

过共晶高硅铸造铝合金 磷-稀土双重变质处理^①

张卫文 尹志民 赵 阳 陈红生

(中南工业大学材料科学与工程系, 长沙 410083)

摘 要 采用正交实验方法研究了磷、混合稀土变质剂添加量和变质处理温度对 Al-22 Si-1.2 Cu-0.9 Mg-1.0 Ni 过共晶高硅铸造铝合金变质效果的影响。结果表明: 磷、稀土的添加量和磷变质处理温度对合金的变质效果起决定作用; 稀土添加量对合金室温抗拉强度无明显影响, 但能显著提高其高温强度; 合金变质处理的最佳工艺如下: 磷添加量为 0.1%, 稀土添加量为 0.6%, 磷变质温度为 830 °C, 稀土变质温度为 810 °C。

关键词 过共晶 高铝硅合金 变质处理

过共晶高硅铝合金具有高硬度、高强度和良好的体积稳定性, 是一种新型汽车、摩托车活塞用合金^[1,2]。这种合金除含有少量 Mg₂Si、Al₂Cu、Al₃Ni 外, 主要组织特征为 α (Al)、初晶硅和共晶组织 ($\alpha + \text{Si}$)。其中初晶硅、共晶硅的大小、形貌和分布对合金性能影响很大, 是关键性的显微组织因素。合金熔体中加入少量变质剂会使合金中的初晶硅和共晶硅的特征发生很大的变化。在高硅铝合金中, 磷是最有效的初晶硅变质剂^[2,3], 硫和稀土对共晶硅有变质作用^[4,5]。国内外关于高硅铝合金的变质处理研究侧重于单个因素对变质效果的影响。实际上, 变质剂的种类、变质剂的添加量、变质处理温度以及铸锭冷却速度等都会对变质处理效果产生影响。本研究采用正交实验方法系统研究了磷和稀土的添加量、磷和稀土的变质温度对过共晶高硅铝合金性能的影响。

1 材料和实验方法

实验用合金的原材料为 A00 铝锭、1 号结

晶硅、1 号电解铜、2 号镁块和 1 号电解镍板。变质剂采用赤磷和 Al-10% 混合稀土中间合金, 成分见表 1。

表 1 试验合金的化学成分 (wt.-%)

合金元素	Si	Cu	Mg	Ni	Fe	Al
设计成分	22	1.2	0.9	1.0	≤0.5	余量
化验成分	21.80	1.08	0.85	0.91	0.43	余量

熔炼在 30 kW 井式电阻炉的石墨坩埚内进行, 每炉 10 kg。先将大部分铝锭熔化并过热到一定的温度, 再加入结晶硅、铜块、镍块和余下的铝锭。待熔清后降温至 760 °C 左右加入镁块, 然后除气精炼, 扒渣后再进行变质处理。为了全面了解变质剂的添加量和变质处理温度对合金组织性能的影响, 采用了四因素三水平正交实验方案 (表 2)。

变质处理后扒渣静置, 熔体在 800 °C 左右浇入标准拉伸试棒模, 模温约 250 °C。实验过程中分别采用 303 电位差计和表面温度计监测熔体和浇模的温度。

铸态和人工时效态合金的室温拉伸性能试

^① 湖南省计委资助项目 收稿日期: 1994-08-06; 修回日期: 1994-11-05

表2 磷-稀土复合变质处理的正交设计(L₉(3⁴))

位级	P添加量 (wt.-%)	RE添加量 (wt.-%)	P变质温度 /C	RE变质 温度/C
1	0.05	0.1	850	830
2	0.10	0.3	830	810
3	0.15	0.6	810	780

棒直接取自标准试棒模浇注的试棒, 高温力学性能试棒则取自铸棒中间部位, 试样尺寸符合GB1148-82。固溶处理 515±5℃, 4h, 60℃水淬, 人工时效 220℃, 6h, 空冷。为了评判变质处理工艺的优劣, 测试了合金在室温和高温下铸态、人工时效态的拉伸性能, 室温和高温拉伸实验分别在 WE-100 型和 Instron 材料试验机上进行。在 MET-1 型金相显微镜下观察分析了合金初晶硅和共晶硅的形态、大小、分布。为了定量说明合金中初晶硅的分布情况,

采用参数 η 来表征合金中初晶硅的分布均匀程度: $\eta = P/m \times 100\%$, 式中 P 为 n 处在 $[0.9\bar{n}, 1.1\bar{n}]$ 内的视场数, n 为某一视场内相应的单位面积初晶硅个数, \bar{n} 为试样单位面积初晶硅平均个数, m 为观察视场的总个数。

2 实验结果及分析

2.1 不同变质处理态合金的拉伸力学性能

不同变质处理态合金的铸态室温拉伸性能和人工时效态(T6)高温(300℃±5℃, 保温 0.5h)拉伸性能见表 3。依据正交分析方法, 将表 3 中各列同一水平下对应的抗拉强度值相加, 并求其平均值, 合金性能随各变质处理工艺参数而变化的趋势示于图 1。

由图 1 可以看出: 对于铸态合金, 磷和稀

表3 不同变质处理态合金的拉伸力学性能

	磷添加量 (wt.-%)	稀土添加量 (wt.-%)	磷变质温度 /C	RE变质温度 /C	铸态室温		T6态高温	
					σ_b /MPa	$\delta\%$	σ_b /MPa	$\delta\%$
1	0.05	0.1	830	830	144.0	0.5	95.4	1.2
2	0.05	0.3	810	780	140.0	0.4	94.9	1.2
3	0.05	0.6	850	810	142.8	0.5	100.0	1.0
4	0.10	0.1	810	810	142.6	0.3	127.0	1.1
5	0.10	0.3	850	830	144.0	0.4	137.2	1.6
6	0.10	0.6	830	780	156.7	0.6	152.8	1.6
7	0.15	0.1	850	780	145.7	0.6	114.4	1.1
8	0.15	0.3	830	810	146.2	0.5	160.0	1.3
9	0.15	0.6	810	830	134.8	0.4	140.4	1.2

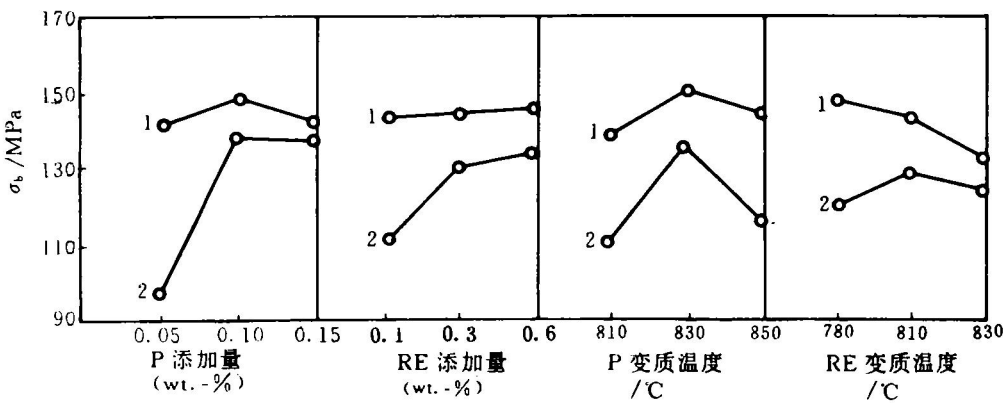


图1 变质处理工艺因素与合金的抗拉强度

1—铸态合金室温抗拉强度; 2—人工时效态合金高温抗拉强度

土的变质温度以及磷的添加量对室温抗拉强度有明显的影 响,而稀土的添加量的影响相对来说较小;对于人工时效合金的高温抗拉强度,各变质工艺参数均有显著的影响,随着稀土含量的增加,高温抗拉强度逐渐提高。

为了评判各工艺因素对合金变质处理效果的影响程度,由表 3 中的数据进行极差分析,结果见表 4。

表 4 变质处理工艺因素的极差

	P 添加量 (wt.-%)		RE 添加量 (wt.-%)		P 变质温度 / °C		RE 变质温度 / °C	
	5.7	1.4	9.9	6.4				
铸态合金室温抗拉强度	5.7	1.4	9.9	6.4				
人工时效合金高温抗拉强度	42.2	18.9	18.8	8.7				

由表 4 可以看出:对于铸态合金室温拉伸性能,四个工艺因素对它影响的显著性由大到小的顺序依次是:磷变质温度、稀土变质温度、磷添加量、稀土添加量;对于 T6 态合金高温抗拉强度,显著性由大到小的顺序依次是:磷添加量、稀土添加量、磷变质温度、稀土变质温度。

过共晶高硅铝合金主要用于生产活塞等高温下工作的构件,因此,高温抗拉强度是衡量该合金的一个重要指标。从前面的分析中发现,变质处理工艺对合金室温和高温力学性能影响的规律基本上是一致的。但也有一个例外(图 1),当稀土变质温度为 810 °C 时,虽然铸态抗拉强度不是最佳值,但合金高温抗拉强度达到了最大值;此外,在 810 °C 进行稀土变质处理可缩短熔体降温时间,便于生产控制和减少熔体吸气,同时提高生产效率。因此,其最优变质处理工艺参数可以确定为:磷添加量为 0.1%,稀土添加量为 0.6%,磷变质温度为 830 °C,稀土变质温度为 810 °C。

2.2 不同处理态合金的显微组织

不同变质处理态合金中的初晶硅的大小和分布见表 5。合金的典型显微组织见图 2。

从表 5 可以看出,采用前述实验方案对合金进行变质处理,初晶硅都可以得到很好的细

化,其平均晶粒尺寸都低于 40 μm。其中 6 号试样初晶硅平均晶粒尺寸小于 20 μm,并且大小均一,80% 的颗粒都在 25 μm 以下(见表 5),其金相组织见图 2。 η 和 \bar{n} 的数值也表明,6 号合金初晶硅分布最均匀,初晶硅尺寸细化效果也比较好。

表 5 不同变质处理态合金中初晶硅平均晶粒尺寸和分布

编号	$\bar{L}/\mu\text{m}$	尺寸范围 / μm			\bar{n} mm ²	$\eta/\%$
		$L < 25$	$25 < L < 35$	$L > 35$		
1	22.0	71	21	8	231	32
2	27.5	53	22	25	194	38
3	20.3	79	18.5	2.5	238	38
4	22.8	68.5	22.0	9.5	225	26
5	24.7	56	28.5	15.5	188	12
6	17.5	80	19.5	0.5	265	50
7	29.5	31	40	29	157	38
8	21.0	72	22.5	5.5	291	30
9	38.8	11.5	26	62.5	78	12

2.3 初晶硅尺寸对合金性能的影响

根据前面的实验结果,可以导出初晶硅平均晶粒尺寸 \bar{L} 和铸态室温抗拉强度 σ_0 的回归方程: $\sigma_0 = 102.9 + 201.3 \bar{L}^{-0.5}$, 相关系数 $R = 0.85$ 。

从图 3 可以看出,实验值与方程曲线吻合得比较好。这说明,在过共晶铝硅合金中,初晶硅的尺寸和分布是影响合金力学性能的关键因素。

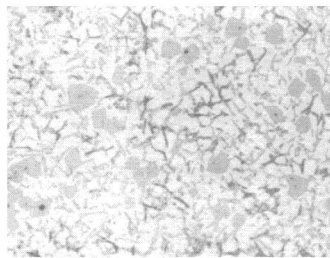


图 2 合金的典型金相组织特征, ×200

2.4 合金中共晶硅的特征

不同变质处理工艺对共晶硅的形貌和分布也产生了影响。图4是未添加稀土元素的合金显微组织，共晶硅成针状，分布在初晶硅的周围，取向无规则。稀土元素的加入，导致了共晶硅由针状、短杆状向纤维状转变(图2)，并且随着稀土含量的增加，转变量也逐步增多。

2.5 验证实验

按正交实验方法确定的最佳工艺参数进行验证实验，结果列于表6。

实验项目	铸态 σ_b /MPa	T6态高温 σ_b /MPa	\bar{L} / μm	η %
验证实验	150.4	138.2	20.0	50
正交实验最优点	156.7	160.0	17.5	50

从表中可见，本实验确定的最佳变质处理工艺具有很好的可重复性，合金的变质效果有很好的可靠性。说明采用上述最优变质处理工艺参数是切实可行的。

3 结论

(1) 磷的添加量和变质处理温度是过共晶高硅铝合金变质处理的两个关键因素，对合金的变质处理效果起决定作用。

(2) 稀土对过共晶高硅铝合金室温抗拉强度无明显影响，但可以显著提高合金的高温抗拉强度。

(3) 在本文实验条件下，Al-22 Si-1.2 Cu-0.9 Mg-1.0 Ni 铸造合金最佳变质处理工艺条件如下：磷的添加量为0.1%，稀土的添加量为0.6%，磷变质温度为830℃，稀土变质温度为810℃。

参考文献

- 1 Jorstad J L. AFS Transactions, 1984, 92: 573-578.
- 2 蔡宗德等. 特种铸造及有色合金, 1990, 4: 37-39.
- 3 Kissling R J, Wallace J F. Foundry, 1963, 91(4): 74-79.
- 4 Sharan R, Anantharaman T R. Current Science, 36(21): 568-570.
- 5 张启远等. 金属学报, 1981, 17(2): 130-136.

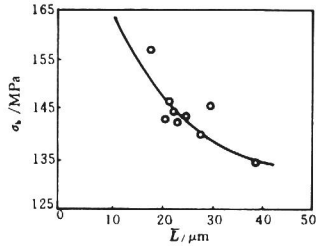


图3 铸态抗拉强度 σ_b 与初晶硅尺寸 \bar{L} 的关系

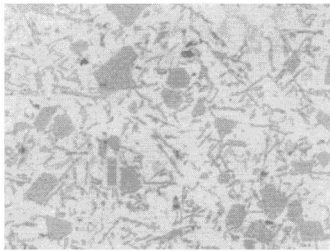


图4 未添加稀土元素的合金铸态金相组织, $\times 200$