

应用技术

Al-20%Si合金初生硅宏观偏聚和细化的试验研究

贾海龙, 张海涛, 左克生, 何立子, 崔建忠

(东北大学材料电磁过程教育部重点实验室, 辽宁沈阳 110819)

摘要: 利用铜楔形模铸造, 通过凝固过程测温, 研究了浇注温度、变质剂对Al-20%Si合金初生硅宏观偏聚的影响, 及冷却速率对P、Cr和P-Cr复合变质Al-20%Si合金凝固过程中初生硅形貌和大小影响规律。结果表明: 850 °C浇注得到的试样初生硅的宏观偏聚最少, 就变质剂对初生硅宏观偏聚效果, Cr变质的明显改善, P-Cr复合变质与Cr变质效果相差不多, 但远优于P变质; 变质剂对初生硅细化和球化作用, P变质效果最好, P-Cr复合变质次之, 都大幅好于Cr变质的效果; 初生硅细化效果随冷却速率增加而增强, 但当冷却速率在某区间时, 初生硅大小随冷却速率的变化不敏感。获得宏观偏聚少, 形貌好, 尺寸小于20 μm的初生硅的最佳工艺条件为: 采用P-Cr复合变质, 850 °C浇注, 冷却速率大于10 °C/s。

关键词: Al-20%Si合金; 初生硅; 宏观偏聚; 细化

中图分类号: TG292 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2013) 09-0865-06

Experimental Study on Macro-Segregation and Refinement of Primary Si in Al-20%Si Alloy

JIA Hai-long, ZHANG Hai-tao, ZUO Ke-sheng, HE Li-zi, CUI Jian-zhong

(Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials of Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract : The effects of modifiers and pouring temperature on macro-segregation and modification of primary Si in Al-20%Si alloy under different cooling rate was investigated with wedge-shaped mould, meanwhile the effects of P and combined addition of P and Cr on Al-20%Si were also studied in this paper. The results show that the optimal pouring temperature is 850 °C. Segregation of primary Si could be inhibited with the addition of modifiers. Segregation of primary Si with the addition of Cr improved significantly, so is that of combined addition of P and Cr, and they all better than that with the addition of P. The primary Si particles were well modified by Cr, P or combined addition of P and Cr, but P has a better modification effect than Cr. Combined addition of P and Cr improves the P modification effect and substantially inhabits the segregation of primary Si. The effect of refinement of primary silicon is enhanced with the increasing rate of cooling. When the cooling rate is in a certain interval, the size of the primary silicon of modified Al-Si alloy is not sensitive to changes of cooling rate. Therefore, the best process condition access to less macro-segregation, good morphology, size of primary silicon less than 20 μm is using P-Cr, pouring at 850 °C and with the cooling rate beyond 10 °C/s.

Key words : Al-20%Si alloy; primary Si; macro-segregation; refinement

随着社会的发展, 能源、环境、安全等问题日益被人们所重视, 研发新型材料, 减少材料自身的重量, 提高效率是解决问题的重要措施。由于过共晶铝硅合金比重小、热膨胀系数小、耐磨性和热稳定性好, 因而将这种材料作为汽车用缸套材料具有很好的发展前景。但过共晶铝硅合金的微观组织中通常存在较粗大初生硅, 严重地割裂了合金基体^[1], 易引起局部应力集中^[2], 明显降低了合金的力学性能。一般认为, 当初生硅尺寸小于20 μm, 才能满足材料的强度及切削加工

性能, 初生硅粗大及偏聚问题一直制约着这类合金的生产和应用。因此, 改变初生硅的宏观偏聚、大小和形态, 是提高过共晶铝硅合金广泛应用的有效途径。

为了抑制过共晶铝硅合金中初生硅的宏观偏聚, 研究者们采用了各种方法, 如快凝技术^[3]、机械搅拌^[4]、电磁搅拌^[5]等, 虽然都有一定效果, 但由于生产规模、生产效率和生产工艺等条件的限制, 在国内还不能投入工业化的应用。变质处理可以改善过共晶铝硅合金中初生硅的形貌和大小^[6-8], 研究者们对过共晶铝硅合

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51204046); 教育部项目基本科研业务费项目国家项目培育种子基金 (N110408007)。

收稿日期: 2013-04-23收到初稿, 2013-06-15收到修订稿。

作者简介: 贾海龙 (1988-), 男, 硕士, 主要从事金属材料组织和性能研究。E-mail: fxjhl.cool@163.com

通讯作者: 张海涛 (1978-), 男, 博士, 讲师, E-mail: Haitao_zhang@epm.neu.edu.cn

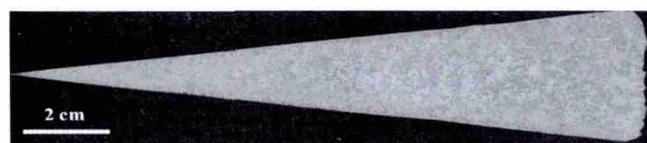
金的变质处理进行了大量研究工作，初生硅的变质处理主要由磷来实现^[9]，开发的变质剂大多以磷为基础，包括赤磷、各类磷盐、Cu-P中间合金等，也有使用磷的化合物（如PCl₃或PCl₅以及PNCl₂等）来细化初生硅^[10-13]，但变质时反应剧烈以及使用过程中产生大量的反应渣^[14]；Cu-P中间合金加入后易偏聚^[15]，效果不稳定，而且价格高。胡慧芳等^[16]研究了P、RE和Sr在过共晶Al-Si合金中的相互作用，认为添加元素P、RE和Sr之间具有相互促进作用，且经过Sr-P-RE多元复合方法处理后，初晶硅平均尺寸最小，在基体中的分布最均匀，具有最佳变质效果，其次是P-RE复合变质，再次是P-Sr复合变质。而对于既能有效改善初生硅的宏观偏聚，又能细化初生硅的方法较少。

为了细化初生硅，除了向该合金中加入变质剂之外，在生产过程中还通常通过控制该合金凝固的冷却速率来细化合金中的初生硅。张蓉、沈淑娟等人^[17]通过阶梯铸型研究冷却速率对过共晶Al-Si合金铸件组织中初生硅相的影响。结果表明，快冷有利于抑制初生硅的析出，而慢冷有利于粗大组织的恢复。吴树森、涂小林等人^[18]研究了冷却速率对Al-20%Si-1%Cu-0.5%Mg-0.5%Mn合金初生硅的影响，冷却速率对初生硅尺寸的影响较显著；磷变质或双重变质条件下，冷却速率的变化对初生硅细化的影响较小。

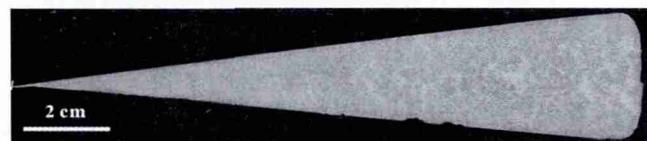
本研究利用铜楔形模铸造，对Al-20%Si、P变质Al-20%Si、Cr变质Al-20%Si、P-Cr复合变质Al-20%Si合金凝固过程的冷却曲线进行分析，结合微观组织观察，详细研究了浇注温度及不同变质剂对初生硅偏聚和尺寸大小的作用效果，并定量探讨了冷却速率对过共晶铝硅合金初生硅形貌、大小的影响规律。

1 试验材料及方法

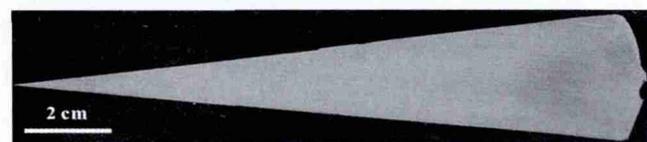
用于浇注的铜楔形模尺寸如图1a所示，使用10根



(a) 800 °C, 未变质



(c) 900 °C, 未变质



(e) 850 °C, P-Cr变质

Φ 0.5 mm热电偶测量楔形模中心对称面上不同高度处的温度变化，如图1b所示。使用中频感应炉进行熔炼，当合金液温度达到浇铸温度时将合金液浇铸入铜楔形模中进行凝固和测温。

本试验8中对Al-20%Si采用P变质、Cr变质和P-Cr复合变质三种不同的处理工艺，其中P加入量为0.03%（质量分数，下同），在800 °C以Al-P中间合金的形式加入熔体，Cr加入量为0.8%，在760 °C加入熔体，P-Cr复合的加入量为如上所述两者的结合，三种工艺均保温20 min。浇注温度分别为800、850、900 °C。将浇注得到的铸锭纵向切开，经过铣削和砂纸磨平，用扫描仪扫描，获得试样宏观图片。使用金相显微镜拍取显微组织照片，运用图像处理软件Image pro plus计算初生硅大小。

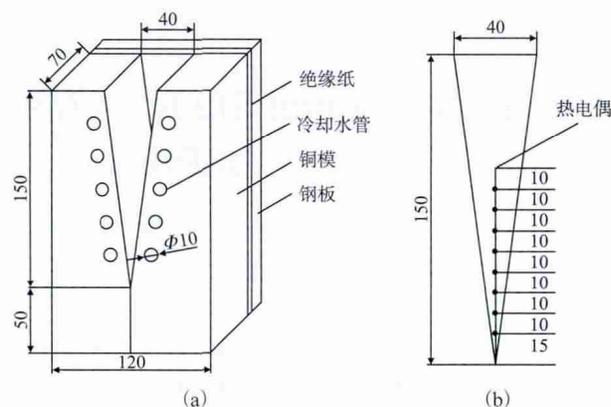


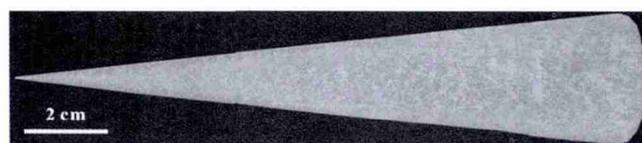
图1 铜楔形模具和热电偶位置示意图

Fig. 1 Schematics of wedge-shaped copper mould and positions of thermocouples

2 试验结果

2.1 浇注温度及合金元素对初生硅偏聚的影响

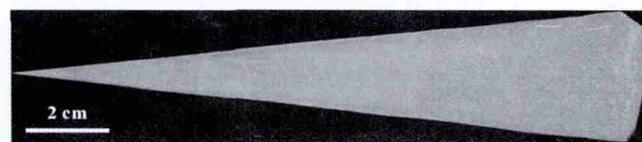
图2为经800、850、900 °C浇注得到的Al-20%Si合金铸件、850 °C浇注得到的P变质、850 °C浇注得到的



(b) 850 °C, 未变质



(d) 850 °C, Cr变质



(f) 850 °C, P变质

图2 铜模浇注Al-20Si合金楔形铸件的宏观组织

Fig. 2 Macrostructures of Al-20%Si alloys

Cr变质和850 °C浇注得到的P-Cr变质铸锭的宏观照片。

从图2a-c可以看到，850 °C浇注得到的试样初生硅的宏观偏聚最少。一般认为^[19-20]，过共晶Al-Si合金中存在的宏观偏聚现象是由比重偏聚引起的。利用JMatPro材料性能模拟软件可以看出过共晶铝硅合金中初生硅相的密度在低于700 °C时均小于液相的密度。在楔形模中浇注时，模子两侧和尖端的熔体先凝固，中心的熔体凝固慢。随着铸件中高度的增加，铸件下部由于冷却快而先凝固，在两相区区间的时间较短，初晶Si没有足够的时间来上浮就被已经凝固的基体组织所包围。在距离尖端一定高度初晶Si能够上浮后，由于下面的初晶Si不能上浮或上浮较少，致使该处形成白色的贫Si区。而在该位置上面的熔体中，由于有Si相上浮补充上来而没有形成明显的贫Si区。随着浇注温度的增加，熔体中的温度梯度逐渐增加，相同高度的熔体凝固的时间越长，初生Si相能够上浮的时间也随之增加；同时，浇注温度越高，Si-Si键被破坏，熔体越均匀，偏聚减弱，两种因素综合导致850 °C浇注得到的试样偏聚最少。

对比图2a和2d-f可以发现，Cr变质合金的偏聚明显得到改善，P-Cr变质后的合金偏聚情况与Cr变质合金相差不多，但要好于P变质后合金。经Cr变质的合金在凝固过程中，其领先析出相已经不是β-Si，而变成了

CrSi₂相，如图3所示。在凝固过程中，由于CrSi₂相的领先析出，使其周围熔体中Si组元的含量降低，导致初生Si的析出温度下降，使初生硅上浮时间减少，同时由于CrSi₂相的析出，使得熔体密度发生变化，影响初生硅上浮，从而改善了初生Si颗粒的宏观偏聚。

2.2 变质剂对初生硅形貌及尺寸的影响

图4为近似相等冷却速率下合金试样金相照片。对比图4a、b可以看出，添加Cr元素后合金中初生硅颗粒尺寸明显减小，并且有所圆化。对比图4b-d可以看出，添加Cr元素后合金中初生硅颗粒尺寸比P变质后合金中初生硅颗粒尺寸大，而P-Cr变质合金中初生硅颗粒尺寸介于P变质和Cr变质合金中间。

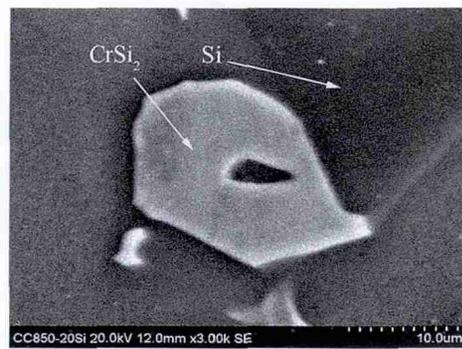
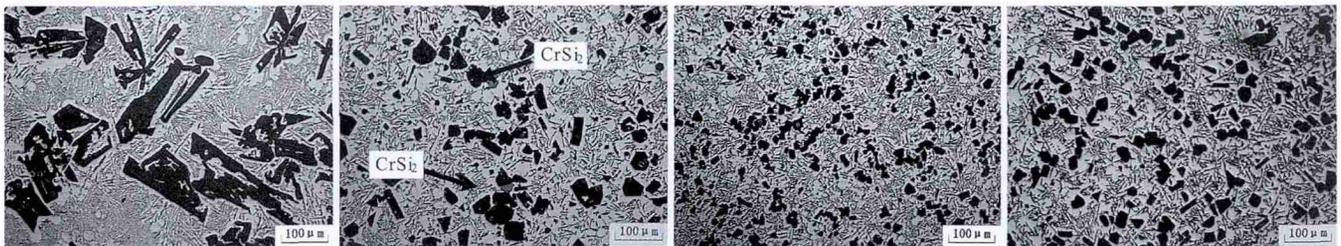


图3 Cr变质Al-20Si合金中CrSi₂相SEM照片

Fig. 3 SEM micrograph of CrSi₂ phase in Al-20%Si alloy with Cr addition



(a) 15.30 °C/s, 未变质

(b) 15.47 °C/s, Cr变质

(c) 14.68 °C/s, P变质

(d) 15.68 °C/s, P-Cr变质

图4 近似相等冷却速率下合金试样金相照片

Fig. 4 Microstructures of different samples at equal cooling rate

由图4a可以看出，未变质的Al-20%Si合金，初生硅粗大呈不规则状且分布不均匀，棱角分明。这是因为初晶Si生长遵循择优生长的原则，在有些方向上它的生长速度较快，所以产生了棱角，有着极强的割裂基体作用。

从图4b中可以看出，Cr变质后，初生Si主要为块状和板条状，在边角处仍存在棱角，初生Si的大小不一；在初生Si周围存在α-Al枝晶包围的晕状组织；同时出现了新的相CrSi₂，部分分布于α-Al基体上，少量与初生Si相连，很多CrSi₂颗粒内部存在孔洞；共晶Si呈长针状分布于α-Al基体上。分布于熔体中的Cr元素与Si原子结合形成新的CrSi₂相，该相具有类似C40的六角形结构，晶格常数为a=0.442 8 nm，c=0.636 9 nm，尽管Si为面心立方结构，但CrSi₂的(0001)面平行于Si

的(111)面，因此CrSi₂可以作为初生硅的异质核心，从而细化初生硅。

从图4c可以看出，经P变质后，初生硅颗粒的大小都要比未经变质的明显细小，并且分布较均匀，形状规整圆滑，棱角明显减小。铝磷中间合金加入到熔体后，熔体中生成AlP颗粒，AlP与Si晶格常数十分相近(Si为0.545 nm，AlP为0.542 nm)，而且它们的最小原子间隙也十分相近(Si为0.244 nm，AlP为0.256 nm)，因此，在过共晶铝硅合金熔体中反应形成的AlP小颗粒有可能作为合金中初生硅的外来异质晶核，为初生硅析出提供了现成的结晶衬底，从而起到有效地细化初生硅的作用^[21]。

从图4d可以看出经P-Cr变质后，初生硅颗粒比未经变质的明显细小，这是由于AlP小颗粒和CrSi₂相的共

同作用结果。

2.3 冷却速率对初生硅形貌及尺寸的影响

图5显示了Al-20%Si合金在凝固过程中距尖端35 mm的冷却曲线及一阶微分曲线，以此为例分析冷却曲线。由图5可以看出，由于铜模的冷却能力高，熔体迅速冷却至700~750 °C，该合金的凝固以初生硅的析出开始，初生硅释放的潜热使冷却曲线和它的一阶微分曲线发生变化，初生硅是在1.8 s时的677.5 °C温度下析出，当出现共晶平台时，形核和长大结束，由图5可以看出初生硅形核和长大的结束是在5.1 s时的572 °C。

根据两相区的冷却速率的计算公式 (1)，计算出铜楔形模不同高度对应的冷却速率如图6所示。

$$V = \frac{T_1 - T_s}{t_s - t_1} \quad (1)$$

式中：V为冷却速度，°C/s；T₁为初生硅开始析出温度，°C；T_s为共晶Si析出温度，°C；t₁为初生Si开始析出时的时间，s；t_s为共晶Si开始析出的时间，s。

由图6可以看出，不同试样同一位置对应的冷却速率不同，P、Cr的加入使得初晶平台温度升高，初晶生长温度也不断增大，P、Cr变质影响合金初晶阶段的热分析特征值，这说明P对初生硅的变质作用使得过共晶Al-Si合金凝固过程中初晶阶段凝固过程发生了变化，体现在热分析参数上的变化。

图7显示了在850 °C，铜模浇注得到的试样距离尖

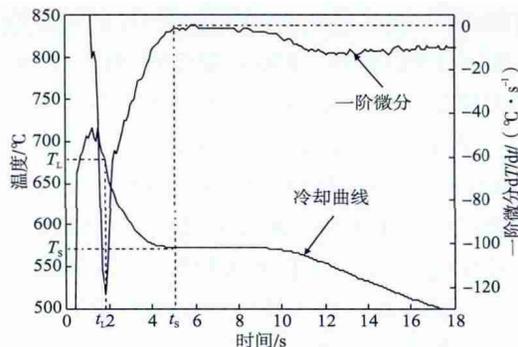


图5 Al-20%Si合金距尖端35 mm的冷却曲线及一阶微分曲线
Fig. 5 The cooling curve and first order differential curve of 35mm from the tip for Al-20%Si alloy

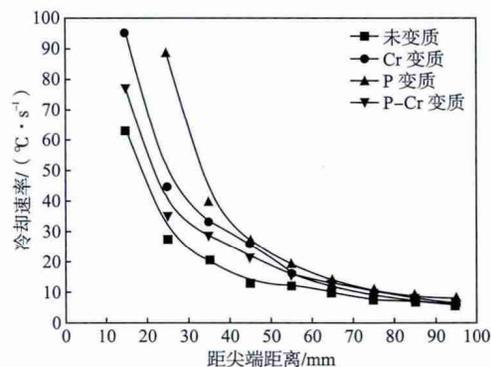
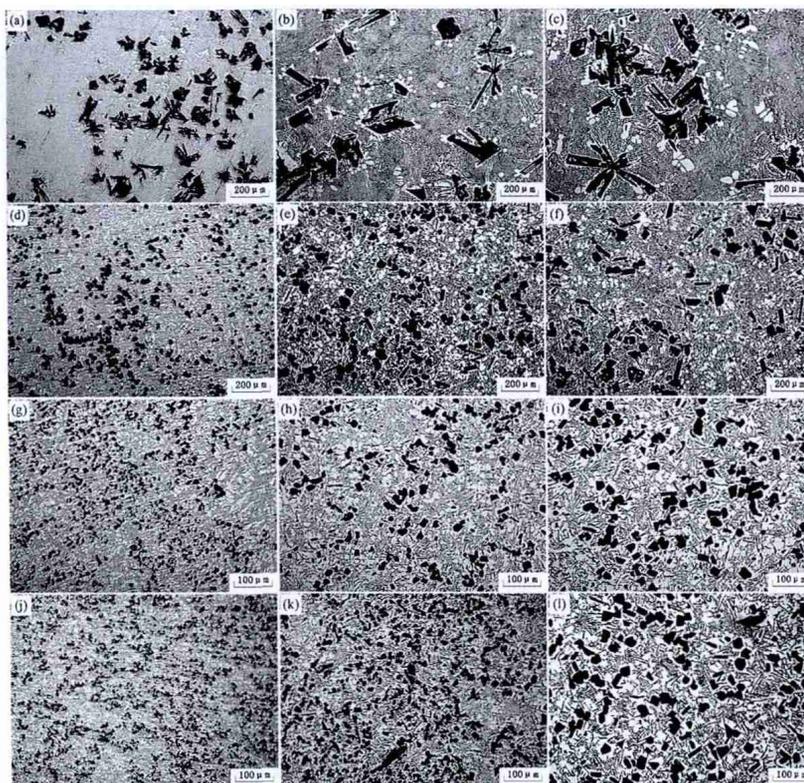


图6 850 °C铜模浇注合金的冷却速率与尖端距离之间的关系图
Fig. 6 The relationship between cooling rate and different positions from the tip for Al-20% Si alloys poured at 850 °C



(a) 15 mm, 未变质 (b) 55 mm, 未变质 (c) 105 mm, 未变质 (d) 15 mm, Cr变质 (e) 55 mm, Cr变质 (f) 105 mm, Cr变质 (g) 15 mm, P变质 (h) 55 mm, P变质 (i) 105 mm, P变质 (j) 15 mm, P-Cr变质 (k) 55 mm, P-Cr变质 (l) 105 mm, P-Cr变质

图7 850 °C铜模浇注试样距离尖端不同位置的金相照片

Fig. 7 Microstructures at different positions from the tip for Al-20%Si alloys

端不同位置的金相照片。由图7可以看出,随着冷却速度的增加,过共晶铝硅合金凝固组织中初生硅尺寸减小,当冷却速率缓慢时,初生硅呈长条状,然而在快速冷却条件下,初生硅的形状有由长条状转变为多角状变化的趋势。

图8显示了冷却速率与初生硅等积圆直径关系。由图8可以看出,P变质后,当冷却速率小于11 °C/s时,初生硅平均尺寸大于14 μm,初生硅平均尺寸对冷却速率的变化敏感;当冷却速率在11~26 °C/s时,初生硅平均尺寸对冷却速率的变化不敏感,大致在12 μm左右;当冷却速率大于40 °C/s时,初生硅平均尺寸小于10 μm,随着冷却速率的增加,初生硅颗粒尺寸逐渐减小,对冷却速率的变化敏感。

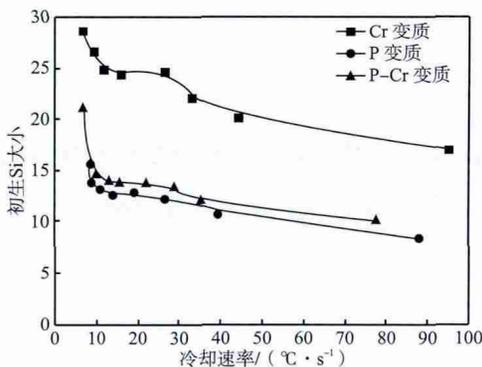


图8 850 °C浇注,冷却速率与初生硅大小关系曲线

Fig. 8 The average size of primary Si as a function of cooling rate for modified Al-20%Si alloys poured at 850 °C

Cr变质后,当冷却速率小于10 °C/s时,初生硅平均尺寸大于26 μm,初生硅平均尺寸对冷却速率的变化敏感;当冷却速率在10~26 °C/s时,初生硅平均尺寸对冷却速率的变化不敏感,大致在24 μm左右;当冷却速率大于45 °C/s时,初生硅平均尺寸小于20 μm,随着冷却速率的增加,初生硅颗粒尺寸逐渐减小,对冷却速率的变化敏感。

P-Cr变质后,当冷却速率小于10 °C/s时,初生硅平均尺寸大于20 μm,初生硅平均尺寸对冷却速率的变化敏感;当冷却速率在10~28 °C/s时,初生硅平均尺寸对冷却速率的变化不敏感,大致在14 μm左右;当冷却速率大于35 °C/s时,初生硅平均尺寸小于11 μm,随着冷却速率的增加,初生硅颗粒尺寸逐渐减小,对冷却速率的变化敏感。

当冷却速率较小且低于某一值时,随冷却速率的增大,过冷度增大,促进了自发形核,晶核数量增多,使晶粒细化。P变质或Cr变质主要是通过再熔液中生成AlP或其它化合物作为异质核心而使初晶Si细化的,当冷却速率增大且在某一区间时,随冷却速率的增加,自发形核的增加大于异质核心数量的减少,而且冷却速度并未大到可以抑制初晶Si长大的程度,因此并未对初晶Si细化产生显著影响。当冷却速率大于某一值

时,随冷却速率的增大,周围晶体的生长可以抑制初晶Si的进一步长大,从而使初晶Si细化。

3 结论

利用铜楔形模,研究了浇注温度、变质剂对Al-20%Si合金初生硅宏观偏聚的影响及冷却速率对P、Cr变质Al-20%Si合金凝固过程中初生硅形貌和大小的影响规律,得出以下主要结论。

(1) 850 °C浇注得到的试样初生硅的宏观偏聚最少,经过Cr变质的Al-20%Si合金初生硅宏观偏聚得到明显改善,P-Cr复合变质后的Al-20%Si合金初生硅宏观偏聚改善情况与Cr变质合金相差不多,但远优于P变质的Al-20%Si合金。

(2) 变质剂能使Al-20%Si合金中形貌复杂、粗大的多边形形状的初生硅尺寸变小并有所圆化,变质效果由强到弱依次为:P变质,P-Cr复合变质,Cr变质。

(3) 初生硅细化效果随冷却速率增加而增强,P变质后,初生硅平均尺寸均小于20 μm,Cr变质后,当冷却速率大于45 °C/s时,初生硅平均尺寸小于20 μm,P-Cr变质后,当冷却速率大于10 °C/s时,初生硅平均尺寸小于20 μm。P变质、Cr变质及P-Cr复合变质后合金,当冷却速率在某区间时,初生硅大小随冷却速率的变化不敏感。

(4) 获得宏观偏聚少,形貌好,尺寸小于20 μm的初生硅的最佳工艺条件为:采用P-Cr复合变质,850 °C浇注,冷却速率大于10 °C/s。

参考文献:

- [1] Wang F, Yang B, Duan X J. The microstructure and mechanical properties of spray-deposited hypereutectic Al-Si-Fe alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 137: 191-194.
- [2] Nikanorov S P, Volkov M P, Gurin V N. Structural and mechanical properties of Al-Si alloys obtained by fast cooling of a levitated melt [J]. Materials Science and Engineering. 2005, A390: 63-69.
- [3] 谢状德,沈平,董寅生,等.快速凝固铝硅合金材料及其在汽车中的应用[J].材料科学与工程,1999,17(4):10-14.
- [4] 坚增运,杨根仓,周尧和. Al-18%Si合金的温度处理[J].中国有色金属学报,1995,5(4):133-136.
- [5] 毛卫民,李树索,赵爱民,等.电磁搅拌对过共晶Al-Si合金Si长大过程和形貌的影响[J].材料科学与工艺,2001,9(2):117-121.
- [6] 张卫文,尹志民,赵阳,等.过共晶高硅铸造铝合金磷-稀土双重变质处理[J].中国有色金属学报,1995,5(1):59-62.
- [7] 张卫文,尹志民,陈小群.磷在过共晶铝硅合金中的存在形式及其变质机理[J].中国有色金属学报,1994,4:229-232.
- [8] Lu Shuzu, Hellawell A. The mechanism of silicon modification in aluminum-silicon alloys: impurity induced twinning [J]. Metallurgical Transaction A, 1987, 18A: 1721-1733.
- [9] 葛良琦. Al-20% Si中初生硅形态控制技术研究[D].南京:南京理

从图5中可知，铸态Mg-6Gd-3Y-0.4Zr-2Zn合金熔体未处理时，抗拉强度 (UTS) 为150 MPa，屈服强度 (TYS) 为123 MPa，伸长率为2.8%，但合金熔体经机械振动处理后具有较好的力学性能，其抗拉强度达到176 MPa，屈服强度为142 MPa，伸长率为5.6%。经机械振动处理后，合金的抗拉强度和屈服强度分别提高17.3%和15.4%，伸长率也由2.8%提高到5.6%。这说明合金熔体采用机械振动处理后，合金的抗拉强度和屈服强度以及伸长率都有明显提高，这与组织分析结果保持一致。合金熔体经机械振动能够明显改善合金的铸态力学性能。熔体经机械振动处理后，拉伸性能的提高与基体晶粒的细化、第二相分布均匀密不可分。

3 结论

(1) 铸态Mg-6Gd-3Y-0.4Zr-2Zn合金主要由 α -Mg基体， $Mg_{24}(GdYZn)_5$ 以及 $Mg_{12}ZnY$ 相组成。首先结晶的是初生相 α -Mg基体，最后凝固形成的是网状第二相；具有条纹状的 $Mg_{12}ZnY$ 相分布于共晶相 $Mg_{24}(GdYZn)_5$ 之中，两相交替分布，总体上构成网状的共晶相。合金熔体未经处理时，合金易在第二相内形成不同程度的裂纹及孔洞，对合金的力学性能不利。

(2) 合金熔体经机械振动处理后，合金组织得到显著的改善，晶粒明显细化，第二相分布弥散，原来交替生长的板条状第二相变得短而细小且均匀分布，合金中铸造缺陷明显得到改善。

(3) 合金熔体经机械振动处理后具有较好的力学

性能，其铸态抗拉强度与屈服强度分别为176 MPa和142 MPa。机械振动熔体处理在提高合金抗拉强度与屈服强度的同时伸长率也得到了提高。

参考文献：

- [1] 胡耀波, 邓娟, 赵冲, 等. 稀土Mg-Gd系合金的研究现状与展望 [J]. 材料导报, 2010, 24 (23): 95-99, 103.
- [2] 师昌绪, 李恒德, 王淀佐, 等. 加速我国金属镁工业发展的建议 [J]. 材料导报, 2001, 15 (4): 5-6, 103.
- [3] 王玮. Mg-10Gd-3Y-0.5Zr合金复合净化行为研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2010: 40-47.
- [4] 李理, 张新明, 周楠, 等. Mg-Gd-Y-Zr合金热轧板材的粗晶超塑性行为与微结构 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20 (3): 390-396.
- [5] 吴文祥, 靳丽, 董杰, 等. Mg-Gd-Y-Zr高强耐热镁合金的研究进展 [J]. 中国有色金属学报, 2011, 21 (11): 2710-2718.
- [6] Rokhlin L L. Magnesium alloys containing rare earth metals [M]. London: Taylor and Francis, 2003.
- [7] 王元庆, 樊自田, 李继强. 消失模铸造AZ91D 振动凝固及半固态热处理组织的演变 [J]. 铸造, 2006, 26 (8): 506-509.
- [8] 王元庆, 樊自田, 李继强, 等. 浇注温度和机械振动对消失模铸造镁合金组织和力学性能的影响 [J]. 铸造, 2007 (3): 266-269.
- [9] 田雪峰, 樊自田, 黄乃瑜. 机械振动对消失模铸造镁合金组织及力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2006, 16 (11): 1838-1844.
- [10] 张德恩, 卢锦德, 张晓燕. 机械振动对新型铸造铝合金凝固组织及性能的影响 [J]. 贵州大学学报, 2009, 26 (1): 79-83.

(编辑: 曲学良, qxl@foundryworld.com)

(上接第 869 页)

- 工大学, 2007.
- [10] 赵恒先, 陈润辉. 过共晶铝-硅合金细化变质的进展 [J]. 轻金属, 1992, 2: 60-64.
 - [11] 康嘉华, 丁光宇, 张全孝. 过共晶铝-硅合金细化初生硅的研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 1993, 5: 54-57.
 - [12] Lu Shuzu, Hellawell A. Growth mechanism of silicon in Al-Si alloys [J]. Journal of Crystal Growth, 1985, 73: 316-328.
 - [13] 刘玉先, 肖莉美, 刘相法, 等. Al-Si合金中共晶硅生长形态的研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 1995, 6: 1-4.
 - [14] 汤大明, 韩大明. 新型高硅铝合金材料车用性能研究 [J]. 黑龙江交通科技, 2007, 10: 60-61.
 - [15] 张俊红, 任智森, 赵群, 等. 变质工艺影响过共晶Al-Si合金初晶Si细化的研究 [J]. 轻金属, 2006, 10: 62-65.
 - [16] 胡慧芳, 李华基, 薛寒松, 等. 混合稀土、磷、锶对Al-24%Si活

塞合金的变质处理 [J]. 铸造技术, 2008, 29 (3): 341-343.

- [17] 张蓉, 沈淑娟, 赵志龙, 等. 熔体过热处理及冷却速度对Al-Si过共晶合金凝固组织的影响 [J]. 有色金属, 2002, 3: 19-21.
- [18] 吴树森, 涂小林, 吴广忠. 冷却速度对过共晶Al-Si合金的初晶Si微细化的影响 [J]. 材料科学与工艺, 2001, 2: 141-145.
- [19] 宋长江, 许振明, 刘向阳, 等. 电磁分离技术制备过共晶Al-Si合金自生功能梯度材料 [J]. 上海交通大学学报, 2005, 39 (7): 1089-1093.
- [20] 于思荣, 张新平, 何镇明, 等. 初始Si含量对离心法制备过共晶Al-Si合金FGM中初生硅分布的影响 [J]. 复合材料学报, 2003, 20 (6): 16-20.
- [21] 张士俊, 边秀房, 郭晶, 等. P变质对不同冷速下过共晶压铸铝合金初晶Si的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2006, 08: 19-21.

(编辑: 曲学良, qxl@foundryworld.com)