

外熔体温度对 7075/6061 复合铸锭组织与性能的影响

郑小平, 姜 龙, 龚文源, 宋进英, 田亚强, 陈连生

(华北理工大学, 河北 唐山 063009)

摘 要: 通过固/液复合铸造技术制备了具有“半固态显微组织/枝晶组织”分布特征的包覆型 7075/6061 复合铸锭, 研究了外熔体温度对该复合铸锭界面组织形态与力学性能的影响规律, 探讨了该复合铸锭的界面结合机制。结果表明: 外熔体温度 760 °C、半固态坯料预热温度 300 °C、保温 40 min、空冷条件时, 制备的 7075/6061 双金属复合铸锭的显微组织分布与形态特征较好、抗压强度较高; 随着外熔体温度的升高, 内层 7075 合金半固态坯料的近球状 α -Al 固相颗粒逐渐粗大、球形化逐渐减弱; 复合界面处内层半固态坯料局部重熔的现象逐渐增加, 界面附近的半固态显微组织形态呈: 球状固相颗粒合并长大、非球形化、枝晶化的演变规律; 室温压缩时, 复合铸锭以圆柱体轴线呈 45°角方向裂开, 而非复合界面方向。

关键词: 双金属复合材料; 固/液复合铸造; 铝合金; 外熔体温度; 半固态组织

中图法分类号: TB331; TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)08-2544-05

包覆型双金属复合材料以其优异的综合性能得到材料研究人员的普遍关注, 而其“枝晶/枝晶”的显微组织分布特征, 容易在塑性加工过程中, 比如挤压、压缩、轧制等, 出现心部材料变形不均、变形抗力过大导致加工困难等现象, 致使其塑性加工所需的工艺控制与设备要求较高, 制约了其进一步发展与应用^[1-5]。而设计“半固态显微组织/枝晶组织”的分布特征, 则可利用半固态金属的成形抗力低、易流变等特点^[6-8], 有效地克服上述不足, 促进包覆型双金属复合材料的发展与应用。

7075 铝合金具有超高强度但耐蚀性差, 而 6061 铝合金具备优良的耐蚀性与塑性成形能力, 结合二者优点, 有望制备出兼具超高强、耐腐蚀的双金属复合材料。而考虑到枝晶组织形态的 7075 合金塑性加工成形抗力较大, 通过应变诱导熔化激活 (strain-induced melt activation, SIMA) 法^[9,10]将其制备成半固态坯料, 再利用固/液复合工艺制备出包覆型的 7075/6061 复合铸锭。从而研究外熔体温度对该复合铸锭的组织与性能的影响, 探讨固/液复合铸造工艺制备 7075/6061 复合铸锭的界面结合机制。

1 实 验

双金属复合铸锭的内层与外层分别选择某厂家生产的 7075、6061 合金, 其成分如表 1 所示。而枝晶态的 7075 合金则通过冷压缩 SIMA 法制备成半固态坯料, 其工艺参数为: 预变形量约 10%、半固态等温温度 610 °C,

保温 30 min^[11,12], 其半固态显微组织如图 1 所示。

将 6061 合金放入坩埚中加热至 730、760、790 °C, 并待其完全熔化后进行精炼除气, 同时将 7075 合金半固态坯料放入坩埚中进行 300 °C 预热 40 min; 然后将 6061 合金熔体浇入放置有 7075 合金半固态坯料的坩埚中, 空冷至室温取出, 从而制备出包覆型 7075/6061 复合铸锭, 其技术原理如图 2 所示。

表 1 7075 与 6061 合金的化学成分

Table 1 Nominal composition of 7075 and 6061 aluminum alloys (wt%)

Alloy	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Cr	Al
7075	5.92	0.96	0.10	0.62	0.30	0.04	0.04	Bal.
6061	0.09	1.17	0.46	0.15	0.82	0.66	0.01	Bal.

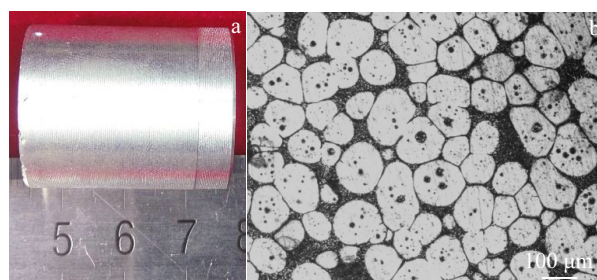


图 1 7075 合金半固态坯料与显微组织

Fig.1 Semi-solid billet (a) and microstructure (b) of 7075 aluminum alloy

收稿日期: 2017-08-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51474091, 51574107); 河北省自然科学基金 (E2013209268); 唐山市科技创新团队培养计划项目 (15130202C)

作者简介: 郑小平, 男, 1978 年生, 博士, 副教授, 华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063009, 电话: 0315-2592403, E-mail: zhengxp1978@163.com

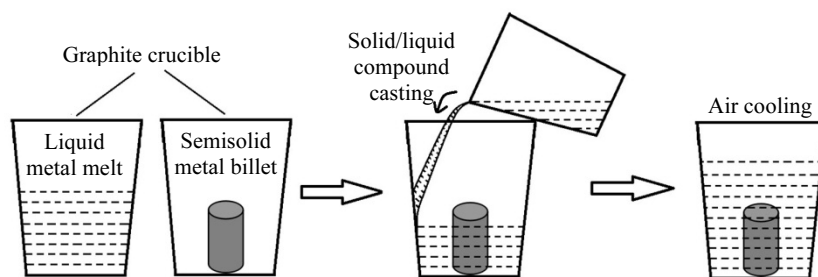


图 2 固/液复合铸造法原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of the solid/liquid metal compound casting

对包覆型 7075/6061 复合铸锭的横截面进行宏观与微观组织观察, 其中, 宏观腐蚀液为: 2.5 mL HNO_3 + 1.5 mL HCl + 1 mL HF + 95 mL H_2O , 侵蚀 20 s; 微观腐蚀剂为 0.5% HF 水溶液, 侵蚀 30 s。Zn 元素线分析在 JXA-8230 电子探针上进行。室温压缩力学性能测试在 WAW-300 微机控制电液伺服万能试验机上进行, 试样尺寸为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$, 压速 1 mm/min。

2 结果与分析

2.1 外熔体温度对宏观形貌的影响

对不同外熔体温度、空冷条件下制备的 7075/6061 复合铸锭进行横截面宏观形貌观察, 如图 3 所示。内外层合金有着良好的包覆型双金属复合铸锭结构, 且半固态坯料与外层金属熔体的结合界面良好、宏观缝隙较少且不明显。随着 6061 合金外熔体温度升高, 内层 7075 合金半固态坯料在界面处出现局部熔化现象; 当外熔体温度升高至 790 $^{\circ}\text{C}$, 半固态坯料表层发生部分重熔现象, 如图 3b、3c 所示的虚线框处。这是由于 7075 合金

的耐蚀性较差, 其表面氧化膜的致密性较低, 半固态坯料氧化膜致密性较差或显微组织液相偏聚的表层, 在高温 6061 合金熔体的冲击对流作用下, 容易被渗熔或氧化膜断裂^[13,14]。

2.2 外熔体温度对显微组织的影响

图 4 为不同外熔体温度、空冷条件下制备的 7075/6061 复合铸锭横截面, 从铸锭心部到铸锭外部的显微组织。可见, 随着外熔体温度的升高, 内层 7075 半固态坯料的显微组织仍然保持着近球状 $\alpha\text{-Al}$ 固相颗粒的形态, 只是固相颗粒逐渐粗化。对比复合铸造前的半固态坯料显微组织 (图 1b), 固/液复合铸造后, 半固态坯料的 $\alpha\text{-Al}$ 固相颗粒明显长大, 特别是尺寸小的; 同时, 显微组织中原有“液相”区域几乎消失殆尽, 分析原因有: “液相”区为几个微米甚至纳米尺度的细小共晶组织组成^[15,16], 受热激发后将长大, 或者原有大尺寸的 $\alpha\text{-Al}$ 固相颗粒获得能量将吞并邻近的细小晶粒而长大^[16], 从而导致半固态坯料的“液相”区域在固/液复合铸造过程中消失或减少。再看复合界面处, 随着外熔体温度的升

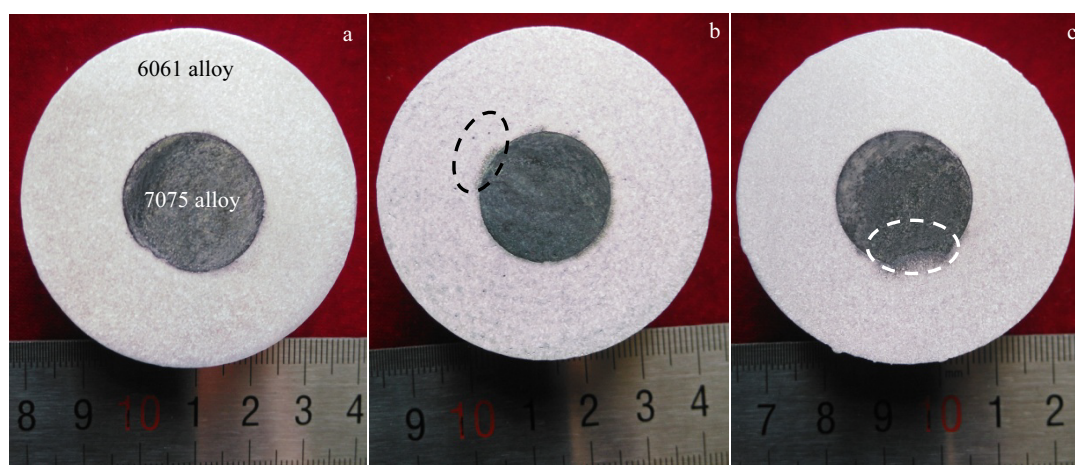


图 3 不同外熔体温度的 7075/6061 双金属复合铸锭横截面宏观形貌

Fig.3 Macrostructures of the cross section of the 7075/6061 bimetal composite ingots at different outside melt temperatures:

(a) 730 $^{\circ}\text{C}$, (b) 760 $^{\circ}\text{C}$, and (c) 790 $^{\circ}\text{C}$

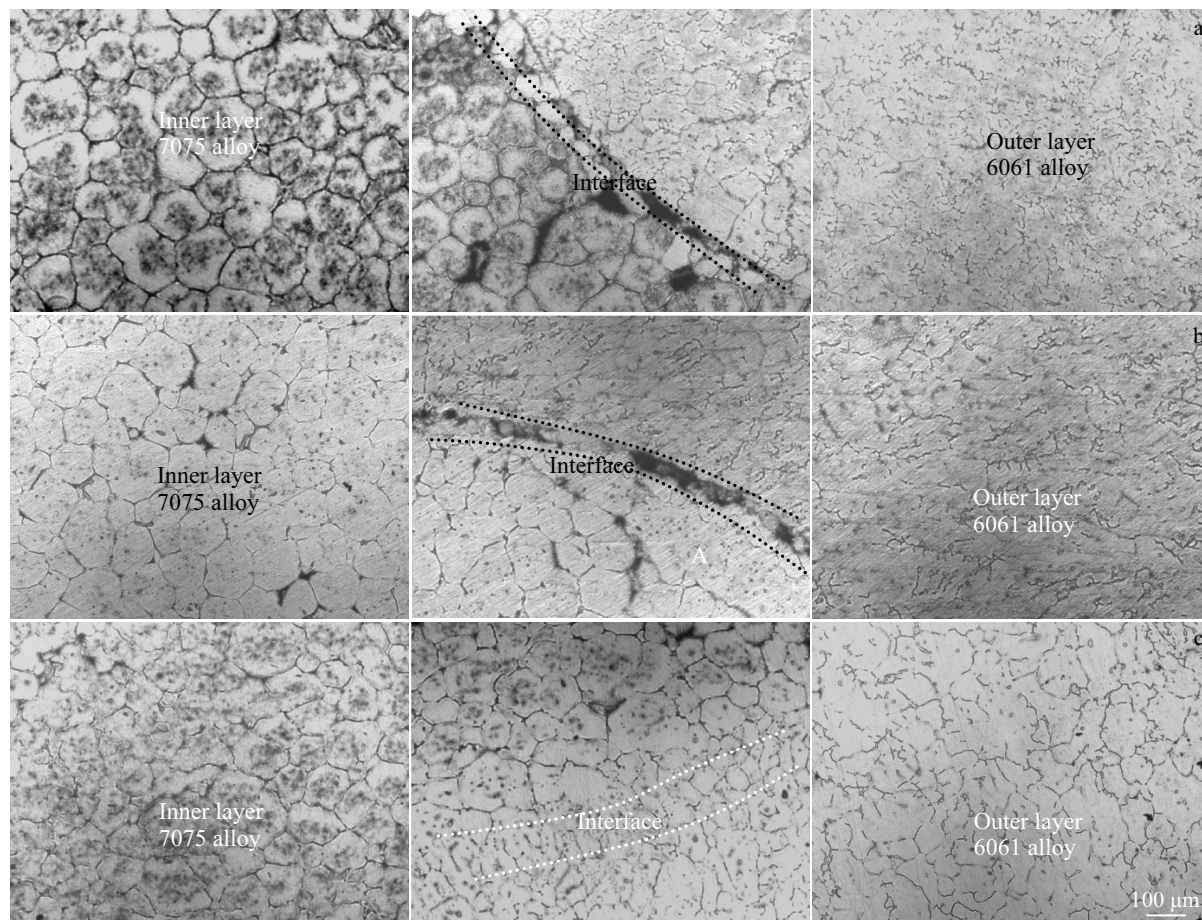


图 4 不同外熔体温度的 7075/6061 双金属复合铸锭横截面显微组织

Fig.4 Microstructures of the cross section of the 7075/6061 bimetal composite ingots at different outside melt temperatures:
(a) 730 °C, (b) 760 °C, and (c) 790 °C

高, 界面宽度逐渐的增大, 界面处氧化夹渣现象明显减弱, 冶金结合程度逐渐增强; 而复合界面内层 7075 合金侧的显微组织明显异常长大, 如图 4b 界面处 A 标识; 而外熔体温度为 790 °C 时, 界面处的氧化夹渣显著减少或消失, 界面组织形态为枝晶与等轴晶混合, 从而使复合铸锭在界面处形成了由内到外: 近球状晶、等轴晶、树枝晶与等轴晶混合、树枝晶的显微组织分布特征。

2.3 外熔体温度对成分分布的影响

对不同外熔体温度条件下获得的 7075/6061 双金属复合铸锭, 进行半径线上的 Zn 元素线扫描分析, 结果如图 5 所示。总体来说, Zn 元素分布特点为: 从复合铸锭心部到界面处, 以 7075 合金的 Zn 含量计数, 保持稳定状态, 没有出现异常波动; 在界面处, 突然急剧降低到 6061 合金的 Zn 含量计数, 然后保持稳定状态, 亦无异常波动。但 790 °C 时, Zn 元素在内层 7075 合金一侧, Zn 元素的分布略有波动, 特别是在复合界面处, 呈现明显的梯度分布特征, 表明此时 Zn 元素有向复合界面外

层 6061 合金一侧扩散的现象。结合图 3 与图 4 的结果与分析可知, 730 °C 时, 界面处有较为完整的氧化膜或夹渣存在, 阻碍了 Zn 元素向外层合金扩散; 760 °C 时, 界面处的氧化膜或夹渣受到高温外熔体的冲击, 有分解或断裂的现象, 从而有通道使 Zn 元素向外层合金扩散; 790 °C 时, 界面处的氧化膜或夹渣大大减少、甚至消失, 有利地促进了 Zn 元素向外层合金的扩散。且随着外熔体温度的升高, 也使得内层 7075 合金半固态坯料的表层有浅层的熔化, 从而在对流扩散的作用下, 更加促使 Zn 元素向外层合金扩散。同时, 根据 Zn 元素过渡情况也可知复合铸锭界面宽度顺序为 790 °C > 760 °C > 730 °C, 与显微组织分析所得界面宽度随外熔体温度变化规律一致。

2.4 外熔体温度对压缩力学性能的影响

为了研究不同外熔体温度对 7075/6061 双金属复合铸锭力学性能的影响, 在复合铸锭的界面附近, 以界面为中心, 沿径向切割出圆柱体压缩试样, 室温压缩测试后的试样宏观形貌如图 6 所示。可以看出, 压缩试样均

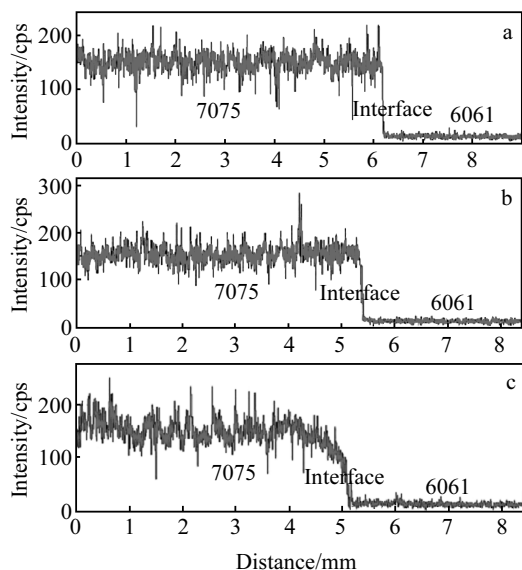


图 5 不同外熔体温度的 7075/6061 双金属复合铸锭横截面 Zn 元素分布

Fig.5 Distribution of Zn element counts in the radius direction of the 7075/6061 bimetal composite ingots at different outside melt temperatures: (a) 730 °C, (b) 760 °C, and (c) 790 °C

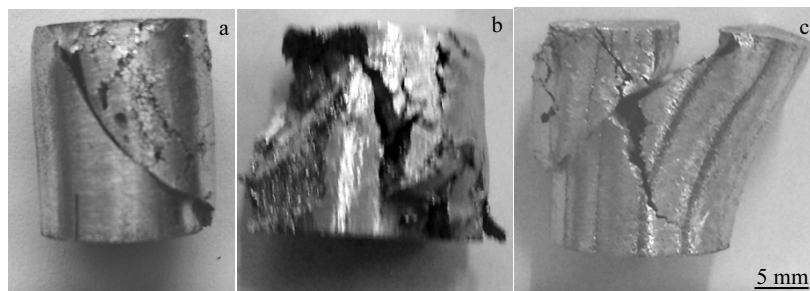


图 6 不同外熔体温度条件下制备 7075/6061 双金属复合铸锭室温压缩后的宏观形貌

Fig.6 Macrostructures of 7075/6061 bimetal composite ingots after compressed at room temperature with different outside melt temperatures: (a) 730 °C, (b) 760 °C, and (c) 790 °C

的扩散机制来发挥作用^[17]; 但因内、外层合金原子之间受到界面处氧化膜、夹渣、孔洞等缺陷的阻碍, 此时内层合金获得的能量和原子之间的相互交换相对较少, 其组织形态基本得到保持。随着外熔体温度的升高, 半固态坯料表面局部熔化加剧, 熔合结合机制占主导^[17], 此时界面处合金元素分布呈梯度过渡, 复合铸锭的抗压强度增大, 界面的冶金结合能力增强; 但外熔体温度过高, 表面重熔进一步加剧, 虽然复合界面实现了较为完全的冶金结合, 但内层半固态坯料的 α -Al 固相颗粒粗化与非球化严重, 且界面处内层组织枝晶化明显, 致使复合铸锭的抗压强度呈下降的趋势。

综上所述, 固/液复合铸造工艺制备具有“半固态显微组织/枝晶组织”分布特征的 7075/6061 双金属复合铸锭,

沿圆柱体轴线 45°角方向裂开, 而非沿复合界面处 (位于圆柱体试样的中间部位)。由此可知, 复合铸锭的界面两侧合金并非简单的机械咬合, 而是以原子扩散形式形成冶金结合界面; 室温压缩时, 裂纹源的产生不在复合界面处, 裂纹源的扩展方向也不沿着复合界面扩展。

图 7 为 7075/6061 双金属复合铸锭室温压缩性能的应力-应变曲线。可以看出, 外熔体温度为 730 °C 时, 复合铸锭压缩性能较差, 抗压强度为 202.36 MPa; 而外熔体温度为 760、790 °C 的复合铸锭压缩性能较好, 分别为 301.42、262.28 MPa, 此时主要由于外熔体温度较高, 界面处原子的相互扩散加剧, 复合界面质量较好、结合强度较高; 但外熔体温度过高, 导致内层 7075 合金半固态坯料的显微组织非球状化甚至枝晶化严重, 内外层组织严重粗化, 从而降低了复合铸锭的力学性能。

3 讨论

当 7075 合金半固态坯料预热温度及保温时间一定时, 6061 合金外熔体温度越高, 其携带的热量越大。当外熔体温度较低时, 固态坯料表面与金属液相接触, 复合界面主要依靠金属液和固态坯料间的润湿能力及元素

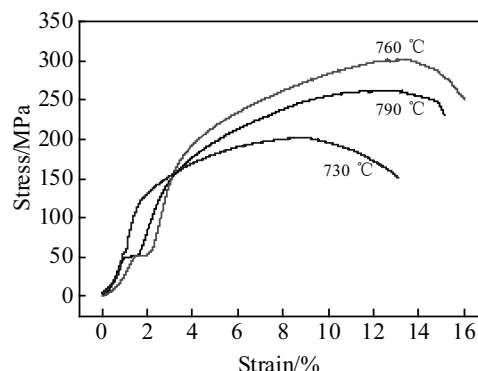


图 7 7075/6061 双金属复合铸锭室温压缩曲线

Fig.7 Compression stress-strain curves of the 7075/6061 bimetal composite ingots at room temperature

其界面复合机制为:以熔合结合为主,元素扩散结合为辅。

4 结 论

1) 固/液复合工艺参数为外熔体温度 760 °C、半固态坯料预热温度 300 °C、保温 40 min、空冷条件时,制备的 7075/6061 双金属复合铸锭的显微组织分布与形态特征较好,复合铸锭的抗压强度较高。

2) 随着外熔体温度的升高,内层 7075 合金半固态坯料的近球状 α -Al 固相颗粒逐渐粗大、球形化逐渐减弱;复合界面处内层半固态坯料局部重熔的现象逐渐增加,复合界面附近的半固态显微组织形态呈:球状固相颗粒合并长大、非球状化、枝晶化的演变规律。

3) 室温压缩时,复合铸锭以圆柱体轴线呈 45°角方向裂开,而非复合界面方向;随着外熔体温度升高,复合铸锭的抗压强度先增加后降低,760 °C时达到峰值。

参考文献 References

- [1] Liang H, Xue Z Y, Wu C J *et al. Acta Metallurgica Sinica*[J], 2010, 23(3): 206
- [2] Liu X B, Chen R S, Han E H. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2009, 209(10): 4675
- [3] Bae D S, Chae Y R, Lee S P *et al. Procedia Engineering*[J], 2011, 10: 996
- [4] Zhang Bing(张 兵), Wang Kuaisheng(王快社), Sun Yuanjun(孙院军) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2011, 21(9): 2163
- [5] Li X B, Zu G Y, Wang P. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2015, 25(1): 36
- [6] Wang C P, Tang Z J, Mei H S *et al. Rare Metals*[J], 2015, 34(10): 710
- [7] Chen Yongnan, Huo Yazhou, Zhao Yiping *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2016, 45(6): 1406
- [8] Wang S Z, Ji Z S, Sugiyama S *et al. Materials & Design*[J], 2015, 65: 591
- [9] Wang Jia(王 佳), Xiao Han(肖 寒), Wu Longbiao(吴龙彪) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2014, 50(5): 567
- [10] Jiang J F, Wang Y, Du Z M *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2012, 22(S2): 422
- [11] Li Chunxiao(李春晓), Zhao Dan(赵 丹), Zheng Xiaoping(郑小平) *et al. Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2015, 44(11): 22
- [12] Li Chunxiao(李春晓), Zheng Xiaoping(郑小平), Zhao Dan(赵 丹) *et al. Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2016, 41(2): 127
- [13] Liu Weihua(刘伟华). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2008
- [14] Yu Jiayin(于佳音). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013
- [15] Jiang J F, Wang Y, Atkinson H V. *Materials Characterization*[J], 2014, 90: 52
- [16] Yao Dandan, Zhang Yingbo. *Materials Letters*[J], 2016, 166: 201
- [17] Liu Ping(刘 平), Liu Teng(刘 腾), Wang Qudong(王渠东). *Materials Review*(材料导报)[J], 2014, 28(1): 26

Effects of Outside Melt Temperature on Microstructure and Properties of 7075/6061 Bimetallic Composite Materials

Zheng Xiaoping, Jiang Long, Gong Wenyuan, Song Jinying, Tian Yaqiang, Chen Liansheng
(North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, China)

Abstract: The 7075/6061 cladding bimetal composite ingots with a “semi-solid microstructure/dendrite microstructure” distribution characteristic were prepared by solid/liquid metals compound casting. The interfacial morphology and mechanical properties of the ingots with different outside melt temperatures were analyzed. At last, the interface bonding mechanism of the ingot was discussed. The results show that the 7075/6061 cladding bimetal composite ingot has advantageous microstructure distribution and morphology, and has the best compressive strength, while the parameters are the outside melt temperature 760 °C, the billet pre-temperature 300 °C, holding time 40 min and air cooling. With the increasing of the outside melt temperature, the near-spheroidal α -Al solid particles of the semi-solid billets of the inner layer 7075 alloy are coarser and more non-spherical, the remelted area of the semi-solid billet at the bonding interface also increases. Otherwise, as the outside melt temperature increases, an evolution rule of the semi-solid microstructures nearby the bonding interface occurs as follows: near-spheroidal solid particles merging and growing, non-spherical crystal, and dendritic crystal. During the compression mechanical property test at ambient temperature, the samples fracture along 45° angle direction to axis, but not along the bonding interface.

Key words: bimetal composite material; solid/liquid metal compound cast; aluminum alloy; outside melt temperature; semi-solid microstructure

Corresponding author: Chen Liansheng, Ph. D., Professor, School of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, P. R. China, Tel: 0086-315-2597151, E-mail: kyckfk@ncst.edu.cn