

电磁搅拌对复层材料凝固组织的影响

赵佳蕾, 付 莹, 曹志强, 钟德水, 李廷举

(大连理工大学 材料与科学学院, 大连 116023)

摘 要: 采用固液复合的方法制备 3003/4004 和 5056/AZ91 两种不同结合类型的双金属复层材料, 使用光学显微镜和 XRD 等手段分析电磁搅拌对复层界面凝固组织的影响。结果表明: 施加电磁搅拌可以明显改变两种复层材料界面的凝固组织, 对于 3003/4004 复层铸锭, 未经处理时, 4004 一侧界面附近的凝固组织为粗大的树枝晶; 而经电磁搅拌处理后, 其界面附近凝固组织为非树枝状; 对于 5056/AZ91 复层铸锭, 未经处理时, 金属间化合物主要聚集在过渡层处, 靠近 5056 铝合金一侧的为 Mg_2Al_3 , 靠近 AZ91 镁合金一侧的为 $Mg_{17}Al_{12}$; 而施加电磁搅拌后, Lorentz 力会引起 AZ91 熔体强迫流动, 反复冲刷外层 5056 凝壳导致重熔, 大量铝元素被卷入铸锭内部与未凝固的镁合金熔体混合, 使得从界面到心部均为单一的 Mg_2Al_3 相。

关键词: 复层材料; 电磁搅拌; 镁合金

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Effect of electromagnetic stirring on solidification structure of clad ingots

ZHAO Jia-lei, FU Ying, CAO Zhi-qiang, ZHONG De-shui, LI Ting-ju

(Department of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: The solid-liquid compound method was used to prepare 3003/4004 and 5056/AZ91 clad ingots. The optical microscope and XRD were used to analyze the effect of electromagnetic stirring on the modification of solidification structure. The results show that, with electromagnetic stirring, the interface morphology of solidification structure obviously changes. For 3003/4004 clad ingot, without electromagnetic stirring, the solidification structure of 4004 aluminum alloy near the interface is coarse dendrite, when electromagnetic stirring is used, the solidification structure of 4004 aluminum alloy changes into non-dendrite crystal. For 5056/AZ91 clad ingot, without electromagnetic stirring, the of intermetallic compounds congregate on the interface, which closing to 5056 side and AZ91 side are Mg_2Al_3 and $Mg_{17}Al_{12}$. When electromagnetic stirring is used, the forced convection in AZ91 melt caused by Lorentz force washes against 5056 solidification shell to remelting, a great quantity of Al element involves in the core of the ingot and mixed with magnesium alloy melt, so that Mg_2Al_3 is generated from the interface to the core.

Key words: cladding materials; electromagnetic stirring; magnesium alloy

层状金属复合材料是“十二五”国家科技计划材料领域重点项目。所谓层状金属复合材料是利用复合技术使两种或两种以上物理、化学、力学性能不同的金属在界面上实现牢固冶金结合而制备的一种新型复

合材料^[1]。这类材料能够充分发挥母材的优势性能, 同时具有“互补效应”^[2], 可以克服各自的缺点, 具有较强的可设计性和良好的综合性能, 广泛用于航天、化工、汽车、轮船、冶金等领域^[3-5]。其制备方法主要

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51074031, 51071035); 高等学校博士点专项科研基金资助项目(20100041110030)

收稿日期: 2012-06-11; **修订日期:** 2013-01-04

通信作者: 曹志强, 教授, 博士; 电话: 13941191184; E-mail: caozq@dlut.edu.cn

有爆炸复合^[6]、轧制复合^[7]、扩散复合^[8]、铸造复合^[9]等, 其中采用铸造复合, 特别是连续铸造, 具有工艺简单易于实现连续生产、界面结合强度高等优点, 有利于工业化生产, 已成为金属复层材料研究领域的热点之一^[10-11]。电磁搅拌早已被广泛应用于各类合金的制备环节, 不仅可以减少铸坯表面和皮下夹杂物的数量, 使夹杂物分布均匀, 还可以明显细化合金组织的晶粒, 改善铸坯的微观结构, 提高合金的综合性能^[12-13], 而将电磁搅拌应用于复层材料的制备却鲜有报道。

在金属凝固过程中施加旋转磁场, 会在金属熔体内部产生一个电磁力分量, 其方向与磁场旋转方向相同, 将驱动金属液中产生强迫流动。如果处于旋转磁场中的铸锭外层为一种固态金属, 内层为另外一种液态金属, 那么内层熔体强迫流动将对两种金属的界面结合状态、过渡层的形成以及相结构等产生重大影响。为了研究电磁搅拌作用对界面处金属凝固行为的影响规律, 本文作者选用两种不同复合类型的复层材料, 一种为没有界面反应的 3003/4004 铝铝复层材料, 一种为有界面反应的 5056/AZ91 铝镁复层材料, 考察电磁搅拌对复层铸锭的宏观形貌、结合界面的微观组织、成分分布的影响, 研究两种不同类型的复层铸锭在有/无电磁搅拌情况其结合界面的凝固过程及结合机理。

1 实验

实验材料为 3003、4004、5056 和 AZ91 合金, 其成分如表 1 所列。实验所采用的电磁搅拌装置为两相两级对电磁驱动器, 其磁搅拌强度通过改变旋转磁场发生器的输入电压来调节, 磁场发生器所产生磁场的磁感应强度与输入电压成正比。铸型采用 304 不锈钢材质, 其直径为 70 mm, 高度为 75 mm。将配制好的合金分别在两个井式电阻炉中熔炼, 每种合金浇注前都在过热 50 °C 的温度下保温 20 min 左右。具体的实验过程如图 1 所示。在制备 3003/4004 铝铝复层铸锭过程中, 首先将温度为 700 °C 的外层 3003 合金浇注到不锈钢铸型中, 静置 10 s 后, 将铸型中尚未凝固的熔体倾倒出来, 获得一壁厚为 10~12 mm 的凝壳。然后, 将温度为 600 °C 的 4004 熔体浇注到 3003 凝壳中(此时 3003 凝壳内侧的温度约为 560~580 °C), 同时施加旋转磁场, 磁场强度约为 15 mT。制备 5056/AZ91 铝镁复层铸锭的方法与上述方法相同, 外层 5056 合金浇注温度为 710 °C, 静置时间同样为 10 s, 凝壳厚度 8~10 mm, 凝壳温度 580~600 °C, 内层 AZ91 浇注温度为 595 °C, 施加磁场强度同样为 15 mT。将浇注好的复

表 1 实验材料的化学成分

Table 1 Chemical composition of experimental materials

Material	Mass fraction/%						
	Si	Mn	Mg	Fe	Cu	Zn	Al
3003	0.6	1.0~1.5		0.7	0.05~0.20	0.10	Bal.
4004	9.0~10.5	—	1.0~2.0	—	0.25	0.20	Bal.
5056	0.6	1.0~1.5	5.5	0.7	0.05~0.20	0.10	Bal.
AZ91	9.0~10.5	0.10	Balance	0.8	0.25	0.20	1.0~2.0

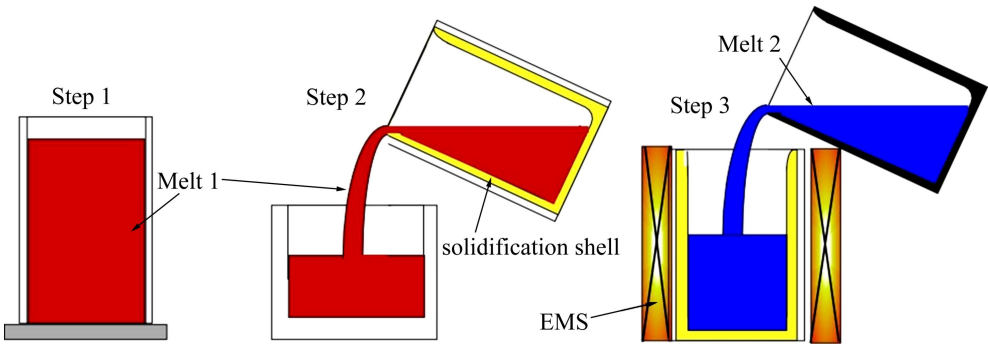


图 1 实验过程示意图
Fig. 1 Schematic diagram of experimental process

层铸锭空冷。作为对比, 本实验还在相同情况下制得未施加电磁搅拌的试样。最终获得尺寸为 $d\ 67\ \text{mm} \times 75\ \text{mm}$ 的复层铸锭, 将其从距底部 $15\ \text{mm}$ 的位置沿横截面剖开, 经磨样、抛光, 王水 $V(\text{HCl}):V(\text{HNO}_3)=3:1$ 腐蚀后观察其宏观组织, $5\%\text{HF}$ (体积分数) 腐蚀后观察其金相组织。采用 EPMA-1600 电子探针对结合界面成分进行线分析及微区成分分析。使用 Shimadzu XRD-6000 X 射线分析仪对 5056/AZ91 复合铸锭界面进行检测, 以确定其相组成, 其操作电压为 $40\ \text{kV}$, 操作电流为 $30\ \text{mA}$, 扫描范围从 $20^\circ \sim 100^\circ$, 扫描速度为 $4^\circ/\text{min}$ 。

2 结果及分析

2.1 电磁搅拌对 3003/4004 铝合金复层铸锭凝固组织的影响

图 2 所示为 3003/4004 复层铸锭宏观组织。由图 2 可知, 3003/4004 铝合金在有无电磁搅拌情况下均形成

了清晰的复合界面, 且外层 3003 合金均为典型的柱状晶组织。未加电磁搅拌的铸锭中, 其心部的 4004 合金晶粒组织粗大, 且与 3003 凝壳接触的部分因受到凝壳的冷却作用形成柱状晶, 柱状晶向铸锭中心生长直至与中心粗大的等轴晶相遇, 如图 2(a) 所示; 而经电磁搅拌处理的铸锭中, 其心部的 4004 合金晶粒组织明显变得细小, 且柱状 4004 晶粒全部转变为等轴晶, 如图 2(b) 所示。

图 3 所示为 3003/4004 复层界面金相组织。由图 3 可知, 未加电磁搅拌时, 复合界面附近 4004 合金一侧的凝固组织为粗大的树枝晶, 且树枝晶的生长方向与热量传输方向平行, 如图 3(a) 所示。经电磁搅拌处理的铸锭, 界面附近 4004 合金一侧的凝固组织由粗大的树枝晶变为球状或近球状的非树枝晶, 且分布更为均匀, 如图 3(b) 所示。

2.2 电磁搅拌对 5056/AZ91 复层铸锭凝固组织的影响

图 4 所示为有无电磁搅拌情况下 5056/AZ91 复层材料界面的宏观组织。如图 4(a) 所示, 将镁合金浇注

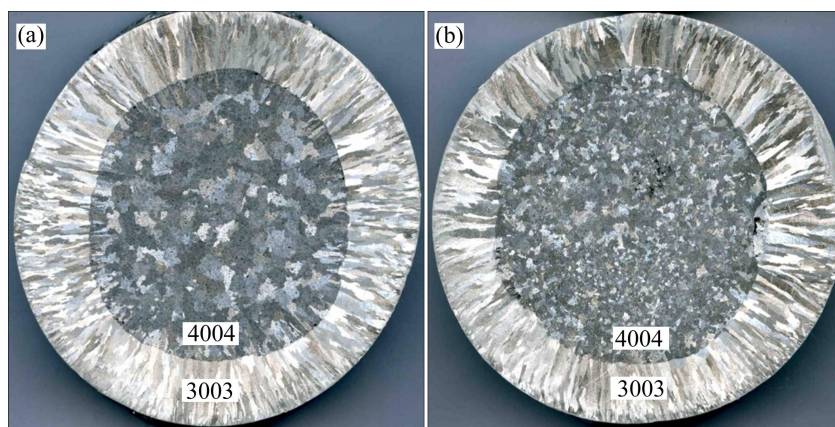


图 2 3003/4004 复层铸锭宏观组织

Fig. 2 Macrostructures of 3003/4004 cladding ingots: (a) Without electromagnetic stirring; (b) With 80 V electromagnetic stirring

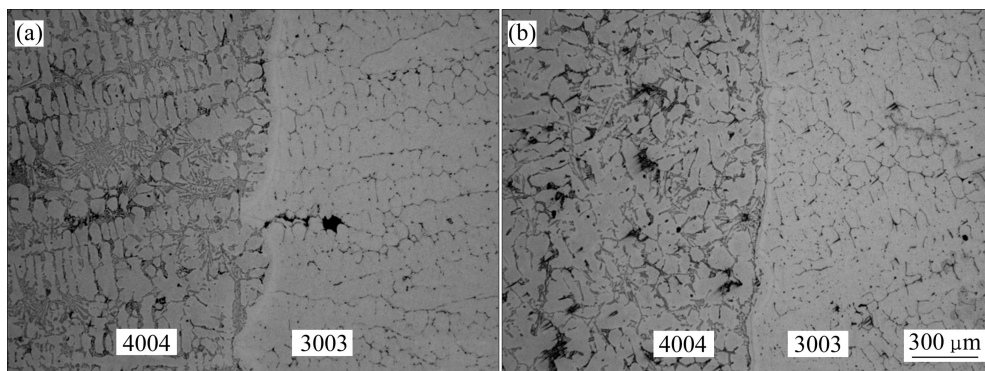


图 3 3003/4004 复层铸锭界面微观组织

Fig. 3 Microstructures of interfaces of 3003/4004 cladding ingots: (a) Without electromagnetic stirring; (b) With 80 V electromagnetic stirring

到具有一定温度的固态铝合金凝壳中时, 两种金属会发生反应, 形成一定厚度的过渡层, 过渡层内生成异于两侧基体的脆性金属间化合物。图 5 所示为未施加电磁搅拌时复层试样界面附近微观组织(取样位置已在图 4(a)中标出)。结果表明, 从图 5(a)左侧的 AZ91 镁合金到图 5(b)右侧的 5056 铝合金, 两种基体之间的过渡层出现了不同类型的金属间化合物(已用数字标出)。经电子探针定量分析(见表 4)及 X 射线衍射分析

(见图 6(a)), 基本可以确定其物相组成。由图 5 可知, 与 AZ91 基体直接接触层(标注 1)为团簇状($\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}+\alpha\text{-Mg}$)共晶组织, 随后 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相逐渐增多, 出现树枝状 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相(标注 2), 并过渡至 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 单相区(标注 3 和 4)。接下来为 Mg_2Al_3 单相区(标注 5)。根据 Al-Mg 二元合金相图^[14], Mg 含量不同会生成不同类型的金属间化合物, 而从 AZ91 侧开始, Mg 元素在过渡层中的含量还是渐降低的, 因此在过渡层内出

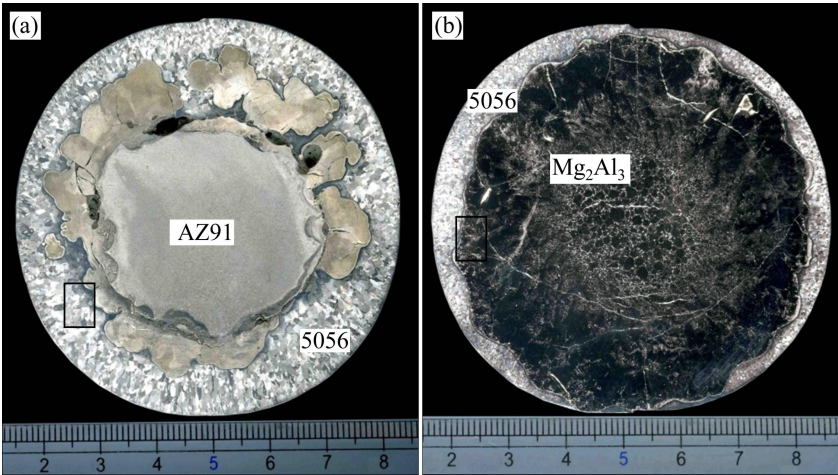


图 4 5056/AZ91 复层铸锭的宏观形貌

Fig. 4 Macrostructures of 5056/AZ91 cladding ingots: (a) Without electromagnetic stirring; (b) With 80 V electromagnetic stirring

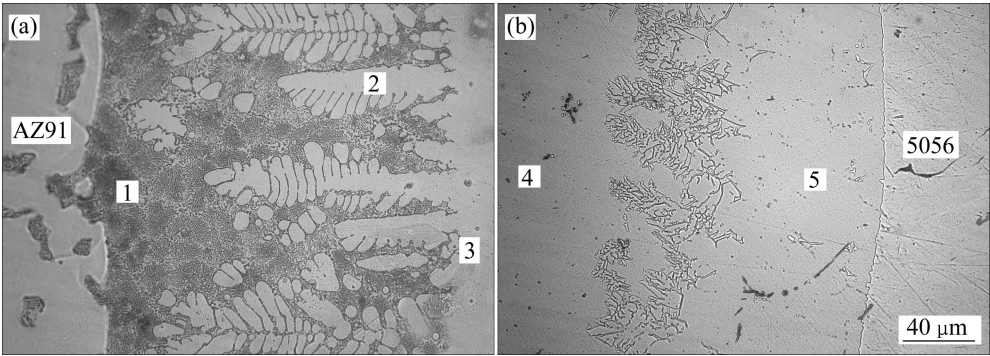


图 5 未施加电磁搅拌情况下基体与反应层结合区域的微观组织

Fig. 5 Microstructures of layer between reaction zone and matrix alloys without electromagnetic stirring: (a) AZ91 side; (b) 5056 side

表 4 反应层内不同位置的 EPMA 成分分析

Table 4 Composition analysis of elements at different positions in reaction zone by EPMA

Element	Mole fraction/%				
	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5
Mg	72.854	60.168	51.276	48.091	40.363
Al	26.917	39.712	48.585	51.771	59.523
Phase	$\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}+\alpha\text{-Mg}$		$\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$		Mg_2Al_3

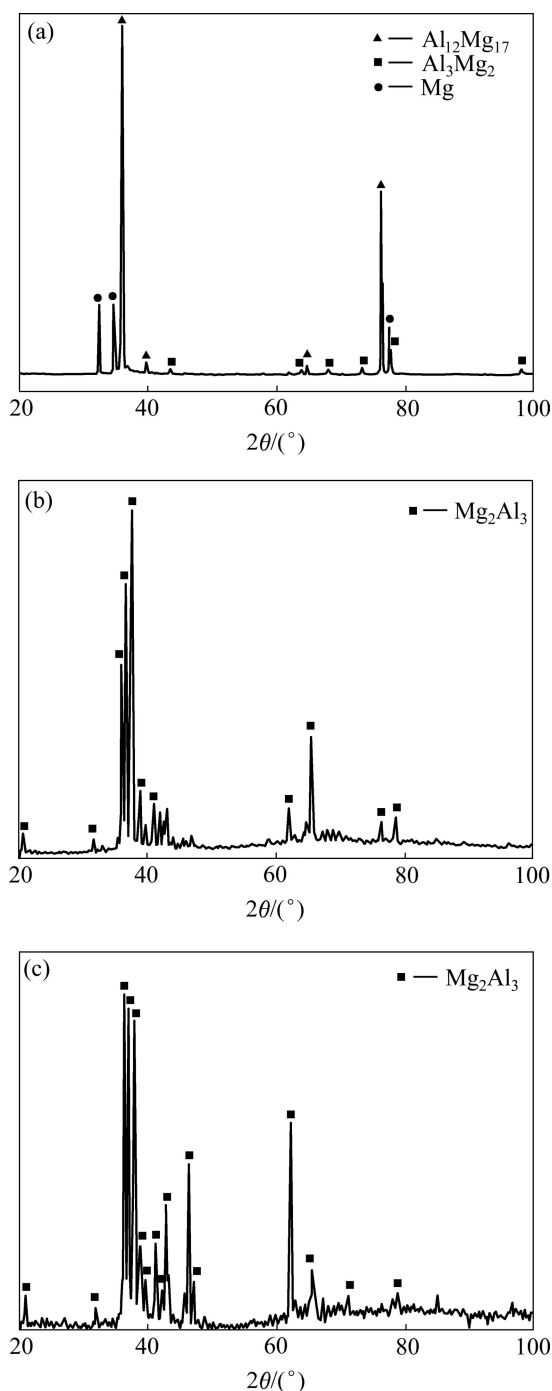


图 6 图 4 中标定区域的 XRD 谱

Fig. 6 XRD patterns of marked area in Fig. 4: (a) Without electromagnetic stirring; (b) Position 1 with electromagnetic stirring; (c) Position 2 with electromagnetic stirring

现了不同的金属间化合物。经 Image-Pro Plus 软件测量, 该过渡层约 3 mm。施加电磁搅拌后, 复层铸锭横截面的宏观形貌如图 4(b)所示, 可看出界面处与内部呈现相同的组织形貌, 分别对其进行 XRD 分析可以看到(如图 6(b)和(c)所示), 无论是界面还是心部均

为 Mg_2Al_3 相。可见, 对于有界面反应的 5056/AZ91 复层材料, 未施加电磁场时, 两种金属间形成一定厚度的过渡层, 过渡层内由 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 及 Mg_2Al_3 两种相组成; 施加一定强度的电磁搅拌可以促进两种合金之间的反应, 导致复层铸锭内层几乎都转变为 Mg_2Al_3 相。

2.3 讨论

3003 和 4004 合金为两种不同牌号的铝合金, 将 4004 浇注到 3003 凝壳中时, 两者不发生反应, 没有金属间化合物生成。当 4004 熔体置于旋转磁场内, 由于电磁感应将产生感应电流, 金属液作为载流导体在外加磁场的作用下产生电磁力, 此电磁力可分解为径向力 f_r 和切向力 f_θ , 低频电磁搅拌情况下起主要作用的为切向力 f_θ , 在 f_θ 的作用下熔体沿着圆周运动^[15]。切向力的计算公式为

$$f_\theta = -1/2B^2\sigma(\omega - v/r)r \quad (1)$$

$$v = rN = r \left(\frac{\sqrt{gy}}{\sqrt{2\pi r}} \right) \quad (2)$$

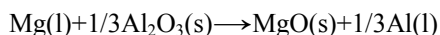
$$\omega = 2\pi f \quad (3)$$

式中: σ 为电导率(S/m); v 为流体切向流速分量(m/s); B 为磁感应强度(T); r 为金属熔体的半径(m); ω 为交变电流的角频率(rad/s); f 为电源频率(Hz); N 为金属液的转速(r/s); y 为弯月面深度; g 为重力加速度(m/s^2)。

以 3003/4004 复层铸锭为例, 600 °C 下 4004 铝合金的电导率 σ 为 $7.0 \times 10^6 \text{ S/m}$ ^[14]; 磁感应强度 B 为 $15 \times 10^{-3} \text{ T}$; 金属熔体半径 r 为 0.021 5 m; 电源频率 f 为 50 Hz; 弯月面深度 y 为 0.013 m^[18]; 重力加速度 g 为 9.8 m/s^2 。将数据分别带入式(1)、(2)和(3)可求得界面处熔体所受的电磁力约为 5 248 N。该电磁力(洛伦兹力)可以促使 4004 熔体在 3003 凝壳处产生较强的强迫流动, 这就改变原有的树枝晶生长条件, 在这种情况下晶粒的长大无论在哪个方向都没有明显的优先取向, 最终生长成为球状或近球状的非树枝晶^[19]。因此, 复层铸锭界面附近及心部的 4004 合金凝固组织都为球状或近球状, 组织的细化有利于复层铸锭机械性能的提高。

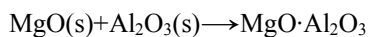
而对于 5056/AZ91 复合材料, 从热力学角度分析, 根据式(4), 当 AZ91 熔体温度约为 595 °C 时即可与 5056 外壳内表面的氧化层反应, 且为自发不可逆过

程。



$$\Delta G^\ominus = -40 \text{ kJ/mol} \quad (4)$$

之后所形成的 MgO 与铝合金表面氧化膜 Al_2O_3 发生化学反应形成尖晶石 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, 其化学反应式如下:



$$\Delta G^\ominus = -40 \text{ kJ/mol} \quad (5)$$

该反应可以使 5056 外壳内表面的氧化膜发生脱落,进而促进 AZ91 镁合金熔体与新鲜(未氧化)的 5056 基体直接接触,在随后的凝固及冷却中直接进行热量传递及原子扩散反应。在无电磁搅拌情况下,由于反应层中 AZ91 合金侧至 5056 合金侧 Mg 含量逐渐降低,Al 含量逐渐增加,因此凝固层呈现不同的组织形貌:靠近镁合金一侧形成 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$, 靠近铝合金一侧形成 Mg_2Al_3 。对铸锭施加电磁搅拌后,内层 AZ91 熔体在电磁力的作用下发生强迫对流,顺时针旋转的熔体反复冲刷 5056 铝合金凝壳,铝镁之间发生化学反应,反应产物在电磁力的驱动下进入铸锭心部,随着电磁搅拌的进行熔体的温度会长时间高于铝镁共晶反应温度 (437°C),这样铝镁反应时间大大增加,铝壳不断被重熔,反应产物不断被分配到铸锭内层各处,最终导致铸锭内层全部生成 Mg_2Al_3 。

对比电磁搅拌对 3003/4004 和 5056/AZ91 两种复合材料的影响,可以看出,对于不会发生化学反应的 3003/4004 合金,电磁搅拌可以细化内部 4004 合金凝固组织,进而改善 3003/4004 复合材料界面组织性能;而对于发生化学反应的 5056/AZ91 合金,电磁搅拌加速了铝镁之间的反应,使得金属间化合物区域增大。

3 结论

1) 在未加电磁搅拌及施加 80 V 电磁搅拌的情况下,成功制得界面复合良好的 3003/4004 铝合金复层材料,经过电磁搅拌处理的铸坯,其心部晶粒组织比相同条件下未经电磁搅拌处理的铸坯组织更为细小。

2) 当外层为 5056 铝合金,内层为 AZ91 镁合金时,未施加电磁搅拌时 5056 与 AZ91 的过渡层几乎全部为金属间化合物,靠近 5056 铝合金一侧为 Mg_2Al_3 , 靠近 AZ91 镁合金一侧为 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$; 当施加 80 V 电磁搅拌时,电磁力所引起 AZ91 熔体强迫流动反复冲刷外层 5056 凝壳导致重熔,大量铝元素被卷入铸锭内部与未凝固的镁合金熔体混合,使得复层铸锭从界面到

心部都生成 Mg_2Al_3 。

REFERENCES

- [1] 刘晓涛,张延安,崔建忠. 层状金属复合材料生产工艺及其新进展[J]. 材料导报, 2002, 16(7): 41-43.
LIU Xiao-tao, ZHANG Ting-an, CUI Jian-zhong. Technology of clad metal production and its latest progress[J]. Materials Review, 2002, 16(7): 41-43.
- [2] 吴人杰. 复合材料[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000.
WU Ren-jie. Composite materials[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2000.
- [3] GRISHABAR R B, SERGUEEVA A V, MISHRA R S, MUKHERJEE A K. Laminated metal composites-High temperature deformation behavior[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 403(1/2): 17-24.
- [4] 吴彩虹,李廷举,金俊泽. 双金属复层材料制备现状及研究进展[J]. 铸造, 2005, 54(2): 103-107.
WU Cai-hong, LI Ting-ju, JIN Jun-ze. Development of clad metal processing[J]. Foundry, 2005, 54(2): 103-107.
- [5] WANG Tong-min, LI Jun, DU Yan-yan, YAN Zhi-ming, SUN Jian-bo, CAI Shao-wu, XU Jing-jing, LI Ting-ju. Study on continuous casting of cladding aluminum alloys with electromagnetic brake[J]. Materials Research Innovation, 2010, 14(4): 271-276.
- [6] AKBARI-MOUSAVI S A A, BARRETT L M, AL-HASSANI S T S. Explosive welding of metal plates[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 202(1/3): 224-239.
- [7] DANESH M H, KARIMI T A. An investigation of deformation behavior and bonding strength of bimetal strip during rolling[J]. Mechanics of Materials, 2005, 37(5): 531-542.
- [8] AYDIN K, KAYA Y, KAHRAMAN N. Experimental study of diffusion welding/bonding of titanium to copper[J]. Materials and Design, 2012, 37: 356-368.
- [9] XIONG Bo-wen, CAI Chang-chun, WAN Hong, LU Bai-ping. Fabrication of high chromium cast iron and medium carbon steel bimetal by liquid-solid casting in electromagnetic induction field[J]. Materials and Design, 2011, 32(5): 2978-2982.
- [10] 孙建波. 复层铝合金铸坯连续铸造技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
SUN Jian-bo. Study on the continuous casting of clad aluminum ingot[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [11] 费劲,李元元,张卫文,夏伟,陈维平. 双流浇注连续铸造铝合金梯度材料的工艺参数[J]. 特种铸造及有色合金, 2003, 3: 1-3.
FEI Jin, LI Yuan-yuan, ZHANG Wei-wen, XIA Wei, CHEN Wei-ping. Processing parameters for aluminum alloy gradient materials in double-stream-pouring continuous casting (DSPCC)[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2003, 3: 1-3.

- [12] 王 晶, 李培杰, 何良菊, 弭光宝, 钟约先. 电磁搅拌对 A356 合金熔体结构及其凝固行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(12): 2090–2098.
- WANG Jing, LI Pei-jie, HE Liang-ju, MI Guang-bao, ZHONG Yue-xian. Influence of electromagnetic stirring on structure of A356 melt and its solidification behavior[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(12): 2090–2098.
- [13] 王宝峰, 李建超. 电磁搅拌技术在连铸生产中的应用[J]. 鞍钢技术, 2009(1): 1–5.
- WANG Bao-feng, LI Jian-chao. Application of electromagnetic stirring technology in continuous casting[J]. Anshan Iron and Steel Technology, 2009(1): 1–5.
- [14] 王祝堂, 田荣璋. 铝合金及其加工手册[M]. 3 版. 长沙: 中南大学出版社, 2005.
- WANG Zhu-tang, TIAN Rong-zhang. Handbook of aluminum alloy and its process[M]. 3rd ed. Changsha: Central South University Press, 2005.
- [15] 张红霞, 杜永胜. 不同电磁搅拌器内电磁力的有限元数值计算[J]. 铸造设备与工艺, 2011(3): 35–37.
- ZHANG Hong-xia, DU Yong-sheng. The finite element numerical simulation of electromagnetic force in different electromagnetic stirrers[J]. Foundry Equipment and Technology, 2011(3): 35–37.
- [16] 张伟强. 金属电磁凝固原理与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- ZHANG Wei-qiang. Electromagnetic solidification principle and technology of metals[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004.
- [17] 金俊泽, 任忠鸣, 郭可切. 熔体流动对定向凝固铝合金的溶质分布及组织的影响[J]. 大连工学院学报, 1985, 24(4): 37–42.
- JIN Jun-ze, REN Zhong-ming, GUO Ke-ren. The influence of melt flowage on the distribution and composition of solidified aluminum alloy[J]. Journal of Dalian Institute of Technology, 1985, 24(4): 37–42.
- [18] 张 琦, 金俊泽, 王同敏, 李廷举, 郭庆涛. 金属液在旋转电磁搅拌器作用下的流动分析[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(1): 98–104.
- ZHANG Qi, JIN Jun-ze, WANG Tong-min, LI Ting-ju, GUO Qing-tao. Analysis of molten metal flow in rotating magnetic field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(1): 98–104.
- [19] 韩富银, 张金山, 高义斌, 王红霞. 电磁搅拌对镁合金 AZ91D 半固态组织的影响[J]. 铸造技术, 2005, 26(6): 497–499.
- HAN Fu-yin, ZHANG Jin-shan, GAO Yi-bin, WANG Hong-xia. Effect of electromagnetic stirring on microstructure of semisolid magnesium alloy AZ91D[J]. Foundry Technology, 2005, 26(6): 497–499.

(编辑 李艳红)