能, 特别是塑性造成损害。所设计的焊丝材料能够适用于焊接 2090Ce 稀土铝锂合金。

关键词 2090Ce 铝锂合金 焊缝合金化 焊接接头 热裂纹敏感性 力学性能

铝锂合金所具有的高比强度、比刚度等一系列优点已为各国航空航天界所共识。目前国外已有多种牌号的铝锂合金投入使用^[1]。2090Ce 稀土铝锂合金是立足于我国丰富稀土资源的基础上开发的新型产品, 具有较高的塑性和韧性等优点^[2]。焊接性研究对于推广并拓展其应用领域是十分必要的。已有的研究表明, 稀土铝锂合金中所含的 Li、Zr 和 Ce 等合金元素有助于改善其焊接性^[3, 4]。然而, 由于至今国内外尚无适用于 2090 铝锂合金的焊丝材料, 而采用现有的售品焊丝难以获得满意的焊接接头, 接头强度系数较低, 一般在 50% 以下, 虽然焊后时效处理能提高接头的强度, 但同时大幅度降低了塑性^[5]。国外学者在研究 2090 铝锂合金的焊接问题时常采用 2319 合金焊丝^[6], 虽然用这种焊丝得到的焊接接头塑性较好, 但强度一般, 热裂纹敏感性偏高。因此, 研制新型的适用于焊接 2090 稀土铝锂合金的焊丝材料对于该类合金的应用有着十分重要的

意义。

本文以 2319 合金焊丝为基础, 通过设计新型焊丝向焊缝中添加适量的 Li、Zr 和 Ce 等合金化元素, 研究 2090Ce 铝锂合金焊缝凝固组织变化规律及其改善热裂纹敏感性作用机理; 探讨合金元素对接头力学性能的影响及作用规律; 并研制适用于 2090Ce 铝锂合金焊接的焊丝材料。

1 试验方法

试验用母材为自制的稀土铝锂合金 2090Ce 板材, 板厚 3.0 mm, 名义成分为(%): Al-2.3Li-2.7Cu-0.12Zr-0.05Ti-0.10Ce。板材在焊前经固溶+人工时效热处理, 规范为: 520℃, 30 min+165℃, 24 h+195℃, 6 h。以 2319 合金焊丝为基础, 适当调整 Li、Zr 和 Ce 等合金元素的含量, 设计了四种焊丝合金, 同时, 还选用了 2319 售品焊丝作为比较。表 1 给

① 国家自然科学基金(编号 59171063)和航空科学基金资助项目

收稿日期: 1996-03-07; 修回日期: 1996-06-13 贺 勇, 男, 34 岁, 讲师

出了所用焊丝的名义化学成分。焊接试件尺寸为 100 mm × (50~ 80) mm × 3.0 mm, 焊丝直径为 $d2.0\text{ mm}$ 。焊前对母材和焊丝均进行了严格的化学清理以消除焊接气孔。采用自动交流 TIG 焊焊接, 平对接接头, 手工填丝得到不同化学成分的焊缝金属, 所用焊接规范如表 2 所示。

表 1 焊丝化学成分(%)

焊丝	Li	Cu	Mn	Zr	Ce	Al
2319		6.3	0.3	0.18		余量
H1		6.3	0.3	0.4	0.4	余量
H2		6.3	0.3	0.92	0.8	余量
H3	3.0	6.3	0.3	0.4	0.4	余量
H4		6.3	0.3	0.92	0.4	余量

表 2 焊接规范

试验	焊接 I/A	$u/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	d/mm	$Q/\text{L}\cdot\text{mm}^{-1}$	H/mm
焊接试验	60~ 70	2.33	2.5	6.0	2.5
可变拘束 抗热裂试验	70~ 72	2.33	2.5	8.0	2.5
拉伸试验	120~ 126	2.33	2.5	6.0	2.5

I —焊接电流; u —焊接速度; d —钨极直径; Q —氩气流量; H —焊炬高度

采用横向变拘束试验方法研究焊缝金属的热裂纹敏感性。进行变拘束试验时, 采用自动 TIG 电弧重熔焊缝。使用曲率半径为 300 mm 的模块使焊缝表面在凝固过程中承受 0.43% 的附加应变。

焊接接头拉伸试件尺寸为 120 mm × 12.5 mm × 2.6 mm。焊接后的试件经 X 射线透视, 对无缺陷的试件铣加工去除焊缝正反面堆高。试验在 Instron 1195 试验机上进行, 加载速度为 1.0 mm/min。为了比较各种焊缝金属的塑性, 对焊接接头还进行了三点正弯曲试验, 试件尺寸为 80 mm × 10 mm × 2.6 mm, 试验在油压弯曲试验机上进行, 加载速度小于 3.0 mm/min, 当焊缝正面出现第一条微裂纹时停止加载, 并测量弯曲角 α 。

采用 JX6 型工具显微镜测量得到焊缝表面裂纹总长 L_T 和裂纹总数 N 。利用光学显微镜进行焊缝金相组织观察和定量组织分析。对

拉伸试件断口进行了扫描电镜(SEM) 微观形貌分析, 并结合光学金相组织观察拉伸试件裂纹扩展路径。

2 试验结果及分析

2.1 变拘束试验结果

表 3 给出了采用不同种类焊丝得到的焊缝金属的热裂纹总数 N 和热裂纹总长 L_T 。在热裂纹形成过程中, 引起裂纹产生的驱动力——应变能一定时, 若消耗于塑性变形的能量增多, 则消耗于形成裂纹表面的能量份额相应减少, 裂纹继续扩展的过程随之减缓, 表现为裂纹总长 L_T 较小; 裂纹总数 N 则反映了焊缝金属在脆性温度区间由于塑性储备不足以承受所施加的应变而萌生裂纹部位的数目。当外加应变一定时, 裂纹总长 L_T 和裂纹总数 N 间接地反映了焊缝金属的高温塑性, 高温塑性好的焊缝金属中裂纹总长和总数较少。因此, 从降低焊缝金属热裂纹敏感性的角度来看, H3 和 H2 焊丝的效果最好, 其次为 H4、H1 和 2319 焊丝。

表 3 变拘束试验结果

焊丝	N	L_T/mm
2319	12.5	20.8
H1	9.3	16.1
H2	7.5	12.9
H3	8.9	9.95
H4	8.2	13.6

2.2 接头力学性能

表 4 所示为 2090Ce 合金焊接接头拉伸和弯曲试验结果。表中 δ_w 为焊缝金属延伸率, 标距 8.0 mm, 等于焊缝宽度; δ_j 表示焊接接头的延伸率, 包括焊缝、热影响区和母材, 标距为 30 mm; α 代表弯曲角; η 为接头强度系数, 等于接头拉伸强度与母材强度之比。试件均断于焊缝金属中。

试验结果表明, 除 H2 焊丝以外, 采用本文所设计的 H1、H3 和 H4 焊丝所焊接头的拉伸强度均高于 2319 焊丝所焊接头。考察塑性

指标 δ_w 、 δ_j 和 α ，可以看出，2319 焊丝所焊接头和焊缝金属的塑性较好，而本文所设计的 H4 焊丝的塑性优于 2319 焊丝，H1 焊丝则与 2319 焊丝相当。采用 H3 焊丝则可获得最高的接头强度，但塑性较差。

表 4 焊接接头力学性能

焊丝	σ_b /MPa	δ_w /%	δ_j /%	α /(°)	η /%
2319	207.5	15.8	7.2	63	45.2
H1	230.0	14.5	7.0	60	50.2
H2	176.5	9.5	4.6	46	38.6
H3	264.0	3.9	2.8	16	57.7
H4	235.0	16.5	8.4	74	51.3

2.3 焊缝凝固组织形态

图 1 和图 2 分别为三类具有代表性的焊缝凝固组织金相照片。可以看出，虽然焊丝种类不同，但 2090Ce 铝锂合金焊缝组织均呈现出其独特的组织特征，即从熔合线至焊缝中心，

结晶形态依次为等轴细晶区、柱状晶区和等轴树枝晶区。根据焊缝金属中合金元素含量不同，各区域的宽度及晶粒大小有所差别。

表 5 给出了根据母材化学成分，焊丝成分及熔合比(65%) 计算得到的焊缝金属主要合金元素含量。与上述金相组织照片进行比较，可见随着 Li、Zr 和 Ce 含量的增加，焊缝组织中细晶区宽度增加，柱状晶区宽度变窄，柱状晶粒尺寸亦有所减小，焊缝中心等轴树枝晶区则有所扩大。以 2319 和 H1 两种焊丝为例，细晶区宽度分别为 30~ 50 μm 和 104 μm ；柱状晶区宽度分别为 820 μm 和 360 μm 。定量金相分析结果还表明，随着合金元素 Li 和 Ce 含量的增加，焊缝中的共晶数量相应增加。

2.4 拉伸断口形貌分析

从宏观上看，2319、H1、H2 和 H4 焊丝所焊接头在拉伸断裂前焊缝金属均发生了较大的

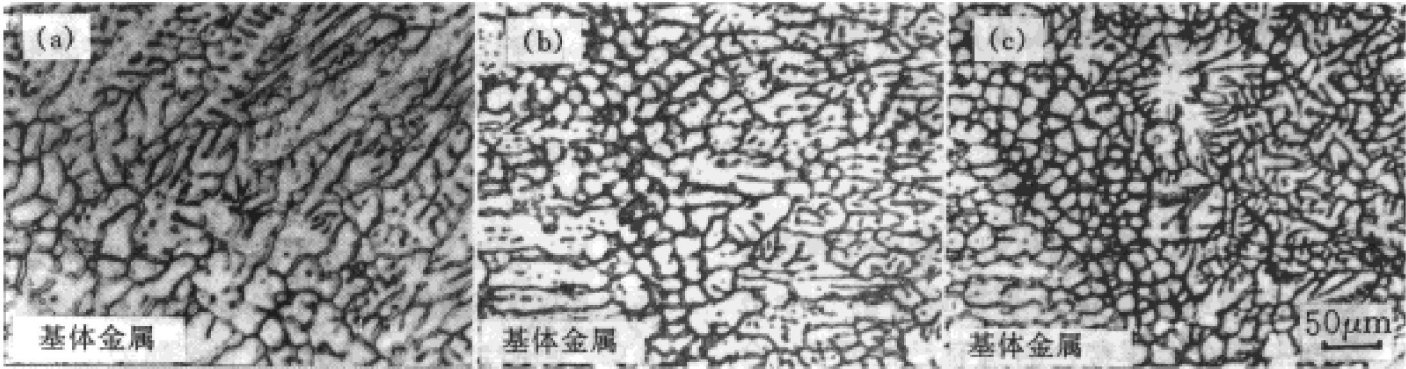


图 1 焊缝熔合线附近凝固组织形态
(a) —2319 焊丝; (b) —H1 焊丝; (c) —H3 焊丝

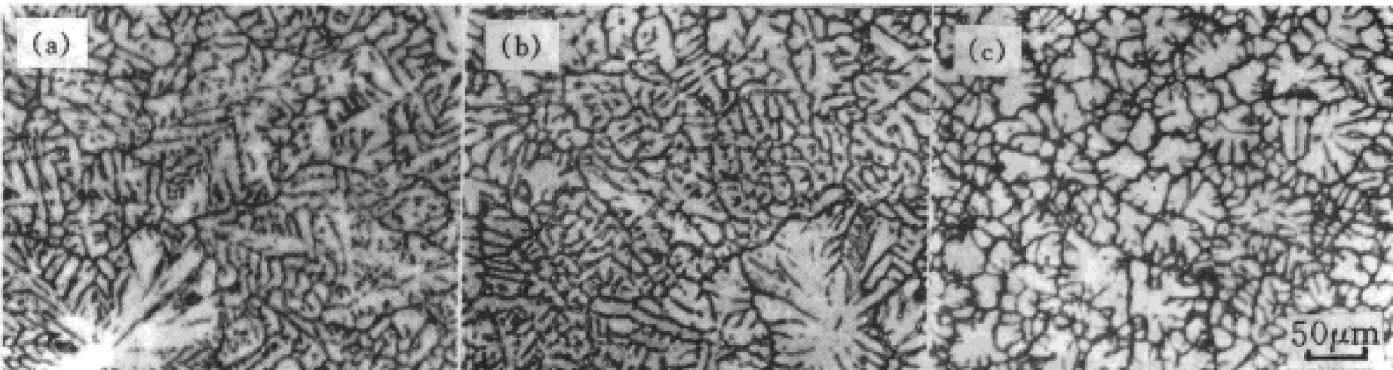


图 2 焊缝中心凝固组织形态
(a) —2319 焊丝; (b) —H1 焊丝; (c) —H3 焊丝

表5 焊缝金属中主要合金元素含量及共晶数量(%)

焊丝	Li	Cu	Zr	Ce	共晶
2319	1.50	3.96	0.10	0.065	6.4
H1	1.50	3.96	0.20	0.20	7.5
H2	1.50	3.96	0.30	0.34	10.2
H3	2.50	3.96	0.20	0.24	10.9
H4	1.50	3.96	0.30	0.20	8.2

塑性变形,断口表面大致与最大拉应力方向成45°角,而H3焊丝的焊缝金属断口表面与最大拉应力方向垂直。图3(a)表明H1焊丝所焊焊缝金属中裂纹扩展以穿晶断裂为主,断口上存在较多的韧窝和粗大的撕裂棱,说明焊缝在拉伸断裂前发生了较为显著的塑性变形,焊缝金属塑性较高;图3(b)中的断口形貌显示出兼有沿晶和穿晶的混合断裂特征,断口上撕裂棱较浅,存在平滑的沿晶断面,说明断裂前无明显的塑性变形。断口上还可见到与主断面垂直的沿晶二次裂纹,经测量可知,二次裂纹所包围的区域平均直径约25 μm ,相当于枝晶的横向尺寸,说明二次裂纹是沿着亚晶界扩展的。

3 讨论

在诸多影响焊缝金属热裂纹敏感性的因素中,焊缝凝固组织特征是非常重要的一个方面。对于铝锂合金焊接性的研究已经证实,合金元素Li、Zr和Ce的共同作用使得铝锂合金焊缝中形成了由细晶区、柱状晶区和等轴树枝

晶区组成的凝固组织特征^[3, 4, 7]。合金元素Zr是铝合金焊丝中常用的变质剂,能促进异质形核,细化晶粒;而Li作为降低铝液表面张力最为有效的合金元素,在熔池凝固过程中富集于固液界面前沿的液相中使组分过冷程度增大,促进共晶数量增加;稀土元素Ce则兼有Li和Zr二者的作用。所以, Li、Zr、Ce元素含量较多的H2和H3焊丝的焊缝金属中,柱状晶区很窄,而等轴细晶区和等轴树枝晶区很宽,且晶粒细化,同时,焊缝中的共晶数量较多(表5)。

与柱状晶相比,等轴晶的变形能力较强。当处于固液态的焊缝金属由于凝固而受到拉伸应力作用时,柱状晶难以通过位移或转动而变形,其晶界处容易萌生裂纹并沿着比较平直的晶界扩展;而等轴晶则可以自由地发生相对位移或转动,同时,由于晶界面积增大,曲折程度增加,因而裂纹沿其晶界扩展时消耗的塑性变形功也较多,呈现出较高的抵抗热裂能力。另外,由于Li、Ce的表面活性作用,共晶液相具有良好的流动能力和润湿性,对裂纹有较好的愈合作用,亦有助于降低焊缝金属的热裂纹敏感性。

另一方面,稀土元素Ce能够促进焊缝边缘细晶区的形成和焊缝中部等轴树枝晶的提前发展,同时抑制柱状晶的生长,随着Ce含量的增加,焊缝中细晶区和等轴树枝晶区域也扩大,柱状晶区缩小;Ce在 $\alpha\text{-Al}$ 中的固溶度很

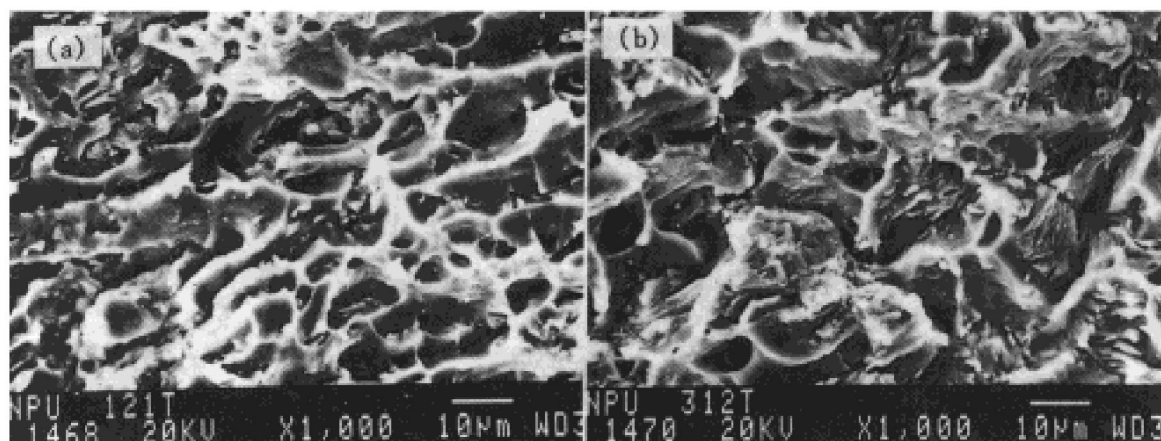


图3 焊缝金属拉伸断口SEM形貌

(a) —H1焊丝; (b) —H3焊丝

小, 适量的 Ce 可偏聚于晶界, 提高晶界激活能, 改善晶界强度; Li 则是铝合金的有效固溶强化元素, 并可与铝形成亚稳相 δ' (Al_3Li), 随着 Li 含量的增加, 焊缝中 δ' 相析出增多, 从而引起沉淀强化。

然而, Li 和 Ce 的存在能够加剧其它合金元素如 Cu 等的偏析, 加之 Ce 具有高度的化学活性, 易与 Al、Cu 等元素反应生成高硬度的化合物相, 如图 4 所示, 这些变化将对焊缝金属的强度和塑性造成损害, 故 H2 焊丝所焊焊缝金属的强度较低; 另外, Li 和 Ce 均为促进共晶形成元素, 随着 Li 和 Ce 含量的增加, 焊缝中共晶数量增多, 当共晶呈网状分布于晶界时, 将会增加晶界脆性, 使焊缝金属的塑性下降。如表 5 所示, 可见由于 H2 和 H3 焊丝中分别含有较多的 Ce 和 Li, 其焊缝金属中的共晶数量很多, 且呈网状分布于晶界上(图 4), 因而其塑性较差。

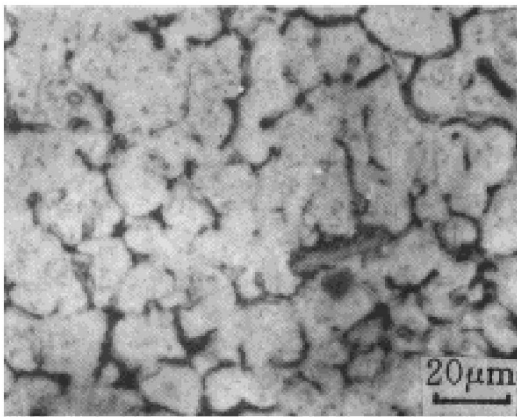


图 4 H2 焊丝所焊焊缝中的块状相及共晶形貌

4 结论

(1) 采用焊缝合金化手段, 向 2090Ce 铝锂合金焊缝中添加适量的合金化元素 Li、Zr、

Ce 能够明显改善焊缝凝固组织形态, 具体表现为焊缝边缘细晶区和焊缝中部等轴树枝区域扩大, 晶粒细化; 共晶数量增多, 使愈合作用提高; 因而能够降低焊缝热裂纹敏感性。

(2) 采用 2319 焊丝焊接 2090Ce 合金, 其接头塑性较高而强度较低; 而向焊缝金属中添加适量的合金元素 Li、Zr 和 Ce, 能够在不降低接头塑性的同时, 明显改善接头的强度; 但 Li 和 Ce 含量过多则对接头性能, 特别是塑性造成损害。

(3) 本文所设计的四种用于焊接 2090Ce 铝锂合金的焊丝, 其焊缝热裂纹敏感性均低于 2319 合金所焊焊缝, 其中以 H2 和 H3 二种焊丝效果最好; H4 焊丝所焊接头强度和塑性均高于 2319 焊丝, 焊缝热裂纹敏感性亦较低, 故适合于焊接要求综合性能良好的 2090Ce 合金焊接结构; H3 焊丝所焊焊缝的热裂倾向低于 H4 焊丝, 且接头强度最高, 虽然塑性稍差, 但仍可满足一定的使用要求。

参考文献

- 1 Balmuch E S. In: Sanders T H Jr and Starke E A Jr eds, Aluminum Alloys. Vol. III. ICAA4, Atlanta (USA), 1994: 82.
- 2 He M *et al.* In: Peters M and Winker P J eds, Aluminium-lithium, 6th Inter Al-Li Conf, Garmisch-Partenkirchen (FRG), DGM Internationalgesellschaft mbh, 1991: 563.
- 3 Yunjia H *et al.* J of Welding, 1989, (7): 280.
- 4 王引真等. 见: 中国材料研究学会编, 新型材料及表面技术(第一分册), '94 秋季中国材料研讨会, 北京, 1994, 北京: 化学工业出版社, 1995: 40.
- 5 Pickens J R. J of Mater Sci, 1990, (25): 3035.
- 6 Martukanitz R P, Natalie C A, Knoefel J O. J of Metals, 1987, (11): 38.
- 7 贺 勇, 王忠平, 贺运佳. 西北工业大学学报, 1995, 13 (1): 21.

(下转 116 页)

ESTIMATION OF ETCHING RATE OF FeNi42 ALLOY IN FeCl_3 SOLUTION BY USING CATHODIC POLARIZATION

Li Lingchuan, Ma Jusheng, Tang Xiangyun
*Department of Materials Science and Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084*

ABSTRACT The cathodic polarization studies of FeNi42 alloy and Pt in FeCl_3 solution of 30° Bé by using linear sweep of potential showed that the diffusion of Fe^{3+} to alloy surface controlled the etching rate of the alloy and that the etching current was equal to the limiting current of reduction. The etching current density of the alloy could be estimated by the cathodic polarization of potential sweep applied on Pt working electrode. Peaks on polarization curves of fast sweep of Pt working electrode, which reduced the limiting current region and was the restricting factor to decide the etching current density by high sweep rate of potential, corresponded to the reduction reaction of Fe^{3+} to Fe^{2+} . The peak or inflection formed on polarization curves of FeNi42 was related to the deposition processes of metal from solution. Fast sweep of potential performed on FeNi42 alloy was not feasible to measure its etching current density.

Key words etching cathodic polarization lead frame

(编辑 彭超群)

(上接 97 页)

HOT CRACKING SUSCEPTIBILITY AND MECHANICAL PROPERTIES OF 2090Ce Al-Li ALLOY WELD

He Yong, Lin Dechao, Wang Zhongping, He Yunjia
*Researching Group of Welding,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072*

ABSTRACT Both hot cracking susceptibility of the weld metal and mechanical properties of the weldment of 2090Ce Al-Li alloy containing rare-earth cerium were investigated by means of weld alloying method through newly designed filler wire in which suitable amounts of alloying elements such as lithium, zirconium and cerium were added. The composition of the filler alloy appropriate for welding 2090Ce alloy was also discussed. The results revealed that the suitable addition of Li, Zr and Ce in weld may promote the refinement of solidification microstructure, increase of eutectic content and improve the distribution of eutectic. The improvement of microstructure leads to a considerable reduction of the susceptibility of hot cracking of weld metal as indicated by the transverse restraint test. Otherwise, the results show that the tensile strength of the weldment can be evidently improved while keeping constant plasticity. Nevertheless, excessive amounts of lithium and cerium in the weld metal may be harmful to the properties, especially plasticity, of the weldment. The results have also verified that the newly designed filler alloys are applicable for welding 2090Ce Al-Li alloy.

Key words 2090Ce Al-Li alloy weld alloying weldment hot crack susceptibility mechanical properties

(编辑 彭超群)