

电磁搅拌法制备铝合金半固态坯料的研究

王永飞^{1,2}, 赵升吨¹, 樊晓光², 李双江¹, 蒋红¹, 王军³

(1. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

(2. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

(3. 中国重型机械研究院股份公司, 陕西 西安 710032)

摘 要: 研究了搅拌电流及搅拌频率对 2A50 铝合金半固态坯料中心及边缘位置微观组织的影响规律。结果表明: 无电磁搅拌时, 坯料的微观组织主要由粗大的树枝晶组成, 部分枝晶臂长度甚至超过 200 μm , 不能用于半固态成形。随着电磁搅拌电流或搅拌频率的增加, 中心与边缘位置的平均晶粒尺寸均不断减小, 并在搅拌电流超过 30 A 或搅拌频率超过 30 Hz 时略有增加; 中心与边缘位置晶粒的形状因子随搅拌电流或搅拌频率的增加都不断增加并逐渐趋于平缓, 但当搅拌电流为 40 A 或搅拌频率为 40 Hz 时略有下降; 同时, 中心与边缘位置微观组织的均匀性越来越好。在搅拌电流 30 A、搅拌频率 30 Hz 条件下, 能够制备出平均晶粒尺寸和形状因子分别为 75.6 μm 及 0.73 的具有理想微观组织的半固态坯料。

关键词: 铝合金; 半固态坯料; 电磁搅拌; 微观组织

中图法分类号: TG146.21; TG113.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)10-3569-07

金属半固态成形 (semi-solid metal forming) 兼顾液态成形的易流动性及固态成形的高力学性能, 能够实现复杂零件的近净成形, 被誉为 21 世纪最有前途的金属加工技术之一^[1-3]。相比较于传统铸造成形, 半固态成形零件致密性好、缩松缩孔缺陷少、力学性能高, 相对于传统热锻而言, 其成形零件余量小、机械加工量少、生产效率高、成形力大大降低、模具寿命长、易于实现近净成形^[4-7]。

金属半固态成形主要包括流变成形和触变成形, 尽管这 2 种半固态成形技术在工艺上有所不同, 但其技术核心都是制备具有细小、均匀、近球状微观组织的半固态金属浆料或坯料^[8,9]。电磁搅拌工艺因其无污染, 易于控制, 容易实现自动化等特点在半固态金属坯料制备领域具有广阔的应用前景。Lee 等^[10]通过控制电磁搅拌以及浇注的速度研究了流变挤压铸造过程中不同固相分数对零件充型性能及机械性能的影响, 并得到具有细小微观组织的零件。Mao 等^[11]研究了电磁频率对半固态 AZ91D 合金凝固组织的影响, 当电磁频率低于 50 Hz 时, 随着频率增大, 凝固组织圆整度逐渐提高; 超过 50 Hz, 电磁频率对凝固组织圆整度提高不明显。Zhao 等^[12]提出了电磁搅拌复合机械振动

工艺制备铝合金半固态浆料工艺, 分别研究了电磁功率和振动功率对 AlSi9Mg 铝合金半固态浆料微观组织的影响规律, 发现当搅拌功率和振动功率分别为 2.0~2.4 kW 与 0.8 kW 时可获得较为理想的半固态微观组织。刘政等^[13]采用双向弱电磁搅拌与等温处理工艺制备 A356 铝合金半固态浆料, 研究了搅拌频率以及等温温度对半固态微观组织的影响规律, 并制备出了晶粒细小、分布均匀的半固态微观组织。尽管很多研究涉及到电磁搅拌法制备半固态铝合金坯料, 但是关于搅拌电流与搅拌频率对半固态铝合金微观组织演变的作用的相关研究并不多。

2A50 铝合金作为一种广泛应用的中等强度铝-铜变形合金, 具有较高的热塑性, 常用来制造形状复杂、强度中等的模锻件, 但其浇铸成形制件存在较为严重的晶间偏析, 尽管通过热处理强化能够提高合金硬度, 但合金元素会由晶粒内部严重析出, 进而导致其延伸率和抗拉强度等力学性能下降。本研究的主旨在于对比分析采用电磁搅拌法制备半固态坯料时, 不同的搅拌电流及搅拌频率对半固态坯料中心位置以及边缘位置微观组织的影响规律, 进而获得合理的工艺参数, 以制备出具有理想微观组织的半固态浆料, 从而为能

收稿日期: 2019-11-04

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (XZY012019003/XZD012019009); 西北工业大学凝固技术国家重点实验室开放课题 (SKLSP201921); 中国博士后科学基金 (2018M643627)

作者简介: 王永飞, 男, 1988 年生, 博士后, 助理研究员, 西安交通大学, 陕西 西安 710049, 电话: 029-82668607, E-mail: yongfeio@126.com

够采用铝合金半固态成形技术批量生产高质量发动机壳体、连杆、曲轴及压缩机用涡旋盘等具有量大面广特征的铝合金零部件奠定基础。

1 实 验

本实验所采用的商用 2A50 铝合金挤压棒的化学成分如表 1 所示。其固、液相线分别为 521 和 615 ℃，该材料的半固态温度区间较宽，达到 94 ℃，非常适用于半固态成形。

图 1 所示为本实验中使用的半固态电磁搅拌装置示意图。该装置主要由位于上端的中频感应加热炉以及位于下端的电磁搅拌器组成，且在中频感应加热炉与电磁搅拌器中间装配有可以使检测电磁搅拌器搅拌桶预热温度的热电偶 B 能够顺利通过且可用于通入保护气体的中空型塞杆。电磁搅拌器主要由不锈钢坩埚、电阻加热丝、隔热层、冷却水管以及三相两级电机的定子等组成。

采用电磁搅拌法制备 2A50 铝合金半固态坯料的具体实验流程如下：先将适量的 2A50 铝合金置于中频感应加热炉内，快速加热至预定熔化温度（645 ℃）保温，保证原料彻底熔化且温度均匀。接着，打开电阻加热及冷却水系统，预热搅拌筒并冷却电机定子。当搅拌筒温度达到 350 ℃时，提升中空型塞杆使铝合金熔体通过漏斗形石墨锥套快速浇注至搅拌筒内；同时，启动电磁搅拌器按照预设的参数对熔体进行电磁搅拌直至完全凝固。最后，将电磁搅拌处理凝固后的材料迅速淬火冷却成坯料以保留其半固态微观组织。采用电磁搅拌器对铝合金熔体进行电磁搅拌时的具体

表 1 2A50 铝合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of 2A50 aluminum alloy (wt%)								
Cu	Si	Mg	Mn	Zn	Ti	Ni	Fe	Al
2.43	0.82	0.68	0.53	0.12	0.06	0.05	0.01	Bal.

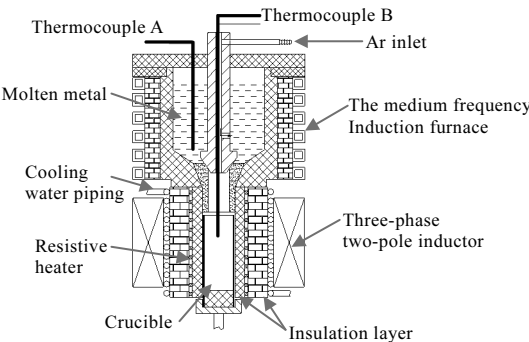


图 1 电磁搅拌装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of electromagnetic stirring equipment

实验工艺参数如表 2 所示。

为了进一步观察分析半固态浆料的微观组织，在电磁搅拌制备的铝合金半固态坯料的中心与边缘处分别取样，取样位置如图 2 所示。将试样切割为 8~10 mm 的立方体并镶嵌为 $\Phi 30\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 的圆柱形试样。对该试样进行粗磨、细磨、抛光后采用 0.5% 氢氟酸进行腐蚀，腐蚀时间为 12~20 s。采用光学显微镜观察金相组织，并借助 Image-Pro Plus 图像分析软件对金相组织平均晶粒直径和形状因子进行定量分析，其计算公式如下^[14,15]：

$$D = \frac{\sum_{N=1}^N \sqrt{4A/\pi}}{N} \tag{1}$$

$$F = \frac{\sum_{N=1}^N 4\pi A/P^2}{N} \tag{2}$$

其中， D 、 A 、 P 、 N 、 F 分别为晶粒的平均等效直径、面积、周长、数量、平均形状因子。

2 结果与讨论

2.1 无电磁搅拌下 2A50 铝合金的微观组织

图 3 所示为熔体浇铸温度 645 ℃，搅拌筒预热温度 350 ℃，且不施加电磁搅拌时，2A50 铝合金自然凝固后的微观组织。从图 3 可以看出，该合金的微观组织主要由粗大的树枝晶（如标记 A 所示）组成，其部

表 2 实验工艺参数

Table 2 Process parameters of experiment		
No.	Stirring current, I_s/A	Stirring frequency, f_s/Hz
0	0	0
1	10	30
2	20	30
3	30	30
4	40	30
5	30	10
6	30	20
7	30	40

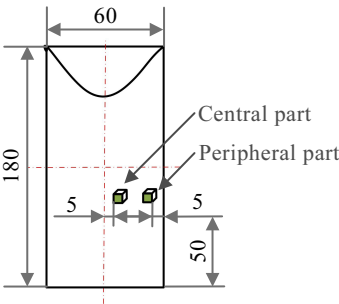


图 2 铝合金半固态坯料不同取样位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of different sampling positions of aluminum alloy semi-solid billet

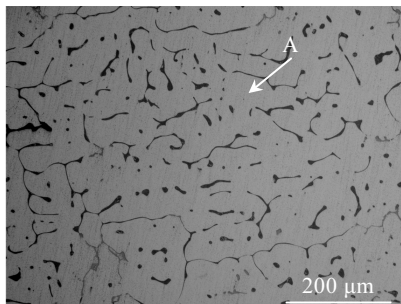


图 3 无电磁搅拌时 2A50 铝合金材料的微观组织

Fig.3 Microstructure of 2A50 aluminum alloy without the electromagnetic stirring process

分枝晶臂长度甚至超过 200 μm ，大量树枝晶相互缠绕，将共晶组织夹杂在其中，是典型的铸造态微观组织^[16]。

2.2 搅拌电流对半固态 2A50 铝合金微观组织的影响

图 4 所示为当熔体浇铸温度为 645 $^{\circ}\text{C}$ ，搅拌筒预热温度为 350 $^{\circ}\text{C}$ ，搅拌频率为 30 Hz 时，不同搅拌电流作用下 2A50 半固态铝合金中心及边缘位置的微观组织。由图 4a 与 4b 可见， $I_s=10\text{ A}$ 时，中心位置的微观组织中存在大量未破碎的粗大枝晶组织（如标记 A 所示），大部分枝晶臂长度超过 200 μm ；边缘位置的微观组织略有改善，更多树枝晶有破碎趋势。这可能是由于电磁搅拌最大运动速度位于近边缘位置，枝晶

破碎效果略好于中心。对比其铸造组织（图 3），明显看到 $I_s=10\text{ A}$ 时微观组织的共晶相（如标记 B 所示）分布不太均匀，部分破碎树枝晶形成的近球状晶粒（如标记 C 所示）分散在共晶相中，如图 4a 与 4b 所示。这说明尽管当 $I_s=10\text{ A}$ 时，搅拌强度较弱，不足以彻底打碎树枝晶并均匀分散在共晶相中，但电磁搅拌确实改变了 2A50 铝合金微观组织的形态及共晶相的分布。

如图 4c 及 4d 所示，当 $I_s=20\text{ A}$ 时，中心位置微观组织中的树枝晶数量明显减少，晶粒尺寸明显减小，形状趋于圆整，但仍然存在部分不规则形状的初生 $\alpha\text{-Al}$ 晶粒。而边缘位置微观组织中几乎不存在树枝晶，但晶粒尺寸大小不一，部分晶粒形貌不够圆整。此外，共晶相基本均匀分布，明显好于 $I_s=10\text{ A}$ 的微观组织；如图 4e 与 4f 所示，当增大 I_s 至 30 A 时，树枝晶彻底破碎，形成细小独立的近球状晶粒并均匀分布于共晶相中。中心与边缘位置的微观组织无明显差别，仅中心位置的电磁搅拌效果略差，导致部分近球状晶粒相互粘结，晶界不如边缘位置清晰；如图 4g 与 4h 所示，当 $I_s=40\text{ A}$ 时，其微观组织与 $I_s=30\text{ A}$ 时类似，并无明显改善。这说明 $I_s=30\text{ A}$ 的电磁搅拌强度对树枝晶的破碎效果已基本达到峰值，进一步增大 I_s 无法明显改善其破碎效果。

图 5 及图 6 所示分别为搅拌频率 30 Hz 时，2A50 铝合金半固态坯料中心与边缘位置微观组织的平均晶粒尺寸及形状因子随搅拌电流的变化曲线。随着搅拌

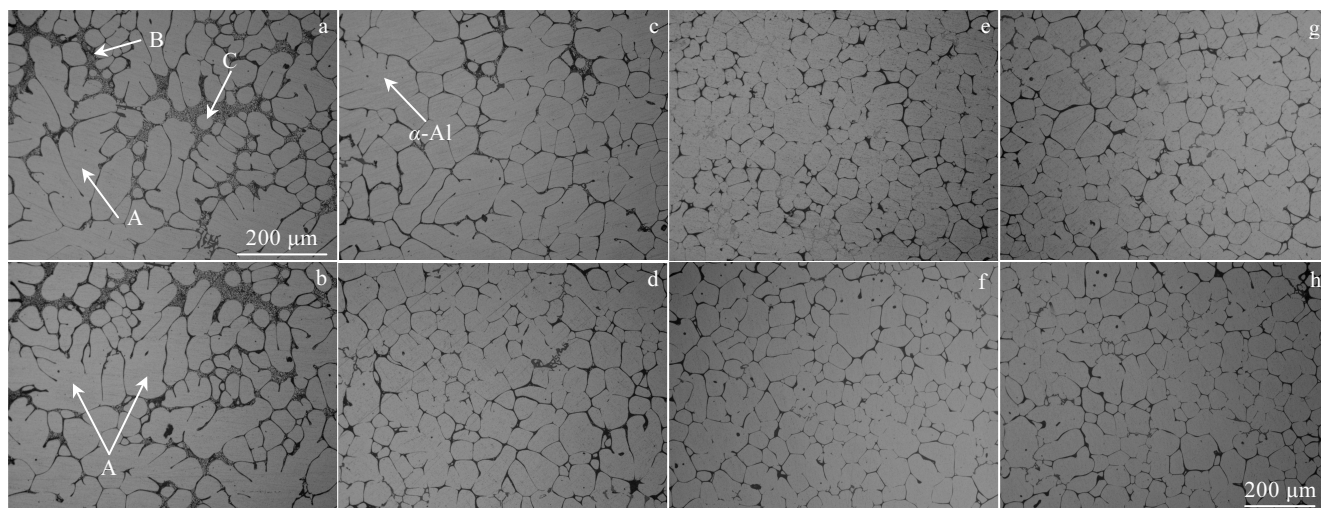


图 4 搅拌频率为 30 Hz 时不同搅拌电流作用下 2A50 铝合金半固态坯料中心及边缘位置的微观组织

Fig.4 Microstructures of the central (a, c, e, g) and peripheral (b, d, f, h) parts of semi-solid 2A50 aluminum alloy prepared by electromagnetic stirring process with the stirring frequency of 30 Hz and different stirring currents: (a, b) 10 A, (c, d) 20 A, (e, f) 30 A, and (g, h) 40 A

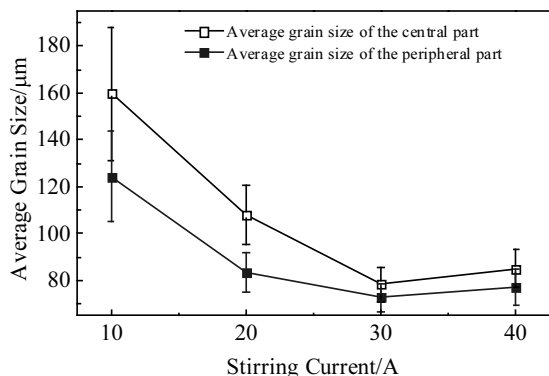


图 5 平均晶粒尺寸随搅拌电流的变化

Fig.5 Variations of the average grain size with the stirring current

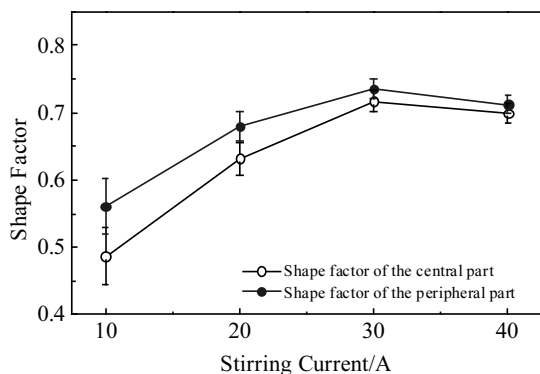


图 6 形状因子随搅拌电流的变化

Fig.6 Variations of the shape factor with the stirring current

电流的增加, 中心与边缘位置处的平均晶粒尺寸均不断减小并在 30 A 后略有增加; 同样, 中心与边缘固相晶粒的形状因子不断增加, 但当搅拌电流为 40 A 时, 晶粒形貌略有恶化 (图 4g 与 4h 所示), 导致形状因子略有下降。此外, 中心与边缘位置的平均晶粒尺寸及形状因子随着搅拌电流的增加而逐渐趋于一致, 差别越来越小, 这说明制备的半固态坯料边缘与中心位置微观组织的均匀性越来越好。

分析图 4~图 6 可知, 增加搅拌电流对破碎树枝晶形成均匀细小的近球状晶粒的作用极其明显。一方面, 增加搅拌电流使电磁搅拌力近乎成比例增加, 能够有效地增强电磁搅拌强度, 从而保证在较窄的半固态温度区间内 (特别是高固相分数时), 迫使浆料连续高速旋转, 增加电磁搅拌的有效持续时间以增强其搅拌破碎作用^[17]。另一方面, 电磁搅拌作用时, 金属熔体直接接触搅拌筒壁面及底部, 迅速降温形成凝固薄壳, 大大削弱集肤效应及端面效应对浆料流动的影响, 在心部相对均匀电磁搅拌力的作用下, 剩余未凝固浆料的运动相对较为均匀, 通过边缘处浆料沿壁面四周上升并在浆料中心下降的循环回流过程将高速旋转区彻底破碎的枝晶臂带至浆料中心。该过程中破碎枝晶臂相互摩擦、旋转、粗化长大, 逐渐形成均匀细小的球状晶粒并均匀分布于整个半固态材料^[6]。这也合理地解释了当搅拌电流大于 30 A 时, 中心与边缘的微观组织不存在明显差别。

2.3 搅拌频率对半固态 2A50 铝合金微观组织的影响

图 7 所示为当熔体浇铸温度为 645 °C, 搅拌筒预

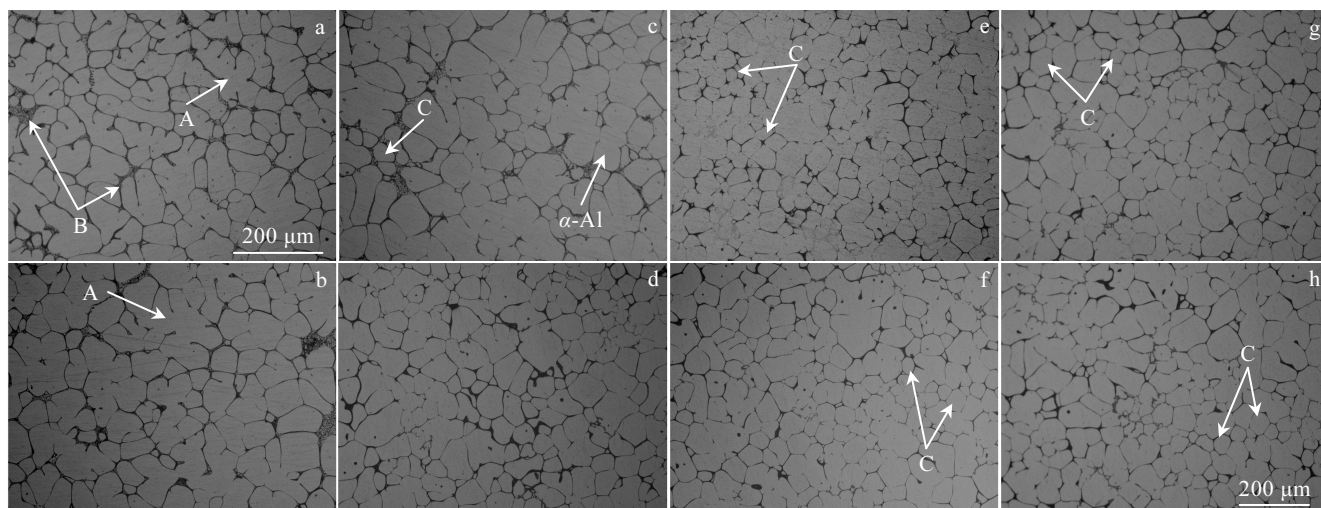


图 7 搅拌电流为 30 A 时不同搅拌频率作用下 2A50 铝合金半固态坯料中心及边缘位置的微观组织

Fig.7 Microstructures of the central (a, c, e, g) and peripheral (b, d, f, h) parts of semi-solid 2A50 aluminum alloy prepared by electromagnetic stirring process with the stirring current of 30 A and different stirring frequencies: (a, b) 10 Hz, (c, d) 20 Hz, (e, f) 30 Hz, and (g, h) 40 Hz

热温度为 350 ℃, 搅拌电流为 30 A 时, 不同搅拌频率作用下 2A50 半固态铝合金中心及边缘位置的微观组织。

由图 7 可见, 随搅拌频率的增加, 中心与边缘位置的微观组织差别越来越小, 粗大的枝晶组织 (如标记 A 所示) 不断被破碎并漂移形成独立细小的近球形晶粒 (如标记 C 所示)。当 $f_s=10$ Hz 时, 中心位置的微观组织中仍然存在大量未完全退化的枝晶臂均匀分布在共晶相 (如标记 B 所示) 中, 边缘位置的固相晶粒较为圆整粗大, 分布较为均匀, 但仍有少量不规则晶粒, 如图 7a 与图 7b 所示。当 $f_s=20$ Hz 时, 中心位置的微观组织由大量粗糙的 α -Al 晶粒组成, 部分固相晶粒聚集在一起形成团簇, 而边缘处的固相晶粒进一步细化圆整, 粗大晶粒周围形成许多细小近球状晶粒, 如图 7c 与图 7d 所示。进一步增加 f_s 至 30 Hz, 中心及边缘位置的固相晶粒趋于一致, 细小圆整的近球状晶粒均匀分布在共晶相上, 如图 7e 与图 7f 所示。值得注意的是, 当 $f_s=40$ Hz 时, 相较于 $f_s=30$ Hz, 其晶粒略有粗化。这可能是由于 $f_s=40$ Hz 时浆料高频旋转使浆料温度迅速降低, 减少有效搅拌时间, 同时延长其保温粗化时间, 引起局部晶粒粗大。

图 8 及图 9 所示分别为 $I_s=30$ A 时, 2A50 铝合金半固态坯料中心与边缘位置的平均晶粒尺寸及形状因子随搅拌频率的变化曲线。可见, 随着搅拌频率的增加, 中心与边缘位置的平均晶粒尺寸均不断减小, 但在 40 Hz 时略有增加; 同样, 中心与边缘位置固相晶粒的形状因子随搅拌频率的增加而不断增加并逐渐趋于平缓, 40 Hz 时形状因子略有下降。此外, 中心与边缘位置的平均晶粒尺寸及形状因子随着随搅拌频率的增加而越来越趋于一致, 这与随搅拌电流增加的变化规律基本一致。

分析图 7~图 9 可知, 增加搅拌频率同样能够破碎

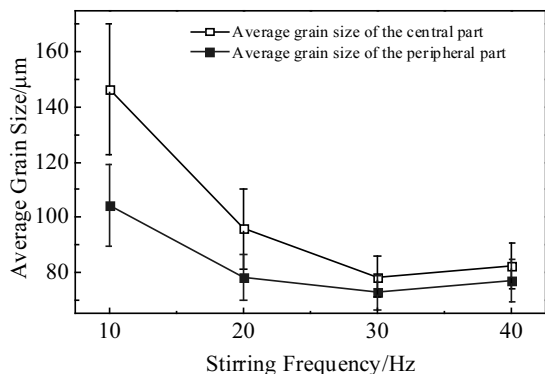


图 8 平均晶粒尺寸随搅拌频率的变化

Fig.8 Variations of the average grain size with the stirring frequency

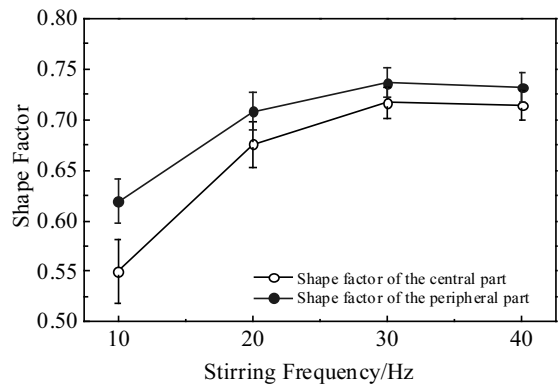


图 9 形状因子随搅拌频率的变化

Fig.9 Variations of the shape factor with the stirring frequency

树枝晶, 细化晶粒并形成细小圆整的近球状晶粒, 并且浆料中心与边缘位置的微观组织差别也越小。式 (3) 为电磁场旋转速度与搅拌频率的关系:

$$n_0 = \frac{60f}{P} S \quad (3)$$

其中, n_0 为电磁场旋转速度 (r/min); f 为搅拌频率 (Hz); P 为电磁搅拌器磁极对数; S 为转差率。

由式 (3) 可知, 随着搅拌频率的增加, 电磁场的旋转速度会增加, 而高速旋转的电磁搅拌力能够迫使浆料高速旋转, 特别是在浇注初期, 熔体温度较高, 粘度较小, 在高搅拌频率旋转电磁搅拌力作用下金属熔体高速旋转, 大大增强其对树枝晶的搅拌破碎效果, 并通过浆料循环回流作用将破碎枝晶臂带入至其中心位置, 因此当搅拌频率较高 ($f_s \geq 30$ Hz) 时, 可以获得均匀的近球状晶粒^[18]。

2.4 合理工艺参数的确定

图 10 所示为本实验中电磁搅拌不同工艺参数条件下获得的半固态坯料的平均晶粒尺寸和形状因子。研究表明, 具有平均晶粒尺寸小于 100 μm, 形状因子大于 0.6 的微观组织特征的半固态材料适用于半固态成形^[19]。因此实验 1 ($I_s=10$ A, $f_s=30$ Hz)、实验 2 ($I_s=20$ A, $f_s=30$ Hz) 及实验 5 ($I_s=30$ A, $f_s=10$ Hz) 制备出的半固态材料均不适合半固态成形。此外, 相较于其他合格的实验工艺参数, 实验 3 ($I_s=30$ A, $f_s=30$ Hz) 与实验 7 ($I_s=30$ A, $f_s=40$ Hz) 制备出的半固态材料均具有更小的平均晶粒尺寸以及更大的形状因子。但考虑到搅拌频率过高对微观组织的改善效果已经不明显, 且过高旋转速度容易带来卷气等缺陷, 因此实验 3 ($I_s=30$ A, $f_s=30$ Hz) 所采用的电磁搅拌参数为制备 2A50 铝合金半固态坯料的合理的工艺参数, 且其平均晶粒尺寸和形状因子分别为 75.6 μm 及 0.73。

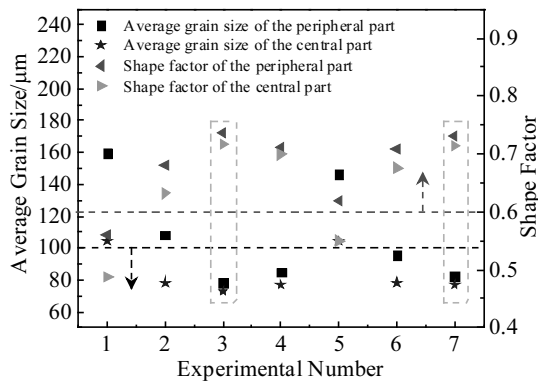


图 10 电磁搅拌不同工艺参数条件下半固态坯料的平均晶粒尺寸和形状因子

Fig.10 Variations of the average grain size and shape factor of semi-solid billet prepared by electromagnetic stirring with different process parameters

3 结 论

1) 无电磁搅拌条件下, 2A50 铝合金材料的微观组织主要由粗大的树枝晶组成, 部分枝晶臂长度超过 200 μm, 不能用于半固态成形。

2) 随着搅拌电流或搅拌频率的增加, 中心与边缘位置的平均晶粒尺寸均不断减小并在 30 A 或 30 Hz 后略有增加; 形状因子不断增加并逐渐趋于平缓, 但当搅拌电流为 40 A 或搅拌频率为 40 Hz 时略有下降; 同时, 制备的半固态坯料中心与边缘位置微观组织的均匀性越来越好。

3) 电磁搅拌法制备 2A50 铝合金半固态坯料合理的工艺参数为: 搅拌电流 30 A, 搅拌频率 30 Hz, 且其对应的平均晶粒尺寸和形状因子分别为 75.6 μm 及 0.73。

参考文献 References

- [1] Guan Renguo(管仁国), Ma Weimin(马伟民). *Theory and Technology of Semi-solid Metal Forming*(金属半固态成形理论与技术)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 3
- [2] Wang Yongfei(王永飞), Zhao Shengdun(赵升吨), Zhang Chenyang(张晨阳). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(12): 3875
- [3] Wang Yongfei(王永飞), Zhao Shengdun(赵升吨), Fan Shuqin(范淑琴) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金

属材料与工程)[J], 2017, 46(10): 2900

- [4] Zhao Zude(赵祖德), Luo Shoujing(罗守静). *The Light Metal Semi-solid Forming Technology*(轻合金半固态成形技术)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 1
- [5] Zhou Quan(周 全), Chen Leping(陈乐平), Xiao Chengbo(肖程波) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(3): 665
- [6] Zhang Qi(张 琦), Cao Miao(曹 苗), Cai Jin(蔡 进) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(8): 1975
- [7] Wang Ping(王 平), Liu Jing(刘 静). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(9): 2232
- [8] Wang Y, Zhao S, Zhao X *et al. Journal of Mechanical Science and Technology*[J], 2017, 31(8): 3917
- [9] Jiang J, Wang Y, Xiao G *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2016, 238: 361
- [10] Lee S M, Kang C G. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*[J], 2011, 225(B2):184
- [11] Mao W M, Zhen Z S, Chen H T. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2005, 15(1): 72
- [12] Dao V, Zhao S D, Lin W *et al. Solid State Phenomena*[J], 2012, 192: 398
- [13] Liu Zheng(刘 政), Chen Tao(陈 涛), Chen Zhiping(陈志平) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(5): 1664
- [14] Jiang Jufu(姜巨福). *Research on the Preparation of AZ91D Semi-solid Billet by New SIMA Method and Thixoforging*(新 SIMA 法制备 AZ91D 半固态坯及其触变模锻研究)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 8
- [15] Wang Y, Zhao S, Zhao X *et al. Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2017, 31(8): 3917
- [16] Xing Shuming(邢书明), Bao Peiwei(鲍培玮). *Melted Metal Die Forging*(金属液态模锻)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 9
- [17] Kang C G, Bae J W, Kim B M. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2007, 187-188(4): 344
- [18] Zhang L, Li W, Yao J P. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2013, 554(6): 156
- [19] Mohammadi H, Ketabchi M, Kalaki A. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2011, 20(7): 1256

Study on Aluminum Alloy Semi-Solid Billets Prepared by Electromagnetic Stirring Process

Wang Yongfei^{1,2}, Zhao Shengdun¹, Fan Xiaoguang², Li Shuangjiang¹, Jiang Hong¹, Wang Jun³

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(3. China National Heavy Machinery Research Institute Co., Ltd, Xi'an 710032, China)

Abstract: The effects of the stirring current and frequency on the microstructure of the semi-solid 2A50 alloy at the central and peripheral parts of the billet were studied. Results show that the coarse dendritic particles are the main constituent of the microstructure without electromagnetic stirring, where the length of the dendrite arm is larger than 200 μm . This type of semi-solid billet is unqualified for the semi-solid forming. With the increase in stirring current or stirring frequency, the average size of the grains located at the central and peripheral regions decreases first and then slightly increases when the stirring current and stirring frequency is over 30 A and 30 Hz, respectively; the shape factors at central and peripheral parts gradually increase and then slightly decrease when the stirring current is 40 A or the stirring frequency is 40 Hz; Furthermore, the uniformity of the grain size and shape factor at the central and peripheral parts is improved with the increase in the stirring current or the frequency. The optimal average grain size of 75.6 μm and the shape factor of 0.73 are able to be obtained under the stirring current of 30 A and stirring frequency of 30 Hz.

Key words: aluminum alloy; semi-solid billet; electromagnetic stirring; microstructure

Corresponding author: Wang Yongfei, Postdoctor, Associate Researcher, Department of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China, Tel: 0086-29-82668607, E-mail: yongfeio@126.com