



高硅铝合金 Al-20Si-xCu 热裂行为及其机理

袁建伟, 陈翌庆, 余俊超, 张凯旋, 周 锐

(合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009)

摘 要: 本文研究了 Al-20Si-xCu 系列合金的凝固过程和热裂行为。采用差热分析法(DTA)对凝固过程进行了分析, 用自制的 T 形模具对其热裂行为进行了研究, 并用 Clyne 和 Davis 模型对三元合金热裂敏感性进行了预测。结果表明: 用裂纹敏感性系数(CSC)预测的合金热裂敏感性趋势与 Al-20Si-xCu 系列合金的实验结果一致, 合金的热裂敏感性(Hot tearing sensitivity, HTS)大小顺序为 Al-20Si-3Cu>Al-20Si-4Cu>Al-20Si-2Cu>Al-20Si-1Cu。同时, 运用 ProCAST 模拟软件采用基于有限元(FEM)的数值计算和综合求解的方法, 对合金铸件充型、凝固和冷却过程进行模拟, 预测合金浇注过程产生的热裂应力以及热裂指标(HTI)等参数, 其数值模拟结果与实验结果吻合较好。

关键词: 铝硅合金; 热裂敏感性; 热分析; 数值模拟

文章编号: 1004-0609(2022)-11-3294-12

中图分类号: TG292

文献标志码: A

引文格式: 袁建伟, 陈翌庆, 余俊超, 等. 高硅铝合金 Al-20Si-xCu 热裂行为及其机理[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(11): 3294–3305. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-42908

YUAN Jian-wei, CHEN Yi-qing, YU Jun-chao, et al. Hot tearing behavior and its mechanism of high silicon aluminum alloy Al-20Si-xCu[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(11): 3294–3305. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-42908

高硅铝合金是一种具有广泛应用前景的环境友好型轻质电子封装材料, 其具有热导性好, 刚度和比强度高, 铸造性能优良, 耐磨性、抗蚀性、耐热性好, 与金属镀覆性好, 易于精密机加工等优点, 特别适合作为交通、建筑、航空航天、军事等领域的封装材料^[1-9]。二元铝硅合金流动性能好, 铸件致密, 不易产生铸造裂纹, 是比较理想的封装材料, 然而即使经过变质处理, 合金的强度仍然较低, 这严重影响了封装材料的质量和使用寿命^[10-11]。

为进一步提高 Al-Si 合金力学性能, 人们通常

加入 Cu、Mg、Mn 等合金元素来形成强化相^[12], 这些合金元素的添加虽增加了合金强度, 但对其热裂倾向的影响尚不明确。杨承志等^[12]研究了 Cu 含量对压铸铝硅合金组织和力学性能的影响, 发现 Cu 元素的添加极大地提高了合金强度; PUPARATTANAPONG 等^[13]研究了钪(Sc)对 A356 低共晶铝硅合金铸造性能的影响, 发现 Sc 元素的添加, 不仅减小了 A356 合金中 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒的尺寸, 而且极大地减少了合金的热裂纹, 证实了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。可以发现, 近些年来大量研究者主要研究了合金元素

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52071123)

收稿日期: 2022-01-19; 修订日期: 2022-03-18

通信作者: 陈翌庆, 教授, 博士; 电话: 13013090706; E-mail: chenylq63@hfut.edu.cn

对铝硅合金力学性能的影响, 而忽视了其热裂敏感性的研究。因此, 研究 Cu 等添加元素对高硅铝合金热裂敏感性的影响, 对得到同时兼具力学性能好、不易产生铸造裂纹优点的铝硅合金封装材料具有重要意义。

为了弄清合金热裂的形成机制, 几十年来人们从不同的角度对合金热裂进行了广泛的研究, 提出了许多理论和数学模型^[14-18]。目前对铝硅合金热裂行为的研究中, 有关热裂形成的理论主要有两类: 一类是基于应力、应变和应变速率的理论, 它们和合金在热裂形成温度范围内的热-力耦合特性相关; 另一类是与凝固因素相关的液膜及其填充相关的理论。其中, “液膜理论”为大家所共识, 认为液膜表面张力在热裂形成机理中十分重要, 热裂纹的形成是由于铸件在凝固末期枝晶间存在液膜和铸件在凝固过程中受到拉力。而随着计算机数值模拟技术的发展, 利用数值模拟对热裂形成温度范围内固态组织的热裂敏感性进行研究也取得了不小进展。SUN 等^[19]系统地研究了杆径和砂型强度对 Mg-WE43A 约束杆件热裂的影响, 结果表明随着杆径和砂型强度的增加, 合金的热裂敏感性逐渐降低。LI 等^[20]结合数值模拟软件研究了 Mg-4.5Zn-xY-yNd 合金的 HTS, 结果表明 Mg-4.5Zn-6Y 合金的热裂倾向最低。本文结合数值模拟系统地分析了 Al-20Si-xCu 合金的热裂敏感性, 这为开发铸造性能良好、能热处理强化、力学性能较高、热裂敏感性小的特殊铝硅合金提供了依据。

1 实验

1.1 实验材料和工艺

该合金用纯度为 99.97%(质量分数, 下同)的工业纯铝、Al-30%Si 和 Al-50%Cu 中间合金为原料制成。首先, 让纯铝锭在内壁涂有氮化硼的石墨坩埚中熔化, 熔炼后依次加入 Al-30%Si 和 Al-50%Cu 中间合金, 在 700 °C 时加入 2% 的六氯乙烷进行除气精炼, 然后将温度调至 800 °C, 保温 40 min, 取出后再将熔融金属倒入预热温度为 220 °C 的模具中。模具的预热处理是先将整个模具进行组装, 在调节至 220 °C 的预热器中预热 1.5 h, 然后在浇注熔融金属时将模具取出。本研究中所用合金的具体化学成分见表 1。

1.2 热裂浇注系统

该热裂实验采用的是“T”形模具^[21-24], 其示意图如图 1(a)所示, 主要由热裂铸造系统、数据采

表 1 Al-20Si-xCu 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of Al-20Si-xCu alloys

Alloy	Mass fraction/%			Precipitated phase
	Al	Si	Cu	
Al-20Si-1Cu	Bal.	20.08	0.98	$\alpha+\beta+\theta$
Al-20Si-2Cu	Bal.	19.92	2.03	$\alpha+\beta+\theta$
Al-20Si-3Cu	Bal.	19.96	3.05	$\alpha+\beta+\theta$
Al-20Si-4Cu	Bal.	20.02	4.01	$\alpha+\beta+\theta$

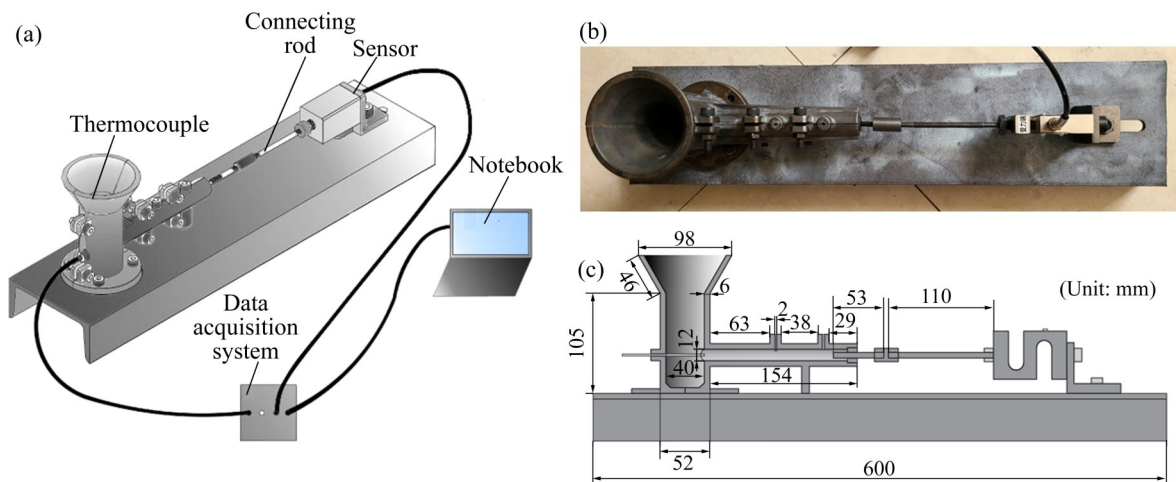


图 1 热裂浇注系统示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of hot tearing pouring system

集系统和计算机组成。热裂铸造系统为可拆卸的模具，凝固温度数据由左端插入模具内部热点位置的热电偶采集，收缩应力由右端移动卡槽固定的传感器通过模具末端的连杆采集，并传输到数据转换器(A/D)，然后由计算机以数据和图表的形式显示出来，其实物图和模具相关尺寸如图1(b)和(c)所示。

1.3 双热电偶差热分析系统

采用双热电偶差热分析系统^[22-23]采集凝固曲线并进行分析，其示意图如图2所示。分别将热电偶插入坩埚的中心和边缘，测量合金凝固过程中的中心位置温度(T_c)和边缘位置温度(T_s)^[25]。为了尽可能保证坩埚的径向导热，在坩埚顶部和底部均采用10 cm厚的隔热板进行密封，以减少热量损失。双热电偶分析系统的主要目的是确定枝晶相干性点和枝晶相干点温度(T_{coh})^[26]。

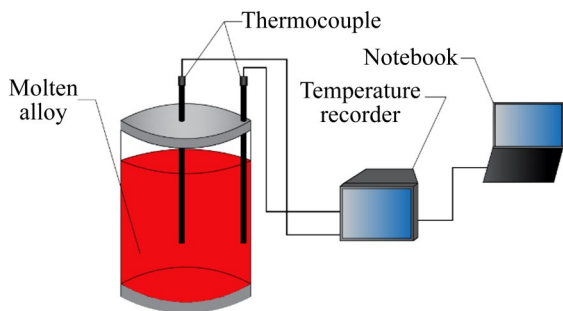


图2 双热电偶差热分析系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of dual thermocouple differential thermal analysis system

HTS的预测基于Cyne-Davies模型^[27-28]的假设。当合金的固相分数(f_s)为0.4~0.9时，液体可以自由地在枝晶间流动，合金在凝固收缩能及时得到缓解，收缩应力能够完全释放而不产生热裂。因此，将这一阶段称为应力松弛阶段。当固相分数大于0.9时，枝晶开始结合，残余液相在进料时受到限制，进料由整体进料转变为枝晶间的局部补料。此时合金进入了脆弱区。如式(1)所示，定义 f_s 介于0.4和0.9之间的凝固时间为 t_R ， f_s 介于0.9和0.99之间的凝固时间为 t_V 。将 t_V 与 t_R 之比作为测定合金HTS的参数，即裂纹敏感性系数(CSC, C_{CS})，其表达式如下：

$$C_{CS} = \frac{t_V}{t_R} = \frac{t_{0.99} - t_{0.9}}{t_{0.9} - t_{0.4}} \quad (1)$$

式中： $t_{0.99}$ 为与 $f_s=0.99$ 相对应的时间； $t_{0.9}$ 为 $f_s=0.9$

对应的时间； $t_{0.4}$ 为 $f_s=0.4$ 对应的时间。

2 结果与讨论

2.1 凝固过程

用DTA(差热分析法)分析表征了合金的凝固过程。热分析结果包括Al-20Si-1Cu、Al-20Si-2Cu、Al-20Si-3Cu、Al-20Si-4Cu的冷却曲线及其一阶、二阶导数曲线，其用来显示合金凝固过程中的特征温度和相沉淀。合金的冷却曲线分析与之前的研究相似^[29]，冷却曲线的一阶导数反映了合金凝固过程中的热变化，具体表现为一阶导数上出现的放热峰，可用其来估算相变温度。冷却曲线的二阶导数可以指示凝固的开始和结束，可分别测出液相线(T_L)和固相线(T_S)的温度。二阶导数也可以用来测量放热速率和峰值，冷却曲线二阶导数的第一个峰值N表示凝固过程中开始析出相的质量形核。在图3中，N表示 β -Si相开始形成，对应的温度为 T_N 。假设在凝固过程中没有发生任何相变，基线则由合金冷却曲线一阶导数确定的凝固开始和结束点连接而成^[29-30]。图3中各合金的冷却曲线显示了降温速率的三次变化，对应于一阶导数曲线中的三个峰值，表明存在三种相变。结合Al-Si-Cu三元相图分析，图3中的三个峰确定为 β -Si相、 α (Al)相和 Al_2Cu 相。表2总结了各合金凝固过程中相析出的温度参数。

在由冷却曲线导出的一阶导数曲线上可以看到一些由相析出引起的放热峰。结合Al-20Si-xCu合金凝固过程中相析出的温度参数，熔融金属先结晶出 β -Si相， α (Al)相则是通过约570 °C下的 $L \rightarrow \beta$ -Si + α (Al)二元共晶反应沉淀而成， θ (Al_2Cu)相则是通过约515 °C下的 $L \rightarrow \beta$ -Si + α (Al) + θ (Al_2Cu)三元共晶反应沉淀而成。一阶导数曲线即放热峰与基线之间的包围区域的面积可用来判断析出相的数量。在Al-20Si-1Cu合金中(见图3(a))，其在一阶导数曲线上623.6 °C、574.4 °C和513.9 °C时共出现了三个放热峰，可以推断出这三个放热峰分别是 β -Si相、 α 相和 θ 相。由于Cu含量(质量分数)仅为1%，故 θ 相的放热峰强度极低。同样，在XRD谱中，Al-20Si-1Cu合金的 θ 相衍射峰强度很低，因此凝固过程中的 θ 相析出量很低。在Al-20Si-2Cu合金中(见图3(b))，随着Cu含量增加到2%，从一阶导数曲线上同样可以看出三个放热峰，且由于Cu含量增加， θ

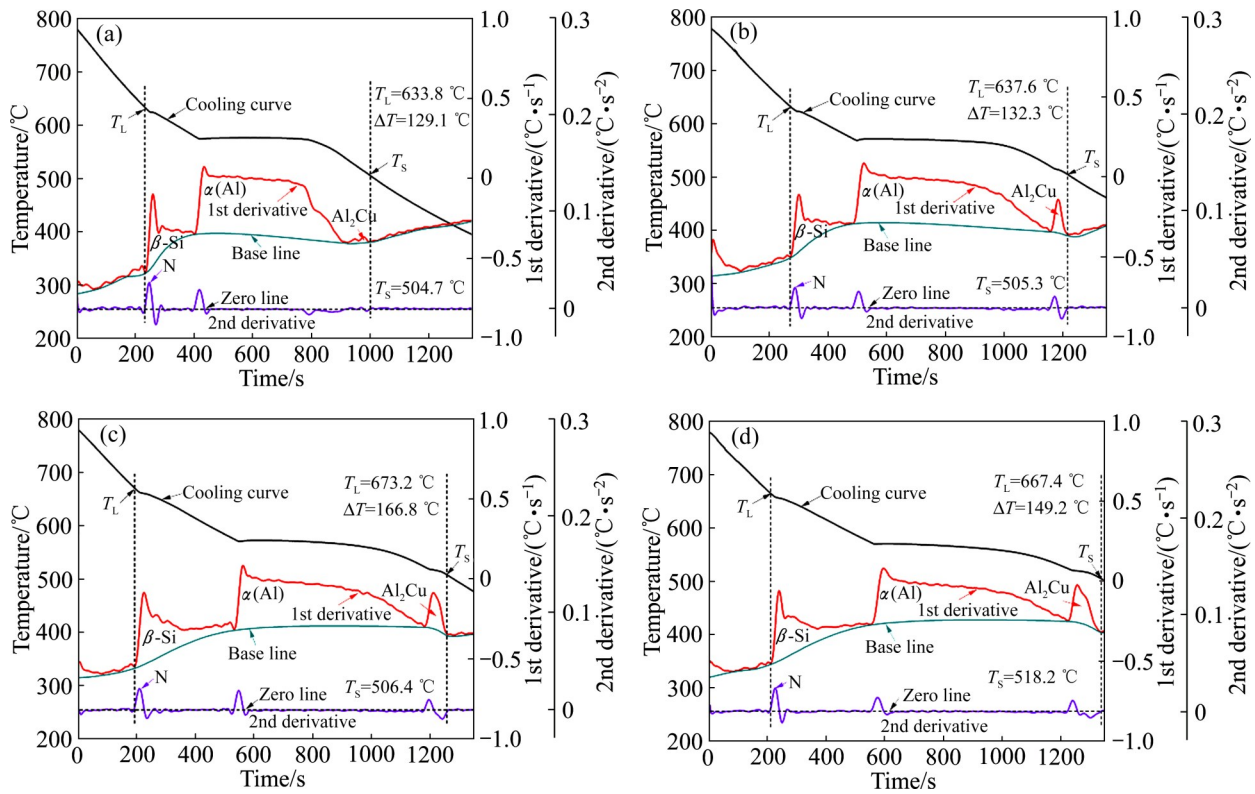


图3 Al-20Si-xCu 合金的冷却曲线、一阶导数和二阶导数曲线

Fig. 3 Cooling curves, first derivative and second derivative curves of Al-20Si-xCu alloys: (a) Al-20Si-1Cu alloy; (b) Al-20Si-2Cu alloy; (c) Al-20Si-3Cu alloy; (d) Al-20Si-4Cu alloy

表2 Al-20Si-xCu 合金凝固过程中相析出的温度参数

Table 2 Temperature parameters of phase precipitation during solidification of Al-20Si-xCu alloys (°C)

Alloy	$L \rightarrow \beta\text{-Si}$	$L \rightarrow \beta\text{-Si} + \alpha(\text{Al})$	
		$\alpha(\text{Al})$	$\alpha(\text{Al}) + \theta(\text{Al}_2\text{Cu})$
Al-20Si-1Cu	623.6	574.4	513.9
Al-20Si-2Cu	626.9	572.5	516.1
Al-20Si-3Cu	660.9	571.8	517.6
Al-20Si-4Cu	657.6	568.8	518.7

相的放热峰面积明显大于 Al-20Si-1Cu 合金, 表明 θ 相的数量明显增加。当 Cu 含量增加到 3%(Al-20Si-3Cu) 时, 从图 3(c) 可以看出, 析出相为 $\beta\text{-Si}$ 相、 α 相和 θ 相; 同时, θ 相的数量进一步增加。当 Cu 含量进一步增加到 4%(Al-20Si-4Cu) 时, 析出相仍然为 $\beta\text{-Si}$ 相、 α 相和 θ 相, 且 θ 相仍有增加, 但增加量较小。

2.2 枝晶相干性温度与热裂敏感系数

利用差热分析(DTA)测量的数据可以计算出枝晶相干点(T_{coh})的温度。由于石墨坩埚的顶部和底部

均采用隔热板进行密封隔热, 熔融金属凝固过程中释放的热量只能从水平方向传递。在合金凝固前, 中心和边缘的传热介质均为液体, 温差慢慢趋于稳定。在凝固初期, 由于坩埚边缘传热距离较短, 坩埚边缘的温度下降速度快于中心温度的下降速度, 导致边缘的凝固提前, 故边缘先于中心凝固。此时边缘的传热介质是固体, 而中心的传热介质是液体。因此, 随着凝固的继续, 温差($\Delta T = T_c - T_e$)逐渐增大。在凝固后期, 随着温度降低, 中心也开始凝固, 凝固枝晶形成连续骨架的点(枝晶相干点), 边缘和中心的传热介质都变为固体。由于固相的导热系数高于液相, 一旦形成连续的枝晶骨架, 热量更容易通过连接的固相枝晶向边缘扩散, 中心温度(T_c)和边缘温度(T_e)迅速接近, 从而减小了中心和边缘的温差, 其差值将出现一个最小值。当形成连续的枝晶骨架时, 即 ΔT 出现最大值时, 表示边缘与中心之间的枝晶相干性, 此时由中心热电偶测得的温度定义为 T_{coh} [31-34]。

图 4 所示为所研究合金的差热分析结果, 红色

和黑色曲线分别表示中心热电偶温度 T_c 和边缘热电偶温度 T_e 的变化曲线, 紫色曲线表示中心和边缘的温差 ΔT 的变化曲线。从图 4 中可以看出, Al-20Si-1Cu、Al-20Si-2Cu、Al-20Si-3Cu、Al-20Si-4Cu 形成连续的枝晶骨架时的温度即枝晶相干点 (T_{coh}) 的温度分别为 580.4 °C、590.6 °C、634.6 °C、627.2 °C。

图 5 所示为 Al-20Si-xCu 合金的裂纹敏感性系数 (C_{CS}) 和枝晶凝聚温度 (T_{coh})。根据合金的凝固曲线和 Clyne-Davies 模型计算了 C_{CS} 值^[17]。这些计算值用于预测合金的热裂敏感性。利用热分析测试系统测量了 T_{coh} 值, 并用于确定测试合金的热裂敏感性。枝晶联接的凝固分数 f_s^{coh} 也是确定 Al-20Si-xCu 合金 HTS 的重要测量参数。当 Cu 含量分别为 1%、2%、3% 和 4% 时, f_s^{coh} 分别为 81.78%、80.69%、77.69% 和 78.14%。当 f_s^{coh} 较低时, 合金中的液相较多, 合金的强度主要由液膜提供, 热裂的发生主要是由于强度较低的液膜难以抵抗凝固收缩力而撕裂, 热裂机理遵循液膜机理。当 f_s^{coh} 较高时, 晶间结合力主要来自晶界两侧的“桥”, 如果“桥”在凝固收

缩过程中断裂, 则会引发热裂, 其热裂机理遵循枝晶桥联机制。在相同的冷却条件下, 后期枝晶相干性可以延长质量供给时间, 从而降低合金的 HTS, 因此, 枝晶凝聚温度 (T_{coh}) 越高, 枝晶凝聚时的固相分数 (f_s^{coh}) 越小, 合金的热裂倾向越大。Al-20Si-3Cu 合金的 T_{coh} 最高, f_s^{coh} 最小, 表明该合金的 HTS 最高。

2.3 糊状区间

已有研究表明, 合金的热裂敏感性取决于合金糊状区的宽度 (ΔT_m , 即 T_{coh} 与 T_s 之间的温度范围) 和第二相析出^[29]。图 6 所示为 Al-20Si-xCu 合金的 ΔT_m , 可以看出, 当 Cu 含量分别为 1%、2%、3% 和 4% 时, ΔT_m 分别为 75.7 °C、85.3 °C、128.2 °C 和 109.0 °C。大量研究表明^[24-26], 热撕裂只在糊状区开始, 较宽的 ΔT_m 会导致较高的热裂敏感性。一般来说, 在 ΔT_m 较宽的合金中, 凝固过程中的凝固收缩程度是更大的, 大的凝固收缩程度意味着更高的 HTS。当 Cu 含量从 1% 增加到 2% 时, ΔT_m 略有增

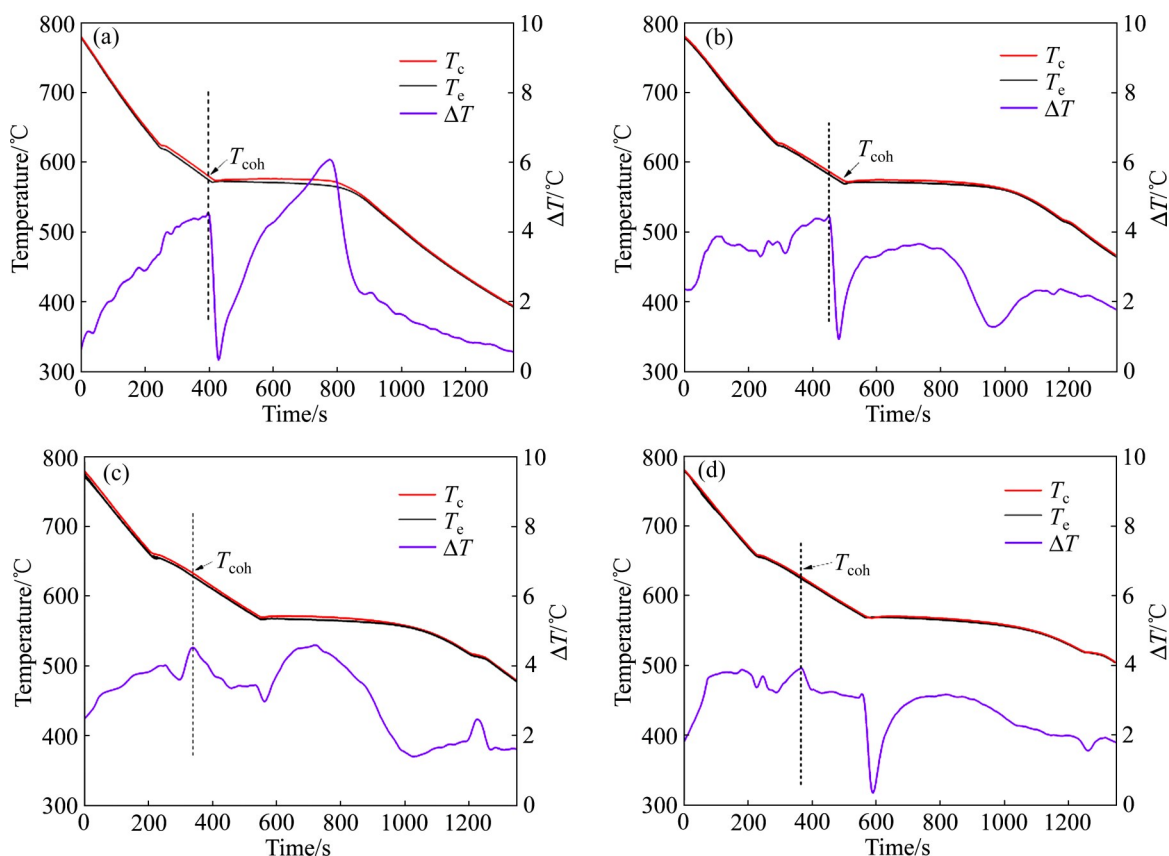


图 4 Al-20Si-xCu 系列合金的差热分析结果

Fig. 4 Results of differential thermal analysis of Al-20Si-xCu series alloys: (a) Al-20Si-1Cu alloy; (b) Al-20Si-2Cu alloy; (c) Al-20Si-3Cu alloy; (d) Al-20Si-4Cu alloy

加; 当 Cu 含量增加到 3% 时, ΔT_m 增加幅度较大, 然后随着 Cu 含量的进一步增加而减小。Al-20Si-3Cu 合金的 ΔT_m 最宽, 表明该合金的 HTS 最高, 这与预测的 C_{CS} 结果一致。

2.4 热裂浇注实验

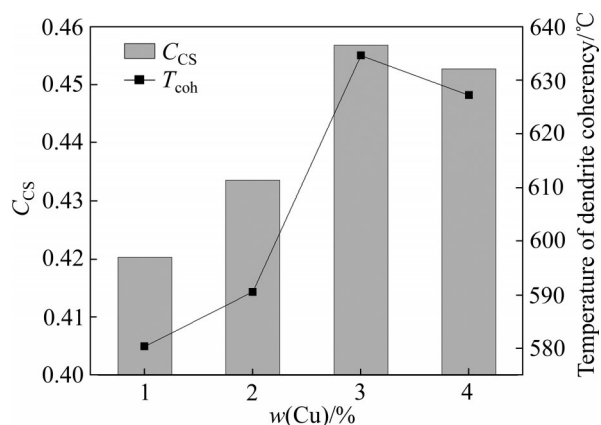


图 5 Al-20Si-xCu 系列合金的 C_{CS} 与 T_{coh} 随 Cu 含量变化图

Fig. 5 Changes of C_{CS} and T_{coh} with Cu content in Al-20Si-xCu series alloys

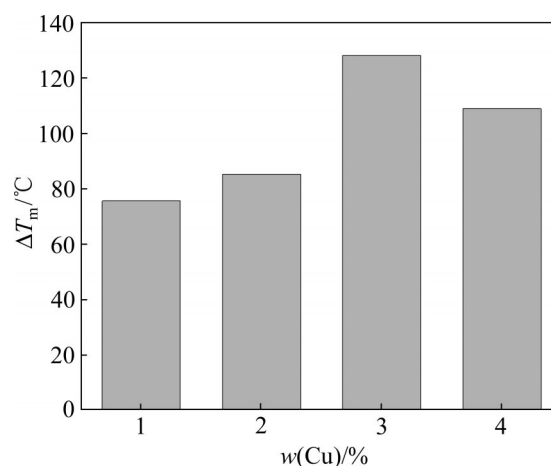


图 6 Al-20Si-xCu 系列合金的 ΔT_m 随 Cu 含量变化图

Fig. 6 ΔT_m of Al-20Si-xCu series alloys varies with Cu content

Al-20Si-xCu 系列合金的收缩力和凝固温度随凝固时间的变化如图 7 所示。图中黑色曲线表示凝固温度, 红色曲线表示收缩应力。从图中收缩力曲线可以看出, 合金收缩力在凝固开始时急剧增大,

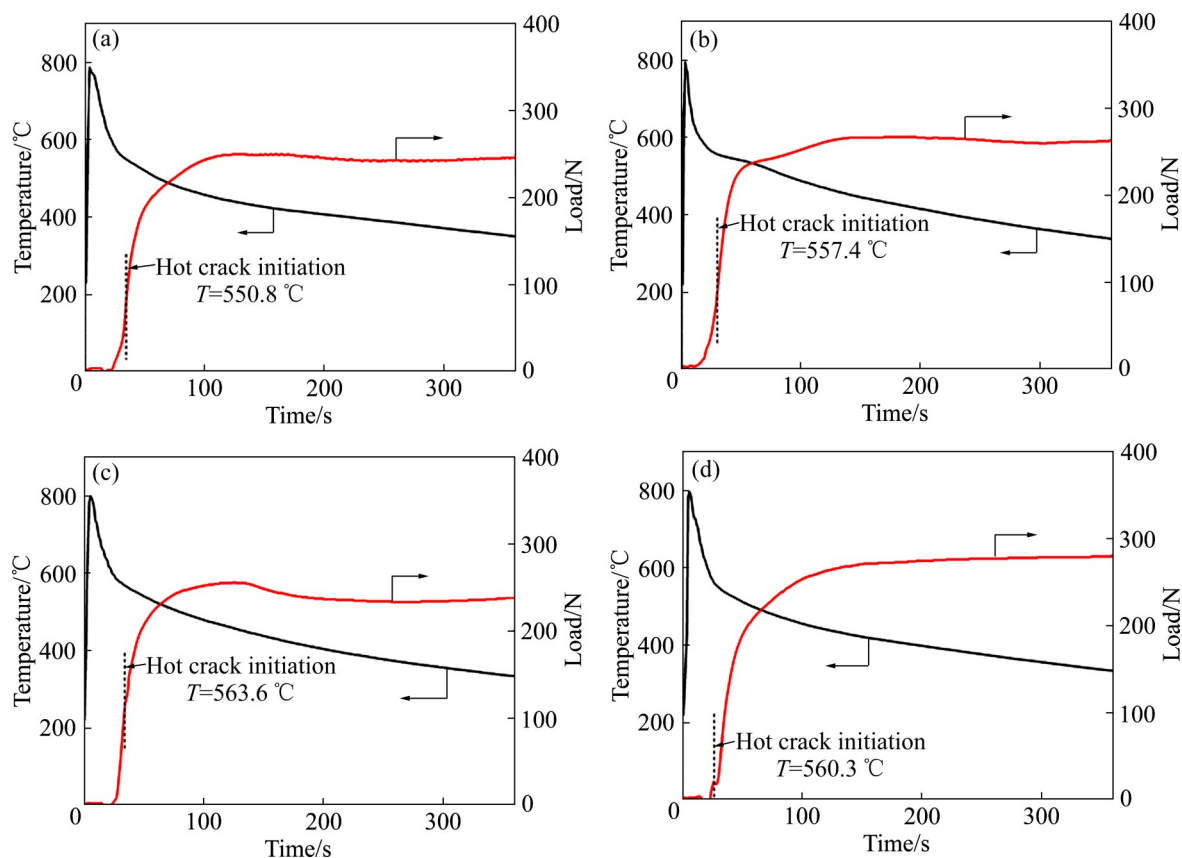


图 7 Al-20Si-xCu 系列合金的温度/力-时间曲线图

Fig. 7 Temperature/force-time curves of Al-20Si-xCu series alloys: (a) Al-20Si-1Cu alloy; (b) Al-20Si-2Cu alloy; (c) Al-20Si-3Cu alloy; (d) Al-20Si-4Cu alloy

在增大过程中, 曲线斜率出现变化或者曲线突然下降到一定程度, 然后进一步增大直至凝固结束。很明显, 当收缩力曲线的斜率开始出现明显变化时, 表明发生了热裂^[35]。如图7(a)和(b)所示, Al-20Si-1Cu和Al-20Si-2Cu合金的收缩力曲线斜率没有明显的变化趋势, 这清楚地表明该成分合金的HTS较低。图7(c)和(d)分别显示了Cu含量为3%和4%的合金的收缩力, 可以看出, 在563.6℃和560.3℃时曲线斜率发生了明显变化, 呈现高的HTS。实验浇注的宏观试样分别如图8(a)、(b)、(c)和(d)所示, 浇注的宏观试样热点处分别用显像剂进行热裂缺陷显像处理(红色越深, 热裂纹越大)。从热点附近的宏观样品(见图8(a)~(d))可以看出, 在所研究的四种合金中, Al-20Si-3Cu合金的热裂纹最大, HTS最高。根据桥接理论, 当热裂发生的温度较低时, 形成能够抵抗强烈凝固收缩力的固相骨架, 热裂不易发生, 与试样宏观形貌的热裂观察结果一致。

2.5 相组成

图9所示为Al-20Si-xCu系列合金的XRD结果, 在Al-20Si-xCu合金中检测到了 β -Si相、 α (Al)和 θ (Al₂Cu)相。在合金结晶时, 首先形成的是 β -Si晶体, 然后发生由 $L \rightarrow \beta$ -Si+ α (Al)的二元共晶反应, 之后液相中Cu的溶解度升高而发生三元共晶反应,

直至结晶结束。Al-20Si-xCu合金的凝固过程为 $L \rightarrow \beta$ -Si+ $L \rightarrow \beta$ -Si+ α (Al)+ $L \rightarrow \beta$ -Si+ α (Al)+ θ (Al₂Cu)。在XRD谱中可以看出, Al-20Si-1Cu合金的 θ 相衍射峰强度很低, 因此凝固过程中的 θ 相析出量很低。随着Cu含量逐步增加, θ 相衍射峰强度逐步增加, 表明 θ 相的数量增加。当Cu含量由2%增加到3%时, 可以明显看出 θ 相衍射峰强度增大, 表明此成分合金中 θ 相增加明显。可以看出, XRD结果与凝固过程中合金冷却曲线相沉淀分析结果相吻合。结合对前文热裂敏感性的分析可以发现, 随着 θ (Al₂Cu)相的增加, 合金热裂敏感性呈现上升的趋势, 主要原因是该相分布在 β -Si相四周及晶界上, 其对凝固过程中后期的再充型有显著影响^[12]。而Al-20Si-xCu系列合金的热裂敏感性呈现先增后减的趋势, 这是第二相与合金糊状区域宽度共同作用的结果。

2.6 热裂的数值模拟

热裂的数值模拟用ProCAST模拟软件完成: 先使用SolidWorks软件对“T”形模具及铸件进行3D建模, 再将建好的3D模型导入ProCAST软件进行数值模拟。模拟时首先在ProCAST的“mesh”模块对导入的模型进行面、体交叉检查, 再进行面网格和体网格的划分和检验, 在“cast”模块对画

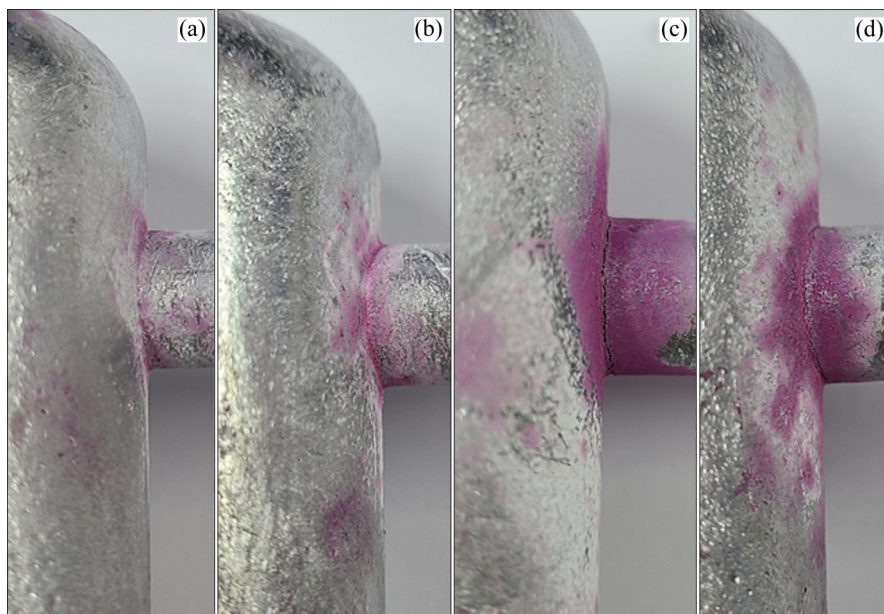


图8 Al-20Si-xCu系列合金的宏观浇注试样图

Fig. 8 Macroscopic casting sample diagrams of Al-20Si-xCu series alloys: (a) Al-20Si-1Cu alloy; (b) Al-20Si-2Cu alloy; (c) Al-20Si-3Cu alloy; (d) Al-20Si-4Cu alloy

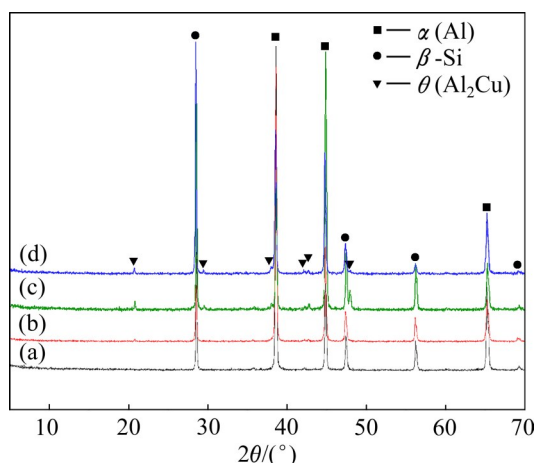


图9 Al-20Si-xCu 系列合金的XRD谱

Fig. 9 XRD patterns of Al-20Si-xCu series alloys: (a) Al-20Si-1Cu alloy; (b) Al-20Si-2Cu alloy; (c) Al-20Si-3Cu alloy; (d) Al-20Si-4Cu alloy

好网格的“vdb”文件设置铸造参数: 设置重力方向向下; 分别定义模具、合金、石墨环的材质; 设置不同材质界面间的换热系数(根据软件推荐数值, 本文采用金属模具与合金间换热系数为 $2000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、模具与石墨环之间的换热系数为

$500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、合金与石墨环之间的换热系数为 $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 设置浇注温度为 780°C , 浇注时间为 10 s , 模具预热温度为 220°C , 冷却条件为空冷; 运行后在“view”模块观察模拟结果并进行分析。

图 10 所示为 Al-20Si-xCu 系列合金运用 ProCAST 模拟软件计算的第一次热裂时的模具应力分布图, 模拟计算的热点处的应力和热裂指标 (HTI) 为研究合金凝固过程中发生的热裂行为提供了一个很好的参考^[36-38]。图 11 所示为运用 ProCAST 模拟软件计算的合金浇入模具中时温度、应力和固相分数随时间变化的曲线图。从图 11 中可以看出, 四种合金应力变化趋势相同, 合金收缩应力呈现在凝固初期急剧增大, 在增大过程中突然下降到一定程度, 然后进一步增大并不断变化直至凝固结束的变化趋势。当收缩应力出现明显变化时, 即表明裂纹开始萌生, 这与实验浇注得到的应力变化结果相吻合。图中的模拟结果表明, 当 Cu 含量分别为 1%、2%、3% 和 4% 时, 合金热点处产生热裂时的应力和热裂指标 (HTI) 分别为: 113.86 MPa 、 210.20 MPa 、 270.02 MPa 和 103.48 MPa , 以

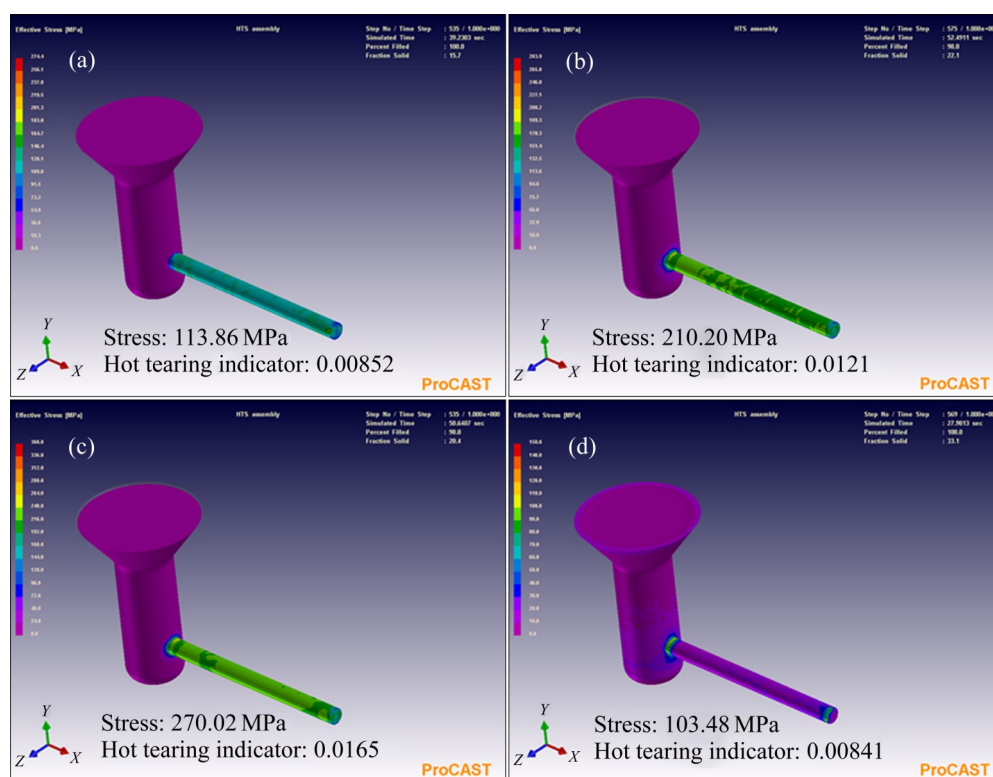


图10 Al-20Si-xCu 系列合金的热裂数值模拟应力分布图

Fig. 10 Numerical simulation stress distribution diagrams of Al-20Si-xCu series alloys in hot tearing: (a) Al-20Si-1Cu alloy; (b) Al-20Si-2Cu alloy; (c) Al-20Si-3Cu alloy; (d) Al-20Si-4Cu alloy

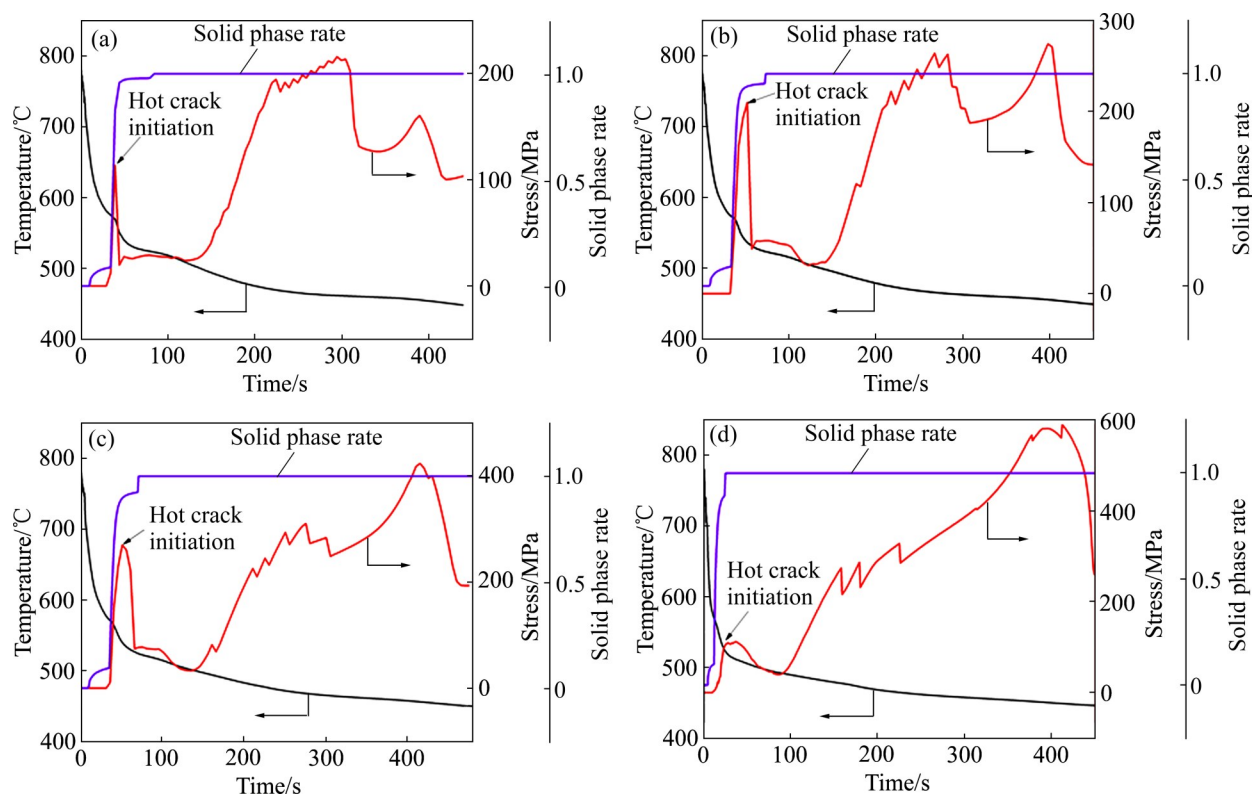


图 11 Al-20Si-xCu 系列合金的热裂数值模拟温度/应力/固相率-时间曲线图

Fig. 11 Numerical simulation of hot tearing temperature/stress/solid phase rate-time curves of Al-20Si-xCu series alloys: (a) Al-20Si-1Cu alloy; (b) Al-20Si-2Cu alloy; (c) Al-20Si-3Cu alloy; (d) Al-20Si-4Cu alloy

及 0.00852、0.0121、0.0165、0.00841。随着 Cu 含量的增加，合金热点处的应力和热裂指标(HTI)呈现先增加后减小的趋势。在 Cu 含量为 3% 时，合金热点处的应力和热裂指标(HTI)达到最大值，其热应力分布也不均匀，这表明 Al-20Si-3Cu 合金的热裂倾向最大，HTS 最高。由此进一步说明，数值模拟计算的合金热裂倾向与实验结果吻合较好。

3 结论

1) 预测的 Al-20Si-xCu 系列合金的热裂敏感性与实测的热裂参数一致。所研究合金的热裂敏感性从高到低的顺序依次为 Al-20Si-3Cu、Al-20Si-4Cu、Al-20Si-2Cu 和 Al-20Si-1Cu。

2) 合金的热裂敏感性与枝晶凝聚时的温度(T_{coh})和枝晶凝聚时的凝固分数 f_s^{coh} 密切相关，枝晶凝聚时的温度(T_{coh})越高，枝晶凝聚时的凝固分数 f_s^{coh} 越小，合金的热裂敏感性越高。

3) Al-20Si-xCu 系列合金的相组成为 β -Si 相、

$\alpha(\text{Al})$ 相和 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 相，合金的热裂敏感性由合金糊状区的宽度(ΔT_m 、 T_{coh} 和 T_s 之间的温度范围)和第二相析出共同决定。

REFERENCES

- [1] 姜巨福, 李明星, 王 迎. 铝合金挤压铸造技术研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(9): 2313-2329.
JIANG Ju-fu, LI Ming-xing, WANG Ying. Research development of squeeze casting technology of aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(9): 2313-2329.
- [2] 刘 学, 田 源, 李美玲, 等. 过共晶铝硅合金的研究进展[J]. 有色金属加工, 2021, 50(3): 12-13, 55.
LIU Xue, TIAN Yuan, LI Mei-ling, et al. Research progress of hypereutectic Al-Si alloy[J]. Nonferrous Metals Processing, 2021, 50(3): 12-13, 55.
- [3] 邓运来, 张新明. 铝及铝合金材料进展[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 2115-2141.
DENG Yun-lai, ZHANG Xin-ming. Development of aluminium and aluminium alloy[J]. The Chinese Journal of

- Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 2115–2141.
- [4] 朱廷茂, 王 奎, 蒋海燕, 等. 过共晶铝硅合金硅相复合变质的研究进展[J]. 上海金属, 2019, 41(5): 97–104.
- ZHU Yun-mao, WANG Kui, JIANG Hai-yan, et al. Research progress of complex modification on Si phase in hypereutectic Al-Si alloys[J]. Shanghai Metals, 2019, 41(5): 97–104.
- [5] 刘闪光, 虞秀勇, 毛郭灵, 等. 钇在亚共晶铝硅合金中的作用研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(15): 101–107.
- LIU Shan-guang, YU Xiu-yong, MAO Guo-Ling, et al. Research progress on the role of yttrium in hypoeutectic Al-Si alloys[J]. Materials Reports, 2022, 36(15): 101–107.
- [6] 刘 洋. 铝硅合金性能研究[J]. 科技风, 2017(11): 266.
- LIU Yang. Study on properties of Al-Si alloy[J]. Technology Wind, 2017(11): 266.
- [7] 黄志刚, 赵 飞, 王日初, 等. 微合金化对电子封装用高硅铝合金微观组织与性能的影响[J]. 有色金属科学与工程, 2018, 9(3): 22–28.
- HUANG Zhi-gang, ZHAO Fei, WANG Ri-chu, et al. Effects of microalloying on the microstructure and properties of high-silicon aluminum alloy for electronic packaging[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2018, 9(3): 22–28.
- [8] 蔡志勇, 王日初. 快速凝固铝硅合金电子封装材料[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2016.
- CAI Zhi-yong, WANG Ri-chu. Rapidly solidified aluminum silicon alloy electronic packaging materials[M]. Changsha: Central South University Press, 2016.
- [9] 解立川, 彭超群, 王日初, 等. 高硅铝合金电子封装材料研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(9): 2578–2587.
- XIE Li-chuan, PENG Chao-qun, WANG Ri-chu, et al. Research progress of high aluminum-silicon alloys in electronic packaging[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(9): 2578–2587.
- [10] 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.
- YU Wen-hui, SHI Lei, ZHANG Yong, et al. Influence of Al-10Si-2Fe master alloy on refinement of eutectic cells and hot tearing sensitivity of Al-10Si-2Cu alloy[J]. Foundry, 2019, 68(9): 988–991.
- [11] BABY A K, PRIYARANJAN M, DEEPAK LAWRENCE K, et al. Tribological behaviour of hypereutectic Al-Si automotive cylinder liner material under dry sliding wear condition in severe wear regime[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2021, 235(7): 1450–1462.
- [12] 杨承志, 龙思远, 王 朋, 等. Cu 含量对压铸铝硅合金组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2016, 41(11): 57–61.
- YANG Cheng-zhi, LONG Si-yuan, WANG Peng, et al. Effect of Cu content on microstructures and properties of die-casting Al-Si alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(11): 57–61.
- [13] PUPARATTANAPONG K, PANDEE P, BOONTEIN S, et al. Fluidity and hot cracking susceptibility of A356 alloys with Sc additions[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2018, 71(7): 1583–1593.
- [14] LI S, APELIAN D. Hot tearing of aluminum alloys[J]. International Journal of Metalcasting, 2011, 5(1): 23–40.
- [15] D'ELIA F, RAVINDRAN C, SEDIKIO D, et al. Hot tearing mechanisms of B206 aluminum–copper alloy[J]. Materials and Design, 2014, 64: 44–45.
- [16] 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.
- XU Rong-fu. Study on hot tearing formation in hypoeutectic Al-Si alloys[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [17] 武荣召. 稀土和钒对铸造 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织和性能的影响[D]. 福州: 福州大学, 2013.
- WU Rong-zhao. Influence of rare earth and vanadium on the microstructure and properties of the cast Al-Zn-Mg-Cu alloys[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2013.
- [18] SONG Jiang-feng, PAN Fu-sheng, JIANG Bin, et al. A review on hot tearing of magnesium alloys[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2016, 4(3): 151–172.
- [19] SUN Qing-ya, LIU Dong-rong, WANG Li-ping, et al. Influences of rod diameter and sand-mould strength on hot tearing in Mg WE43A constrained rod castings[J]. International Journal of Metalcasting, 2019, 13(2): 407–416.
- [20] LI Xing-xing, LIU Zheng, WANG Yue, et al. Investigation on hot tearing behavior and its mechanism of Mg-4.5Zn-xY-yNd(x+y=6, x=0, 1, 3, 6) alloys[J]. Materials Research Express, 2019, 6(10): 106535.
- [21] 魏子淇, 刘 正, 王 志, 等. 钇对 Mg-Zn-Y-Zr 合金热裂敏感性影响[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(2): 233–240.
- WEI Zi-qi, LIU Zheng, WANG Zhi, et al. Effects of Y on hot tearing susceptibility of Mg-Zn-Y-Zr alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(2): 233–240.
- [22] 冯 羽, 毛萍莉, 刘 正, 等. 钇含量对 MgZn_{4.5}Y_xZr_{0.5} 合金热裂敏感性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(10): 1970–1980.
- FENG Yu, MAO Ping-li, LIU Zheng, et al. Effect of yttrium content on hot tearing susceptibility of MgZn_{4.5}Y_xZr_{0.5}

- alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(10): 1970–1980.
- [23] 贾东瑞, 王 越, 刘 正, 等. Y 含量对 $\text{MgZn}_9\text{Y}_x\text{Zr}_{0.5}$ 合金热裂敏感性的影响[J]. 材料工程, 2019, 47(7): 126–133.
- JIA Dong-rui, WANG Yue, LIU Zheng, et al. Effect of Y content on hot tearing susceptibility of $\text{MgZn}_9\text{Y}_x\text{Zr}_{0.5}$ alloys[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(7): 126–133.
- [24] SU Xin, FENG Zhi-jun, HUANG Jing-fu, et al. Influence of a low-frequency alternating magnetic field on hot tearing susceptibility of EV31 magnesium alloy[J]. China Foundry, 2021, 18(3): 229–238.
- [25] HUANG Z H, LIANG S M, CHEN R S, et al. Solidification pathways and constituent phases of Mg-Zn-Y-Zr alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 468(1/2): 170–178.
- [26] CAO G, HAYGOOD I, KOU S. Onset of hot tearing in ternary Mg-Al-Sr alloy castings[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2010, 41(8): 2139–2150.
- [27] SRINIVASAN A, WANG Zhi, HUANG Yuan-ding, et al. Hot tearing characteristics of binary Mg-Gd alloy castings[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(5): 2285–2298.
- [28] ZHANG G, LIU Z, WANG Y, et al. An investigation on solidification path and hot tearing tendency of Mg-2Zn-3Y-xAl alloys[J]. Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik, 2019, 50(12): 1471–1483.
- [29] ZHOU Ye, MAO Ping-li, WANG Zhi, et al. Solidification process and hot tearing behaviors of AZ series magnesium alloys[J]. Materials Research Express, 2019, 6(11): 116554.
- [30] HASSAN J, MARYAM K, SAEED F. Computer-aided cooling curve thermal analysis and microstructural evolution of Mg-5Zn-xY cast alloys[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2017, 130(3): 1429–1437.
- [31] 王 志, 李一洲, 刘 正, 等. Mg-6Zn-xCu-0.6Zr 合金凝固路径及热裂倾向性[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(7): 1309–1319.
- WANG Zhi, LI Yi-zhou, LIU Zheng, et al. Solidification path and hot tearing tendency of Mg-6Zn-xCu-0.6Zr alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(7): 1309–1319.
- [32] WANG Zhi, ZHOU Ye, LI Yi-zhou, WANG Feng, et al. Hot tearing behaviors and in situ thermal analysis of Mg-7Zn-xCu-0.6Zr alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(8): 1504–1513.
- [33] 陈永强. Cu、Mg 含量对 Al-6Zn-yMg-xCu 合金热裂敏感性的影响[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.
- CHEN Yong-qiang. Effect of Cu and Mg contents on hot tearing susceptibility of Al-6Zn-yMg-xCu alloys[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2020.
- [34] 李星星, 刘 正, 王 越, 等. 铸态镁合金 Mg-xZn-0.5Y-0.5Zr 热裂缺陷研究[J]. 稀有金属, 2020, 44(7): 697–705.
- LI Xing-xing, LIU Zheng, WANG Yue, et al. Hot tearing defects of as-cast Mg-xZn-0.5Y-0.5Zr alloys[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44(7): 697–705.
- [35] WEI Zi-qi, WANG Yue, LIU Zheng. Effects of Zn and Y on hot-tearing susceptibility of Mg-xZn-2xY alloys[J]. Materials Science and Technology, 2018, 34(16): 2001–2007.
- [36] ZHOU Ye, MAO Ping-li, WANG Zhi, et al. Experimental investigation and simulation assessment on fluidity and hot tearing of Mg-Zn-Cu system alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 297: 117259.
- [37] WANG Ke, FU Peng-huai, PENG Li-ming, et al. A simplified hot-tearing criterion for shape castings based on temperature-field simulation[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50(11): 5271–5280.
- [38] TAKAI R, ENDO N, HIROHARA R, et al. Experimental and numerical analysis of grain refinement effect on hot tearing susceptibility for Al-Mg alloys[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100(5/6/7/8): 1867–1880.

Hot tearing behavior and its mechanism of high silicon aluminum alloy Al-20Si-xCu

YUAN Jian-wei, CHEN Yi-qing, YU Jun-chao, ZHANG Kai-xuan, ZHOU Rui

(School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The solidification process and hot tearing behavior of Al-20Si-xCu series alloys were investigated. The solidification process was analyzed by differential thermal analysis (DTA) and the hot tearing behavior was studied by self-made “T” mold, the Clyne and Davis models were used to predict the hot tearing sensitivity of ternary alloy. The results show that the hot tearing sensitivity predicted by the crack sensitivity coefficient (CSC) is consistent with the experimental results of Al-20Si-xCu series alloys. The hot tearing sensitivity (HTS) of the alloys is Al-20Si-3Cu > Al-20Si-4Cu > Al-20Si-2Cu > Al-20Si-1Cu. At the same time, ProCAST simulation software was used to simulate the filling, solidification and cooling processes of alloy castings by using the method of numerical calculation and comprehensive solution based on finite element method (FEM), and the hot tearing stress and hot tearing index (HTI) were predicted. The numerical simulation results were in good agreement with the experimental results.

Key words: aluminum-silicon alloy; hot crack sensitivity; thermal analysis; the numerical simulation

Foundation item: Project(52071123) Supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2022-01-19; **Accepted date:** 2022-03-18

Corresponding author: CHEN Yi-qing; Tel: +86-13013090706; E-mail: chenq63@hfut.edu.cn

(编辑 何学锋)