

Si 含量及模具温度对压铸 Al-Si 合金流动性的影响

李雪科¹, 田战峰¹, 汪建余², 葛素静¹, 谭卓², 杨保垒¹, 何更雷¹

(1. 河北新立有色金属集团有限公司, 河北省轻金属合金材料技术创新中心,

河北省轻金属合金材料产业技术研究院, 河北保定 071100;

2. 一汽-大众汽车有限公司规划部, 吉林长春 130011)

摘要: 在真空压铸机上配置了压铸流动性试验模具, 制备了压铸流动性样品, 通过对金属液流动长度和凝固后金相组织检测分析, 研究了Si元素含量及模具温度对Al-Si铸造合金流动性的影响。结果显示, 在同一压铸工艺条件下, Si含量由7%增加至8%, 压铸样品流动长度快速增长, Si含量8%以后增长缓慢, 在Si含量为9%时样品流动长度达最大值1 285 mm; 在相同Si含量条件下, 随着模具温度的上升, 压铸样品流动长度呈线性增加, 在模具温度180 °C时可达1 481 mm; 经过对比, 模具温度150 °C时样品边部微观组织较180 °C更加均匀。

关键词: Al-Si铸造合金; Si元素含量; 模具温度; 流动性; 微观组织

铝合金压铸工艺在汽车制造中主要应用于发动机缸体、缸盖等零部件。然而在电动车上特斯拉开启了车身一体化压铸技术的先河, 给车身制造带来了一次技术革新^[1]。一体化压铸工艺是将汽车身上多个结构复杂的零件进行优化, 使用一个或者几个大型零件替代^[2]。因此新能源汽车行业的蓬勃发展为国内一体化压铸铝合金材料研发和超大型一体化压铸设备制造提供了行业发展驱动, 同时“节能减排”与“新能源化”汽车产业的国家政策扶持为合金材料开发、工艺装备制造、汽车产业升级换代和国际市场开拓提供了稳定高效的发展前景^[3]。

随着我国装备水平的提升, 如力劲集团压铸机锁模力从6 000 t到16 000 t的突破发展, 为大型一体化压铸结构件发展夯实基础^[4]。同时铝合金压铸成形的重要影响因素之一, 即铝合金熔体的充型能力, 直接决定了压铸充型完整性, 还会对铸件最终的组织 and 力学性能产生影响^[5]。铝合金液体的充型能力首先取决于铝合金材料本身的流动能力, 同时又受铸造工艺、浇注条件和铸件结构等因素的影响^[6]。合理的压铸工艺使合金充满薄而复杂的模腔, 减少铸件中热裂、气孔、缩孔和缩松等缺陷。因此, 良好的流动性是获得优质铸件的基本条件。

除了工艺和装备外, 一体化压铸成形制造对材料提出了更高的技术要求。当前一体化压铸免热处理材料以Al-Si系为主, 国内免热处理压铸铝合金的研究, 如立中集团、帅翼驰、瑞格和鸿图等单位以Al-Si系铝合金为主^[4], 少数开发Al-Mg系合金^[5]。Al-Si系铸造合金由于具有较好的流动性, 成为大型薄壁一体化复杂构型压铸件的首选^[6]。良好的流动性能使铸件在凝固末期减少疏松、缩孔甚至热裂等缺陷, 使得合金可以充满大型薄壁复杂结构铸件的型腔, 获得合格的铸件。文献报道Si含量与Al-Si合金流动性关系^[7], 随着Si含量增加流动性先降低后升高, Si含量在18%左右时流动性出现最高点, Si含量持续增加流动性反而降低。研究表明, 相同的过热度条件下, Si含量在1.65%~12.6%之间, 亚共晶合金Si含量增加流动性持续增加^[8]。

目前对于新能源汽车车身底盘向电芯直接集成于车辆底盘的工艺(CTC)发展, 大型一体化压铸件尺寸将越来越大, 构型将越来越复杂, 对压铸Al-Si系合金的

作者简介:

李雪科(1994-), 男, 硕士, 中级工程师, 主要研究方向为铝合金新材料开发与制备。电话: 18104993365, E-mail: lixueke@lizhong.com.cn

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

09-1256-07

收稿日期:

2024-12-05 收到初稿,
2025-03-16 收到修订稿。

充型能力也是一项挑战^[1]。因此研究Si元素含量及模具温度对合金压铸流动性的影响,对今后一体化压铸技术发展有一定指导意义。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

Al-Si合金的共晶点Si含量为12.6%,而目前市场上常用的典型Al-Si系免热处理合金Si含量在6%~11%范围内,如美铝C611、莱茵Castasil-37和麦格纳Aural 6等^[4],均在亚共晶范畴。根据研究表明,在亚共晶范围内铸造铝合金流动性随着Si含量的增加而增加,又因常用免热处理材料主要元素种类基本相同,本次试验主要在国标AlSi7MnMg的成分基础上,通过调整Si元素含量7% (A组)、8% (B组)、9% (C组)、10% (D

组),研究Si含量增加对压铸流动性的影响。

1.2 熔炼过程

将预先准备的工业铝锭 (Al 99.97%)、443工业硅、Al-10Mn和Al-10Ti中间合金置于150 kg压铸机机边炉中,由室温升至750 ℃;待完全熔化后,将事先准备的金属镁加入铝液并充分溶解后,加入四通新材生产的STJ-A1精炼剂进行搅拌并扒去表面浮渣;静置5 min后,控制石墨棒通入高纯氦气 (控制流量20 L/min) 20 min。在除气过程中将Al-10Sr杆投入铝液中进行变质处理,之后采用OBLF QSG750-II铝镁基直读光谱仪检测合金成分,如表1所示。结合JMatPro软件v12.4计算表1合金成分在700 ℃至室温过程中固相率变化,分析不同Si含量对流动性的影响。

表1 不同Si含量合金化学成分
Tab. 1 Chemical compositions of alloys with different Si contents

合金	Si	Fe	Mn	Mg	Ti	Sr	杂质	Al
A	7.02	0.11	0.52	0.14	0.07	0.021	< 0.05	余量
B	8.08	0.11	0.51	0.13	0.06	0.019	< 0.05	余量
C	9.05	0.10	0.49	0.13	0.06	0.018	< 0.05	余量
D	10.06	0.11	0.49	0.12	0.05	0.020	< 0.05	余量

1.3 试验方法

使用东洋BD-350V5型真空压铸机进行试验。为了考察不同模具温度对压铸铝合金材料的压铸流动性影响,以C组Si9%为压铸合金,模具温度设置为120 ℃、150 ℃和180 ℃。在Si含量影响的研究中,将模具温度设置150 ℃,铝液浇注温度700 ℃,冲头低速速度设置为0.15 m/s,高速速度为4 m/s,模具材料为H13钢,涂料为压铸用脱模剂。压铸开始前先进行试模5件,计数开始时每次压铸5件试样。待A组试验完成后,重新在铝液中添加Al-40Si中间合金进行配料,将Si7%增加到Si8%,进行后续压铸试验。C组和D组按此循环进行,成分调整过程中Sr和Mg元素会有一定烧损,需要在试验过程及时补充到同一水平。

压铸流动区总长为1 746.4 mm,压铸样品的宽度×厚度为12.5 mm×3 mm,压铸试样如图1所示,将压铸的流动性样品放置在专用的量具上测量流动长度。将样品不同位置取截面小试样,切好样品经打磨抛光后置于Axio Imager M2m蔡司金相显微镜下观察其微观组织变化。

2 试验结果

2.1 压铸流动性对比

图2为不同Si含量合金的压铸样品流动长度对比。

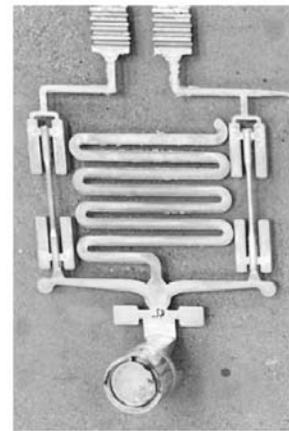


图1 压铸流动性样品

Fig. 1 Die casting fluidity sample

在模具温度150 ℃的条件下,随着Si元素含量的上升,金属液的流动长度先极速增长后增长缓慢,其中Si含量为9%和10%的流动长度相当,在Si含量9%时出现最大值1 285 mm。图3为JMatPro软件计算不同Si含量合金固相率结果, Si含量分别为7%、8%、9%和10%时液相线温度分别为616.4 ℃、609.5 ℃、602.5 ℃和595 ℃,固相线温度分别为567 ℃、565 ℃、558.9 ℃、557.5 ℃,固液相线温度差分别为49.4 ℃、44.5 ℃、43.6 ℃和37.5 ℃,随着Si含量的升高结晶区间变窄。研究表明^[9-11]合金的

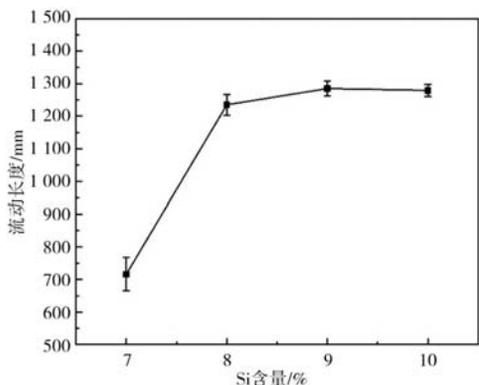


图2 模具温度150 °C下不同Si含量合金的压铸样品流动长度对比
Fig. 2 Comparison of flow lengths of die casting samples of the alloys with different Si contents at a mold temperature of 150 °C

结晶温度范围变窄， α -Al晶粒生长时间缩短，枝晶网络逐渐退化，为共晶液相提供更顺畅的流动通道提高补缩能力，因此Si含量7%~9%，如图3 (a)至 (c) 所示，流动呈上升趋势。但在Si含量增加到10%时，如图3 (d) 所示，铝液中会在608 °C先析出少量AlSiMnFe相，此时铝液粘度增加，因此Si10%与Si9%流动性相当。

图4为不同模具温度条件下的压铸流动长度对比。Si含量为9%的合金随着模具温度的升高，合金液的流动长度基本呈现线性增长，在模具温度180 °C时流动长度达到最大值1 481 mm。从检测数据方差来看，模具较低温度时压铸流动性数据波动相对较大，模具温度升高有改善熔体流动长度稳定性作用。模具温度直接

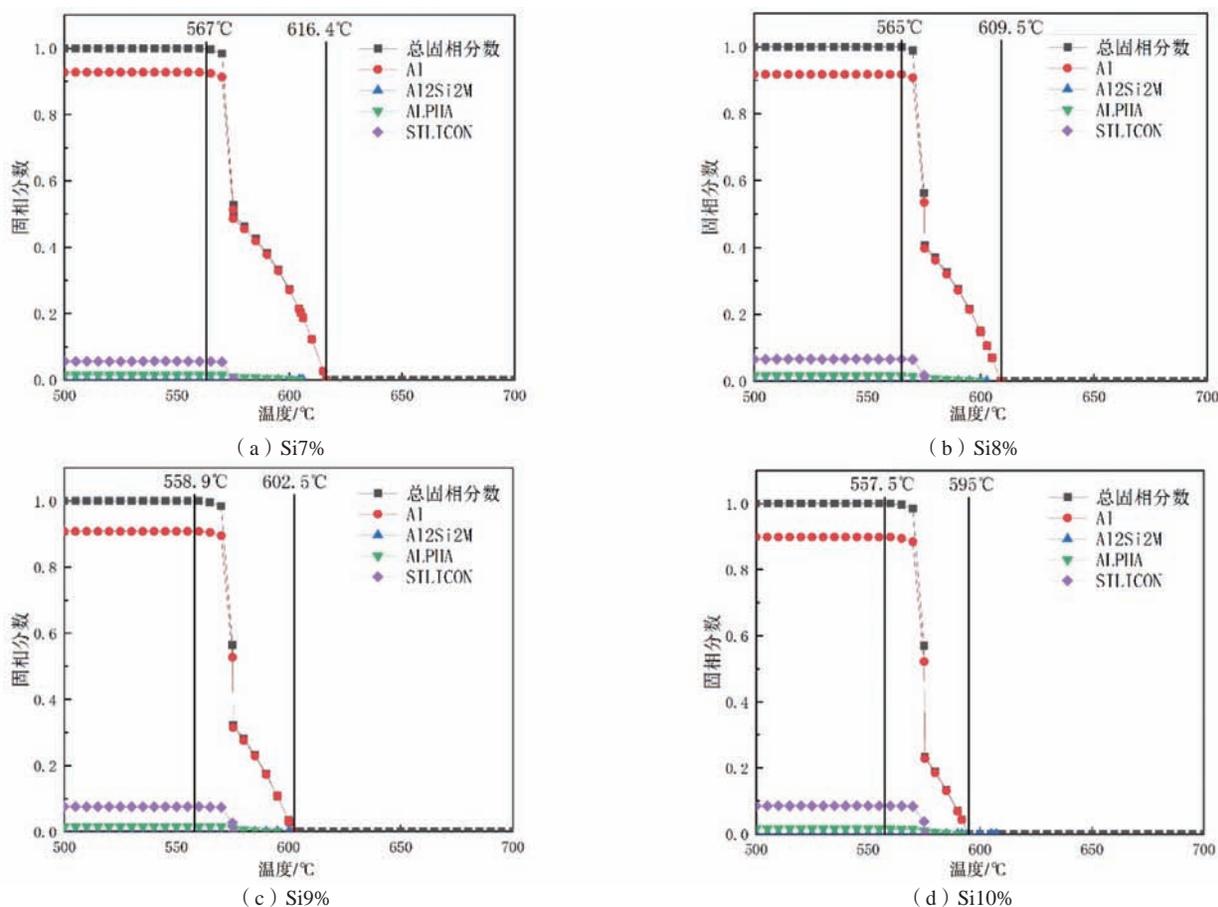


图3 不同Si含量合金JMatPro软件固相率计算结果

Fig. 3 The calculation results of solid fractions using JMatPro software for the alloys with different Si contents

影响合金熔体在模具型腔的散热速度，因此对于压铸流动的影响比较明显。

2.2 不同 Si 含量下金相组织对比

压铸流动性表现为合金液体充填铸型的能力，合

金液凝固前流动的最大距离。流动的长短从数据可以直观对比，从凝固后的微观组织也可以分析金属液的流动性大小。液态金属流动停止机理表明^[12-13]，流动区分为过热金属区、生核过渡区和结壳堵塞区。图5为Si含量7%和9%试样的100 mm位置200倍金相即过热金属

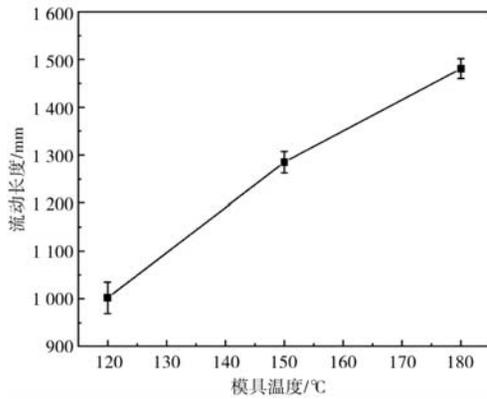


图4 Si含量为9%合金在不同模具温度下的流动长度
Fig. 4 The flow lengths of alloys with 9% Si content at different mold temperatures

凝固区。从图5 (a) 和 (c) 边部对比发现, Si7%样品组织中枝晶发达, 且边缘部位出现粗大共晶Si相, 而含Si9%合金组织中 α -Al晶粒细小且组织较均匀, 两种组织中均存在弥散分布5 μm 左右粒状AlSiMnFe相。对比图5 (b) 和 (d) 芯部, 同样Si7%样品组织 α -Al晶粒与共晶Si组织更加粗大, 而Si9%组织表现均匀, 粒状AlSiMnFe相均较少。这是因为Si7%时合金的结晶范围宽, 在过热金属区 α -Al晶粒与共晶Si形核过度长大, 而Si9%时结晶范围窄凝固时间短, 粗大的 α -Al晶粒减少, 而共晶Si组织同样细小, 因此Si9%组织整体表现为均匀。因AlSiMnFe相结晶温度600 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 边部较芯部温度下降快, 因此边部析出AlSiMnFe相多而芯部较少。

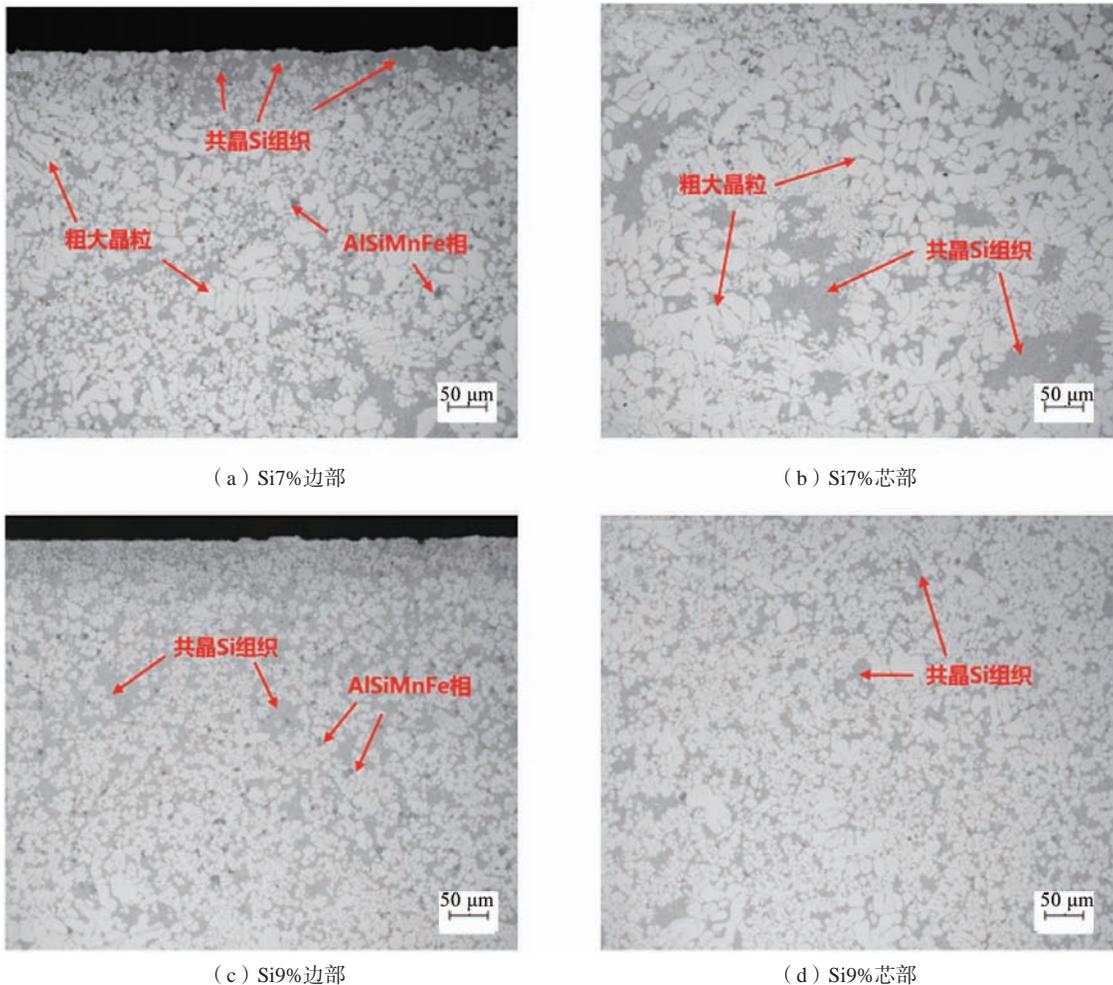


图5 Si含量7%和9%合金流动长度100 mm位置金相对比

Fig. 5 Metallographic comparisons of alloys with Si contents of 7% and 9% at the positions of flow length of 100 mm

图6为Si含量7%和9%试样的600 mm位置200倍金相。对比图6 (a) 和 (c) 边部发现, 因Si7%时流动性偏低, 流动尾端铝液温度较低出现共晶Si的偏聚区,

因为在液体流动过程中前端铝液不断与模具进行热交换, 率先温度降低至液相线以下, 铝液中形成大量细小晶粒, 因此组织出现细化^[14-17], 而Si9%组织较大。

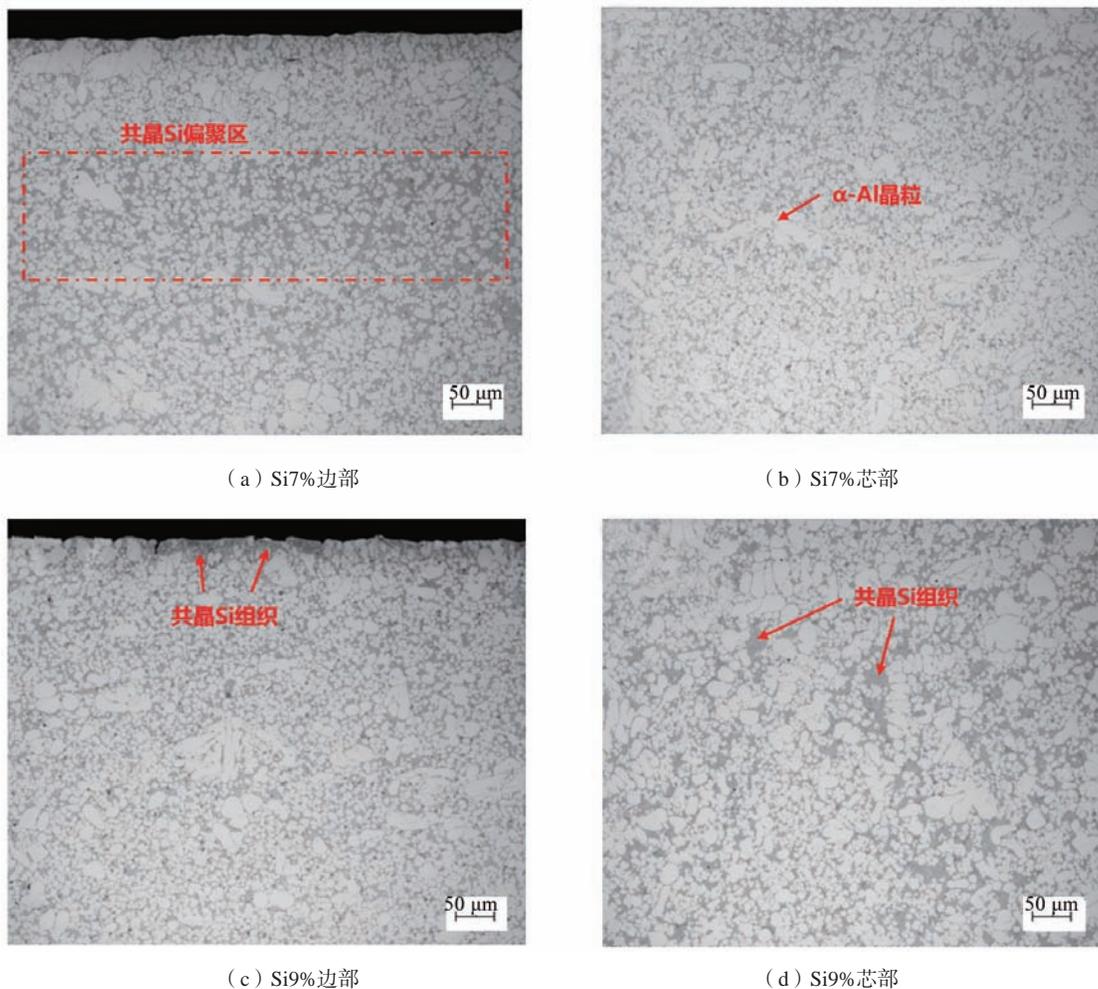


图6 Si含量7%和9%合金流动长度600 mm位置金相对比

Fig. 6 Metallographic comparisons of alloys with Si contents of 7% and 9% at the positions of flow length of 600 mm

前端铝液中细小晶粒增多,随着温度降低导致铝液粘度增加,使铝液流动性受阻,也是Si7%时样品流动较差的原因。对比图6(b)和(d)发现,晶粒与共晶Si组织同样Si9%样品较Si7%粗大,此位置未接近Si9%流动尾端,此时铝液温度较高能够支撑其有较好流动长度。

2.3 不同模具温度下金相组织对比

从对不同Si含量流动性影响看,边部组织随位置变化明显,相对芯部更能解释流动性长短原因,因此只取流动性较好的Si9%试样边部金相组织进行对比。图7为Si9%时不同模具温度与300 mm和900 mm位置下的边部200倍金相。对比图7(a)至(c)中300 mm位置发现,模温120 °C、150 °C和180 °C时枝晶臂间距分别为13.2 μm、15.7 μm和20.3 μm。随着模温的升高,α-Al晶粒逐渐增大,同时共晶Si组织和AlSiMnFe相出现粗化,这是因为模温的升高,降低了铝液和模具的

温度差,降低了铝液与模具的热交换,因此晶粒和第二相等组织较粗大。对比图7(d)至(f)中900 mm位置发现,共晶Si组织有明显变化,在120 °C时流动长度为1 002 mm。该位置接近铝液停止头部,因为铝液流动,头部不断与模具进行热交换,温度迅速下降至液相线下形成大量细小晶粒,越靠近边部冷却越快,边部先结晶α-Al,导致Si原子向内部液相区富集形成共晶Si出现偏析^[18-19]。模温150 °C时流动长度为1 285 mm,900 mm位置出现大量细小等轴晶粒,共晶Si与AlSiMnFe相明显细化均匀。模温180 °C时流动长度1 481 mm,900 mm位置α-Al晶粒和AlSiMnFe相与模温150 °C相比变化较小,但共晶Si组织较粗大,这是因为模温高时铝液冷却速度慢,共晶Si组织粗大。

3 结论

通过真空压铸流动性试验并结合金相分析研究了Si元素含量及模具温度对Al-Si铸造合金的流动性影

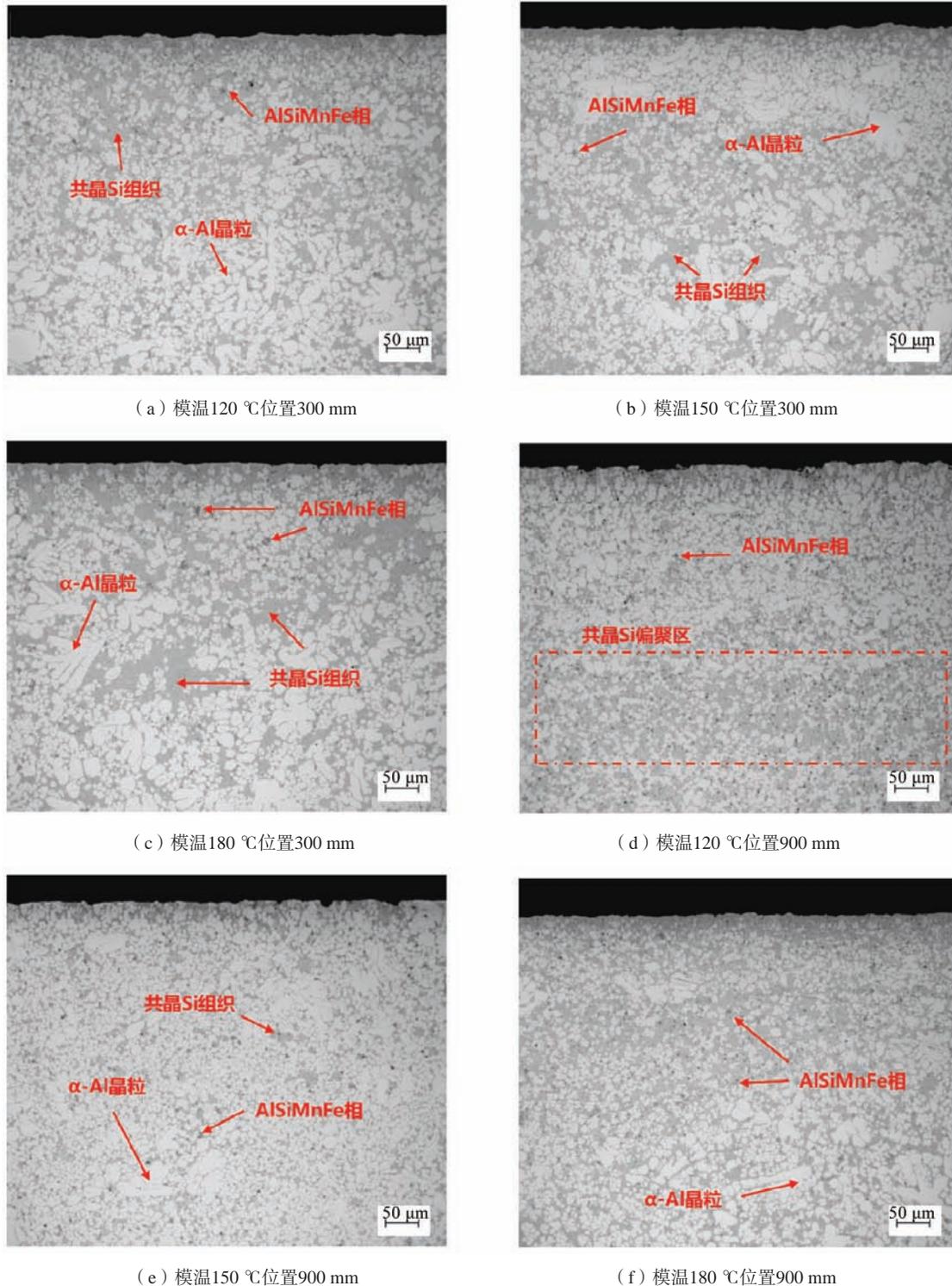


图7 合金Si含量9%时不同模具温度和不同位置的边部金相对比

Fig. 7 Comparisons of metallographic structures at edge positions with different mold temperatures and positions when the Si content of alloy is 9%

响, 得到以下结论。

(1) 在模具温度150 °C下, Si含量由7%增加8%, 压铸样品流动长度快速增长, Si含量8%以后增长缓慢, 在Si含量9%时样品流动长度达最大值1 285 mm。

(2) Si含量为9%的Al-Si铸造合金, 随着模具温度从150 °C提高到180 °C, 压铸样品流动长度呈线性增加, 在模具温度180 °C时为1 481 mm, 但模具温度150 °C时样品边部微观组织较180 °C更加均匀。

参考文献:

- [1] 杨仕聪. 电动汽车轻量化技术的应用探讨 [J]. 专用汽车, 2023 (9): 16-18.
- [2] 樊振中, 袁文全, 王端志, 等. 压铸铝合金研究现状与未来发展趋势 [J]. 铸造, 2020, 69 (2): 159-166.
- [3] 罗婷瑞, 樊振中, 胡惠翔, 等. 新能源汽车用一体化压铸铝合金研究现状与发展趋势 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43 (11): 1472-1478.
- [4] 黄华, 但昭学, 朱宇, 等. 一体化压铸免热处理铝合金研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44 (8): 1054-1061.
- [5] 姜玉敬. 我国免热处理铝合金及其一体化压铸行业呈高质量快速发展态势 [J]. 中国有色金属, 2023 (20): 66-68.
- [6] 李先洲. 铝合金一体化压铸技术浅析 [J]. 铸造, 2023, 72 (4): 462-465.
- [7] LANG G. The relation between phase diagram and fluidity [J]. Aluminum, 1972, 48: 664-672.
- [8] 侯文生. 铸造合金流动性的电测 [J]. 铸造工程, 2001, 25 (1): 22-25.
- [9] 牛艳萍, 赵禹凯, 王顺成, 等. Si含量对Al-Si-Mg合金铸造流动性、热导率和力学性能的影响 [J]. 铸造, 2016, 65 (4): 366-370.
- [10] 刘挺. 薄壁铸造铝合金流动性的影响因素 [J]. 新疆有色金属, 2011 (A02): 86-88.
- [11] 李大奎, 刘闪光, 乔彦龙, 等. 铸造Al-Si合金流动性和热裂敏感性的研究现状 [J]. 热加工工艺, 2022, 51 (3): 7-12.
- [12] 叶荣茂, 蒋烈光, 蒋祖龄, 等. 液态金属停止流动机理的探讨 [J]. 金属科学与工艺, 1983 (4): 44-53.
- [13] 韩青有. 压铸条件下合金流动停止机理 [J]. 铸造, 2024, 73 (10): 1378-1385.
- [14] 龚举波. 铝合金压铸充型流态动态演变过程研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [15] 宗福春, 葛素静, 钱伟涛, 等. 合金元素和浇注温度对AlSi9Cu3铝合金收缩率和流动性的影响 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (15): 45-50.
- [16] 邹国童. 铸造铝合金的流动性, 热裂倾向性和收缩率研究 [J]. 福建冶金, 2023, 52 (2): 31-34.
- [17] 朱必武. AlSi10MnMg薄壁铝合金件压铸流动行为及其组织力学性能 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [18] 曹丽云, 刘兴江, 杨晓平, 等. 冷却速度对共晶铝硅合金凝固组织形态的影响 [J]. 辽宁工学院学报, 2001, 21 (4): 40-42.
- [19] 杨璐. 新型Al-Ni-Si系铸造铝合金的流动性及阳极氧化特性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2024.

Effects of Si Content and Mold Temperature on the Fluidity of Al-Si Casting Alloys

LI Xue-ke¹, TIAN Zhan-feng¹, WANG Jian-yu², GE Su-jing¹, TAN Zhuo², YANG Bao-lei¹, HE Geng-lei¹

(1. Hebei xinlizhong Nonferrous Metals Group Co., Ltd., Hebei Light Metal Alloy Material Technology Innovation Center, Hebei Light Metal Alloy Material Industry Technology Research Institute, Baoding 071100, Hebei, China; 2. Faw-Volkswagen Automotive Co., Ltd., Changchun 130011, Jilin, China)

Abstract:

The die-casting fluidity test samples had been prepared through configuring fluidity test mold in a vacuum die-casting machine, investigating the effects of Si element content and mold temperature on the fluidities of Al-Si casting alloys by using of detection and analysis for the flow lengths of molten metal and metallographic microstructures after solidifying. The results show that under the condition of same die-casting process, when the Si contents increase from 7% to 8%, the flow lengths of the die-casting samples increase rapidly, but slow down after the Si contents are more than 8%, and the flow length of sample reaches its maximum value of 1 285 mm when the Si content is 9%; Under the condition of same Si content, as the mold temperatures increase, the flow lengths of die-casting samples increase linearly, reaching 1 481 mm at a mold temperature of 180 °C. After comparison, the microstructure of the sample edge is more uniform at a mold temperature of 150 °C than that at 180 °C.

Key words:

Al-Si casting alloy; Si content; mold temperature; fluidity; microstructure