

基于正交试验的过共晶 Al-20Si 合金 变质工艺优化设计

赵 岚^{1a}, 杨明晓^{1a}, 高 尧^{1a}, 张 余^{1b}, 童 先^{1,2}

(1. 浙江工贸职业技术学院 a. 材料工程系, b. 汽车与机械工程学院, 浙江 温州 325003;
2. 温州莱特激光工程研究院有限公司, 浙江 温州 325003)

摘 要: 基于 L9(3⁴) 正交试验, 本文对过共晶 Al-20Si 合金进行变质处理。通过直观和方差分析, 确定最佳的变质工艺参数。结果表明: 正交试验最佳的工艺参数为 A₂B₂C₁D₂, 变质工艺参数为 0.04% 的 P 添加量, 0.6% 的 RE 混合稀土添加量, 20 min 的变质时间以及 780℃ 的变质温度, 此时初生 Si 相转变为规则的六边形, 平均尺寸为 24.84 μm, 共晶硅相细化明显; 因素 A (P 添加量) 对变质效果有显著影响, B、C、D 因素 (分别为 RE 混合稀土添加量、变质时间和变质温度) 对变质效果有一定的影响作用, 各因素的影响程度分别为 P 添加量 > RE 混合稀土添加量 > 变质温度 > 变质时间。

关键词: 过共晶 Al-20Si 合金; 正交试验; 变质处理; 组织形貌

中图分类号: TG136.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-0105(2016)02-0042-04

The Modification Process Optimization of Hypereutectic Al-20Si Alloys Based on Orthogonal Experiment

Zhao Lan¹, Yang Mingxiao¹, Zhang Yu², Tong Xian^{1,3}

(1. a. Department of Material Engineering, b. Department of Automobile and Machinery Engineering, Zhejiang Industry & Trade Vocational College, Wenzhou, 325003, China;
2. Wenzhou Laite Laser Engineering Research Institute Co. Ltd, Wenzhou, 325003, China)

Abstract: Based on L9(3⁴) orthogonal experiment, modification treatments was made of hypereutectic Al-20Si alloys in this paper. Through direct analysis and variance analysis, the best process parameter of modification was determined. The results show that, the best process parameter of orthogonal experiment is A₂B₂C₁D₂, which is the quantity added of P is 0.04%, mixed rare earth is 0.6%, the modification time is 20min and the modification temperature is 780℃. The morphology of primary Si phase became regular hexagons and the average size were 24.84μm, eutectic Si phase were refined significantly; Factor A(the quantity added of P) has an obvious influence on modification effect, while B、C、D(mixed rare element, modification time and modification temperature) have some certain effects on modification effect. The extent of influence of these factors is the quantity added of P > mixed rare element > modification time > modification temperature.

Keywords: hypereutectic al-20Si alloys; orthogonal experiment; modification treatments; morphology

过共晶 Al-Si 合金因其具有较高的比强度、优良的耐磨蚀性能和导热性能、出色的铸造性能以及良好的机械加工性能, 被广泛应用于汽缸体、发动机活塞等汽摩配件上^[1-4]。然而, 组织中粗大的块状或十字状初生 Si 相和针状的共晶 Si 相极易造成内应力的聚集, 严重时将割裂基体, 造成产品失效断裂^[5-6]。因

此过共晶 Al-Si 合金若不经适当的变质处理, 很难被运用到实际生产中。本文通过设计正交试验, 研究了 P 和 RE 混合稀土添加量以及变质时间和变质温度对过共晶 Al-20Si 合金组织的影响, 依据直观和方差分析, 确定最佳的初生 Si 相变质工艺参数。

收稿日期: 2016-04-11

作者简介: 赵岚, 硕士, 浙江工贸职业技术学院讲师, 主要研究方向: 金属材料及表面改性。

1 试样制备和试验方案

1.1 试样制备

在过共晶 Al-20Si 合金熔炼过程中,选用 SC-7.5-10 型坩埚电阻炉进行熔炼,每炉次合金的重量约为 2 kg 左右。首先将石墨坩埚预热至 500~600 ℃,同时将准确称量好的工业纯铝锭、结晶硅和变质剂(包括 Al-P 中间合金和 RE 混合稀土)预热到 200 ℃左右;将称量好的铝锭加入坩埚中,升温使其熔化,待铝锭完全熔化后,将温度升至 800 ℃,加入结晶硅,熔化过程中加入覆盖剂,形成熔池后,扒去表面熔渣;根据正交试验列出的各组试验参数,将相应量的 Al-P 中间合金和 RE 混合稀土用铝箔包好以钟罩压入铝液中,待完全熔化后搅拌均匀。将温度调至正交试验的相应温度,保温相应时间后,加入适量清渣剂;再通入 0.3%~0.5% C₂Cl₆对熔体进行除气精练,充分搅拌均匀后将熔体静置 5 min,扒去表面熔渣。待温度为 720 ℃时将合金液浇入被预热 250 ℃的内腔尺寸为 φ20 mm×200 mm,拔模斜度为 1°的圆柱形金属模具中。

过共晶 Al-20Si 合金及 RE 混合稀土经 X 射线荧光光谱仪分析检测,成分见表 1 和表 2 所示。

表 1 Al-20Si 合金化学成分					单位: %
元素	Al	Si	Cu	Fe	其他
含量	Bal.	11.47	3.07	0.226	<0.1

表 2 RE 混合稀土化学成分						单位: %
元素	Ce	La	Pr	Nd	Y	Sm
含量	50	25	8	15	1	1

1.2 试验方案

本试验采用 L9(3⁴)正交试验表对过共晶 Al-20Si 合金进行变质处理,研究不同变质剂含量(P 添加量和 RE 混合稀土添加量)以及变质工艺(变质时间和变质温度)对合金中初生 Si 相的形貌、尺寸、分布情况等影响,从而确定最佳的变质工艺。本试验的因素和水平的选择参照参考文献[7-9]并结合前期试验确定。正交试验的具体参数设计见表 3 所示。

表 3 正交试验设计					
水平	因素	A	B	C	D
		P 含量/%	RE 混合稀土含量/%	处理时间/min	处理温度/℃
1		0.02	0.3	20	750
2		0.04	0.6	40	780
3		0.06	0.9	60	810

从各组铸件同一部位截取试块,制成金相试样。用 0.5%HF 水溶液腐蚀试样,在 Leica DM2500M 光学显微镜观察试样的金相组织;用 Image Pro Plus 6.0 软件测量组织中初生 Si 相的尺寸,并取平均值作为初生硅相的平均尺寸;用布鲁克 X 荧光光谱仪测量试样的元素组成。

2 结果与分析

2.1 试验结果

图 1 为未变质处理的过共晶 Al-20Si 合金铸态组织。由图 1 可以看出,组织中不规则的长条状或块状初生 Si 相不均匀的分布在白色 α-Al 基体上,边缘处具有较尖锐的棱角,初生 Si 相上存在大小不一的“窟窿孔”,其主要由于初生 Si 相上存在较大纵横比的孪晶面,而孪晶面凹槽处在金相组织中表现为大小不一的“窟窿孔”^[10]。初生 Si 相尺寸差异较大,其最大尺寸约 230 μm 左右,平均尺寸约 83 μm 左右。细针状的共晶 Si 相分布于初生 Si 相四周,分布不均匀,出现明显的偏聚现象。

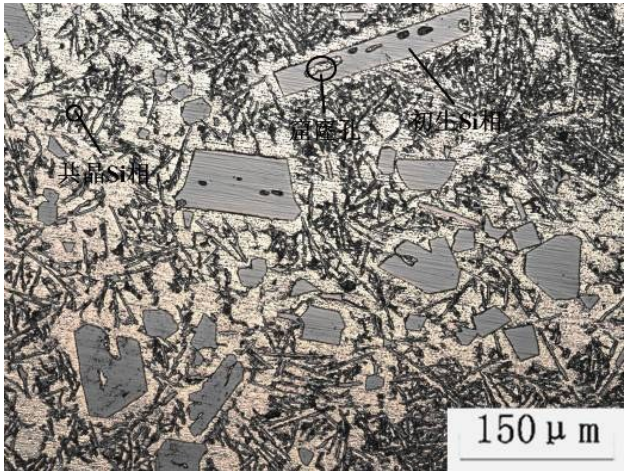


图1 过共晶 Al-20Si 合金变质处理前铸态组织

图 2 为正交试验后过共晶 Al-Si 合金的金相组织图。表 4 为不同变质工艺条件下初生硅尺寸测量值对比表。由图 2 和表 4 可知,经过变质处理后,组织中初生 Si 相大部分转变为规则的四边形、五边形和六边形,边缘钝化不明显,仍有锋利的棱角存在,窟窿孔基本消失。尺寸相比未变质时有了明显的细化,平均尺寸在 26.64 μm~49.7 μm 之间。共晶硅相除了在 A₂B₃C₁D₂ 和 A₃B₂C₁D₃ 工艺条件下有明显的细化外,其余几组尺寸相比未变质时变化不明显,仍以针棒状存在,分布较未变质时更加均匀。

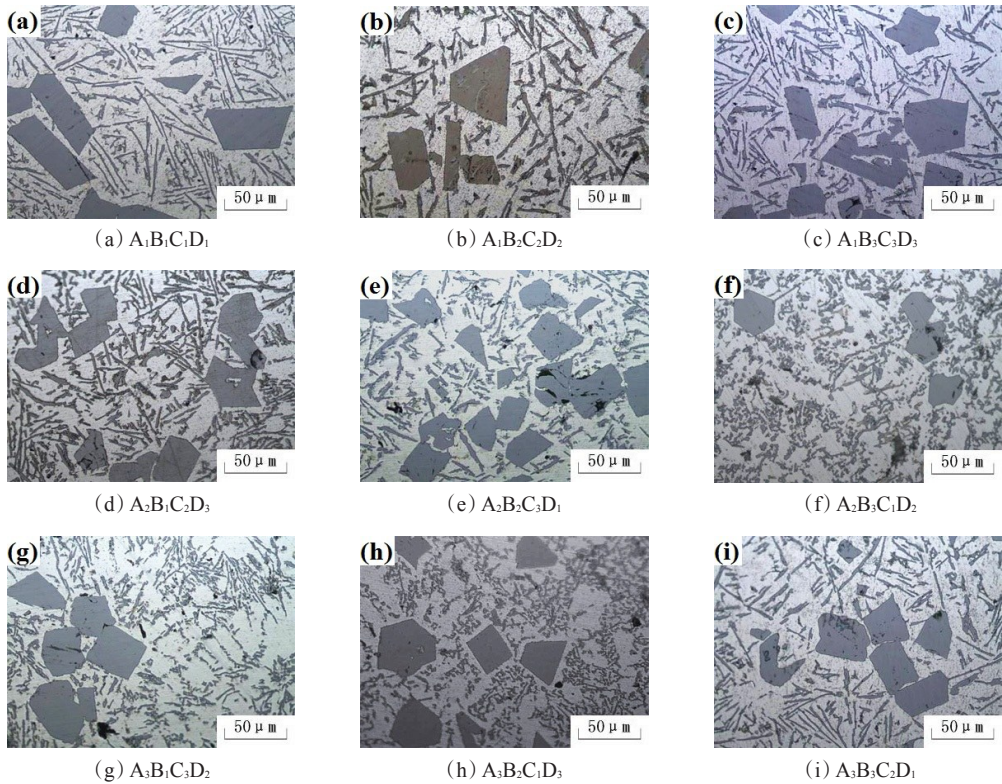


图2 不同变质工艺条件下Al-20Si合金的显微组织

表4 不同变质工艺条件下初生硅平均尺寸测量值对比

试验号	A(P含量/%)	B(RE混合稀土含量/%)	C(处理时间/min)	D(处理温度/℃)	初生Si平均尺寸/ μm
1	1(0.02)	1(0.3)	1(20)	1(750)	49.7
2	1(0.02)	2(0.6)	2(40)	2(780)	43.46
3	1(0.02)	3(0.9)	3(60)	3(810)	47.6
4	2(0.04)	1(0.3)	2(40)	3(810)	32.4
5	2(0.04)	2(0.6)	3(60)	1(750)	27.95
6	2(0.04)	3(0.9)	1(20)	2(780)	26.64
7	3(0.06)	1(0.3)	3(60)	2(780)	39.18
8	3(0.06)	2(0.6)	1(20)	3(810)	35.95
9	3(0.06)	3(0.9)	2(40)	1(750)	37.25

2.2 结果分析

2.2.1 直观分析

表5为不同变质工艺条件下过共晶Al-20Si合金初生Si相平均尺寸直观分析表。由表可知，细化处理的最佳工艺参数为A₂B₂C₁D₂。即P的添加量为0.04%，RE混合稀土的添加量为0.6%，变质时间为20 min，变质温度为780℃。由表中极差值可知：A因素（P添加量）的极差值最大，对细化作用影响最为显著，其次是B因素（RE混合稀土添加量）、D因素（变质温度）和C因素（变质时间）。

表5 初生Si相平均尺寸直观分析

试验号	A(P含量/%)	B(RE混合稀土含量/%)	C(处理时间/min)	D(处理温度/℃)	初生Si平均尺寸/ μm
$\bar{I}_j$	46.92	40.43	37.43	38.30	$\alpha=1,2,3,\cdots,9$ $j=1,2,3,4$
$\bar{II}_j$	29.00	35.79	37.70	36.43	
$\bar{III}_j$	37.46	37.16	38.24	38.65	
极差	17.92	4.64	0.81	2.22	
最优方案	A ₂	B ₂	C ₁	D ₂	

2.2.2 方差分析

表6为过共晶Al-20Si合金初生Si相平均尺寸方差分析表，A、B、C、D因素的自由度f值都为2，试验误差S_E的自由度f值是8，通过查显著性水平的F分布表可知，当 $\alpha=0.1$ 时，F_{0.1}(2,8)=3.11，当 $\alpha=0.05$ 时，F_{0.05}(2,8)=4.46，因此表6中因素A对变质作用为显著影响，B、C、D因素对变质效果有一定影响作用，各因素的影响程度分别为P添加量>RE混合稀土添加量>变质温度>变质时间。

2.3 验证试验

由于直观与方差分析得出的最佳工艺参数A₂B₂C₁D₂不在正交试验九组试验组中，因此设计了A₂B₂C₁D₂工艺对初生Si相进行变质处理的验证试

验,试验所得金相组织见图3。由图3可知,该工艺条件下初生Si相转变为规则的六边形,窟窿孔消失,平均尺寸进一步减小,达到24.84 μm ,相比正交试验九组试验组中最佳组的初生Si相平均尺寸减小了1.8 μm 。共晶Si相细化变短,分布更加均匀。验证组中初生Si相的变质效果也印证了正交试验的直观和方差分析所得出的结论。

3 结论

(1) 在正交试验九组试验组中,经变质处理后组织中初生Si相大部分转变为规则的四边形、五边形和六边形,尺寸有了明显的细化,平均尺寸由未变质时的83 μm 减小至26.64 μm ~49.7 μm 之间。

(2) 通过直观分析,得出了初生Si相变质处理的最佳工艺参数为 $A_2B_2C_1D_2$ 。该变质工艺参数为

0.04%的P添加量,0.6%的RE混合稀土添加量,20 min的变质时间以及780℃的变质温度。由极差值大小可知:A因素(P添加量)的极差值最大,对细化作用影响最为显著,其次是B因素(RE混合稀土添加量)、D因素(变质温度)和C因素(变质时间)。

(3) 通过方差分析,得出了因素A(P添加量)对变质作用为显著影响,B、C、D因素(分别为RE混合稀土添加量、变质时间和变质温度)对变质效果有一定的影响作用,各因素的影响程度分别为P添加量>RE混合稀土添加量>变质温度>变质时间。

(4) 在最佳工艺参数 $A_2B_2C_1D_2$ 的验证试验中,初生Si相转变为规则的六边形,平均尺寸进一步细化,达到24.84 μm ,共晶硅相细化变短,分布更加均匀。

表6 初生Si相平均尺寸方差分析

因素类别	离差平方和S	自由度f	均方	F比	F临界值	显著性
P(%)	482.365	2	241.183	3.668		(*)
RE混合稀土(%)	34.074	2	17.037	0.259		
变质时间(min)	1.028	2	0.514	0.008	$F_{0.1}(2,8)=3.11$ $F_{0.05}(2,8)=4.46$	
变质温度(℃)	8.575	2	4.288	0.06		
误差	526.04	8	65.755			

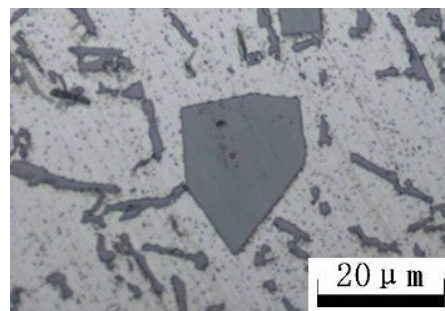


图3 $A_2B_2C_1D_2$ 工艺下过共晶Al-20Si合金显微组织

参考文献:

- [1] 周志敏,王娜,李勇,等.过共晶Al-Si合金初晶Si相的细化机理[J].特种铸造及有色合金, 2012,32(2):99-102.
- [2] 杨颖,王宇鑫,张瑜,等.过共晶铝硅合金耐磨性能的研究进展[J].金属功能材料, 2011,18(4):P72-76.
- [3] 刘相法,乔进国,宋西贵,等.Al-P中间合金在Al-Si活塞合金中的应用[J].特种铸造及有色合金, 2002(6):43-45.
- [4] 肖海波,刘昌明,林雪冬,等.颗粒增强Al-20Si-5Mg合金气缸套与铸铁气缸套的性能比较[J].特种铸造及有色合金, 2010,30(12):1140-1144.
- [5] 贾海龙,张海涛,左克生,等.Al-20%Si合金初生硅宏观偏聚和细化的试验研究[J].铸造, 2013,62(9):865-869.
- [6] 杨子润,庞绍平,孙瑜,等.变质及合金化对过共晶Al-20%Si合金组织及磨损性能的影响[J].中国有色金属学报, 2013,23(5):1218-1225.
- [7] 张训,张志峰,李大全,等.变质工艺对过共晶Al-Si合金连铸坯组织的影响[J].特种铸造及有色合金, 2011,31(2):183-186.
- [8] 张俊红,任智森,赵群,等.变质工艺影响过共晶Al-Si合金初晶硅细化的研究[J].轻金属, 2006(10):62-65.
- [9] 孔凡校.P、Sr、RE变质对过共晶Al-Si合金组织形态的影响[J].有色金属:冶炼部分, 2011(12):46-49.
- [10] C.L.Xu, H.Y.Wang, C.Liu, et al. Growth of octahedral primary silicon in cast hypereutectic Al-Si alloys[J].Journal of Crystal Growth, 2006, 291:540-547.

(责任编辑:史子木)