

[文章编号] 1004- 0609(2000) 04- 0511- 05

电磁搅拌制备半固态材料非枝晶组织的形成机制^①

张景新, 张 奎, 刘国钧, 徐 骏, 石力开

(北京有色金属研究总院 国家有色金属复合材料工程技术研究中心, 北京 100088)

[摘 要] 半固态材料具有非枝晶固相晶粒均匀分散悬浮于液态基体中的特殊结构。提出了半固态材料中非枝晶组织的形成机制, 即“晶粒漂移和混和-抑制机制”。在电磁搅拌引起的强烈混和对流作用下, 熔体的动态凝固过程不同于常规铸造时的静态凝固过程。混和对流作用改变了熔体中的传热和传质过程, 从而决定了凝固组织。晶粒漂移作用极大地增大了非均匀形核率, 从而细化晶粒; 混和-抑制作用则改变了晶粒生长形态, 使晶粒在各个方向上可以较为均匀地长大, 具有规则圆滑的形貌, 成为非枝晶组织。

[关键词] 半固态加工; 非枝晶组织; 电磁搅拌

[中图分类号] TG 292

[文献标识码] A

对于常规铸造形成的组织结构, 经典铸造理论一般从热力学角度按“三个晶区”进行解释, 但这种解释存在许多与实验或生产实际不相符合的地方, 例如对于内部等轴晶区形成的解释^[1, 2]。电磁搅拌连续铸造是制备半固态坯料的主要方法。半固态金属中的初生固相为圆滑细小的(近)球形晶粒, 即所谓非枝晶组织。有人曾认为是在凝固过程中首先生成树枝晶, 然后在搅拌作用下, 树枝晶发生机械断裂或熔断而转变成为球形晶粒。结合理论分析和电磁搅拌连续铸造试验, 本文提出了电磁搅拌作用下的晶粒漂移和混和-抑制机制, 认为电磁搅拌在熔体中产生的强烈混和对流改变了传热和传质过程是控制凝固组织的重要原因。

1 非枝晶组织形成的传统观点

金属半固态加工技术之所以一经发现立即引起了人们的极大关注, 就在于它所利用的材料是(近)球形晶粒悬浮于液态基体中的非枝晶组织, 材料在半固态下加工成型具有许多优于常规铸造和压力加工的特点^[3]。对于这种特殊组织的形成原因, 人们曾提出了枝晶机械断裂和枝晶熔断两种主要解释^[4], 认为在搅拌作用下树枝状晶发生机械断裂或由于根部颈缩及搅拌引起的热扰动的作用而熔断, 枝晶碎片在搅拌对流作用下被带入熔体内部作为新的长大核心保存下来, 晶粒逐渐转变为圆球形。在

常规铸造中, 人们也认识到了搅拌、振动等方式可以起到动态细化晶粒的作用, 但却只认为这是枝晶发生了碎断。

研究表明, 在固-液两相区间, 枝晶是难以机械断裂的^[5, 6], 枝晶臂的熔断倒是可以发生的。不可否定枝晶碎断有可能存在, 但这决不是非枝晶组织形成的主要原因, 在较大熔体受到电磁搅拌时更是如此。枝晶碎断观点的缺陷, 就是认为晶粒先生长成树枝状, 然后在搅拌作用下由于碎断向球形转化, 并没有真正认识到在搅拌引起的强烈对流作用下熔体的凝固过程会发生异于经典凝固理论所描述的现象。

2 电磁搅拌作用下的晶粒漂移和混和-抑制机制

电磁搅拌作用下熔体的凝固与常规铸造相比, 其最大的不同就在于电磁搅拌在熔体中产生了强烈混和对流, 凝固过程是处于激烈运动的条件下进行的, 而后者可以认为是相对静态的。动态与静态的差别正是凝固过程中不同现象及最终获得完全不同的组织结构的根源所在。结晶凝固过程是通过晶体的形核和核的长大来完成的, 强烈对流对动态结晶过程的影响也主要是通过影响甚至改变这两个过程来实现的。可以认为, 在熔体中存在大量的有效形核质点, 这些质点在适宜的条件下能以非均匀形核

① [基金项目] 国家“863”计划资助项目(715- 009- 0120)

[收稿日期] 1999- 09- 20; [修订日期] 2000- 02- 14

[作者简介] 张景新(1976-), 男, 硕士。

的方式形成大量晶核,混和对流引起的晶粒漂移又极大地增大了形核率;而在长大过程中,强烈的混和对流则极大地改变了熔体中的传热和传质过程,对晶体的非均匀生长起到了强烈的抑制作用。

2.1 混和对流对熔体凝固过程中传热和传质的影响及晶粒漂移

混和对流作用极大地改变了熔体中的传热和传质过程,从而决定了凝固组织。

从传热方面来说,混和对流使得熔体内部热量的传输主要以快速对流而不是热传导来进行。搅拌对流作用一方面延缓了型壁和液面处熔体的冷却,另一方面又加速了内部熔体及熔体整体的温度降低。型壁处与液面的熔体受到较强的冷却作用,但混和对流作用将这些部位较冷的熔体带入熔体内部而将温度较高的熔体带来补充,从而延缓了这些部位温度的降低,推迟了表层稳定凝固壳层的形成。较冷的熔体进入内部,较热的熔体到表层受到冷却,这种混和作用加速了内部熔体温度的降低,从而使全部液态金属在一个相对较短的时间内降到凝固温度,整个熔体处于过冷状态而不只是表层,并且温度相对均匀,从而可以大量生核,并使得晶粒在熔体内部运动漂移过程中得以留存下来继续长大。从传质方面来说,熔体中物质传输为对流控制而非扩散控制,物质处于快速混和状态,晶粒生长排出的溶质被及时带走,不会在界面前沿堆积,因而使得熔体中宏观成分相对均匀。

凝固是在连续降温的条件下进行的,型壁及液面等处依然是向外界散热的主要部位,因而这些部位的熔体中能形成较多的晶粒;这些晶粒随熔体运动漂移进入内部,在随熔体运动及自身旋转运动的过程中长大,这是常规铸造条件下没有的。正是由于熔体混和对流作用使晶粒向内部漂移(晶粒游离),而不是就地生长,极大地增大了熔体中的形核率,这为熔体中结晶出细小圆滑的非枝晶初生固相准备了条件。

2.2 晶粒生长过程中的混和-抑制

电磁搅拌制备半固态坯料的实质主要在于:在连铸机的外围加设电磁搅拌器,使熔体中产生感生电流,熔体在电磁力的作用下产生旋转运动并由于离心作用产生径向和轴向运动^[7],从而产生强烈的混和对流。

2.2.1 熔体混和对流对晶粒非均匀生长的抑制

电磁搅拌在熔体中引起的强烈混和对流作用,改变了常规凝固条件下依靠传导单向传热和依靠扩散缓慢传质的状态。强烈的对流引起熔体内的热量

和物质快速混和,使熔体在整体上温度和成分相对均匀。晶粒在随熔体混和对流运动的同时自身也快速旋转运动,这时的晶粒可以看成是自由晶粒(free crystals)。这就使得晶粒处于一个相对均匀的生长环境中而且在不断地改变自身的位置,消除(或者说极大削弱)了产生枝晶的条件,在这种情况下的晶粒长大,没有哪一个方向可以有明显的优先生长,故而晶粒在各个方向上均匀长大,最终生长成为圆滑的形状规则的特殊非枝晶组织。

在常规铸造的静态凝固中,熔体单向散热从表层向内部逐渐凝固,存在着明显的宏观固-液界面。而在动态凝固中则不同,甚至可以认为运动于熔体中的每个晶粒作为独立的固相相对于液相基体而存在,它们之间的界面即为固-液界面,这个界面为晶粒表面,这显然不同于静态凝固时的状态。

实际的凝固过程是一个受多种因素控制的复杂的物理化学过程,即使处于强烈的混和对流作用下,熔体也不是一个平衡均匀的体系,因而晶粒也会出现不规则形状甚至会出现分枝(这里存在一个混和对流作用的强度和程度问题),并且处于搅拌作用下的晶粒之间会由于撞击烧结发生晶粒团聚并可能融合成一个晶粒。尽管如此,由于混和对流作用,使得熔体成为一个温度和成分相对均匀的环境,这种环境是不利于晶粒择优生长的。所谓的混和-抑制正是指混和对流的环境不利于择优生长,或者说这种生长方式受到了强烈的抑制,而只能各个方向相对均匀地长大。

强烈的混和对流使熔体中产生剧烈紊流,从而在熔体中的微区内产生了较强的温度波动和成分波动。晶粒在液流中漂移时,要不断通过不同的温度区域和浓度区域,受到温度和成分波动的冲击,从而其表面处于反复局部熔化和生长的状态中。晶粒的突出生长部位由于曲率较大,具有较高的能量,因而更容易熔化,所以残存的数量就更少。

2.2.2 自由晶粒的生长及非枝晶组织的获得

1) 自由晶粒的生长

自由晶粒长大过程中释放出的结晶潜热被流动的熔体及时带走,排出的溶质也在熔体中混和。但晶粒周围存在一个对流作用较弱的扩散边界层,如图1所示的 δ 范围;在这个微区内的温度和成分分布是控制晶粒生长行为的重要因素。在边界层中,溶质浓度分布是从晶粒到液相逐渐降低,即存在局部的负的浓度梯度,因而液相线为由低到高。同时由于结晶潜热的释放,使得扩散边界层中温度从晶粒向液相也是渐低的,即存在负的温度梯度(这不

同于宏观上从熔体表层到内部正的温度梯度), 因而晶粒可以通过向液相中直接排出结晶潜热而不断长大, 此时热流方向与长大方向相同, 这也是不同于静态凝固的。尽管由于强烈的混和对流作用使得边界层很薄, 但这已足以提供晶粒生长所需要的微小的动态过冷度。图中扩散边界层中的过冷度包括由成分过冷引起的 $\Delta T_c (T_L - T^*)$ 和热过冷 $\Delta T_t (T^* - T_b)$, 或许还有曲率过冷 ΔT_o 。当然, 这种状态也许只是个瞬间, 因为晶粒处于运动中, 晶粒生长的环境总是在变换。也正是由于运动及变换, 才使得熔体中某处微区的某种状态不会长久地作用于晶粒的某个侧面导致晶粒不同部位的生长出现较大差异, 所以晶粒各个方向相对均匀的长大, 形成规则圆滑的(类)球形形貌。

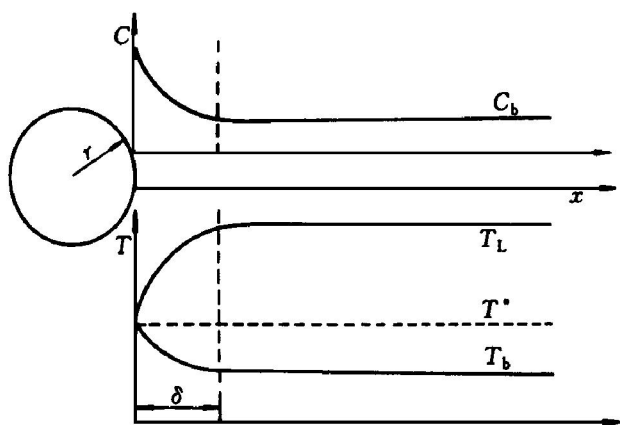


图 1 自由晶粒的生长

Fig. 1 Growth of free crystals

2) 非枝晶组织的获得

随着冷却和凝固的进行, 熔体终将转变成固体。在混和对流作用下, 熔体内部热量的传递主要是通过通过对流来进行, 而熔体向外界的热量散失, 依然是通过型壁和液面来进行的, 因此在总体上看熔体依然存在一个由型壁向内部的温度梯度。前面曾提及混和对流延缓了型壁表面稳定凝固壳层的形成, 而当稳定的凝固壳层形成时, 熔体内部已具有大量的处于生长状态的晶粒, 初生固相已经具有了一定的体积分数。凝固层不再运动, 但内部尚未固化的熔体依然处于对流中, 晶粒依然均匀长大, 并随着凝固的进行不断有晶粒随熔体的凝固而逐渐沉积下来, 使凝固层变厚, 而熔体逐渐减少。可以看出, 这种逐层堆积方式没有了传统铸造中在静态单向散热条件下少数晶粒择优单向生长生成粗大柱状晶的现象, 从而消除了柱状晶。

3 理论的适用性

虽然在本文的标题中提到电磁搅拌作用下制备半固态材料, 但在以上的内容中并没有特别强调电磁搅拌和合金成分。本文的目的在于阐明合金熔体在外场或外加物理扰动作用下产生混和对流运动同时凝固时晶体生核和晶粒长大过程中的一种规律, 一种趋势。虽然由于合金成分不同, 物理扰动产生的方式不同以及作用的强度和程度不同, 而会对组织的形成和演变有不同程度的影响, 但它作为一种规律、一种趋势总是存在的。即便是在没有外加强制物理扰动的常规铸造中, 单是浇注时引起的流动及凝固过程中的热溶对流 (thermo-solutal convection) 即自然对流对铸件内部等轴晶区的形成也起了至关重要的作用^[8, 9]。在晶粒游离和混和-抑制作用较强的情况下 (如较长时间的、激烈的对流), 金属结晶会形成细小圆滑的球晶组织, 电磁搅拌制备半固态材料即是如此; 而当作用程度较小时, 可能只会在一定程度上增大形核率和一定程度上限制了晶粒向发达树枝状晶的生长发展; 处于两者之间的, 便是该机制起中等程度作用的情况。

4 半固态组织

利用自行研制的电磁搅拌连续铸造设备制备了 A357, ZL108, AS9U3 等多种合金直径在 60~ 110 mm 的多种规格的半固态棒坯。图 2 为初始半固态

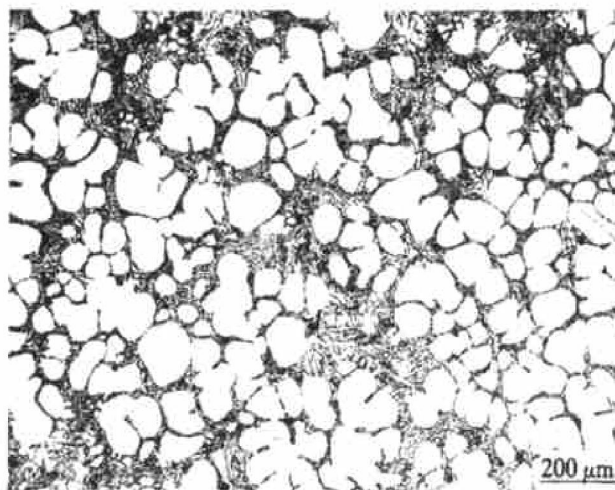


图 2 电磁搅拌制备的半固态材料的组织结构 (A357)

Fig. 2 Microstructure of semi-solid metal produced by electromagnetic stirring process

组织, 初生固相晶粒细小圆滑均匀分散于快冷基体中。在压铸成型前要对坯料进行二次加热使坯料部分重熔恢复半固状态^[10], 图 3 为二次加热后的组织, 可以看到初生固相更为圆滑, 尺寸也略有长大。图 4 为利用半固态压铸成型技术生产的汽车用空调器涡轮的组织, 初生固相除夹杂了一定的液相外, 基本保持了半固态的特殊非枝晶组织形态。

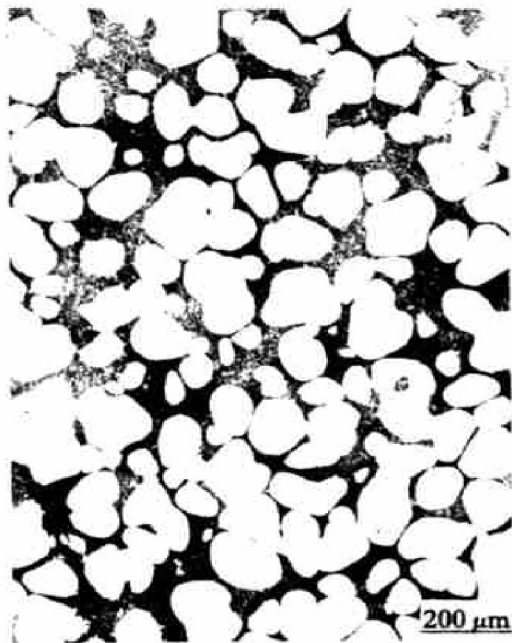


图 3 二次加热后的组织(A357)

Fig. 3 Microstructure of semisolid metal after reheating

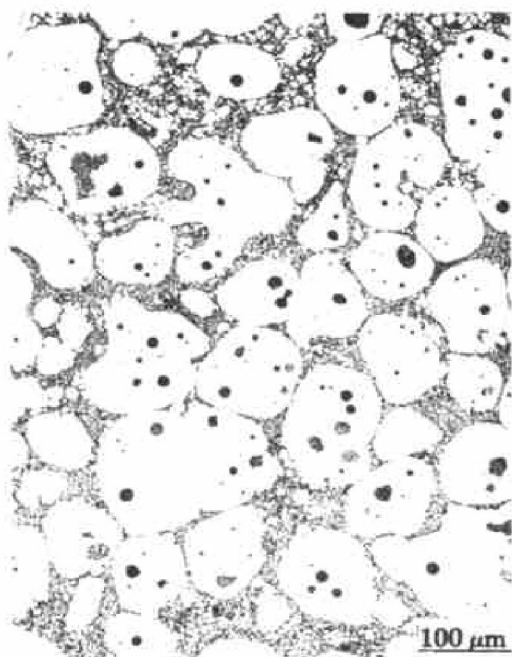


图 4 半固态压铸空调器涡轮的组织(A357)

Fig. 4 Microstructure of die-cast turbine for air conditioner

5 结论

1) 本文跳出了传统铸造理论静态观点的限制, 对处于强烈混和对流作用下的熔体的动态凝固过程进行了论述, 初步阐明了半固态金属中特殊非枝晶组织的形成机制。

2) 认为混和对流作用下的强烈晶粒漂移和混和-抑制机制是半固态非枝晶组织形成的主要原因。混和对流引起晶粒漂移极大地增大了非均匀形核率, 从而细化晶粒; 混和-抑制则改变了晶粒生长形态, 使晶粒各个方向较为均匀地长大成为规则圆滑的晶粒, 消除了常规铸造中的柱状晶区。

3) 认为本理论对于受到外场或外加物理扰动而引起强制对流的熔体的凝固过程具有普遍的意义。只是由于外加扰动作用的强度和程度不同而对最终组织影响的程度不同。

[REFERENCES]

- [1] WANG Jia-xin(王家焱), HUANG Ji-rong(黄积荣), LIN Jian-sheng(林建生). *Metallic Solidification and Its Controlling(金属的凝固及其控制)* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1983.
- [2] ZHOU Yao-he(周尧和), HU Zhuang-qi(胡壮麒) and JIE Wan-qi(介万奇). *Solidification Technique(凝固技术)* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1998.
- [3] Kirkwood D H. *Semisolid metal processing* [J]. *International Materials Reviews*, 1994, 39(5): 173- 189.
- [4] Flemings M C. *Behavior of metal alloys in the semisolid state* [J]. *Metallurgical Transactions B*, 1991, 22B(7): 269- 293.
- [5] ZHANG Kui(张奎), LIU Guo-jun(刘国钧), ZHANG Yong-zhong(张永忠), et al. *半固态金属制备原理与应用* [J]. *Chinese Journal of Rare Metals(稀有金属)*, 1998, 22(6): 447- 449.
- [6] Hellawell A. *Grain evolution in conventional and rheocastings* [A]. *Proceedings of the 4th International Conference on Semisolid Processing of Alloys and Composites* [C]. Sheffield, 1996. 60- 65.
- [7] Spitzer K H, Dubke M and Schwerdtfeger K. *Rotational electromagnetic stirring in continuous casting of round strands* [J]. *Metallurgical Transactions B*, 1986, 17B(3): 119- 131.
- [8] Witzke S, Riquet J P and Durand F. *Diffusion field ahead of a growing columnar front: discussion of the columnar-equiaxed transition* [J]. *Acta Metallurgical*, 1986, 29: 365- 374.

- [9] Beckermann C. Modeling segregation and grain structure development in equiaxed solidification with convection [J]. JOM, 1997, 49(3): 13–17.
- [10] Loue W R and Suery M. Microstructure evolution during partial re-melting of Al-Si7Mg alloys [J]. Materials Science and Engineering, 1995, A203: 1–13.

Formation mechanism of non-dendritic structure in semi-solid metals produced by ES process

ZHANG Jing-xin, ZHANG Kui, LIU Guo-jun, XU Jun, SHI Li-kai

(Beijing General Research Institute for Non-ferrous Metals, Beijing 100088, P. R. China)

[Abstract] The microstructure of semi-solid metal comprises non-dendritic solid phase grains suspended in liquid matrix, which is the key technological foundation for semi-solid processing. In this paper, the formation mechanism for non-dendritic structure in semi-solid metal is proposed, namely mechanism of particle-drift and blending-compressing. Under vigorous convection caused by intense electromagnetic stirring, the dynamic solidification process of melt is quite different from that of conventional casting which is relatively static. The transferring of heat and mass during solidification is greatly changed by vigorous convection, and determined the microstructure. Particle-drift greatly increases the heterogeneous nucleation and so refines the grains; Blending-compressing changes the growing morphology of primary grains and makes grains grow relatively uniformly in all directions into near globular shape, and results in non-dendritic structure.

[Key words] semi-solid processing; non-dendritic structure; electromagnetic stirring

(编辑 朱忠国)