

电磁连铸颗粒增强铝基复合材料圆坯及其摩擦性能

Electromagnetic Continuous Casting for Particle-reinforced Al Matrix Composites Billet and Its Wear Properties

王宏明, 李桂荣, 赵玉涛, 戴起勋
(江苏大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013)
WANG Hong-ming, LI Gui-rong, ZHAO Yu-tao, DAI Qi-xun
(School of Material Science & Engineering,
Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

摘要: $\text{Al}+\text{Zr}(\text{CO}_3)_2$ 体系原位反应合成法制备 $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Al}_3\text{Zr})_p/\text{Al}$ 颗粒增强铝基复合材料圆坯, 在合成及半连铸过程中施加低频电磁搅拌来改善增强相颗粒在铝基体内的分布状态, 同时在结晶器初始凝固区域施加高频电磁场实现软接触连铸, 以改善铸坯的表面质量。扫描电镜 (SEM) 分析显示: 施加电磁搅拌后复合材料的凝固组织致密, 颗粒增强相的体积分数增加, 且颗粒细化、分布更趋于均匀。干滑动摩擦磨损实验表明: 施加电磁搅拌后, 复合材料的耐磨性能提高。磨损表面的 SEM 分析显示粘着磨损比不施加电磁搅拌时明显减少, 摩擦磨损机制以磨粒磨损为主。施加的高频磁场使得单纯使用低频电磁搅拌产生的表面粗糙现象消失, 铸坯表面质量显著提高。
关键词: 电磁连铸; 颗粒增强; 铝基复合材料
中图分类号: TG249.7; TB331 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2005)12-0053-04

Abstract: $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Al}_3\text{Zr})_p/\text{Al}$ composite was prepared *via in-situ* synthetic reaction in $\text{Al}+\text{Zr}(\text{CO}_3)_2$ system. During the preparation and semi-continuous casting process, a low frequency electromagnetic field was employed to improve the distribution state of reinforced particles by electromagnetic stirring. At the same time, a high frequency electromagnetic field was applied at the initial solidification zone to realize the soft-contact state between the billets and the mold wall, so as to improve the billets surface quality. SEM analysis indicated that after being stirred by the low frequency electromagnetic field the microstructure of the composite got compact, the amount of reinforced phase was increased, and the reinforced particles grew finer and distributed more uniformly. The dry friction experiment showed that the wear resistance of the composite was greatly improved by electromagnetic stirring. The SEM analysis of the worn-out surface indicated that the adhesive wear was reduced and the wear mechanism was mainly abrasion after employing electromagnetic stirring. Furthermore, the problem of coarse billets surface resulted from low frequency electromagnetic stirring was resolved and the surface quality was improved remarkably *via* employing the high frequency electromagnetic field.
Key words: electromagnetic continuous casting; particle-reinforced; Al matrix composite

用原位反应合成法制备自生颗粒增强铝基复合材料, 由于颗粒增强体在基体内部原位形核、长大, 尺寸细小, 界面结合强度高, 其耐磨性能大幅度提高。原位反应制备颗粒增强复合材料是在熔化的金属液内加入化学试剂, 利用其与金属间反应生成颗粒增强体, 弥散在金属基内起到增强的作用^[1,2]。但增强颗粒的大小、分布和数量不易控制, 使得材料

的性能不均匀^[2,3]。针对此问题, 本研究在 $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Al}_3\text{Zr})_p/\text{Al}$ 复合材料制备及浇铸过程中引入低频电磁场进行电磁搅拌, 使得增强颗粒的数量增加, 分布均匀, 但出现的新问题是铸坯表面质量恶化较严重, 因此又利用电磁软接触连铸技术^[4], 在结晶器外铸坯初始凝固区域施加高频磁场, 使得铸坯表面质量得以改善。

1 实验

原材料为工业纯铝(99.85%,质量分数,下同)和工业碳酸锆($Zr(CO_3)_2$)粉剂(纯度99.20%)。

图1为实验装置示意图。熔铝炉容量为80kg;结晶器为闭路水冷割缝结晶器,材质为紫铜,有效高度为40cm,内径为 $\phi 18$ cm,在结晶器壁上沿铸造方向平行开设8条0.6mm窄缝,缝隙间用绝缘材料填充;电磁搅拌采用型号为DJMR1616W的旋转电磁搅拌器,输入功率为10kW,频率为10Hz;高频磁场发生装置总功率为40kW连续可调,频率为20kHz。将工业纯铝锭在工频熔铝炉中熔化至850℃,精炼后加入制备好的 $Zr(CO_3)_2$ 粉剂,搅拌,待充分反应后,开始浇铸。连铸过程分三组:(1)不施加任何磁场;(2)只施加低频电磁搅拌磁场;(3)同时施加低频电磁搅拌磁场和高频软接触磁场。对所得到的铸坯进行表面观察并取相同部位的铸坯断面作扫描电镜分析,观察颗粒数量及分布情况,然后进行干滑动摩擦磨损实验,研究施加电磁场对材料耐磨性能的作用,并通过磨损面的扫描电镜观察分析磨损机制。

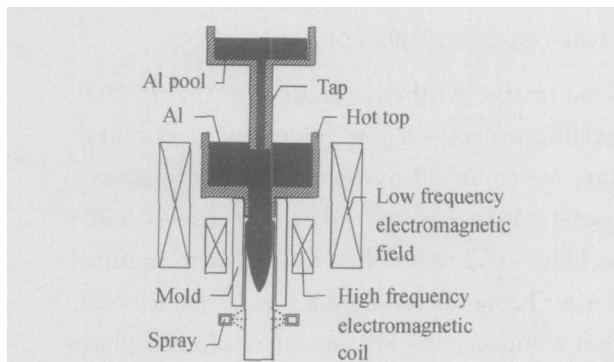


图1 电磁连铸实验装置示意图

Fig 1 Schematic diagram of electromagnetic continuous casting

2 电磁连铸原理分析

金属在电磁场中的受力原理见图2。当感应线圈在结晶器内产生高频电磁场 B 时,在金属液内诱发感应电流 J ,两者交互作用产生一电磁力。若介质的磁导率为 μ ,根据麦克斯韦方程组得到式(1):

$$F = J \times B = -\frac{\nabla B^2}{2\mu} + \frac{(B \cdot \nabla)B}{\mu} = F_r + F_z \quad (1)$$

F_r 是垂直熔体侧表面指向液芯的电磁力的径向分力,它降低了熔体与结晶器之间的接触压力,因此称为软接触力;第二项旋度不为零,它是使熔体旋转的周向

力 F_z ,对熔体起搅拌作用,因此称为电磁搅拌力。根据Maxwell方程, F_r 与 F_z 的关系为^[4]:

$$\left| \frac{F_r}{F_z} \right| \approx \frac{L}{\delta} \quad (2)$$

式中: L 为铸坯的特征长度; δ 为集肤层厚度,介质一定时,决定于磁场频率,其计算式如下:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \sigma \cdot \mu \cdot f}} \quad (3)$$

式中 σ, μ, f 为金属的电导率、磁导率和磁场频率。

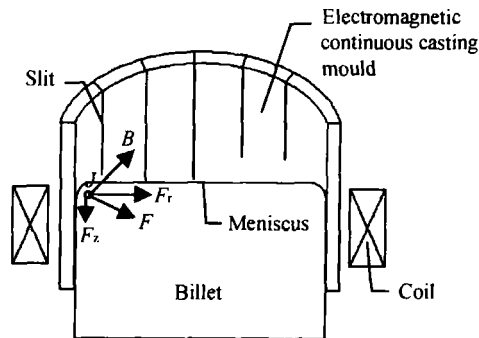


图2 电磁连铸原理示意图

Fig 2 Schematic of the principle of electromagnetic continuous casting

根据以上分析,对低频线圈输入电流频率10Hz, $\delta \gg L$,使得 $F_z \gg F_r$,即电磁力主要表现为周向旋转作用力,由于旋转产生离心力,会增加铸坯与结晶器间的压力,使润滑介质不易流入,引起表面粗糙;对高频线圈来说,输入高频电流频率20kHz, $\delta \ll L$,即集肤层厚度非常小,电磁力主要作用于很薄的金属表层,并且有 $F_r \gg F_z$,即电磁力主要表现为作用于金属表面的径向电磁压力,当 F_r 达到可以抵消金属液体的静压力和圆周运动产生的离心力后,结晶器内金属就与结晶器壁呈现软接触状态。因此,高频和低频磁场的配合,既在金属液内部实现了电磁搅拌,又实现了电磁软接触。

3 实验结果与分析

3.1 复合材料铸坯的表面质量

图3是电磁场对铸坯表面质量的影响。由图3可知,不施加电磁场时铸坯表面有小的凹坑和明显的褶皱,这是由于初始凝固时析出的气泡和拉坯时的摩擦阻力形成的;当施加低频电磁搅拌后(见图3b),铸坯表面质量恶化,表面褶皱加大,并有较深(约1mm)的凹沟。分析其原因是,施加电磁搅拌后金属液在电磁力的驱动下旋转,圆周运动产生的离心力压缩金属液使之与结晶器壁间压力增大,导致摩擦阻力增大,而且由于金属液中存在陶瓷颗粒相,也会使得摩擦阻

力增加,并在铸坯表面形成凹沟状划痕;当施加高频磁场后(见图 3c),得到了表面较好的铸坯,表面光洁,无明显褶皱,这是因为高频磁场的集肤层较薄,电磁力集中作用在铸坯的表面形成电磁压力,不仅抵消了低频电磁搅拌产生的离心力,而且降低了由于金属静压力造成的初始凝固坯壳与结晶器之间的压力,使得拉坯阻力几乎为零,即坯壳与结晶器出现软接触状态,润滑变好,铸坯表面变得光洁^[4]。

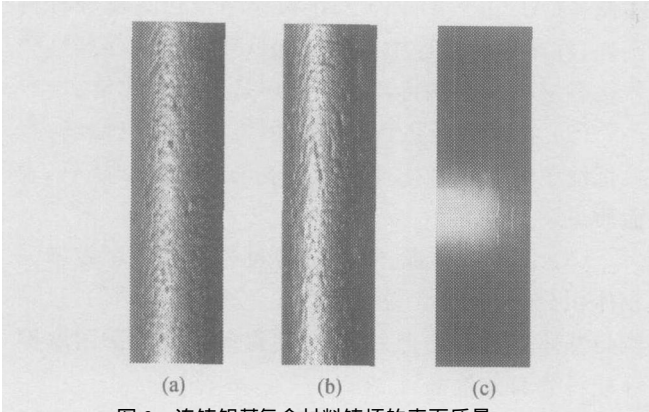


图 3 连铸铝基复合材料铸坯的表面质量

- (a) 未施加电磁场;
- (b) 只施加低频搅拌磁场;
- (c) 高频、低频磁场同时施加

Fig 3 Surface quality of continuous casting aluminum-based composites billet (a) no electromagnetic field (b) impressing low frequency electromagnetic field; (c) impressing high and low frequency electromagnetic field

3 2 复合材料铸坯的凝固组织

在 JEOL-JXA-840A 型扫描电镜上观察 (Al₂O₃ + Al₃Zr)_p/Al 复合材料微观组织,结果如图 4 所示。由于高频磁场只作用于铸坯表层,所以对铸坯内部微观组织结构起主要作用的是低频电磁搅拌磁场。

从图 4 可以看出,施加低频电磁场后,铸坯的凝固组织变得致密,凝固组织中增强相颗粒的绝对含量即所占体积分数明显增加,而且其在基体中的分布更加均匀,在粒度上也有较明显的细化,可以说是处于弥散化状态,这对改善强度、耐磨性等其他力学性能起到了很好的作用。关于施加低频电磁场可以增加颗粒相的原因,认为是实验所施加的低频电磁场不仅仅在结晶器区域,结晶器上热顶内的金属液也被充分搅拌,这使得加入的试剂与基体铝有充分的反应,所以颗粒相含量增加。该结果与本课题组前期研究该原位反应体系的反应机理时得到的结论相一致^[1,2]。

3 3 复合材料的耐摩擦性能

对有无电磁搅拌条件下的复合材料铸坯进行干滑动摩擦实验,实验参数及磨损质量损失见表 1。从磨损量上可看出,施加电磁搅拌后复合材料的磨损量

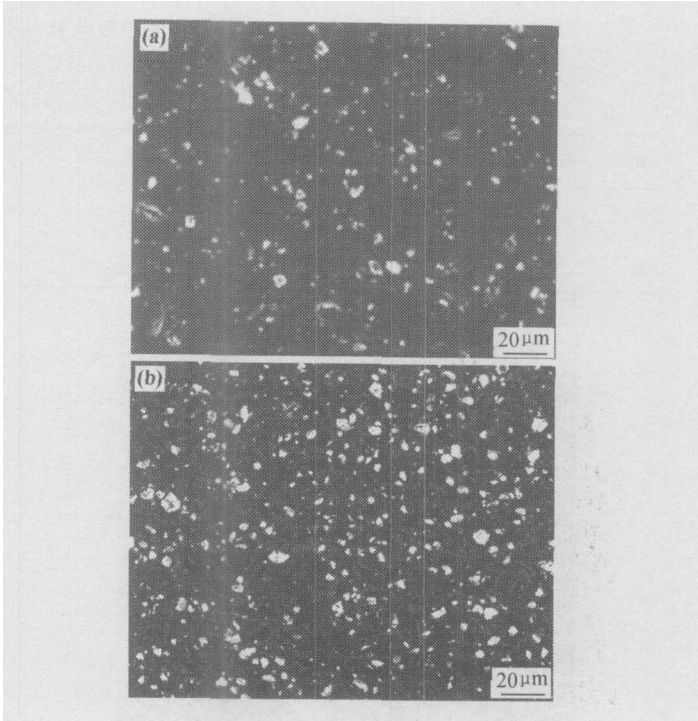


图 4 (Al₂O₃ + Al₃Zr)_p/Al 复合材料微观组织

- (a) 无电磁搅拌;
- (b) 电磁搅拌, P = 10kW

Fig 4 Microstructures of (Al₂O₃ + Al₃Zr)_p/Al composites (a) no electromagnetic stirring; (b) impressing electromagnetic stirring, P = 10 kW

减少约 50%,说明施加电磁搅拌提高了复合材料的耐摩擦磨损性能。为分析电磁搅拌提高材料耐磨擦性能的机理,对磨损面形貌进行 SEM 分析,结果见图 5。

图 5a 是无电磁搅拌时的 SEM 照片。可见试样的磨损表面剥落严重,受变形和挤压而产生的变形迁移层明显。原因在于其中增强颗粒体积分数低,磨损过程中其不能起到很好减磨作用,使得纯铝基体更多地和对磨件表面接触,铝基体硬度低,且在摩擦过程中产生的热量使铝基体表面层温度升高而软化变形,接着在磨擦表面形成凸起的具有犁削作用的粘着点,随着摩擦磨损的进行,粘着点逐渐增大,在剪切力的作用下,致使铝基体的剥落加剧,表面因磨削而被大片撕脱转移,由此产生相对大面积的凹坑。

图 5b 是施加电磁搅拌后的 SEM 照片。可见表面较平整光滑,有几处小凹坑,撕裂坑面积小而浅。原因在于电磁搅拌下增强颗粒体积分数高且细化好,在铝基体中弥散分布,更多的硬质颗粒 (900℃时弹性模量^[5]: Al₂O₃ 为 380MPa; Al₃Zr 为 308MPa) 凸出于磨损表面,起到了抵抗对磨件对复合材料表面的微切削破坏,并可以限制铝基体的变形,提高了基体抗剪切应变的能力,有利于在摩擦表面形成摩擦转移膜,减少了铝基体与对磨材料直接接触的几率,因此磨损表面粘着撕脱的块度和数量均降低^[6]。

表 1 磨损实验参数及有无电磁搅拌下试样磨损量的比较

Table 1 Experimental parameters of wearing test and comparison of abrasion loss of the samples

No	Rub material	Electromagnetic stirring power/ kW	Impose load/ N	Wearing time/ min	Abrasion loss/ mg
1	40Cr steel	0	90	90	58.8
2	40Cr steel	10	90	90	31.7

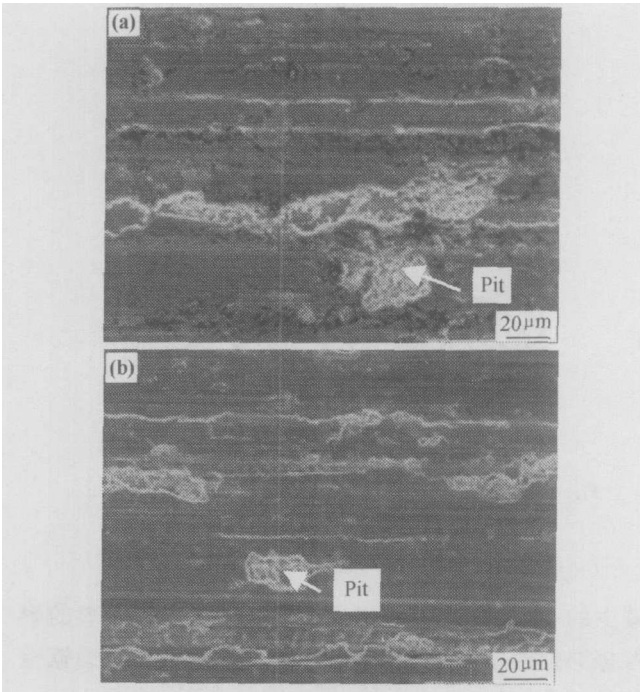


图 5 复合材料摩擦磨损表面 SEM 照片

(a) 无电磁搅拌; (b) 电磁搅拌, $P = 10\text{ kW}$

Fig 5 SEM photographs of worn surface of composites

(a) no electromagnetic stirring;

(b) impressing electromagnetic stirring, $P = 10\text{ kW}$

总之, $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Al}_3\text{Zr})_p/\text{Al}$ 复合材料由于增强颗粒相的引入, 磨损面上存在磨粒磨损, 比单纯的粘着磨损有更好的耐磨性。在合成过程中施加电磁搅拌后, 增加了铝基体中的增强颗粒数量, 且颗粒分布弥散均匀, 有助于提高减磨作用。熔池受到较强烈的搅动, 可以促进颗粒相在基体内的均匀分布, 同时由于颗粒相为陶瓷相, 在磁场中不受电磁力作用, 导致颗粒相与金属液之间存在速度差异, 金属液对颗粒相的冲蚀作用使得颗粒相显著细化和圆整化, 进而提高了颗粒相与基体合金之间的润湿性和结合力^[7], 使得颗粒相不易剥落, 复合材料的耐磨性能得到提高。

4 结论

(1) 利用 $\text{Al-Zr}(\text{CO}_3)_2$ 体系内的原位反应合成

法制备 $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Al}_3\text{Zr})_p/\text{Al}$ 颗粒增强铝基复合材料圆坯, 在半连铸过程中同时施加低频电磁搅拌和高频软接触来分别改善铸坯的内部质量和表面质量。

(2) 在结晶器初始凝固区域施加高频电磁场, 有效抵消了由于电磁搅拌使铸坯表面质量差的缺陷, 表面质量明显提高。

(3) 施加电磁搅拌后, 复合材料基体内颗粒增强相体积分数增加, 颗粒明显细化, 分布趋于均匀, 且颗粒与基体金属的结合力增强, 使得复合材料的耐摩擦性能得到有效提高。

参考文献

[1] 孙建祥, 颜敏娟, 赵玉涛. $\text{Al-Zr}(\text{CO}_3)_2$ 体系熔体反应法制备复合材料的反应机理研究 [J]. 铸造技术, 2004, 25 (9): 663-666.

[2] 李桂荣, 戴起勋, 赵玉涛, 等. Al-Zr-O-B 体系原位合成颗粒增强铝基复合材料及性能 [J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(4): 573-577.

[3] 孙国雄, 廖恒成, 潘冶. 颗粒增强金属基复合材料的制备技术和界面反应与控制 [J]. 特种铸造及有色合金, 1998, 19(4): 12-17.

[4] 王宏明, 李家旺, 徐明喜, 等. 钢的软接触电磁连铸技术的研究进展 [J]. 特殊钢, 2005, 26(4): 29-32.

[5] ZHAO Y T, LI Z H, CHENG X N, et al. *In-situ* synthesized $(\text{Al}_3\text{Zr} + \text{Al}_2\text{O}_3)_p/\text{A356}$ composites by direct melt reaction in Al-Zr-O system [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13(4): 769-773.

[6] 王文龙, 吴军华, 张国定. 铝基复合材料的摩擦磨损性能 [J]. 金属学报, 1998, 34(11): 1177-1182.

[7] ASAI S. Recent development and prospect of electromagnetic processing of materials [J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2000, 1(4): 191-200.

基金项目: 江苏省高校自然科学基金资助项目 (05KJD450043)

收稿日期: 2005-01-13; 修订日期: 2005-09-08

作者简介: 王宏明 (1974-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为材料电磁加工及制备, 联系地址: 江苏省镇江市江苏大学材料科学与工程学院 (212013)。