



Ce 含量对 2195 铝锂合金组织及性能的影响

赵和安 胡丽敏 李爱文 张 帅 刘 玲

(航天新力科技有限公司, 遵义 563114)



摘要: 综合采用了光学显微镜、扫描电镜以及万能拉伸试验机等方法, 研究了不同 Ce 含量对 2195 合金组织及性能的影响。研究表明: 在 2195 铝锂合金中添加 0.2% 含量的 Ce 能显著细化铸态组织晶粒, 添加 Ce 含量过多会导致组织晶粒粗化; 添加 0.2%Ce 能保证合金强度不发生明显变化, 并显著提高合金塑性。

关键词: Ce 含量; 2195; 组织; 性能

中图分类号: TG156.9 **文献标识码:** A

Effect of Ce Content on Microstructure and Properties of 2195 Al-Li Alloy

Zhao Hean Hu Limin Li Aiwen Zhang Shuai Liu Ling

(Aerospace Xinli Technology Co., Ltd., Zunyi 563114)

Abstract: The effects of Ce content on microstructure and properties of 2195 alloy were investigated by means of optical microscope, scanning electron microscope and universal tensile testing machine. The results show that adding 0.2% Ce content in 2195 Al-Li alloy can significantly refine the as-cast microstructure grains, and adding too much or too little Ce content can lead to coarsening of microstructure grains. The addition of 0.2% Ce can ensure that the strength of the alloy does not change obviously and improve the plasticity of the alloy significantly.

Key words: Ce content; 2195; organization; performance

1 引言

Li 是自然界中最轻的金属元素 (0.534g/cm^3), 向 Al 中添加 1% 的 Li, 可以降低 3% 的合金密度, 提升 6% 的弹性模量^[1-2], 其减轻密度的效果比 Be、Mg 等轻合金元素更好。进入空中的航天运载器, 每减重 1 克, 相当于 1g 铂金的价值, 结构减重在航天领域可谓“克克计较”。因此, Li 的加入对运力按克重计算价格的空间运载器来说弥足珍贵, 世界各国十分重视研制和开发铝锂合金轻量化结构材料在航天航空领域中的应用。

铝锂合金凭借比镁合金更耐腐蚀、不易燃烧且成

型性能更好, 比复合材料在抗冲击、塑性和修复性方面更优的性能, 同时强度媲美常规 2 系/7 系高强铝合金但密度更低、更耐腐蚀抗疲劳, 被全球公认是航天航空领域最理想轻质结构材料之一, 在高铁、舰船等追求轻量化领域也存在巨大应用前景^[3]。我国从“七五”开始也逐渐重视铝锂合金的研究, 由于铝锂合金关键技术被国外封锁, 国内铝锂合金制备仍然存在质量稳定性差、短横向塑性和韧性较低、塑韧性水平较低、具有较强的各向异性等问题。改善铝锂合金性能的常规方法是优化热处理工艺及微合金化, 已被众多科研工作者所证实。经文献调研发现, 稀土在铝合金具有以下几个方面作用: a. 变质作用, 能减少铝合金铸造枝

基金项目: 航天航空用高性能铝锂合金及先进制备加工技术研究(遵义科合重大(2020)2号); 航天舵机壳体用新型细晶超轻铝锂合金特种材料研发及应用(120001108)。

作者简介: 赵和安(1983), 硕士, 材料成型专业; 研究方向: 新材料研发。

收稿日期: 2023-03-20

晶间距，细化铸造组织；b.净化熔体，消除 H、Fe 等有害物质；c.微合金化作用，对铝合金起一定的改性作用^[4]。

2195 铝锂合金 Cu 含量较高，具有较高的铜锂比（Cu/Li≈4）而几乎不出现 δ' 相，因此，共面滑移和晶界 δ' -PDF 不再是导致合金降低塑性和韧性的主要原因，但 Ce 在其他较低铜锂比铝锂合金中的一些有益作用使用作者认为在 2195 合金中添加微量 Ce 也许是能够提高 2195 铝锂合金组织及性能的一种方式。同时，2195 铝锂合金中 Cu 含量在 3.7%~4.3%之间，在高 Cu 含量铝合金中添加 Ce 可提高其强度^[5~7]。在铝锂合金中添加 Ce 具有减少铝锂合金晶界或亚晶界的应力集中和晶界弱化，使变形更加均匀，有利于合金韧性的提高^[8]。本文在 2195 铝锂合金的基础上复合添加微量元素 Ce，改善合金的性能，以期得到塑韧性较好的铝锂合金材料。

2 实验材料及方法

本实验材料以 2195 铝锂合金为基础，分别熔铸制备了不含 Ce 以及含三种比例 Ce 的铝锂合金铸锭。按照各组铝锂合金成分设计，对各组分的质量百分比进行配料，并将配好的原材料按照一定顺序放置于真空感应炉中，在真空环境下熔炼，得到金属液并浇铸成型，得到 $\phi 125\text{mm}$ 规格且重量 10kg 的铸锭。经化学分析，其各组分合金元素的化学成分如表 1 所示。铸锭经 495℃/48h 均匀化退火，锻造成 380mm×200mm×35mm 厚度锻板。锻板经 515℃空气炉固溶 2h，冷水淬火处理后进行 T6 时效处理。

表 1 合金成分表						
合金编号	Cu	Li	Mg	Ti	Ce	Ag
2195 (1#)	4.27	1.11	0.45	0.002	0	0.41
2195+0.1Ce (2#)	4.30	1.05	0.43	0.001	0.11	0.39
2195+0.2Ce (3#)	4.25	1.17	0.47	0.002	0.19	0.38
2195+0.3Ce (4#)	4.48	1.06	0.43	0.003	0.30	0.40

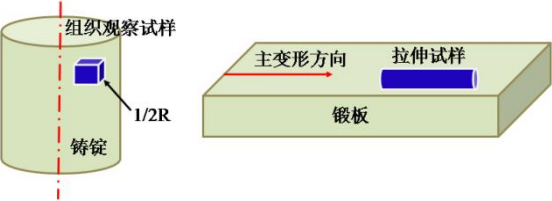


图 1 均匀化态组织观察试样及拉伸试样取样示意图

将均匀化前后铸锭沿半径方向 1/2R 处取一块试样

进行显微组织观察，并沿锻板主变形方向各取拉伸试样进行拉伸性能测试，均匀化显微组织观察试样及拉伸取样位置如图 1 所示。

将均匀化态晶粒组织试样依次砂纸上研磨，研磨顺序分别是 240#、320#、1000#、2000#砂纸上研磨，然后进行机械抛光及 Keller 试剂（2.5% HNO_3 +1.0% HF +1.5% HCl +95% H_2O ）腐蚀后采用 AXIO VERT A1 蔡司光学显微镜进行观察。

利用 ZEISS EVO®MA and LS Series 扫描电子显微镜及其附带的背散射（BSE）、二次电子（SE）及能谱（EDS）对铸态、均匀化态及 T6 态断口试样的第二相粒子的形貌、成分特征进行观察和分析，加速电压 20kV。

将 T6 态拉伸试样在 CTM4105 万能拉伸试验机上按照 GB/T 228.1—2010 标准进行室温拉伸，测定相应合金的室温拉伸性能。试样尺寸沿锻板主变形方向按取样，试样尺寸如图 2 所示。

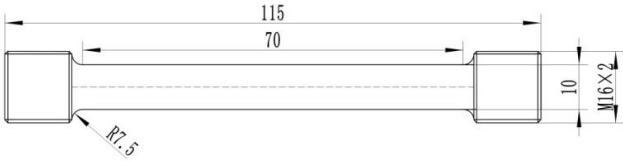


图 2 拉伸试样尺寸图

3 实验结果与分析

3.1 铸态组织分析

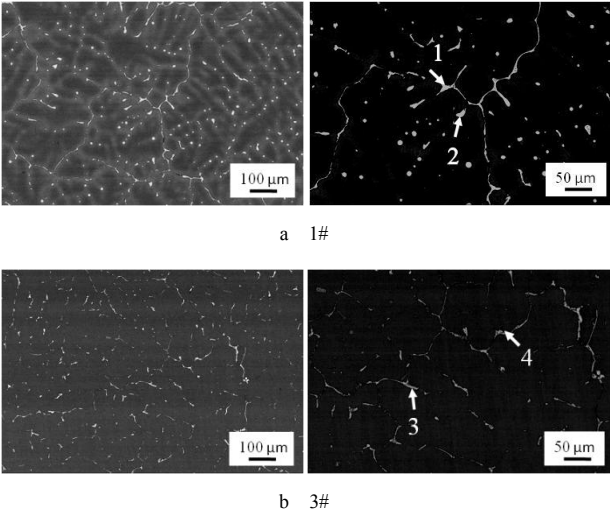


图 3 不同 Ce 含量铝锂合金铸态 SEM 像以及第二相粒子 EDS 的位点图

图 3 所示为不同 Ce 含量 2195 铝锂合金铸态扫描

图片,从晶粒形貌上看,两种铝锂合金都呈树枝状晶粒组织,但未加 Ce 的 1#合金树枝晶更明显;从晶粒尺寸而言,未加 Ce 的 1#合金的晶粒尺寸明显比加 0.2%Ce 的 3#合金大。结果说明在 2195 合金中添加一定量的 Ce 能显著细化铝锂合金铸态晶粒组织。

图 3 中白色箭头所指白色典型第二相的能谱结果如表 2 所示。四种铸态合金组织中均存在较多在凝固过程中产生非平衡相,其 EDS 分析(见表 2)表明,不含 Ce 的 1#合金中的非平衡凝固共晶相主要是 S 相(Al_2CuMg),另外还有极少量常见的含 Fe 杂质粒子;含 0.2%Ce 的 3#合金中存在含有 Ce、Zr 等元素的 S 相(Al_2CuMg)及含 Fe 杂质粒子。这些含 Fe 粒子与唐滔^[9]等人的研究($\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$)相似。此外,对比两种合金的能谱结果,发现不含 Ce 的 1#合金含 Fe 粒子的 Fe 含量比含 0.2%Ce 的 3#合金高。

表 2 不同 Ce 含量 2195 铝锂合金铸态能谱结果

测试点	Cu	Mg	Ag	Ce	Zr	Fe	Al
1	23.13					7.17	69.69
2	32.31	2.58					65.11
3	19.66	0.76		0.88	0.64		78.06
4	24.85					4.13	83.01

3.2 均匀化态组织分析

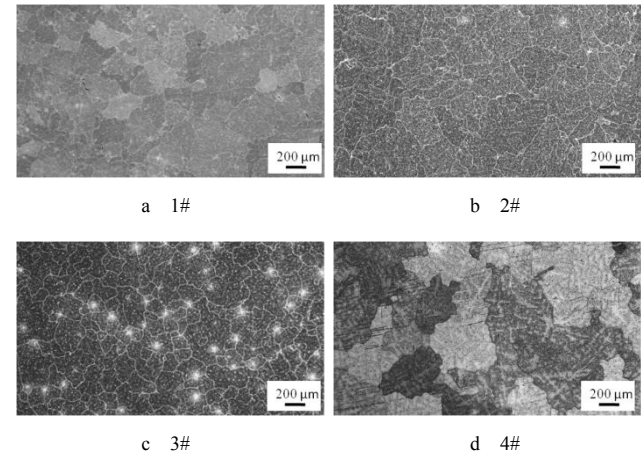


图 4 不同 Ce 含量铝锂合金均匀化态金相照片

图 4 所示为四种不同 Ce 含量合金经 495℃/48h 均匀化后的光学金相显微镜组织。可以看出,不同 Ce 含量铝锂合金中组织的形貌差别非常大。不含 Ce 的 1#合金晶粒尺寸约 180~250μm(见图 4a),添加 0.1%Ce 的 2#合金晶粒尺寸约 180~230μm(见图 4b),含 0.2%Ce 的 3#合金晶粒尺寸最小(160~180μm)且分布最均匀,而含 0.3%Ce 的 4#合金的晶粒尺寸最大,

达到 330~450μm。说明在 2195 铝锂合金中加入适量的 Ce 含量可以细化组织晶粒,使晶粒分布更均匀,而添加的 Ce 含量过多会使铝锂合金组织粗化。在铝合金中添加 Ce 可以细化晶粒的原因具体有两个,一是 Ce 在 Al 中的固溶度较小,容易与 Al 及其他合金元素在固液界面前沿富集形成化合物并阻碍晶粒长大^[10];二是加入适量的 Ce 能够降低相与相之间的表面张力,促进晶粒形核,进而细化组织晶粒,使晶粒分布更均匀。当铝合金中的 Ce 含量较多时,凝固过程中过剩的 Ce 会与 Al 形成较多的化合物(AlCe),促进释放大量的结晶潜热,降低熔液过冷度,降低晶粒细化效果,导致晶粒组织粗化。

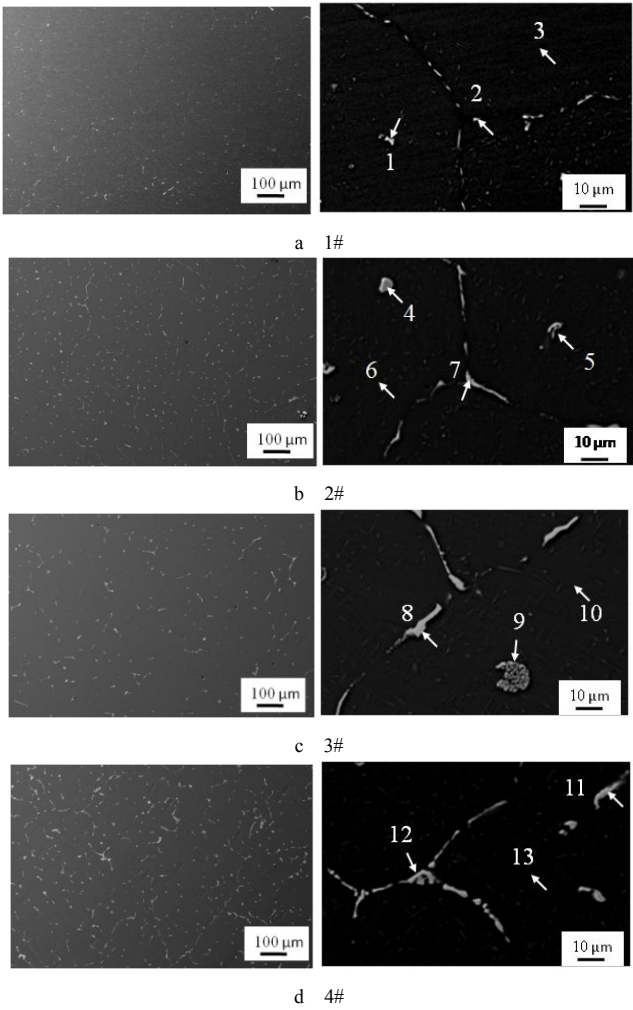


图 5 不同 Ce 含量铝锂合金均匀化态 SEM 像以及第二相粒子 EDS 的位点图

图 5 所示为不同 Ce 含量铝锂合金经均匀化(495℃/48h) SEM 像以及第二相粒子 EDS 的位点图。从图中可以看出,不同 Ce 含量的铝锂合金 SEM 组织差异比较大。1#铝锂合金晶界上存在断续呈串状分布的白色

颗粒，晶内存在点状析出相以及大块状未溶相（见图 5a）。2#~4#含 Ce 合金在晶界上存在不规则形貌的未溶相，呈断续的链状排布，晶粒内部中存在明显的长条状析出相和残余凝固共晶相。此外，还可以看出，在含 Ce 铝锂合金中，含 0.1%Ce 的 2#合金中遍布呈串状分布的白色颗粒，数量较多（见图 5b）；含 0.2%Ce 的 3#合金组织比较干净，只存在少量随机分布的白色颗粒，且分布均匀（见图 5c）；含 0.3%的 3#合金组织中则存在明显粗大的白色颗粒且数量多（见图 5d）。这些粒子含 Ce 富 Cu 且难溶，会导致固溶基体中 Cu 含量降低，时效析出相的数量减少，降低合金的强度^[7]。

图 5 中箭头所指白色第二相的能谱结果如表 3 所示。合金晶界和晶内均存在未溶残余第二相。EDS 分析表明，对于 1#合金晶界上的白色第二相主要是由 Al、Cu、Fe 元素和微量 Ag 元素组成，其 Cu 元素含量较高，明显是 AlCuFe 相和含 Ag 相的混合物（位点 2）；晶内第二相为主要含有 Al、Cu、Fe 元素，明显是 AlCuFe 相（位点 1），猜测这些含 Fe 相为 Al_7Cu_2Fe 。2#~4#合金中的残余第二相粒子主要分为两种类型，第一种与 1#合金中的位点 2 所指白色第二相一致，为含 Fe 杂质相（ Al_7Cu_2Fe ），其能谱见位点 4、位点 5；另一种为富 Cu 且含 Ce 的白色第二相粒子 Al_8Cu_4Ce 相和含 Ag 相（位点 7）。值得注意的是，与 1#合金相比，2#~4#合金基体中的 Ag 含量较高，Cu 含量较低。此外，从图 5 高倍组织中可以看出，在含 Ce 和不含 Ce 的铝锂合金晶粒内部均观察到大量针状相和不规则相，与不加 Ce 合金相比，加 Ce 合金中的针状相数量更多，尺寸更细长。

表 3 不同 Ce 含量 2195 铝锂合金均匀化态能谱结果

测试点	Cu	Mg	Ag	Ce	Zr	Fe	Al
1	7.94					3.3	88.76
2	6.14		0.21			2.13	91.51
3	1.66	0.52	0.31				97.51
4	28.09					0.78	71.13
5	13.44	0.71	0.44	0.36		1.76	83.3
6	1.45	0.65	1.5				96.6
7	26.69	0.63		2.46	0.56		69.88
8	33.48			5.82		0.31	60.39
9	15.67	0.67	0.39	1.33			81.94
10	1.65	0.55	1.2				96.6
11	27.49			5.62		0.28	66.6
12	22.48		0.25	4.35		0.23	72.67
13	1.58	0.43	1.23				96.75

3.3 T6 态性能及断口组织分析

经过前面不同 Ce 含量合金的微观组织分析，并结合组织与性能之间的关系，基于前面均匀化态组织选择不含 Ce 及含 0.2%Ce 的 1#和 3#合金进行力学性能测试，结果如表 4 所示。从表中可以看出，1#合金与 2#合金屈服强度和抗拉强度区别不大，但是加 0.2%Ce 的 2#合金延伸率和断面收缩率比 1#合金分别大 37.5%、45%。说明了在 2195 铝锂合金中添加一定量的 Ce 含量能提高合金的塑性且能保证强度不大幅度下降。

表 4 不同 Ce 含量铝锂合金 T6 态室温拉伸性能结果

合金	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_b/MPa	延伸率 $\delta/\%$	断面收缩率 $\psi/\%$
1#	474	533	8	11
3#	468	520	11	16

图 6 为不同 Ce 含量 T6 态铝锂合金断口组织以及第二相粒子 EDS 的位点图。由图可知，T6 状态下，两合金的断口主要断裂特征均分为分层开裂，但 1#合金层厚较 3#合金较薄，韧窝数量明显较少^[11]。3#合金晶粒尺寸较小，晶界处有较多第二相粒子，说明 Ce 有细化晶粒的作用。此外，两种合金断口上均出现少量沿亚晶开裂。综上，可推测含 0.2%Ce 的 3 号合金塑性由于未加 Ce 的 1#合金，这与前面力学性能规律相符合。

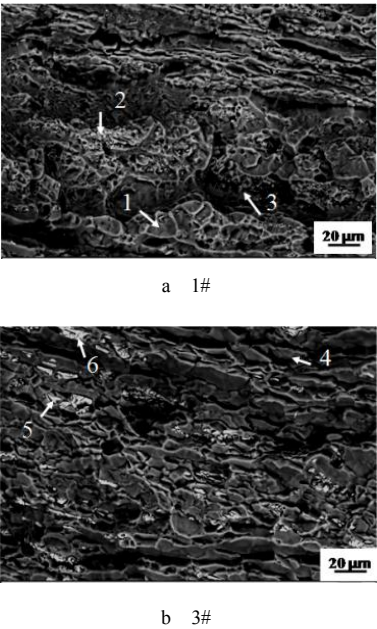


图 6 不同 Ce 含量 T6 态铝锂合金断口组织

表 5 所示为图 6 中白色箭头所指白色典型第二相的 EDS 能谱结果分析。由表可知，未添加 Ce 的 1#合金断口组织中存在 AlCuFe 粒子，可能是 Al_7Cu_2Fe 和

其他含 Cu 颗粒；添加 0.2%Ce 的 3#合金断口组织中 AlCuFe 以及 AlCuCe 等粒子，可能是 Al₇Cu₂Fe 以及 Al₈Cu₄Ce 的混合粒子。另外，从表中还可以看出，3#合金断口第二相粒子中的 Fe 含量较 1#低，说明 Ce 的添加能净化熔体，消除 Fe 等有害物质，提高合金塑性。

表 5 不同 Ce 含量 T6 态铝锂合金断口能谱结果

测试点	Cu	Mg	Ag	Ce	Fe	Al
1	1.49	0.58	0.45			97.48
2	8.34				2.12	89.55
3	27.99				4.61	67.4
4	1.59	0.52	0.39			97.5
5	17.29	0.68		2.85		79.02
6	15.03			2.48		81.73

4 结束语

a. 在 2195 铝锂合金中加入适量的 Ce 能够降低相与相之间的表面张力，促进晶粒形核，进而细化组织晶粒，使晶粒分布更均匀，Ce 含量添加过多，会形成 AlCe 化合物，促进释放结晶潜热，降低过冷度，导致晶粒组织粗化。

b. 在 2195 铝锂合金中添加一定量的 Ce 含量能提高合金的塑性且能保证强度不大幅度下降。一定量的 Ce 能净化熔体消除 Fe 等有害物质，提高合金塑性，但 Ce 会与 Al、Cu 等元素形成含 Ce 富 Cu 的 AlCuCe 相，降低固溶基体中的 Cu 含量，时效析出相减少，降低合金强度。

c. 2195 合金和含 0.2%Ce 的 2195 合金 T6 状态的屈服强度、抗拉强度、延伸率和断面收缩分别为：474MPa、533MPa；8%、11%；468MPa、520MPa；10%、

16%。

参考文献

1 李劲风, 宁红, 刘丹阳, 等. Al-Cu-Li 系铝锂合金的合金化与微合金化[J]. 铝加工, 2020, 3(254): 3~10

2 Meric C. An investigation on the elastic modulus and density of vacuum casted aluminum alloy 2024 containing lithium additions[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2000, 9(3): 266~271

3 刘乐. 铝锂合金微观组织演变及热变形力学性能研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2019

4 吴秀亮, 刘铭, 臧金鑫, 等. 铝锂合金研究进展和航空航天应用[J]. 材料导报, 2016, 30(28): 571~585

5 肖代红, 陈康华, 宋旻. 铈对 Al-Cu-Mg-Mn-Ag 合金时效析出与显微组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2007, 98(5): 669~675

6 肖代红, 王健农, 丁冬雁, 等. 微量 Ce 和 Ti 对 AlCuMgAg 合金组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2004(4): 404~407

7 Yu Xinxiang, Yin Dengfeng, Yu Zhiming. Effect of cerium and zirconium microalloying addition on the microstructures and tensile properties of novel Al-Cu-Li alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(8): 1917~1923

8 孟亮, 郑修麟. 稀土元素及杂质在铝锂合金中的作用研究现状与发展[J]. 航空学报, 1998, 19(2): 129~136

9 唐韬. Ce 及热处理对铝锂合金析出相及各向异性的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2013

10 潘波, 李睿, 李劲风, 等. Ce 对高强 Al-Cu-Li 合金组织及拉伸性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(1): 21~30

11 王永欣, 陈铮, 徐磊, 等. 铈对 Al-Li 合金断裂方式影响的半定量研究[J]. 中国稀土学报, 2004(3): 369~374