

凝固条件和镁对 Al-Si11.0 合金组织的影响

Effect of the Cooling Conditions and Mg Content on
the Microstructures of Al-Si11.0 Alloy

徐才录 (清华大学机械工程系)

H. M. Tensi R. Roesch (慕尼黑工业大学, 德国)

Xu Cailu (Dept. of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing)

H. M. Tensi R. Roesch (Dept. of Mechanical Engineering,

Technical University Munich, Germany)

[摘要] 研究了定向凝固时冷却条件和镁元素对 Al-Si11.0 合金树枝晶结构和共晶组织的影响。试验结果表明, 随着冷却速度的增加, Al-Si11.0 合金的一次枝晶和二次分枝间距都显著减小; 在较小的冷却速度时, 加入镁元素后合金的二次分枝间距明显增大, 而在冷却速度大于 $160\text{K}/\text{min}$ 时, 则没有影响。试验还发现, 加入镁元素后, 冷却速度对共晶成分的影响显著减小。提高冷却速度使得合金的共晶组织变细。在试验范围内, Al-Si11.0 合金中加入 0.15% 镁时, 共晶组织变得较粗; 而当镁的加入量增加到 0.3% 时, 其共晶组织比 Al-Si11.0 合金细得多, 分析了出现这一结果的原因。

关键词 铝合金 定向凝固 显微组织

[Abstract] Effect of cooling conditions and Mg on the dendritic, eutectic structures of Al-Si11.0 alloy by unidirectional solidification was investigated. The results show that with increase of the cooling rate the first dendritic spacings and second dendritic arm spacings are evidently decreased; Mg addition raises the dendritic arm spacing considerably at the low cooling rate ($< 160\text{K}/\text{min}$), while it has no significant influence on dendritic arm spacings at high cooling rate. Enhancement of the cooling rate fines the eutectic structure of Al-Si11.0 alloy. In all experimented cooling conditions the alloy with the addition of 0.15% Mg possesses the coarsest eutectic structure, while the alloy with the 0.3% Mg addition the finest structure in eutectics.

Keywords aluminium unidirectional solidification microstructure

1 前言

当一种铸造合金的成分确定后, 其铸造组织主要决定于凝固条件。定向凝固工艺由于能够独立地控制凝固界面前沿的温度梯度 G 和凝固界面的移动速度 V , 使得人们能非常准确地控制凝固条件。通过定量金相分析仪, 则可以确定凝固组织的特征, 从而描述凝固组织和凝固条件的关系。

Al-Si 合金中的凝固组织可分为树枝晶和共晶组织。对于定向凝固得到的 Al 固溶体的树枝晶结构可由一次树枝晶间距 e 和二次分枝间距 d_s 来表示粗细程度。根据 Hunt^[1] 和 Kurz^[2] 的试验, 一次树枝晶间距与凝

固速度 V 和凝固界面前沿的温度梯度 G 有下列关系:

$$e = k G^{-1/2} V^{-1/4} \quad (1)$$

其中, k 是由试验结果决定的常数。

在二次分枝间距 d_s 与冷却速度的关系方面已经做了许多工作, 而且已取得了令人满意的结果。根据 Kattmis^[3] 的报告, 两者的关系可用下式表示:

$$d_s = B_0 (M \times V)^{-1/3} \quad (2)$$

其中, B_0 是与树枝晶形状有关的常数, M 是决定于材料的常数。其他的试验结果显示, 根据合金成分的不同其指数介于 $-1/2$ 和 $-1/3$ 之间。

冷却条件对树枝晶间的剩余液态-共晶成分或过共晶成分的耦合生长组织也同样有很大的影响,它们的这种关系也可以用定量金相分析得到^[4,5]。

在本工作中,利用慕尼黑工业大学的定向凝固装置和定量金相分析设备,研究了冷却条件和微量元素镁对 Al-Si11.0 合金树枝晶、共晶组织的影响。

2 试验条件

圆柱状试棒在慕尼黑工业大学机械工程材料研究所的定向凝固装置上^[6]凝固得到。凝固参数即凝固速度 V 和凝固界面前沿的温度梯度 G 由两根热电偶(直径 0.2mm)组成的探针测量并直接输入计算机处理。

试验的原材料由瑞士的 Alusuisse-Lonza 公司提供。试样的成分如表1所示。凝固界面前沿的温度梯度 G 尽可能地控制在 20 (±2) K/mm 的范围内,而凝固速度 V 则在 2~30mm/min 内变化。

表1 所用 Al-Si11.0 合金的成分 (wt%)

Table 1 Composition of Al-Si11.0 alloy (wt%)

| 合金 | Si | Mg | Fe | Mn | Cu | Zn |
|-----------------|------|------|---------|---------|---------|---------|
| Al-Si11.0 | 11.0 | - | < 0.002 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| Al-Si11.0Mg0.15 | 11.0 | 0.15 | < 0.002 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| Al-Si11.0Mg0.30 | 11.0 | 0.29 | < 0.002 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |

金相试样从试棒的稳定凝固参数区域中切取。一次枝晶间距 e 和二次分枝间距 ds 分别在试样的横截面和纵截面上测量得到^[7]。下列共晶区域的参数由一个半自动的定量金相分析仪上得到:共晶区域的面积(体积)分数;共晶体中 Si-相的面积(体积)分数;共晶区中 Si-粒子的几何尺寸(平均截面积大小,形状系数^[10]等);共晶 Si 的细化度(单位面积上共晶 Si 的数目);共晶 Si 平均自由间距。

3 试验结果与讨论

3.1 凝固参数对树枝晶结构的影响

定向凝固中的温度梯度 G 和凝固速度 V 对一次枝晶间距的影响如图1a 所示;图1b 则表示了凝固参数对二次分枝间距 ds 的影响。

从图1可见,一次枝晶间距 e 和二次分枝间距 ds 均随冷却速度 G × V 的增加而减小。这里也可以看出镁元素的作用:在较低的冷却速度时(约 40K/min),Al-Si11.0Mg0.3 和 Al-Si11.0Mg0.15 合金的二次分枝

间距明显大于没有含镁的 Al-Si11.0 的 ds,在较高冷却速度时,则三种合金有类似的 ds 值(见表2)。

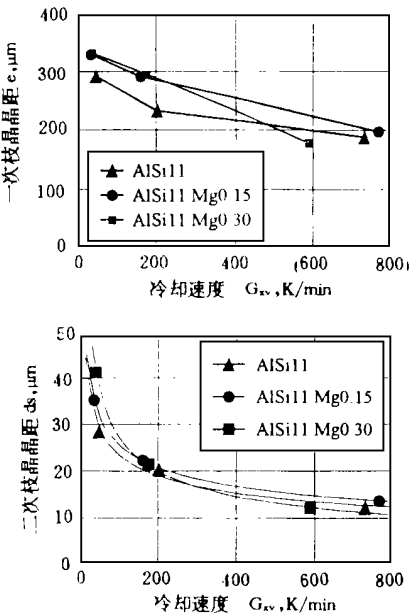


图1 冷却速度对树枝晶一次、二次枝晶间距的影响

Fig. 1 Influence of cooling rate on dendritic spacing and dendritic arm spacings

表2 不同凝固条件下的二次分枝间距 ds (μm)

Table 2 Dendritic arm spacing at various solidifying conditions

| 合金 | 二次分枝间距 μm | | |
|-----------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | V _{EF} = 2mm/min | V _{EF} = 8mm/min | V _{EF} = 30mm/min |
| Al-Si11.0 | 28.47 | 20.38 | 12.30 |
| Al-Si11.0Mg0.15 | 35.22 | 22.34 | 13.71 |
| Al-Si11.0Mg0.30 | 41.29 | 21.50 | 12.27 |

镁元素对二次分枝间距 ds 的影响主要是由于加入镁后增加了合金的凝固区间(在定向凝固中即是树枝晶凝固界面与共晶凝固界面的距离)。根据文献[8],特别在较低的冷却速度时,镁对铝硅合金的凝固区间有明显的影响(表3),从而影响到相同冷却速度时的凝固(粗化)时间,造成二次分枝间距 ds 的增加。

文献[9,10]指出,加入镁后将降低 Si 在 Al 液中的扩展,进而引起二次分枝的减小(枝晶尖端溶质富集区的减小^[11]),这种影响与上面的影响刚好相反。从实验结果可见,在较低冷却速度时,镁的加入使得二次分枝间距增加了,说明对凝固区间的影响是主要的。而在高的冷却速度时,镁对 ds 影响就显得微不足道了。

表3 凝固速度对树枝晶和共晶凝固界面间距的影响

Table 3 Influence of solidification rate on distance between dendritic and eutectic solidification front

| 合金 | 树枝晶和共晶凝固界面的间距, mm | |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|
| | $V_{EF}=2\text{mm/min}$ | $V_{EF}=8\text{mm/min}$ |
| Al-Si11.0 | 0.39 | 0.74 |
| Al-Si11.0Mg0.30 | 0.67 | 0.96 |

加入镁后对一次枝晶间距 e 的影响虽然较小,但效果与对二次分枝的影响类似。

3.2 凝固条件和镁对 Al-Si 合金共晶成分的影响

随着冷却速度的增加, Al-Si 合金中共晶相的体积分数显著减少(图2a),同时共晶相中的 Si 含量相应增加(图2b)。

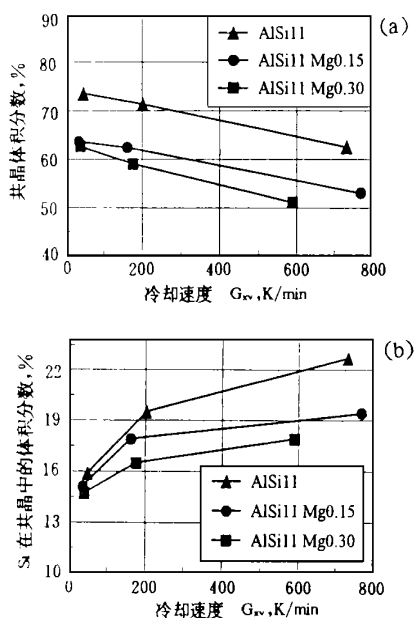


图2 共晶体体积分数和 Si 在共晶体中的体积分数与冷却速度、含镁量的关系

Fig. 2 Relationship between Si volume fraction in eutectic and cooling rate, magnesium content

在这里, 加入镁的影响也清楚可见。加入镁0.3%合金的共晶体的体积分数在实验冷却条件下比 Al-Si11.0合金低10.0%左右, 而两种合金共晶成分之差则随冷却速度的提高而增加(图2b)。在 Al-Si (Si 含量为5%~17%) 二元合金中, Steen 等^[12]以及 Tensi 和 Pek^[13]的试验结果表明, 冷却速度对 Al-Si 共晶成分的影响极大, 在高的冷却速度下, Al-17.0Si 合金也可以

得到不含初晶 Si 全部共晶体组织。由图2b 可见 Al-Si11.0 与 Al-Si11.0Mg0.3 合金共晶成分的差别随冷却速度提高而增加, 加入少量的镁元素减小了共晶成分随冷却速度增加而升高的趋势。

3.3 凝固条件和镁元素对 Al-Si 共晶组织的影响

凝固条件和镁含量不但影响 Al-Si11.0 合金树枝晶中间的共晶体量和共晶成分, 而且对共晶组织 (Si 在共晶体中的形态) 也有明显的影响。三种合金的共晶组织随冷却速度的提高而变细了。作为定量分析的共晶 Si 组织, 由在每个试棒上切取的横截面将测定大约2000个共晶 Si 粒子而得到“共晶 Si 粒子平均面积 A ”和“共晶 Si 细化度”来衡量。

共晶 Si 粒子的大小与分布和共晶 Si 细化度与冷却速度的关系如图3、4所示。图3中清楚地显示, 冷却速度较低时, 共晶 Si 的面积与它们之间的平均自由间距随着冷却速度的增加而迅速减少, 在冷却速度大于200 K/min 时, 冷却条件对共晶 Si 粒子则没有实质的影响。与之相适应, 表示单位面积共晶 Si 粒子数的共晶 Si 细化度随冷却速度的提高而增大(见图4)。

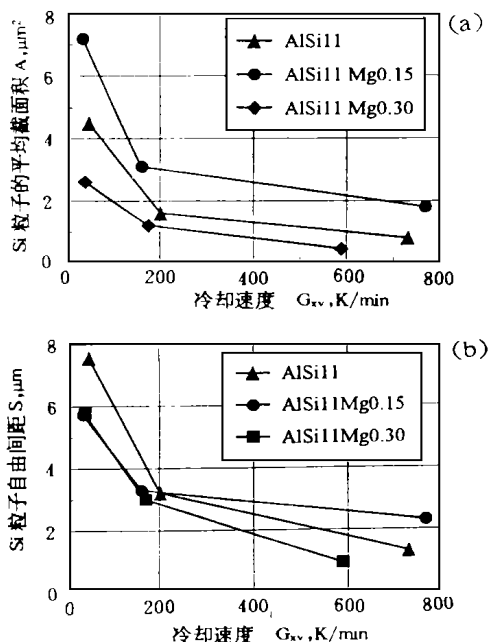


图3 冷却速度和镁含量对共晶 Si 粒子大小、分布的影响

Fig. 3 Influence of cooling rate and Mg content on size and distribution of eutectic Si particle

图3中镁的加入对共晶 Si 的影响是显而易见的。在所有实验条件下, 在 Al-Si11.0, Al-Si11.0Mg0.15 和 Al-Si11.0Mg0.3 三种合金中以加入0.3% Mg 合金的共晶 Si 组织最细, 而加入0.15% Mg 合金的组织最粗,

没有加入镁的 Al-Si11.0 的尺寸介于前两者中间。

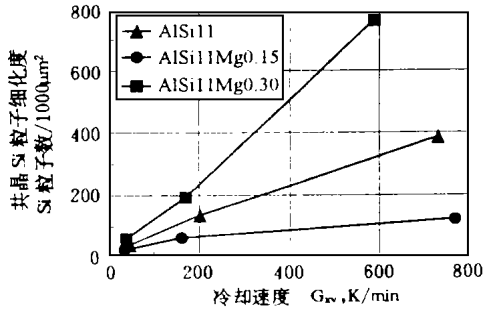


图4 共晶 Si 粒子细化度与冷却速度和镁含量的关系

Fig. 4 Relationship between eutectic Si particle fineness and cooling rate, magnesium content

镁对合金共晶 Si 相的影响可以在下列分析中得到解释。当 Al-Si11.0 合金中加入 0.15% Mg 时, 如前所述, 增加了合金树枝晶凝固界面与共晶凝固界面的距离, 即增加了共晶凝固过程中 Si 的粗化时间, 因此得到了较粗共晶 Si 粒子的 Al-Si 共晶组织。当镁的加入量增加至 0.3% 时, 由于有了较多的镁原子, 这时候镁降低 Si 在 Al 液中的扩散起主导作用, 从而获得较细小的共晶 Si 粒子。

图5给出了冷却速度和镁对共晶 Si 形状因子的影响。从图中可以看出, 在试验的所有冷却条件下, 与共晶 Si 平均尺寸及共晶 Si 细化度的结果相对应, Al-Si11.0Mg0.3 合金的形状因子都是最大的。

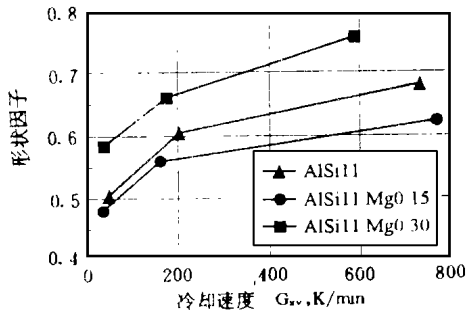


图5 冷却条件和镁对共晶 Si 粒子形状因子的影响

Fig. 5 Influence of cooling condition and magnesium on form factor of eutectic Si particles

随冷却速度的升高, 共晶 Si 的形状因子趋向于 1.0, 即 Si 截面的形状接近于圆。共晶 Si 金相组织中也看出这种趋势。

4 结论

(1) 凝固条件不仅影响 Al-Si11.0 合金的树枝晶结构, 而且对树枝晶间的共晶组织也有明显的影响。加入

镁元素后, 合金的二次分枝间距在低冷却速度 (40K/min) 时增大了, 而在高的冷却速度时, 镁对 Al-Si11.0 合金的二次分枝间距 d_s 则无明显影响。

(2) 镁的加入对 Al-Si 合金共晶成分有明显影响。加入镁后, 冷却速度对共晶成分的影响显著减小。

(3) 随着冷却速度的增加, 合金的共晶组织变细。当加入镁量为 0.15% 时, 合金的共晶组织较 Al-Si11.0 粗, 当加入镁量为 0.3% 时, 则合金的共晶组织比 Al-Si11.0 细得多。

参考文献

- Hunt, J. D. Solidification and Casting of Metals, The Metals Society, Bd. 192, London 1979, 3 ~ 11
- Kurz, W., Fischer, D. J. Acta Metall., New York, 1981, 29 (11): 11 ~ 20
- Kattamis, T. Z., Flemings, M. C. Solidification of Iron-Base Alloys at Large Degree of Undercooling, AMC Contract, Rep. No. DA-19-020-SM C-0231 (X), Cambridge/MA, 1966
- Underwood, E. E. Quantitative Stereology, Addison-Wesley, Publ. Co. Reading, Massachusetts, 1970
- Exner, H. E., Hongardy, H. P. Einfuehrung in die quantitative Gefuegeanalyse, DGM (1984)
- Tensi, H. M., Fuchs, H., Harmathy, P. F., Schmidt, S. Aluminium, 1984, 60, 499 ~ 502, 614 ~ 617
- Tensi, H. M., Fuchs, H. Aluminium, 58: 1982, 335 ~ 339
- Tensi, H. M., Roesch R., Macksoth, C. Keimbildung und Kristallwachstum von Silizium in AlSi-Legierungen, Arbeitsbericht zur Te 65/28-3, TU Mnich, 1990
- Freche, H. R. Diffusion of Magnesium and Silicon into Aluminium, Trans. Amer. Inst. Min. Met. Eng., 1936, 122, 324 ~ 326
- Dorward, R. C. Predicting Ternary Diffusion Interactions from Solubility Relationships, Trans. Met. soc. AIME, July 1968, 242 (7): 1470 ~ 1472
- 朱云, 徐才录. 冷却速度和细化元素对 Al-5.0Cu-0.8Mg 合金组织的影响. 航空学报, 1985, 6: 279 ~ 284
- Steen, H. A. H., Hellawell, A. Acta Metall., 1972, 20: 363 ~ 370
- Tensi, H. M., Pek, P. Aluminium, 1986, 62 (8)

收稿日期: 1998. 1. 27

徐才录, 男, 1961年11月生, 工程师。联系地址: 北京市清华大学机械系 (邮编 100085)