DOI：10.16410/j.issn1000-8365.2021.05.018

变质处理对 Al–17Si 合金组织和性能影响

何磊东，仲召军，李鹏鹏
（江苏汇联铝业有限公司，江苏 连云港 222000）

摘　要：未经变质处理过共晶铝硅合金微观组织主要有粗大的初晶硅和针状或层片状共晶体(α+Si)组成，会严重割裂基体，其尖端和棱角会引起应力集中，使合金的力学性能明显下降，产品无法满足实际应用需求。研究不同变质剂处理方案对过共晶 Al-17%Si 合金微观组织和性能的影响。结果表明：通过加入 0.36% Cu-P（14%P）合金和 0.40%稀土镧铈(La-Ce)进行复合变质处理后，细化效果最佳，微观组织均匀细化和性能得到了优化。抗拉强度由未变质 126 MPa 增加到 167 MPa，增加了 33%；硬度由 123 HBW 降低到 111 HBW，降低了 10%；变质前后初晶硅形态并未发生变化，仍呈现板条状形态，初晶硅的平均尺寸由 140 um 降至 55 um。

关键词：过共晶 Al-17%Si；变质处理；组织和性能

中图分类号：TG146.21　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-8365（2021）05-0402-05

Effect of Modification on Microstructure and Properties of Al–17Si Alloy

HE Leidong，ZHONG Zhaojun，LI Pengpeng
(Jiangsu Huilian Aluminum Co., Ltd., Lianyungang 222000, China)

Abstract：The microstructure of the unmodified eutectic Al-Si alloy was mainly composed of coarse primary silicon and acicular or lamellar eutectic (α+Si), which would seriously cut the matrix, and its tips and edges would cause stress concentration, which would significantly reduce the mechanical properties of the alloy, and the product can not meet the practical application requirements. The effects of different modifier treatment schemes on the microstructure and properties of hypereutectic Al-17%Si alloy were investigated. The results show that by adding 0.36% Cu-P (14%P) alloy and 0.40% rare earth lanthanum and cerium (La-Ce) to the composite modification treatment, the best refining effect, uniform microstructure refinement and optimized properties. The tensile strength increases from 126 MPa to 167 MPa without deterioration, increasing by 33%. The hardness decreases by 10% from 123 HBW to 111 HBW. The morphology of primary silicon remains the same before and after modification, and the average size of primary silicon decrease from 140 μm to 55 μm.

Key words：hypereutectic Al-17%Si; metamorphism; microstructure and properties

在国内外，过共晶 AI-Si 合金应用日益广泛的是 Al-Si-Cu 系合金。美国通用汽车公司用 390 合金生产汽车发动机的气缸体（w (Si):16.0%~18.0%，w(Cu):4.0%~5.0%），日本用 ADC14 制造汽车变速箱壳体、离合器架等；国内过共晶 AI-Si 合金广泛用于制造汽车、船舶、飞机的重要结构件，内燃机活塞等零件[1-6]。过共晶铝硅合金具有更低的膨胀系数、更小的密度，更高的耐磨性，但过共晶 AI-Si 合金使用过程中，出现比较多的问题是由于凝固过程中固液两相间的溶质分配及非平衡凝固引起的合金元素的偏析及微观组织的不均匀行为，形成粗大的初晶硅颗粒和长针状的共晶硅晶体，严重影响着合金的性能，容易造成应力集中[7-15]；进行变质处理，以细化初晶硅，对过共晶铝硅合金性能的提高具有重要意义。变质处理就是向合金中加入变质剂来改变合金中初晶硅的尺寸以及形貌，从而提高其抗拉强度、塑性、耐磨性等力学性能，是十分有效的细化初晶硅的方法，操作工艺简单而效果明显；变质处理后，可以改变初晶硅形貌和分布，改善产品性能[16-24]。本文作者研究不同变质剂处理方案，获得最佳性能的过共晶 Al-17%Si 合金。

1　试样制备

试验采用纯铝 A00 和工业硅熔炼制得过共晶 Al-17%Si 合金，熔炼选用井式坩埚电阻炉。熔炼温度设定在 760 ℃，待纯铝 A00 熔化后加入金属硅、铁、铜，最后加镁，全部熔化后，进行精炼处理，金属液静置 2~3 min 后，随后进行变质处理，1 组：不经

收稿日期：2021-03-03

作者简介：何磊东（1998—），甘肃会宁人，材料工程师．主要从事金属材料研发方面的工作．电话：13314189430，Email:3025921979@qq.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

过变质处理；2 组：仅加入稀土镧铈(La-Ce)，加入质量分数分别为 0.2%、0.4%、0.6%，变质温度为 780 ℃，变质处理时间：15 min；3 组：仅加入 Cu-P 合金(14%)，加入质量分数分别为 0.24%、0.36%、0.48%，变质温度为 820 ℃，变质处理时间：15 min；4 组：先加入 Cu-P 合金(14%)，加入质量分数分别为 0.24%、0.36%、0.48%，变质温度为 820 ℃，变质处理时间：15 min，再加入稀土镧铈(La-Ce)，加入质量分数分别为 0.2%、0.4%、0.6%，变质温度为 780 ℃，变质处理时间：15 min；然后采用金属型在 710 ℃浇注制得过共晶 Al-17%Si 合金。

2　试验结果及分析

主要研究对过共晶铝硅合金中的初晶硅以及共晶硅进行细化处理，优化出最佳的变质剂组分、以及变质处理对过共晶铝硅合金组织和性能的影响规律。

2.1　合金成分分析

制备过共晶 Al-17%Si 合金化学成分如表 1，主要元素 Si、Cu、Mg、Fe 和 Al 均在理论含量之内，其他元素合计都小于 0.20%，含有其他杂质很少，符合试验成分要求。

2.2　拉伸测试

表 2 为未变质和不同变质剂处理方案下过共晶 Al-17%Si 合金抗拉强度。

可以从表 2 中得出每组中变质剂加入量最佳的试验数据，未变质的空白对照组(1)抗拉强度(R_m)为126 MPa，加入 0.40%稀土(2-2)试样 R_m 为 150 MPa，相对空白组增加 19%；加入 Cu-P 中间合金(P0.05%)(3-2)试样 R_m 为 147 MPa，增加 17%；加入 Cu-P 中间合金(P0.05%)和 0.40%稀土复合变质(4-2)试样抗拉强度最佳，R_m 为 167 MPa，相对未变质增加 33%。加入稀土和 Cu-P 中间合金不同变质剂类型时，过共晶 Al-17%Si 抗拉强度不同程度的提高了，但变化不够明显。对于变质剂的加入量控制才是至关重要的。

图 1 为未变质和不同变质剂处理方案下过共晶 Al-17%Si 合金抗拉强度变化趋势。通过图可知 3 种变质处理方案后，合金的抗拉强度都处于增长趋势，复合变质的增长幅度最大，则变质效果最佳，磷与稀土的共同变质细化结果，可同时实现对初晶硅和共晶硅细化。

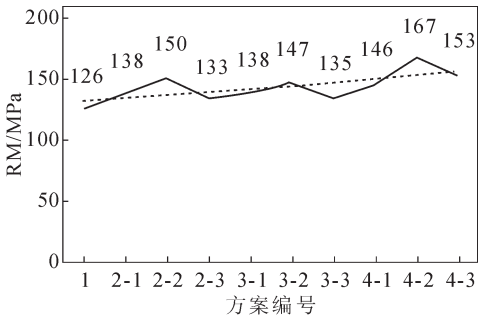


图 1 过共晶 Al-17%Si 合金抗拉强度变化趋势

Fig.1 Trend of tensile strength of hypereutectic Al-17%Si alloy

如图 2 所示，(1)、(2-2)、(3-2)和(4-2)试验合金拉

表1 Al–17%Si合金成分 w(%)

Tab.1 Chemical composition of Al–17%Si alloy

Al-17%Si	Si	Cu	Mg	Fe	Al	稀土	P	其他合计
理论含量	16.00~18.00	4.00~5.00	0.45~0.65	1.30 以下	其余	/	/	/
1	17.34	4.73	0.55	0.64	77.80	/	/	0.14
2-1	16.87	4.53	0.45	0.79	77.80	0.2	/	0.16
2-2	17.50	4.75	0.47	0.83	77.80	0.4	/	0.15
2-3	17.25	4.63	0.57	0.80	77.80	0.6	/	0.25
3-1	16.92	4.26	0.55	0.80	77.80	/	0.03	0.17
3-2	17.51	4.30	0.57	0.74	77.80	/	0.05	0.18
3-3	16.71	4.20	0.47	0.85	77.80	/	0.07	0.17
4-1	16.27	4.36	0.59	0.83	77.80	0.2	0.03	0.15
4-2	17.10	4.09	0.53	0.82	77.80	0.4	0.05	0.16
4-3	16.58	4.10	0.50	0.82	77.80	0.6	0.07	0.20

表 2 过共晶 Al–17%Si 合金抗拉强度数据表

Tab.2 ensile strength of hypereutectic Al–17%Si alloy

编号		1	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-3	4-3
变质剂	种类	/	稀土镧铈(La-Ce)			Cu-P 合金(14%)			稀土、P 复合变质		
	加入量(%)	/	0.20	0.40	0.60	0.24	0.36	0.48	0.20 0.36	0.24 0.60	0.40 0.48
R_m/MPa		126	138	150	133	138	147	135	146	167	153
幅度		0%	10%	19%	6%	10%	17%	7%	16%	33%	21%

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

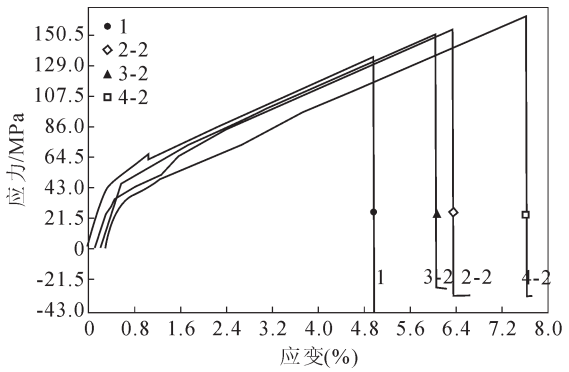


图 2 拉伸曲线 1、2-2、3-2 和 4-2
Fig.2 Tensile curves of 1,2-2,3-2 and 4-2

伸曲线，从图 2 中得出，拉伸曲线并没有产生明显的屈服，4 条曲线在加载的小前段，曲线呈线性，坡势较陡，这一段是铝合金的线弹性区，随后应变增加，应力升高，曲线开始稳态性增长，直到应力达到一定程度，拉伸试样都是突然断裂的，直接被拉断，没有出现“缩颈”现象。

2.3 金相分析

图 3 所示为空白对照组和不同变质剂处理方案下过共晶 Al-17%Si 合金组织。

图 3 中(1)为未变质空白对照组，观察图片，粗大的块状物以及不规则形状的初晶硅无序杂乱分布在基体中，初晶硅的平均尺寸为 140 um，共晶硅呈现长针状形貌。通过与空白对照组相比较，不同变质剂变质后初晶硅形态并未发生变化，仍呈现板条状形态，但初晶硅得到了明显的细化，尺寸差别很大，弥散分布在基体中。

通过图 3 中(2-1)、(2-2)、(2-3)观察分析比较，随着稀土(La-Ce)加入量的增加，初晶硅的尺寸先减少后增大，加入稀土 (La-Ce) 变质效果最佳的量为 0.40%，初晶硅的平均尺寸为 80 um 左右，稀土(La-Ce)能够抑制初晶硅的生长界面粗化，阻止生长方向发生分枝；稀土(La-Ce)不仅能够变质初晶硅也能够变质共晶硅，共晶硅形态较变质前仍为针状，但尺寸由长针状变为短针状，分布更加均匀化，稀土(La-Ce)对共晶硅影响较大。

图 3 中 (3-1)、(3-2)、(3-3) 看出，Cu-P 中间合金(14%P)加入量随着增大，初晶硅的尺寸也是先减少后增大；P 变质剂在微量或者过量的情况下，出现不同情况的偏析聚集一方，变质剂的加入量控制是至关重要的；P 加入后能在高温下形成 AlP 化合物，弥散分布在 Al-Si 合金熔体中，在合金结晶过程中，AlP 作为异质核心，能变质细化初晶硅，当 Cu-P 中间合金(14%P)加入量为 0.36%，即 P 含量 0.05%，对初晶硅变质效果最佳，初晶硅的平均尺寸为 60 um 左右；Cu-P 中间合金对共晶硅的影响并不明显。结合稀土(La-Ce)和 Cu-P 中间合金变质各自的优点，尝试复合变质，通过图 3 中(4-1)、(4-2)、(4-3)观察分

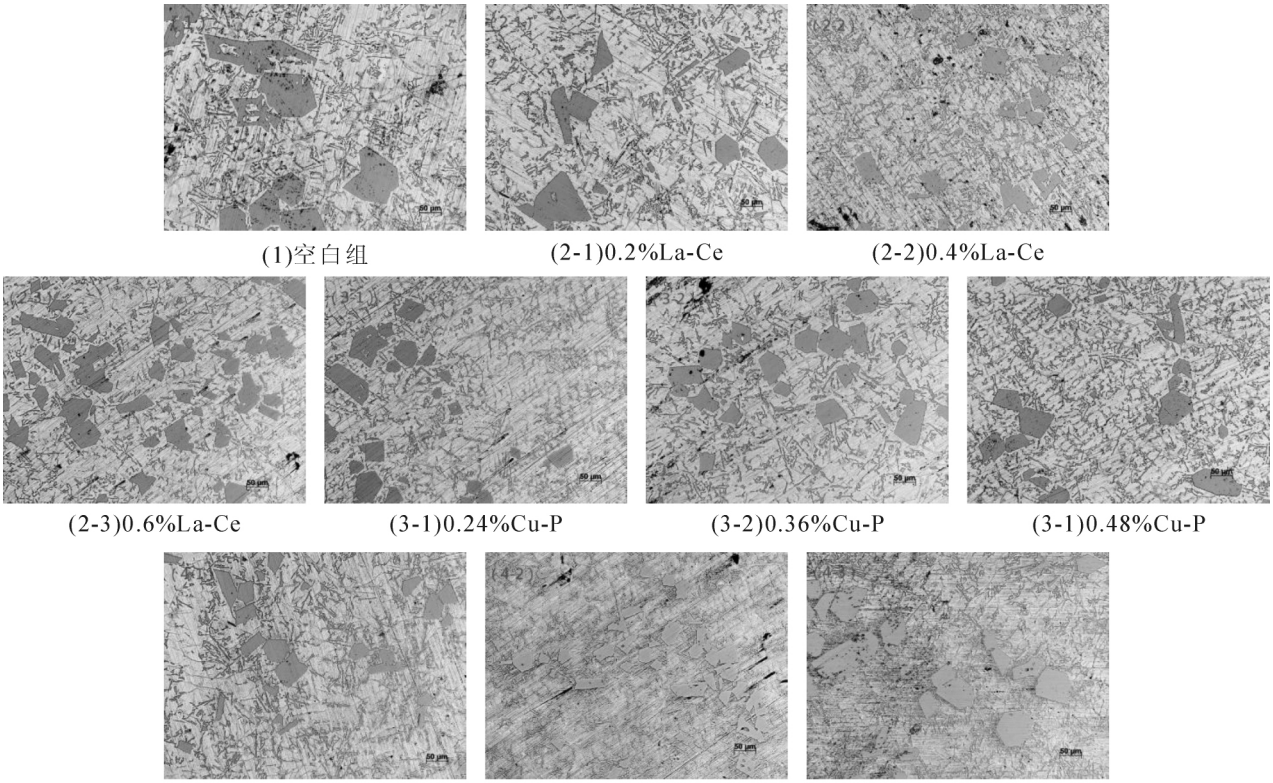


图 3 过共晶 Al-17%Si 合金组织
Fig.3 Microstructure of hypereutectic Al-17%Si alloy

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

析比较，磷与稀土的共同变质处理结果，可同时实现对初晶硅和共晶硅细化与形貌的改变，发现稀土(La-Ce) 加入量为 0.40%和 Cu-P 中间合金 (14%P) 0.36%，即 P 含量 0.05%时，Al-17%Si 合金初晶硅的平均尺寸为 55 um 左右，共晶硅形态短针状，均匀弥散分布在基体中。

2.4　硬度试验

过共晶 Al-17%Si 合金为较软材质，测试结果如表 3。

表 3 过共晶 Al–17%Si 合金硬度数据表

Tab.3 Hardness data of hypereutectic Al–17%Si Alloy

编号	1	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3
HB (HBW)	123	118	117.4	118.4	115	114.4	115.2	113.4	111	113.6
幅度	0%	-4%	-5%	-4%	-7%	-7%	-6%	-8%	-10%	-8%

可以从表 3 中得出，加入 0.40%稀土(2-2)、Cu-P 中间合金(P0.05%)(3-2)、Cu-P 中间合金(P0.05%)和 0.40%稀土复合变质(4-2)过共晶 Al-17%Si 合金试样布氏硬度 HB 分别为 117.4、115.2、111 HBW，3 者相差不大，而未变质的空白对照组 1 过共晶 Al-17%Si 合金试样布氏硬度 HB 为 123 HBW，发现变质处理后(2-2)、(3-2)和(4-2)合金试样相对未变质的硬度分别降低 5%、7%和 10%；变质后过共晶 Al-17%Si 合金硬度都小幅度降低，最佳试样合金布氏硬度才降低了 10%。

图 4 所示为未变质和不同变质方案下过共晶 Al-17%Si 合金布氏硬度柱状图，明显可以看出，变质处理后，合金的布氏硬度呈下降趋势。通过 2 组和 3 组来对比分析，2 组的硬度整体略高于 3 组，这主要是过共晶 Al-17%Si 合金组织由初晶硅和共晶硅组成，初晶硅尺寸越大，硬度越大；稀土元素能够细化合金中的共晶硅，缩短了过共晶 Al-17%Si 合金初晶硅结晶温度区间导致初晶硅不能充分生长而尺寸变小，从而合金硬度降低，P 变质细化合金中的初晶硅，初晶硅平均尺寸变小，硬度降低。4 组由于 P 和稀土共同作用下，细化合金中的初晶硅，造成过共晶 Al-17%Si 合金布氏硬度降低。

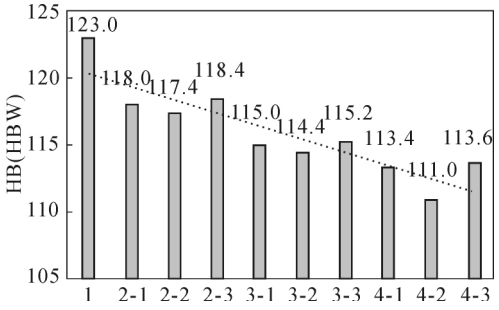


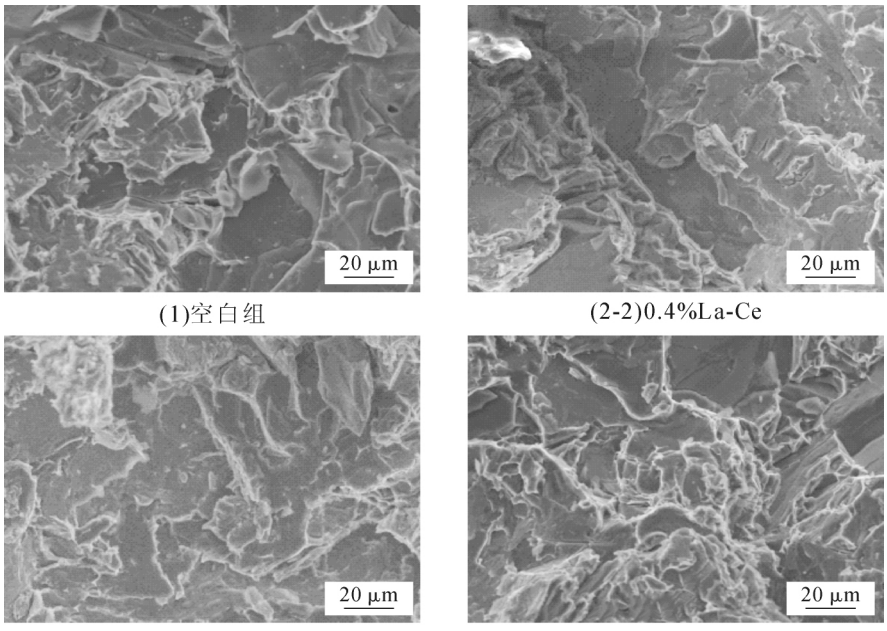
图 4 不同变质处理过共晶 Al-17%Si 合金的硬度

Fig.4 Hardness of hypereutectic Al-17%Si alloy with different modifications

2.5　拉伸断口分析

结合试样拉伸曲线变化趋势和拉伸断口形貌来分析，主要出现了解理断裂和韧性断裂两种方式。如图 5 所示为 Al-17%Si 拉伸试棒断裂后断口的扫描图像。

从图 5(1)的断口形貌可以看出：试棒断口上出现了河流状花纹、解理扇和相当数量的初晶硅断面，几乎全为解理性断裂，存在一定韧窝断裂。由于解理性断裂占主导作用，故金属型试棒强度、伸长率皆很



(1)空白组　(2-2)0.4%La-Ce

(3-2)0.36%Cu-P　(4-2)0.4%La-Ce&0.36%Cu-P

图 5 不同变质处理的过共晶 Al-17%Si 合金的硬度

Fig.5 SEM images of tensile fracture of hypereutectic Al-17%Si alloy with different modifications

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

低。试棒断裂时，初晶硅在尖角处由于应力集中产生微裂纹，然后微裂纹沿硅相某一特定晶面，形成穿晶脆性断裂。从图 5(2-2)、(3-2)的断口形貌可以看出：试棒断口上出现了迭波和韧窝，解理性断区减少，具有明显的韧性断裂特征。试棒断裂时，虽有一部分初晶硅粒子因应力集中而产生晶间裂纹源，但是大部分初晶硅由于细化、尖角钝化，对基体的割裂作用降低，使铝基体的塑性得以发挥，所以合金的强度、伸长率都得以提高。

从图 5(4-2)的断口形貌可以看出：开裂的初晶硅数量和生长缺陷相对较少，断面上有许多韧窝存在，分布也较为均匀，这是由于在 α 基体上存在许多第二相 Si 粒子，当试样拉伸时发生塑性变形时，基体中存在的位错在切向力的作用下，向第二相运动，并在其周围塞积着位错环。随着变形程度的延续，第二相粒子前沿塞积的位错越来越多，这使得位错受到错源的驱动力和二相粒子排斥力。当拉伸到一定程度时，由于某些粒子周围存在作用力，有可能将领先位错推向基体与第二相的界面上，当一个接一个的位错环推向界面上以后，界面将沿一定方向的面分开而形成微孔。由于微孔的形成，使原来存在的排斥力大为减小，位错源又重新激活，使一个个位错推向微孔，导致微孔迅速扩大，第二相 Si 粒子之间的基体金属产生“内缩颈”，当达到一定程度时被撕裂或剪断，使空洞连接，从而形成韧窝端口形貌，对基体的割裂作用大幅度降低，变质能够极大地提高过共晶 Al-17%Si 合金的塑性和强度，变质后 Al-17%Si 合金的拉伸断口是种解理断裂和韧性断裂混合断裂的方式。

3 结论

通过上述试验结果可以看出，变质剂的加入量控制是至关重要的，过共晶 Al-17%Si 合金使用 0.36% Cu-P(14%P)合金和 0.40%稀土镧铈(La-Ce)进行复合变质处理后，细化初晶硅组织，共晶硅由原有的长针状或层片状变为更加细小短针状，这是磷与稀土的共同变质细化结果，大幅度改善了 Al-17%Si 合金的力学性能，形成高综合性能铝合金材料，是我国国民经济和国防工业发展所需，其发展需遵循材料自身的发展规律，并结合工程需求目标，确定其发展方向，使得应用空间更加广泛，极有发展前途的高硅铝合金材料。

参考文献：

[1] XU C L, Jiang Q C. Effect of Nd on primary silicon and eutectic silicon in hypereutectic Al-Si alloy [J]. Alloys and compounds, 2006, 422: LI-L4.

[2] WANG S R, MARul. Growthmechanism of primary silicon in cast hypoeutectic Al-Si alloys[J]. Transactions of nonferrousmetals society of china, 2012, 224: 1264-1269.

[3] FENG H K, YU S R. Effect of ultrasonic treatment on microstructures of hypereutectic Al-Si alloy[J]. materials processing technology,2008, 208:330-335.

[4] 陈振明，赵海东. ADC14 挤压铸造件中 Si 偏析的原因分析[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(8):743-746.

[5] 熊仪. 压铸有色合金的应用现状和发展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2000(z1): 15-16.

[6] XU C L, JIANG Q C. Morphologies of primary silicon in hypereutectic Al-Si alloys with melt overheating temperature and cooling rate[J]. Materials science and engineering A, 2006,437:451-455.

[7] 杨伏良，甘卫平，陈招科. 高硅铝合金几种常见制备方法及其细化机理[J]. 材料导报，2005，19(5):42-43.

[8] 仲召军，李龙，周德敬. 铸造 Al-Si 合金细化变质处理技术的研究进展[J]. 铸造，(2016)03-0242-06.

[9] 孙晓东，郭建，黄小婷. 过共晶铝硅合金的研究进展[J]. 铸造技术，2017，38(4):26-29.

[10] 赖华清. 稀土在铸造铝合金中的作用 [J]. 热加工工艺, 2001,01(5):37-39.

[11] 徐永强. 合变质处理对过共晶铝硅合金组织及性能的影响[D]. 吉林：吉林大学,2014.

[12] HE K, YU F, ZHAO D. Effect of phosphorus modification on the microstructure and mechanical properties of DC cast Al-17.5Si-4Cu-1Zn-0.7Mg-0.5Ni alloy [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2009, 62 (4-5):367-371.

[13] 陈振明，赵海东，陈学文，等. ADC14 挤压铸造件中 Si 偏析的原因分析[J]. 压力铸造, 2013, 33(8):743-745.

[14] 乔进国. Al-P-Si 中间合金及其变质处理技术的研究 [D]. 济南：山东大学, 2005.

[15] 石凯. 稀土细化半固态 ZL101 铝合金研究[D]. 赣州：江西理工大学, 2009.

[16] 曹国剑，左锋，李艳春，等. 铝硅合金变质的研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26(17):112-115.

[17] KNUUTINEN A, NOGITA K, MCDONALD S D. Modification of Al-Si alloys with Ba, Ca,YandYb [J]. Journal of Light Metals, 2001,1(4):229-240.

[18] 陈潇潇. 高硅铝合金连接性能的试验研究[D]. 合肥：合肥工业大学, 2012.

[19] 曾勇. 过共晶铝硅合金变质处理的热分析技术研究[D]. 武汉：华中科技大学, 2009.

[20] WU Y, WANG S, LI H A new technique to modify hypereutectic Al-24% Si alloys by a Si-P master alloy [J]. Journal of Alloys and-Compounds,2009,477(1):139-144.

[21] 姚启均. 金属力学性能试验常用数据手册[M]. 北京：机械工业出版社,1994.

[22] 汪立亮，徐寅生. 活塞材料的应用及新材料的开发[J]. 汽车工艺与材料, 1998, 3(9):22-24.

[23] 张士林，任颂赞. 简明铝合金手册[M]. 上海：上海科学技术文献出版社, 2000.

[24] 王祝堂，田荣璋. 铝台金及其加工手册[M]. 长沙：中南工业大学出版社,1989.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net