

[文章编号] 1004- 0609(2001)02- 0211- 05

# 7075 合金液相线半连续铸造与二次加热的合金组织<sup>①</sup>

路贵民, 董 杰, 崔建忠

(东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110006)

**[摘 要]** 提出了液相线半连续铸造制备铝合金半固态浆的新工艺, 研究了液相线半连续铸造 7075 合金的微观组织及其在二次加热过程中的变化。在液相线温度下(908 K)半连续铸造的 7075 合金组织为均匀、细小的蔷薇状组织, 晶粒平均等积圆直径为 29.7  $\mu\text{m}$ , 晶粒平均圆度为 1.87。经二次加热后, 铸造组织逐渐转变为等轴晶。在 849 K 下加热 60 min 后, 晶粒平均等积圆直径为 57.6  $\mu\text{m}$ , 平均圆度为 1.49。在 869 K 下加热 30 min 后, 晶粒平均等积圆直径为 47.2  $\mu\text{m}$ , 平均圆度为 1.54。结果表明, 液相线半连续铸造可以获得理想的 7075 合金半固态浆料。

**[关键词]** 液相线铸造; 半连续铸造; 半固态; Al 合金; 非枝晶

**[中图分类号]** TG 292

**[文献标识码]** A

半固态加工作为一种高效节能的现代材料成型新技术, 近年来得到了迅速发展, 应用范围不断扩大, 基础研究也不断深入。该技术因具有一系列独特优点而备受世人瞩目, 必将成为本世纪最具发展潜力的材料成型技术<sup>[1~ 3]</sup>。

在半固态加工过程中, 浆料的制备是关键的技术环节, 也是半固态领域研究的重点问题。目前有关半固态浆料的制备方法主要有电磁搅拌法、应变诱发熔化激活法、喷射成型法、紊流效应法、粉末冶金法和液相线铸造法等<sup>[3~ 5]</sup>, 其中电磁搅拌法和应变诱发熔化激活法已经进入工业应用阶段。

液相线铸造法是近年来作者在大量研究的基础上开发的一种新型制浆技术, 即在合金液相线温度下保温形核后, 进行浇注获得均一细小的非枝晶组织, 以适合于半固态成型。该技术尤其适合于变形铝合金浆料的制备。作者曾对 2168 及 7075 合金铁模铸造进行过详细研究<sup>[6~ 8]</sup>, 并在此基础上开展了液相线半连续铸造的研究工作。本研究的目的是探索液相线铸造过程的熔体凝固机理与工艺条件, 以期为实现工业化生产奠定基础。

## 1 实验

合金以工业纯铝(含 Al 99.7%)、电解铜、金属镁、锌、锰剂为原料, 在坩埚式电阻炉内进行熔炼。经分析, 合金的化学成分如表 1。

精炼后的合金转入静置炉内进行二次深度净化

表 1 实验用 7075 合金成分

Table 1 Composition of experimental 7075 alloy

Element	Cu	Mg	Zn	Mn	Fe	Si	Al
Content/ %	1.67	2.22	5.95	0.30	0.35	0.20	Bal.

后, 在计算机程序控温仪精确控制下冷却与保温。控温精度为  $\pm 1$   $^{\circ}\text{C}$ 。达到预定温度与保温时间后, 在立式半连续铸造机上进行铸造。改变铸造结晶器的内部结构可控制一次冷却强度, 冷却强度由弱至强用 0, A, B, C 表示。通过冷却水流量控制二次冷却强度。冷却水流量为 0~ 0.1  $\text{m}^3/\text{min}$ , 铸造速度可调范围为 0~ 300  $\text{mm}/\text{min}$ 。铸锭尺寸为  $d100 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$ 。

合金的液相点采用差热分析法(DTA)测定。实验用 7075 合金的液相点为 907.5 K。

试样再加热设备为管式电阻炉, 其恒温带长 150 mm。温度控制采用计算机程序控温仪。试样加热实际温度以测温仪测定的温度为准。测温偶为 S 型热电偶。

采用光学显微镜与电子显微镜观察分析金相组织, 用图像分析仪测定晶粒尺寸与圆度。

## 2 结果及分析

### 2.1 7075 合金铸造组织

不同条件下的铸锭组织如图 1, 2 所示。

图 1 所示为 1013 K 下的铸造组织, 其铸造条

① [基金项目] 国家自然科学基金资助项目(59974009)

[收稿日期] 2000- 04- 10; [修订日期] 2000- 09- 22

[作者简介] 路贵民(1965- ), 男, 副教授, 博士。

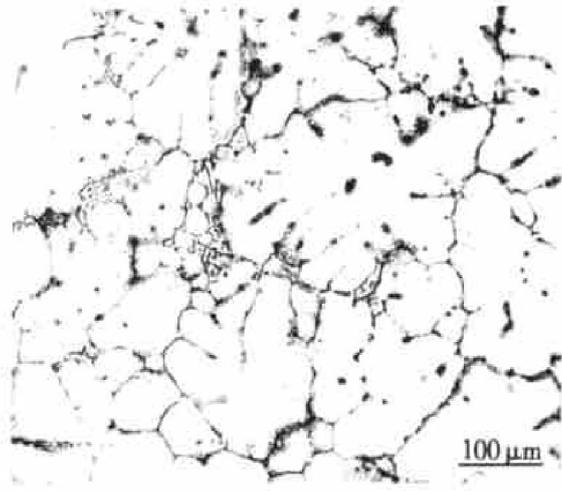


图1 1013 K 7075 合金铸造组织

Fig. 1 Microstructure of 7075 alloy cast at 1013 K

件为: 1013 K 保温 30 min, 一次冷却强度 B, 二次冷却水流量  $0.025 \text{ m}^3/\text{min}$ , 铸造速度  $120 \text{ mm}/\text{min}$ 。图 2(a) 所示为铸造温度  $915 \text{ K}$ , 其它条件与图 1 相同的铸造组织。图 2(b), (c), (d) 所示均为  $908 \text{ K}$  下的铸造组织, 铸造条件分别为: 图 2(b) 保温 3 min,

一次冷却 B, 二次冷却水流量  $0.025 \text{ m}^3/\text{min}$ , 铸造速度  $145 \text{ mm}/\text{min}$ ; 图 2(c) 保温 30 min, 一次冷却 B, 二次冷却水流量  $0.025 \text{ m}^3/\text{min}$ , 铸造速度  $145 \text{ mm}/\text{min}$ ; 图 2(d) 保温 30 min, 一次冷却 A, 二次冷却水流量  $0.075 \text{ m}^3/\text{min}$ , 铸造速度  $180 \text{ mm}/\text{min}$ 。

### 2. 1. 1 浇注温度对合金组织的影响

在常规铸造 ( $1013 \text{ K}$ ) 条件下, 铸锭组织为粗大的树枝晶, 而在低温直至接近液相线温度时, 转变为蔷薇状及近球形的非枝晶组织, 且晶粒逐渐细化。根据结构起伏理论, 在低温时, 熔体内存在大量的近程有序排列的准固态原子集团, 这些原子集团在一定的过冷度下, 便迅速长大变成稳定的结晶核心<sup>[9]</sup>。另外, 当温度足够低时, 熔体有过冷的可能, 发生大量异质形核, 从而使铸锭完全由细小的等轴晶组成。因此认为, 降低浇注温度有助于等轴晶的形成<sup>[10]</sup>。

### 2. 1. 2 恒温时间对合金组织的影响

图 2(b), (c) 所示分别为在  $908 \text{ K}$  下恒温 3 min 与 30 min 后的铸造组织。恒温时间很短时, 铸锭组

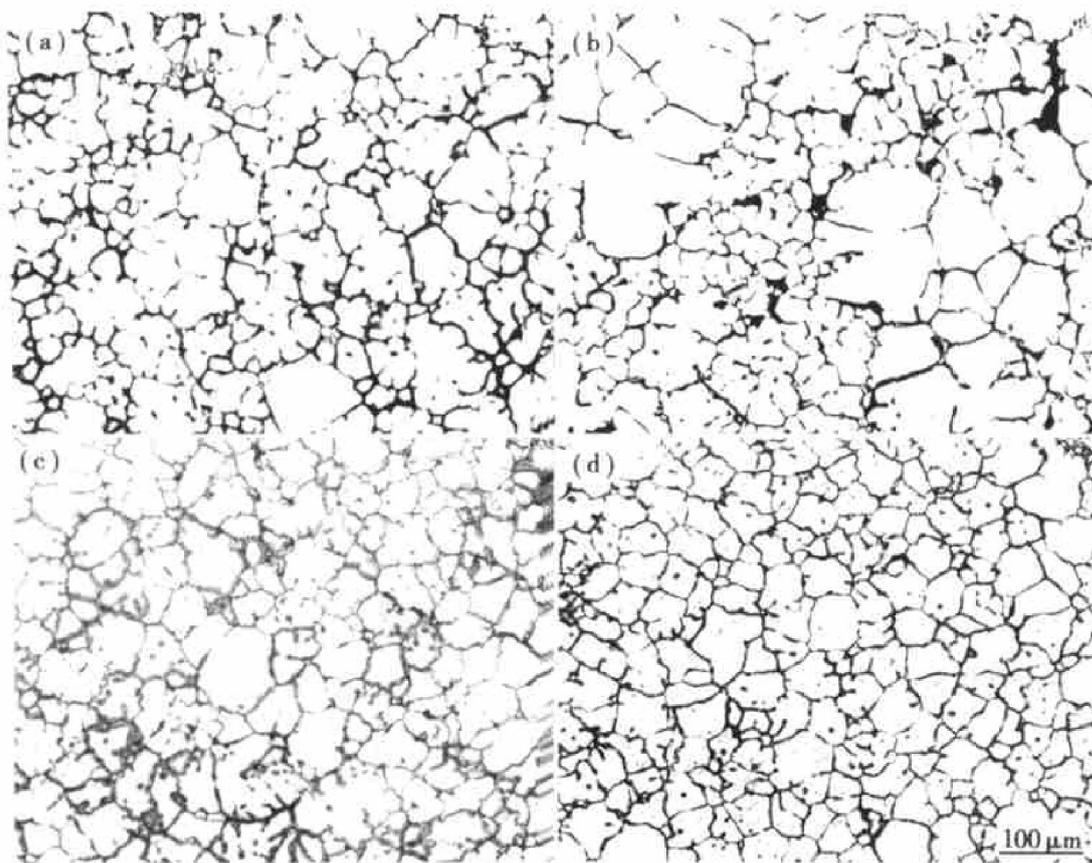


图2 不同铸造条件下的 7075 合金组织

Fig. 2 Microstructures of 7075 alloy under different cast conditions

(a) — $915 \text{ K}$ ; (b) — $908 \text{ K}$ , 3 min, cooling intensity B;

(c) — $908 \text{ K}$ , 30 min, cooling intensity B; (d) — $908 \text{ K}$ , 30 min, cooling intensity A ( $A < B$ )

织形状与大小很不均匀, 当恒温达到一定时间后, 其组织变得均一、细小。这是由于熔体传热速度滞后于冷却速度, 造成熔体内温度场不均, 局部产生温度梯度, 导致在凝固过程中形核不均以及晶粒生长条件不同。而当恒温时间较长时, 熔体内温度趋于一致, 晶核分布与晶体生长条件比较一致, 晶核数量有所增加, 得到的铸锭组织均一、细小。

### 2.1.3 冷却强度对合金组织的影响

通过改变一次冷却强度和二次冷却强度可发现, 在降低一次冷却强度而提高二次冷却强度, 并提高铸造速度的条件下, 铸锭组织有所改善, 如图 2(c), (d) 所示。实验表明, 降低一次冷却强度, 有利于降低熔体中的温度梯度, 抑制枝晶的长大速度; 提高二次冷却强度, 可有效降低液穴深度, 有利于促进形核与铸锭组织的均匀。

通过图像分析仪对图 2(d) 所示试样进行分析, 晶粒平均等积圆直径为  $29.7 \mu\text{m}$ , 最小直径为  $3.8 \mu\text{m}$ , 最大直径为  $86 \mu\text{m}$ , 其中等积圆直径小于  $55 \mu\text{m}$  的晶粒占 95% 以上。晶粒平均圆度为 1.87, 最小圆度为 1.2, 最大圆度为 6.4。

## 2.2 二次加热的合金组织

### 2.2.1 849 K 下等温加热的合金组织

7075 合金液相线半连续铸造试样在 849 K 下恒温加热不同时间后的组织如图 3 所示。

在 849 K 下加热 5 min 后, 晶界上的共晶组织开始熔化, 晶粒有球化倾向。但由于加热时间短, 组织变化并不明显, 仍保持蔷薇状组织。当恒温时间达到 20 min 后, 共晶组织熔化量增多, 枝晶逐步

消失, 晶粒明显球化。但通过扫描电镜二次电子像 (SME) (见图 4) 可以看出, 晶粒边界并不光滑, 局部仍存在微小花瓣。说明在此条件下合金组织的转变不完全。经图像分析仪测定, 在 849 K 下恒温加热 20 min 后, 晶粒平均等积圆直径  $48.6 \mu\text{m}$ , 晶粒平均圆度 1.59。当恒温时间达到 60 min 后, 共晶组织进一步熔化, 液相比比例增多, 晶粒球化更加明显。图像分析结果表明, 晶粒平均等积圆直径  $57.6 \mu\text{m}$ , 晶粒平均圆度 1.49。从 SEM 像可以看到, 晶界比较光滑, 枝晶或花瓣状晶已完全转变为等轴晶。同时, 在晶粒内部有液相析出。经扫描电镜分析, 在晶界及晶内液相中主要是富含 Cu 相。

### 2.2.2 869K 恒温加热的合金组织

液相线半连续铸造 7075 合金在 869 K 下恒温加热后的组织如图 5 所示。在 869 K 下恒温加热 5 min 后, 合金组织开始出现明显变化, 晶界共晶组织开始溶解。恒温加热 15 min 后晶粒已明显球化。经测定, 晶粒平均等积圆直径  $45.8 \mu\text{m}$ , 晶粒平均圆度 1.52。加热 30 min 后, 晶界与晶粒内部有大量液相析出, 晶粒已全部转化为等轴晶。晶粒平均等积圆直径  $47.2 \mu\text{m}$ , 晶粒平均圆度 1.54, 与加热 15 min 的组织相比, 晶粒尺寸及圆度变化不大。

## 3 结论

1) 通过液相线半连续铸造 7075 合金获得了均一、细小的蔷薇状组织。晶粒平均等积圆直径为  $29.7 \mu\text{m}$ , 晶粒平均圆度为 1.87。经二次加热后转变为均匀、细小的等轴晶。

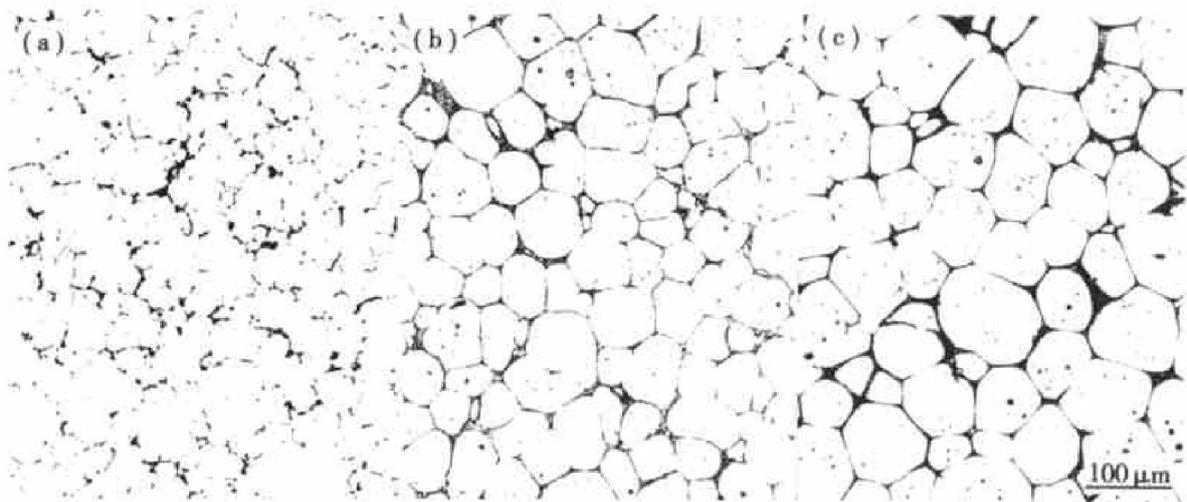


图 3 849K 下二次加热的合金组织

Fig. 3 Microstructures of non-dendritic samples remelted in semi-solid state at 849 K

(a) —5 min; (b) —20 min; (c) —60 min

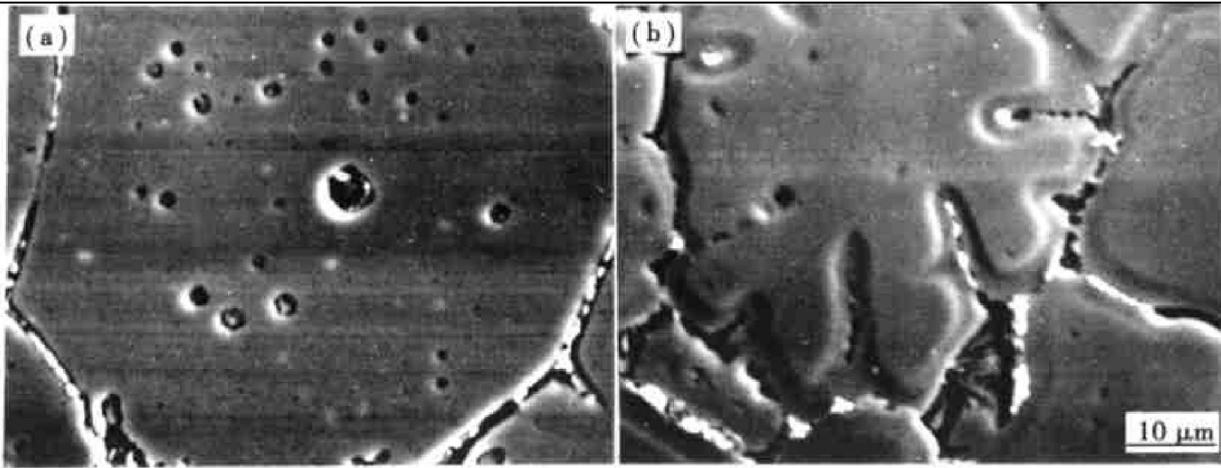


图4 849 K 下合金的二次电子像

Fig. 4 Secondary electron micrographs of non-dendritic samples remelted in semi-solid state at 849 K (a) -20 min; (b) -60 min

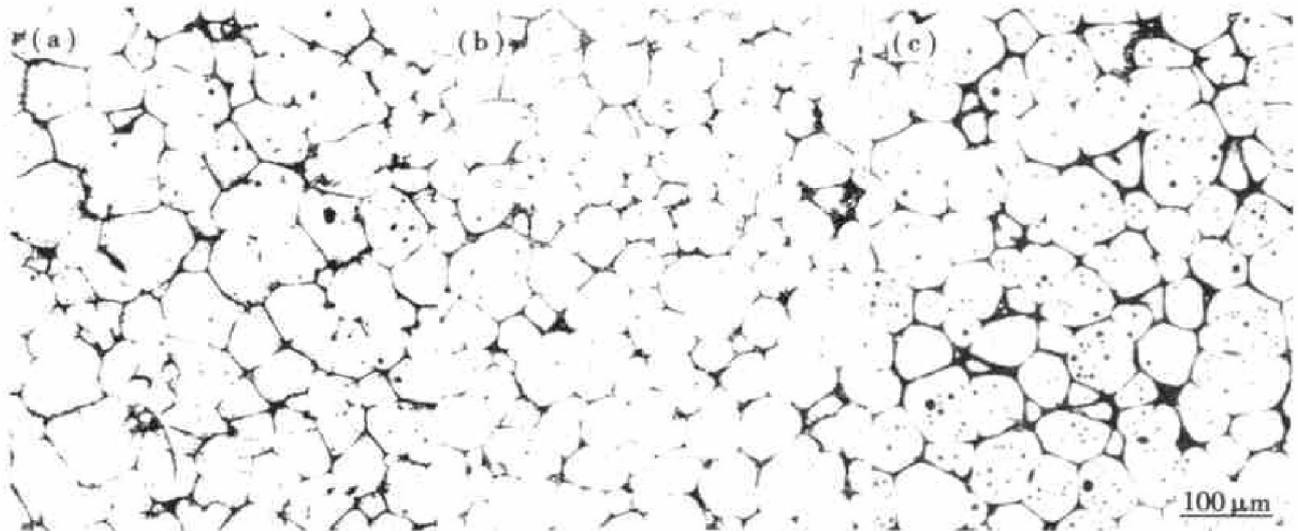


图5 869 K 下二次加热的合金组织

Fig. 5 Microstructures of non-dendritic samples remelted in semi-solid state at 869 K (a) -5 min; (b) -15 min; (c) -30 min

2) 在 849 K 下恒温加热 60min 后, 可完全转变为等轴晶, 晶粒平均等积圆直径为 57.6 μm, 晶粒平均圆度为 1.49。在 596 °C 下恒温加热 15 min 后, 即可全部转变为等轴晶, 晶粒平均等积圆直径为 45.8 μm, 晶粒平均圆度为 1.52。恒温时间延长至 30 min 后, 除液相比比例增加外, 晶粒圆度及尺寸基本不变。

3) 液相线半连续铸造是制取 7075 合金半固态浆料的有效方法。

[ REFERENCES ]

[ 1 ] Flemings M C. Behavior of metal alloys in the semi-solid state [ J ]. Metall Trans, 1991, 22B(6): 269- 293.  
 [ 2 ] Kirkwood D H. Semi-solid metal processing [ J ]. Int Met Rev, 1994, 39(5): 173- 189.  
 [ 3 ] MAO Wei-min(毛卫民), ZHAO Ai-min(赵爱民) and

ZHONG Xue-you(钟雪友). 半固态金属成形应用的新进展与前景展望 [ J ]. Special Casting and Nonferrous Alloy(特种铸造及有色合金), 1998(6): 33- 36.

[ 4 ] XIE Shui-sheng(谢水生) and HUANG Sheng-hong(黄声宏). Technology and Application of Semi-solid Forming(半固态金属加工技术及其应用) [ M ]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999.  
 [ 5 ] SU Hua-qin(苏华钦), ZHU Ming-fang(朱鸣芳) and GAO Zhi-qiang(高志强). 半固态铸造的现状与发展前景 [ J ]. Special Casting and Nonferrous Alloy(特种铸造及有色合金), 1998(5): 1- 6.  
 [ 6 ] LIU Dan(刘丹) and CUI Jian-zhong(崔建忠). 无搅拌制浆新技术-液相线铸造 [ J ]. Foundry Technology(铸造技术), 1998(6): 44- 46.  
 [ 7 ] LIU Dan(刘丹), CUI Jian-zhong(崔建忠) and XIA Ke-nong(夏克农). 液相线铸造铝合金 2618 显微组织 [ J ]. J Northeastern University(Natural Science)(东北大

- 学学报, 自然科学版), 1999, 20(2): 173– 176.
- [8] CUI Jian-zhong(崔建忠), LU Gui-min(路贵民), LIU Dan(刘丹), et al. 半固态浆制备技术的新进展 [J]. J Harbin Institute of Technology (哈尔滨工业大学学报), 2000, 32(4): 110– 113.
- [9] Yue J T and Voltmer F W. Influence of gravity-free solidification on solute microsegregation [J]. J Crystal Growth, 1975, 29: 329– 334.
- [10] Chalmers B. The structure of ingots [J]. J Australian Inst Met, 1963(8): 255– 259.

## Casting and remelted microstructures of 7075 alloy cast by liquidus semi-continuous casting

LU Gui-min, DONG Jie, CUI Jian-zhong  
(School of Materials and Metallurgy, Northeastern University,  
Shenyang 110006, P. R. China)

**[Abstract]** A new process, liquidus semi-continuous casting(LSC) to produce semi-solid slurries of aluminum alloy, was presented. The casting and remelted microstructures of 7075 alloy cast by LSC were studied. The microstructures cast at liquidus temperature (908 K) by LSC is uniform, fine and rose flowered. The average equal-area-circle grain diameter is 29.7  $\mu\text{m}$  and the average roundness is 1.87. The casting microstructures are gradually turned into equiaxed grains by being remelted. After the casting billet are soaked at 849 K for 60 min, the average equal-area-circle grain diameter is 57.6  $\mu\text{m}$  and the average roundness is 1.49. After the casting billet is soaked at 869 K for 30 min, the average equal-area-circle grain diameter is 47.2  $\mu\text{m}$  and the average roundness is 1.54. The results show that fine semi-solid slurries of 7075 alloy can be obtained by LSC.

**[Key words]** liquidus casting; semi-continuous casting; semi-solid; Al alloy; non-dendrite

(编辑 何学锋)