DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.10.004

锶变质时间对近共晶铝合金电力金具材料组织与性能的影响

李　捷[1],张　军[2]

(1. 国网北京市电力公司,北京 100031;2. 中国电力科学研究院有限公司,北京 100055)

摘　要:在近共晶成分 Al-Si-Mg 合金中,加入锶(Sr)作为变质剂,研究变质时间对合金组织与性能的影响。结果表明,Sr 能使共晶硅在铸态时呈团絮状,热处理后颗粒状的组织更细小。但是,随变质时间的延长,镁(Mg)、Sr 含量会逐渐烧损,导致强化效果与变质效果削减,力学性能也随之降低,当变质时间为 1 h 时,合金的综合力学性能最好,此时,其抗拉强度为 325.6 MPa,伸长率为 8.3%。

关键词:Sr 变质时间;近共晶 Al-Si 合金;电力金具材料

中图分类号:TG146.2; TG113　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)10-0913-04

Effect of Sr Modification Time on Microstructure and Properties of Near Eutectic Aluminum Alloy Electric Power Fitting Materials

LI Jie[1], ZHANG Jun[2]

(1. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100055, China)

Abstract: In the near-eutectic Al-Si-Mg alloy, Strontian (Sr) was added as a modifier. The effect of Sr modification time on the microstructure and mechanical properties of the alloys were studied. The results show that Sr can make the eutectic silicon become flocculent in the as-cast state, and the particle microstructure became finer after heat treatment. However, with the increasing modification time, the content of Magnesium (Mg) and Sr was burning lost gradually, which caused the effect of strengthening and modification decreased, so did mechanical properties. The best comprehensive mechanical properties of the alloy were observed after being modified for an hour, which the tensile strength is 325.6 MPa and the elongation is 8.3%.

Key words: modification time of Sr; near eutectic Al-Si alloy; electric power fitting materials

目前,亚共晶或近共晶铝硅合金中,共晶组织常用的细化、变质剂有 Al-Ti-B、Al-Ti-C、Al-Ti-B-RE、Al-Sr、Sr-Y 复合变质等[1-5],在 Al-Si 合金中加入 Sr,不仅改变了共晶硅的形貌进而改善了合金的强度[6,7];同时也改变了 α-Al 枝晶的生长行为,促进更多晶核形成,使合金晶粒细化,增加合金的强度和塑性,是较为理想的变质剂。然而,以本公司为例,采用低压铸造铝合金电力金具时,目前使用 200 kg 中频熔炼炉熔炼,模具采用一模两腔,一个产品的重量约为 2 kg,200 kg 炉料需要成型 50 次,每次时间大约为 6 min 左右,一炉炉料需要在保温炉中保温将近 5 h 才能生产完。因此,为保证产品质量,本文模拟生产时间,研究 Sr 变质时间对力学性能的影响,具有很重要的现实意义。

1　试样制备及试验方法

试验在 7.5 kW 坩埚电阻炉中模拟进行,首先将石墨坩埚预热到 500~600 ℃,同时也将铝锭、结晶硅、镁锭、Al-8Sr 中间合金预热到 200 ℃左右待用;将铝块加入到坩埚,升温使其熔化,当温度升至 800 ℃时,加入结晶硅,保温一定时间,待其完全熔化后,温度降至 720 ℃左右,加入用铝箔包住镁块以钟罩压入铝液深处,静置 10 min;然后加入 0.3%的 Al-8Sr 中间合金进行变质处理。熔化过程中加入覆盖剂,形成熔池后,除去表面熔渣;再加入 N_2 除气精练,静置 10 min 后,于 700 ℃左右浇入被预热 200 ℃金属模具中,随后分别保温 1、2、3、4、5 h 以

收稿日期:2020-06-29

作者简介:李　捷(1972-),河北石家庄人,硕士,高级工程师.主要从事电网发展、规划及建设研究方面的工作.
电话:010-63660002,E-mail:lijie@bj.sgcc.com.cn

通讯作者:张　军(1986-),山东龙口人,硕士,高级工程师.主要从事架空线路金具及材料研究方面的工作.
电话:18613838703,E-mail:452713225@qq.com

同样的方法与浇注温度浇铸到模具中。

试验检测其铸态与 T6 热处理态组织与性能，热处理工艺参数为：固溶温度选择 535 ℃，保温 6 h，水冷，时效温度为 160 ℃，时效时间为 6 h，然后空冷。

金相试样从各试样中部同一位置截取，用 0.5% HF 水溶液浸蚀试样，在光学显微镜观察试样的金相组织；并将试样车成 ϕ12 mm 标准拉伸试棒，采用电子万能试验机测定其力学性能。

2 结果与讨论

2.1 化学成分

表 1 是近共晶 Al-Si-Mg 合金变质 10 min 和 1、2、3、4、5 h 后，经过 XRF 测试后的结果。从表中可以看出，随着变质时间的延长，合金中的 Mg、Sr 含量逐步降低，尤其是 Sr 元素，2 h 时只剩 0.000 8%。Mg、Sr 均较为活泼，在合金中 Mg 可以在 Al 中形成固溶体起到固溶强化作用、可与 Si 形成金属件化合物 Mg_2Si 起到强化作用，Sr 作为变质剂起到细化组织作用，这两种元素的减少的结果必定导致其强化效果与变质效果的削弱，最终表现出力学性能的降低。

表1 Al–Si–Mg合金化学成分 *w*(%)
Tab.1 Chemical compositions of Al–Si–Mg alloy

变质时间	Al	Si	Mg	Sr	Fe	其余
10 min	Bal.	10.538	0.451 3	0.020 3	0.149 3	<0.01
1 h	Bal.	10.902	0.408 7	0.012 1	0.169 0	<0.01
2 h	Bal.	11.098	0.303 7	0.000 8	0.167 9	<0.01
3 h	Bal.	11.290	0.257 7	0	0.155 6	<0.01
4 h	Bal.	11.445	0.168 9	0	0.154 8	<0.01
5 h	Bal.	11.553	0.154 8	0	0.168 9	<0.01

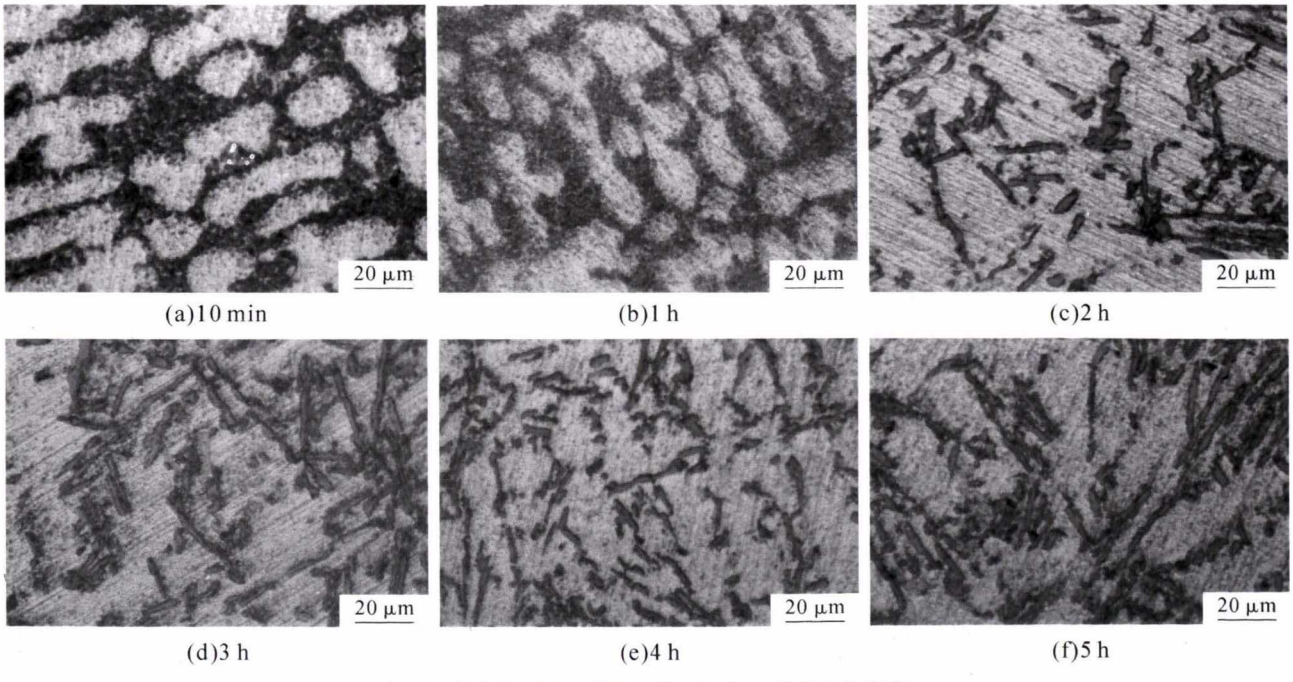
2.2 显微组织

图 1 是不同变质时间后的铸态显微组织。可以看出，变质时间为 10 min 和 1 h 时，共晶组织是呈团絮状，α-Al 规律排列，2 h 开始，共晶组织变回变质前的细针状，而且随着变质时间的延长，细针状的共晶硅也越来越大，与表 1 成分检测对照发现，0.01%~-0.02%的 Sr 对共晶组织的变质效果显著，2 h 时 Sr 的含量仅剩 0.000 8%，已基本起不到变质作用，而 3 h 开始已检测不到 Sr 的存在，也就没有变质的效果。因此，随着保温时间的延长，Sr 的变质效果逐步衰退，共晶硅尺寸也随着保温时间的延长而长大。

图 2 是不同变质时间热处理后显微组织。可以看出，铸态铝合金经过 T6 热处理后，原来的团絮装或者针状的共晶硅均变成颗粒状或者短棒状。结合图 1 可知，共晶硅铸态时呈团絮状的组织要比细针状的共晶组织热处理后组织更细。Sr 在铝合金中的变质机理方面，LU 和 Hellawell 提出的杂质诱导孪晶理论。该理论认为，变质元素吸附在硅的生长台阶上，阻碍硅以台阶生长机制长成片状，而且变质元素的原子在硅相表面的吸附改变了硅原子的堆积次序，从而在硅晶体中造成大量孪晶的产生，共晶硅相转而以孪晶凹谷机制生长[8]。

2.3 力学性能

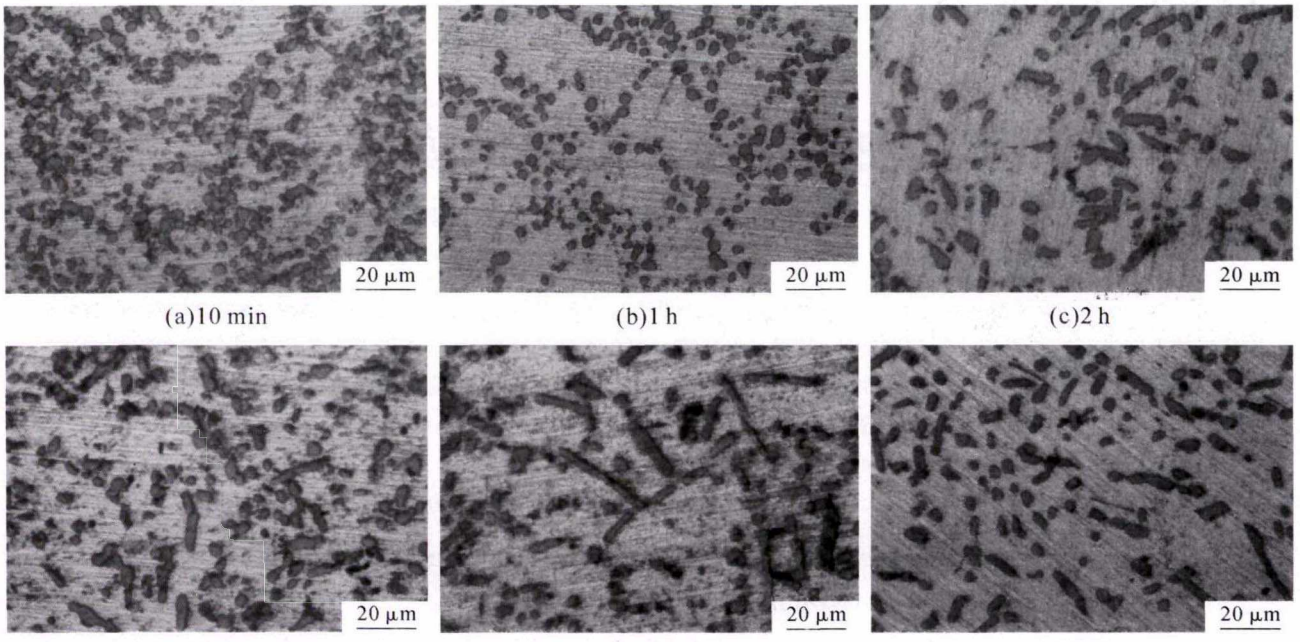
图 3 是不同变质时间近共晶 Al-Si-Mg 合金的抗拉强度值与伸长率的变化曲线。可以看出，不管是



(a)10 min　(b)1 h　(c)2 h

(d)3 h　(e)4 h　(f)5 h

图 1 不同 Sr 变质时间 Al-Si-Mg 合金铸态显微组织
Fig.1 As-cast microstructure of Ai-Si-Mg alloy with different Sr modification time



(a)10 min　(b)1 h　(c)2 h

(d)3 h　(e)4 h　(f)5 h

图 2 不同 Sr 变质时间 Al-Si-Mg 合金热处理态显微组织

Fig.2 Heat treatment microstructures of Al-Si-Mg alloy with different Sr modification time

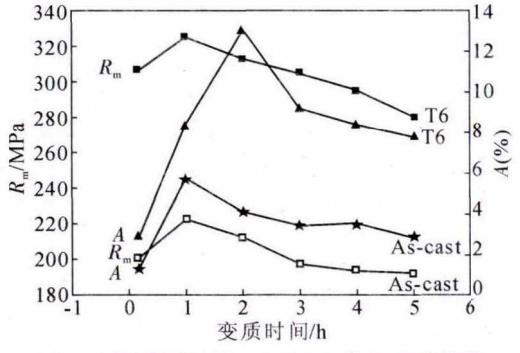


图 3 不同变质时间 Al-Si-Mg 合金力学性能

Fig.3 Mechanical properties of Al-Si-Mg alloy with different modification time

铸态还是 T6 热处理后，合金的强拉强度与伸长率都是随着 Sr 变质时间的延长，先增长后降低的趋势，当变质时间为 1 h 时，合金的抗拉强度最佳，其抗拉强度为 325.6 MPa，此时的伸长率为 8.3%，但并非最佳值，伸长率的最佳值在变质时间为 2 h 的时候出现，其最佳值能达 13%。其部分原因可解释为，变质时间在 1 h 到 2 h 这个阶段内，由前面的显微组织可以发现，其变质的效果在降低，理应伸长率也会随着降低，但是，由化学成分的变化也可以发现，此时的 Mg 含量也由 0.408 7%降低至 0.3037%，而 Mg 起到强化的同时会降低伸长率，反之 Mg 的降低可以提高伸长率。因此，此阶段 Mg 含量降低导致的伸长率提高的效果要比变质效果降低导致的伸长率下降的程度大。

此外，热处理对合金的性能提升非常的显著。经过 T6 热处理后，硅相变为球状，或者短棒状，减小了对基体的割裂作用，其力学性能得到极大提高。

综上，建议相关企业采用 Sr 变质时，要控制好其变质时间，根据产品需要达到的力学性能，选择需要完成的时间，以免后期出现不合格产品。以本合金为例，3 h 内生产的产品其力学性能均能达到 300 MPa 以上，伸长率 7%以上，符合大部分的铝合金电力金具的使用性能要求。

3　结论

(1)随着变质时间的延长，合金中的 Mg、Sr 两种元素的含量会逐步降低，强化效果与变质效果降低。

(2)变质时间对合金的铸态与热处理态的显微组织均有较大的影响，其本质原因为 Sr 含量对组织的影响，铸态时 Sr 的存在能使共晶硅呈团絮状，热处理后其组织也更加细小。

(3)随着变质时间的延长，合金的力学性能先增加后降低，当变质时间为 1 h 时，综合性能最好，此时抗拉强度最大，达到 325.6 MPa，伸长率为 8.3%。

参考文献：

[1] Zhang Z, Xia X C, Wang J, et al. The Microstructure and Compressive Properties of Aluminum Alloy (A356) Foams with Different Al-Ti-B Additions[J]. Materials Science, 2016, 22(3): 338-342.

[2] Zhao H L, Yue J S, Gao Y, et al. Grain and dendrite refinement of A356 alloy with Al-Ti-C-RE master alloy [J]. 稀有金属：英文版, 2013(1):12-17.

(下转第 929 页)

表2 数据分析表
Tab.2 Data analysis table

定位方式	参照组	实验组
d1	0.113 8	0.067 9
d2	0.132 4	-0.028 5
d3	0.122 8	-0.115 5
d4	0.134 7	-0.038 8
d5	0.107 1	0.093 5
d6	0.198 4	-0.058 7
d7	0.100 8	-0.096 8
d8	0.035 2	0.014 4
D	0.099 4	0.053 2

0.099 4 提高至 0.053 2 mm，且该方案检具制作周期短，满足个性化快速定制的需求，为后续复杂铸型高精度定位提出了一种新的实现方案。

参考文献：

[1] 尚俊玲，陈伟平，李元元. 中国铸造行业发展战略分析[J]. 铸造技术，2007，28(10):1386-1389.

[2] 柳百成. 铸造技术与计算机模拟发展分析 [J]. 铸造技术，2005，26(7)：611-617.

[3] 刘丰，单忠德. 大型薄壁壳体件无模铸造技术研究 [J]. 铸造技术，2013，34(10)：1324-1326.

[4] 刘丽敏，单忠德. 轻型数控成形机主体结构有限元分析与优化 [J]. 铸造，2012，69(9)：1038-1042.

[5] Li Xinya, Shan Zhongde, Liu Feng, et al. Rapid Patternless Casting Technology on CNC Manufacturing[C]//Proceedings of69th World Foundry Congress, 2010, 10, 16-20.

[6] 刘丽敏，单忠德. 基于无模铸造精密成形技术砂型坎合组装方式研究[J]. 铸造技术，2017，38(2)：354-359.

[7] 单忠德. 中国的无模铸造[J]. 铸造技术，2011，32(5)：760-762.

[8] 单忠德. 基于快速原型的金属模具制造工艺研究[D]. 北京：清华大学，2002.

[9] 程精涛. 几种快速成形方法在铸造中的应用 [J]. 铸造技术，2015，32(5)：242-244.

（上接第 915 页）

[3] 周斌，龚家林，黄宜俊. Al-10Sr 中间合金形态对 AlSi7Mg 合金变质组织的影响[J]. 铸造技术，2019，40(1): 43-44，48.

[4] 于小健，吉卫喜，钱陈豪，等. Sr-Y 复合变质对 Al-7Si 合金组织和性能的影响[J]. 材料科学与工艺，2020. [2020-05-25 on line].

[5] 贾锦玉，陈志强，胡文鑫，等. La 和 Y 对细化后 A356 铝合金显微组织的影响[J].稀土，2020，41(2): 41-46.

[6] Shabestari S G, Miresmaeili S M, Boutorabi S M A. Effects of Sr-modification and melt cleanliness on melt hydrogen absorption of 319 aluminium alloy [J]. Journal of Materials Science, 2003, 38 (9): 1901-1907.

[7] Liu L, Samuel A M, Samuel F H, et al. Influence of oxides on porosity formation in Sr-treated Al-Si casting alloys [J]. Journal of Materials Science, 2003, 38(6): 1255-1267.

[8] Lu S Z, Hellawell A. Growth mechanisms of silicon in Al-Si alloys [J]. Journal of Crystal Growth, 1985, 73(2): 316-328.

（上接第 924 页）

参考文献：

[1] Kosuge K, Sunaga M, Goda R, et al. Cure and Collapse Mechanism of Inorganic Mold Using Spherical Artificial Sand and Water Glass Binder [J]. MATERIALS TRANSACTIONS, 2018, 59(11): 1784-1790 .

[2] SONG, DU, ZHANG, et al. Parametric optimization of modifiers for ester-hardened sodium silicate bonded sand [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2020, 35(5): 531-536

[3] Ismail A A M, Kannadasan K, Pichaimani P, et al. Synthesis and characterisation of sodium silicate from spent foundry sand: Effective route for waste utilisation [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 264: 121689.

[4] 张普庆，孙清洲，赵中魁，等. 含水玻璃芯砂粘土旧砂再生技术研究 [J]. 铸造技术，2010，31(8): 1051-1053.

[5] 王瑾，杨靖昊，赵亮. 基于绿色铸造水玻璃砂再生回用技术研究 [J]. 铸造技术，2018，39(3): 533-536，542.

[6] 吴星，欧全梅，陈勇棠. 磷酸盐改性水玻璃旧砂加热-机械法再生 [J]. 铸造技术，2016，37(5): 1076-1078.

[7] 卢记军，汪华方，周昌瑞. 水玻璃旧砂湿法再生研究进展[C]//2018 中国铸造活动周论文集. 中国机械工程学会、铸造行业生产力促进中心：中国机械工程学会铸造分会，2018:331-335.

[8] 车广东，刘向东. 水玻璃加入量对 VRH-CO2 法硬化水玻璃砂的影响 [J]. 铸造技术，2014，35(02): 334-336.

[9] Wang L C, Jiang W M, Gong X L, et al. Recycling water glass from wet reclamation sewage of waste sodium silicate-bonded sand [J]. China Foundry, 2019, 16(3): 198-203.