DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.11.007

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],陈云祥[3],林　波[3]

(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；3. 浙江机电职业技术学院,浙江 杭州 310053)

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来减小回路电阻。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,导致其电导率显著提升。结果表明,在保证其力学性能的前提下,将该合金电导率提高至 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: TG146.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)11-1159-04

New Method to Improve the Conductivity of as-cast AlSi10Mg Aluminum Alloy

PAN Zuqiang[1], DUAN Min[1], TONG Ziqian[2], CHEN Yunxiang[3], LIN Bo[3]

(1. Zhejiang Jisi Aluminum Co., Ltd., Hangzhou 311401, China; 2. Hangzhou Steamer Casting-forging Co., Ltd., Hangzhou 311106, China; 3. Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Hangzhou 310053, China)

Abstract: In high voltage switch arcing products, it is necessary to reduce the loop resistance by improve some products conductivity. By controlling the Ti content in AlSi10Mg alloy (≤0.03%) and adopting Sr modification and heat treatment aging (190 ℃), the microstructure and distribution of the Si phase were improved, leading to a significant increase in its electrical conductivity. The results show that the electrical conductivity of the AlSi10Mg alloy can be increased to more than 23.5ms /m to meet the requirements of electrical materials on the premise of guaranteeing its mechanical properties.

Key words: aluminum alloy; refine microstructure; 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。因此，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,经济师,铸造工程师.主要从事技术和生产运营方面的工作.
电话:0571-87191527,E-mail:zuqiang.pan@gisap.cn

通讯作者:段　民(1984-),河南南阳人,工程师,本科.主要从事铝合金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。试验用合金成分如表 1。

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

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、光谱仪、立式金相显微镜、数字金属电导率测量仪、立式淬火炉、箱式时效炉及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

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

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模型中。

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 和 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 含量下测量的铸态 AlSi10Mg 合金电导率曲线。可以看出，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。图 2 为不同 Ti 含量细化 AlSi10Mg 铝合金的凝固组织。可以看出，当钛含量为 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，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。由于钛元素具有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。

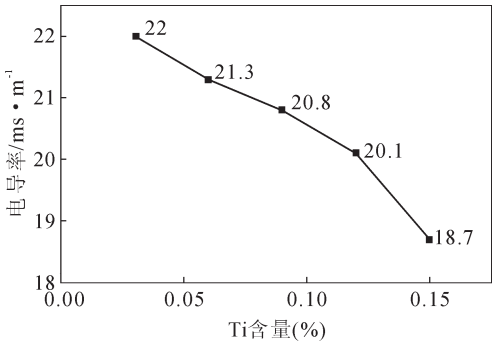
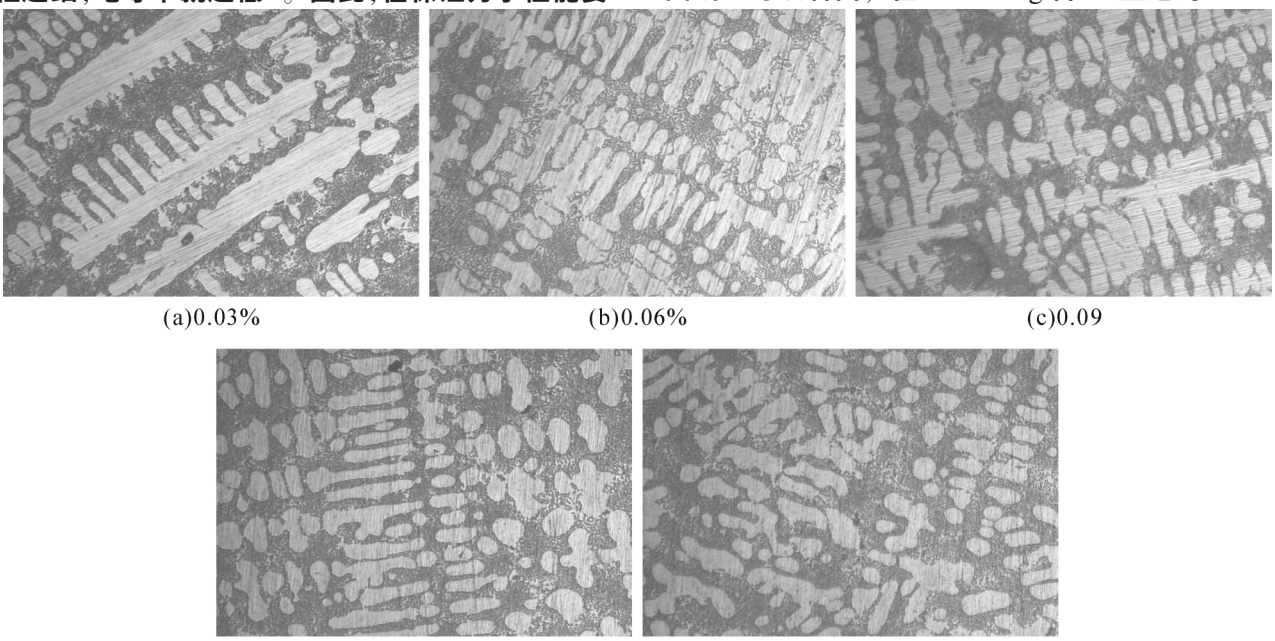


图 1 不同 Ti 含量铸态 AlSi10Mg 合金电导率

Fig.1 Electrical conductivity of AlSi10Mg alloy with different Ti contents

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，合金中共晶硅组织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，粗大针状的硅相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；同时未经过变质和经过 Sr 变质的 ALSi10Mg 合金都随 Ti 含量的增加而保持相同的变化趋势，而且从未变质的曲线上可以看出，在 AlSi10Mg 含 Ti 量达到 0.06%



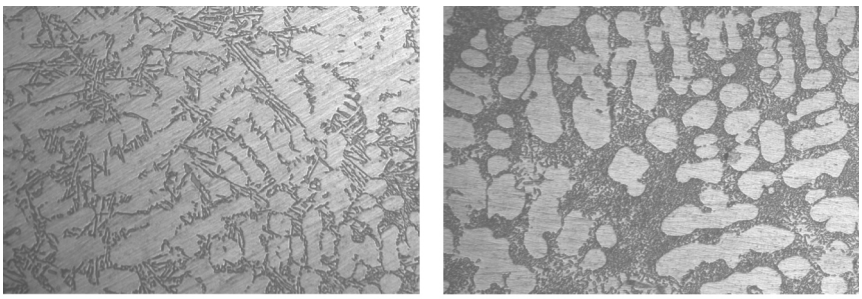
(a)0.03% (b)0.06% (c)0.09

(d)0.12% (e)0.15%

图 2 不同 Ti 含量细化 AlSi10Mg 铝合金的凝固组织 ×100

Fig.2 Refinement microstructure of AlSi10Mg aluminum alloy refined by different Ti contents

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



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

图 3　未经过变质和经过 Sr 变质后 AlSi10Mg 铝合金的凝固组织　×100

Fig.3　Solidification microstructure of AlSi10Mg aluminum alloy without modification and modification by Sr

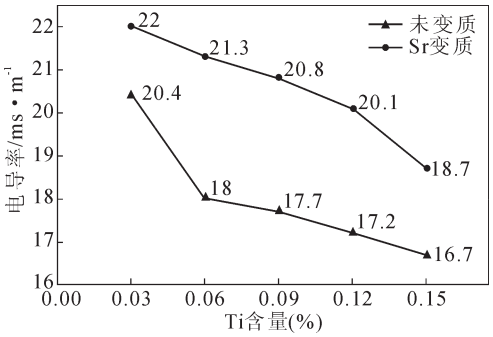


图 4　未经过变质和经过 Sr 变质后 AlSi10Mg 铝合金的电导率对比

Fig.4　Conductivity comparison of AlSi10Mg aluminum alloy without modification and modification by Sr

时其电导率下降幅度较大。通过 Sr 变质处理后，合金电导率在相同的含 Ti 量情况下，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。

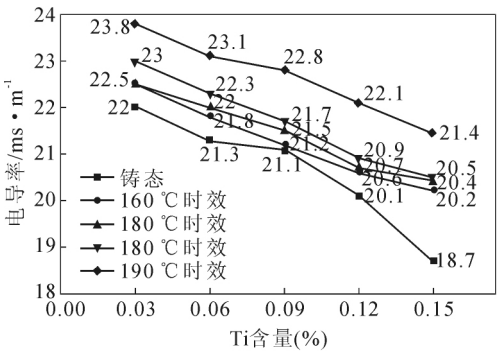
2.3　不同热处理工艺对 AlSi10Mg 合金电导率的影响

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 相由短纤维形状转变为颗粒状[4]，且促进 Si 相的均匀分布，保证了 α-Al 基体的连续性；而且随着时效温度的增加，强化相析出越充分，合金的电导率越高。图 5 为铸态试样及经过不同时效温度处理后 AlSi10Mg 铝合金的电导率、硬度和抗拉强度变化。可以看出，经过 T6 热处理后的试样的电导率明显高于铸态试样的电导率，经过 160、170 和 180 ℃时效后的试样，试样的电导率虽然随时效温度升高而提高，但是其变化幅度不大，经过 190 ℃时效的试样，其电导率大幅度提高。在相同固溶处理条件下，时效温度在 160、170 和 180 ℃时，其单铸试棒的力学性能变化不大，当时效温度提高至 190 ℃时，单铸试棒的力学性能急剧下降；从实验结果发现合金经过变质处理后，当 Ti 含量为 0.03%的试样，经过固溶处理 +190 ℃时效后其电导率达到了 23.8 ms/m，但是其强度值已经接近 EN1706 标准对该材料在 ST6 状态下的最低标准值，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，已经不能通过继续提高其时效温度来提高试样电导率。

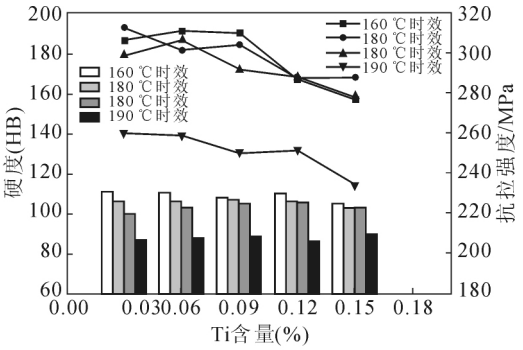
3　结论

(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，经过 Sr 变质比未经过 Sr 变质的 AlSi10Mg 合金试样，电导率高出 2~3 ms/m。



(a)电导率



(b)硬度和抗拉强度

图 5　铸态试样及经过不同时效温度处理后 AlSi10Mg 铝合金的电导率、硬度和抗拉强度

Fig.5　Electrical conductivity, hardness and tensile strength of as-cast and different aging temperatures AlSi10Mg aluminum alloy

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(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，但其力学性能下降也比较明显。

综合以上实验，采用含 Ti 含量≤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，并可实现批量生产。

参考文献：

[1] Wang M X, Wang S J, Liu Z Y, 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，2002，22(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 Materials Science, 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.

(上接第 1158 页)

[3] 王孝良，周崎，王喆. Nd 对原位自生 Mg_2Si/Al 复合材料的变质作用[J]. 热加工工艺，2013，42(8)：115-120.

[4] 陈继飞，杨军军. 稀土 La 对 Al-Si 合金的变质作用机理研究[J]. 铸造技术，2008，29(5)：658-661.

[5] Qin Q D, Zhao Y G, Liu C, et al. Strontium modification and formation of cubic primary Mg_2Si crystals in Mg_2Si/Al composite[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 454 (1-2): 142-146.

[6] 王克研，武晓峰，高欣宇，等. Gd 对 Al-5Mg-2Si-Mn 合金组织与力学性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金，2018，38(11)：1244-1247.

[7] 李贞宽，边秀房，韩娜，等. Bi 对亚共晶 Al-Si 合金组织和性能的影响[J]. 铸造技术，2007，28(11)：1486-1488.

[8] Farahany S, Ourdjini A, Idris M H, et al. Effect of bismuth on microstructure of unmodified and Sr-modified Al-7Si-0.4Mg alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21 (7): 1455-1464.

[9] Wu Xiaofeng, Wang Zhe, Zhang Guangan, et al. Effect of Bi modification treatment on microstructure, tensile properties, and fracture behavior of cast Al-Mg2Si metal matrix composite [J]. China Foundry, 2013,1(10):18-23.

[10] Papworth A, Fox P. The disruption of oxide defects within aluminium alloy castings by the addition of bismuth[J]. Materials Letter, 1998, 35(3-4): 202-206.

[11] Kiser M T, Zok F W, Wilkinson D S. Plastic flow and fracture of a particulate metal matrix composite [J]. Acta Mater, 1996, 44(9): 3465-3476.

《特种铸造及有色合金》杂志征订启事

期刊简介：《特种铸造及有色合金》杂志，是中国科学技术协会主管，中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所主办的中文核心期刊，为国内外权威数据库及检索系统收录，并荣获全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖和新中国 60 年有影响力的期刊。

主要内容：各种(黑色和有色合金)特种铸造方法，如：熔模铸造、压力铸造、半固态铸造、金属型铸造、离心铸造、连续铸造、壳型铸造、消失模铸造(实型铸造)及电磁铸造等方面的理论、工艺、设备、造型材料、测试与控制、计算机应用技术等；各种(砂型铸造及特种铸造)有色合金及复合材料的熔炼和铸造工艺、凝固理论、测试与控制、计算机应用等方面的科研成果及生产经验，并介绍上述内容的国内外发展动向和学术、技术交流活动消息等。

期刊订阅：本刊为月刊，邮发代号 38-109，20 元 / 期，全年共 12 期，邮局可订，平邮免邮费。合订本和专刊、光盘可向本刊编辑部邮购。

联系方式：

地址：武汉市江岸区江大路 26 号(430019)

电话：027-85358206/85486024/85358127(传真)

邮箱：tzzz@special-cast.com 网址：www.special-cast.com

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net