

# 化学成分对 Al-Si 及 Al-Si-Mg 合金热裂敏感因子的影响



罗继辉\*, 刘杰, 吴宇, 冉艳蓉

长江师范学院材料科学与工程学院, 重庆 408100

**摘要:** 为合理设计 Al-Si 基合金成分, 研究合金元素对 Al-Si 基合金热裂的影响。采用 Pandat 计算软件, 计算了不同 Si 含量对 Al-Si 合金热裂敏感因子的影响, 计算了 Mg 合金的加入对合金热裂敏感的影响。对影响合金热裂敏感因子的凝固路径进行了分析。计算结果表明: Si 含量在 10% (质量百分比) 以下, 热裂敏感因子基本不存在, 合金不会出现热裂倾向; 当 Si 含量达到 11~12% 时, 合金的热裂敏感因子很小。当 Si 含量达到过共晶区域时 ( $Si \geq 13\%$ ), 合金热裂敏感因子开始增加, 且随 Si 元素含量的增加而增加, 合金在过共晶区的热裂倾向较大。加入 Mg 可以有效减少合金的热裂敏感因子, 且随 Mg 含量的增加, 热裂敏感因子逐渐减小。

**关键词:** Al-Si 合金; Al-Si-Mg 合金; 热裂敏感因子; 化学成分; 凝固

**DOI:** [10.57237/j.mater.2022.02.005](https://doi.org/10.57237/j.mater.2022.02.005)

## Effect of Composition on Crack Susceptibility Index of Al-Si and Al-Si-Mg Alloys

Luo Jihui\*, Liu Jie, Wu Yu, Ran Yanrong

College of Materials Science and Engineering, Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China

**Abstract:** In order to reasonably design the composition of Al-Si based alloy and study the effect of alloying elements on hot crack of Al-Si based alloys, the effect of alloying elements on hot cracking of Al-Si based alloy was studied. The influence of different Si contents on the crack susceptibility index (CSI) of Al-Si alloy was calculated by using Pandat, and the influence of Mg addition on the CSI of the Al-Si-Mg alloy was also calculated. The solidification path affecting the CSI of the alloy was analyzed. The results show that when the Si content is below 10% (mass percentage), the CSI is almost non-existent and the Al-Si alloy will not show crack tendency; When the Si content reaches 11~12%, the CSI of the Al-Si alloy is very small. When the Si content reaches the hypereutectic region ( $Si \geq 13\%$ ), the CSI of the Al-Si alloy begin to increase with increasing of Si content. The crack tendency of the Al-Si alloy in the hypereutectic region is larger. Adding Mg can effectively reduce the CSI of the alloy. Furthermore, with increasing of Mg content, the CSI of Al-Si-Mg alloy gradually decreases.

**Keywords:** Al-Si Alloy; Al-Si-Mg Alloy; Crack Susceptibility Index; Composition; Solidification

\*通信作者: 罗继辉, luo\_jihui@163.com

收稿日期: 2022-11-28; 接受日期: 2023-01-16; 在线出版日期: 2023-02-03

<http://www.materialsr.com>

## 1 引言

Al-Si 合金是一种用途较广的金属材料，具有良好的铸造性能、机械加工性能以及力学性能等[1-4]。包括 Al-Si 在内的诸多铝合金在凝固过程中往往会出现热裂现象，这是一种较严重的铸造缺陷[5-8]，热裂通常沿着晶界分布[9]。有关铝合金热裂形成的原因，主要认为是因为合金后期凝固中，由于补缩不足，垂直于枝晶生长方向受到拉应力应变作用，导致合金开始出现裂纹[10]。热裂严重影响铸件的质量。因此，热裂纹是工业生产中急需解决的一个问题。

近年来，研究人员开始寻找能够预判铸件热裂状况的判据，并将这些判据应用于各类合金的凝固成型过程中，取得了一定的效果。例如，Clyne 等[11]认为当合金的固相体积分数在 0.9~0.99 时，补缩会受到阻碍，因收缩受阻产生的应力会积累，且铸件的强度和塑性都比较差，是热裂纹产生的危险阶段。Monroe 等[12]认为，在合金的最后凝固阶段，当合金受到拉伸应变且不能得到足够的液相补缩时，缩孔缩松就会沿着晶界形成。提出了用合金在最后凝固阶段由于变形而生成的缩孔缩松的体积分数大小表示合金的热裂趋势高低。Kou[13]以凝固后期中两相邻树枝晶之间的未凝固区域为研究对象，假定树枝晶沿着 z 轴方向生长，液相合金沿着与树枝晶生长相反的方向流动补缩；同时树枝晶受到垂直于其生长方向的应变。当两相邻树枝晶之间的未凝固区域在凝固过程中，该区域因受到应变而造成的体积增大量不能被液相合金的流动补缩以及两树枝晶的横向生长量平衡时，在该处就会形成热裂纹。Liu 等[14]用 Kou 的理论计算了 Al-Mg-Si 和 Al-Cu-Mg 合金的热裂敏感因子，并于实验结果相比较，结果说明计算结果与实验结果相吻合，说明该理论具有一定的实验指导意义。

本文以 Al-Si 合金为研究对象，利用 Kou 的理论计算了不同 Si 含量对合金热裂敏感因子的影响。同时，研究了 Mg 元素对 Al-Si 合金热裂敏感因子的影响，为 Al-Si 及 Al-Si 基合金成分设计提供一定的理论基础。

## 2 计算方法

### 2.1 计算公式

本文采用 Kou 等人的热裂判别公式[13]，如若合金某处满足式（1），该处就会形成热裂。

$$\frac{d\varepsilon}{dt} > \sqrt{1-\beta} \frac{d\sqrt{f_s}}{dT} + \frac{1}{(dT/dt)} \frac{d}{dz} (1 - \sqrt{1-\beta} \sqrt{f_s}) v_z \quad (1)$$

式中， $\varepsilon$ ——枝晶受到的应变；

$T$ ——合金的温度；

$B$ ——合金收缩因子；

$f_s$ ——固相体积分数；

$t$ ——时间；

$z$ ——合金的生长方向；

$v_z$ ——液相合金在 z 轴方向的流动速度。

式（1）的形式较为复杂，对式（1）进行简化分析。引入热裂敏感因子 CSI(crack susceptibility index)。

$$CSI = \text{MAX} \left| \frac{dT}{d\sqrt{f_s}} \right|_{f_s \rightarrow 1} \quad (2)$$

式（2）能定量预测热裂纹的形成，是判断合金热裂敏感性的主要指标，其中的最大值称为热裂敏感因子。热裂敏感因子数值越大，说明合金的热裂倾向越大。

### 2.2 计算材料及方法

参考 Al-Si 合金相图，分别选择不同成分的亚共晶和过共晶成分进行计算，表 1 是计算过程中合金的具体成分。

表 1 Al-Si-Mg 合金成分

合金	化学组成(质量百分比)		
	Si	Mg	Al
1	5%	/	余量
2	10%	/	余量
3	11%	/	余量
4	12%	2%	余量
5	13%	2%	余量
6	14%	2%	余量
7	15%	2~5%	余量

采用 Pandat (2022 Education) 计算模拟软件进行数据计算。首先，载入 Al-Si 合金的热力学数据，设计 Al-x%Si 合金的成分。计算出  $\sqrt{f_s}$  与时间的变化曲线，再对该曲线求导 ( $\frac{dT}{d\sqrt{f_s}}$ )，由于计算结果是负值，由式

(2) 可知，需要取绝对值，因而对结果前加负号，并建立  $\sqrt{f_s}$  与  $-\frac{dT}{d\sqrt{f_s}}$  的关系曲线，所得结果大小既是判断

合金发生热裂倾向的热裂敏感因子。最后，加入 Mg 元素，并导入 Al-Si-Mg 合金热力学数据，计算出加入 Mg 后的热裂敏感因子的变化。计算时，按照砂型铸造进行参数的设置，冷却速度为 0.4 °C/s，采用 BD (back

diffusion) 模式, 温度梯度设置为  $4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ 。

### 3 计算结果与分析

#### 3.1 Al-Si 合金的凝固路径

图 1(a) 是不同含量  $\text{Al}-x\%\text{Si}$  ( $x=5, 10, 11, 12, 13, 14, 15$ ) 在凝固时固相分数与温度的关系图。从图中可以看出, 随 Si 含量的增加, 两相区的范围(液相线与共晶线之间的温度区间)出现先减小后增加的趋势。当 Si 含量在 5% 时, 合金开始在  $628\text{ }^{\circ}\text{C}$  开始时凝固, 出现固相, 当温度到达  $604\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 完成凝固。当 Si 含量在 10% 时, 合金开始在  $595\text{ }^{\circ}\text{C}$  开始时凝固, 出现固相, 当温度到达  $576\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 出现共晶组织。原因是该点接近共晶点( $\text{Si}=12.6\%$ ), 液相直接转变成固相。当 Si 含量在 12% 时, 两相区范围达到最小, 原因是该点接近共晶点( $\text{Si}=12.6\%$ ), 液相直接转变成固相。当合金 Si 含量超过 13% 时, 达到过共晶成分, 液相开始凝固的温度, 随 Si 含量的增加逐渐又开始增加, 两相区(液相 +Diam-A4)的范围开始增加, 造成相同温度下, 固相占据的分数开始增加。图 1(b) 是将固相分数经过平方根处理后的变化曲线, 变化规律与图 1(a) 基本相同。

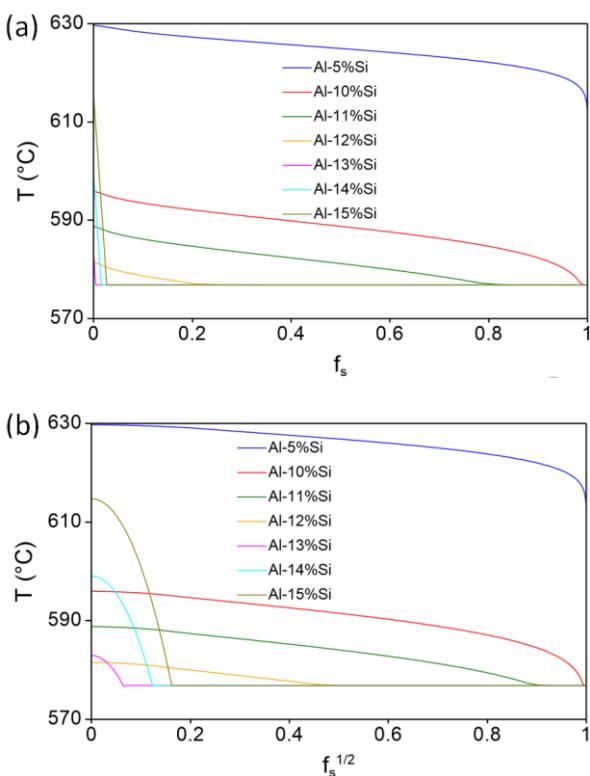


图 1  $\text{Al}-x\%\text{Si}$  合金固相分数与温度之间的关系 (a)  $T$  与  $f_s$ ; (b)  $T$  与  $f_s^{1/2}$

#### 3.2 Al-Si 合金的热裂敏感因子计算结果

图 2(a) 是计算得到的不同含量  $\text{Al}-x\%\text{Si}$  ( $x=5, 10, 11, 12, 13, 14, 15$ ) 合金在凝固时的热裂敏感因子曲线。图 2(b) 是图 2(a) 中虚线框部分的放大。从图中可以看出, 当 Si 含量在 5% 和 10% 时, 在  $\sqrt{f_s} < 1$  的区间没有峰值出现。当固相分数达到 1 时, 虽然计算曲线向上进行延伸, 但是合金已经凝固, 因而不存在热裂倾向。当 Si 含量在 11%, 合金峰值很小, 热裂敏感因子只有 26 (如图 2(b) 所示)。综上, 可以看出, 亚共晶成分( $\text{Si}<12\%$ ) 的 Al-Si 合金热裂敏感因子很小, 说明亚共晶成分的 Al-Si 合金在凝固过程中不会产生热裂。

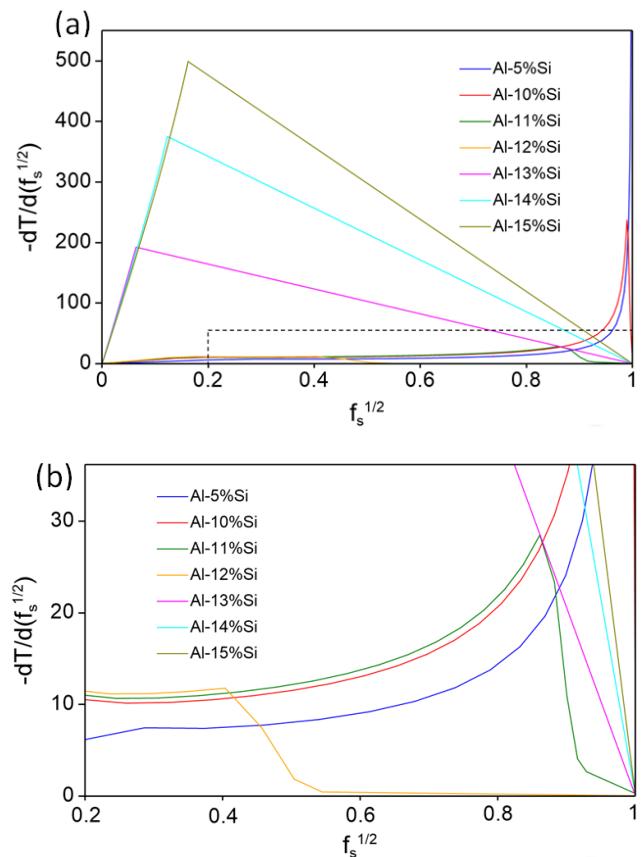


图 2  $\text{Al}-x\%\text{Si}$  合金热裂敏感因子计算结果 (a) 整体; (b) 局部

合金在共晶成分点( $\text{Si}=12\%$ )附近的热裂敏感因子也非常小, 只有 12。但是, 当合金成分达到过共晶成分( $\text{Si}>12\%$ )时, 合金的热裂敏感因子突然增加。比如, 当 Si 含量在 13% 时, 曲线峰值突然增加至 192, 当 Si 含量在 15% 时, 达到最大值 499。说明在过共晶区域合金有出现热裂的倾向, 且倾向随 Si 含量的增加逐渐增加。产生热裂的原因可能与过共晶成分有关, 合金随温度的降低开始进入两相区后,

固相后期增加的速率极快（如图 1 (a)），凝固后出现的收缩，造成应力集中，在应力的作用下，合金开始出现裂纹。此外，合金在此范围之内的流动性能变差[15]，凝固后期液相补缩不好，导致热裂敏感因子增加。

### 3.3 Mg 元素 Al-Si 合金凝固路径的影响

为减少合金出现热裂的倾向，考虑加入合金 Mg 元素，并对 Si 含量大于 12% 的合金进行凝固模拟计算。

图 3 (a) 是不同含量 Al- $x\%$ Si-2%Mg ( $x=12, 13, 14, 15$ ) 合金在凝固时固相分数与温度的关系图。与图 1 (a) 相比，可以看出，合金在加入 Mg 元素后，合金开始出现固相以及最后完全凝固（固相分数  $f_s$  为 1 时）的温度降低，原因是 Mg 的熔点要比 Al 和 Si 的熔点低，造成合金固相线的温度降低。其余变化趋势基本相同。图 3 (b) 是将固相分数经过平方根处理后的变化曲线。与图 1 (b) 相比较，可以看出，含 Si 在 15% 的 Al-15%Si-2%Mg 合金变化趋势更加平滑，各曲线段的斜率基本相同，说明热裂倾向性开始减小。

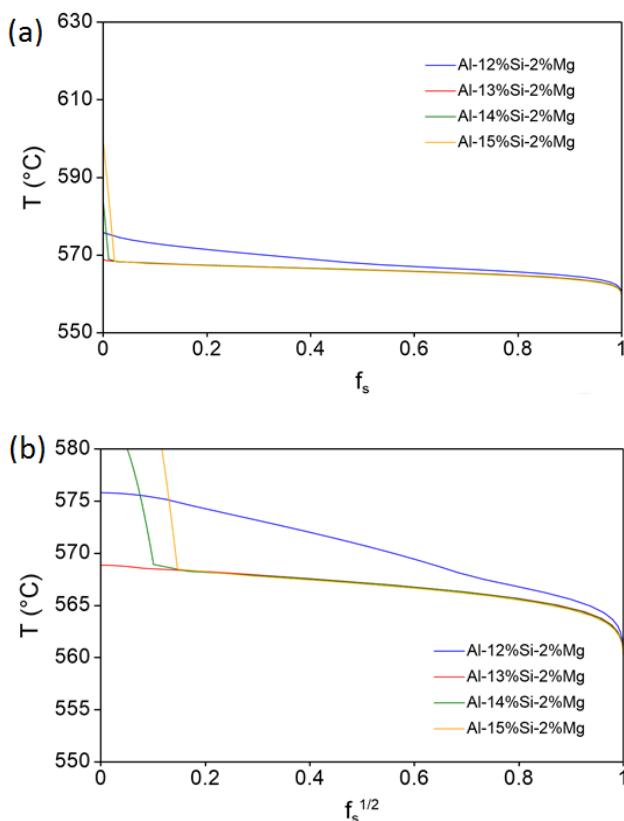


图 3 Al- $x\%$ Si-Mg 合金固相分数与温度之间的关系 (a)  $T$  与  $f_s$ ;  
(b)  $T$  与  $f_s^{1/2}$

### 3.4 Mg 元素对 Al-Si 合金热裂敏感因子的影响

图 4 是不同含量 Al- $x\%$ Si-2%Mg ( $x=12, 13, 14, 15$ ) 合金在凝固时的热裂敏感因子。与图 2 比较，可以看出，加入 Mg 元素后，合金的热裂敏感因子开始明显出现下降。比如，当 Si 含量在 13% 时，未加入 Mg 元素前，合金的热裂敏感因子峰值为 192，加入 Mg 元素后，热裂敏感因子降为 5 以下（如图 4 中蓝色曲线最大值）；当 Si 含量在 14% 时，未加入 Mg 元素前，合金的热裂敏感因子为 375，加入 Mg 元素后，热裂敏感因子降为 300 以下；含 Si 15% 的合金也从 499 下降至 436 左右。上述计算结果说明过共晶成分的 Al-Si 合金在加入 Mg 元素后，合金的热裂倾向明显开始减小。

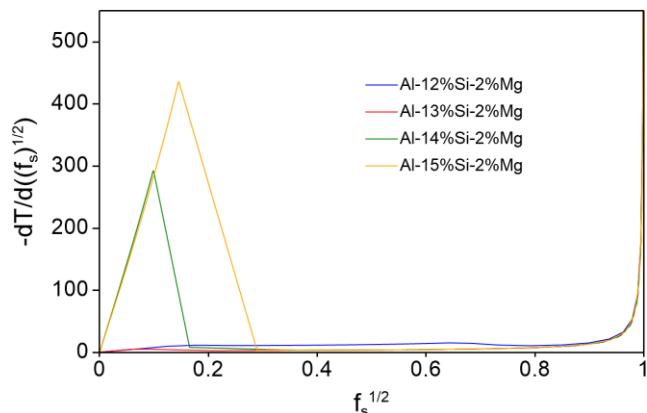


图 4 Mg 对合金热裂敏感因子影响

为进一步研究 Mg 含量对 Al-Si 合金热裂因子的影响，对 Al-15%Si 合金分别加入 2%、3%、4% 以及 5% 的 Mg 元素，计算 Mg 含量对 Al-Si 合金热裂因子的影响。计算结果见图 5。

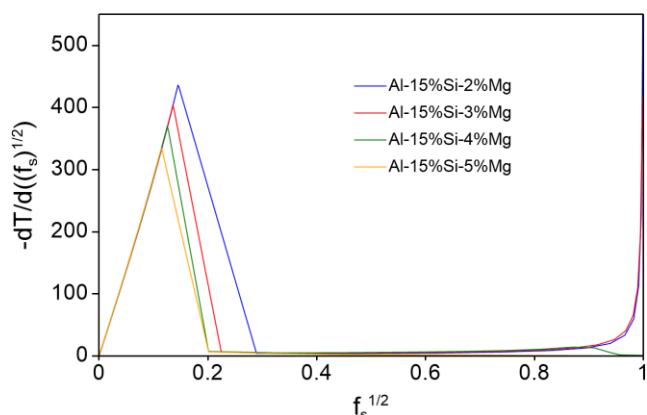


图 5 Mg 含量对合金热裂敏感因子影响

从图 5 中可以看出, 当 Mg 含量在 3% 时, 合金的热裂敏感因子为 403, 比 Mg 含量在 2% 时, 下降了 33。当 Mg 含量分别在 4% 和 5% 时, 合金的热裂敏感因子进一步下降至 369 和 330。由以上结果, 可以看出, 合金的热裂因子最大值随 Mg 含量的增加逐渐开始减小。其原因是当 Mg 元素加入合金后, 降低了合金的凝固温度, 同时延缓了合金固相凝固的速度, 两相区中的液相补缩开始增加, 因而, 合金的热烈倾向开始减小。

## 4 结论

利用 Pandat 计算了 Al-Si 合金的热裂敏感因子, 分析了 Mg 元素对合金热裂敏感因子的影响。取得如下结论:

- (1) 在亚共晶区域内, Al-Si 合金热裂敏感因子较小, 在过共晶区内, Al-Si 合金的热裂敏感因子较大, 且随 Si 含量的增加而增加;
- (2) 在 Al-Si 合金中加入 Mg 元素, 能有效降低 Al-Si 合金热裂敏感因子, 且随 Mg 含量的增加逐渐减少。

## 参考文献

- [1] Birol Y. Melt treatment of Al-Si foundry alloy with B and Sr additions [J]. Journal of Materials Science, 2017, 52 (11): 6856-6865.
- [2] Stadler F, Antrekowitsch H, Fragner W, et al. Effect of main alloying elements on strength of Al-Si foundry alloys at elevated temperatures [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2012, 25 (4): 215-224.
- [3] Ye H. An overview of the development of Al-Si-Alloy based material for engine applications [J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2003, 12: 288-297.
- [4] Gan J Q, Huang Y J, Wen C, et al. Effect of Sr modification on microstructure and thermal conductivity of hypoeutectic Al-Si alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30 (11): 2879-2890.
- [5] Olivier C, Yvan C, Michel B. Hot tearing in steels during solidification: experimental characterization and thermomechanical modeling [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2008, 130 (2): 1-7.
- [6] Bellet M, Cerri O, Bobadilla M, et al. Modeling hot tearing during solidification of steels: assessment and improvement of macroscopic criteria through the analysis of two experimental tests [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2009, 40 (11): 2705-2717.
- [7] Li S, Apelian D. Hot tearing of aluminum alloys a critical literature review [J]. International Journal of Metalcasting, 2011, 5 (1): 23-40.
- [8] Li Y, Li H, Katgerman L, et al. Recent advances in hot tearing during casting of aluminium alloys [J]. Progress in Materials Science, 2021, 117:100741.
- [9] Sun Z, Tan X, Wang C, et al. Reducing hot tearing by grain boundary segregation engineering in additive manufacturing: example of an  $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$  high-entropy alloy [J]. Acta Materialia, 2021, 204: 116505.
- [10] Song J F, Pan F S, Jiang B, et al. A review on hot tearing of magnesium alloys [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2016, 4 (3): 151-172.
- [11] Clyne T W, Davies G J. The influence of composition on solidification cracking susceptibility in binary alloy system [J]. The British Foundryman, 1981, 74: 65-73.
- [12] Monroe C A, Beckermann C. Development of a hot tear indicator for steel castings [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 413:30-36.
- [13] Kou S. A criterion for cracking during solidification [J]. Acta Materialia, 2015, 88:366-374.
- [14] Liu J, Kou S. Susceptibility of ternary aluminum alloys to cracking during solidification [J]. Acta Materialia, 2017, 125: 513-523.
- [15] Lang G. The relation between phase diagram and fluidity [J]. Aluminum, 1972, 48: 664-672.