

Al-10Si-2Fe 中间合金对 Al-10Si-2Cu 合金共晶团细化及热裂敏感性的影响

于文慧, 石磊, 张勇, 郑洪亮, 林晓航, 田学雷

(山东大学材料科学与工程学院材料液固结构演变与加工教育部重点实验室, 山东济南 250061)

摘要: 通过测量Al-10Si-2Cu合金共晶团尺寸、冷却曲线、热裂敏感性等, 研究了Al-10Si-2Fe中间合金对经Sr变质的Al-10Si-2Cu合金共晶团尺寸的影响, 以及共晶团尺寸对热裂敏感性的影响。结果表明, 在Sr变质的Al-10Si-2Cu合金熔体中添加Al-10Si-2Fe中间合金处理后, 其共晶团尺寸明显减小, 抗拉强度和伸长率都得到提高, 热裂敏感性显著降低。

关键词: 铝硅铜合金; 共晶团; 细化; 热裂敏感性

ADC12合金是一种Al-Si-Cu系合金^[1], 具有良好的力学性能, 在汽车缸体、缸盖、连杆等零件中应用广泛。其服役性能主要受共晶硅的粗大板片状和细长针状等形貌的限制。工业上通常采用添加Sr^[2]、Y^[3]等变质剂的方法将其转变为珊瑚状。这些变质元素虽然优化了共晶硅的形貌, 但也引起共晶团粗大^[4-5], 这是变质过程中不可避免的问题。Cu可以增加铝合金强度, 同时也会引起合金液相区范围增加, 热裂倾向增大^[6-7]。因此细化合金共晶团, 降低其热裂倾向对提高其服役性能具有重要意义。

近年来, 新型Al-10Si-2Fe中间合金细化(Al+Si)共晶团的作用被报道后, 在不降低Sr变质效果的前提下细化(Al+Si)共晶团尺寸成为可能^[8]。通常, 细化晶粒不仅可以提高金属材料的综合力学性能, 还可以降低合金的热裂倾向, 在AZ91D^[9]、Al-Cu^[10]、Al-Si^[11]等合金中都发现了此规律, 但是共晶团细化对热裂倾向的影响却少有报道。高硅亚共晶Al-Si合金中共晶团所占比例高, 观察较容易^[12], 因此本研究以Al-10Si-2Cu合金为对象, 研究Al-10Si-2Fe中间合金对Sr变质后Al-10Si-2Cu合金共晶团尺寸及热裂倾向的影响。

1 试验方法

采用工业纯铝(>99.7%, 质量分数, 以下同)、结晶硅3303(>99.3%)和T2紫铜(>99.9%)在中频感应炉中熔配Al-10Si-2Cu合金, 之后转移到电阻炉中在740℃保温备用。试验时, 采用Sr变质、Sr变质+Al-10Si-2Fe中间合金细化两种方法处理保温熔体, 并浇注试样进行对比。首先以Al-10Sr中间合金的形式向保温熔体中加入 300×10^{-6} 的Sr, 保温30 min后浇注至石墨模具(内径27 mm, 高度75 mm, 壁厚为8 mm)并测量铸锭中心位置的冷却曲线。随后, 在Sr变质处理后再加入1%的Al-10Si-2Fe中间合金对保温熔体进行细化处理, 保温15 min浇注到石墨模具并测量温度曲线。从铸锭底部10 mm处切取试样, 将打磨、抛光后的样品使用1%的NaOH溶液腐蚀5 min以观察其共晶团。

采用GB/T 1173—1995规定标准模具浇注标准抗拉试棒, 试棒形状尺寸如图1所示。试验在WDW-100D万能试验机上进行, 测试抗拉强度和伸长率。对合金的热裂敏感性测量采用浇注热裂约束试棒方法(热裂约束试棒模具尺寸如图2所示, 浇注前在模具内腔均匀涂ZnO涂层烘干, 并将模具预热至

作者简介:

于文慧(1989-), 女, 博士生, 主要研究方向为铝合金晶粒细化。E-mail: jane_0610@126.com

通讯作者:

田学雷, 男, 教授, 博士生导师。电话: 0531-88392319, E-mail: tianxuelei@sdu.edu

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)09-0988-04

基金项目:

国家自然科学基金面上项目(51371109)。

收稿日期:

2018-12-21 收到初稿,
2019-03-12 收到修订稿。

200 ℃)。两组试验都采用上述两种处理方式对保温熔体进行处理后再进行浇注,但Sr变质前对熔体进行除渣除气处理。每组试验重复3次。

热裂倾向的大小采用热裂敏感性(HTS)进行比较, HTS 的计算方法见式(1)^[13]:

$$HTS = \sum (f_{\text{length}} \cdot f_{\text{location}} \cdot f_{\text{crack}}) \quad (1)$$

式中: f_{length} 为棒长影响因子,棒越长,越易受阻出现裂纹。从上到下,每根试棒对应的 f_{length} 数值分别为32、16、8、4; f_{location} 为位置影响因子,裂纹出现在接近直浇道一端对应的 f_{location} 数值为1,出现在接近末尾球形腔一端 f_{location} 数值是2,出现在热裂棒中间 f_{location} 数值是3; f_{crack} 为裂纹尺寸影响因子,按照裂纹尺寸分为无裂纹($f_{\text{crack}}=0$)、半发纹($f_{\text{crack}}=1$)、发纹($f_{\text{crack}}=2$)、严重裂纹($f_{\text{crack}}=3$)和完全断裂($f_{\text{crack}}=4$)。

2 试验结果

2.1 组织分析

图3为只经过Sr变质和在此基础上使用Al-10Si-2Fe中间合金处理的Al-10Si-2Cu合金的冷却曲线。只经过Sr变质的合金其共晶再辉前最低点温度为562.6 ℃,而Al-10Si-2Fe中间合金处理后,这个特征温度提高0.9 ℃。这说明共晶相形核受到Al-10Si-2Fe中间合金的影响。由于Al-10Si-2Fe中间合金能够促进硅相形核^[14],硅作为共晶组织中的领先相,因此共晶组织形核温度提高。

图4为上述两个试样的共晶团分布,其中箭头指向的圆形区域为共晶团中心。Al-10Si-2Fe中间合金处理后共晶团尺寸明显降低,统计后发现共晶团尺寸从5 100 μm降至1 000 μm。

2.2 热裂敏感性

图5和图6分别为仅经过Sr变质和经过Sr变质+Al-10Si-2Fe中间合金细化处理后的Al-10Si-2Cu合金的热裂约束试棒,其中裂纹尺寸影响因子 f_{crack} 标注在图中。根据 HTS 计算公式,两组试样对应的 HTS 值分别为:

$$HTS_{\text{Sr}} = 32 \times 1 \times 1 + 16 \times 1 \times 2 + 8 \times 1 \times 3 + 4 \times 1 \times 4 = 104$$

$$HTS_{\text{Sr+Al-10Si-2Fe}} = 32 \times 1 \times 0 + 16 \times 1 \times 1 + 8 \times 1 \times 3 + 4 \times 1 \times 3 = 52$$

如此计算3组热裂约束试棒对应的 HTS 平均值,仅经过Sr变质的Al-10Si-2Cu合金 HTS 为120(±21.17),经过Sr变质+Al-10Si-2Fe中间合金细化处理后的Al-10Si-2Cu合金的 HTS 为74.7(±24.11)。发现Al-10Si-2Fe中间合金处理后,合金的 HTS 降低37.8%。

2.3 力学性能

表1是铸态Al-10Si-2Cu合金孕育前后的抗拉强度和伸长率。孕育后,合金的抗拉强度和伸长率均有所提高,其中抗拉强度提高约4.7%,伸长率提高约38.2%。

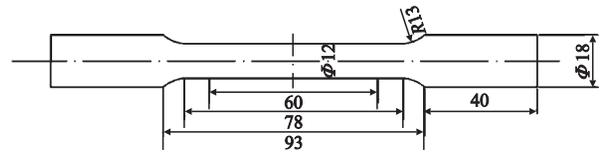
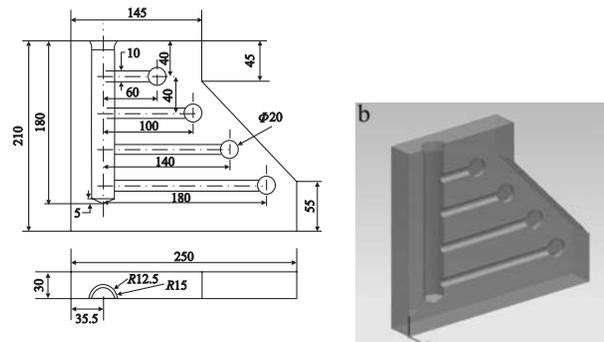


图1 拉伸试样尺寸

Fig. 1 Size of tensile sample



(a) 尺寸

(b) 3D模型

图2 热裂约束棒模具

Fig. 2 Hot tearing constrained rod casting mold

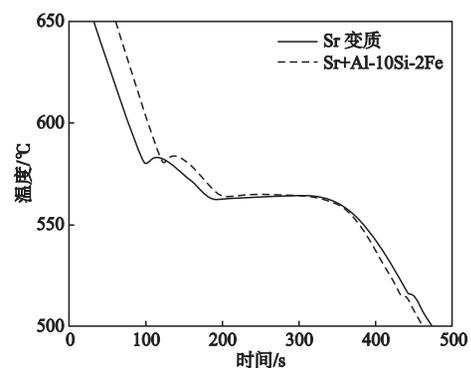
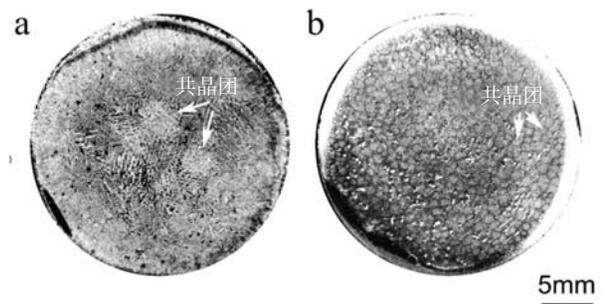


图3 Al-10Si-2Cu合金冷却曲线

Fig. 3 Cooling curves of Al-10Si-2Cu alloys



(a) Sr变质

(b) Sr+Al-10Si-2Fe合金处理

图4 腐蚀处理后Al-10Si-2Cu试样中共晶团的宏观组织

Fig. 4 Macrographs of eutectic cells in the etched

Al-10Si-2Cu samples

这是由于孕育后共晶团细化使得晶界增加。需要指出,通过Al-10Si-2Fe合金引入的Fe元素含量非常低(约0.02%),因此对于合金性能不会产生明显影响。

3 分析讨论

较高的Cu含量是导致合金热裂敏感性升高的主要原因,但是通过细化Al-10Si-2Cu合金的(Al+Si)共晶团尺寸,仍然能够显著降低其热裂敏感性,说明共晶团尺寸对热裂敏感性具有重要影响。未变质时,初生铝与共晶铝之间的晶粒取向关系是相同的,共晶团在初生铝上形核^[8]。Sr变质后,初生铝和共晶铝的晶粒取向关系不同,共晶团不依附于初生铝形核,而是在熔体中形成球状共晶团。加入Al-10Si-2Fe后,共晶团的形核方式不变,只是Si作为领先相其形核能力增加,因此共晶团尺寸更小。据此绘制图7模型示意图解释共晶团尺寸减小对热裂机制的影响。

Al-10Si-2Cu合金凝固顺序为: $L \rightarrow L + \alpha - Al \rightarrow L + \alpha - Al + (Al + Si)_{\text{eutectic}} \rightarrow L + \alpha - Al + (Al + Si)_{\text{eutectic}} + (Al + Si + Al_2Cu)_{\text{eutectic}}$ 。可见,(Al+Si)共晶团形成较早,其形成的半固态骨架液态补缩能力在热裂敏感性研究中起重要作用。Sr变质可改善共晶硅形貌^[15],由于Al-10Si-2Fe合金不损害Sr的变质效果^[14],晶粒尺寸减小可增加合金流动性^[16],故共晶团尺寸减小,在相同固相率下合金液流动性增加。补缩能力增加,液固两相区被拉伸或晶间开裂之后液相或液固混合液填充能力增加,使应力建立对应的温度更低,应力也会相应减小,致使热裂敏感性降低。低熔点共晶及偏析会增加合金的热裂倾向^[17]。随着(Al+Si)共晶团细化,(Al+Si+Al₂Cu)三元共晶分布更均匀,因此有利于降低热裂敏感性。

从图7还可以看出,单位体积内晶粒表面积增加,因此单位面积上液膜厚度降低。断裂应力由式(2)表示^[18]:

$$\sigma_{fr} = 2\gamma/b \quad (2)$$

式中: σ_{fr} 为断裂应力; γ 为液膜的表面张力; b 为膜的厚度。可见,液膜厚度越小,断裂应力越大,因此热裂敏感性将降低。

液膜理论不能完全解释热裂的机制,通常根据液膜理论计算出的断裂应力要低于实际断裂应力^[19]。晶间搭接理论可以更好地解释热裂形成的机理,即在凝固后期有大量的晶间搭接存在,可以将枝晶间结合力大大提高,并可能提高到晶内水平^[20]。而此时如果凝固收缩应力作用在枝晶上,并不会使枝晶发生分离,破坏晶间搭接而形成裂纹,只会导致晶粒的变形。共晶团细化,晶粒数量增加,晶间搭接数量增加。当产生拉应力时,晶粒之间协同滑移变形,释放应力,因此热裂敏感性降低。

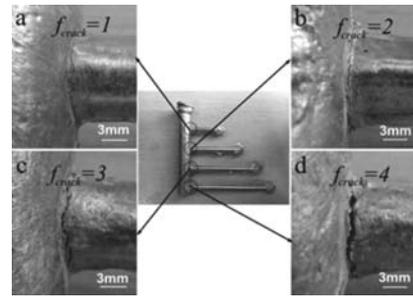


图5 仅Sr变质的Al-10Si-2Cu合金试棒浇口处热裂纹
Fig. 5 Tears near the sprue ends of Al-10Si-2Cu alloys after Sr modified

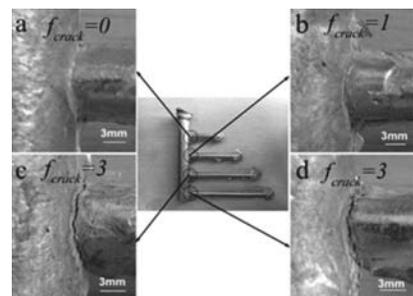


图6 Sr变质+细化的Al-10Si-2Cu合金试棒浇口处热裂纹
Fig. 6 Tears near the sprue ends of Al-10Si-2Cu alloy samples treated by Sr + Al-10Si-2Fe alloy

表1 铸态Al-10Si-2Cu合金孕育前后抗拉强度和伸长率
Table 1 Ultimate tensile strength and elongation of as-cast Al-10Si-2Cu alloys without and with inoculation

处理方式	抗拉强度/MPa	伸长率/%
仅Sr变质	246.7 (± 11.6)	5.5 (± 0.6)
Sr变质+Al-10Si-2Fe细化	258.3 (± 12.9)	7.6 (± 0.8)

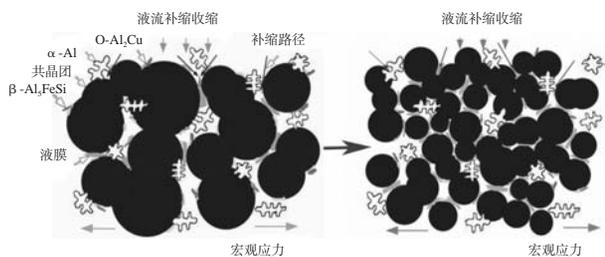


图7 含Si量较高的Al-Si-Cu合金共晶团尺寸影响热裂敏感性的机理模型

Fig. 7 Hot tearing mechanism model of Al-Si-Cu alloy with high Si content and different eutectic cell sizes

4 结论

Al-10Si-2Cu合金经Sr变质再经Al-10Si-2Fe合金处理后可以有效降低共晶团尺寸。共晶团尺寸降低可以将Al-10Si-2Cu合金的热裂敏感性降低37.8%。这种影响机制是由于共晶团细化导致凝固期间的补缩能力增加,单位表面积液膜厚度降低,晶间搭接数量增加,因此热裂敏感性降低。

参考文献:

- [1] 张银帅, 黄正华, 宋东福, 等. 铝合金汽车转向器压铸过程的数值模拟与产品组织分析 [J]. 铸造, 2017, 66 (6): 572-576.
- [2] HUANG Z X, YAN H, WANG Z W. Microstructure and mechanical properties of strontium-modified ADC12 alloy processed by heat treatment [J]. Journal of Central South University, 2018, 25 (6): 1263-1273.
- [3] 张银帅, 黄正华, 戚文军, 等. Y对ADC12合金铸态组织与性能的影响 [J]. 稀土, 2018, 39 (5): 40-48.
- [4] DAHLE A K, NOGITA K, MCDONALD S D, et al. Eutectic nucleation and growth in hypoeutectic Al-Si alloys at different strontium levels [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001, 32: 949-960.
- [5] MCDONALD S D, NOGITA K, DAHLE A K. Eutectic nucleation in Al-Si alloys [J]. Acta Materialia, 2004, 52: 4273-4280.
- [6] CAMPBELL J, CLYNE T. Hot tearing in Al-Cu alloys [J]. Cast Metals, 1990 (3): 224-226.
- [7] 薄兵, 潘冶, 陆韬, 等. 工艺参数对ADC12铝合金压铸件微孔缺陷与力学性能的影响 [J]. 铸造, 2017, 66 (2): 127-130.
- [8] ZHANG Y, ZHENG H, LIU Y, et al. Cluster-assisted nucleation of silicon phase in hypoeutectic Al-Si alloy with further inoculation [J]. Acta Materialia, 2014, 70: 162-173.
- [9] DAVIS T, BICHLER L, DELIA F, et al. Effect of TiBor on the grain refinement and hot tearing susceptibility of AZ91D magnesium alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 759: 70-79.
- [10] LI S, SADAYAPPAN K, APELIAN D. Role of grain refinement in the hot tearing of cast Al-Cu alloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2013, 44: 614-623.
- [11] ULUDAG M, CETIN R, DISPINAR D, et al. The effects of degassing, grain refinement & Sr-addition on melt quality-hot tear sensitivity relationships in cast A380 aluminum alloy [J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 90: 90-102.
- [12] DAHLE A K, NOGITA K, MCDONALD S D, et al. Eutectic modification and microstructure development in Al-Si Alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 413: 243-248.
- [13] CAO G, KOU S. Hot cracking of binary Mg-Al alloy castings [J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 417: 230-238.
- [14] ZHANG Y, ZHENG H, LIU Y, et al. A novel Al-10Si-2Fe master alloy and its effect on inoculation of eutectic cells in Sr-modified A356 alloy [J]. China Foundry, 2014, 11 (2): 98-102.
- [15] 毛文龙, 周海涛, 王顺成, 等. Sr变质对Al-Si-Mg合金的流动性、力学性能和导热系数的影响 [J]. 铸造, 2017, 66: 122-126.
- [16] 毛文龙, 赵禹凯, 王顺成, 等. 晶粒细化对铸造Al-3.2Si-0.8Mg合金流动性、力学性能和导热系数的影响 [C]//第一届先进材料前沿学术会议论文集, 西安, 2016: 5.
- [17] 张兴孟, 毛卫民, 朱文志. Zn、Mg、Cu对7075铝合金热裂性能和组织的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34: 1336-1339.
- [18] DICKHAUS C, OHM L, ENGLER S. Mechanical properties of solidifying shells of aluminum alloys [J]. Transactions-American Foundrymens Society, 1994, 101: 677-684.
- [19] 宁勤恒, 李永刚, 左秀荣, 等. 热裂形成机理及判据的研究进展 [J]. 热加工工艺, 2018, 47: 7-12, 17.
- [20] 许荣福. 亚共晶Al-Si合金热裂形成过程的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2014.

Influence of Al-10Si-2Fe Master Alloy on Refinement of Eutectic Cells and Hot Tearing Sensitivity of Al-10Si-2Cu Alloy

YU Wen-hui, SHI Lei, ZHANG Yong, ZHENG Hong-liang, LIN Xiao-hang, TIAN Xue-lei

(Key Laboratory for Liquid-Solid Structural Evolution and Processing of Materials, Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract:

The influence of Al-10Si-2Fe master alloy on the size of eutectic cells in Sr modified Al-10Si-2Cu alloy and the resultant influence on hot tearing sensitivity were investigated through the measurement of the size of eutectic cell, cooling curves and hot tearing sensitivity. The results show that the addition of Al-10Si-2Fe master alloy into the Al-10Si-2Cu alloy promotes the refinement of eutectic cells. The mechanical properties including ultimate tensile strength and elongation increase, while the hot tearing sensitivity of Al-10Si-2Cu alloy significantly decreases.

Key words:

Al-Si-Cu alloys; eutectic cell; refinement; hot tearing sensitivity