

5356 合金连铸关键技术研究

高世鹰¹ 陈 强¹ 柴挨俊² 郭有军²

(1. 内蒙金属材料研究所, 包头 014030; 2. 包头铝业有限公司, 包头 014060)

摘 要 连铸连轧方法制备 5356 合金主要分为前端的连铸和后端的轧制两个阶段。连铸时, 合金铸坯内部、表面的质量均对后续的轧制产生重要影响。研究了连铸阶段的关键工艺参数(浇注温度、拉坯速度)对 5356 合金铸坯内部、表面的影响, 并通过现场试验对比不同浇注温度(690、700 和 710 °C)和拉坯速度(7.0、7.3 和 7.5 m/min)条件下的铸坯状态。结果表明, 浇注温度和拉坯速度相互制约, 并对铸坯质量有重大影响。此外, 通过现场试验分析与理论结合, 掌握了连铸阶段得到高质量铸坯的关键工艺参数范围。

关键词 5356 合金; 浇注温度; 拉坯速度; 现场试验

中图分类号 TG146.21; TG249.5

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240202

Key Technology in Continuous Casting of 5356 Alloy

GAO Shiyong¹, CHEN Qiang¹, CHAI Aijun², GUO Youjun²

(1. Inner Mongolia Institute of Metal Materials, Baotou 014030; 2. Baotou Aluminum Co., Ltd., Baotou 014060)

Abstract: The production of 5356 alloy by continuous casting and rolling method mainly consists of front-end continuous casting and back-end rolling. During continuous casting, the internal and surface quality of billet has a significant impact on subsequent rolling process. The effects of key process parameters (pouring temperature, drawing speed) during continuous casting stage on interior and surface of 5356 alloy billets were investigated, and the billet states under different pouring temperatures (690, 700 and 710 °C) and drawing speeds (7.0, 7.3 and 7.5 m/min) were analyzed comparatively through experiments. The results indicate that pouring temperature and drawing speed are mutually constrained, significantly affecting the quality of billet. Finally, the key process parameter range for high-quality castings during the continuous casting stage was obtained through field experimental analysis and theoretical integration.

Key Words: 5356 Alloy, Pouring Temperature, Drawing Speed, Field Experiment

5356 合金具备良好的焊接性能和耐腐蚀性, 是用于军工武器装备、车辆、船舶、高铁及航天工业等多种领域铝合金构件的关键焊接材料。制备 5356 合金的主要生产工艺包括以下 3 种: 立式半连续铸造、连铸连轧和水平连铸连拉。刑清源^[1]使用电磁连铸制备 5356 合金, 并考察电源功率、拉坯速度等参数对 5356 合金性能的影响。本研究利用连铸连轧试制生产线, 针对 5356 合金连铸连轧制备过程中连铸环节关键工序开展工艺技术分析, 在连铸环节进行测试分析对比, 系统分析关键工艺数据, 提出控制优化措施, 总结工艺优化控制要点, 从而保证最终产品的优良品质。

1 5356 合金连铸技术难点

5356 合金主要成分为 Mg、Mn、Cr, 其因显著的断

裂韧度、较高的强度密度比、优异的耐腐蚀性和焊接性能而广泛应用于铝制结构件焊接。然而, 连铸高质量的 5356 铸坯以保证后续连轧顺利进行并且制备出指标合格的产品是一个挑战。

使用轮式铸造机(张紧轮在上、铸造轮在下), 其结构见图 1。铸造机主要部件为: 铸造轮、张紧轮和压紧轮, 铸造轮转动后通过钢带的摩擦力带动张紧轮的转动, 压紧轮压紧铸造轮上方的钢带使铝液在铸造轮结晶槽内得到良好的密封, 冷却水启动后, 冷却喷嘴对铸造轮及钢带的左、右、内、外 4 个方向进行冷却, 结晶槽内铝液逐渐由液态转变为固态, 在起坯器的作用下铸坯与结晶槽分离, 并通过传感器、自动剪、矫直机等设备后进入轧机开始轧制工序。

整条连铸连轧生产线产能由铸造工序决定, 该设备针对 5 系合金的产能为 1.1~1.2 t/h, 对应浇注速度为

收稿日期: 2024-05-13; 修订日期: 2024-09-10

基金项目: 内蒙古自治区科技计划资助项目(2023YFHH0125)

第一作者简介: 高世鹰, 男, 1983 年出生, 工程师, E-mail: gsysh@126.com

引用格式: 高世鹰, 陈强, 柴挨俊, 等. 5356 合金连铸关键技术研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(9): 1382-1386.

GAO S Y, CHEN Q, CHAI A J, et al. Key technology in continuous casting of 5356 alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(9): 1382-1386.

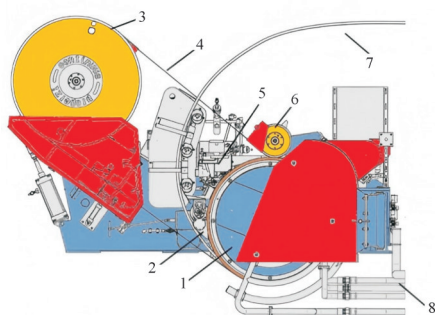


图1 铸造机结构图

Fig.1 Structure diagram of casting machine

1. 铸造轮 2. 起坯器 3. 张紧轮 4. 钢带 5. 中间包 6. 压紧轮 7. 铸坯 8. 冷却水管路

18~20 kg/min。以浇注速度为核心,围绕该工艺参数总结浇注温度、拉坯速度之间互相制约、相互影响的关系,对稳定制备出合格产品很重要。

从工艺稳定性角度讲,铸造过程低温、快速、强冷既对铸坯质量有益,可得到较细小、均匀的组织,枝晶间距小、致密,又可提高生产效率。但为了保证合适的进轧温度及与连轧机轧制速度相匹配,实现稳定的连铸连轧过程,必须选择适宜的工艺参数^[2]。当铸造速度过快时,若冷却强度不够,会使进轧温度太高,轧制过程容易出现脆裂、粘铝等,同时也会导致较高的轧制速度、较大的热效应,影响生产过程的稳定性;如果铸造速度太小,则需要的冷却强度较小,既影响到铸坯组织、性能和生产效率,也会对钢带、结晶轮寿命等产生不利影响。现场试制过程中也发现存在铸坯缺陷、成形不规则、内部组织不理想等问题。

研究关注整个铸造过程中铝液的流动、吸热、凝固时温度场、浓度场等的变化,并以铸造、传热相关理论为基础,研究铸造关键参数的变化对铝液凝固过程的影响。匹配铸造关键参数(浇注温度、拉坯速度)之间相互影响、相互制约的关系,将大幅改善铝液浇注时铸坯成形及铸坯内部、表面的质量,可减少后续轧制时断裂、粘铝等问题^[3]。

2 5356合金连铸关键参数

2.1 浇注温度

浇注温度是保证铸造能平稳进行的关键参数。浇注温度低,不但能促进铝液中部分杂质的析出,而且可以使得未析出的杂质在铝液内均匀分布。当铝液温度小于690℃时,铝液的黏度和流动性将会降低,铸坯内部易出现气孔、缩松等问题^[4]。若铝液温度更低时,铝液会提前凝固,有堵塞流管、小浇包浇注嘴的风险,影响整条生产线的运转。浇注温度高则铝液黏度

降低、流动性增强,利于改善铸坯质量,但浇注温度过高,铝液会大量吸收空气中的气体导致金属夹杂。当铝液温度高于710℃时,铝液凝固结晶的液穴将要增长,使得过渡带增大,易发生穿晶或产生较大的柱状晶,影响后续的轧制工序^[5]。因此本试验将浇注温度控制在690~710℃,并探索浇注温度与拉坯速度相互制约、相互影响的关系,寻求5356合金连铸关键参数最优解。

2.2 拉坯速度

铸坯是截面积为 $9.75 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 的梯形锭,进入牵引系统会以一定速度配合铸造系统拉动铸坯进入后端工序,其示意图见图2。

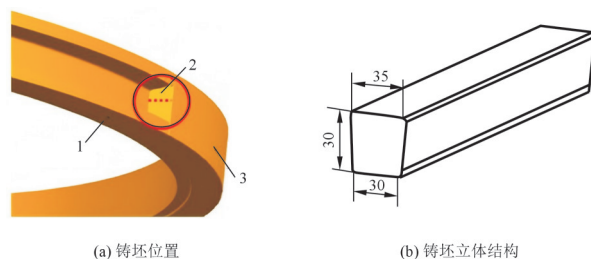


图2 铸坯示意图

Fig.2 Schematic diagram of casting billet

1. 结晶轮 2. 铸坯 3. 钢带

拉坯速度不仅影响铸坯的生产效率,而且对铝液整个凝固结晶过程也影响巨大。拉坯速度较低时,铝液在结晶槽内停留时间长,冷却时间增加,导致铸坯温度低、硬度高,进而影响后续的轧制工序。拉坯速度较大时,铝液在结晶槽内停留时间短、冷却时间减少,铸坯内部冷却不完全仍为液态,可能产生缩孔、夹杂等问题。拉坯速度为:

$$v = \frac{V_1}{F\rho} \quad (1)$$

式中, V_1 为铸造机浇注速度,kg/min; F 为铸坯截面积, m^2 ; v 为拉坯速度,m/min; ρ 为铸坯密度, g/cm^3 。经计算, $v=7.4 \text{ m/min}$,因此本试验研究将拉坯速度控制在7.0~7.5 m/min之间。

2.3 结晶冷却

传统的铸造过程是从下往上的凝固,其中大部分热量通过凝固前沿转移到刚凝固的铝锭中,而在轮式铸造机上至少93%~95%的热传递发生在横向上,即垂直于铸轮铸件的主轴和旋转方向。冷却水通过喷嘴分别从4个方向对铸坯进行动态冷却,液态金属凝固呈长“V”形,见图3。“V”的形状和长度随液态金属温度和速度而变化。影响液态金属的特性包括凝固范围、流动性、热导率、液态和固态的热扩散、化学特性如氧化物的形成倾向和性质、熔融热等,这些特性影响到向

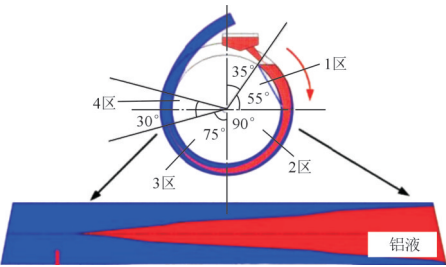


图3 铸机内部铝液凝固过程

Fig.3 Solidification process of aluminum liquid inside casting machine

内壁的传热速率以及凝固机制的类型^[6]。

制备高质量的铸坯取决于铸造机以有效的方式从熔融金属中提取热量的能力,以确保金属从液体到固体的平稳和均匀的转变。如果冷却太快,金属在模具中收缩太快,会导致铸坯因速冷发生不规则弯曲。冷却太慢,会导致模具内的散热过多,从而导致过高的模具工作温度和过度使用模具润滑剂。冷却水不足会导致结晶槽严重的热损伤,这可能需要外部稳定热处理来消除这种损伤。当铸造机冷却水启动时,冷却喷嘴将对结晶槽的内、外、左、右4个方向喷水,因此铝液的热量将被结晶槽、钢带吸收。为了保证连铸的顺利进行,冷却水的流量必须做到精确控制。单位时间内冷却水喷洒在结晶槽、钢带时吸收的热量 φ 为^[7]:

$$\varphi=[c_y(T_y-T_r)+c_g(T_r-T_p)+E_l]V_1\times 10^3\quad (2)$$

式中, T_y 为浇注温度, $^{\circ}\text{C}$; T_r 为纯铝的熔点, $^{\circ}\text{C}$; T_p 为铸坯出结晶区温度, $^{\circ}\text{C}$; c_y 为液态铝金属的比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; c_g 为固态铝金属的比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; E_l 为铝金属的熔化潜热, J/kg 。

单位时间内吸收热量 φ 所需要的冷却水总量(Q)为:

$$Q=\frac{\varphi}{(T_{\text{SR}}-T_{\text{SC}})c_s}\quad (3)$$

式中, T_{SC} 为冷却前水的温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{SR} 为冷却后水的温度, $^{\circ}\text{C}$; c_s 为冷却水比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$,计算得 $Q=180\text{ L}/\text{min}$ 。

为保证铝液从液态到固态平稳均匀的转化,需要铸造机冷却系统具备分区冷却、梯度冷却的功能。同时,分区冷却、梯度冷却方式不仅可以使铝液从液态平稳凝固,而且可以减少过冷、少冷问题的发生。本研究使用的铸造机主要分为4个冷却区域(1、2、3、4),并且每个冷却区域的冷却水压力、流量均可控制,具备梯度冷却功能,见图4。理论上随着结晶槽内铝液的增多,1~3区的冷却水流量、压力也应随之增大,铝液到达3区时液固转化基本已经完成,故4区的冷却水流量、压力略小于1~3区。

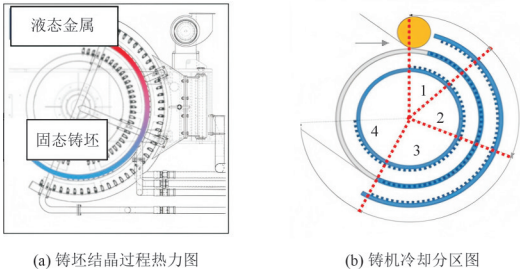


图4 铸坯冷却结晶过程

Fig.4 Cooling and crystallization process of casting billet

由于结晶槽(材料铜)、钢带(材料钢)材料不同,其热导率也存在较大差异,钢带表面的热流密度约为结晶槽表面热流密度的1.35倍。综合考虑热流密度、梯度冷却等因素,分配冷却区的冷却水参数,见表1。

表1 冷却水参数

Tab.1 Parameters for cooling water

区域	喷嘴数量/ 个	冷却区域占 比/%	流量分配/ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	水压/ kPa
1区	80	20	40	60
2区	150	40	50	80
3区	200	30	60	80
4区	20	10	30	40

冷却水参数(流量、水压等)可以指导纯铝杆的生产,对于5356合金该参数窗口过于宽泛,无法有效保证铸坯指标要求。因此,不断缩小浇注温度和铸造速度工艺窗口并找到两者最佳匹配点是5356合金连铸的关键技术难点。

3 试验设计

利用连铸设备在不同的浇注温度和拉坯速度下铸造分析对比铸坯表面质量、内部金相组织图^[8]。综合考虑整个连铸过程中铸造参数对铝液液固转化平稳性、内部组织均匀性的影响,本试验使用现有连铸设备,选取不同浇注温度(690、700和710 $^{\circ}\text{C}$)、拉坯速度(7.0、7.3和7.5 m/min)开展现场调试试验,试验过程中保证试验环境、冷却水参数(流量、压力)等参数恒定,试验参数见表2。

表2 试验参数

Tab.2 Experimental parameters

试验编号	浇注温度/ $^{\circ}\text{C}$	拉坯速度/ $(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$
1	690	7.0
2	690	7.3
3	690	7.5
4	700	7.0
5	700	7.3
6	700	7.5
7	710	7.0
8	710	7.3
9	710	7.5

4 试验分析

5356 合金连铸过程中浇注温度和拉坯速度会对结晶腔中的铸坯质量产生直接影响。图 5 为铸坯表面质量。可以看出,不同的浇注温度、拉坯速度会对铸坯表面质量产生明显的影响。

试验过程中,在 690 °C 浇注温度下铸坯成形不规则,产生内部裂纹,铸坯频繁断裂导致无法连续浇注。在 700 °C 以上铸坯质量有所好转,成形良好无断裂,可

连续浇注^[9]。当冷却水参数(流量、压力)固定时,拉坯速度将直接影响结晶槽内铝液的凝固结晶速度。拉坯速度越慢,铝液在结晶槽内滞留时间增加,冷却时间增加,利于结晶腔内气孔的析出,但是冷却时间过长,会使晶粒过于粗大,见图 6d 和图 6e。浇注温度和拉坯速度都取最大值会导致过冷现象,晶粒杂乱生长,见图 6i,导致铸坯内部组织疏松,后续轧制时铸坯表面容易出现裂纹。结合理论分析,认为当浇注温度为 710 °C,拉坯速度为 7.0 和 7.3 m/min 时铸坯组织结构更好,符合现场生产要求。

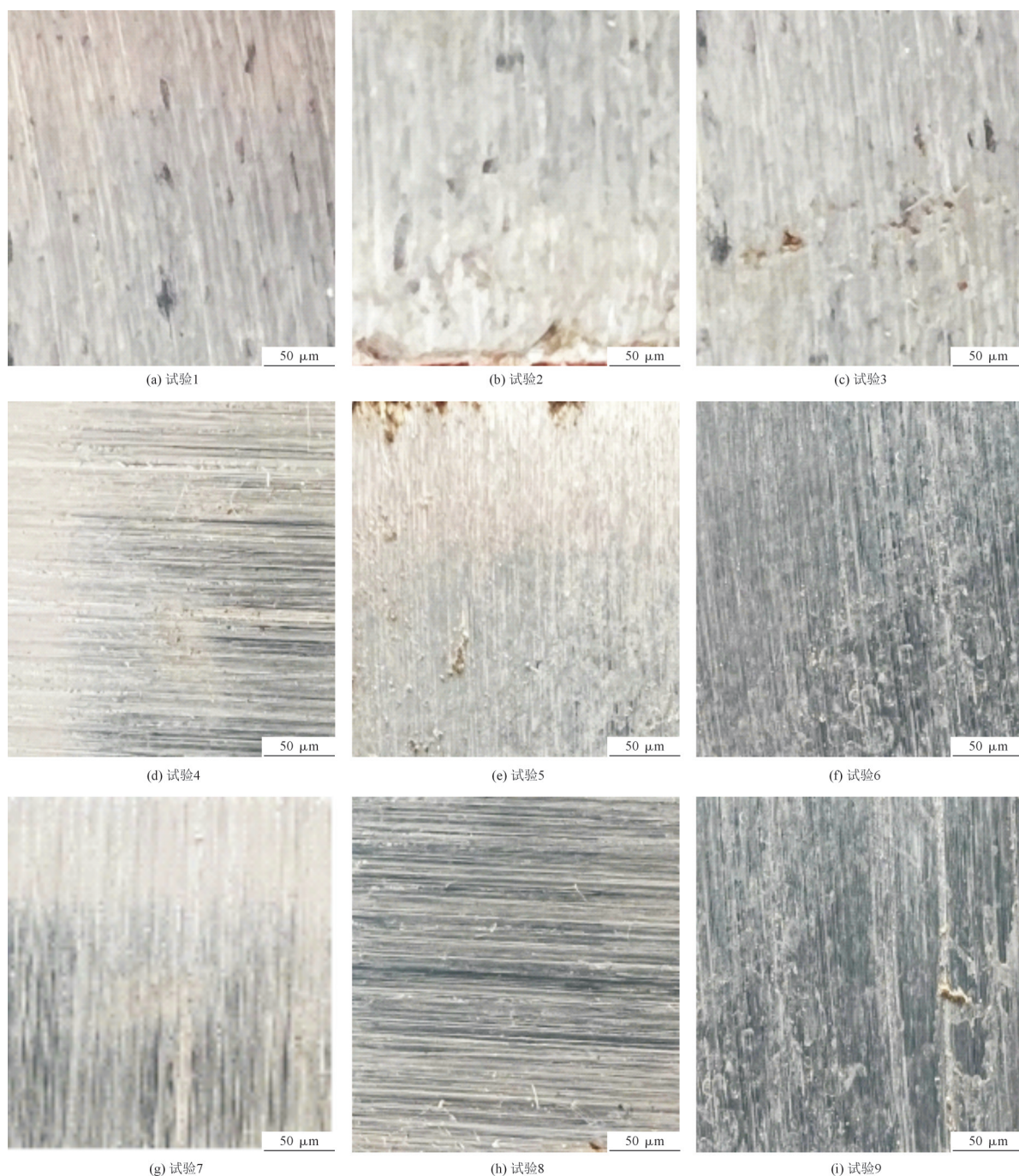


图 5 铸坯表面质量

Fig.5 Surface quality of casting billet

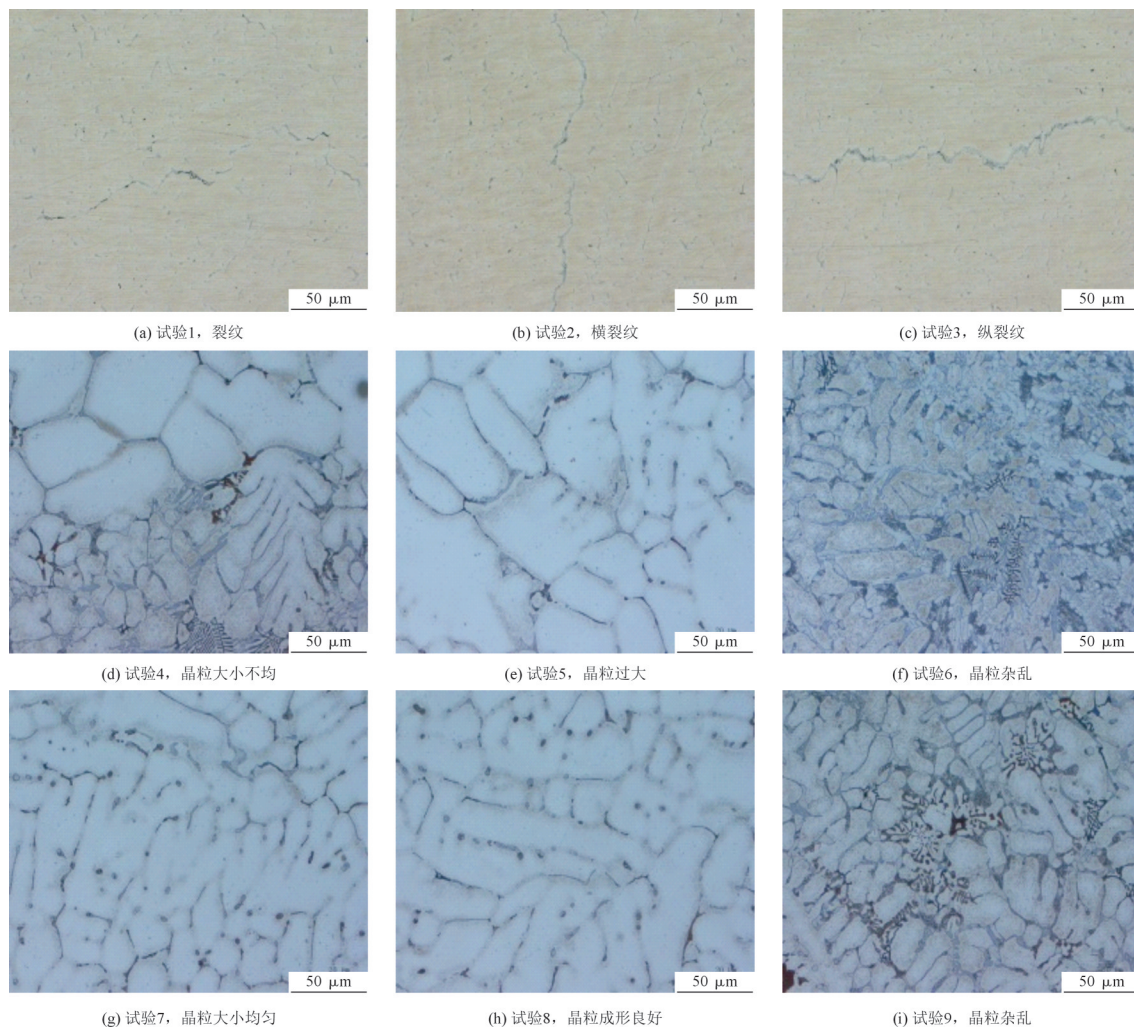


图6 铸坯内部金相组织

Fig.6 Internal microstructure of casting billet

5 结 论

(1) 浇注温度和拉坯速度是5356合金连铸阶段关键工艺参数,两者相互制约。

(2) 拉坯速度对结晶区温度场、流场影响较为明显:速度过高,导致出口处不能完全凝固,可能产生铝液倒流,同时增加主流股冲击深度,旋涡回流区域也变得狭长,加剧液面波动,增加气孔及夹杂等缺陷的产生。速度过低,凝固点位置高,铸坯提前形成,易造成过度冷却,不满足入轧温度,增加铝杆表面缺陷,同时也不能满足正常生产。

(3) 5356合金合适的工艺参数范围:浇注温度为700~710℃,浇注速度为18~20 kg/min,拉坯速度为7.0~7.3 m/min。在该工艺条件下可以连续稳定铸造出符合后端轧制要求的5356合金锭坯。

参 考 文 献

[1] 刑清源. 5356铝合金电磁连铸、净化和微合金化工艺研究[D]. 辽宁

大连:大连理工大学,2015.

- [2] 马仕祥. 基于ProCAST铝合金压板铸造工艺优化设计[J]. 中国铸造装备与技术, 2024, 59(3): 93-95.
- [3] 王亚男, 马旭梁. 铝合金铸造性能及相关参数数据库研究[J]. 铸造, 2024, 73(4): 514-519.
- [4] JIANG W M, ZHU J W, LI G Y, et al. Enhanced mechanical properties of 6082 aluminum alloy via SiC addition combined with squeeze casting[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2021, 88(29): 119-131.
- [5] 罗启全. 铝合金熔炼与铸造[M]. 广州: 广东科技出版社, 2022.
- [6] SATA A, RAVI B. Foundry data analytics to identify critical parameters affecting quality of investment castings [J]. ASCE-ASME J Risk and Uncert. in Eng. & Sys., 2019, B5(1): 1-5.
- [7] 姬会爽. 基于数据分析和理论模拟的铜杆连铸连轧及深加工生产线工艺优化[D]. 河北秦皇岛: 燕山大学, 2022.
- [8] 譙攀. 6082铝合金挤压铸造及热处理组织和力学性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [9] 姬方方. 铸造铝合金板材的断裂性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.

(编辑: 栗万仲)