

内熔体浇口位置对 7075/6009 合金铸锭成分和内层组织的影响

郑小平, 张卫文, 王郡文, 邵明, 李元元

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 金属新材料制备与成形广东省重点实验室, 广州 510640)

摘要: 为了控制梯度复合铸锭横截面上的内层组织分布, 通过改变内熔体浇口在结晶器中心线上的不同位置, 采用双流浇注半连续铸造技术制备内层合金宽度不同的 7075/6009 梯度复合铸锭, 分析不同内层合金宽度的铸锭横截面上的宏观组织、硬度分布及其微观组织的二次枝晶间距, 探讨内熔体浇口位置对双流浇注半连续铸造技术的内熔体形成液穴的影响。结果表明: 随着内熔体浇口探入结晶器深度的加大, 铸锭横截面的内层合金组织的宽度逐渐加大, 洛氏硬度始降点逐渐外移, 铸锭横截面的 Zn 含量始降点也逐渐外移, 半径为 10 mm 处的二次枝晶间距逐渐缩小。

关键词: 连续铸造; 7075/6009 铝合金; 导管位置; 凝固液穴

中图分类号: TG 146.2+1; TG 249.7 **文献标识码:** A

Effects of position of submerged entry nozzle in mould on composition and structures of 7075/6009 Al alloy ingots

ZHENG Xiao-ping, ZHANG Wei-wen, WANG Jun-wen, SHAO Ming, LI Yuan-yuan

(Guangdong Key Laboratory for Advanced Metallic Materials Processing, School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to control the distribution of internal layer on the cross section of the gradient composite ingots, several 7075/6009 composite ingots were prepared by double-stream-pouring continuous casting by adjusting the positions of submerged entry nozzle in the mould. Macrostructures, hardness distributions and secondary dendrite spacing of the prepared ingots with different internal layer thicknesses were investigated. The effect of the position of submerged entry nozzle in the mould on liquid pool of inside melt was analyzed. The results show that, with the increase of the depth of submerged entry nozzle in the mould, the thickness of internal layer on the cross section of the ingots increases gradually, and the initial dropping points of Rockwell hardness and Zn content move to the ingot surface. Furthermore, the secondary dendrite spacing of the alloy at the radius of 10 mm decreases.

Key words: continuous casting; 7075/6009 Al alloy; entry nozzle position; solidification liquid pool

梯度复合材料的研究与开发已成为新材料研究的热门课题, 具有非常广阔的研究和应用前景。随着梯度复合材料制备技术的不断更新发展, 出现了粉末冶金法、自蔓延高温合成法、等离子喷涂法、激光熔覆法、气相沉积法、分层制备法和连续铸造法等技术^[1-4]。

浇注双金属熔体的连续铸造法制备梯度复合材料

在 20 世纪 80 年代初期被提出后, 已在铜合金、铝合金及镁合金等材料上开展了许多研究, 并实现了铝合金大型铸锭的工业生产。根据内熔体浇口所处位置和内熔体浇注时间的不同, 衍生出一些各具特色的制备方法, 如 Novelis Fusion 法^[5], 是先浇注内层金属熔体, 当内层金属熔体形成的液穴稳定后, 再浇注外熔体,

而后形成了内层金属凝固液穴内嵌于外层金属凝固液穴、双液穴并存的现象; DSPCC 法^[6]是同时浇注内、外熔体, 控制内熔体浇口始终在外层金属熔体凝固液穴上, 受到流下的内熔体温度影响, 原来的液穴形状发生变化而形成一个新的凝固液穴; CFC 法^[7]是先浇注外层金属熔体, 始终控制凝固液穴底在内熔体浇口之上的某个位置, 当铸锭心部形成与内熔体浇管外径一样的孔芯后, 浇注内熔体。其中采用 Novelis Fusion 法和 CFC 法所得的外层与内层金属的界面连接本质上是利用外层金属熔体或内层金属熔体的高温, 重熔已凝固内层金属或外层金属表面, 然后, 在连接表面厚度约 2 mm 处的半固态区进行凝固焊接; 而采用 DSPCC 法所得的外层与内层金属的界面连接本质上是利用外层与内层金属熔体的顺序凝固, 溶质与组元间的相互渗透与交织产生冶金结合, 连接界面厚度约为 10 mm。

而采用 Novelis Fusion 法和 CFC 法所得的内层合金在铸锭横截面上的宽度就是内熔体浇管的宽度, 不受内熔体浇口位置的影响。但采用 DSPCC 法所得的内层合金在铸锭横截面上的宽度与内熔体浇口的位置有着密切联系。为了研究 DSPCC 法的内熔体浇口位置对铸锭横截面上内层合金组织的影响, 本文作者在前期工作的基础上^[8-12], 通过改变内熔体浇口探入结晶器内的深度, 制备出不同内层合金宽度的 7075/6009

梯度复合铸锭, 对内层合金组织进行宏观和微观分析, 分析内熔体浇口位置对内层合金宽度的影响规律。

1 实验

实验采用 DSPCC 技术, 其工艺原理及设备如图 1 所示。以 7075 和 6009 为实验原材料, 其成分如表 1 所列。

分别在电阻坩埚熔炼炉里熔配 7075 和 6009 铝合金, 并除渣、精炼、除气, 然后, 7075 合金在 $t_{in}(750\text{ }^{\circ}\text{C})$ 、6009 合金在 $t_{out}(720\text{ }^{\circ}\text{C})$ 保温 30 min, 依次倒入内浇包和外浇包中, 以 DSPCC 工艺进行实验, 其参数为: 铸造速度 v 为 120 mm/min, 冷却水强度 p 为 0.5 MPa, 节流孔径 D 为 1.6 mm, 内熔体浇口自结晶器最上沿开始垂直深入结晶器内的位置 H 分别为: 0、10、15 mm; 最后制得 3 根不同内层合金宽度 $d65\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ 的 7075/6009 梯度复合铸锭。

分别在铸锭中间截取试样, 采用 10 mL HF+5 mL HCl+5 mL HNO₃+380 mL H₂O 腐蚀液进行宏观腐蚀。然后, 对试样横截面径向的洛氏(HRF)硬度进行测量, 测量方法根据 GB/T 231—91 进行, 测试仪器为 HD8—187.5 型光学布洛维硬度计, 1.587 5 mm(1/16") 的直径钢球压头, 588 N 载荷。最后, 采用 EPMA—1600

表 1 7075 与 6009 铝合金主要成分

Table 1 Main composition of 7075 and 6009 aluminum alloys (mass fraction,%)

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
7075	0.4	0.5	1.20—2.00	0.3	2.1—2.9	0.18—0.28	5.10—6.10	0.2
6009	0.6—1.0	0.5	0.15—0.60	0.2—0.8	0.4—0.8	0.10	0.25	0.1

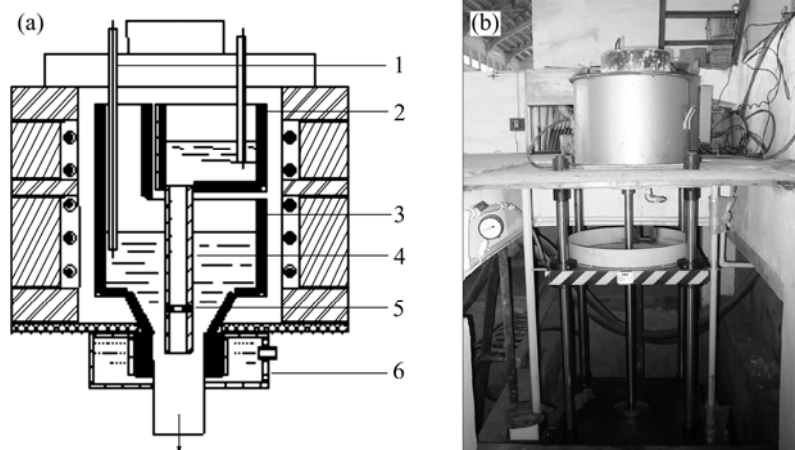


图 1 双流浇注连续铸造技术原理示意图(a)及其设备图(b)

Fig.1 Schematic diagram (a) and shape (b) of apparatus of DSPCC principle: 1—Thermocouple; 2—Inside ladle; 3—Outside ladle; 4—Embedded nozzle; 5—Throttle bore; 6—Crystallizer

型电子探针在径向宏观硬度点附近进行 EDS 成分测试和扫描。

2 结果与分析

2.1 铸锭横截面的径向宏观分析

从铸锭中间部位截取试样片打磨、腐蚀后,其宏观组织形貌如图 2 所示。由图 2 可看出,随着内浇口位于结晶器内位置的加深,内层合金的直径逐渐增大。采用游标卡尺测量铸锭横截面内层合金厚度,当 $H=0$ mm 时,内层合金平均厚度为 33.5 mm;当 $H=10$ mm 时,内层合金平均厚度为 38.8 mm;当 $H=15$ mm 时,内层合金平均厚度为 44.3 mm。由此可知,随着 H 加大,内层合金平均厚度随之增加;当 $H=15$ mm 时,内层合金的厚度比 0 mm 时的厚度增加了 30%。

测得内浇口深入结晶器内不同深度下的铸锭沿径向分布的洛氏硬度如图 3 所示。

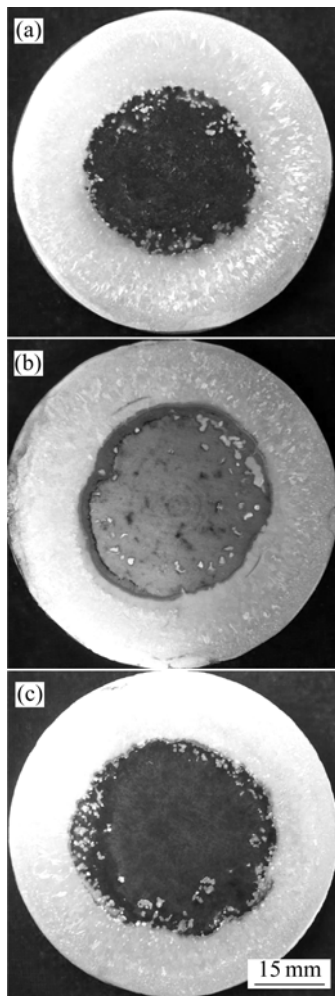


图 2 内浇管深入结晶器不同位置的径向宏观截面组织
Fig.2 Macrostructures of cross sections of ingots with different depths: (a) $H=0$ mm; (b) $H=10$ mm; (c) $H=15$ mm

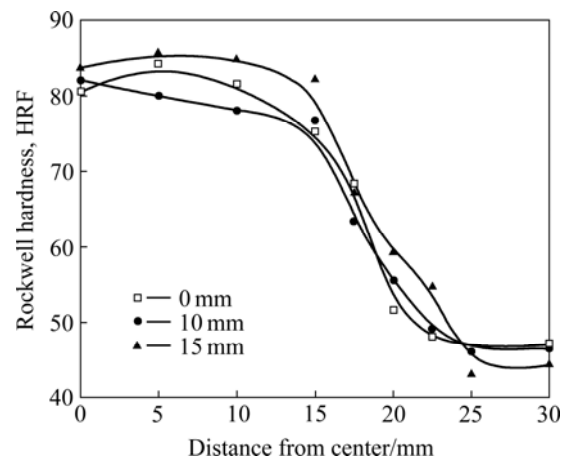


图 3 内浇管深入结晶器不同位置的铸锭沿径向的硬度分布

Fig.3 Hardness distributions along radial direction of ingots with different depths

由图 2 可以看出,随着深度的不断增大,内层合金的影响范围不断扩大。这是由于随着深度加大,内熔体的出水口与液面高度愈大,导致液压愈大,内熔体流出内浇口的速率愈大,从而单位时间内的流量愈多。同时,深度愈大,内浇口越靠近已形成的凝固液穴,在高温和高速的作用下,高速内熔体触底反弹、回旋、对流越激烈,已凝固液穴底部被重熔的范围越大,从而内熔体合金原子扩散的范围越大。内浇管深入结晶器不同位置的铸锭径向洛氏硬度分布如图 3 所示。由图 3 可看出,当 $H=0$ mm(即与外熔体浇口平行)时,洛氏硬度始剧降点位置为半径 10 mm 处;当 $H=10$ mm 时,洛氏硬度始剧降点位置为半径 15 mm 处;当 $H=15$ mm 时,洛氏硬度始剧降点位置为半径 17 mm 处。据此也可看出,随着 H 加大,洛氏硬度始剧降点沿径向逐渐外移, H 为 15 mm 时比 0 mm 时外移了 7 mm。因此,随着 H 加大,内熔体影响范围逐渐扩大,内层合金的宽度逐渐加大,内层合金的洛氏硬度始降点逐渐沿径向外移。

2.2 铸锭横截面的径向微观分析

把洛氏硬度测试后的试样,在压痕点附近进行 EDS 成分测试,其 Zn 元素成分分布曲线如图 4 所示。由图 4 看出,在铸锭的内层和外层, Zn 元素的含量都比较均等,内层的 Zn 含量接近 7075 合金的含量,外层的 Zn 含量接近 6009 合金的 Zn 含量水平;而在过渡区域, Zn 含量却急剧变化,出现约 10 mm 的梯度下降过渡区,这样, Zn 元素在 7075 合金的含量通过 10 mm 左右的区域后下降过渡到与在 6009 合金中的含量相同,铸锭凝固时不会产生因热应力引起的内裂、

应力集中等缺陷, 为后续的塑性变形提供优良的应力过渡条件。

由此可知, 每条 Zn 元素含量曲线都有一个始剧降点。当 $H=0$ mm 时, 始剧降点位于半径 12 mm 左右处; 当 $H=10$ mm 时, 始剧降点位于半径 16 mm 左右处; 当 $H=15$ mm 时, 始剧降点位于半径 17.5 mm 处。随着内浇口位置的下移, Zn 含量的始剧降点逐渐沿半径方向外移, 当 $H=15$ mm 时, 始剧降点比 $H=0$ mm 时的外移了 5.5 mm。

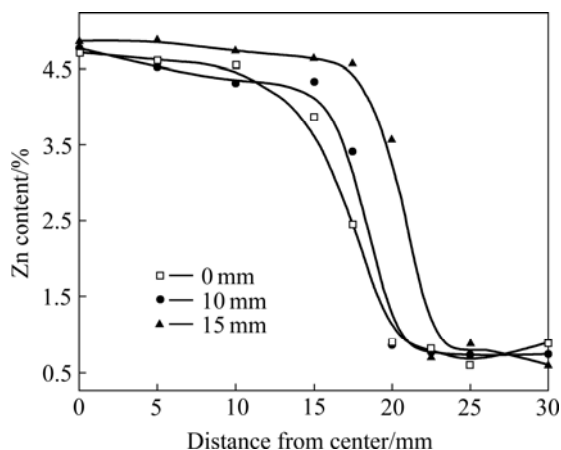


图 4 内浇管深入结晶器不同位置的铸锭沿径向 Zn 元素成分分布曲线

Fig.4 Composition distribution curves of Zn element along radial direction of ingots with different depths

图 3 中不同深度的宏观洛氏硬度在半径 $R=10$ mm 左右处有明显的区别, 因此, 就以 $R=10$ mm 处的二次枝晶间距为切入点, 研究深度对铸锭内层合金凝固组织的影响。在不同深度的铸锭横截面 $R=10$ mm 点处进行 SEM 分析, 其结果如图 5 所示。根据定量金相的截线法分析 $R=10$ mm 处的二次枝晶间距, 当 $H=0$ mm 时, 平均二次枝晶间距为 $14.5 \mu\text{m}$; 当 $H=10$ mm 时, 平均二次枝晶间距为 $11.3 \mu\text{m}$; 当 $H=15$ mm 时, 平均二次枝晶间距为 $9.6 \mu\text{m}$, 比 $H=0$ mm 时的间距小 35%, 表明当 $H=15$ mm 时, 在半径为 10 mm 处的冷却速度比 H 为 0 mm 和 10 mm 时的要快。同时, 随着 H 的增大, $R=10$ mm 处的晶粒组织更加细小、均匀。由此可知, 随着 H 的增大, 铸锭横截面上 $R=10$ mm 处的二次枝晶间距逐渐减小, 组织更加均匀、细小。

3 讨论

3.1 DSPCC 工艺的凝固液穴特点

由半连续铸造凝固原理可知^[13]: 双流浇注半连续

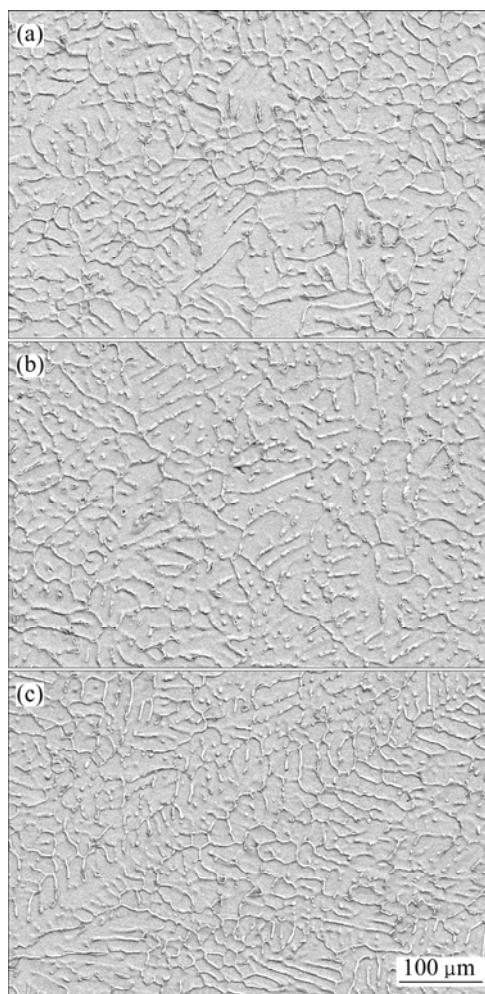


图 5 内浇管深入结晶器不同位置铸锭横截面半径为 10 mm 处的 SEM 像

Fig.5 SEM images of ingots with different depths on radius of 10 mm: (a) $H=0$ mm; (b) $H=10$ mm; (c) $H=15$ mm

铸造过程中, 在结晶器区域存在两股金属熔体, 外熔体与结晶器冷却壁接触, 凝固成一定厚度的凝固壳, 并形成一弯月面状凝固液穴。同时, 内熔体受自身重力与液压力作用, 从内浇口以一定速度注入结晶器芯部。由于内浇口位于凝固液穴最底端上沿的某个位置, 当高温、高速的内熔体与凝固液穴底端附近的低温、半固态熔体相遇后, 发生对流传质和热交换, 二次加热凝固液穴底端附近的熔体, 而邻近的已凝固合金也受热, 发生部分重熔, 致使原凝固液穴形状扩大、下移, 形成一个新月面状液穴(见图 6)。在新形成液穴的弯月面上沿处, 内外熔体发生对流、扩散和热交换, 形成铸锭的内外层合金冶金结合过渡区域。在自身重力与牵引力作用下, 已部分凝固的铸锭被牵引出结晶器, 受到二次直接冷却水作用, 未凝固的芯部内熔体迅速发生凝固, 形成内层合金、过渡层合金和外层合

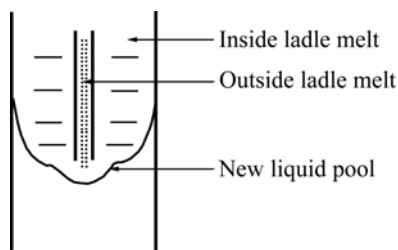


图6 DSPCC工艺的凝固液穴

Fig.6 Liquid pool of DSPCC technique

金的梯度复合铸锭。

3.2 内浇口位置对内熔体形成液穴的影响

根据金属热态成形传输原理^[14]，管道流体从宽口径进入窄口径时，存在一个急变流段，外层金属熔体浇包和结晶器的连接处就是外层熔体的急变流段(见图1的原理示意图)。在急变流段，进入结晶器截面的流束将收缩直至最小截面，然后，逐渐扩大，充满整个结晶器截面。而内层金属熔体刚好相反，当内浇口位置处于结晶器最上沿时，内层金属熔体从窄口径的内浇管进入宽口径的结晶器，由于惯性作用，流束不能按照管道形状突然扩大，而是逐渐地在流动中扩大。同时，亦受外层熔体急变流段挤压作用的约束，内熔体向外扩散能力被大大减小，在一定流程内，内熔体保持着原有细小形状以层流方式流动，直至外层熔体进入逐渐扩大区并减弱了对内熔体的约束后，内熔体才向结晶器径向扩大，而此时径向速率已被减弱，也很靠近铸锭凝固界面，温度下降，致使其扩散能力减弱，可扩散影响范围不大。当内浇口下移入结晶器内的位置将要或已超过外熔体的急变流段时，此时因内熔体因液压力增大，其流速增大，在不受外熔体挤压作用情况下，径向速率大大提高，虽然比较接近液穴底部，但由于高温、高速作用，内熔体扩散能力大大增强，可扩散影响范围增大。因此，随着 H 增大，内熔体形成液穴的宽度逐渐加宽。

另外，根据凝固原理^[15]，凝固速度与铸造组织的晶粒度与二次枝晶间距密切相关：随着凝固速度的增加，晶粒越细小、越均匀，二次枝晶间距也越小。在一次间冷区，由于冷却速度不快，内熔体形成液穴只发生部分凝固，就迅速被引出结晶器进入二次水冷区。冷却强度突然增大，凝固速度大大增加，内熔体液穴中的熔体迅速凝固，此时凝固组织的晶粒尺寸与一次间冷却凝固组织的晶粒尺寸相比大大减小，二次枝晶间距亦大大缩小，组织更趋均匀。从图5所示的 $R=10\text{ mm}$ 处的二次枝晶间距就可看出，当 $H=0\text{ mm}$ 时，

$R=10\text{ mm}$ 处的组织由于在一次间冷却区时，已经完全或大部分凝固，此处组织的二次枝晶间距比较大；而当 $H=15\text{ mm}$ 时， $R=10\text{ mm}$ 处的二次枝晶间距比 $H=0\text{ mm}$ 时的小35%，由于此处组织在一次间冷区时，没有开始凝固或小部分凝固，在进入二次直水冷区后，凝固速度大大增大，凝固瞬间完成，获得的组织晶粒尺寸十分均匀、细小，二次枝晶间距大大缩小。从这可看出，在结晶器内的一次间冷区， $H=0\text{ mm}$ 、 $R=10\text{ mm}$ 处的内熔体已大部分或完全凝固；而 $H=15\text{ mm}$ 、 $R=10\text{ mm}$ 处的内熔体未发生凝固，说明 $H=15\text{ mm}$ 时内熔体形成的液穴宽度比 $H=0\text{ mm}$ 时的宽。因此，随着 H 的增大，内熔体形成的液穴宽度逐渐变大。

4 结论

1) 随着内熔体浇口探入结晶器深度的加大，宏观上，铸锭横截面的内层合金组织宽度逐渐加大，洛氏硬度始降点逐渐沿径向外移；微观上，铸锭横截面的Zn含量始降点也逐渐沿径向外移，半径 10 mm 处的晶粒尺寸趋于均匀、细小，二次枝晶间距逐渐缩小。

2) 由于内熔体浇管的嵌入，DSPCC工艺的凝固液穴与常规DC工艺的凝固液穴不同，在凝固液穴中心存在一个由内熔体形成的液穴，影响着内熔体的扩散范围；随着内熔体浇口位置的下移，内熔体形成液穴的宽度逐渐变大。

REFERENCES

- [1] KIEBACK B, NEUBRAND A, RIEDEL H. Processing techniques for functionally graded materials[J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, A362(1/2): 81-105.
- [2] WOJCIECHOWSKI S. New trends in the development of mechanical engineering materials[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 106(1/3): 230-235.
- [3] 李耀天. 梯度功能材料研究与应用[J]. *金属功能材料*, 2000, 7(4): 15-23.
LI Yao-tian. Study on functional graded material and its application[J]. *Metallic Functional Materials*, 2000, 7(4): 15-23.
- [4] 庞建超, 高福宝, 曹晓明. 功能梯度材料的发展和制备方法的研究[J]. *金属制品*, 2005, 31(4): 4-9.
PANG Jian-chao, GAO Fu-bao, CAO Xiao-ming. Study on development and fabrication of functionally gradient materials[J]. *Steel Wire Products*, 2005, 31(4): 4-9.
- [5] BENDYK J C. Novelis Fusion™ process: Breakthrough in the simultaneous DC casting of multiple aluminum alloy layers for rolling ingot[J]. *Light Metal Age*, 2006(8): 48-50.

- [6] 张卫文, 朱仓山, 魏兴钊, 蒙继龙, 袁叔贵, 郁 鹤. 生产梯度材料的双流浇注连续铸造方法[J]. 科学通报, 1998, 34(11): 1223-1226.
ZHANG Wei-wen, ZHU Cang-shan, WEI Xing-zhao, MENG Ji-long, YUAN Shu-gui, YU Ge. The double-stream-pouring technique for production gradient materials by continuous casting[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 34(11): 911-914.
- [7] 吴春京, 于治民, 谢建新, 吴 渊. 充芯连铸法制备铜包铝双金属复合材料的研究[J]. 铸造, 2004, 53(6): 432-434.
WU Chun-jing, YU Zhi-min, XIE Jian-xin, WU Yuan. Fabrication of bimetal composites of copper cladding aluminum with process of continuous core-filling casting[J]. Foundry, 2004, 53(6): 432-434.
- [8] 张卫文, 郁 鹤, 李元元, 邱 城. 采用连续铸造方式制备的梯度材料[J]. 材料导报, 2000, 14(3): 24-26.
ZHANG Wei-wen, YU Ge, LI Yuan-yuan, QIU Cheng. Gradient material produced by continuous casting[J]. Materials Review, 2000, 14(3): 24-26.
- [9] LI Yuan-yuan, ZHANG Wei-wen, FEI Jin, ZHANG Da-tong, CHEN Wei-ping. Heat treatment of 2024/3003 gradient composite and diffusion behavior of the alloying elements[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, A391(1/2): 124-130.
- [10] 张卫文, 许 峰, 费 劲, 李元元. 梯度复合铝合金的缝隙腐蚀研究[J]. 材料保护, 2006, 39(5): 1-3.
ZHANG Wei-wen, XU Feng, FEI Jin, LI Yuan-yuan. Crevice corrosion behavior of 2024/3003 aluminum alloy plate at the gradient bonded planes[J]. Journal of Materials Protection, 2006, 39(5): 1-3.
- [11] LI Yuan-yuan, FEI Jin, CHEN Wei-ping, ZHANG Wei-wen, SHAO Ming. Preparation of 2024/3003 gradient materials by semi-continuous casting using double-stream-pouring technique[J]. Journal of Central South University of Technology, 2002, 9(4): 229-234.
- [12] ZHANG Wei-wen, LUO Zong-qiang, XIA Wei, LI Yuan-yuan. Effect of plastic deformation on microstructure and hardness of AlSi/Al gradient composites[J]. Transactions of Nonferrous Metal Society of China, 2007, 17(6): 1186-1193.
- [13] 蔡开科, 程士富. 连续铸钢原理与工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994: 9-10.
CAI Kai-ke, CHENG Shi-fu. Principle and process of steel continuous casting[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994: 9-10.
- [14] 林柏年. 金属热态成形传输原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000: 102-105.
LIN Bai-nian. Transmission principle of metal hot forming[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2000: 102-105.
- [15] 胡汉起. 金属凝固原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 146.
HU Han-qi. Metal solidification principle[M]. Beijing: China Machine Press, 2000: 146.

(编辑 李艳红)