

文章编号: 1004-0609(2004)03-0359-07

工艺参数对气膜软接触连铸坯组织性能的影响^①

程常桂, 邓 康, 任忠鸣, 罗鸿博, 雷作胜

(上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200072)

摘 要: 研究了气体种类、气体流量、拉坯速度等工艺参数对气膜软接触连铸坯组织性能的影响。结果表明: 随气体流量的降低、拉坯速度的增大, 铸坯的表面质量变差, 宏观组织中的等轴晶比例降低, 铸坯的皮下反偏析层厚度增大; 气膜软接触连铸坯的力学性能明显高于传统 DC 连铸坯。

关键词: 气膜; 软接触; 连铸; 宏观组织; 力学性能

中图分类号: TF 777

文献标识码: A

Effects of technology parameters on microstructure and tensile properties of slab produced with gas film soft contact casting technology

CHENG Chang-gui, DENG Kang, REN Zhong-ming, LUO Hong-bo, LEI Zuor-sheng

(School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The effects of technology parameters including the gas kind, the gas flow rate and the casting speed on microstructures and tensile properties of slab were studied. The results show that the slab surface becomes worse and the equiaxed dendrite rate reduces with the gas flow rate decreasing and the casting speed increasing, and the surface segregation thickness increases on the same condition. Furthermore, the slab produced with the gas film soft contact technology excels the slab produced with the conventional DC casting technology in the tensile properties.

Key words: gas film; soft contact; continuous casting; macrostructure; mechanical properties

目前, 铝合金连铸技术根据结晶器的结构特点分类主要有: 热顶连铸技术^[1, 2]、低头组合式浇铸技术^[3, 4]、电磁无模连铸技术^[5, 6]、电磁软接触连铸技术^[7-10]、气膜软接触连铸技术等^[11-14], 这些技术各有其优缺点。气膜软接触连铸技术与其他技术相比, 其凝固过程的主要特点是: 连铸坯与结晶器内壁在气膜的软接触作用下, 冷却效果低且均匀, 拉坯阻力小, 可以防止拉裂、拉漏; 结晶器是结合热顶技术和软接触概念的一种新型设计, 有效冷却长度短; 铸坯的一冷区和二冷区部分重合, 避免连铸中铸坯表面出现“回热”现象。因此, 气膜软接触

连铸技术能够生产高质量的铸坯, 且成本低、操作简单, 特别是对于建筑用的普通挤压用铝合金铸坯而言, 具有较好的性价比。

连铸生产中, 铸坯质量的好坏直接决定着最终成品质量、金属收得率及生产成本的高低, 而铸坯质量的好坏, 取决于铸坯表面质量, 如铸坯表面平整度、光洁度; 取决于铸坯的内部凝固组织, 如晶粒结构与尺寸、化学成分的均匀程度、组织致密程度等。生产过程中, 影响铸坯组织性能的工艺参数主要有: 气体流量、拉坯速度、气体种类等, 在合理控制工艺参数条件下, 气膜软接触连铸坯能够满

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59974017; 50174037)

收稿日期: 2003-06-30; 修订日期: 2003-11-20

作者简介: 程常桂(1970-), 男, 讲师, 博士。

通讯作者: 邓 康, 教授, 博士; 电话: 021-56331102; E-mail: dengk2000@163.com

足生产过程中对铸坯质量的要求。

1 实验

实验设备如图 1 所示。金属液经中间包、浸入式水口进入结晶器内。气体通过热顶与水箱、石墨套之间的环形气缝进入结晶器内,在结晶器内壁与铸坯之间形成气膜。结晶器尺寸见表 1。

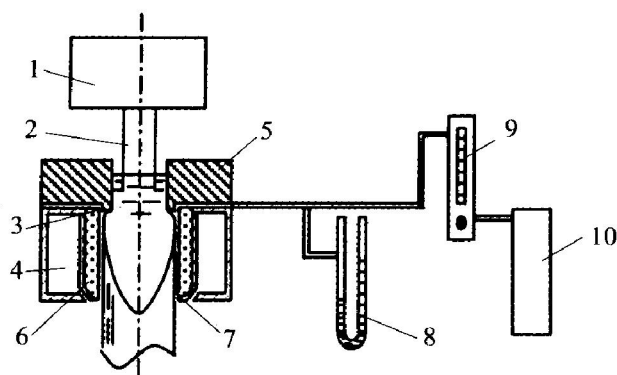


图 1 气膜软接触连铸设备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gas film soft-contacted continuous casting equipment

- 1—Tundish; 2—Submerged entry nozzle;
3—Annular gas slot; 4—Mold;
5—Hot top; 6—Graphite liner;
7—Gas film; 8—Pressure gauge;
9—Flowmeter; 10—High pressure gas flask

表 1 气膜软接触连铸结晶器的尺寸

Table 1 Dimensions of gas film soft-contacted continuous casting mould (mm)

Hot top height	Hot top inner diameter	Graphite liner height	Graphite liner inner diameter	Annular gas slot width
120	80	50	100	0.45

为保证气体流量、压力稳定,采用高压瓶装的氩气和氮气来进行实验,研究不同气体种类对连铸坯组织性能的影响,气体压力和流量分别由 U 型管压力计和玻璃转子流量计测定。实验用合金为:1080 工业纯铝、2024 铝合金。

实验过程中,考虑到 2024 铝合金的铸造难度,首先采用工业纯铝进行实验,以铸坯表面质量的好坏作为实验成功与否的判断标准,研究气膜软接触连铸工艺的合理工艺参数。浇铸前,为避免金属液进入环形气缝内,保证连铸的稳定性,先开通气体,在气缝内形成一定的背压后再开浇。由于热顶的内径比石墨套内径小,通过适当措施使铸坯的初

始凝固点在热顶下部。在工业纯铝气膜软接触连铸实验获得成功的基础上,再进行 2024 铝合金的实验,研究各种工艺参数对铝合金组织性能的影响。

由于工艺参数的影响,铸坯径向和横向上的晶粒形状、大小有可能不同,进行宏观组织分析和电镜扫描分析时,遵循不引起组织变形和变化的原则取样。为进行力学性能测试,对不同工艺条件下的铸坯力学性能进行比较,取样时确保同一试样长度范围内的工艺参数相同。

2 结果与分析

2.1 气膜连续性对铸坯表面质量的影响

气体流量、拉坯速度、环形气缝均匀度等工艺参数对铸坯表面质量的影响可归结到气膜的连续性对铸坯表面质量的影响。结晶器内气膜连续,铸坯表面质量就光滑;气膜不连续,铸坯表面就存在冷隔、裂纹、偏析瘤等缺陷。气体流量低、拉坯速度大、环形气缝均匀度差,则气膜的连续性就差。大量实验结果表明,对于工业纯铝和 2024 铝合金而言,影响铸坯表面质量的气体流量存在临界值^[15],当气体流量高于临界值时,气膜是连续的,铸坯表面质量光滑;低于临界值时,气膜不连续,铸坯表面质量差。

气膜在周向方向不连续时,典型的工业纯铝铸坯表面特性如图 2 所示。

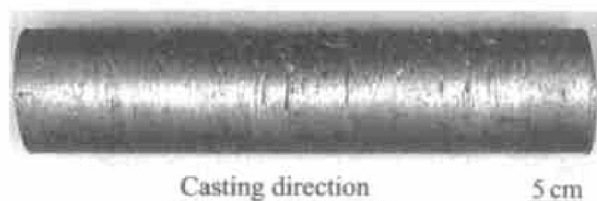


图 2 气膜不连续时的气膜软接触连铸铝坯

Fig. 2 Aluminum billet produced by gas film soft-contacted continuous casting process in discontinuous gas film

图 2 中的工艺参数为:冷却水压力为 0.1 MPa,热顶内金属液位高度为 10 cm,浇注温度为 690 °C,气体流量约为 0.15 m³/h。由图可见,铸坯上侧表面明显存在冷隔缺陷,铸坯下侧表面非常光滑。产生这种实验现象的原因是:连铸开浇时,气体流量过低,或者安装不当,气缝宽度在周向上不均匀,一侧宽度大,另一侧宽度小,不能满足连铸稳定进行的条件,导致部分气缝被堵塞,在被金属

液堵塞的气缝处, 气体未能起到软接触作用, 因此铸坯表面质量较差。这与实验完后拆开结晶器观测到的气缝堵塞结果是完全一致的。

气膜连续时, 工业纯铝和 2024 铝合金铸坯的表面特性如图 3 所示。

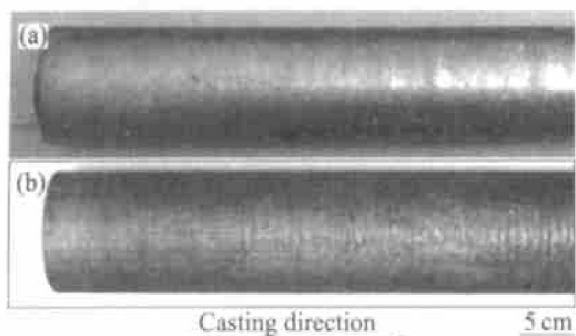


图 3 气膜软接触连铸铝坯和 2024 铝合金铸坯

Fig. 3 Aluminum and 2024 aluminum alloy billets produced by gas film soft-contacted continuous casting process

(a) —Aluminum billet;
(b) —2024 aluminum alloy billet

由图 3 可知, 工艺参数合适、气膜连续时, 完全消除了传统 DC 连铸工艺中的冷隔、裂纹等缺陷, 铸坯表面质量非常光滑。

气膜连续性对铸坯表面质量的影响主要是由不同条件铸坯的凝固特点所决定的。气膜不连续时, 铸坯局部受到的冷却作用过强, 铸坯表面可能产生“回热”现象, 初始凝固坯壳因冷凝收缩向液相穴内偏移, 这些都利于冷隔、偏析瘤等缺陷的产生, 因此铸坯表面质量差。气膜连续且厚度较大时, 铸坯受到均匀的冷却作用, 冷却强度小, 铸坯表面没有“回热”, 铸坯质量高。

在生产过程中, 为提高生产效率, 总是要尽可能增大拉坯速度。随着拉坯速度的增加, 结晶器环形气缝处气体的背压降低, 气膜的刚度、连续性也随之降低, 对铸坯质量不利。因此, 在提高拉坯速度的同时, 应相应增大气体流量, 以满足气膜连铸的稳定性。同时, 为保证结晶器周向供气均匀, 必须改善设备的进气方式, 选取合理的工艺参数, 避免参数波动对工艺过程的影响。

2.2 气体种类对铸坯表面质量的影响

实验中采用的气体为氩气和氮气, 以研究不同气体对铸坯质量的影响。在使用氩气获得比较成功的基础上, 又采用氮气进行气膜软接触连铸实验。结果表明, 工艺参数之间的规律与气体种类无关,

对于铝及铝合金而言, 采用氩气及氮气的冶金效果基本相同。

2.3 气体流量对铸坯宏观组织的影响

气体流量对气膜软接触效果的影响非常显著。在合适工艺参数条件下, 结晶器内壁与铸坯处于软接触状态, 铸坯内外质量好。气体流量低时, 气体不能够充分起到软接触作用, 铸坯受到的传热及润滑性能变差, 铸坯质量差。在其他工艺参数相同, 气体流量不同的条件下, 2024 铝合金铸坯的宏观组织结构如图 4 所示。图 4 中, 相同的工艺参数为: 气体为氩气, 浇注温度均为 $690\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冷却水压力均为 0.2 MPa , 拉坯速度均为 68 mm/min , 热顶内金属液位为 10 cm 。由图 4(a) 可知: 气体流量为 $0.383\text{ m}^3/\text{h}$ 时, 2024 铝合金铸坯断面全为细小的等轴晶结构, 晶粒平均面积约为 0.8 mm^2 , 其宏观晶粒度在 2~3 级之间; 气体流量为 $0.213\text{ m}^3/\text{h}$ 时, 试样大部分区域为粗大的柱状晶, 一小部分区域为细小等轴晶(图 4(b)); 气体流量为 $0.128\text{ m}^3/\text{h}$ 时, 试样的宏观组织全为柱状晶, 没有等轴晶(图 4(c))。

当气体流量极低时, 铸坯与结晶器内壁直接接触, 气膜软接触作用不明显, 铸坯的冷却效果与传统的 DC 连铸工艺差别不大, 称此状态为类似 DC 连铸状态。气体流量为 $0.102\text{ m}^3/\text{h}$ 条件下的状态即为类似 DC 连铸状态。由图 4(c) 可知, 铸坯的宏观组织为典型的 3 层晶粒结构, 等轴晶的比率很小, 并可观察到明显的裂纹。

由以上实验结果可知: 在气膜软接触连铸条件下, 随着气体流量的降低, 铸坯的等轴晶比例逐渐降低。这是由于气体流量低时, 气膜的连续性、稳定性、刚性较差, 结晶器内冷却强度加强, 有利于柱状晶的生长。同时, 试样中出现一部分为柱状晶, 另一部分为细小等轴晶, 也表明气体流量较低时, 气膜在周向上分布不均匀, 结晶器内一侧冷却强度过大, 另一侧冷却强度合适。

2.4 拉坯速度对铸坯宏观组织的影响

气体为氩气, 浇注温度均为 $690\text{ }^{\circ}\text{C}$, 气体流量为 $0.255\text{ m}^3/\text{h}$, 冷却水压力为 0.2 MPa , 热顶内金属液位高度为 10 cm , 拉坯速度分别为 $75, 89\text{ mm/min}$ 的 2024 铝合金铸坯宏观组织如图 5 所示。由图 5 可知, 在其他工艺参数一定的条件下, 增大拉坯速度, 随铸坯逸出结晶器外的气体量明显增加, 表现在气膜内的压力分布上, 就是气膜内的压力、刚度降低, 铸坯局部受到的冷却效果增强, 因此

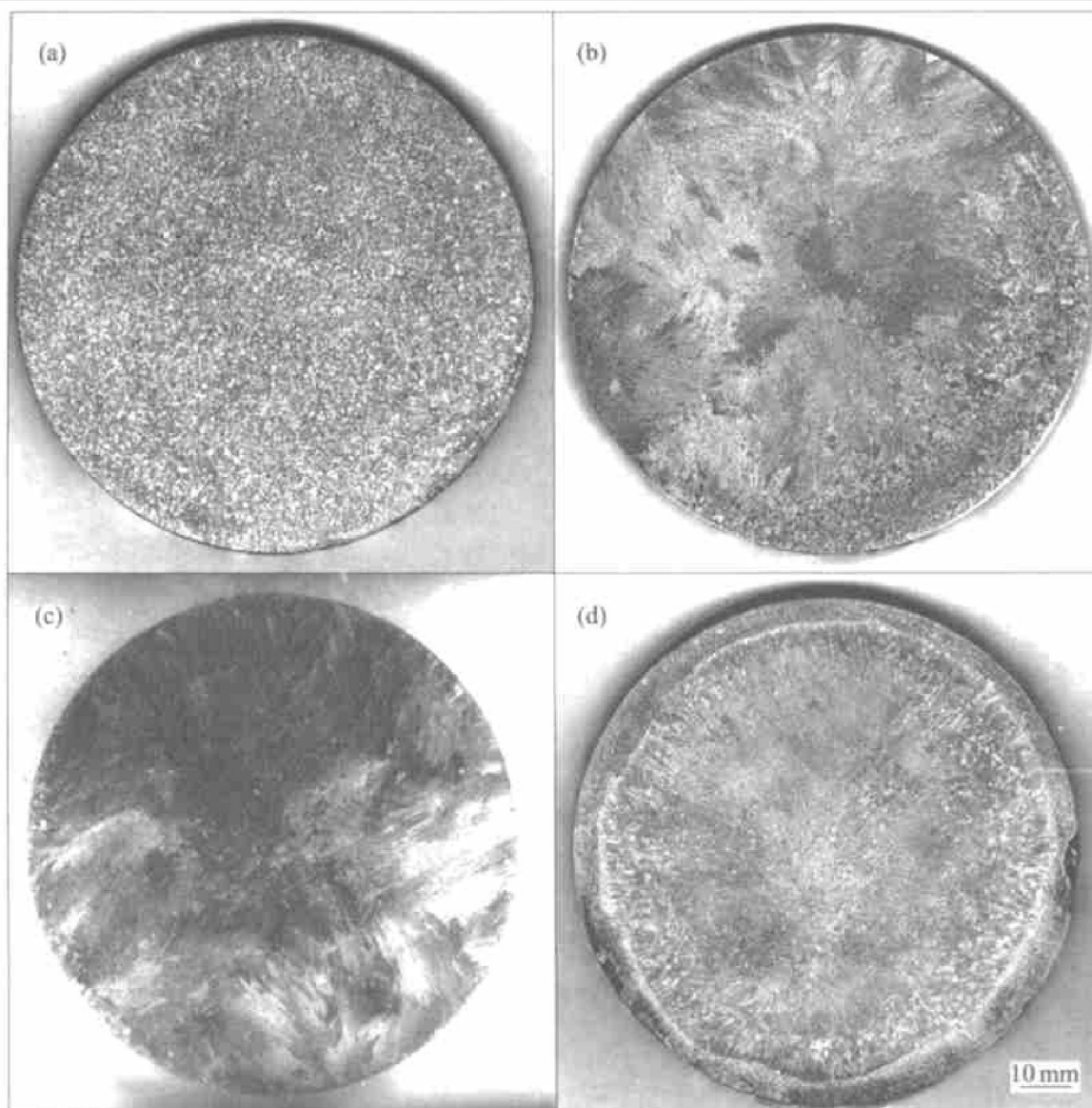


图 4 不同气体流量下 2024 铝合金铸坯的宏观组织

Fig. 4 Macrostructures of 2024 aluminum alloys casted at different gas flow rates

(a) $-0.383 \text{ m}^3/\text{h}$, 68 mm/min ; (b) $-0.213 \text{ m}^3/\text{h}$, 68 mm/min ;
(c) $-0.128 \text{ m}^3/\text{h}$, 68 mm/min ; (d) $-0.102 \text{ m}^3/\text{h}$, 68 mm/min

产生一定比例的柱状晶组织。

2.5 气体流量对铸坯皮下反偏析的影响

铸坯皮下反偏析与其在结晶器内的冷却效果密切相关, 气体流量不同, 铸坯皮下反偏析层的厚度明显不同。拉坯速度为 68 mm/min , 冷却水压力为 0.2 MPa , 金属液位高度为 10 cm , 氩气流量不同条件下, 2024 铝合金铜元素的扫描电镜照片如图 6 所示。

由图 6 并结合等离子发射光谱分析结果可知: 气体流量为 $0.238 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 皮下偏析层厚度约为 $120 \mu\text{m}$; 气体流量为 $0.136 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 皮下偏析层厚度约为 $240 \mu\text{m}$; 气体流量为 $0.043 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 皮下偏析层厚度大于 $500 \mu\text{m}$ 。其原因主要是由于随

着气体流量的降低, 气膜的连续性、刚度也随之降低, 气体所起的软接触作用会降低, 铸坯在结晶器内部的冷却效果加强, 铸坯表面存在“回热”现象, “回热”程度越大, 铸坯皮下反偏析层厚度也就越大。

2.6 拉坯速度对铸坯皮下反偏析的影响

拉坯速度为 92.5 mm/min , 浇注温度为 690°C , 冷却水压力为 0.2 MPa , 氩气流量为 $0.238 \text{ m}^3/\text{h}$ 条件下, 2024 铝合金铜元素的扫描电镜照片如图 7 所示。由图 7 可知, 皮下反偏析层的厚度约为 $450 \mu\text{m}$ 。图 7 中试样的工艺参数与图 6(a) 的工艺参数相比, 两者的拉坯速度不同, 前者为 92.5 mm/min , 后者为 68 mm/min , 其他工艺参数相同。这表明: 随拉坯速度的增大, 2024 铝合金

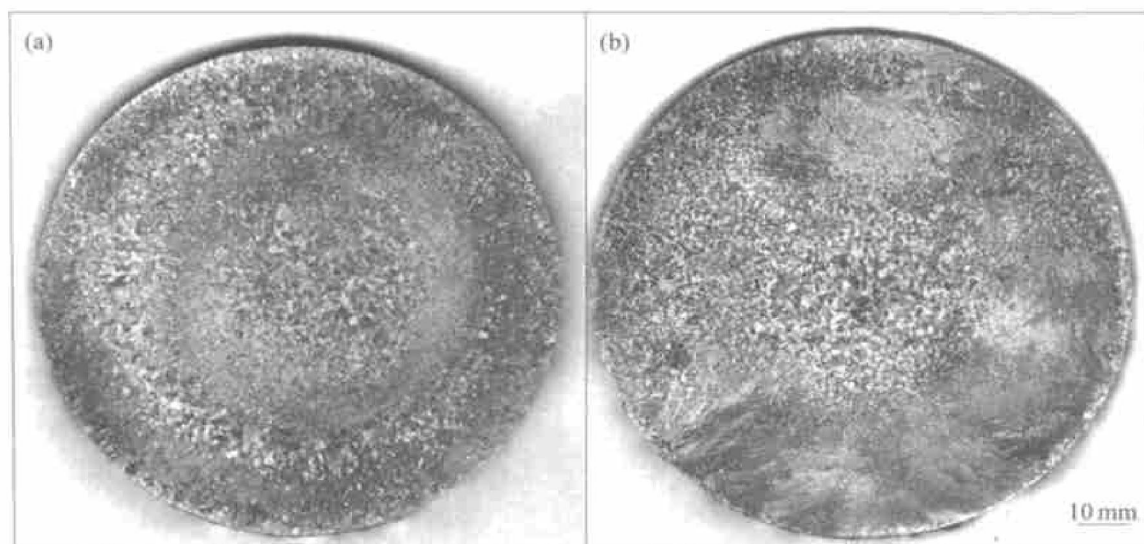


图 5 不同拉坯速度下 2024 铝合金铸坯的宏观组织

Fig. 5 Macrostructures of 2024 aluminum alloys at different casting speeds

(a) $-0.255 \text{ m}^3/\text{h}$, 75 mm/min; (b) $-0.255 \text{ m}^3/\text{h}$, 89 mm/min

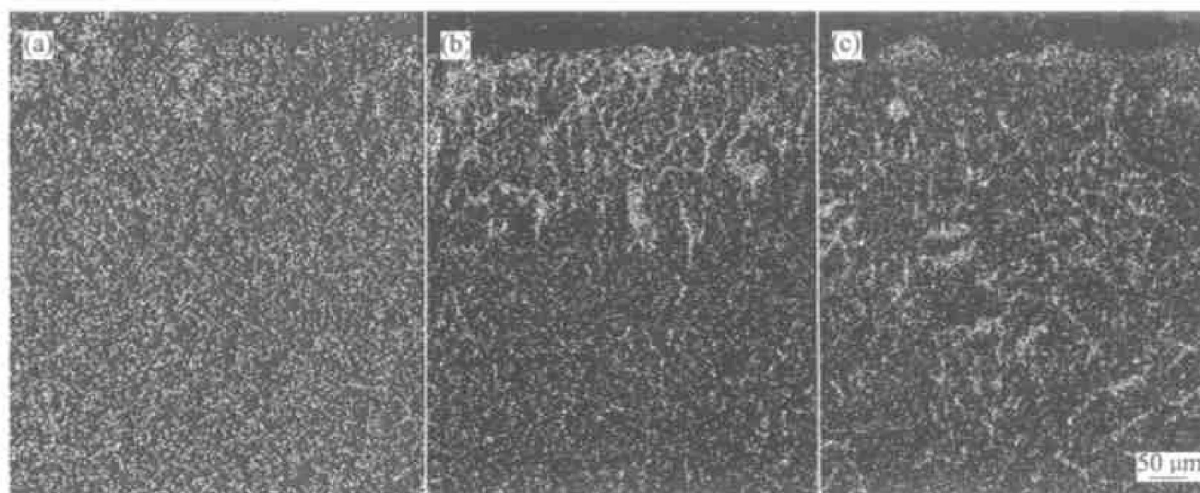


图 6 不同气体流量时 2024 铝合金铜元素扫描电镜照片

Fig. 6 SEM photos of Cu in 2024 aluminum alloy casted at different gas flow rates

(a) $-0.238 \text{ m}^3/\text{h}$; (b) $-0.136 \text{ m}^3/\text{h}$; (c) $-0.043 \text{ m}^3/\text{h}$

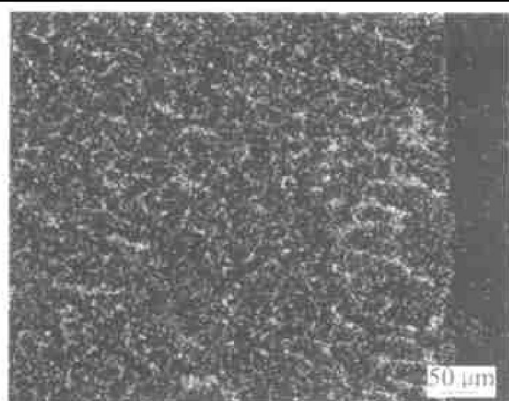


图 7 拉坯速度为 92.5 mm/min 时 2024 铝合金铜元素扫描电镜照片

Fig. 7 SEM photo of Cu in 2024 aluminum alloy at casting speed of 92.5 mm/min

皮下反偏析厚度也随之增大。其原因主要是由于拉坯速度增大, 气膜厚度及连续性均降低, 气体所起的软接触作用会减弱, 铸坯在结晶器内部的冷却效果加强, 因此, 皮下反偏析层厚度增大。传统 DC 连铸工艺中, 拉速增大, 有利于减小通过结晶器传出的热量, 因此偏析厚度小, 在气膜软接触连铸条件下, 由于结晶器内存在气膜, 因此拉坯速度的影响效果相反。

根据气体流量、拉坯速度影响铸坯皮下反偏析的规律, 在实际生产过程中, 为提高生产效率, 需要提高拉坯速度, 同时应相应地提高气体流量, 以减小反偏析程度。这一结论与由铸坯宏观组织分析得出的结论是一致的。

2.7 工艺参数对铸坯力学性能的影响

铸坯的组织状态决定铸坯的力学性能。气膜软接触连铸坯与传统 DC 连铸坯相比,铸坯整个横断面为细小均匀的等轴晶,而传统工艺生产的铸坯为典型的 3 层晶粒结构,两者晶粒结构不同,表现在力学性能上也存在差别。

工艺参数不同,铸坯的宏观组织结构不同,分别对宏观组织全为细小等轴晶的铸坯取样为 A,宏观组织一部分为柱状晶、一部分为等轴晶的铸坯取样为 B,宏观组织为典型的 3 层晶粒结构的铸坯取样为 C。A 铸坯对应的拉伸试样编号为 1, 2, 3, 试样中心位于铸坯横断面中心线上,其中,2 试样中心与铸坯中心重合,三者中心相距 25 mm; B 铸坯对应的试样编号为 4, 5, 6; C 铸坯对应的试样编号则为 7, 8, 9。其中 1, 2, 3 号试样横断面均为细小的等轴晶; 4 号试样宏观组织为等轴晶,而 5, 6 号试样则为柱状晶; 7, 9 号试样为柱状晶,8 号试样为粗大的等轴晶。力学性能检测结果如表 2 所示。

表 2 2024 铝合金连铸坯的力学性能

Table 2 Mechanical properties of 2024 aluminum alloy billets

Sample No.	Tensile strength/MPa	Average tensile strength/MPa	Elongation/%	Average elongation/%
1	256.10		6.130	
2	254.76	255.73	5.958	6.037
3	256.34		6.025	
4	282.83		6.55	
5	239.63	250.83	4.184	5.189
6	230.03		4.834	
7	242.37		4.289	
8	231.38	238.69	4.261	4.295
9	242.32		4.336	

由表 2 可知:在气膜连铸稳定工艺条件下拉出的 A 铸坯的抗拉强度、延伸率均比类似 DC 连铸工艺条件下的 C 铸坯要好。同时气膜连铸稳定进行条件下的铸坯 A 试样的抗拉强度及延伸率在 3 个位置上比较均匀,而 B, C 铸坯的力学性能在 3 个取样位置存在差别,这可能是由于 A 铸坯的宏观组织为均匀的细小等轴晶,而 B, C 铸坯的横断面上取样位置晶粒结构不同而造成的。

3 结论

1) 气膜连续性对铸坯质量有重要影响。工艺参数满足气膜连续时,铸坯表面质量高;反之,则铸坯质量较差。气膜软接触连铸条件下,氩气和氮气的冶金效果基本相同。

2) 气膜软接触连铸工艺中,气体流量、拉坯速度对铸坯的宏观组织有重要影响。当其他工艺参数一定时,随着气体流量的降低、拉坯速度的增大,铸坯宏观组织中的等轴晶比例降低,一定条件下甚至整个横断面上全为柱状晶;气体流量过低的时候,气膜不能起到软接触作用,此时铸坯的凝固条件近似为传统的 DC 连铸工艺,铸坯宏观组织为典型的 3 层晶粒结构。

3) 气膜软接触连铸条件下,其他工艺参数一定时,2024 铝合金的皮下反偏析层厚度随气体流量的增大、拉坯速度的降低而减小。工艺参数合理时,偏析层厚度可降低到 120 μm 左右,远小于传统 DC 连铸工艺下的 500~1 000 μm 。

4) 为满足提高生产率的要求,在增大拉坯速度的同时,应适量提高气体流量,以保证铸坯与结晶器内壁处于软接触状态,提高铸坯质量。

5) 铸坯的力学性能与铸坯的宏观组织密切相关。在气膜软接触连铸稳定进行的条件下,铸坯的抗拉强度及延伸率均比传统 DC 连铸坯高;同时在横截面上,前者的力学性能比较均匀,而后的均匀性较差。

REFERENCES

- [1] Lossack E. Practical experience with the use of hot top molds in DC casting of al-billets[A]. James R. Light Metals[C]. New York: Metall Soc of AIME, 1976. 413 - 424.
- [2] Ogle J R. Hot top integrally lubricated semi-continuous direct chill casting[A]. James R. Light Metals[C]. New York: Metall Soc of AIME, 1976. 539 - 546.
- [3] Wagstaff F E, Wagstaff R B, Bowles D, et al. An improved DC casting technology[A]. Das S K. Light Metals[C]. Denver, CO: Minerals Metals & Materials Soc (TMS), 1993. 709 - 714.
- [4] Wagstaff F E, Wagstaff R B, Bowles D, et al. Low-head composite(LHC), a new ingot casting technology[A]. Nilmani. Australian, Asian, Pacific Course and Conference on Aluminum Cast House Technology: Theory and Practice[C]. Melbourne, Aust: Minerals Metals

- & Materials Soc(TMS), 1993. 372 - 385.
- [5] Emle E F. Continuous casting of aluminum[J]. International Metals Reviews, 1976, 21(6): 75 - 115.
- [6] Baker C, Subramanian V. DC and continuous casting, aluminum transformation technology and applications[M]. OH: American Society for Metals, Metals Park, 1980. 335 - 388.
- [7] 任忠鸣, 董华峰, 邓 康, 等. 软接触结晶器电磁连铸中初始凝固的基础研究[J]. 金属学报, 1999, 35(8): 851 - 855.
- REN Zhong-ming, DONG Huafeng, DENG Kang, et al. Study of initial solidification in soft contact electromagnetic continuous casting[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1999, 35(8): 851 - 855.
- [8] 邓 康, 任忠鸣, 蒋国昌. 软接触电磁连铸的数值模拟和实验分析[J]. 金属学报, 1999, 35(10): 1112 - 1116.
- DENG Kang, REN Zhong-ming, JIANG Guochang. Numerical simulation and experiment analysis of electromagnetic continuous casting with soft-contacted mould[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1999, 35(10): 1112 - 1116.
- [9] Vives C, Forest B. Crem: a new casting process(part I): fundamental aspect[A]. Evens J. Light Metals[C]. Denver, CO: AIME Annual Meeting, 1987. 769 - 778.
- [10] Vives C, Forest B. Crem: a new casting process(part II): industrial aspect[A]. Evens J. Light Metals[C]. Denver, CO: AIME Annual Meeting, 1987. 779 - 784.
- [11] Ekenes M J, Peterson W S. Visual observations inside an AIRSLIPTM mold during casting[A]. Christian M. Light Metals[C]. Anaheim, CA: Minerals Metals & Materials Soc(TMS), 1990. 957 - 961.
- [12] Ekenes J M, Storey K W, Peterson W S, et al. Fiber optics—a new look at AIRSLIPTM casting[A]. Elwin L. Light Metals[C]. New Orleans, LA: Minerals Metals & Materials Soc(TMS), 1990. 933 - 943.
- [13] Schneider W, Grün G U. The new AIRSOL VEIL billet casting system improvements mathematical, modeling[A]. Nilmani M. The 4th Australasian Asian Pacific Conference on Aluminium Cast House Technology[C]. Sydney, Aust: Minerals, Metals & Materials Soc (TMS), 1995. 297 - 315.
- [14] Lorenz H, Schneider W. Improvements in plant operation of the AIRSOL VEILTM billet casting system[A]. Euel R C. Light Metals[C]. San Diego, CA: Minerals, Metals & Materials Soc(TMS), 1991. 889 - 893.
- [15] 程常桂, 任忠鸣, 邓 康, 等. 气膜软接触连铸技术的研究[J]. 特种铸造与有色合金, 2003, 23(2): 29 - 31.
- CHENG Chang-gui, REN Zhong-ming, DENG Kang, et al. Study on gas film soft-contacted continuous casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2003, 23(2): 29 - 31.

(编辑 陈爱华)