DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4014

混合稀土变质对 A390 合金显微组织及力学性能的影响

王亚东[1],王建华[1],奎永才[1],雷　强[1],吴华洋[1],李　薇[2],隋育栋[3]

(1. 云南德孟高速公路投资开发有限公司,云南 保山 678013; 2. 云南省交通规划设计研究院股份有限公司,云南 昆明 650041; 3. 昆明理工大学 材料科学与工程学院,云南 昆明 650500)

摘　要:铝硅合金拥有良好的成型性和较高的力学性能,被广泛应用于各个行业。但过共晶铝硅合金铸态组织中存在的粗大不规则块状初晶硅相会割裂基体,显著降低合金力学性能。本文采用 OM、SEM 及万能材料试验机等研究混合稀土 La、Ce 变质 A390 过共晶铝硅合金的微观组织和力学性能。结果表明,混合稀土对初晶硅的变质效果明显,随着混合稀土含量的增加,初晶硅的体积分数和合金的力学性能呈先增加后降低的趋势,当混合稀土加入量为 0.58%(其中 La 为 0.33%,Ce 为 0.25%,质量分数)时,初晶硅的体积分数达到最小值 9.37%,铸态合金的抗拉强度和伸长率分别为 229 MPa 和 1.7%。

关键词:A390 合金;混合稀土;初晶硅;共晶硅;力学性能

中图分类号:TG146.2+1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)05-0487-07

Study on the Microstructure and Mechanical Properties of A390 Aluminium Alloy Modified by Mixed Rare Earth

WANG Yadong[1], WANG Jianhua[1], KUI Yongcai[1], LEI Qiang[1], WU Huayang[1], LI Wei[2], SUI Yudong[3]

(1. Yunnan Demeng Expressway Investment and Development Co., Ltd., Baoshan 678013, China; 2. Yunnan Transportation Planning and Design Research Institute Co., Ltd., Kunming 650041, China; 3. Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Aluminium-silicon alloys are widely used in various industries because of their good mechanical properties and high temperature resistance. However, the presence of coarse and irregular primary crystalline silicon phases in the original as-cast microstructure seriously affects the properties of per-eutectic aluminium-silicon alloys. In this paper, the effect of La and Ce on the microstructure and mechanical properties of A390 alloys was studied by OM, SEM and a universal material testing machine. The results show that mixed rare earth elements have an obvious metamorphic effect on primary silicon. With increasing amounts of mixed rare earth elements, the volume fraction of primary silicon and the mechanical properties of the alloy first increase and then decrease. When the amount of mixed rare earth is 0.58 wt. %　(La is 0.33 wt. %, Ce is 0.25 wt. %), the volume fraction of primary silicon reaches the minimum value of 9.37%, and the tensile strength and elongation of the as-cast alloy are 229 MPa and 1.7%, respectively.

Key words: A390 alloy; rare earth elements; primary silicon; eutectic silicon; mechanical properties

A390 过共晶铝硅合金具有轻质、耐磨、耐腐蚀、热膨胀系数小、导热性强、耐高温性能好、电阻率好等优点,被广泛应用于汽车、机械、建筑等领域[1-3]。在过共晶铝硅合金中,未经过变质处理的初晶硅一般为粗大块状,共晶硅为粗大条状,这些粗大相的存在会割裂基体,严重破坏铝硅合金的力学性能[4-5]。因此,对初生硅和共晶硅进行变质处理,提高铝硅合金的各项性能,在科研和实际生产活动中都具有极其重要的意义。

通过改变制备工艺可以对初晶硅相进行变质,如快速凝固、超声波处理、半固态搅拌、熔体过热处理等。Xu 等[6]采用熔体旋转法制备了过共晶 Al-20Si

收稿日期:2024-01-12

基金项目:云南省交通运输厅科技资助项目(云交科教便[2022]123 号);云南交投科技创新计划项目(YCIC-YF-2022-20)

作者简介:王亚东,1971 年生,高级工程师.主要从事交通设施用铝合金材料研究方面的工作.Email: 154364307@qq.com

引用格式:王亚东,王建华,奎永才,雷强,吴华洋,李薇,隋育栋.混合稀土变质对 A390 合金显微组织及力学性能的影响[J].铸造技术,2024,45(5):487-493.

WANG Y D, WANG J H, KUI Y C, LEI Q, WU H Y, LI W, SUI Y D. Study on the microstructure and mechanical properties of A390 aluminium alloy modified by mixed rare earth[J]. Foundry Technology, 2024, 45(5): 487-493.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

合金薄带，发现初晶硅明显减小且转变为颗粒状，同时共晶硅的形态也转变为层片状。Li 等[7]的研究结果表明，挤压铸造工艺能够在一定程度上细化硅相，随着挤压压力的增加，细小的 α-Al 枝晶数量增加，而粗大的初晶硅颗粒数量减少，分布也更加均匀。姚金凤[8]研究发现，采用 T6 热处理工艺可以将富铁的高硅铝合金中的共晶硅细化，但是粗大的富铁相并不能通过热处理改善其尺寸及形貌，目前主要通过添加 P、Na、Sr、Sb 等元素对硅相进行变质[9-13]。但是，P 元素不能同时细化初晶硅和共晶硅，细化效果相对单一；而 Na 元素可以同时细化，但 Na 元素进行复合变质的有效时间很短。用 P、Na、Sr 进行复合变质处理时，会生成 Sr_3P_2 或 Na_3P 等物质，发生变质剂之间变质效果相互抵消的现象，减弱了对硅相的细化效果。同时，P 元素在变质过程中会生成有毒的 P_2O_5 浓烟，给人体健康和环保带来不好的影响。用 Sr 变质可以对共晶硅进行比较好的变质处理，但是变质处理后的合金会产生气孔，影响合金质量。值得注意的是，用 Sr 变质处理时，P、Sb 等元素会对其变质结果产生毒化现象，且 Sr 处理后的合金初晶硅和共晶硅细化效果不好，会与 Al 元素和 Si 元素形成金属化合物，降低合金的性能。Haghayeghi 等[14]向过共晶铝硅合金 A390 的熔体中分别加入棒状的 Al-10Sr 和 Al-10Sb 中间合金，发现初晶硅发生显著细化，其尺寸从 67 μm 分别减小到 12 和 24 μm，分析可知，Sb 通过孪晶和增加层错密度来细化初晶硅，而 Sr 则在硅相细化中起辅助作用。但用 Sb 元素变质处理对冷却速度的要求很高。

此外，加入稀土也可细化硅相。Shi 等[15]向过共晶 Al-20Si 合金中加入纯 Nd，发现 0.3%(质量分数)纯 Nd 能显著减小硅相的尺寸。Li 等[16-18]研究了单独添加 Ce、Er 和 Y 对高硅铝合金的细化作用，发现添加稀土 Ce、Er 或 Y，均能使得硅相的尺寸明显减小。针对过共晶铝硅合金中稀土对硅相的变质机理，国内外学者提出了诸多理论，Alam 等[19]提出干扰原子团理论，认为稀土元素的加入减弱了 Si-Si、Si-Al 原子团之间的结合，而加强了 Al-Al 原子团的结合，导致 α-A1 相首先形核而硅相过冷，在共晶结晶时，α-A1 作为领先相首先析出并长大，同时限制了共晶硅的生长，即稀土对初晶硅的变质作用很小。另一种观点认为，稀土变质是由于稀土元素 La、Ce 等在凝固过程中的富集作用而导致结晶前沿形成成分过冷，从而使硅相生长产生更多的分枝，初晶硅与共晶硅得到细化[4]。本文通过加入 La、Ce 混合稀土对 A390 过共晶铝硅合金的硅相进行变质，研究混合稀土添加量对合金微观组织和力学性能的影响规律，旨在为其应用提供参考。

1 实验材料与方法

采用工业纯铝(纯度>99.7%)与工业纯镁(纯度>99.95%)两种纯金属锭，Al-35Si、Al-50Cu、Al-10La、Al-14P、Al-10Ce(质量分数/%，下同)中间合金为原材料，使用中频感应熔炼炉按质量百分比熔配高硅多元铝合金，合金基础成分为 Al-17.3Si-4.5Cu-0.55Mg-0.08P-X，其中 X 为镧铈混合稀土，其添加量如表 1 所示。在合金制备过程中，首先，使用电阻炉在(720±5) ℃下将纯 Al 加入石墨坩埚中熔化，待纯铝开始融化时加入 Al-35Si、Al-14P 中间合金。为获得成分均匀的熔体，当 Al-35Si 中间合金开始熔化时，加入Al-50Cu 合金，然后加入 Al-10 La、Al-10Ce 中间合金。其次，降温至 690 ℃后向熔体中加入纯镁，轻轻搅拌熔体。最后，使用 C_2Cl_6 对熔体精炼，扒渣后进行浇铸。使用 ICP-AES 测试 Al-17.3Si-4.5Cu-0.55Mg-0.08P-X 合金的成分，如表 2 所示。

表1 A390合金中添加稀土元素后的化学成分
Tab.1 Composition of the A390 alloy with rare elements added

(mass fraction/%)

Alloy	La+Ce	La	Ce
1	0	0	0
2	0.212	0.12	0.092
3	0.580	0.33	0.250
4	0.890	0.51	0.380

表 2 合金实际化学成分
Tab.2 Actual chemical composition of the A390 alloy

(mass fraction/%)

Alloy	Al	Si	Cu	Mg	P	La	Ce
1	Bal.	17.6	4.642	0.612	0.079	0	0
2	Bal.	17.9	4.324	0.593	0.078	0.112	0.091
3	Bal.	16.6	4.565	0.552	0.081	0.325	0.248
4	Bal.	16.8	4.365	0.623	0.078	0.521	0.395

使用 Nikon MA200 光学金相显微镜，Zeiss EVO 180 扫描电子显微镜，结合 Bruker XFlash Detector 6-30 能谱仪对制备的不同金相样品进行微观组织观察，使用 Image-pro plus 统计金相图中初晶硅的体积分数。根据国家标准金属材料拉伸试验(GBT228.1-2010)方法，利用 MTS-E45.305 型万能实验机测试材料的力学性能，设定的拉伸速率为 1 mm/min，每组实验选取 3 个样品，结果取其平均值。

2 实验结果及讨论

图 1a 为金相显微镜下观察到的试样 1 各相的

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

形貌及分布,可以看出没有经过变质处理的铝硅合金中,初晶硅为粗大的块状、不规则多边形且长有棱角。随着混合稀土的添加,当混合稀土元素添加量较低时(图 1b,La 为 0.12%,Ce 为 0.092%),初晶硅几乎没有得到细化。当混合稀土元素添加量达到 0.58%时(图 1c,La 为 0.33%,Ce 为 0.25%),初晶 Si 才得到了明显的细化,且体积分数降低。当混合稀土元素添加量达到 0.8%时 (图 1d, La 为 0.33%,Ce 为 0.25%),初晶硅明显细化。

图 2 为不同混合稀土添加量的 A390 合金中初晶硅的体积分数。从图中可以看出,随着混合稀土元素的添加,初晶硅的体积分数先增加后减小,当混合稀土元素添加量达到 0.58%时(图 1c,La 为 0.33%,Ce 为 0.25%),初晶硅的体积分数最小,且初晶硅明显细化。在没有添加稀土元素的时候,铝硅合金中也会出现一些细小的初晶硅相,但是这些细小的初晶硅相是在自身条件下生长形成的,与添加了稀土元素之后得到的细小初晶硅相组织不同,前者并不会对合金的各项性能带来多大的改善作用,而后者则与之相反。稀土元素的变质效果与自身的添加量存在一定联系,稀土元素的添加量少时会导致吸附在硅晶体表面的稀土元素太少,从而不能有效阻止硅晶体的正常长大,进而导致变质效果不够明显。稀土元素抑制了初晶硅相的形核温度,改变形核时的固液界面能和固相的表面能,从而达到细化初晶硅的目的。

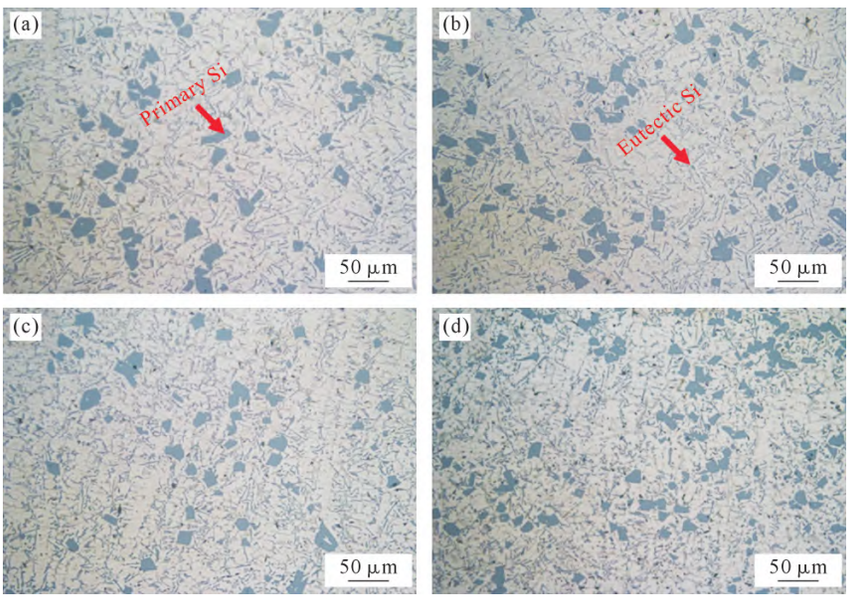


图 1 不同混合稀土含量的 A390 合金金相照片:(a) 0%; (b) 0.212%; (c) 0.58%; (d) 0.89%

Fig.1 OM images of the A390 alloys with different amounts of mixed rare earth: (a) 0 wt. %; (b) 0.212 wt. %; (c) 0.58 wt. %; (d) 0.89 wt. %

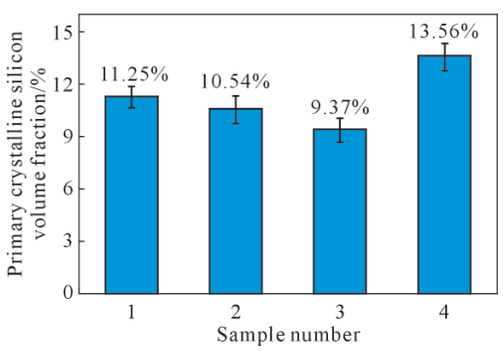


图 2 不同混合稀土含量的 A390 合金中初晶硅的体积分数

Fig.2 Volume fraction of primary silicon in the A390 alloy with different amounts of mixed rare earth elements

图 3 为混合稀土元素含量为0.89%(La 为0.51%,Ce 为 0.38%)合金的 SEM 图像和 EDS 图。由 EDS 图可以看出,稀土元素 La 和 Ce 的分布位置基本一致,可见合金中 La 和 Ce 存在于同一化合物中。且该化合物也含有一定量的 Si 和 Cu,而 P、Fe 在合金中的分布较为均匀。由实验结果可知,实验过程中有少量 P 元素参与了变质处理过程。添加 P 元素主要是与稀土元素协同细化初晶硅,而且 P 元素含量较少,不会与稀土元素发生反应,因此不会对实验结果产生影响。据王雨旋等[20]报道,P 元素是通过与铝硅合金中的 Al 元素发生反应生成 Al-P 化合物,该化合物在硅相生长时可以作为硅相形核核心,提高硅相的形核率,阻止硅相的自由生长,从而达到细化初晶硅的目的。图 3 中点 1 和点 2 的 EDS 结果如表 3 所示。EDS 结果表明,该化合物中不含 Mg 元素和 Fe 元素,可能是由于 La、Ce 元素与 Mg、Fe 元素的交互作用很小,或者几乎不存在交互作用,导致镁元素和铁元素几乎不溶于该化合物中。同理,由于 Cu 元素与稀土元素之间存在相互作用,因此能溶于该化合物中。4 号样中添加的稀土元素含量过多,就会形成一种形成速度比初晶硅形成速度慢的

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

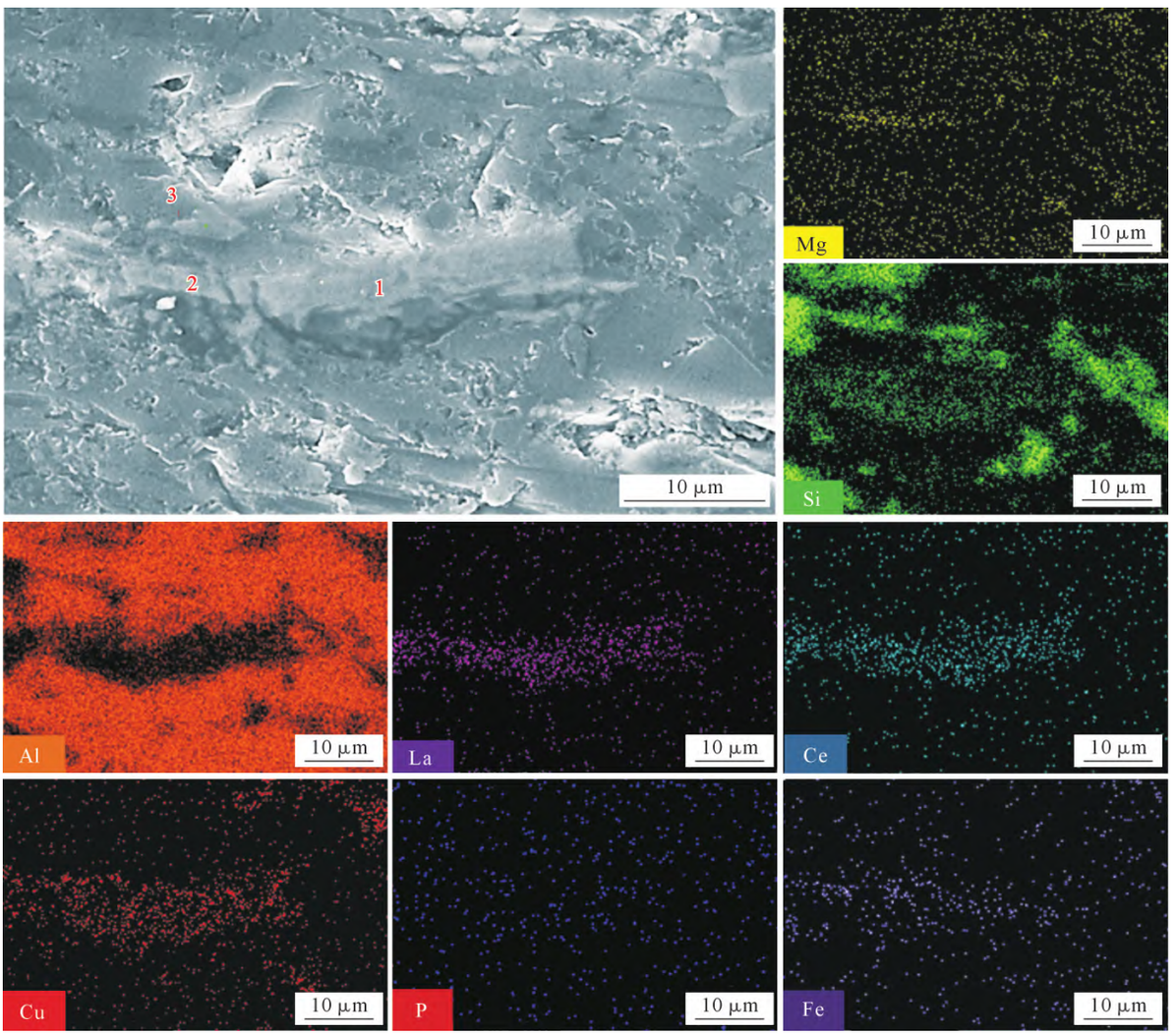


图 3　试样 4 的 SEM 图与 EDS 面扫结果

Fig.3　SEM and EDS mapping results for sample 4

表3 图3中EDS点扫结果

Tab.3 EDS point scan results in Fig. 3

(atomic fraction/%)

Point	Al	Si	Cu	Mg	Fe	La	Ce
1	48.50	14.16	26.36	-	-	6.35	4.36
2	33.65	19.99	29.31	-	-	9.85	7.19
3	65.52	7.39	22.51	2.71	1.48	0.17	0.22

富稀土化合物，该化合物一般为富镧相和富铈相，会使稀土元素变少[21]。结合图 1 分析，稀土元素含量过多导致变质处理效果不佳，出现过变质的现象。同时，过量的稀土元素添加会加速富稀土相的聚集，使之成为夹杂物，这种富稀土相一般呈白色针状结构，生成于初晶硅形成之后，分布在硅相和 α-Al 之间[22]。而稀土元素是使共晶硅发生变质作用的主要物质，这种金属间化合物的大量出现会消耗掉大部分的稀土元素，使参与变质过程的稀土元素含量减少，从而导致变质效果不明显，对合金的力学性能造成一定破坏。

点 3 为稀土元素含量基本为 0 的Al-Fe-Mg-Si-Cu 相五元化合物，之所以会有少量的铁元素，是因为中间合金存在的 Fe 元素，及在合金熔炼过程中带入的少量 Fe，这种误差无法避免。虽然 Fe 元素含量很少，但还是会生成有害相，如 Al-Fe-Si 相。这种相与粗大硅相存在的结果一样，都会破坏铝硅合金的性能。Zou 等[23]研究表明，当 Mg 元素添加到一定量时，这种富 Fe 的 Al-Fe-Si 相会停止生长，与中和剂 Mg 元素生成 Al-Fe-Mg-Si 四元相。因此，为了改善这种含 Fe 相，实验加入一定量的 Mg 元素，避免富 Fe 的 Al-Fe-Si 相生成，达到优化改善的目的。

图 4 的力学实验结果表明，在添加 0.212%混合稀土(La 为 0.12%，Ce 为 0.092%)，合金抗拉强度提高，但屈服强度和伸长率小幅降低。混合稀土元素添加 0.58%(La 为 0.33%，Ce 为 0.25%)时，合金抗拉强度、屈服强度和伸长率均得到提高。随着混合稀土添加量的进一步增加，各项性能都降低，这与混合稀土对 Si 相的变质效果契合。稀土对强度影响的大小与其分布状态有关，混合稀土 La、Ce 大部分沿晶分布，只有少部分与 Al、Si、Fe 等共存，故含量较高时使合金变脆，强度降低。此外，在没有添加稀土元素

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

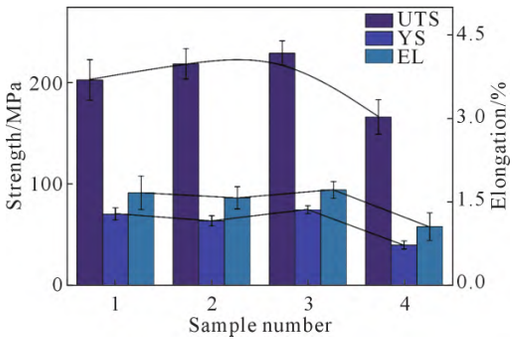


图 4 不同混合稀土含量合金的室温拉伸性能

Fig.4 Tensile properties of alloys with different mixed rare earth contents at room temperature

时,合金中的初晶硅相呈粗大的块状共晶硅,严重破坏了铝硅合金中的铝基体,在硅相长有棱角的地方还容易产生应力集中,产生裂纹源,导致合金产生裂纹,使铝硅合金变得比较脆。因此,经过混合稀土变质处理后的 A390 合金的力学性能与块状共晶硅的分布高度相关,添加 0.58%(La 为 0.33%,Ce 为 0.25%)混合稀土的合金力学性能最佳。

通过图 5 断口对比分析可知,没有添加稀土元素进行变质的试样 1(图 5a)断口形貌存在比较松散和尺寸较大的的组织,从图 5a1 和 a2 可以看到块状的第二相,分析可知这些粗大块状相为初晶硅相。结合图 1 可知,因为试样 1 中的初晶硅相较为粗大且数量多,在受拉应力时阻碍了位错运动的发生,从而使铸件在断裂前不能发生塑性变形,导致铸件的抗拉强度、屈服强度、伸长率比较低。由于这些粗大的初晶硅相的存在阻碍了位错运动,且试样是在受拉应力作用下发生断裂的,在断裂时未察觉到有塑性

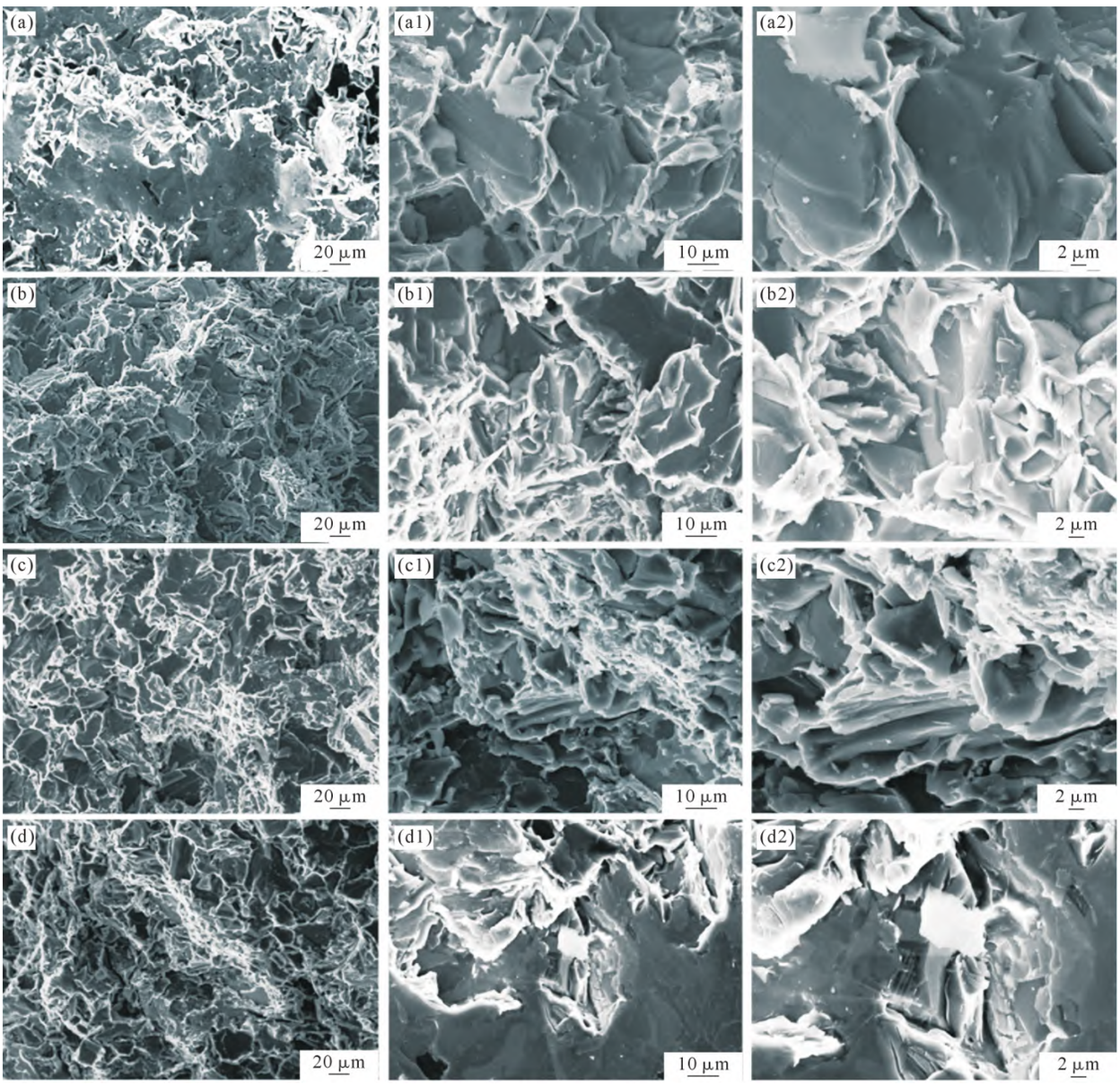


图 5 不同混合稀土含量合金的断口形貌 SEM 图:(a~a2) 0%; (b~b2) 0.212%; (c~c2) 0.58%; (d~d2) 0.89%

Fig.5 SEM images of the fracture morphology of alloys with different mixed rare earth contents: (a~a2) 0 wt. %; (b~b2) 0.212 wt. %; (c~c2) 0.58 wt. %; (d~d2) 0.89 wt. %

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

变形的发生，可初步判断试样断裂的方式为解理断裂。因为解理断裂发生前几乎没有发生塑性变形和解理断口，结晶面呈无规则取向，且在光线照射下断口有许多发光的小平面等特征，与试样的断口形貌相匹配[24]。室温拉伸温度较低，裂纹扩展时所消耗的能量少，扩展阻力小，也容易导致解理断裂。此外，影响解理断裂的因素还有加载速度，晶体结构、试样大小、应力状态等[25]。经过混合稀土有效变质处理之后的试样 3，初晶硅得到了细化处理，断口上基本不存在这些比较松散的组织和形状较大的初晶硅相，且断口较为平整。试样 2 与试样 4 因为稀土元素添加量不够和过多的问题，与试样 1 实验结果相差不大，或者比试样 1 的更差。从理论上来说，试样 3 的初晶硅在进行了变质处理得到细化后，细小密集分布的粒子不会阻碍位错运动的发生，有较好的抗拉强度、屈服强度和伸长率。但是从图片和试验结果来看，试样 3 中的初晶硅虽然得到了变质处理，但是并没有完全得到细化。因此，为了获得性能更好的合金，对有效变质处理后的合金再次进行强化处理很有必要。

3 结论

(1)混合稀土元素 La、Ce 相较于单稀土元素，可以同时作为变质剂，共同参与对铝硅合金中初晶硅的变质处理。

(2)混合稀土元素添加量为 La 0.33%、Ce 0.25% 时对初晶硅的细化效果明显，合金的力学性能最优，铸态合金的抗拉强度和伸长率分别为 229 MPa 和 1.7%。

(3)添加过量的混合稀土元素 La、Ce 会形成富稀土相的聚集，导致参与变质过程的稀土元素含量变少，使变质效果不明显。

参考文献：

[1] 何磊东，仲召军，李鹏鹏. 高硅铝合金变质处理的研究现状及发展趋势[J]. 铸造技术，2021, 42(1): 65-68.
HE L D, ZHONG Z J, LI P P. Research status and development trend of high silicon aluminum alloy modification treatment[J]. Foundry Technology, 2021, 42(1): 65-68.

[2] 王吉岱，闫承俊，孙静，刘喜俊. 铝合金变质处理的现状和发展趋势[J]. 铸造，2005, 54(9): 844-846.
WANG J D, YAN C J, SUN J, LIU X J. Development on modified treatment of aluminum alloy[J]. Foundry, 2005, 54(9): 844-846.

[3] 张瑜，王宇鑫，廖文俊，王华钰，杨颖，严彪. 稀土元素对过共晶铝硅合金的变质机理[J]. 金属功能材料，2010, 17(3): 86-90.
ZHANG Y, WANG Y X, LIAO W J, WANG H Y, YANG Y, YAN B. Modification mechanism of RE on hypereutectic Al-Si alloy [J]. Metallic Functional Materials, 2010, 17(3): 86-90.

[4] 胥锴，刘徽平，袁帮谊，王甫. 过共晶铝硅合金变质处理的研究进展[J]. 热加工工艺，2009, 38(3): 32-35.
XU K, LIU H P, YUAN B Y, WANG F. Development of modification of hypereutectic Al-Si alloy [J]. Hot Working Technology, 2009, 38 (3): 32-35.

[5] 董天顺，马庆亮，付彬国，李晶琨，李国禄，陆鹏炜. 过共晶铝硅合金中硅相细化的研究进展[J]. 热加工工艺，2024, 54(3): 1-6, 13.
DONG T S, MA Q L, FU B G, LI J K, LI G L, LU P W. Research progress on silicon phase refinement in hypereutectic Al-Si alloy [J]. Hot Working Technology, 2024, 54(3): 1-6, 13.

[6] XU C L, WANG H Y, QIU F, YANG Y F, JIANG Q C. Cooling rate and microstructure of rapidly solidified Al-20 wt. % Si alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 417(1-2): 275-280.

[7] LI R X，LIU L J，ZHANG L J, SUN J H, SHI Y J, YU B Y. Effect of squeeze casting on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-*x*Si alloys [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33(4): 404-410.

[8] 姚金凤. 热处理及 Mn 元素对汽车发动机用过共晶铝硅合金组织的影响[J]. 热加工工艺，2018, 47(4): 220-222.
YAO J F. Influence of heat treatment and element mn on microstructure of Al-Si hypereutectic alloy for automotive engines[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(4): 220-222.

[9] 石为喜，鲁毅，汤梦超，李佳露，李晓晨，李贵茂. P 对过共晶A390 合金铸态组织和力学性能的影响[J]. 铸造，2022, 71(3): 331-335.
SHI W X, LU Y, TANG M C, LI J L, LI X C, LI G M. Effect of P on cast microstructure and mechanical properties of hypereutectic A390 alloy[J]. Foundry, 2022, 71(3): 331-335.

[10] 钱钊，刘相法，冯增建，赵德刚，边秀房. 微量混合 RE 对 Al-Si 多元活塞合金的高温强化及组织分析[J]. 铸造，2007, 56(2): 141-144.
QIAN Z, LIU X F, FENG Z J, ZHAO D G, BIAN X F. High-temperature strengthening effect of trace RE on industrial Al-Si piston alloy and its microstructural analysis [J]. Foundry, 2007, 56 (2): 141-144.

[11] 张瑞英，李继承，沙君浩，李家康. Sr 含量对 Al-Si 合金显微组织和热导率的影响[J]. 材料热处理学报，2024, 45(1): 53-61.
ZHANG R Y, LI J C, SHA J H, LI J K. Effect of Sr content on microstructure and thermal conductivity of Al-Si alloy [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2024, 45(1): 53-61.

[12] 刘学，田源，李美玲，李洪林. 过共晶铝硅合金的研究进展[J]. 有色金属加工，2021, 50(3): 12-13, 55.
LIU X, TIAN Y, LI M L, LI H L. Research progress of hypereutectic Al-Si alloy[J]. Nonferrous Metals Processing, 2021, 50(3): 12-13, 55.

[13] PENG J F, WANG W L, YUAN S J, ZHAN Y, ZENG J, GAN P Y, JI J Y. Improved mechanical and frictional properties of hypereutectic Al-Si alloy by modifying Si phase with La addition [J]. Materials Today Communications, 2024, 38: 107857.

[14] HAGHAYEGHI R, TIMELLI G. An investigation on primary Si refinement by Sr and Sb additions in a hypereutectic Al-Si alloy[J]. Materials Letters, 2020, 283: 128779.

[15] SHI W X，GAO B，TU G F，LI S W. Effect of Nd on microstructure and wear resistance of hypereutectic Al-20%Si alloy[J]. Journal of

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Alloys and Compounds, 2010, 508(2): 480-485.

[16] LI Q L, XIA T D, LAN Y F, LI P F, FAN L. Effects of rare earth Er addition on microstructure and mechanical properties of hypereu tectic Al-20%Si alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 588: 97-102.

[17] LI Q L, XIA T D, LAN Y F, ZHAO W J, FAN L, LI P F. Effect of rare earth cerium addition on the microstructure and tensile properties of hypereutectic Al-20% Si alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 562: 25-32.

[18] LI Q L, LI B Q, LI J B, ZHU Y Q, XIA T D. Effect of yttrium addition on the microstructures and mechanical properties of hypereutectic Al-20Si alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 722: 47-57.

[19] ALAM NAJAFABADI M A, OURDJINI A, ELLIOTT R. Impurity modification of aluminium-silicon eutectic alloys[J]. Cast Metals, 1995, 8(1): 43-50.

[20] 王雨旋,石为喜,杨俊, 刘阳,罗心怡,鄢嘉诚,张继源. 磷对过共晶 A390 合金组织和硬度的影响[J]. 辽宁科技学院学报,2021, 23 (6): 8-10, 26.
WANG Y X, SHI W X, YANG J, LIU Y, LUO X Y, YAN J C, ZHANG J Y. Effect of P addition on mi crostructure and hardness of hypereutectic A390 alloy[J]. Journal of Liaoning Institute of Science and Technology, 2021, 23(6): 8-10, 26.

[21] ZHAO B W, XING S M, SHAN A L, YAN G Y, JIANG X L. Influence of La addition on Fe-rich intermetallic phases formation and mechanical properties of Al-7Si-4Cu-0.35Mg-0.2Fe alloys prepared by squeeze casting[J]. Intermetallics, 2023, 153: 107783.

[22] 张鹏,薛松柏,费文潘,王博,韩翼龙,裴夤崟,钟素娟. 稀土元素 Ce 对 Sr 变质的 Al-5Si 铝合金焊丝含氢量和焊缝气孔率的影响[J]. 材料导报,2020, 34(2): 2100-2104.
ZHANG P, XUE S B, FEI W P, WANG B, HAN Y L, PEI Y Y, ZHONG S J. Influence of rare earth Ce on hydrogen content and weld porosity of Sr modified Al-5 Si aluminum alloy welding wires[J]. Materials Reports, 2020, 34(2): 2100-2104.

[23] ZOU J, ZHANG H T, YU C, WU Z B, G C, NAGAUMI H, ZHU K, LI B M, CUI J Z. Investigating the influences of Fe, Mn and Mo additions on the evolution of microstructure and mechanical performances of Al-Si-Mg cast alloys [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 319-332.

[24] JEON J H, SHIN J H, BAE D H. Si phase modification on the elevated temperature mechanical properties of Al-Si hypereutectic alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 748: 367-370.

[25] 王国珍,王玉良,轩福贞,涂善东,王正东. 加载速率、缺口几何和加载方式对 16MnR 钢解理断裂行为的影响[J]. 金属学报,2009, 45 (7): 866-872.
WANG G Z, WANG Y L, XUAN F Z, TU S D, WANG Z D. Effects of loading rate, notch geometry andloading mode on the cleavage fracturebe havior of 16MnR steel [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(7): 866-872.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net