DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.06.004

Sr 变质对 ZL105 合金组织和力学性能的影响

孙文扬
(中国航发西安航空发动机有限公司,陕西 西安 710021)

摘　要:采用 Al-Sr 中间合金对 ZL105 进行变质处理,通过断口分析、拉伸性能测试、金相分析等方法研究了变质对 ZL105 合金力学性能及显微组织的影响。结果表明:变质处理后 ZL105 合金断口组织硅的亮点明显消失,抗拉强度和硬度有所提高,伸长率明显提高,金相组织中共晶硅棱角钝化,由针状、片状趋向于短棒状、颗粒状, Sr 加入量为 0.04%时变质效果最好。

关键词:ZL105 合金;Sr 变质;共晶硅

中图分类号: TG146.2; TG113　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)06-0456-04

Effect of Sr Modification Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of ZL105 Alloy

SUN Wenyang
(AECC Xi'an Aero Engine Ltd., Xi'an 710021, China)

Abstract: ZL105 was modified by Al-Sr master alloy. The effect of modification on the mechanical properties and microstructure of ZL105 alloy was studied by means of fracture analysis, tensile test and metallographic analysis. The results show that after modification, the bright spot of the silicon in the fracture structure of ZL105 alloy disappears obviously, the tensile strength and hardness are improved, and the elongation is improved obviously. The eutectic silicon edges and corners of the metallographic structure passivate from needle and sheet to short rod and granular, and the modification effect is the best when the amount of SR is 0.04%.

Key words: ZL105 Alloy; Sr modification; eutectic silicon

Al-Si 系铸造铝合金具有优良的铸造性能,流动性好,气密性好,收缩小和热裂倾向小,经过变质和热处理后,具有良好的力学性能、物理性能、抗蚀性能和工艺性能,是铸造铝合金中品种最多,用途最广的一类合金[1]。其中 ZL104、ZL105 等 Al-Si 系铸造铝合金常使用在航天、航空产品中。ZL105 属于亚共晶 Al-Si 系铸造铝合金,Si 含量为 4.5%～5.5%,在熔炼工艺上传统认为:一般对硅含量大于 6%的 Al-Si 系铸造铝合金都进行变质处理[2],所以,ZL105 合金不需要进行变质处理。而在实际生产中,有生产单位对 ZL105 合金进行变质处理。在铝合金变质方面,变质剂种类繁多,变质效果也各有特点,相比起其他的变质剂,Sr 变质剂对 Si 相的细化作用更加明显,可以改变共晶硅的生长方式以及改变 Si 的形态,并且使用简单,经过变质处理的合金重熔之后变质效果仍然存在,这使得 Sr 变质在铝合金变质处理领域有着不可替代的地位。所以 Sr 逐渐取代早期开始流行的钠以及钠盐,成为新的变质剂[3]。Sr 在进行变质处理时多以 Al-Sr 中间合金形式加入。本文作者通过试验,研究了使用 Al-Sr 变质处理对砂型铸造 ZL105 合金试样宏观断口组织、室温力学性能以及金相组织的影响。

1　试验方法

1.1　试验材料

采用中频炉先将纯金属熔合成 Al-Si、Al-Cu、Al-Sr 二元中间合金,然后使用 Al-Si、Al-Cu 二元中间合金及纯金属 Mg 按比例配制熔炼成 ZL105 母合金,其成分如表 1。Al-Sr 二元中间合金用于变质处理。

表1 试验用铝合金成分 w(%)
Tab.1 Composition of aluminum alloy for test

成分	Si	Mg	Cu	Fe	Zn	Mn	Al
含量	5.20	0.50	1.24	0.60	0.30	0.50	余量

1.2　熔炼工艺

采用井式电阻炉将母合金重熔成工作合金,待合金液完全熔化,温度调至 710～730 ℃,分别加入

收稿日期:2021-05-09

作者简介:孙文扬(1983—),陕西扶风人,工学学士,工程师.主要从事航空发动机铸造技术方面的工作.
电话:029-86153417,Email:258332962@qq.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

质量分数为 0.02%、0.04%、0.06%的 Sr 进行搅拌,搅拌均匀后使用氮气精炼 15～25 min,氮气精炼前在合金液表面撒上占炉料 0.3%～1.0%的除渣剂,精炼完成后静置 5～8 min 进行打渣,最后使用铝熔体测气仪进行含气量检测,若不合格需进行重新精炼除气,重新进行含气量的检测,合格后调整合金液温度以备浇注。

1.3　试样制备

精炼完成后,静置半小时后开始浇注,浇注温度控制在(720±10)℃,采用砂型铸造,分别使用未加 Sr、加入 Sr 含量分别为 0.02%、0.04%、0.06%的 ZL105 合金浇注力学性能标准试样,根据 HB962 要求,力学性能试样工作部位尺寸为 ϕ12 mm×72 mm,试样尺寸如图 1。浇注的试样经过切割、吹砂等辅助工序后进行 T7(固溶处理+稳定化处理)处理,其具体热处理参数如图 2。

1.4　试验方法

使用型号 WAW-E500C 微机控制电液伺服万能试验机对经过热处理后力学性能试样进行室温抗拉强度和延伸率测试;对拉伸试验后试样断口进行宏观形貌观察;在图 1 试样大端上截取 ϕ18 mm×10 mm 的试样,经研磨后使用金刚石研磨膏进行机械抛光,随后用 0.5%的 HF 溶液腐蚀 5 s,用 OlympusH2-UMA 型金相显微镜观察试样的显微组织,并用仪器自带的金相采集系统采集清晰的显微图片。

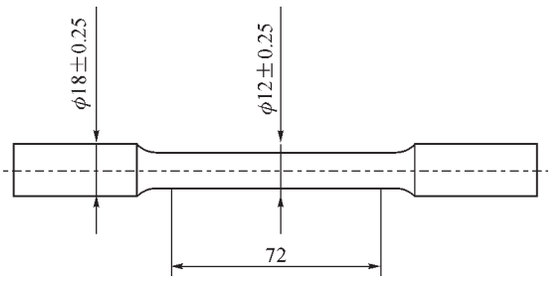


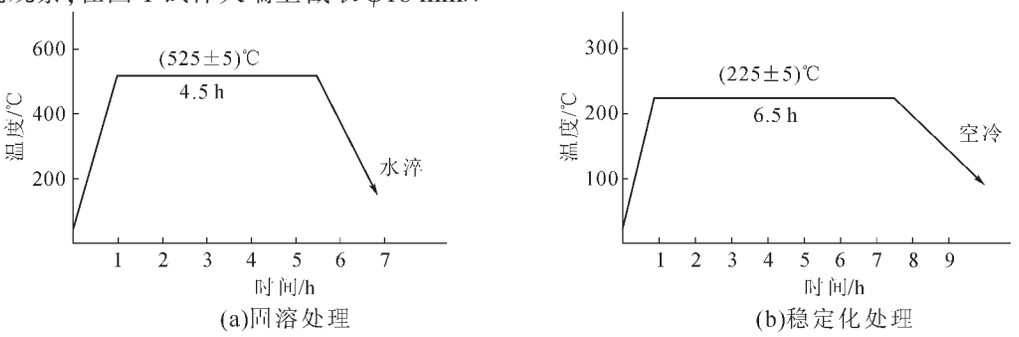
图 1　拉伸试样尺寸

Fig.1　Dimension of tensile sample

2　试验结果与分析

2.1　变质处理对断口形貌的影响

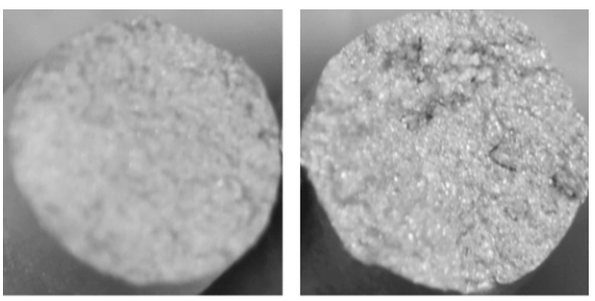
图 3(a)为经过加入 0.04%的 Sr 变质处理后的拉伸断口形貌,图 3(b)为未经过变质处理后的拉伸断口形貌。在宏观断口形貌中可发现,未经变质处理的 ZL105 断口粗大并存在许多硅亮点,而经过加入 0.04%的 Sr 变质处理后则成银灰色的均匀细粒状,这是因为,未经过变质处理的试样,共晶硅比较粗大,在宏观观察时,显示金属光泽,而经过变质处理试样,共晶硅比较细小,均匀分布在铝基体周围,金属光泽显示不明显。



(a)固溶处理　　(b)稳定化处理

图 2　热处理工艺参数

Fig.2　Heat treatment process parameters



(a)0.04%Sr　　(b)0.00%Sr

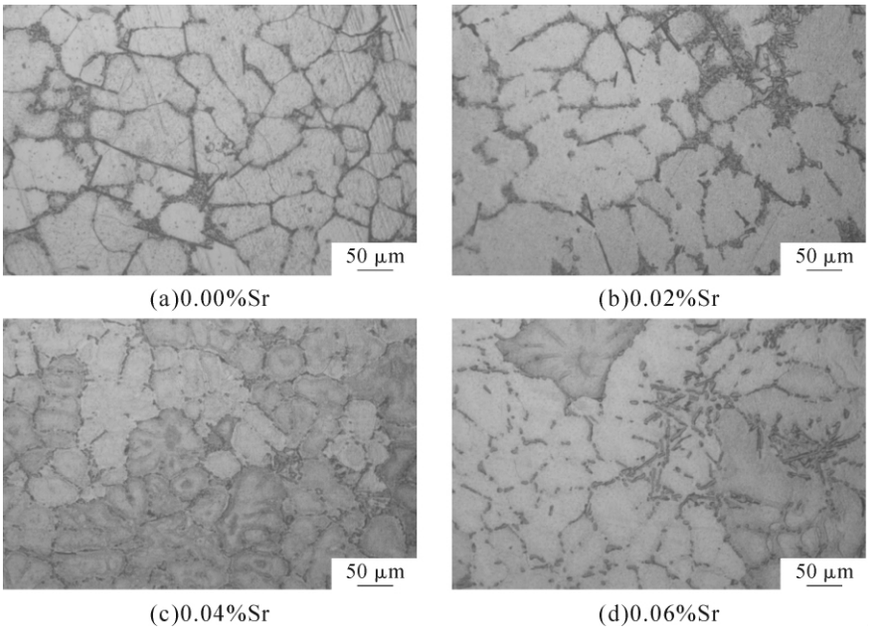
图 3　ZL105 合金断口对比

Fig.3　Fracture comparison of ZL105 alloy

2.2　变质处理对组织的影响

图 4(a)为未使用 Sr 变质处理浇注 ZL105 合金的显微组织,组织中在铝基体上,杂乱分布着许多针状、片状的共晶 Si 相,图 4(b)为加入 0.02%的 Sr 变质处理的 ZL105 合金的显微组织,组织中相对图 4(a)针状共晶硅稍微减少和变短,这是由于 Sr 变质的作用,但是由于 Sr 的加入量过小,变质处理不充分,所以仍然存在部分针状、片状共晶硅,而且初生相 α-AL 晶粒大小变化不大。图 4(c)为加入 0.04%的 Sr 变质处理后 ZL105 合金的显微组织,初生相 α-AL 晶粒较未变质处理有所细小,且组织中原本针状、片状的共晶硅在经过 Sr 变质之后,变成颗粒状、短棒状,均匀的分布在 α-AL 晶粒的周围,几乎已经看不到针状、片状的共晶硅相。图 4(d)为加入 0.06%的 Sr 变质处理后 ZL105 合金的显微组织,可以发现,共晶 Si 相仍然为比较细小的颗粒状,包裹在

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)0.00%Sr (b)0.02%Sr (c)0.04%Sr (d)0.06%Sr

图 4 添加不同含量 Sr 的 ZL105 合金的金相组织
Fig.4 Microstructure of ZL105 alloy with different Sr content

α-AL 的周围，但是分布的均匀性方面不如添加 Sr 为 0.04%的试样。可以初步认为，0.06%的 Sr 添加量变质效果比起 0.04%的 Sr 添加量变质效果开始下降，但是下降的不太明显，材料的变质效果仍然较好。

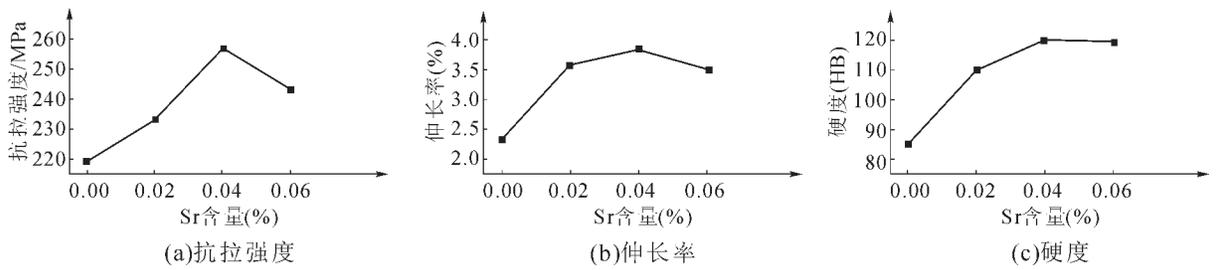
分析原因如下：Sr 的变质使共晶硅细化，是对共晶铝、硅两相共同作用的结果。Sr 是典型的吸附类变质元素[4]，在 Al-Si 共晶生长过程中，Sr 吸附在共晶硅的生长界面上，“毒化”了部分共晶硅慢生长面{111}上的内生台阶及由于界面台阶化效应而产生的台阶，阻碍了共晶硅形核与生长，同时又促进了共晶铝相的形核与生长[5]。

Hellawell[6]研究发现了一种关于共晶硅相变质的理论，即向合金中加入变质剂时候，变质剂会吸附在固液结晶前沿，阻止了硅原子的富集，并且在同一时间会在吸附的界面上面产生孪晶，达到改变 Si 相生长长大的方式来细化组织。Sr 变质处理 ZL105 便基于这种机理，金属锶靠吸附在共晶硅的生长台阶上阻碍其长成片状、针状而生长成颗粒状、短棒状来达到细化共晶组织的效果[7]。因此 Sr 对所有 Al-Si 系的亚共晶合金、共晶合金、过共晶合金均有着良好的变质作用。

2.3 变质处理对力学性能的影响

由图 5 可知，Sr 的加入量为 0、0.02%、0.04%、0.06%时，抗拉强度分别为：209、234、259、243 MPa，伸长率分别为：2.2%、3.5%、4.0%、3.4%，硬度分别为：85、110、120、119 HB，可以看出：在加入了 Sr 变质之后，ZL105 的抗拉强度、伸长率、硬度都呈现出先增大后减小的变化趋势，在 Sr 添加量为 0.04%的时候达到最高值，相对于未变质的基体来说，分别提升了 24%、81%、41%。可以看出，Sr 变质对 ZL105 合金伸长率影响较抗拉强度和硬度更大一些。而在 Sr 添加量为 0.06%时，抗拉强度、伸长率、布氏硬度较 Sr 添加量为 0.04%均有下降趋势。

分析其原因如下：因为材料的拉伸性能与材料的微观组织有很大关系，未变质的 ZL105 合金中共晶硅相呈针状、片状，这些共晶硅相的存在使得合金在受到应力的作用时，撕裂基体，使得合金的力学性能变差，并且在针状、片状共晶硅相处容易产生应力集中，成为微裂纹的裂纹源，在应力进一步加大时，



(a)抗拉强度 (b)伸长率 (c)硬度

图 5 Sr 加入量对 ZL105 力学性能影响
Fig.5 Effect of Sr content on mechanical properties of ZL105

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

使基体发生断裂明显存在，降低试样在拉伸试验中的表现。经过 Sr 变质处理之后,共晶硅都得到了一定程度的细化,从针状、片状转变为短棒状、颗粒状。适当延长静置时间，可以使共晶硅组织得到进一步均匀、细化,对强度的提高有一定影响作用。所以经过变质之后的合金拉伸性能会比未变质的合金好。当 Sr 的添加量继续增加的时候，会产生过变质现象,组织中产生硅化锶、硅铝化锶等化合物[8]的可能性也随之升高，锶化物的团聚会导致变质效果的降低,使得合金的力学性能的下降。所以在 Sr 添加量为 0.06%时较添加量为 0.04%的 ZL105 合金抗拉强度、伸长率、硬度均有所下降。

3　结论

(1)经过 Sr 变质处理后 ZL105 断口形貌较未进行变质处理断口形貌中硅亮点明显消失，呈银灰色细粒状。

(2)Sr 变质处理后 ZL105 金相组织中初生相 α-AL 晶粒较未变质处理有所细小，共晶硅由片状、针状转为短棒状、颗粒状。

(3)Sr 添加量为 0.04%时变质处理后 ZL105 力学性能达到最高值，相比未进行变质处理 ZL105 的合金抗拉强度、伸长率、硬度分别提升了 24%、81%、41%。

(4)Sr 变质处理 ZL105 合金时，加入量为 0.04%时,变质效果最好。

参考文献:

[1] 中国机械工程学会铸造专业学会. 铸造手册(第 3 卷)[M]. 北京. 机械工业出版社,1993.

[2] 郑来苏. 铸造合金及其熔炼 [M]. 西安. 西北工业大学出版社. 1994.

[3] 刘三星,谢青云. 铝—锶长效变质剂的试验[J]. 特种铸造及有色合金,1993(6):40-40.

[4] 王海东,杨必成,田战峰,等. Sr 变质对 A1Si6Mg2 半固态铝合金组织和性能的影响[J]. 热加工工艺,2006,35(1): 7-10.

[5] 胥锴,刘徽平,王甫,等. Sr 变质对 ZL101 合金中共晶 Si 形貌的影响[J]. 铸造技术,2009(5):646-649.

[6] LU S Z, HELLAWELL A. The mechanism of silicon modification in ALuminum-silicon ALloys:Impurity induced twinning [J]. MetALlurgicAL & MateriALs Transactions A, 1987,18 (10): 1721-1733.

[7] 王宇星,黄正军. 铸造 ALSi7Cu2Mg 合金的变质处理研究[J]. 热加工工艺,2010(7):72-73.

[8] 董光明，孙国雄，廖恒成. 锶在铸造铝硅合金中的变质行为[J]. 特种铸造及有色合金,2005(3):146-149.

2021 年《铸造技术》杂志征订启事

《铸造技术》杂志,中文核心期刊,月刊,1979 年创刊,中国铸造协会会刊,被 20 余家数据库收录。中国标准连续出版物号:ISSN1000-8365/CN 61-1134/TG,国内外公开发行,国内邮发代号:52-64,国外发行号:M855。

报道范围:报道国内外铸造领域的先进科技成果、实用工艺技术、生产管理经验以及铸造行业发展动态。内容涵盖铸造成型工艺和铸造材料研究,并兼顾其他金属材料成型方法。

主要栏目:试验研究、工艺技术、生产技术、装备技术、特种铸造、实用成型技术、材料改性、应力控制与理化测试技术、今日铸造、企业精英人物专访等。

发行对象:国内外铸造企业,科研院所,高等学校,铸造原辅材料厂商,设备、仪器厂商,铸件采购商等。

广告范围:刊登铸造设备、熔炼设备、环保设备、铸造原辅材料、检测仪器以及铸件生产、热处理设备、科研成果转让等相关信息。

订阅方式及价格:请从当地邮局订阅,也可以直接从铸造技术杂志社订阅。全年 12 期,每期定价 25 元,平寄全年 300 元(含邮费),挂号全年 336 元,快递全年 420 元。

欢迎订阅、欢迎投稿、欢迎刊登广告

邮购地址:陕西省西安市金花南路 5 号 西安理工大学 608 信箱

联系人:李巧凤　029-83222071　**电话/传真:**13991824906　**网址:**www.zhuzaojishu.net　**E-mail:**zzjs@263.net.cn

银行汇款:户　名:陕西铸造技术杂志社有限责任公司
账　号:3700 0235 0920 0091 309
开户行:中国工商银行西安市互助路支行

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net