

高 Mg 含量对 Al-Si-Cu-Mg 合金凝固过程和 组织演变的影响

陈安柱¹, 周鹏飞^{1, 2}, 陆从相¹

(1. 盐城工业职业技术学院, 江苏盐城 224005; 2. 盐城工学院材料工程学院, 江苏盐城 224051)

摘要: 为开发新型耐磨合金, 利用热力学计算、热分析以及组织分析等手段研究了高Mg (8wt.% ~ 20wt.%) 含量对Al-17Si-4.5Cu-xMg合金凝固行为及组织演变的影响。结果表明: Mg含量的增加显著改变了初生Mg₂Si的形貌以及凝固行为。ThermoCalc模拟预测合金凝固过程中有6个反应, 即形成初生Mg₂Si; 两个二元共晶反应, 形成(Mg₂Si+Si)或(Mg₂Si+Al)相; 三元共晶反应形成(Mg₂Si+Si+Al); 以及凝固后期共晶反应形成Q-Al₅Mg₈Cu₂Si₆和θ-Al₂Cu相。所研究的四种合金中除了有上述相外, 还有富Fe相。Mg含量达到17.2wt.%时初生Mg₂Si的形貌由多面体状转变为树枝晶状。继续增加Mg的含量, 初生Mg₂Si形貌不变, 但枝干变粗。

关键词: Al-17Si-4.5Cu-Mg; 初生Mg₂Si; 形貌; Mg含量; 凝固过程

作者简介:

陈安柱(1984-), 男, 副教授, 从事高性能轻合金开发工作。E-mail: 775132386@qq.com

通讯作者:

周鹏飞, 男, 讲师。电话: 18861991861, E-mail: zpfjsyc@126.com

中图分类号: TG146.22

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)03-0315-08

基金项目:

2019 校级创新团队项目(YGYKT-04); 2019 校级自然科学基金项目(ygy2019-04、ygy20-04); 江苏高校“青蓝工程”。

收稿日期:

2021-02-05 收到初稿,
2021-10-08 收到修订稿。

过共晶Al-Si合金因其热膨胀系数低、耐磨性优异、硬度高等优点而被广泛应用于汽车和航空部件的制造^[1-3]。例如A390 (Al-17Si-4.5Cu-0.5Mg)合金被用于制造活塞、气缸盖、空调压缩机等^[3]。初生Si分布在基体上使合金具有高硬度和好的耐磨性, 但未经变质的初生Si尺寸粗大, 并且呈带有尖角的块状, 这会显著影响合金的力学性能。一般会采用加入变质剂或者提升冷却速率的方法来细化初生Si以提高合金的性能^[4]。

Okayasu等^[5]研究了A390合金的凝固过程(表1)。随着凝固的进行, 先析出初生Si, 随后析出少量的枝晶 θ -Al, 然后发生Al+Si+ θ -Al₃FeSi共晶反应, 凝固最后阶段析出Mg₂Si和 θ -Al₂Cu。

Hekmat-Ardakan等^[6-7]利用相图计算得出Al-17Si合金中Mg含量在6.8%时, 仅有初生Mg₂Si分布在基体上。基体上分布低密度的Mg₂Si, 在不降低耐磨性的同时还可以降重。并发现Mg可以改变A390合金中初生Si和共晶Si的形貌及尺寸, 同时还能形成初生和共晶Mg₂Si, 其拉伸性能虽然有所提高但硬度却下降。研究表明, 提高Mg的含量可促使共晶Si由长针状转变为汉字状, 同时析出的初生Si减少, 取而代之的是初生Mg₂Si相, 同时对比了加入6%~10%Mg与铸态A390的耐磨性, 增加Mg含量能提高合金耐磨性是由于使粗大的初生Si转变为细小的Mg₂Si颗粒的结果。Jayakumar等^[8]研究了3%~5%的Mg对A390合金凝固组织均匀性和性能的影响, 结果表明, 随着Mg含量的增加, Mg₂Si含量在增加, 初生Si的含量在下降, 初生Mg₂Si颗粒的尺寸更加细小, 分布在初生Si的边缘处, 并且有个别分布在基体上。同时指出, Mg₂Si密度(1.99 × 10³ kg · m⁻³)小, 膨胀系数(7.5 × 10⁻⁶ K⁻¹)低, 熔点(1 085)高, 硬度(4.5 × 10⁹ N · m⁻²)高, 弹性模量(120 GPa)高, 这些指标对开发新型轻量化耐磨材料(含Al和Mg₂Si)非常有利, 从而替代目前的常用的过共晶Al-Si合金耐磨材料。

为了开发更轻的高耐磨材料, 高Mg含量的Al-Si合金具有开发的优势, 但截至目前高Mg含量对过共晶Al-Si合金特别是对常用的Al-Si-Cu-Mg凝固行为及组织演变的研究的相关数据还不够全面, 因此本文利用相图计算、冷却曲线分析、组织观察等

表1 A390合金凝固过程
Table 1 Solidification reactions for A390 alloy

反应	理论温度/
析出初生Si	654
-Al枝晶生长	628
共晶反应: L Si+ -Al+Al ₂ FeSi	565
析出Mg ₂ Si: L Si+ -Al+Mg ₂ Si	540
析出Al ₂ Cu: L+Mg ₂ Si Si+ -Al+Al ₂ Cu+Al ₅ Mg ₈ Cu ₂ Si ₆	500
多元共晶反应: L Si+ -Al+Al ₂ Cu+Al ₅ Mg ₈ Cu ₂ Si ₆	499
凝固结束	494

方式研究Mg对Al-Si-Cu-Mg合金凝固行为及组织演变的影响。

1 试验材料与方法

为了更好地理解Al-Si-Cu-Mg多元合金凝固过程和相转变。利用Thermo-Calc (Al-6.0数据库)计算Al-17Si-4.5Cu-xMg合金平衡相图, Si和Cu含量分别保持在17%和4.5%, Mg含量在0~20%, 同时将模拟计算结果和热分析结果与微观组织对比分析。

合金熔炼及温度记录, 试验原材料Al (99.9%)、Si (99.6%)、Cu丝 (99.9%) 和Mg (99.9%) 锭。首先根据设计成分配置熔炼用金属Al、Cu丝、Mg锭和Si锭; 将Al锭放置在SG2-15-8型电阻坩埚熔铝炉中熔化, 熔化温度设定在780℃, 保温40 min直至完全熔化; 然后加入金属Si并搅拌均匀, 降温至750℃, 加入Cu丝并搅拌均匀, 降温至730℃, 投入Mg锭, 加入六氯乙烷除气后扒渣, 静置30 min。将钢模 (Φ35 mm × 50 mm) 预热至250℃, 在730~750℃下, 将金属液浇注到铸铁模具中, 将K型热电偶插入模具中心位置, 如图1, 连接至HOKI温度记录仪, 记录凝固过程中温度随时间的变化, 时间步长50 Hz。

采用SPECTROLAB M12直读光谱仪测定浇注合金的实际成分, 结果如表2所示。采用Phenom XL台式扫描电镜观察组织形貌及分析微区成分, 使用OLYMPUS

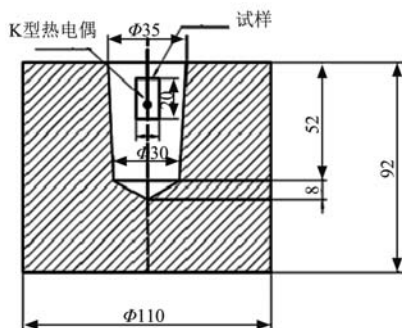


图1 模具示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mold

GX53倒置金相显微镜观察试样铸态组织、形貌, 研究Mg元素含量对Al-Si-Cu-Mg合金组织演变规律。为了更加清楚地观察合金中Mg₂Si的形貌, 用10%NaOH对试样进行深腐蚀, 腐蚀10 min。利用ImagePro6.0统计不同合金中Mg₂Si和Si的平均尺寸。

2 试验结果与讨论

2.1 热力学模拟

利用Thermo-Calc软件计算了Al-17Si-4.5Cu-xMg合金的平衡凝固相图, 如图2所示。图中给出了不同Mg含量情况下, Al-Si-Cu-Mg合金的平衡相变。虚线为Mg含量的两个临界点 (7.5%和17.2%)。需要指出的是, 虽然软件中可以将Fe元素加进去, 但显示的结果非常复杂, 因此为了简便计算, 仅考虑了Al-Si-Cu-Mg四元合金的相互作用。

在所研究的Mg含量范围内, 有两个显著的区域, 如图2中的区域1和2, 以17.2% Mg为分界线, 区域1的Mg含量在7.5%~17.2%之间, 区域2的Mg含量在17.2%~20%之间。可得出, 在此区域内凝固序列改变非常明显。基于图2, 在平衡凝固过程中, 合金的各个阶段的凝固反应及相转变如表3所示。

表2 合金成分
Table 2 Compositions of alloys w_B /%

合金	名义成分				实测成分					
	Si	Cu	Mg	Al	Si	Cu	Mg	Fe	Ti	Al
A	17	4.5	8.0	余量	16.8	4.47	7.86	0.189	<0.01	余量
B	17	4.5	12.5	余量	17.2	4.52	12.39	0.176	<0.01	余量
C	17	4.5	17.2	余量	16.9	4.48	17.16	0.092	<0.01	余量
D	17	4.5	19.0	余量	17.1	4.51	19.11	0.112	<0.01	余量

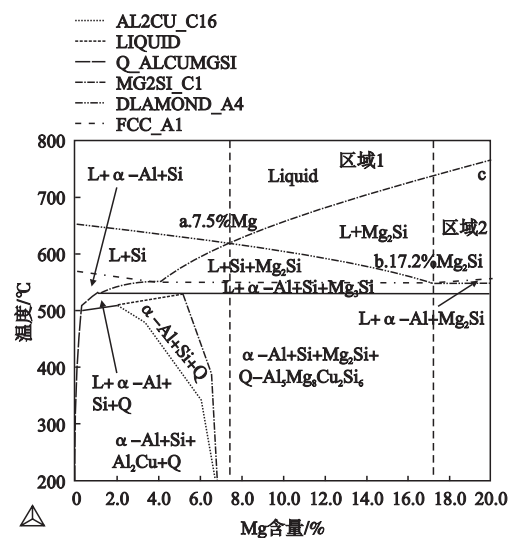


图2 Al-17Si-4.5Cu-xMg平衡相图

Fig. 2 Calculated phase diagram of Al-17Si-4.5Cu-xMg system

表3 Al-17Si-4.5Cu-xMg平衡相图凝固路径表
Table 3 Reaction scheme for Al-17Si-4.5Cu-xMg system

区域1 (a-b)	共晶成分 (a)	区域2 (b-c)	凝固阶段	反应序号
类型1	类型2	类型3		
L L+Mg ₂ Si	L L+Mg ₂ Si	L L+Mg ₂ Si	初生Mg ₂ Si	1
L L+Si+Mg ₂ Si		L L+ -Al+Mg ₂ Si	二元共晶	2-3
	L L+ -Al+Si+Mg ₂ Si		三元共晶	4
	L Q-Al ₃ Mg ₈ Cu ₂ Si ₆ + -Al+Si+Mg ₂ Si		四元共晶	5
	-Al ₂ Cu+Q-Al ₃ Mg ₈ Cu ₂ Si ₆ + -Al+Si+Mg ₂ Si			6

注：反应6仅当Mg含量超过5.9%时发生。

从图2中还可以得出，随着Mg含量的改变，合金的液相线温度、二元反应温度以及三元共晶反应温度改变明显。液相线温度从7.5%Mg的629.1 增加至17.2%Mg的726.3 ，再增加至20%Mg的761.7 ；然而二元反应温度则从7.5%Mg的629.1 降至17.2%Mg的548.6 ，然后增加至20%Mg的559.4 。但是，三

元共晶反应温度并不随Mg含量的变化而变化。从相图中可以得出，在所研究的合金范围内Mg₂Si为初生相，随后随着Mg含量的变化析出Si+Mg₂Si或者Mg₂Si+ -Al。

图3是平衡凝固条件下，四种合金液相与各组分随温度变化的摩尔分数变化曲线。所研究合金凝固过程

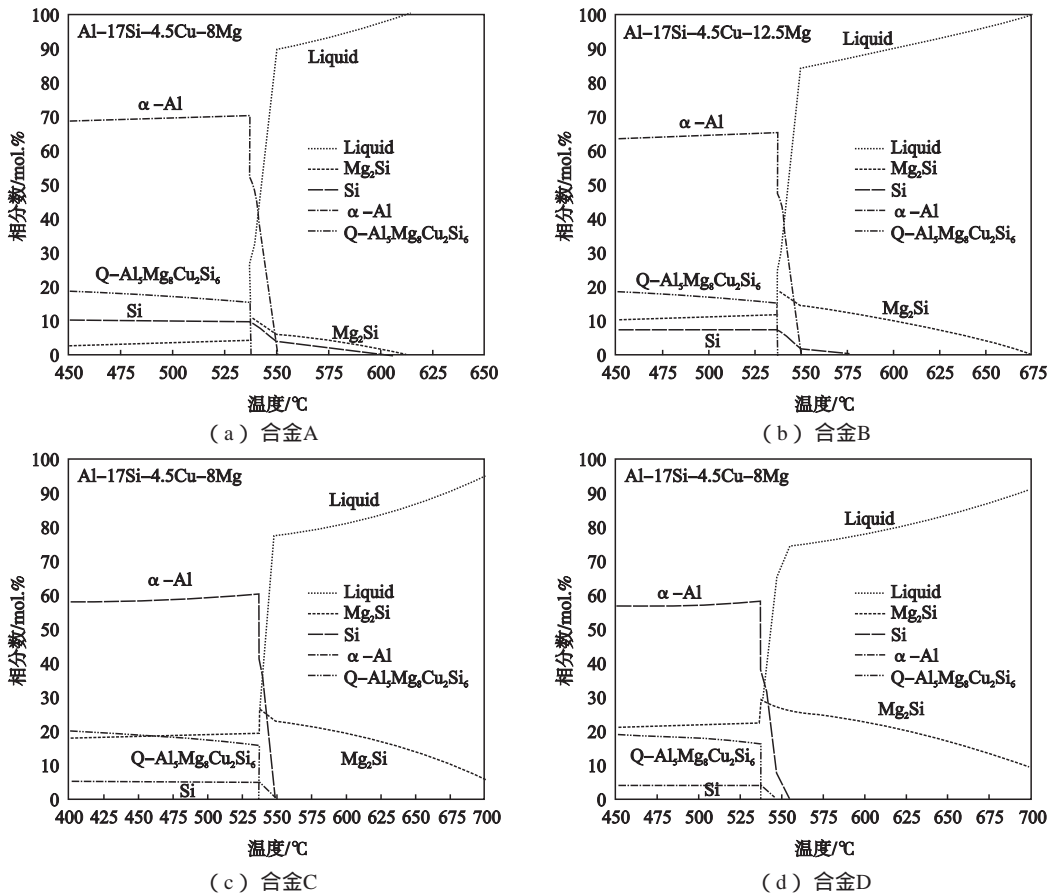


图3 四种合金平衡凝固相摩尔分数随时间变化曲线

Fig. 3 Molar fraction versus time curves of the four alloys under equilibrium condition

可分为三类（如表3）。

类型1：先析出 Mg_2Si ，随后发生二元共晶反应析出 Mg_2Si+Si 。主要的三元共晶反应是 $L \rightarrow L+Si+Al+Mg_2Si$ ，然后发生四元共晶反应 $L \rightarrow Q+Si+Al+Mg_2Si$ ，形成大量的 $-Al$ ，如图3a、b，Mg含量增加， Mg_2Si 摩尔分数显著增加，而Si相分数略有下降。

类型2：首先析出 Mg_2Si ，然后发生三元共晶反应 $L \rightarrow L+Si+Al+Mg_2Si$ ，再发生四元共晶反应 $L \rightarrow Q+Si+Al+Mg_2Si$ ，如图3c。相比合金A和B，合金C中的 Mg_2Si 分数明显增加。相比合金A、B、D中的二元共晶反应（ $L \rightarrow L+Si+Mg_2Si$ 或 $L \rightarrow L+Al+Mg_2Si$ ），合金C中未出现。

类型3：与类型1的凝固路径相似，仅是合金D中的二元共晶反应形成了 Mg_2Si+Al ，如图3d。

随着Mg含量的增加，三元共晶反应时的固相分数不断增加，从合金A的10.3%上升至合金D的34.3%；Q相亦有所增加，但并不明显，从15.3%增加至15.9%。但Si含量从10.1%降至了3.9%。

2.2 组织演变

2.2.1 初生相演变

图4a-d是合金A-D的微观组织图，四种合金组织中均有黑色初生 Mg_2Si 和灰色Si颗粒，以及 $Si+Al+Mg_2Si$ 三元共晶区域。图4e、f是合金A和B的高倍微观组织图。

合金A的基体上分布细小弥散的黑色 Mg_2Si 颗粒，多边形灰色初生Si，如图4a。随着Mg含量的增加，灰色初生Si数量明显减小，初生 Mg_2Si 尺寸增加，如图4b。继续增加Mg至17.2%，初生Si消失，黑色 Mg_2Si 由块状转变为枝晶状，如图4c，文献[8]指出，形成枝晶状 Mg_2Si 是由于在非平衡凝固情况下 $-Al$ 枝晶间剩余液相中的Mg和Si来不及扩散所致。

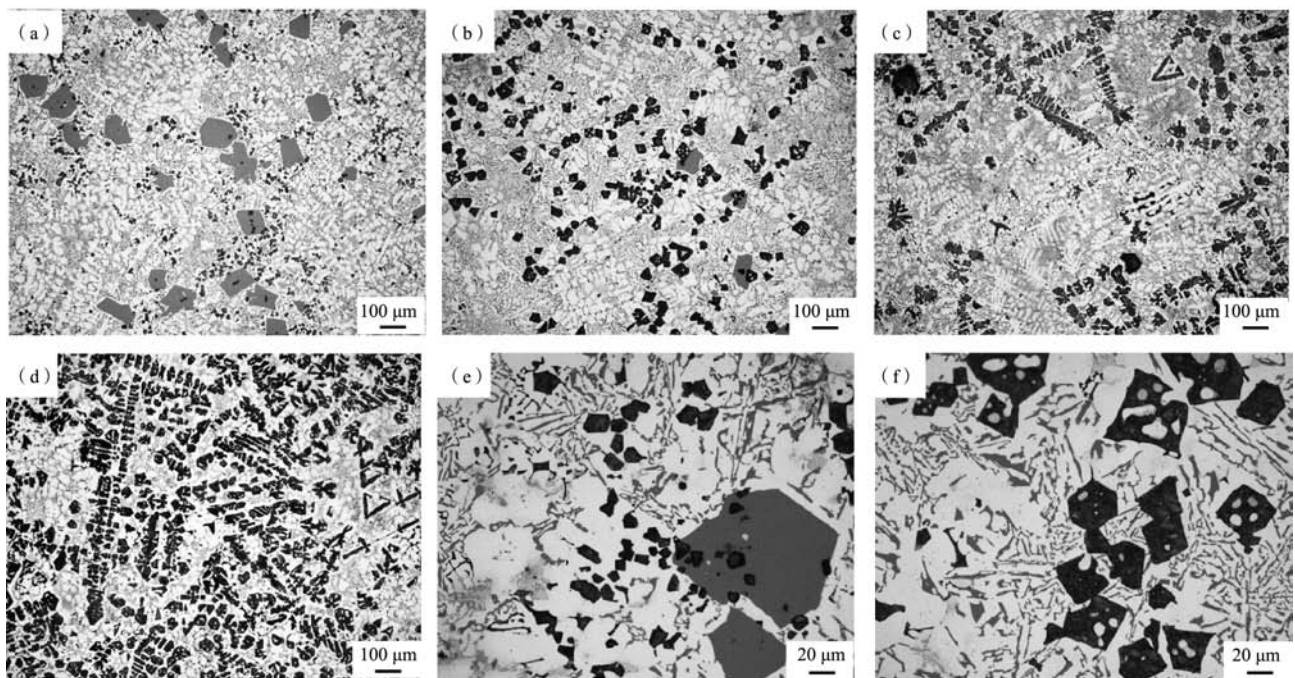
观察图4的微观组织，随着Mg含量的增加，微观组织发生以下演变：①初生 Mg_2Si 由多面体状转变为粗大的树枝状；②Mg含量超过12.5%后，初生 Mg_2Si 尺寸急剧增大。合金D（Mg含量最高）中初生 Mg_2Si 仍呈树枝状，但相比合金C中的 Mg_2Si 枝晶粗化明显。

2.2.2 初生 Mg_2Si 的形貌

为更加清楚地显现初生 Mg_2Si 和Si相形貌，使用10%NaOH对合金A和C进行深腐蚀。合金A和C的高倍SEM形貌如图5a、b所示。可见，随着Mg含量的增加， Mg_2Si 由较小的多面体小平面结构向树枝晶转变，这说明Mg含量的增加影响了 Mg_2Si 的形核与生长过程。

图6是初生 Mg_2Si 形貌及其随着Mg含量增加的形貌演变。当Mg含量达到17.2%时， Mg_2Si 形貌由多面体状转变为树枝晶状，如图6c。Mg含量继续增加时， Mg_2Si 形貌不变，如图6d所示。

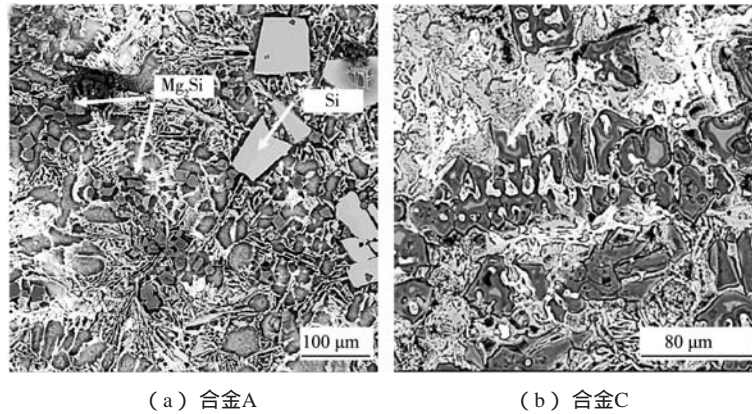
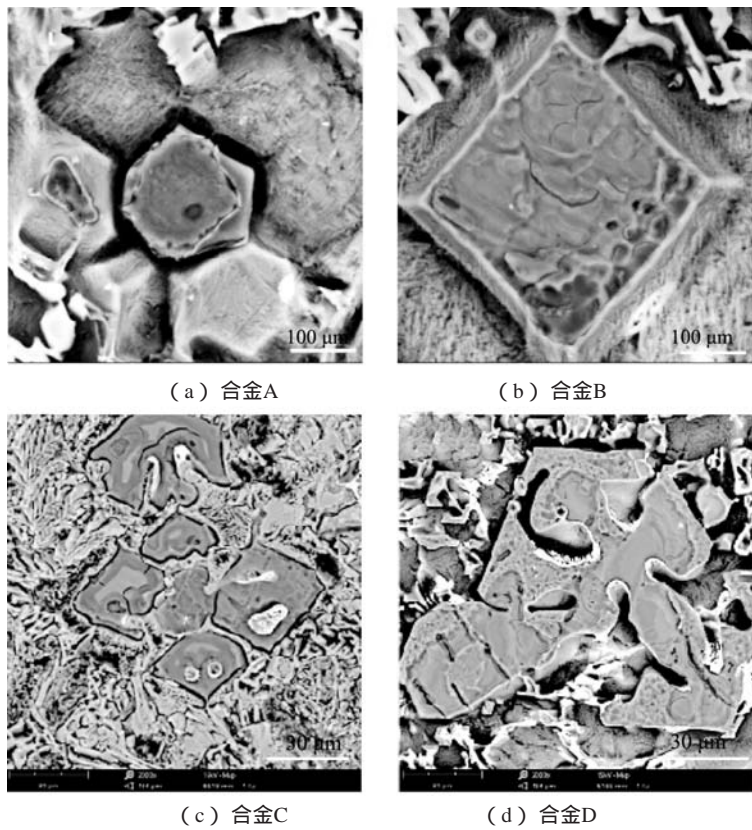
李英民等^[13]系统研究了Al- Mg_2Si 合金中初生 Mg_2Si 的形貌与生长机制。指出初生 Mg_2Si 可能呈现出不同的



(a)、(e)合金A；(b)、(f)合金B；(c)合金C；(d)合金D

图4 四种合金的微观组织

Fig. 4 Optical micrographs of the four alloys

图5 合金A和C中的初晶Si和Mg₂Si形貌Fig. 5 SEM micrographs of the primary Mg₂Si and Si particles in alloy A and alloy C图6 四种合金中Mg₂Si形貌Fig. 6 Morphologies of the Mg₂Si phase of the four alloys

形貌，有八面体形、漏斗形、立方形、截断八面体形以及发达树枝晶状。另外，随着Mg含量的增加，其尺寸也在增大，形貌也会发生改变。图6中有类似八面体的Mg₂Si，如图6a、b；树枝状Mg₂Si的枝干往各个方向扩散生长，如图6c、d。图4d和图6d清楚地显示了从初生Mg₂Si中心生长的枝晶及二次枝晶。

李英民^[13]指出Mg₂Si具有面心立方结构，呈小平面生长，沿着<100>方向择优生长；根据表面自由能最小原则，Mg₂Si呈现八面体生长趋势。但是，在实际凝

固过程中，其生长条件和周边环境不同，会出现其他形貌。当存在某种元素时（例如Mg），可能会改变择优生长方向上的生长速率，随着生长的进行，特定的生长界面会消失，形成其他界面，最终改变Mg₂Si的形貌。从本文的研究结果可知，Mg含量会显著影响初生Mg₂Si的生长和形貌。

2.2.3 共晶组织形貌

图7显示了四种合金的共晶组织。在合金A、B、C

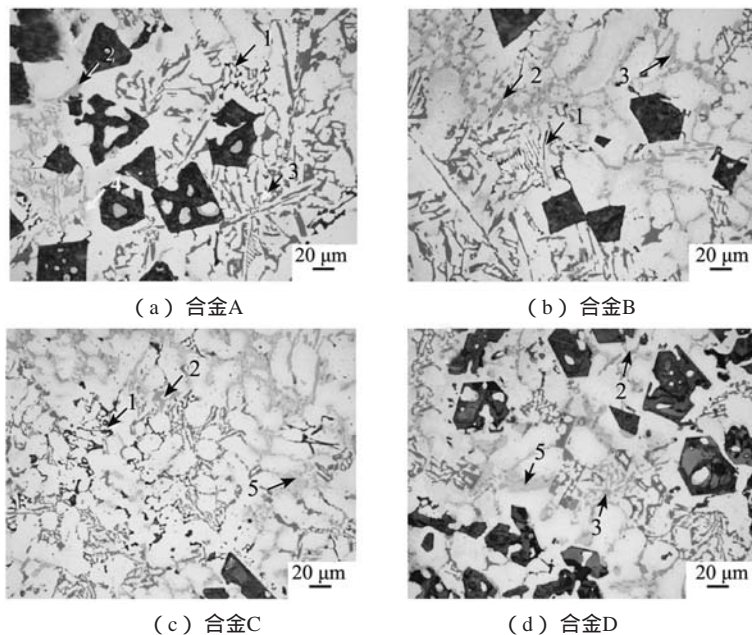


图7 四种合金OM组织(高倍)

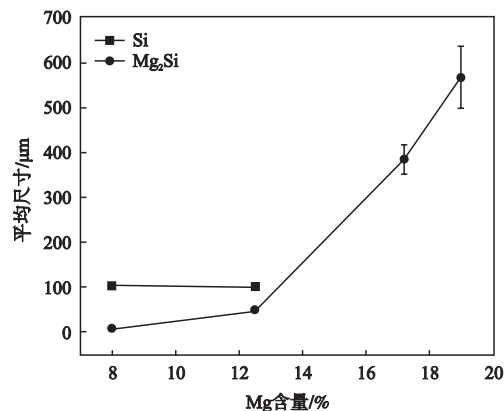
Fig. 7 Optical micrographs obtained from the eutectic regions of the four alloys

中都有黑色细汉字状共晶 Mg_2Si 相,深灰色长条状则是共晶Si相,而亮白色枝晶区域则是 $\pi-Al$ 相。组织中还存在富Cu相以及少量的含Fe相。对一些有典型特征的中间化合物辅助SEM-EDS分析得知,图7中的1-5化合物分别是共晶 Mg_2Si 、共晶Si、 $\pi-Al_8Mg_5FeSi_6$ 、 $\theta-Al_2Cu$ 以及 $Q-Al_5Mg_8Cu_2Si_6$ 。 $Al-Si$ 合金中Mg含量比较低时会出现 $\pi-Al_8Mg_5FeSi_6$,而Mg含量高时,则全部会转化为 $\pi-Al_8Mg_5FeSi_6$ ^[10]。对比图7a、d,随着Mg含量的增加,共晶Si明显细化,其形貌由粗大长条状转变为细短杆状。研究中还发现,随着Mg含量的增加会形成大量的 $\pi-Fe$,并且其尺寸不断增大。

图8是试验组织中统计的初生Si和 Mg_2Si 平均尺寸随Mg含量的变化曲线。统计尺寸表明, Mg_2Si 的平均尺寸从合金A的9.2 μm 增加至合金D的567.3 μm 。另外,初生Si的平均尺寸由合金A的102.5 μm 变化至合金B的101.6 μm ,几乎没有变化。而合金C和D中并没观察到初生Si,这与热模拟分析的结果相一致。

2.3 凝固过程分析

图9是四种合金的凝固曲线及一次微分曲线。合金A和B有6个峰值,合金C中有4个峰值,合金D则有5个峰值,这是由于合金成分不同所致。对于合金A和B,峰1对应的是从液相中析出初生 Mg_2Si 。峰2和3分别对应的是 Mg_2Si+Si 二元反应和 $Mg_2Si+Si+\pi-Al$ 三元共晶反应。峰4对应的是 $\pi-Fe$ 相的析出,峰5是Q相析出^[9, 11-14]。峰6是富Cu相的析出($\theta-Al_2Cu$)。对于合金C,峰1、3、5、6分别对应的是初生 Mg_2Si 析出、

图8 初生Si和 Mg_2Si 平均尺寸随Mg含量的变化曲线Fig. 8 Effect of Mg content on the mean particle sizes of primary Mg_2Si and Si

$Mg_2Si+Si+\pi-Al$ 三元共晶反应、 $Q-Al_5Mg_8Cu_2Si_6$ 析出以及 $\theta-Al_2Cu$ 。在合金D凝固,前两个峰对应的是初生 Mg_2Si 的析出以及 $Mg_2Si+\pi-Al$ 二元共晶反应,峰3和5分别是 $Mg_2Si+Si+\pi-Al$ 三元共晶反应和 $Q-Al_5Mg_8Cu_2Si_6$ 析出,峰6则是析出 $\theta-Al_2Cu$ 。在合金C和D中,虽然没有明显的 $\pi-Fe$ 相的析出峰,但在微分曲线中峰3和5之间有一定的波动,这说明在此过程确有Fe相的反应。而在微观组织中也发现有Fe相的存在。这有可能是合金A和B中的Fe含量比合金C和D要高得多,以至于合金C和D中形成的 $\pi-Fe$ 的含量不足以释放足够的热量来产生明显的峰。

在实际的合金熔炼中不可避免地有Fe元素的存在,在实际元素成分测试结果也表明合金中含Fe元

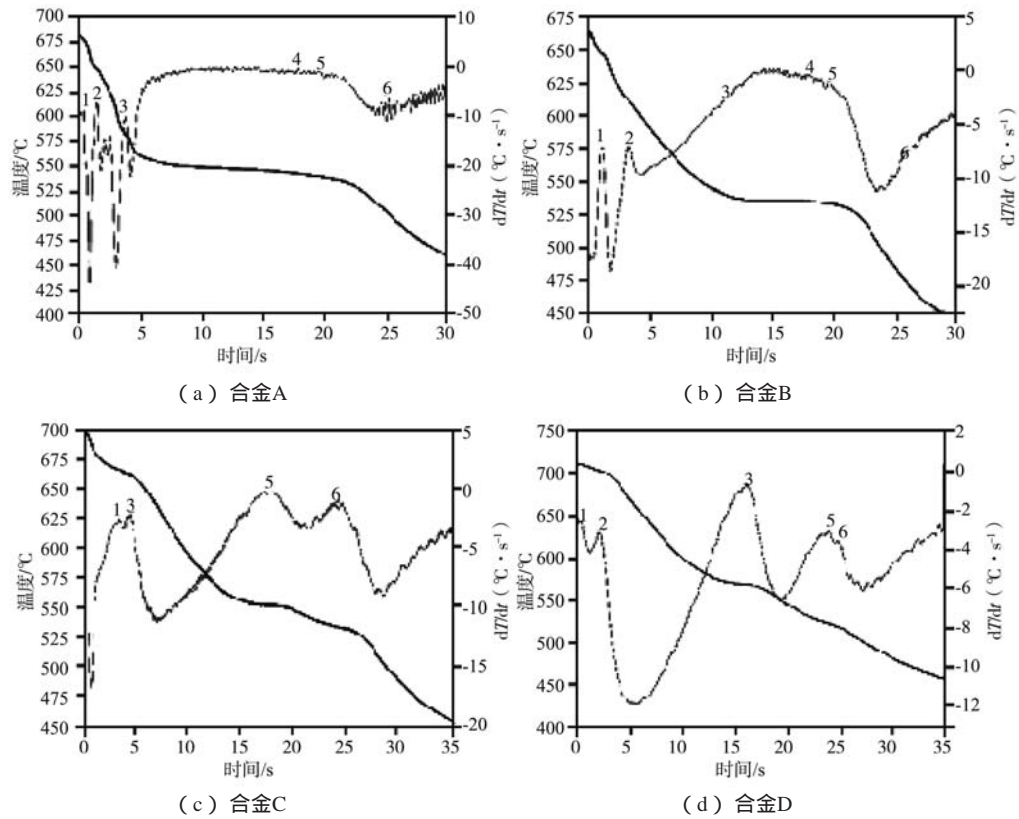


图9 凝固曲线及一次微分曲线分析

Fig. 9 Temperature vs time cooling curves and their first derivatives

素，例如合金A中Fe含量为0.189%，因此从合金所含元素中即可推断组织中应该有含Fe相的存在。图10是合

金A的SEM图，对图中汉字状的相进行EDS分析，从原子组成分析，此相与 $\pi\text{-Al}_8\text{Mg}_5\text{FeSi}_6$ 非常接近，同时根据文献 [9-10] 对比可知，此相为Fe相。

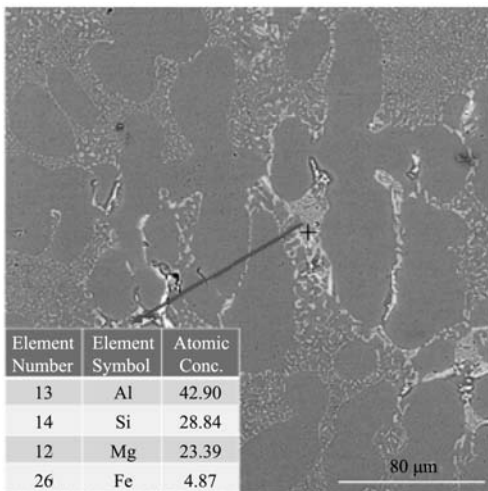


图10 合金A中的Fe相 ($\pi\text{-Al}_8\text{Mg}_5\text{FeSi}_6$)

Fig. 10 Fe-rich phase in the alloy A

3 结论

(1) Thermo-Calc模拟计算表明Al-Si-Cu-Mg合金凝固过程中存在六个反应：初生 Mg_2Si 析出； $\text{Mg}_2\text{Si}+\text{Si}$ 二元共晶析出； $\text{Mg}_2\text{Si}+\text{-Al}$ 二元共晶析出； $\text{Mg}_2\text{Si}+\text{Si}+\text{-Al}$ 三元共晶析出； $\text{Mg}_2\text{Si}+\text{Si}+\text{-Al}+\text{Q-Al}_5\text{Mg}_8\text{Cu}_2\text{Si}_6$ 四元共晶析出； $\text{Mg}_2\text{Si}+\text{Si}+\text{-Al}+\text{Q-Al}_5\text{Mg}_8\text{Cu}_2\text{Si}_6+\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$ 形成。

(2) Mg含量显著影响初生 Mg_2Si 相的生长。随着Mg含量的增加，初生 Mg_2Si 相由八面体转变为小平面枝晶状。Mg含量17.2%时， Mg_2Si 相的形貌发生转变。继续增加Mg含量， Mg_2Si 颗粒变得更加粗大。

参考文献:

- [1] 杜阳, 索忠源, 路大勇. 过共晶Al-Mg₂Si合金材料研究进展 [J]. 吉林化工学院报, 2020 (11) : 24-27.
- [2] 王冰坤, 毛卫民, 范菁, 等. Sr变质对蛇形通道浇注Al-22Si-Cu合金组织的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2020 (2) : 169-173.
- [3] 谭震林, 周全, 张连腾, 等. 锶和硼复合变质对Al-Si-Cu-Mg合金组织及力学性能的影响 [J]. 机械工程材料, 2020 (9) : 24-30.
- [4] 高续森, 郭永春, 马志军, 等. 冷却速度对多元铝硅铸造合金组织与性能的影响 [J]. 稀有金属, 2020 (4) : 394-400.
- [5] OKAYASU M, TAKEUCHI S. Crystallization characteristics of cast aluminum alloys during a unidirectional solidification process [J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 633 : 112-120.
- [6] ALIREZA, HEKMAT-ARDAKAN, GERVAIS. Microstructural evolution of cast iron used for cathode rodding in aluminium electrolysis cell [J]. Minerals, Metals and Materials Series, 2016, 210869 : 1305-1309.
- [7] HEKMAT-ARDAKAN A, AJERSCH F. Effect of conventional and rheocasting processes on microstructural characteristics of hypereutectic Al-Si-Cu-Mg alloy with variable Mg content [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210 : 767-775.
- [8] JAYAKUMAR E, VARGHESE T, RAJAN T P D, et al. Reciprocating wear analysis of magnesium-modified hyper-eutectic functionally graded aluminium composites [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2019, 72 : 1643-1649.
- [9] 迟长志, 燕永文. Mg、Cu、Si元素含量对过共晶铝硅合金组织与性能的影响 [J]. 兵器材料科学与工程, 2013 (6) : 55-57.
- [10] 梅静, 李林鑫. Mn、P与冷却速度联合作用对高铁过共晶铝硅合金组织和硬度的影响 [J]. 热加工工艺, 2016 (45) : 79-81.
- [11] 李荣德, 何昌国. 稀土对Al-Si-Cu-Mg合金组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2008 (8) : 818-822.
- [12] 胡欧林, 李鹏飞. Mg和Cu含量对Al-Si-Mg系合金组织和性能的影响 [J]. 上海金属, 2019 (41) : 20-24.
- [13] 李英民, 马鸣檀, 任玉艳, 等. 稀土La掺杂Mg₂Si的几何结构、弹性性能和电子结构的第一性原理研究 [J]. 材料工程, 2020 (48) : 100-107.
- [14] 张硕, 陈元筠, 王军长, 等. Al-Si-Cu-Mg合金铸造-热处理一体化新工艺研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019 (39) : 128-132.

Effect of High Mg Content on Solidification Process and Microstructure Evolution of Al-Si-Cu-Mg Alloy

CHEN An-zhu¹, ZHOU Peng-fei^{1,2}, LU Cong-xiang¹

(1. Yancheng Vocational Institute of Industry Technology, Yancheng 224005, Jiangsu, China; 2. Material science and Engineering School, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, Jiangsu, China)

Abstract:

In the interests of pursuing the development of new wear-resistant alloys, the current study was undertaken to investigate the effects of Mg additions ranging from 8wt.% to 20wt.% on the solidification behavior and microstructure evolution of hypereutectic Al-17Si-4.5Cu-Mg alloy using thermodynamic calculations, thermal analysis, and extensive microstructural examination. The Mg level strongly influenced the microstructural evolution of the primary Mg₂Si phase as well as the solidification behavior. Thermodynamic predictions using ThermoCalc software reported the occurrence of six reactions, comprising the formation of the primary Mg₂Si; Two pre-eutectic binary reactions, forming either Mg₂Si+Si or Mg₂Si+α-Al phases; The main ternary eutectic reaction forming Mg₂Si+Si+α-Al; Two post-eutectic reactions resulting in the precipitation of the Q-Al₃Mg₈Cu₂Si₆ and θ-Al₂Cu phases, respectively. Microstructures of the four alloys studied confirmed the presence of these phases, in addition to that of the Fe-bearing phase. The morphology of the primary Mg₂Si phase changed from an octahedral to a dendrite form at 17.2wt.% Mg. Any further Mg addition only coarsened the dendrites. Image analysis measurements revealed a close correlation between the measured and calculated phase fractions of the primary Mg₂Si and Si phases. ThermoCalc and Scheil calculations were in good agreement with the experimental results obtained from the microstructural and thermal analyses.

Key words:

Al-17Si-4.5Cu-Mg; primary Mg₂Si; morphology; Mg content; solidification behavior