

[文章编号] 1004- 0609(2000) 04- 0484- 03

超高压条件下凝固界面的稳定性^①

胡火生¹, 于溪凤¹, 张国志¹, 郑翠侠¹, 王 涛¹, 贾光霖¹, 郝兆印², 郭学彬²

(1. 东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110006; 2. 吉林大学 超硬材料国家重点实验室, 长春 130023)

[摘 要] 对 AlSi 合金在 3.6~ 5.5 GPa 高压下凝固形成的组织与常压凝固组织进行了对比, 对高压下的胞枝晶转变进行了分析。发现高压对合金固溶度和扩散系数的影响是引起高压凝固组织变化的主要原因。

[关键词] 高压凝固; AlSi 合金; 胞枝晶转变; 凝固界面

[中图分类号] TG111.4

[文献标识码] A

现代凝固技术的研究与应用, 迫切要求从传热、传质和固-液界面动力学各方面对凝固过程进行定量描述, 并且对各种非平衡条件下的固-液界面形态稳定性进行分析^[1~ 3]。在常压下, 凝固微观组织的形态取决于冷却条件和合金成分^[4, 5]。平面对固-液界面的不稳定导致枝晶形成, 如果生长条件有利于枝晶形成, 则胞晶就会迅速转变为枝晶, 因此, 在常压下, 胞晶只能在合金的定向凝固期间出现^[6]。由于高压可以大大改变固溶度和扩散系数^[7], 从而改变溶质分配系数, 必然会影响凝固组织。本文对此进行了研究。

1 实验

用高纯铝(99.999%)和单晶硅(99.999%)制成 AlSi 母合金(含硅量分别为 9.21%, 20.33% 和 26.60%), 在金属型中浇注成 $d 25\text{ mm}$ 的圆棒, 再加工成 $d 14\text{ mm} \times 13\text{ mm}$ 的试样。高压凝固试样的组装见文献[8]。熔化温度为 1450 K 左右。为了考察压力对凝固组织的影响, 选择 4 个不同压力(3.66, 4.28, 4.89 和 5.50 GPa), 加热保压 20 min 后冷却凝固。待完全凝固后, 卸压取出试样, 进行组织和微区成分分析。

2 实验结果与分析

2.1 高压凝固组织

常压下金属型中凝固的 Al9.21% Si 合金的组织由 α 枝晶和共晶组成, 而在 4.28 GPa 压力下凝

固的组织则主要为胞状组织, 见图 1。胞状晶是 α 过饱和固溶体, 其中 Si 的固溶度为 8.76%, 在胞状组织的边界有少量共晶组织。

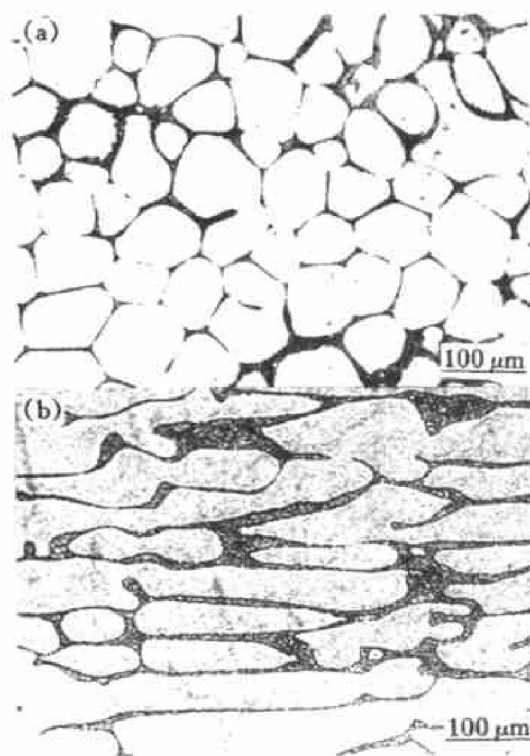


图 1 高压凝固 Al9.21% Si 合金的胞状组织

Fig. 1 Cellular structures of Al-9.21% Si alloy solidified at high pressure

(a) —Cross section; (b) —Longitudinal section

常压下金属型中凝固的 Al20.33% Si 合金的组织为块状过共晶硅和枝状共晶组织, 而在 4.28 GPa 高压下凝固时, 出现胞状晶和树枝状晶的混合组织, 块状过共晶硅消失, 见图 2。在胞状晶和树

① [基金项目] 国家自然科学基金资助项目(59571040)和辽宁省科学基金资助项目(971035)

[收稿日期] 1999- 09- 14; [修订日期] 1999- 11- 14

[作者简介] 胡火生(1944-), 男, 副教授。

枝状晶的过渡区, 胞状晶逐步由等轴胞状变为长椭圆状, 然后形成树枝状。从过渡区的组织可以看出, 最先形成的是胞状晶, 树枝晶是在胞状晶的基础上生长出来的, 见图 3。

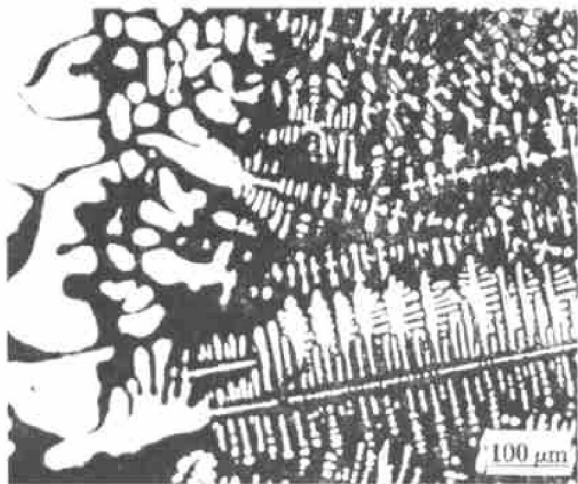


图 2 高压凝固 Al-20.33% Si 合金的胞状和树枝状混合组织

Fig. 2 Cellular and dendritic structures of Al-20.33% Si alloy solidified at high pressure

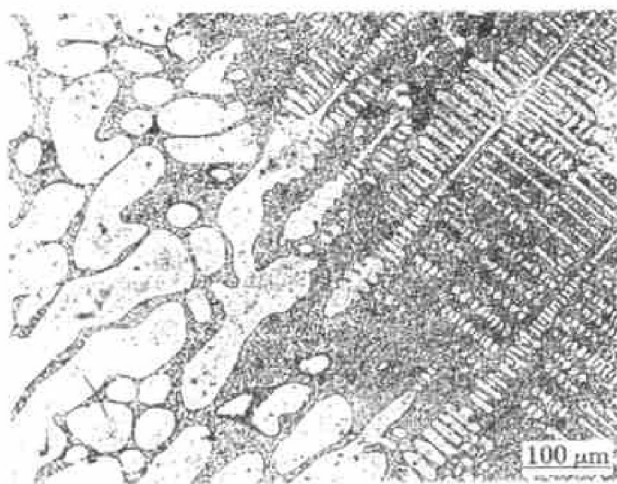


图 3 胞-枝转变的界面生长形态

Fig. 3 Interface growth morphology of cellular-dendritic transition

对 Al-20.33% Si 合金在 4 种不同压力条件下凝固形成的胞状晶和树枝晶的固溶 Si 量进行微区成分分析, 结果见图 4。可见, 随着压力增加, 固溶体的 Si 含量增加, 而在同一压力条件下凝固的试样中, 枝晶 α 固溶体中的 Si 含量均大于胞晶 α 固溶体中的 Si 含量, 这说明, 在压力下凝固, 溶质含量低的 Al-Si 合金容易以胞状方式生长。

在 5.5 GPa 压力下凝固的 Al-26.60% Si 合金中仍有细小块状 β 相出现, 其中 Al 的固溶度为 37.62%^[9], 并有细小的 α 枝晶和共晶, 但未发现胞状组织。这也证明, 高压下形成胞状组织的条件

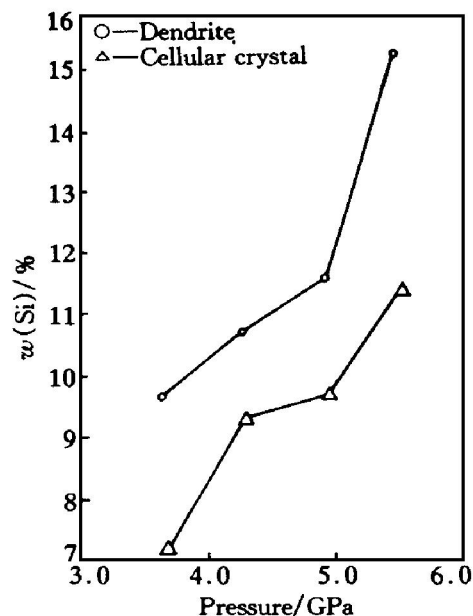


图 4 不同组织中的 Si 量分布

Fig. 4 Si contents at different structures

受合金溶质含量的影响。

2.2 高压下凝固胞-枝组织转变

当含有合金元素或杂质时, 柱状晶的形态通常为树枝晶, 这是合金的成分影响了凝固微观组织所致。从合金熔液中形成晶体时, 可以导致成分的局部变化, 可用溶质分配系数 $K = (c_S / c_L)_{t, p}$ 表示, 其中 c_S , c_L , t 和 p 分别代表固相浓度、液相浓度、温度和压力。胞晶的生长条件接近于平界面的成分过冷限, 而枝晶是远离平界面稳定性极限的结晶形式。只有在常压下和在温度梯度下的定向生长期间, 胞晶才能成为一种稳定的生长形式。

Al-Si 合金在常压下凝固时, 由于 α 相 Si 固溶量很低, 一旦有 α 相析出, 就有大量 Si 溶质排出, 引起界面前沿的扰动而导致不稳定, 形成枝晶生长。因此, 即使是亚共晶 Al-Si 合金, 常压下也很难得到胞状组织。而在高压下, 由于压力导致 α 相中 Si 固溶度增加。在一定 Si 含量下, α 相中 Si 固溶度接近熔体中的 Si 含量, 溶质分配系数接近 1, α 相生长时, 不再有溶质排出, 或者很少排出, 类似无限固溶体合金的结晶^[10], 界面前沿不再有溶质堆积而出现的界面不稳定, 从而形成胞状生长的条件。在 5.5 GPa 的高压下, α 相中 Si 的固溶度最高可达 20%。当熔体中的 Si 含量为 9.21% 时, α 相中 Si 的固溶度大于熔体中的 Si 溶质含量, 生长类似纯金属, 比较容易得到胞状组织。

必须指出, 图 4 中固溶度随凝固压力的关系是在 Si 含量小于 20.33% 的条件下作出的, 实验中发现, 当合金中溶质含量较低时, 即使在高比压下凝

固,在晶界上也总会形成极少量的共晶。可以认为,在任何压力下,固溶度总是略小于合金的实际溶质含量。

当熔体中的Si含量超过高压下 α 相中的固溶度时, α 相生长就有溶质排出,导致界面不稳定。在Si含量不太高时,由于高压下溶质扩散缓慢,界面前沿溶质堆积需要一个过程,也有形成少量胞状组织的条件。继续生长时,界面前沿溶质堆积增加,导致不稳定,有利于枝晶生长,胞状晶就会迅速转变为枝晶。从图3也可以看出由界面不稳定导致的胞状晶向枝状晶的转变。

当熔体中Si含量更高,达到26.60%时,已经超过高压下的过饱和固溶度,不再有形成胞状组织的条件。

以上只是从溶质分配系数的角度分析了溶质排出对界面稳定性的影响,而高压也可能对界面张力产生影响,从而影响界面稳定性。

3 结论

1) Si含量较低时,高压凝固由于增加Al-Si合金中Si在 α 相中的固溶度,减少或抑制界面前沿的溶质堆积,增加界面稳定性,合金容易以胞状方式生长。

2) 溶质含量超过高压下 α 相的过饱和固溶度时,就有界面前沿的溶质堆积,界面不稳定,形成从胞晶向枝晶的转变。溶质含量更高时,不会形成胞状组织。

[REFERENCES]

- [1] SHEN Fuming(沈福宁), TANG Yali(汤亚力), GUAN Shaokang(关绍康), et al. 凝固理论进展与快速凝固[J]. Acta Metallurgica Sinica(金属学报), 1996, 32: 673-684.
- [2] Kurz W and Trivedi R. Solidification micro structures: recent developments and future directions[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1990, 38: 1-17.
- [3] LIU Zhiyi(刘志义) and FU Hengzhi(傅恒志). 晶体取向对DD8镍基高温合金定向凝固的界面稳定性的影响[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1998, 8(1): 47-52.
- [4] LI Shuping(李顺朴) and CHEN Xichen(陈熙琛). Al-Si合金的共晶共生区组织形成规律[J]. Acta Metallurgica Sinica(金属学报), 1995, 31(2)A: 47-55.
- [5] HU Hanqi(胡汉起). Metal Solidification(金属凝固)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1985. 184.
- [6] Kurz W, Fisher D J 著. MAO Xie-min(毛协民), BAO Guanyan(包冠乾)译. Fundamentals of Solidification(凝固原理)[M]. Xi'an: Northwestern Industry University Press, 1987. 66.
- [7] ZHOU Yaohe(周尧和), HU Zhuangqi(胡壮麒) and JIE Wanqi(介万奇). Solidification Technology(凝固技术)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998. 10.
- [8] ZHANG Guozhi(张国志), YU Xifeng(于溪凤), WANG Xiangyang(王向阳), et al. 提高压凝固Al-Si合金的非平衡组织[J]. Acta Metallurgica Sinica(金属学报), 1999, 35: 285.
- [9] ZHANG Guozhi(张国志), XIN Qibin(辛启斌), WANG Xiangyang(王向阳), et al. 高压高熔点过冷大体积近快速凝固[J]. Journal of Northeastern University(东北大学学报), 1998, 19: 479.
- [10] 大野笃美著. TANG Yabin(唐彦斌), ZHANG Zhengde(张正德)译. Metals Solidification(金属的凝固)[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1983. 21.

Stability of solidification interface at superhigh pressure

HU Huosheng¹, YU Xifeng¹, ZHANG Guozhi¹, ZHENG Cui¹,
WANG Tao¹, JIA Guanglin¹, HAO Zhaoyin², GUO Xuebin²

- (1. College of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110006, P. R. China;
2. State Key Laboratory of Superhard Materials, Jilin University, Changchun 130023, P. R. China)

[Abstract] The structure of Al-Si alloy solidified at 3.3~5.5 GPa pressure was compared with that at normal pressure, and the mechanism of the change from cellular crystal to dendritic crystal was studied. The results show that the changes of solid solubility and diffusion coefficient at high pressure are the main cause of structure changes.

[Key words] high pressure solidification; Al-Si alloys; cellular-dendritic transition; solidification interface

(编辑 杨 兵)