DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.09.005

提高铸造铝合金 AlSi10Mg 电导率的新方法

潘祖强[1],段　民[1],童自谦[2]
(1. 浙江集思铝业有限公司,浙江 杭州 311401; 2. 杭州汽轮铸锻有限公司,浙江 杭州 311106)

摘　要:在高压开关灭弧类产品中,部分产品需要通过提高自身电导率,减小回路电阻。通过控制 AlSi10Mg 合金中 Ti 含量(≤0.03%),采用 Sr 变质处理和热处理时效(190 ℃),改善其 Si 相的组织形态和分布,导致电导率提升。在保证力学性能的前提下,将合金电导率提高至 23.5 Ms/m 以上,满足电工材料产品需求。

关键词:铝合金;细化组织;电导率

中图分类号:TG113.22　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)09-0904-04

New Method of Improving the Conductivity of As–cast AlSil0Mg Alloy

PAN Zuqiang[1], DUAN Min[1], TONG Ziqian[2]
(1. Zhejiang GIS Aluminum Co., Ltd., Hangzhou 311401, China; 2. Hangzhou Turbine Casting & Forging Co., Ltd., Hangzhou 311106, China)

Abstract: In high-voltage switch arc extinction products, some products need to improve their own conductivity, to reduce the circuit resistance. By controlling the Ti content in AlSil0Mg alloy (≤0.03%), Sr modification and heat treatment aging (l90 ℃) were adopted to improve the morphology and distribution of Si phase, leading to the improvement of conductivity. On the premise of ensuring mechanical properties, the conductivity of the alloy is increased to more than 23.5 Ms/m to meet the requirements of electrical materials.

Key words: aluminum alloy; refinement of microstructure; electrical conductivity

AlSi10Mg 合金因其良好铸造性，热裂倾向小、气密性高、线收缩小、可热处理强化,良好的导电性能,在高压输配电设备当中广泛应用。Ti 是铝合金中最常用的细化剂，当铝合金中加入少量的 Ti 时,铝合金组织可得到明显细化,合金的强度、韧度、耐磨性、抗疲劳性能及热稳定性等均有所提高,Ti 元素在铝合金中的强韧化作用越来越受到人们的重视[1],同时通过合金细化也可以减少疏松等铸造缺陷,因此在铝合金中,Ti 是一种非常见的合金化元素。

铸造 Al-Si 合金内部组织主要由 α-Al 和 Si 相组成，其组织形态对 Al-Si 合金电导率有较大的影响。本文控制影响 AlSi10Mg 合金组织形态较大的 Ti 含量、采用 Sr 合金变质剂及时效热处理新技术,以提高其电导率。

收稿日期:2019-08-23

作者简介:潘祖强(1963-),浙江杭州人,工程师,总经理.主要从事技术和生产管理方面的工作.
E-mail:zuqiang.pan@gisap.cn

通讯作者:段　民(1984-),河南南阳人,工程师.主要从事铝合金铸造铸造工艺技术方面的工作.
电话:0571-87191527,E-mail:min.duan@gisap.cn

1　试验材料及方法

1.1　试验用原材料

试验用国内某大铝厂生产的 AlSi10Mg 成品合金铝锭。Ti 通过添加块状 AlTi5 中间合金,精炼通过高纯氩气旋转除气。试验用合金成分见表 1。

表 1 试验用合金成分 w(%)
Tab.1 Nominal composition of alloy for testing

编号	Si	Fe	Mg	Mn	Ti	Al
1	9.5	0.18	0.25	0.25	0.03	其余
2	9.5	0.18	0.25	0.25	0.06	其余
3	9.5	0.18	0.25	0.25	0.09	其余
4	9.5	0.18	0.25	0.25	0.12	其余
5	9.5	0.18	0.25	0.25	0.15	其余

1.2　试验设备

井式坩埚电阻炉（型号 TGR-300-60),Spectro 光谱仪,XJL-03 型立式金相显微镜,D60K 数字金属电导率测量仪,立式淬火炉,箱式时效炉,CMT-6105 型微机控制电子万能材料试验机。

1.3　试验方法及过程

AlSi10Mg 合金熔炼过程：使用两台 300 kg 石墨坩埚炉,先将不含 Ti 的成品铝锭投入预热好的坩埚中,AlTi5 合金根据成分需要配比，熔炼温度 730 ℃,熔炼 3 h,期间用渣勺在坩埚内轻轻搅动,待

温度升值 720~730 ℃时，需要变质处理的合金，加入 Al-Sr10 合金变质剂，另外一炉不加变质剂；搅拌 30 s 左右并保温 10 min，之后采用高纯氩气+旋转除气机精炼除气 10 min，静止 5~10 min 后，加入清渣剂除渣。熔炼完成后，将铝液浇入提前制作好标准树脂砂砂型单铸试棒型中。

金相试样取样从单铸试棒一端截取长约 15 mm 试样，并使用电导率测量仪完成电导率检测。

单铸试棒采用 T6 处理工艺，固溶处理 535±5 ℃，保温 6 h，淬火液介质为常温水，时效温度分别采用 160、170、180、190 ℃，保温均为 10 h。

2　试验结果与分析

2.1　不同 Ti 含量对 AlSi10Mg 合金电导率的影响

图 1 为不同 Ti 含量下测得铸态 AlSi10Mg 合金电导率曲线。从图 1 中看出随着 Ti 含量的增加电导率在逐渐下降。Ti 元素是铝合金中最常用的细化剂，能够有效细化粗大的 α-Al 树枝晶，使其变得晶粒细小。从图 2 中看出，当钛含量 0.03%时，合金中出现粗大的 α-Al 树枝晶，在含钛量达到 0.06%时(图 2b)，α-Al 已经得到明显细化，继续增加合金的钛含量，α-Al 晶体由树枝状逐渐变成棒状，再由棒状变成球状。由于钛强烈的细化晶粒作用，造成晶界过多，而晶界作为一种面缺陷，使得电子波散射增加，材料的导电性能下降，且钛含量越高，晶粒越细，电导率就越低[2]。因此，在保证力学性能要求的前提下，降低 AlSi10Mg 合金 Ti 含量是提高电导率有效手段。

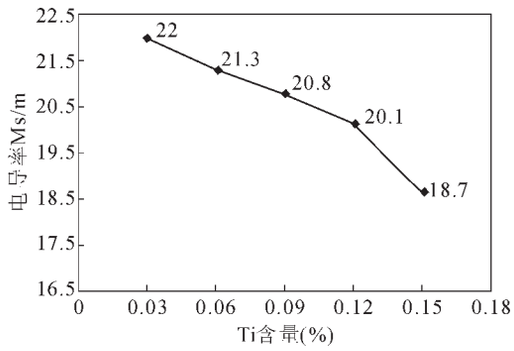
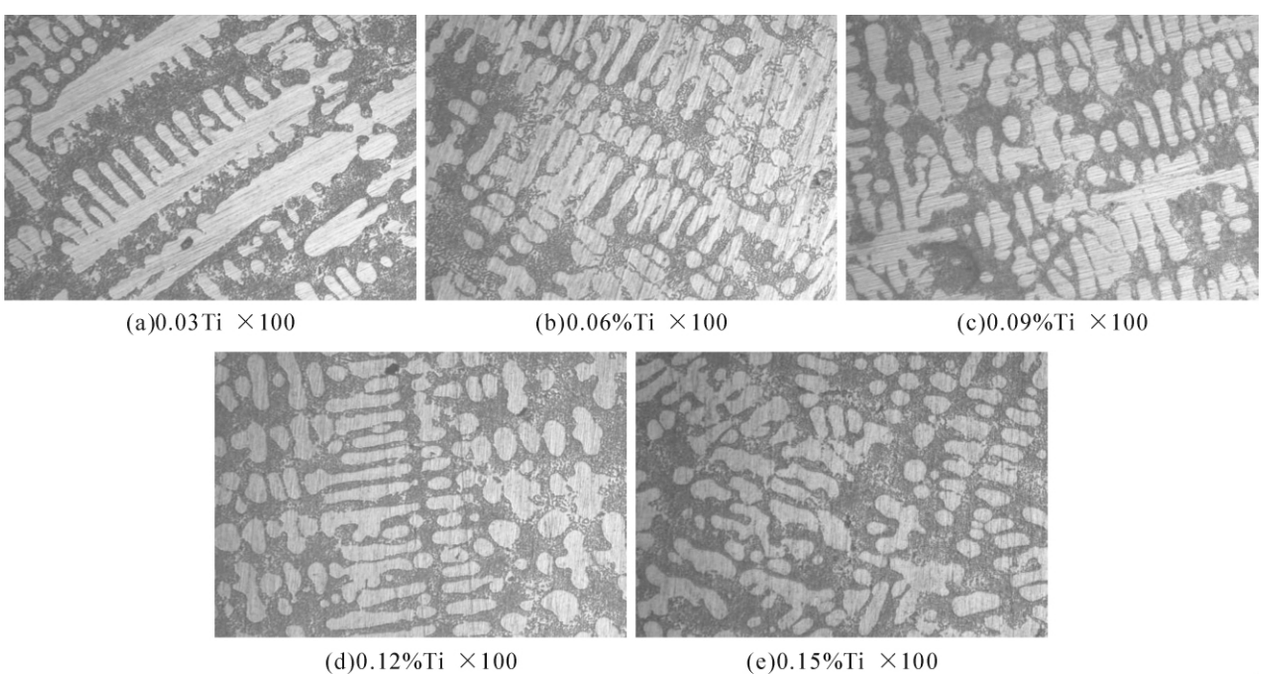


图 1　不同 Ti 含量对电导率的影响
Fig.1　Influence of different Ti contents on conductivity

2.2　Sr 变质对 AlSi10Mg 合金电导率的影响

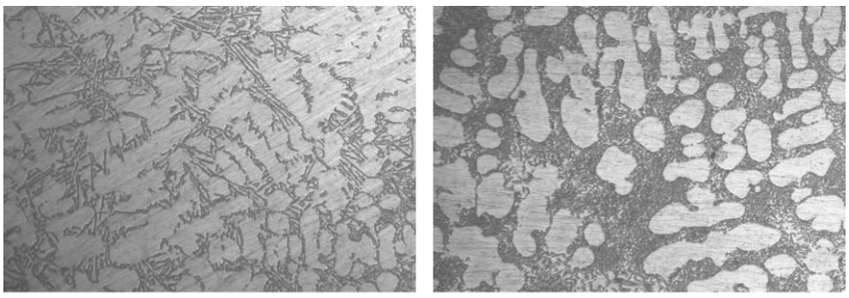
由前述可知，Si 的形态及分布对 Al-Si 合金电导率有较大影响；通过变质处理可以改变 Si 的组织形态及分布，而 Sr 作为一种无害长效变质剂被广泛应用铝硅合金变质处理中[3]。经过 Sr 变质后，合金中共晶硅由长针状或板条状转变为球状或短杆状，见图 3；而硅是半导体，电阻率较高，粗大针状的硅会割裂电导率较高的 α-Al 基体，增大电子散射，从而降低合金电导率；通过 Sr 变质后的合金，Si 相变得细小，这样就能减少对自由电子传递的阻碍，在导电方向上保证 α-Al 基体的连续性及较大的导电截面积，从而提高合金电导率，见图 4；通过 Sr 变质处理后，合金电导率增加了 2~3 Ms/m。但即使采用 Sr 变质剂处理，AlSi10Mg 合金的电导率也没有达到使用要求，需要后续的热处理来调控其组织形态。



(a)0.03Ti ×100　(b)0.06%Ti ×100　(c)0.09%Ti ×100

(d)0.12%Ti ×100　(e)0.15%Ti ×100

图 2　不同 Ti 含量细化 AlSil0Mg 铝合金的凝固组织
Fig.2　The solidified structure of AlSil0Mg aluminum alloy refined with different Ti contents



(a)0.15%Ti未加入Sr变质 ×100　　(b)0.15%Ti加入0.012%Sr变质 ×100

图 3 未经过变质和经过 Sr 变质后 AlSil0Mg 铝合金的凝固组织

Fig.3 Solidified structure of AlSil0Mg aluminum alloy without modification or after modification by Sr

2.3 不同热处理工艺对 AlSi10Mg 合金电导率的影响

热处理是提升铸造 Al-Si 合金电导率的有效方法之一，其原因有二：热处理导致固溶于 α-Al 中的合金元素以第二相的形式大量均匀析出，减少晶格畸变进而改善 α-Al 基体电场的规整性，减少了自由电子的散射，使 α-Al 的电导率升高；同时，热处理改变 Si 相形态，经过熔断、球团化过程，Si 相由短纤维状转变为颗粒状[4]，且促进 Si 相的均匀分布，保证了 α-Al 基体的连续性。由图 5 可以看出，经过 T6 热处理后的电导率明显高于未经过 T6 热处理的电导率。从图 5~ 图 6 以看出，随着时效温度的提高其电导率也在逐渐提高，力学性能随之显著降低。实验结果发现含 Ti 0.03%的试样经过 190 ℃时效其电导率达到 23.8 Ms/m，但是其抗拉强度由 270 MPa 左右快速下降到 230 MPa 左右，其强度值已经接近为 220 MPa(依据 EN1706 标准)的标准值，从其抗拉强度的变化趋势来看，如果要满足其合金力学性能要求，已经不能通过提高其时效温度来提高其电导率。

3 结论

(1)AlSi10Mg 合金中 Ti 元素含量越低，试样电导率越高。

(2)在相同 Ti 含量的情况下，比未经过 Sr 变质

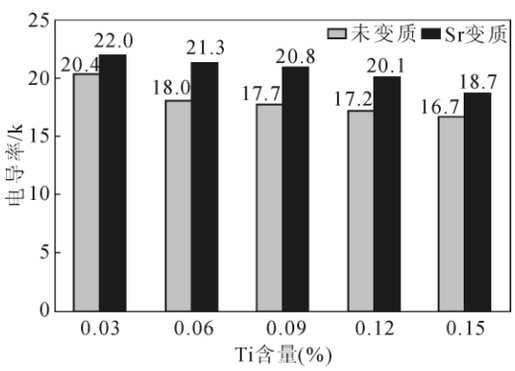


图 4 未经过变质和经过 Sr 变质后 AlSil0Mg 铝合金的电导率对比

Fig.4 Comparison of conductivity of AlSil0Mg aluminum alloy without modification and after modification by Sr

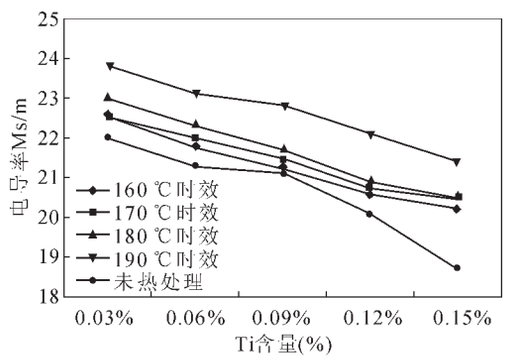


图 5 未经过热处理及经过热处理后 AlSil0Mg 铝合金的电导率对比

Fig.5 Comparison of conductivity of AlSil0Mg aluminum alloy without heat treatment or heat treatment

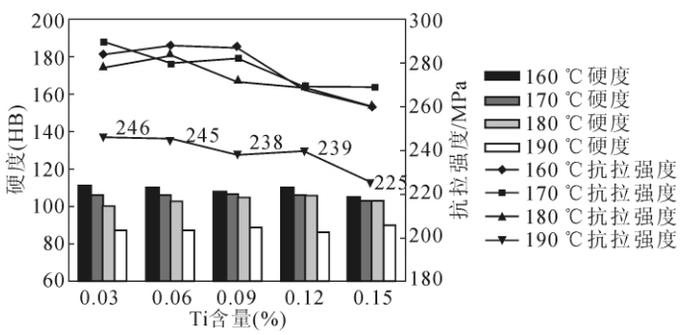


图 6 经过不同时效温度热处理后 AlSil0Mg 铝合金的抗拉强度及硬度对比

Fig.6 Comparison of tensile strength and hardness of AlSil0Mg aluminum alloy after heat treatment at different aging temperatures

（下转第 914 页）

6 结论

某钢厂 CSP 薄板坯开浇炉次夹杂缺陷的主要原因为开机过程钢液二次氧化生成大量的夹杂物，以及钢液中钙铝比控制不合理，造成钢液流动性变差导致塞棒上涨，结晶器液面波动所致；中包氧化性气氛强，浇注过程吸入空气、以及覆盖剂中 SiO_2 与钢液反应等造成开浇炉次从钢包到中间包钢液吸氮、吸氧程度较为严重；通过中间包充分充氩、使用碱性中间包覆盖剂、提高钢液的钙铝比、中间包钢液液面采用氩气保护等措施，取得了较好的效果，开浇液面波动稳定在±4 mm，开浇炉次夹杂缺陷率降低了 35.82%。

参考文献：

[1] 蔡开科. 浇注与凝固[M]. 北京: 冶金出版社, 1987.
[2] Carneiro R A, Ratnapuli R C, Lins V C. The influence of chemical composition and microstructure of API linepipe steels on hydrogen induced cracking and sulfied stress corrosion cracking [J]. Materials Science and Engineering: A, 2003(357): 104-110.
[3] Kihiko takahashi, Hiroyuki Ogawa. Influence of microhardness and inclusion on stress oriented hydrogen induced cracking of linepipe steels [J]. ISTS International, 1996, 36(3): 334-339.
[4] 曹晶，杨文，王新华. 低碳铝镇静钢连铸开浇阶段钢中非金属夹杂物的变化[J]. 钢铁, 2011, 46(6): 37-39.

（上接第 887 页）

[3] Aghion E, Bronfin B. Magnesium Alloys Development towards the 21st Century[C]// Materials Science Forum. 2000:19-30.
[4] Rashad M, Pan F, Lin D, et al. High temperature mechanical behavior of AZ61 magnesium alloy reinforced with graphene nanoplatelets[J]. Materials & Design, 2016, 89: 1242-1250.
[5] 袁秋红，曾效舒，吴俊斌. 石墨烯增强 AZ91镁基复合材料的力学性能[J]. 机械工程材料, 2016, 40(8): 43-48.
[6] 程思. 石墨烯增强镁基复合材料制备及其表面微弧氧化研究[D]. 南昌航空大学, 2017.
[7] 屈晓妮，周明扬，孙浩，等. 碳纳米管–石墨烯增强 AZ31 镁基复合材料实验研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(6): 137-140.
[8] 徐春杰，郭学锋，张忠明，等. 往复挤压及正挤压 AZ91D 镁合金丝材的组织及性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(3): 500-504.
[9] 董群，陈礼清，赵明久，等. 镁基复合材料制备技术、性能及应用发展概况[J]. 材料导报, 2004, 18(4): 86-90.
[10] 代盼. SiCp 增强快速凝固镁基复合材料的组织与性能研究[D]. 西安理工大学, 2015.
[11] Atrens A, Song G L, Cao F, et al. Advances in Mg corrosion and research suggestions[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2013, 1(3): 177-200.

（上接第 906 页）

的试样，电导率高出 2~3 Ms/m。

（3）T6 热处理工艺可以提高试样电导率，随着时效温度的提高电导率逐渐提高，当时效温度为 190 ℃时，电导率提升较为显著，最高达到 23.8 Ms/m，力学性能也能满足客户要求。

综合以上实验，我公司采含 Ti（≤0.03%）的 AlSi10Mg 合金，采用 Sr 变质工艺，同时将热处理时效温度调整为 190 ℃，最终实现零件的电导率达到 23.5 Ms/m 以上的目标。

参考文献：

[1] Mingxing Wang, Sunjun Wang, Zhiyong Liu, et al. Effect of B/Ti mass ration grain refining of low-titanium aluminum produced by electrolysis [J]. Materials science and Engineering A.2006,416(1-2):312-316.
[2] 杨涤心，夏青，杨留栓，等. 铸造铝–硅合金的电导率与化学成分[J]. 特种铸造及有色合金, 2002(4):58-60.
[3] Shabestari S G, Miresmaeili S M, Boutorabi M A. Effects of Sr-modification and melt cleanliness on melt hydrogen absorption of 319 aluminium alloy [J]. Journal of materialsscience,2003,38:1901-1907.
[4] 刘相法，费振义，乔进国，等. Al-Si 合金中 Si 相的团粒化研究[J]. 铸造，2003，52（8）：538-541.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 **2019** 年《铸造技术》杂志
国内邮发代号：52–64　国外发行号：M855　国内定价：18 元/本　海外定价：18 美元/本