

文章编号: 1004-0609(2004)04-0627-06

SCR 技术制备 A2017 合金半固态材料组织演化^①

王顺成, 温景林, 陈彦博, 李英龙, 曹富荣
(东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110004)

摘 要: 采用 SCR (shearing-cooling-roll) 技术制备了 A2017 半固态合金, 对合金液在不同温度下进行浇注, 且对辊-靴型腔中合金组织的演化过程进行了跟踪, 分析了 SCR 过程中凝固形核的热力学条件以及层流剪切特性。结果表明: 随着合金液浇注温度的降低, 坯料内部组织从粗大的枝晶或菊花晶转化为细小的近球形晶。合金液首先在轧辊和靴子表面结晶形核, 在液流冲击及剪切的作用下, 晶核从型壁上脱落进入残余液相形成游离晶; 随着辊-靴型腔内合金固相率的增加, 游离晶在以枝晶方式生长过程中受到层流剪切作用, 二次枝晶臂断裂破碎形成自由晶; 自由晶在层流剪切作用下进一步发生碰撞和摩擦, 最后逐渐趋于球形或椭圆形。

关键词: 材料合成与加工工艺; 半固态; 剪切与冷却; A2017 合金; 组织演化

中图分类号: TG 146; TG 249.7

文献标识码: A

Microstructural evolution of A2017 semi-solid alloys produced by SCR process

WANG Shun-cheng, WEN Jing-lin, CHEN Yan-bo, LI Ying-long, CAO Fu-rong
(School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: SCR (shearing-cooling-roll) process was adopted to manufacture A2017 semi-solid alloys. Molten alloy was poured at different temperatures. The microstructural evolution of the alloy in the roll-shoe gap was studied. The thermodynamics of nucleation and the laminar shear of molten alloy were analyzed. The results show that microstructures are transformed from dendritic or rosette-shaped to fine net-globular as decreasing pouring temperature of molten alloy. Nuclei form at the surface of roll-shoe firstly and then these nuclei are broken and enter the liquid region to form free nuclei under the impact of liquid flow and laminar shearing and grow into dendrites. Under the laminar shearing caused by the roller, the arms of the original dendrites are then broken and distributed dispersedly into residual alloy liquid and form free grains. Free grains move and grow freely continuously and are ground under the laminar shearing and cooling then become spherical or ellipsoidal.

Key words: synthesizing and process technology; semi-solid; shearing and cooling; A2017 alloy; microstructure evolution

半固态金属加工技术是近 20 多年来诞生和发展起来的现代冶金加工新技术, 被专家们称为 21 世纪新兴的金属制造关键技术之一, 该技术的核心是使混合浆料获得非枝晶组织, 晶粒必须球化和细化。目前半固态制浆方法主要有机械搅拌法、电磁搅拌法、应变诱发熔化激活法、液相线铸造法、喷

射沉积法等^[1-9]。

单辊剪切/冷却技术 (SCR-shearing/cooling roll process) 是一种半固态金属加工新方法, 具有 SCR 机的结构, 工作原理简单, 能提供较高剪切力和较高冷却强度, 能有效制备高熔点、高固相率的半固态合金, 可实现连续地制备半固态浆料。通过在浆

① 基金项目: 国家自然科学基金和上海宝钢集团公司联合资助 (50274020)

收稿日期: 2003-07-09; 修订日期: 2003-09-11

作者简介: 王顺成 (1976-), 男, 博士研究生。

通讯作者: 王顺成, 博士研究生; 电话: 024-83686459; E-mail: ashun2001@sina.com

料出口安装模具, 还可以实现半固态金属的制备与成形的一体化与连续化, 是一种适合于批量生产半固态合金的工业技术^[10~12]。工业上 A2017 合金应用广泛, 因此研究 A2017 半固态材料制备与成形具有重要意义。在此, 本文作者通过 SCR 实验机进行了 A2017 合金半固态坯料的制备实验, 对 SCR 技术制备半固态材料组织演化规律进行了研究, 为进一步开发 SCR 技术提供理论依据。

1 实验

实验所用材料为工业用铝合金 A2017, 其固相线温度为 513 ℃, 液相线温度为 641 ℃。半固态区温度为 128 ℃, 且其区间非常大, 适合于半固态加工。A2017 合金是 Al-Cu-Mg 系合金, 其主要成分见表 1。

表 1 A2017 合金成分(质量分数, %)

Table 1 Compositions of A2017 alloy
(mass fraction, %)

Cu	Mg	Mn	Al
3.8~4.8	0.4~0.8	0.4~0.8	Bal.

图 1 所示为 SCR 技术原理示意图。将合金在坩埚中熔化, 精炼后在不同温度下进行浇注, 半固态浆料排出辊-靴间隙后, 直接进入水冷铜模铸成半固态锭坯。实验工艺参数为: 浇注温度 700~800 ℃, 冷却水流量 200 mL/s, 辊-靴间隙 6 mm, 轧辊转速 0.2 m/s。为了直接观察合金组织在辊-靴型腔中的演化过程, 使设备在运转过程中能突然停机, 同时向辊-靴型腔中的残留合金喷水冷却, 使不同

部位的合金组织保留下来, 然后沿辊-靴型腔不同部位取样。试样抛光腐蚀后在光学显微镜下观察合金微观组织。

2 结果与分析

2.1 浇注温度对 A2017 合金组织的影响

图 2 所示为合金液在不同浇注温度下 A2017 半固态合金锭坯内部组织。如图 2(a) 所示, 合金液在 800 ℃下浇注, 坯料内部组织主要是粗大的枝晶。如图 2(b) 所示, 降低浇注温度到 780 ℃, 坯料组织中的初生 α (Al) 得到了明显细化, 其组织主要为菊花晶, 少部分为等轴晶。进一步降低浇注温度到 760 ℃和 740 ℃, 从图 2(c)、(d) 可看到, 枝晶和菊花晶数量明显减少, 坯料内部组织主要是近球形晶。这主要是因为降低了合金液浇注温度, 使辊-靴间隙中合金液冷却充分, 固相率提高, 因此合金液得到了充分的剪切, 枝晶破碎效果好。从挤出的半固态合金外貌可以看出, 合金为浆料状半固态, 在水冷铜模中可以铸成内部无气孔, 外貌良好的半固态锭坯。

2.2 A2017 合金组织演化过程

在辊-靴间隙为 6 mm, 轧辊转速为 0.2 m/s, 冷却水流量为 200 mL/s 时, A2017 合金液在 760 ℃下浇注, 沿辊-靴间隙按图 3(d) 所示位置取样得到的内部组织如图 3(a)、(b)、(c) 所示。从图 3 可清晰看出半固态合金组织在辊-靴型腔中的演化过程。从图 3(a) 可以看到, 在辊-靴间隙入口处, 合金液凝固后, 其组织主要是枝晶和菊花状晶粒。随着合金向下移动, 固相率增加, 轧辊对半固态浆料的剪切作用增强, 枝晶数量明显减少, 其组织主要为菊花状晶粒, 等轴晶数量明显增多, 如图 3(b) 所示。当合金液继续向下移动, 半固态合金得到了充分的剪切, 可以看到大量枝晶或菊花晶破碎的迹象, 其结果不但使得合金晶核增多, 细化晶粒, 而且使晶粒趋于球形或椭球形, 如图 3(c) 所示。由此可知, 不同工艺参数条件下, 得到的合金组织演化规律是相同的, 不同工艺参数只是对最终获得的组织形态有影响。

3 组织演化机制分析

SCR 过程中轧辊对合金能提供强大的剪切力及冷却强度, 其剪切作用及冷却方式独具特点。因

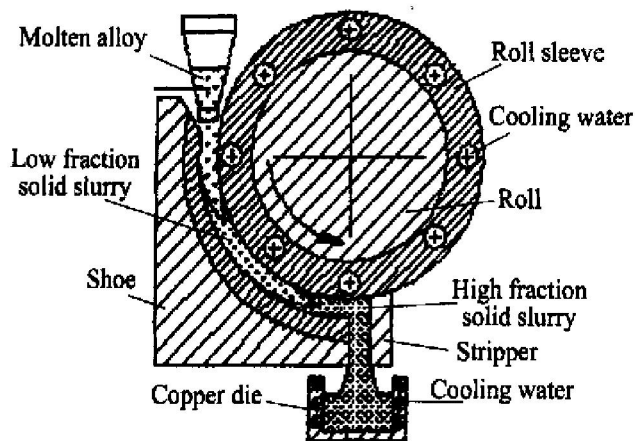


图 1 SCR 技术制备半固态材料原理示意图

Fig. 1 Principle of manufacturing semisolid material by SCR technology

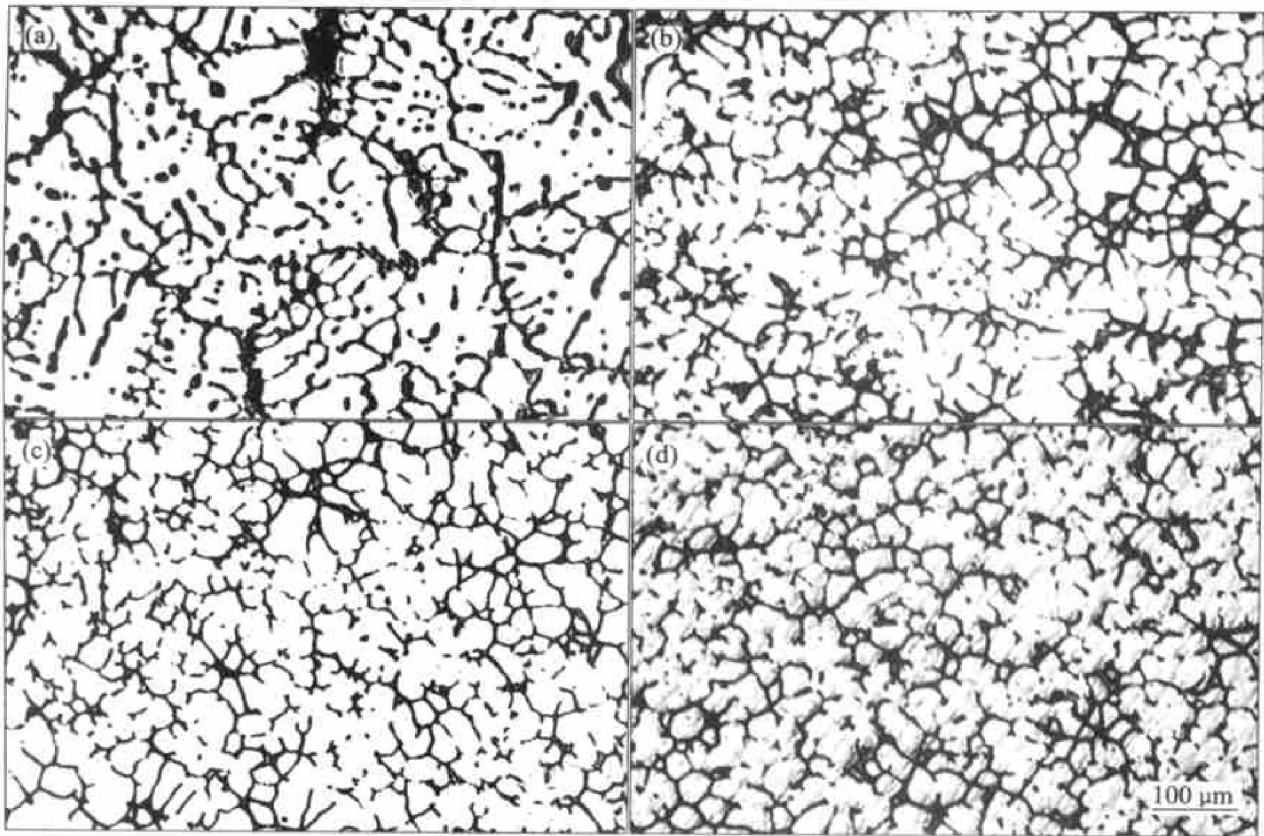


图 2 不同浇注温度下 A2017 半固态合金组织

Fig. 2 Microstructures of A2017 semi-solid alloy poured at different temperatures

(a) $-800\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $-780\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $-760\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $-740\text{ }^{\circ}\text{C}$

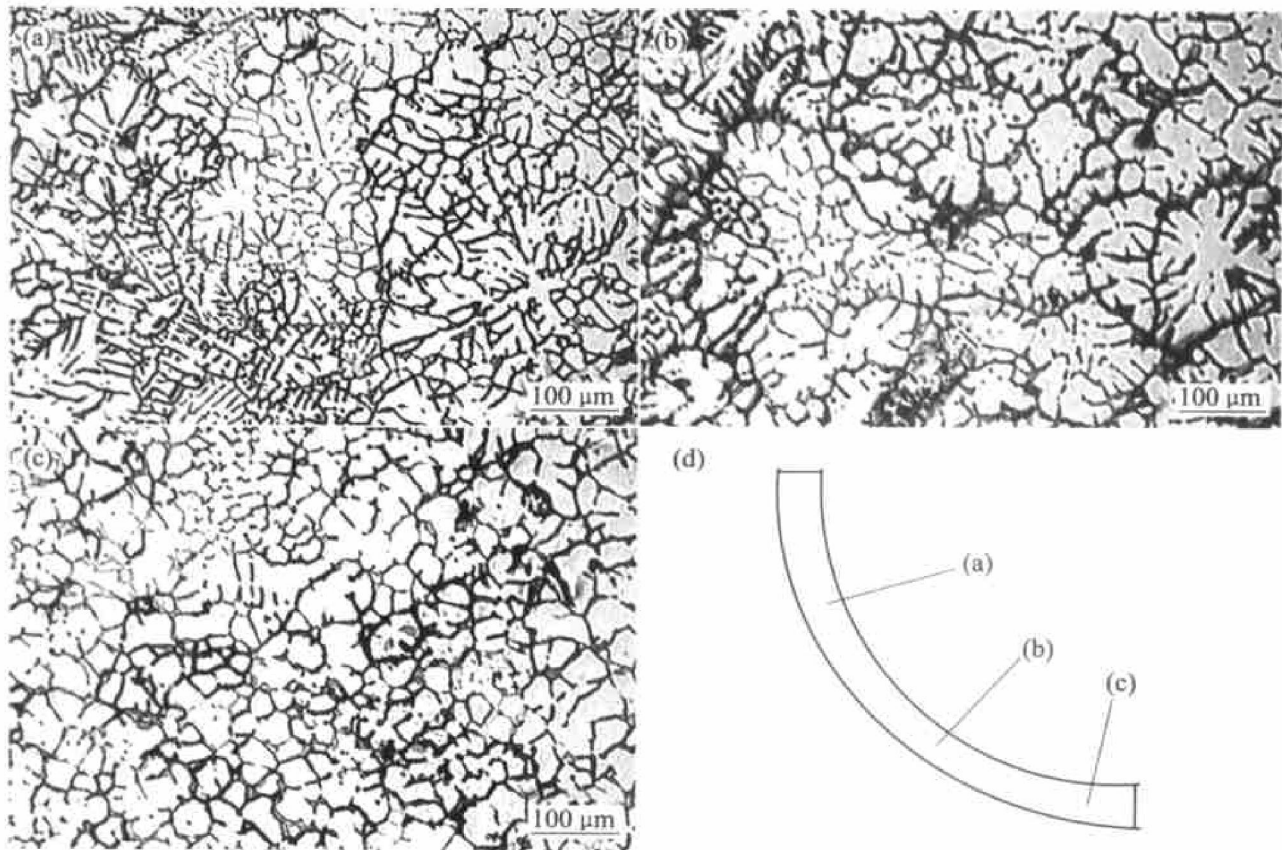


图 3 A2017 半固态合金组织在辊-靴型腔中的演化过程

Fig. 3 Microstructures evolution of A2017 semi-solid alloy in roll-shoe gap

此,在采用 SCR 技术制备半固态材料过程中,非枝晶近球形晶的获得与合金液所受到的冷却作用、层流剪切作用以及晶粒的独特运动特点密切相关。因此,可把 SCR 技术的晶粒演化过程分为形核长大、自由晶形成、自由晶球化 3 个阶段。

3.1 形核

当熔融金属液通过辊-靴间隙顶端入口处的导流槽浇入辊-靴间隙里,通过旋转轧辊施加的摩擦力,合金液被拖入辊-靴间隙。由于轧辊和靴子是主要的散热方向,合金液紧贴辊-靴表面开始快速冷却并形核生长,部分呈树枝晶生长。在浇注过程中液流的冲击以及轧辊的剪切搅拌作用下,在辊-靴表面的晶核或枝晶发生脱落进入残余合金液,成为游离晶。型壁上的聚集体不断地被液流带走,从而保证上述过程将不断进行。因此,冷却强度大和主要散热方向的轧辊和靴子表面是其异质形核基地,在剪切搅拌作用驱动形成的强烈液相对流作用下,轧辊和靴子表面结晶晶核的脱落游离并不断增殖是 SCR 过程中晶核的主要来源。

根据形核原理,形核的主要阻力是晶核的表面能。SCR 技术制备 A2017 半固态材料时,合金首先在轧辊与靴子表面形核,使得表面能降低,因此合金液与辊-靴表面之间的润湿角 θ 是决定形核速率的最关键因素。假设 a 核为球冠形,如图 4 所示, θ 为润湿角; $\sigma_{a,l}$ 为晶核与液相之间的表面能; $\sigma_{a,s}$ 为晶核与辊-靴表面之间的表面能; $\sigma_{l,s}$ 为液相与辊-靴表面之间的表面能。表面能在数值上可以用表面张力值来表示,当晶核稳定存在时,3 种表面张力在同一点达到平衡

$$\sigma_{l,s} = \sigma_{a,s} + \sigma_{a,l} \cos \theta \quad (1)$$

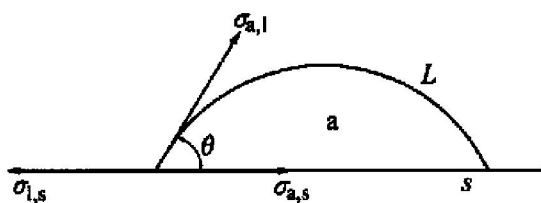


图 4 晶核 a 在辊-靴表面形核

Fig. 4 Nucleus a growing on roll shoe surface

根据几何关系,可以求出晶核与液体界面面积 S_1 及晶核与辊-靴表面的接触面积 S_2 ,晶核的体积 V 也可以算出:

$$S_1 = 2\pi r^2 (1 - \cos \theta) \quad (2)$$

$$S_2 = \pi r^2 \sin^2 \theta \quad (3)$$

$$V = \pi r^3 (2 - 3\cos \theta + \cos^3 \theta) / 3 \quad (4)$$

在辊-靴表面形核时,总自由能的变化 ΔG 为

$$\Delta G = -V \Delta G_V + \Delta G_s \quad (5)$$

式中 第一项为体积自由能的减少,第二项为表面能的增加,它包括 2 个界面的表面能之和

$$\Delta G_s = \sigma_{a,l} S_1 + \sigma_{a,s} S_2 - \sigma_{l,s} S_2 \quad (6)$$

将式(2)~(5)代入到式(6)并整理得

$$\Delta G = (-4\pi r^2 \Delta G_V / 3 + 4\pi r^2 \sigma_{a,l}) ((2 - 3\cos \theta + \cos^3 \theta) / 4) \quad (7)$$

设均匀形核形核功 $\Delta G_0 = (-4\pi r^3 \Delta G_V / 3 + 4\pi r^2 \sigma_{a,l})$, 则非均匀形核的形核功 ΔG 为

$$\Delta G = \Delta G_0 (2 + \cos \theta) (1 - \cos \theta)^2 / 4 \quad (8)$$

由式(8)可知: 1) 当 $\theta = 0$ 时,表示完全润湿, $\Delta G = 0$,不需要形核功就可以形核; 2) 当 $\theta = 180^\circ$ 时, $\Delta G = \Delta G_0$,形核功最大; 3) 一般情况下 θ 介于 0 与 180° 之间,由式(8)可知, ΔG 是 θ 区间 $(0, 180^\circ)$ 上的单调增函数, θ 越小, ΔG 越小,即 θ 越小越容易形核,形核速率越大。因此,辊-靴表面与合金液之间的润湿性能对凝固过程影响较大,实验前需将辊-靴表面清理干净,特别是防止油污及金属氧化物的存在,以保证辊-靴表面与合金之间具有良好的浸润性,为凝固形核提供好的形核基础表面。同时应该选用导热性能好的材料制作辊套和靴子,增大冷却速率,保证形核所需的过冷度。

3.2 自由晶形成

当合金液进入辊-靴型腔后,在转动轧辊的带动下,合金液具有一定的速度。从附着轧辊表面的流体层具有与轧辊等速的 v 开始,靠轧辊越近,流体层流运动速度越大,离轧辊越远,流体层流运动速度越小,直到在靴子表面的流体层的速度为零这样的速度呈线性分布规律。由于辊-靴间隙远小于轧辊直径,也远小于靴子长度和宽度,故可以将此辊-靴间隙视为下板不动,上板以速度 v 运动的无限宽的两平行平板间的间隙,两平板间的流体便作不同速度的层流运动,文献[13]用计算机模拟也证实了上述结论。

在稳定状态下,对于面积为 A 的平板,为了使上板保持以速度 v 运动,必须施加一个力 F ,该力可表示为:

$$\frac{F}{A} = \eta \left[\frac{v}{Y} \right]^n \quad (9)$$

式中 Y 为两平板间的距离; η 为动力粘度; n 为常数。

这是一种剪切力系, 单位面积上所受的力(F/A)为切应力(τ_{yx})。由于速度分布是线性分布, 那么 v_0/Y 可用恒定的速度梯度 dv_x/dy 来代替, 于是在速度不相等的任意 2 个薄流层之间以及流体与辊-靴表面之间的切应力 τ_{yx} 可以表示为

$$\tau_{yx} = \eta \left[\frac{dv_x}{dy} \right]^n \quad (10)$$

在剪切速率一定条件下, η 主要由合金液固相率决定。

自由晶的形成是游离晶长大和枝晶破碎的结果。从式(10)可以看到, 辊-靴间隙中流体层之间的剪切应力正比于该点合金的动力粘度和垂直于运动方向的速度变化率, 增大合金液固相率或者剪切速率, 都可以增加层流剪切应力, 当初生 $\alpha(\text{Al})$ 的枝晶臂抗剪强度低于轧辊提供的剪切力时, 枝晶臂从根部折断破碎下来^[14, 15], 并弥散分布在残余的合金液中, 使晶粒数量增加, 尺寸减小, 成为自由晶, 这与实验结果是相吻合的。降低合金液浇注温度, 或者增大轧辊冷却水流量, 辊-靴型腔中合金得到充分冷却, 高固相率增大, 合金受剪切作用增强, 枝晶破碎效果明显, 等轴晶数量增加, 如图 2 所示。从图 3 可以看到, 随着合金液向下运动, 固相率增加, 坯料内部组织从枝晶或菊花晶逐渐过渡到非枝晶近球形晶。

另外, 采用轧辊内部通水冷却, 辊-靴型腔中合金很容易获得较强的冷却强度。由于冷却速率大, 初生 $\alpha(\text{Al})$ 的生长可得到明显的抑制和细化。同时在轧辊剪切搅拌下, 初生 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒各个方向的生长速率相等, 消除了枝晶生长的条件, 不可能形成一次臂很发达的枝晶, 而是形成细小的菊花状初生 $\alpha(\text{Al})$ 。

从提高枝晶破碎的效果出发, SCR 过程对辊-靴型腔中的合金液必须要有一定的冷却强度, 从而提高固相率区间的长度, 这主要通过合理控制合金液浇注温度和轧辊冷却水流量来实现。同时适当增大轧辊转速, 减小辊-靴间隙, 增大辊-靴间隙合金层流运动的速度梯度, 有利于增大合金液层流剪切力。

3.3 自由晶球化

破碎的枝晶形成的自由晶一般不是呈球状, 自由晶在长大过程中还会继续以枝晶方式生长。自由晶球化过程与其运动密切相关, 在层流剪切作用下, 本文作者提出了图 5 所示的自由晶自由运动方式, 主要包括晶粒的平动和转动。一方面, 由于不

同层流之间的内摩擦作用, 加之对流与溶质偏聚, 强化了枝晶二次臂和菊花晶二次臂在剪切作用下从母晶上进一步发生脱落, 使菊花状初生 $\alpha(\text{Al})$ 的数量进一步减少, 尺寸进一步减小。另一方面, 由于固相率增加, 在层流剪切作用下, 初生 $\alpha(\text{Al})$ 与熔体或与其它初生 $\alpha(\text{Al})$ 的碰撞、摩擦作用增强, 使初生 $\alpha(\text{Al})$ 的端部变得更加圆整, 大部分等轴晶粒直接在运动中被“磨圆”演化成球形或椭圆形晶粒。

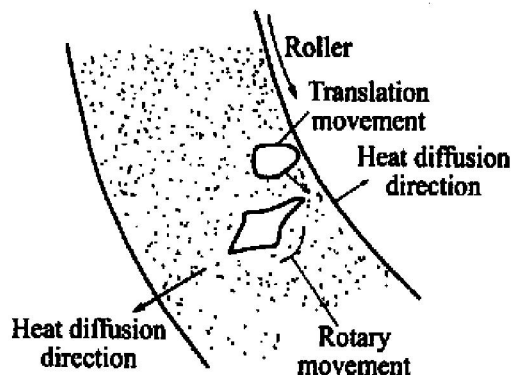


图 5 晶粒在辊-靴型腔中的运动与散热分析模型

Fig. 5 Pattern of grain movement and heat diffusion in roll-shoe gap

4 结论

1) SCR 过程中, 随着合金液浇注温度的降低, 坯料内部组织从粗大的枝晶或菊花状晶粒转化为细小均匀的近球形晶, 合金液在 740~760 °C 浇注, 可获得晶粒尺寸 30~40 μm 的半固态组织。

2) 在液流冲击及轧辊剪切作用下, 晶核从辊-靴表面脱落游离进入液相是 SCR 技术制备半固态材料晶核的主要来源。

3) 在层流剪切作用下, 枝晶臂发生机械破碎是 SCR 过程非枝晶组织形成的主要方式。

REFERENCES

- [1] 罗守靖, 田文彤, 谢水生, 等. 半固态加工技术及应用[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(6): 765-773.
LUO Shoujing, TIAN Wentong, XIE Shuisheng, et al. Technology and applications of semisolid forming[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(6): 765-773.
- [2] 谢水生, 潘洪平, 丁志勇. 半固态金属加工技术研究现状与应用[J]. 塑性工程学报, 2002, 9(2): 1-11.
XIE Shuisheng, PAN Hongping, DING Zhiyong. The overview of study and application of semisolid metals pro-

- cessing technology[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2002, 9(2): 1 - 11.
- [3] Feerante M, Freitas E D. Rheology and microstructural development of a Al-4% Cu alloy in the semi-solid state [J]. Mater Sci Eng A, 1999, A271: 172 - 180.
- [4] Kirkwood D H. Semisolid metal processing[J]. International Materials Reviews, 1994, 39(5): 173 - 189.
- [5] DONG Jie, CUI Jianzhong, LE Qizhi, et al. Liquidus semi-casting, reheating and thixoforming of a wrought aluminum alloy 7075[J]. Mater Sci Eng A, 2003, A345: 234 - 242.
- [6] LIU Dan, CUI Jianzhong, XIA Kenong. Non-dendritic structure 7075 aluminum alloy by liquidus cast and its semi-solid compression behavior[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2000, 10(2): 192 - 195.
- [7] ZHANG Yongzhong, ZHANG Kui, LIU Guojun, et al. The formation of rosette α phase, structural evolution during the reheating and semi-solid casting of AlSi₇Mg alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 137: 195 - 200.
- [8] 张景新, 张奎, 刘国均, 等. 电磁搅拌制备半固态材料非枝晶组织的形成机理[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(4): 511 - 515.
- ZHAND Jingxin, ZHANG Kui, LIU Guojun, et al. Formation mechanism of non-dendritic structure in semi-solid metals produced by ES process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(4): 511 - 515.
- [9] 甄子胜, 赵爱民, 毛卫民, 等. 喷射沉积高硅合金显微组织及形成机理[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(6): 813 - 818.
- ZHEN Zisheng, ZHAO Aimin, MAO Weimin, et al. Microstructures and formation mechanism of spray deposited hypereutectic Al-Si alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(6): 813 - 818.
- [10] Kiuchi M, Sugiyama S. A new process to manufacture semi-solid alloys[J]. ISIJ International, 1995, 35(6): 790 - 797.
- [11] GUAN Ren'guo, WEN Jinglin, LI Yinglong, et al. Continuous extending forming of semisolid A2017 alloy manufactured by SRS process[J]. Rare Metals, 2002, 21(4): 245 - 250.
- [12] 温景林, 管仁国, 刘相华. A2017 半固态合金的半固态扩展成形[J]. 材料研究学报, 2003, 17(1): 55 - 61.
- WEN Jinglin, GUAN Ren'guo, LIU Xianghua. Manufacturing semisolid A2017 alloy by SRS process and semisolid extending forming[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2003, 17(1): 55 - 61.
- [13] 管仁国, 温景林, 刘相华. 单辊搅拌工艺对 A2017 合金热/流耦合场影响的有限元分析[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(S1): 196 - 199.
- GUAN Ren'guo, WEN Jinglin, LIU Xianghua. FEM analysis of single roll stirring process conditions effects on thermal/fluid multiple field of A2017 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(S1): 196 - 199.
- [14] Flemings M C. Behavior of metal alloys in the semisolid state[J]. Metall Mater Trans A, 1991, 22A: 957 - 981.
- [15] 毛卫民, 赵爱民, 崔成林, 等. AlSi₇Mg 合金半固态连铸坯料和组织形成研究[J]. 金属学报, 2000, 36(5): 539 - 544.
- MAO Weimin, ZHAO Aimin, CUI Chengling, et al. Research on the continuous cast billets of semi-solid Al-Si₇Mg alloy and their microstructure formation[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 36(5): 539 - 544.

(编辑 李向群)