

微量 Y 对 Al-Mg-Si 系合金组织性能的影响

张建新^{1,2}, 高爱华³

(1. 河南理工大学 材料科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 河南理工大学 政法学院, 河南 焦作 454000; 3. 河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 在熔炼过程中以铝钇中间合金形式加入稀土 Y 元素, 研究了 0-0.45% 范围内不同 Y 加入量对 Al-Mg-Si 系铝合金铸态组织、导电性能及高温蠕变抗力的影响。结果表明: 经过适量稀土 Y 微处理后的合金材料具有细小均匀的铸态组织, 平均晶粒尺寸维持在 50 μm 左右, 材料的导电能力得到一定程度的改善, 最佳电导率比原来增加 4%, 实验材料的热稳定性显著增强, 高温下的硬度、抗拉强度分别比原来提高 30% 和 25%。

关键词: 稀土 Y; 铝合金; 组织; 性能

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5053.2012.1.002

中图分类号: V223; V215.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2012)01-0006-04

Al-Mg-Si 系铝合金具有良好的热塑性、优良的耐蚀性及理想的机械性能, 该系以 6063、6061 铝合金等为代表的工业型材用途十分广泛^[1]。然而随着铝合金材料在高新技术领域的应用, 对其微观组织和机械性能提出了更高的要求, 例如, 铝箔制品要求材料具有优良的塑性, 高温铝合金要求组织具有较强的蠕变抗力, 散热型材对材料表面耐蚀性能要求较为严格^[2-4], 这就使得开发高性能的铝合金材料变得尤为重要。近几年来, 不少厂家在合金熔体中加入 Al-Ti-C 中间合金、RE-La 及 RE-Ce 等细化添加剂, 并取得了预期效果。与其它处理剂相比, 稀土 Y 元素活性强、在铝中的溶解度大, 逐渐被材料学者所关注。为了最大限度的改善铝合金材料的组织性能, 寻求更为理想的熔体处理方法, 文章以 Y 元素为研究对象, 分别探讨了它对 Al-Mg-Si 系合金晶粒细化、导电性能及高温蠕变抗力的影响, 并针对性的分析了稀土 Y 元素的作用机理。

300℃, 然后把纯铝锭、Al-Si 中间合金放入坩埚, 等炉料完全熔解后进行造渣处理, 加入覆盖剂后将纯镁块压入熔液中, 搅拌均匀将熔体温度升高到 760℃, 然后加入 Al-Y 中间合金, 精炼后保温, 用铁模浇铸成直径为 85mm 的铸锭。在油压机上将铸锭挤压成 40mm × 10mm 矩形铝排, 淬火后进行时效处理。用扫描电子显微镜观察材料的铸态组织, 用 7501 涡流导电仪测量材料电导率的比较值, 用 PHB-3000 型液压式布氏硬度计与万能材料试验机测量材料在不同温度下的布氏硬度及抗拉强度。

表 1 铝合金材料的化学成分(质量分数/%)

Table 1 The chemical ingredient of aluminum alloy material (mass fraction/%)

Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Al
0.62	0.41	0.25	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	Bal.

1 实验材料与方法

在电炉中用石墨坩埚熔炼相应的铝合金材料(成分见表 1), 首先将石墨坩埚预热到 200 ~

2 实验结果与分析

2.1 Y 对铸态组织的细化作用

材料铸态组织的优劣十分重要, 不仅是改善材料塑性的基础, 而且是提高性能的重要条件^[5]。研究表明, 稀土 Y 对 Al-Mg-Si 系铝合金铸态组织具有强烈的细化作用, 但随加入量不同其细化效果存在一定差异。通过实验, 得出如下结论: 稀土 Y 元素加入量在 0.1% (质量分数, 下同) 以下时, 其细化作用不明显; 当其加入量增加到约 0.30% 时, 细化效果较为显著(晶粒直径约在 50 μm); 当 Y 加入量超过 0.45% 后,

收稿日期: 2011-03-05; 修订日期: 2011-10-21

基金项目: 河南省教育厅计划项目(2008B430010); 河南理工大学金属材料发展基金项目(506096)

作者简介: 张建新(1972—), 男, 博士研究生, 副教授, 主要从事高性能金属材料的开发与应用研究; (E-mail) edu001@163.com。

它对组织的细化作用反而出现负面影响,晶界处出现了元素偏聚现象。铸态组织的扫描照片见图 1。

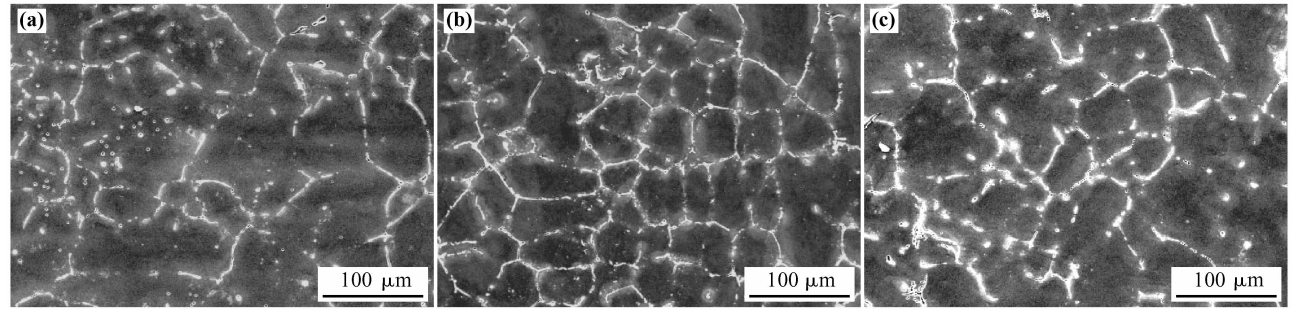


图 1 不同加入量的稀土 Y 对铸态组织的影响 (a)0.1% Y; (b)0.3% Y; (c)0.45% Y

Fig. 1 The effect of different Y content on cast structure (a)0.1% Y; (b)0.3% Y; (c)0.45% Y

关于微量 Y 对铝合金的晶粒细化作用机理,一般认为与熔体中析出的高熔点氧化物 Y_2O_3 及 Y 元素的活泼性有关^[6]。稀土 Y 与氧元素的结合能力极强,能夺取熔体中氧化物(主要是 Al_2O_3)的氧,通过计算物质的焓变可知, Y_2O_3 比 Al_2O_3 更加稳定,生成的 Y_2O_3 晶格常数与 Al 元素接近,其熔点高达 $2410^\circ C$,可作为铝的结晶核心,这不仅有利于细化合金的铸态组织,而且间接的消除了其他氧化物夹杂的影响。其次,Y 元素性质活泼,其电负性比 Al 小,熔于铝基体后容易填补合金相的表面缺陷(形成置换式固溶体),这对熔体的形核速度有利,从而增加了熔体单位体积内的晶粒数目,使其铸态组织得到细化。当向熔体中加入过量 Y 元素时,铸态组织的晶界处开始出现元素偏聚或偏析,通过物相分析知道,合金中的过剩硅元素与过量 Y 交互作用的结果,二者在铝熔体中容易生成中间产物 $YAlSi$,而且这种三元化合物多在晶界处形成偏析,所以铸态组织的细化效果及均匀性不理想。另外,实验中发现合理调整 Si 的含量,对微量 Y 的细化效果发挥至关重要,一般 Si 元素的过剩量以不超过 0.05% 为宜^[7]。

2.2 Y 对材料导电性能的影响

Al-Mg-Si 系合金在汽车导体及散热方面应用较为广泛,为了合理改善材料的导电性能,着重研究了 Y 的加入量对铝合金电导率的影响。实验中发现,当 Y 元素的加入量小于 0.15% 时,它对合金导电性能的影响不明显,其作用是局部的,合金的整体导电能力变化幅度不大;当 Y 的含量达到 0.25% 以上时,合金的导电性能明显上升,继续增加稀土 Y 的含量,当加入量达到 0.30% 时合金电导率最佳;当熔体中 Y 的含量超过 0.40% 以后,合金的导电性能出现明显下降。表 2 列举了 Y 含量对合金电导率的影响数据,其中 X_Y , C_f 与 C_k 分别表示 Y 的加入量、导电系数和电导率。

表 2 稀土 Y 对合金导电性能的影响

Table 2 The effect of RE Y on conductive property of the alloy

No.	Y	Mass fraction/%	Si	C_f	C_k
1	0.00	0.05	28.2	52.7% IACS	
2	0.15	0.05	28.7	53.3% IACS	
3	0.15	0.03	29.1	53.6% IACS	
4	0.30	0.05	29.6	54.1% IACS	
5	0.30	0.03	29.9	54.5% IACS	
6	0.45	0.05	28.6	53.2% IACS	

Note: The sign " C_f " is comparison value of conductivity in the table.

分析表中数据易知,Y 元素的加入量在 0.30% 左右时(此时硅元素过剩 0.03%),材料具有较好的导电性能,这一数据与铸态组织的最佳含量相吻合,可见铸态组织越均匀的材料,其导电性能也十分优越。稀土 Y 的作用机理可从以下两方面解释:一是适量 Y 加入到铝合金熔体后,起到强烈的变质作用,其中的氢(金属熔体中 80% 以上的气体夹杂为氢)、氮等非金属元素与稀土 Y 的结合力较强,生成了相应的氢化物、氮化物,这些化合物部分在造渣处理中排除,部分作为异质晶核,这就有效的抑制了组织中出现气泡,大大降低了针孔率,所以从材料致密性的角度分析,其电导率得到提高^[8];二是加入的 Y 元素与其他合金元素化合时,含 Y 相伴生着较多的铁元素(铁在 Al-Mg-Si 系合金中是杂质元素),这就有效抑制了粗大 β 相的出现(β 相表示式为 $Al_9Fe_2Si_2$,是铝合金中的有害相),组织的均匀性得到改善,所以从材料均匀性的角度分析,实验材料的导电性能较为优越。最后需要指出的是:过量的加入稀土 Y 只会增加组织的割裂性,因为过剩稀土元素多在晶界处形成偏聚,对材料的导电性能起负面效应(见图 2)。

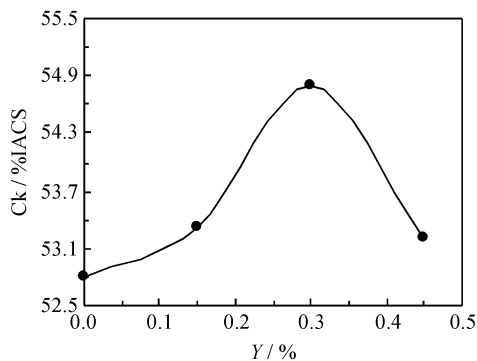


图 2 稀土 Y 对电导率的影响

Fig. 2 The effect of RE-Y on electric conductivity

2.3 Y 对硬度和抗拉强度的影响

许多铝合金材料在高温下容易出现蠕变现象,这一缺点很大程度上限制了铝合金的应用^[9]。如该合金系 6063 合金在 150℃ 时抗拉强度仅为 140MPa (T6 状态),与室温下的抗拉强度相比下降了 40% 左右。为了改善 Al-Mg-Si 系铝合金的耐高温性能,开拓铝合金材料的广阔前景,实验在加入不同 Y 的前提下,测试了试样的强硬度指标。具体步骤为:分别把各试样进行拉伸实验及硬度测试,然后对比分析实验数据,进行计算机模拟绘图,数据见图 3。综合分析试样的机械性能,发现添加 0.30% 的 Y 时其强硬度较高,而且材料保持着较好的塑性,试样的断口处出现了明显的韧窝(见图 4)。

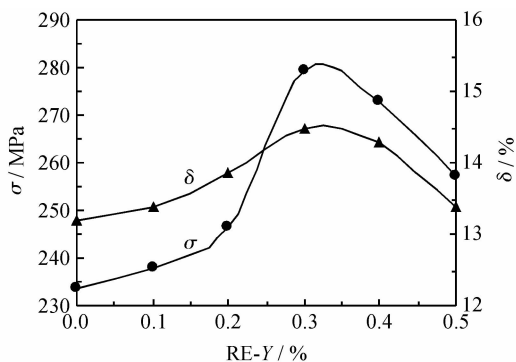


图 3 稀土 Y 与抗拉强度、延伸率的关系

Fig. 3 Variation of tensile strength and elongation with RE-Y

经过稀土 Y 元素处理后的材料,具有良好的热稳定性,工作环境可在原来基础上提高 50 ~ 100℃。对于时效强化型 Al-Mg-Si 系合金,要解决其高温下的蠕变问题,必须弄清楚材料的热稳定性、高温蠕变及高温拉伸强度之间的关系。一般情况下,铝合金材料随着使用温度的升高,其强度下降,热稳定性减弱,发生高温蠕变的概率增加。对于 Y 元素作用下的铝合金,可以从以下三个方面分析作用机理:一是 Y 元

素能和铝基体元素生成富铝稀土相,该相熔点较高,能有效阻止高温下的晶界滑移,这对增加材料的热稳定性有积极作用^[10];二是 Y 元素与组织中的合金元素铜、锌生成复杂的金属间化合物 Cu_4YAl_8 , $\text{ZnY}_{12}\text{Al}_3$, 这些高熔点化合物呈弥散状分布,对位错运动有钉扎功能,对提高材料的高温强度有明显作用;三是稀土 Y 元素的加入能有效降低镁、硅原子的扩散速度,从而延缓了强化相 Mg_2Si 的粗化,这对改善材料的高温蠕变十分有利^[11]。所以实验材料的耐热性能得到一定程度的提高。

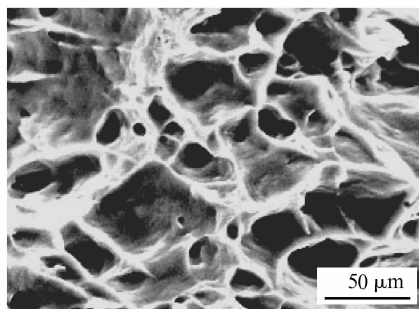


图 4 拉伸试样的断口形貌 (SEM)

Fig. 4 Fracture appearance of tensile samples

3 结论

(1) 加入 0.30% 左右的 Y 对 Al-Mg-Si 系铝合金的铸态组织具有强烈细化作用,铸态晶粒尺寸保持在 50 μm 左右。

(2) 含 Y 元素 0.30% 的 Al-Mg-Si 系铝合金具有较强的导电能力,其电导率相对于普通成分的合金提高大约 5%。

(3) 适量稀土 Y 元素的加入能合理增进 Al-Mg-Si 系合金材料的热稳定性,高温下的强硬度比原来得到明显改善。

参考文献:

- [1] 张向宇,熊计,赵国忠,等. 稀土 La 对 6063 铝合金组织与时效性能的影响[J]. 有色金属, 2010, 62(1): 1-2.
- [2] FUKUI K, TAKEDA M, ENDO T T. Morphology and thermal stability of metastable precipitates formed in an Al-Mg-Si ternary alloy aged at 403K to 483K [J]. Materials Letters, 2005, 59(11): 1444-1445.
- [3] ZHANG L Y, ZHAN Z J, JIA Y Z. Characterization of Al-Si-Mg alloys fast quenched from the melt by special medium [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007,

187/188(12): 791 – 792.

- [4] 高力强, 刘丽, 庄乾坤. 铝及其合金材料在建筑节能中的应用[J]. 新型建筑材料, 2010, 37(7): 31 – 33.
- [5] 姜锋, 韦莉莉, 蹇海根, 等. 航空用 B93 铝合金均匀化显微组织分析[J]. 航空材料学报, 2010, 30(2): 1 – 2.
- [6] 李桂荣, 赵玉涛, 李季. 稀土钇强化 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金的组织特征[J]. 江苏大学学报, 2010, 31(1): 49 – 51.
- [7] 张建新, 高爱华. 过剩 Si 对 6063 铝合金组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2008, 28(2): 148 – 149.
- [8] 袁孚胜, 李明茂, 朱应禄, 等. 稀土在铝及其合金中的作用和应用[J]. 上海有色金属, 2009, 30(3): 130 – 131.
- [9] 陈宇强, 易丹青, 潘素平, 等. 温度对 2024 铝合金蠕变行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(4): 632 – 633.
- [10] 李慧中, 张新明, 陈明安, 等. 稀土钇对 2519 合金组织及耐热性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2005, 23(1): 40 – 41.
- [11] 陈志国, 周娴, 舒军, 等. 稀土在铝合金中微合金化研究进展[J]. 矿冶工程, 2010, 30(2): 103 – 104.

Effect of Micro-Y on Microstructure and Properties of Al-Mg-Si Aluminum Alloy

ZHANG Jian-xin^{1,2}, GAO Ai-hua³

(1. Institute of Materials Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan China; 2. Institute of Liberal Arts and Law, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan China; 3. Institute of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan China)

Abstract: The effects of rare earth yttrium on cast microstructure, conductive property and high temperature creep resistance of Al-Mg-Si aluminum alloy are studied when yttrium element is added into the melt in the form of aluminum-yttrium interalloy with the range of 0 – 0.45%. The results indicate that proper yttrium element has the strong refinement on cast microstructure, the average grain size maintains 50 micron or so. The electrical conductivity of experimental materials gets improving to some extent, compared with the original, the best electric conductivity increases by 4%. The thermal stability of experimental sample grows significantly, the hardness and the tensile strength are increased by 30% and 25% respectively.

Key words: RE-Y; aluminum alloy; microstructure; property