

低硅铝合金热裂敏感性及其机理研究

员飞¹, 李凯¹, 周天鑫², 苗晓军¹, 吴小超², 赵平³

(1. 平高集团有限公司, 河南平顶山 467000; 2. 郑州大学材料科学与工程学院, 河南郑州 450000;
3. 河南平高电气股份有限公司, 河南平顶山 467000)

摘要: 为满足超高压大容量输变电设备对铸造铝合金导电性能的要求, 提升高压开关导体用铸造合金的成品质量, 作者研究了低硅铸造铝合金的热裂行为和力学性能。基于ProCAST对合金铸件充型、凝固和冷却过程进行模拟, 对该材料铸件的热裂应力以及热裂部位进行模拟预测, 同时结合约束杆法试验研究对比Si含量对合金热裂敏感性的影响规律。结果表明, 所预测的热裂敏感性随合金成分变化规律与试验结果相吻合, 当Si含量从0.4%提升至1.5%时, 热裂敏感系数从432降低至64, 同时热裂产生位置从中间杆向球端过渡, 合金抗拉强度提升约8%, 伸长率降低约14%。

关键词: 铝硅合金; 热裂敏感性; 数值模拟; 导电合金

传统的ZL101铸造铝合金由于价格低廉、组织各向同性、铸造性能好, 可以大批量生产而成为使用最多、应用范围最广的一类合金。但长期以来困扰和限制其在输配电领域应用的主要问题是ZL101铝合金的电导率一直没有得到明显提高, 无法满足现代高压开关工业高强度、高电导率发展方向的要求。通过改变合金中硅相的含量和形态, 使合金的晶粒得以细化改善合金的显微组织, 在此基础上合理优化合金元素配比和热处理工艺制度可以实现高力学性能和高电导率的双赢^[1]。但是随着合金含量调整, 热裂是低硅系铝合金铸造过程常见的缺陷, 是生产大型薄壁铝合金铸造导体急需解决的难题。

合金元素的添加对合金的强度和热裂敏感性具有较大影响^[2]。近些年来, 大量学者主要研究了合金元素对铝硅合金力学性能的影响, 而对其热裂敏感性的研究较少。因此, 研究Si等添加元素对高导电铝合金热裂敏感性的影响, 对得到同时兼顾导电性能好, 不易产生铸造裂纹的铝硅合金材料具有重要意义。本文结合数值模拟和约束杆试验系统地分析了低硅铝合金的热裂敏感性, 为开发铸造性能良好、能热处理强化、热裂倾向低的高导电铝合金提供依据。

1 试验材料和方法

试验采用纯铝锭、纯镁、铝硅中间合金和相关原料配制成6种合金成分的低硅铝合金, 本研究所用合金的实测化学成分如表1。首先, 纯铝锭在石墨坩埚中熔化, 熔炼后加入中间合金, 在720℃时加入精炼剂和铝锶中间合金进行精炼、变质; 将温度调至730℃保温20 min, 取出后再将熔融金属倒入预热温度为230℃的模具中。将整个模具进行组装, 预热后将浇注时将模具取出。热裂棒模具如图1所示, 模具材质为45号钢, 约束棒由一根竖直的29 mm的浇道和4根不同长度的直径为9.5 mm的水平圆棒组成, 棒长分别为51 mm、89 mm、127 mm、165 mm; 圆棒一端连接浇道, 另一端和直径19 mm的球端相连。当合金凝固时热裂棒产生收缩, 小球一端会约束阻碍热裂棒收缩, 从而产生热应力。拉伸试样和硬度试样采用T6热处理, 固溶温度525℃、时间6 h后进行60℃水淬处理, 180℃、6 h时效处理后空冷, 然后进行性能测试。

作者简介:

员飞(1993-), 男, 工程师, 主要研究方向为铝合金铸件的质量控制。E-mail: 13838257614@163.com

通讯作者:

吴小超, 男, 教授。E-mail: wuxiaochao@zzu.edu.cn

中图分类号: TG111.91;

TG113.25

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

09-1168-07

收稿日期:

2023-04-18 收到初稿,

2023-06-14 收到修订稿。

表1 试验铸件的化学成分

Table 1 Chemical components in the test castings $w_B/\%$

序号	Si	Mg	Mn	Zn	Fe	Sr	Al
a	0.41	0.5	0.02	0.01	0.11	0.04	余量
b	0.59	0.46	0.02	0.01	0.09	0.04	余量
c	0.85	0.44	0.03	0.01	0.12	0.04	余量
d	1.0	0.5	0.02	0.01	0.13	0.04	余量
e	1.21	0.44	0.02	0.01	0.12	0.04	余量
f	1.51	0.43	0.02	0.01	0.1	0.04	余量

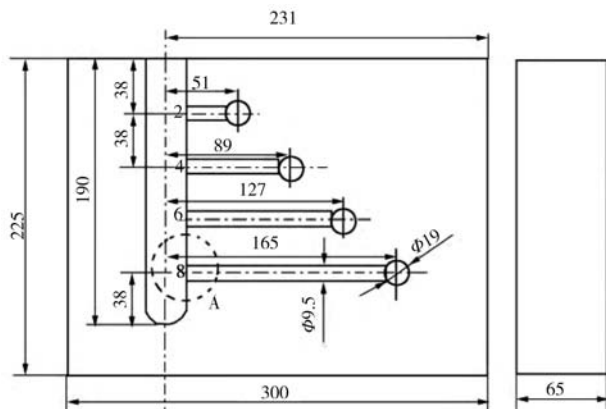


图1 热裂棒模具

Fig. 1 Hot tearing rod mold

合金的硬度采用HB-3000型布氏硬度机测试。合金的力学性能在CMT5305型电子万能试验机上测试，每种合金成分的拉伸试棒测试三根，规格按照GB/T 1173—2013中金属型单铸试样执行。金相试验使用0.5% HF溶液对研磨和抛光后的试样进行化学腐蚀，采用4XC蔡司金相显微镜进行分析，每组成分随机选取位置拍摄20张视图后进行共晶相面积占比统计。热裂试棒断口形貌采用JSM-6510LA型扫描电镜分析。模拟计算使用ProCAST铸造模拟软件。

本文热裂敏感性的试验测试采用“约束杆”钢模铸造法，合金的热裂敏感性（Hot tearing susceptibility, HSC）数学表达式如下^[3]：

$$HSC = \sum (f_{\text{length}} \times f_{\text{location}} \times w_{\text{crack}}) \quad (1)$$

式中： f_{length} 为棒长系数； f_{location} 为裂纹位置系数； w_{crack} 为热裂纹程度系数，其具体系数值如图2所示，该方法计算热裂敏感系数主要依据棒长、裂纹位置以及裂纹产生的程度。如图2a所示，热裂棒越长，合金凝固时的线收缩越短，应力集中较小热裂越不容易产生。随着长度减少，长度系数逐渐从4增加为8、16、32；位置系数也由产生热裂的难易程度决定，如图2b所示，根部为1，端部位2，中间部分为3；而裂纹程度系数，如图2c所示，截面几乎完全断裂为4，半断裂为3，小裂纹为2，微裂纹为1。

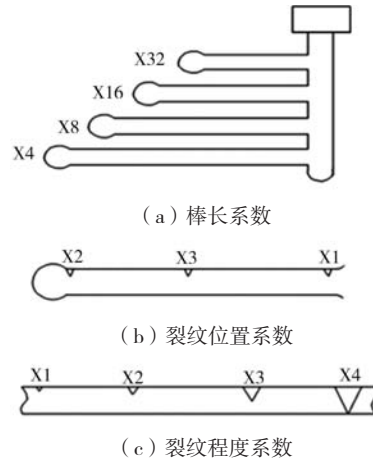


图2 热裂敏感性系数示意图

Fig. 2 Schematic diagram of hot tearing sensitivity coefficient

2 试验结果与分析

2.1 不同成分合金热裂数值模拟

热裂的数值模拟采用ProCAST进行：先在“mesh”模块进行热裂棒浇注模具的建立及面网格和体网格的划分，模具上下模为对称结构。然后通过“cast”模块对模型设置以下铸造参数：设置重力浇注方向向下；分别定义模具、合金的材质，试验所用不同合金成分的铝合金，其材料的物理、力学性能参数可以根据合金元素的含量通过ProCAST计算获得；设置不同材质界面间的换热系数，本研究设置金属模具与合金间换热系数为2 000 W/m²K；浇注温度为730 ℃，浇注时间为30 s，模具预热温度为230 ℃，冷却条件为空冷；模拟完成后在“view”模块观察并分析模拟结果。

热裂模拟结果如图3，图中颜色代表热裂发生的概率大小，HTI（Hot Tearing Indicator）颜色自下向上表明该部位发生热裂概率越大，在黄色或红色时为该部位容易产生热裂的区域，区域面积越大则热裂倾向越高。除热节部位外，其余位置为粉红色，表明其热裂发生的概率非常小接近于零。可以看出铸件热裂易出现部位集中在浇口端，铸件热节的长度从上往下递增，最上方第一热节最短其发生热裂的可能性最小，第四热节最长，其发生热裂的可能性最大。

对于不同合金成分的铸件，从图3a-c可以看出，图3a处第三、四热节有大面积深红色区域，说明其热裂概率大，随着Si含量增加至0.85%，图3c图第三热节处红色区域接近变黄、第四热节红色区域面积大幅减少；图3d-f热裂颜色和区域面积的变化趋势相同，当Si含量达1.51%时，第三热节处仅有少量黄色区域，第四热节热裂区域呈现浅红色，说明其热裂倾向相比a试样大幅降低。

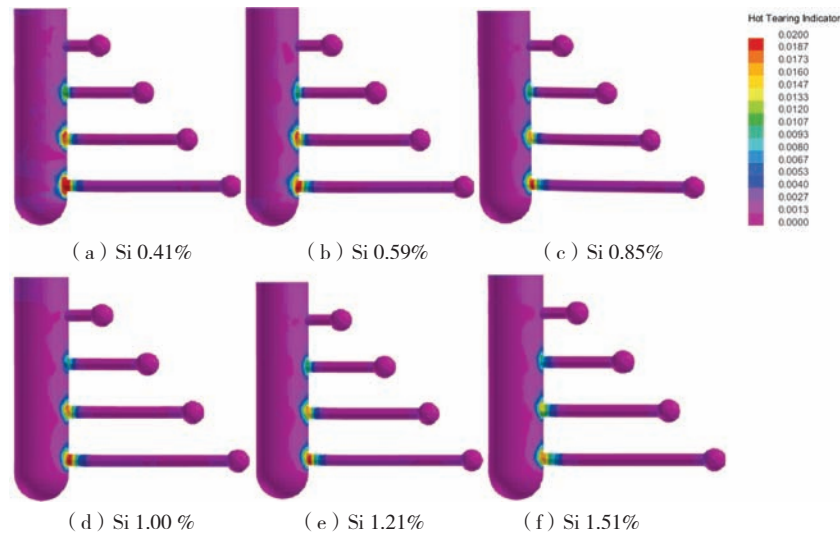


图3 不同合金成分的热裂数值模拟

Fig. 3 Numerical simulation of hot tearing of different alloy compositions

图4是ProCAST 模拟软件计算的合金浇注过程中温度、固相分数和热裂指数随时间变的曲线图,从图中可以看出六种合金的热裂指数变化趋势相同,当温度下降至一定程度,在凝固末期即固相率0.8~1时此时热裂指数达到最高点时会产生热裂纹,直至凝固结束。在凝固早期,枝晶虽然搭接,但大量的液态金属可以

补充枝晶间的凝固收缩,应力因此得到松弛,这一阶段被称为应力释放阶段,该阶段不易产生热裂纹。随着凝固温度的下降,到凝固末期由于残余液相数量较少,不足以补充枝晶间的凝固收缩,此时会产生热裂纹,这一阶段被称为晶间分离阶段^[4],该阶段容易产生热裂纹。

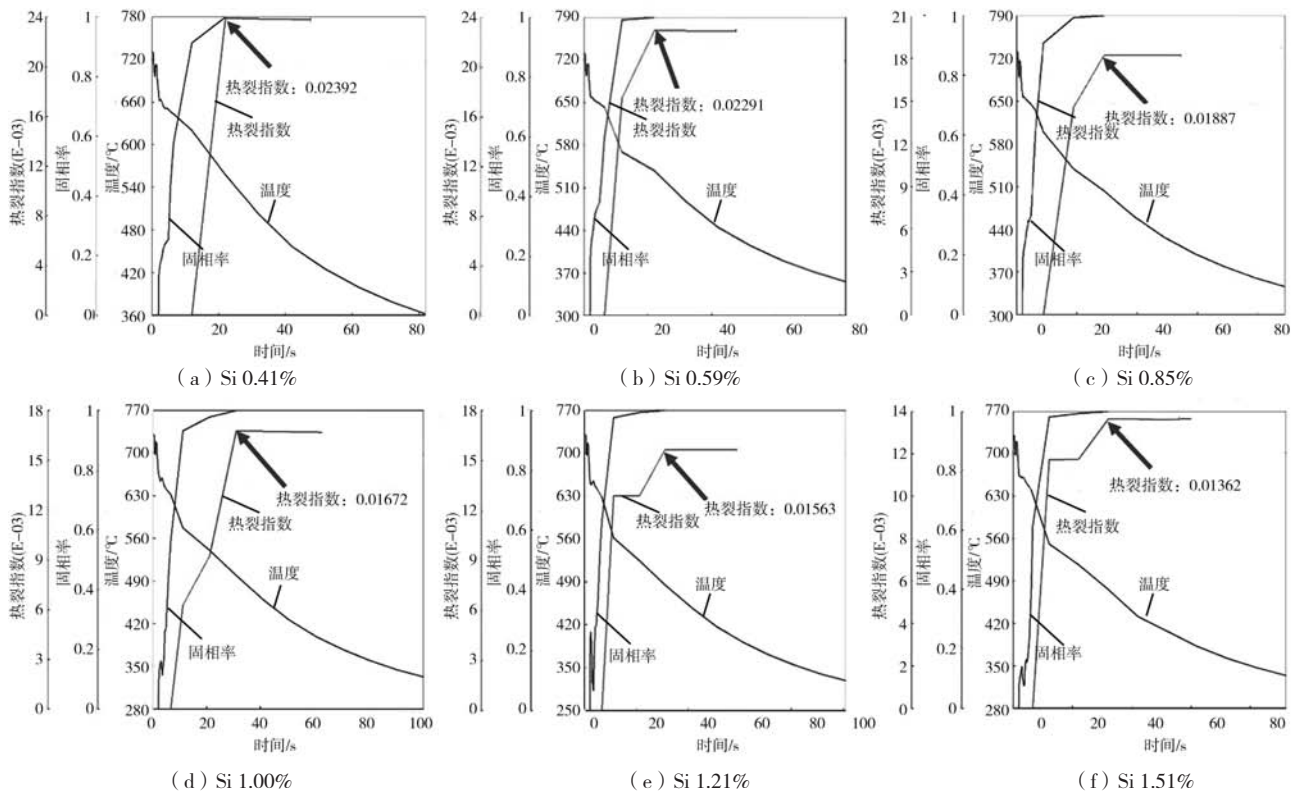


图4 不同合金成分的热裂数值模拟温度/固相率/热裂指数-时间曲线图

Fig. 4 Numerical simulation of hot tearing temperature/solid fraction/hot tearing index-time curve of different alloy compositions

图中模拟结果表明,当Si含量从0.41%升高至1.51%时,合金热节处产生热裂时的热裂指数(HTI)从0.023 92降低至0.013 62。表明随着Si含量的增加,合金热裂倾向明显降低。对于这一现象,从合金成分角度分析,由于热裂多数形成于共晶反应阶段^[5],对于一定近共晶成分的铝合金,并且合金共晶分数不同时,热裂倾向性大小也不同。随着Si含量上升,热裂产生时间从20 s趋向于40 s,发生热裂时对应的固相率逐步下降,当Si含量达到1.21%以后热裂指数曲线存在明显转折和平行过渡区,表明其后期共晶液相量是逐步增加的趋势,说明Si含量增加凝固后共晶液相有一定增加,产生热裂纹时残余液相分数越多则对热裂纹的补缩愈合作用越好。合金中形成了更多的Al-Si共晶相,当合金的微观组织共晶相增多,合金在凝固末期共晶反应增加使固相线温度降低合金流动性变好改善了合金的补缩效果,从而降低了热裂倾向,热裂倾向性会相应减小^[6]。另外从液膜理论^[7]分析,晶粒间存在的共晶液膜有利于晶系滑移,而Al-Si共晶团尺寸大小对共晶液膜的数量及分布有明显影响,Al-Si含量增加所

造成的液膜单位体积增多后有利于更好地分散集中应力,可推迟液膜在应力应变达到临界值发生破碎的时间点,有助于合金抗热裂性能的提升从而改变晶系滑移的难易程度,也直接影响合金的热裂敏感性。

2.2 合金热裂敏感性试验

采用约束杆方法对合金热裂敏感性进行研究,试验浇注的热裂棒试样如图5所示,从图5a可以看出,Si含量0.41%时热裂严重,下方三根热节完全断裂,最上方为半断裂状态,此时热裂指数为432。从图5a-d下方三根热节均断裂,但是断裂位置变化趋势明显,断裂位置从中间杆向球端过渡,其中图5a、b、c最上方热节处裂纹较深但未完全断裂,而图5d最上方裂纹深度变浅、宽度变窄,由半断裂变为微裂纹,按HSC评价方法此处裂纹程度由 $\times 3$ 降低为 $\times 2$,图5d试样中三处热节断裂均发生在球端。图5e相比图5a-d裂纹程度明显改善,最上方无裂纹,第二根热节靠近根部有微裂纹;当Si含量1.51%时,如图5f,上方两热节无裂纹,第三根热节靠近球端有小裂纹,根据式(1)计算可得,热

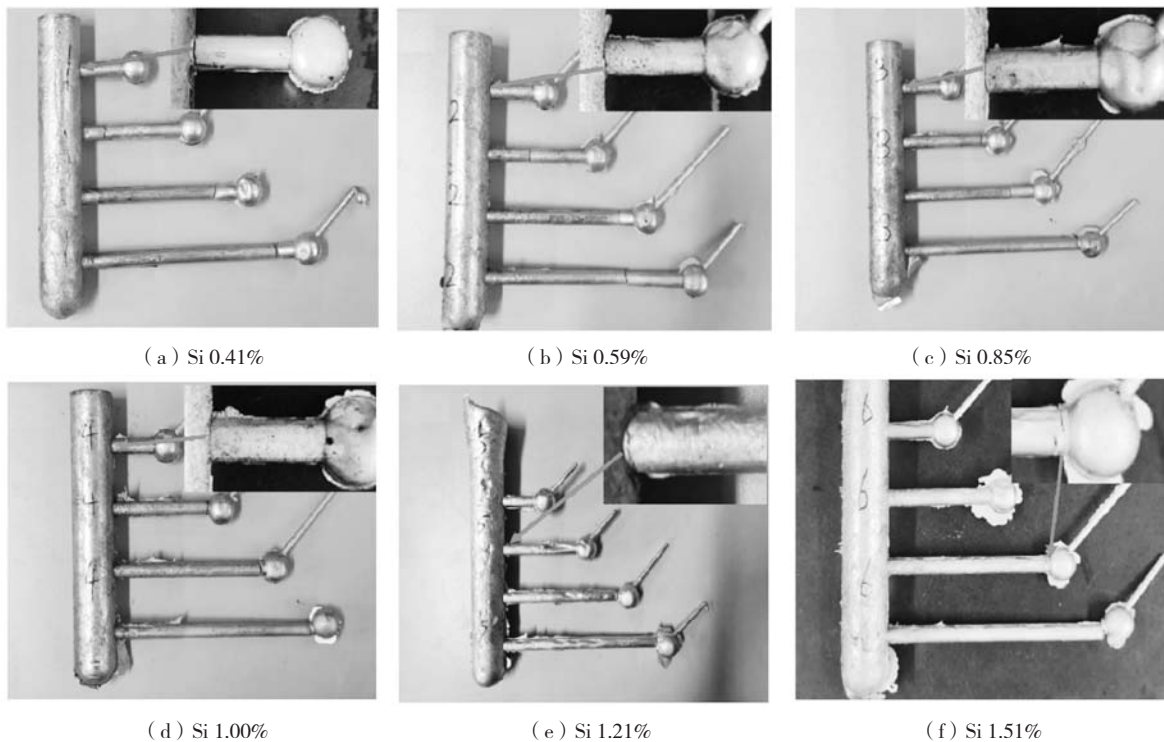


图5 不同合金成分的热裂棒试验结果

Fig. 5 Hot crack bar test results of different alloy compositions

裂指数为64。

不同合金成分的Procast模拟和试验结果变化趋势如图6所示。热裂模拟(HTI)和试验结果(HSC)总体变化趋势保持一致,随着Si含量上升热裂倾向降低。Si含量在1%以下时热裂试验所得不同合金的热裂

敏感性指数与Procast软件模拟预测的热裂敏感性变化保持一致,但是Si含量在1.00%(d试样)时出现转折点,试验结果(HSC)降低趋势明显大于热裂模拟值(HTI),此时合金的热裂倾向明显降低,考虑到铸造过程中热裂纹的产生一般应具备两个条件^[8]:第一是铸

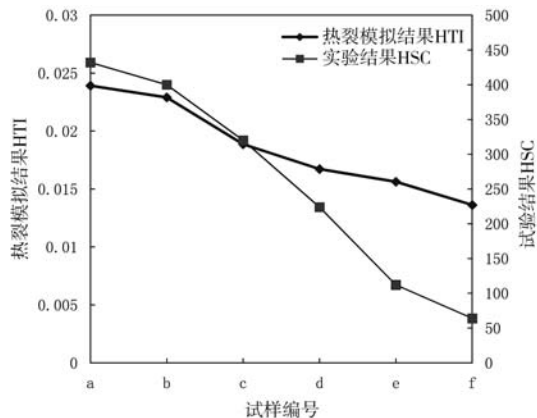


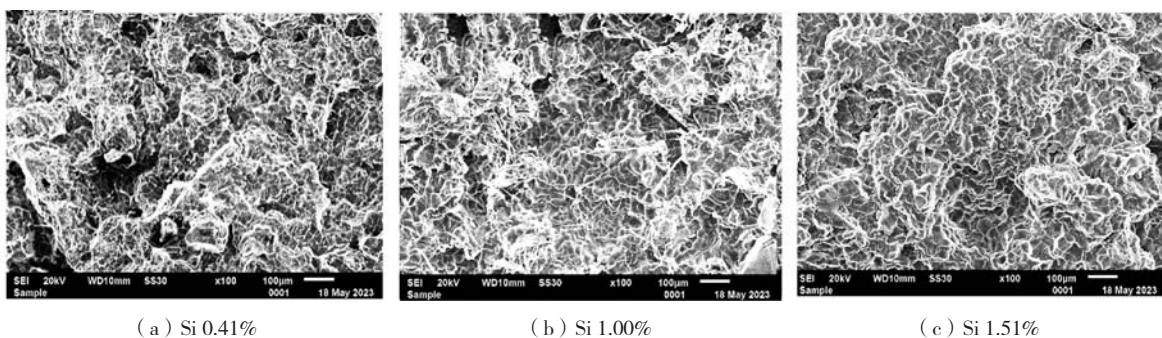
图6 不同合金成分的仿真和试验热裂结果对比

Fig. 6 Comparison of simulation and experimental thermal cracking results of different alloy compositions

件中部分区域存在较高的热应力和应变的集中区；第二是铸件中热应力和应变集中区域在凝固后期没有得到液态金属及时补缩。当铸件某些部位在凝固过程中产生的热应力和应变积累到一定极限值，且此时又缺少液态金属的补缩时，就会在这些部位产生热裂纹^[9]。综合应力和流动性两方面因素分析，由于Si含量的增加合金的强度有所增加，因此应力和应变集中区能够承受凝固后期的收缩应力，在较高的热裂力时才发生

断裂；另外，Si含量提升会使Al-Si-Mg合金铸造流动性获得提高^[10]，试验过程中在Si含量超过1.00%后，液态金属流动性的提升能够对热应力和应变及时补缩，从而避免热裂产生。

图7所示为典型的合金热裂纹断口扫描照片，图7a表明在Si含量0.41%时合金断口表面不平整、起伏大，枝晶自由表面较多、连续性差且面积小，说明枝晶之间结合力不足容易受收缩应力拉扯形成热裂纹，枝晶粗大说明凝固末期在固相线周围形成的共晶液相数量较少，并且粗大枝晶对残余液相补缩产生较大阻碍作用，因此热裂敏感性最高。当Si含量增加至1.00%时，图7b可以看出断口表面相对平整且较为光滑，变得连续且更厚，表明晶间结合力明显改善，而且凝固后期在枝晶周围形成的共晶液相数量有一定的增加，枝晶有所细化，细小的枝晶对液相的流动补缩更加有利，因此裂纹补缩能力得到加强。图7c表明Si含量提升至1.51%后热裂断口表面非常光滑，颗粒感强，晶粒表面没有明显撕裂痕迹，合金断口表面枝晶更加连续且更厚，说明在发生收缩撕裂时存在较多的液体，在凝固后期枝晶间低熔点共晶相有较多的残留，提高了对热裂纹的补缩能力，对热裂纹的扩展有一定阻碍作用，合金的热裂敏感性得到进一步改善。



(a) Si 0.41%

(b) Si 1.00%

(c) Si 1.51%

图7 典型热裂断口形貌

Fig. 7 Typical hot crack fracture morphology

2.3 合金组织和力学性能

采用T6工艺对随炉试棒进行热处理后测试力学性能，不同Si含量的合金力学性能见表2，结果表明随着

表2 不同合金成分的性能 (T6)

Table 2 Properties of different alloy compositions (T6)

序号	R_m /MPa	布氏硬度HB	伸长率/%
a	241	78	1.4
b	243	80	1.4
c	246	81	1.3
d	250	84	1.3
e	255	88	1.3
f	260	90	1.2

Si含量的增加，合金的硬度和抗拉强度也随之增加，伸长率降低。当Si含量为0.41%时，合金的抗拉强度为241 MPa，伸长率为1.4%；当Si含量上升为0.6%时，合金的抗拉强度、伸长率基本不变；当Si含量上升为0.85%时，合金的抗拉强度上升为246 MPa，伸长率降为1.3%；当Si含量为1%和1.2%时，抗拉强度进一步上升，而伸长率逐渐降低。当Si含量为1.51%时，相对于Si含量0.41%，合金的抗拉强度上升8%，而伸长率降低了约14%。

试验合金的金相组织如图8所示，可以看出Si含量提升后显微组织更均匀，共晶硅数量更多，统计后可知其面积占比从5.1%提升至14.2%。金属内部阻碍位错运动的能力逐渐增强，合金的抗拉强度提高，而塑性

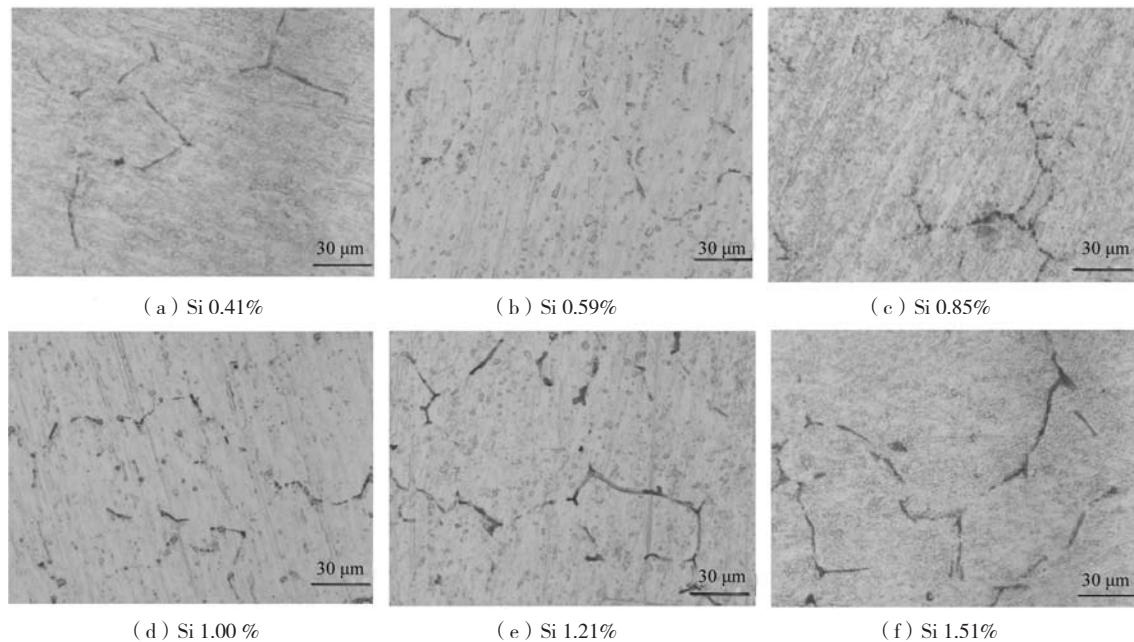


图8 不同合金成分的金相组织

Fig. 8 Metallographic structure of different alloy components

随之降低，主要的原因在于铸态组织中的共晶相增加了变形过程中位错的运动。另外合金中形成 Mg_2Si 强化相^[11]，起到了第二相强化的作用，Si含量增加，合金中形成的强化相增多。

力学性能和金相组织的变化同时反映了热裂性能试验结果，随着Si含量上升热裂倾向降低。由于Si含量的增加合金的强度有所增加，因此能够承受凝固后期的收缩应力，在较高的热裂力时才发生断裂；另外当合金的微观组织共晶相增多，合金在凝固末期共晶反应增加使固相线温度降低，合金流动性变好改善了合金的补缩效果^[12]，从而降低了热裂倾向。因此随着Si含量的增加，合金的热裂倾向降低同时硬度和抗拉强度也得到了提高。

3 结论

(1) 基于ProCAST预测的合金的热裂敏感性与实测的热裂参数变化规律一致，随着Si含量的增加凝固末期的共晶相增多，从而使凝固末期的固相线下降，合金流动性变好，凝固末期补缩效果增强，合金的热裂倾向减少。

(2) 根据约束杆试验结果，当Si含量从0.41%提升至1.51%时，热裂敏感系数从432降低至64，同时热裂产生位置从中间杆向球端过渡。

(3) 随着Si含量上升，合金强度和硬度提高，伸长率下降，Si含量从0.41%提高至1.51%时，合金的抗拉强度上升8%，而伸长率降低了约14%。

参考文献:

- [1] 史霞, 姚三九, 白霄, 等. Si、Cu、Mg元素对ZL101合金电导率和力学性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(12): 1162-1165.
- [2] 史明波, 李乘波, 杜军, 等. Mg对6061再生铝合金凝固特性和热裂行为的影响 [J]. 铸造, 2020, 69(4): 361-366.
- [3] ESKIN DG, SUYITNO, KATGERMAN L. Mechanical properties in the semi-solid state and hot tearing of aluminium alloys [J]. Progress in Materials Science, 2004, 49(5): 629-711.
- [4] 田帅, 杨化冰, 刘桂亮, 等. 纳米TiC_p对2024合金流动性及力学性能的影响 [J]. 铸造, 2018, 67(12): 1055-1059.
- [5] 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(12): 1336-1339.

- [6] 于文慧, 石磊, 张勇, 等. 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 [J]. 铸造, 2019, 68 (9): 988-991.
- [7] 白清领, 李宏祥, 庄林忠, 等. 铝合金熔铸热裂预测数值模拟研究进展 [J]. 铸造, 2013, 62 (1): 25-32.
- [8] 马士平, 闫成鑫, 于宝义, 等. RE对铸造Al-6Zn-2.5Mg-1.8Cu合金热裂倾向性的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (3): 326-330.
- [9] 胡悦高, 邵光杰, 杨弋涛. Si含量对6082合金热裂行为的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2008 (3): 221-223.
- [10] 陈冠, 杨荣凯, 张冰, 等. 铝合金电缆连接件用高性能棒材的微合金化研究 [J]. 铸造, 2018, 67 (10): 875-879.
- [11] 耿桂宏. 材料物理与性能 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2010.
- [12] 李梦妮, 罗干, 杜军. 合金元素与退火处理对Al-7Si-0.8Fe铸造铝合金导电和力学性能的协同影响 [J]. 中国有色金属学报, 2022, 32 (6): 1571-1578.

Research on Hot Tearing Sensitivity and Mechanism of Low Silicon Aluminum Alloy

YUAN Fei¹, LI Kai¹, ZHOU Tian-xin², MIAO Xiao-jun¹, WU Xiao-chao², ZHAO Ping³

(1. Pinggao Group Co., Ltd., Pingdingshan 467000, Henan, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, Henan, China; 3. Henan Pinggao Electric Co., Ltd., Pingdingshan 467000, Henan, China)

Abstract:

In order to meet the electrical conductivity requirements of cast aluminum alloys for ultra high voltage and large capacity power transmission and transformation equipment, and improve the quality of finished products of cast aluminum alloys for high-voltage switch conductors, the hot tearing behavior and properties of low silicon cast aluminum alloys were studied. Based on ProCAST, the mold filling, solidification, and cooling processes of alloy castings were simulated, and the hot tearing stress and hot crack location of the material castings were simulated and predicted. At the same time, the influence of Si content on the hot tearing sensitivity of the alloy was studied and compared through constrained bar method experiments. The results showed that the predicted change rule of hot crack sensitivity with alloy composition was consistent with experimental results. When the Si content increased from 0.4% to 1.5%, the hot crack sensitivity coefficient decreased from 432 to 64. At the same time, the hot tearing generation position transitions from the middle rod to the ball end, resulting in an increase in alloy tensile strength of about 8% and a decrease in elongation of about 14%.

Key words:

aluminum silicon alloy; hot tearing sensitivity; numerical simulation; high conductivity aluminum alloy
