

铸造工艺对 ER5356 铝合金焊丝缺陷和力学性能的影响

薛冠霞¹ 钟 鼓¹ 洪 尧² 王占坤¹ 任思蒙³ 罗安民² 陈德斌² 李虎田³ 郭世杰¹
(1.中铝材料应用研究院有限公司苏州分公司;2.云南铝业股份有限公司;3.中铝材料应用研究院有限公司)

摘 要 连铸过程中铝液进入结晶器直到完全凝固形成的凝固角,对铸坯缩松缺陷形成影响明显。对 ER5356 铝合金焊丝铸坯凝固过程进行研究,通过数值模拟技术,优化了影响凝固角大小的铸造工艺参数,通过控制凝固角度,抑制缩松形成。采用 X 射线探伤仪和常温拉伸试验机对优化后的成品焊丝进行焊缝质量和性能检测。结果表明,保持其他铸造参数不变,降低生产速度,会使铸坯凝固角减小,有利于抑制缩松形成,减少心部缺陷。当铸坯生产速度为 1.15~1.20 t/h、铸造温度为 690~700 ℃、冷却水流量为 9~10 m³/h,凝固角为 56°~65°,铸坯缩松得到完全抑制,焊丝心部无缺陷。焊接后接头的气孔率最低,约为<0.43%,焊接接头抗拉强度最高,为 282.13~283.38 MPa,满足 GB/T32181-2015 焊接接头强度的要求(>275 MPa)。

关键词 5356 焊丝;铸坯;凝固角度;缩松;气孔率

中图分类号 TG146.21;TG422.3 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.08.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Casting Process on Defect Formation and Mechanical Property of ER5356 Aluminum Alloy Welding Wires

Xue Guanxia¹, Zhong Gu¹, Hong Rao², Wang Zhankun¹, Ren Simeng³, Luo Anmin², Chen Debin², Li Hutian³, Guo Shijie¹
(1.Suzhou Branch, Chinalco Materials Application Research Institute Co.,Ltd.;2.Yunnan Aluminum Co.,Ltd.;
3. Chinalco Materials Application Research Institute Co.,Ltd.)

Abstract: Liquid aluminum enters the crystallizer wheel until completely solidified to form solidification angle, which is directly related to the formation of shrinkage defects in the casting billet. The solidification process of casting ingot of ER5356 aluminum alloy welding wire was analyzed. The casting process parameters that affect the size of solidification angle were optimized through numerical simulation to obtain appropriate solidification angle and inhibit the formation of porosity. X-ray flaw detector and normal temperature tensile equipment were employed to inspect the quality and performance of optimized finished welding wire. The results indicate that the reduction of casting speed can reduce the solidification angle of the casting ingot with constant casting parameters, which is beneficial to inhibit the formation of porosity and reduce the defects of center. With the casting speed of 1.15~1.20 t/h, pouring temperature of 690~700 ℃, cooling water volume of 9~10 m³/h, and solidification angle of 65 °~56 °, the porosity of casting ingot is completely suppressed without defect in the center of welding wire. Meanwhile, the porosity of welded joint reaches mininum value and the tensile strength of welded joints reach the maximum value, which are less than 0.43% and 282.13~283.38 MPa, respectively, meeting the requirements of GB/T32181-2015 for tensile strength of welded joint (>275 MPa).

Key Words: 5356 Welding Wire, Casting Ingot, Solidification Angle, Shrinkage, Porosity

高端 ER5356 铝合金焊丝以其优异的焊接强度和稳定性,广泛用于轨道交通、船舶和航空航天等领域。与进口焊丝相比,国产 5356 焊丝普遍存在焊缝气孔率高、力学性能偏低等问题,无法满足高质量焊接的要求,如高速列车、航空航天等特殊行业高度依赖进口焊丝产品,在很大程度上制约了我国高端制造业的发展^[1-2]。影响国产 5356 铝合金焊丝焊接效果的主要原因是,5356 铝合金铸坯心部存在缩松、夹杂多、晶粒粗大

收稿日期:2023-02-14;修改稿收到日期:2023-04-10
第一作者简介:薛冠霞,女,1980 年出生,高级工程师,江苏苏州(215026),E-mail: xueguanxia@cmari.com
通信作者:钟鼓,男,1983 年出生,教授级高级工程师,江苏苏州(215026),E-mail: zhonggu@cmari.com
引用格式:薛冠霞,钟鼓,洪尧,等. 铸造工艺对 ER5356 铝合金焊丝缺陷和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(8):1 079-1 084.
XUE G X, ZHONG G, HONG R, et al. Effects of casting process on defect formation and mechanical property of ER5356 aluminum alloy welding wires[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(8):1 079-1 084.

等缺陷^[3],导致焊接过程不顺畅、焊接性能差。尤其是铸坯的缩松缺陷难以在后续加工过程消除,会遗传到成品焊丝,显著降低焊缝的抗拉强度^[4-8]。因此,研究高质量铝合金焊丝铸坯的冶金质量具有积极意义。

本研究通过模拟 5356 铝合金铸坯生产过程,优化铸坯生产工艺,减小凝固角度、液穴深度、消除心部缩松,并对改进的成品焊丝进行焊接性能评价,包括焊缝组织和焊接接头力学性能,达到改善送丝稳定性、降低焊缝气孔率、提高接头抗拉强度的目的,为国产铝合金焊丝质量的提升以及在轨道交通领域的应用推广提供参考。

1 试验方法

1.1 铸轧坯连铸过程模拟模型建立

1.1.1 控制方程

普洛佩兹连铸过程是一个复杂的工艺过程,伴随着金属液流动、凝固以及温度和热应力的变化。采用 ProCAST 软件对半连续铸造过程的流动、温度以及凝固现象进行模拟计算,控制方程为^[9-11]:

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla U) - \nabla P + S_m \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U T) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{c_p} \nabla T \right) + S_{\text{th}} \quad (3)$$

式中, ρ 为密度; U 为流体的速度矢量; T 为温度; c_p 为比热容; μ_{eff} 为黏度; S_m 为动量源项,其中包括热浮力、Darcy 源项; S_{th} 为热源项,其中包括焦耳热和结晶潜热。

对于普洛佩兹连铸过程,由于金属液流动属于湍流,因此另需控制方程来描述湍流现象。本模型中选用经典的 κ - ϵ 双方程模型,分别为湍动能守恒方程和湍动能耗散守恒方程。固液糊状区由于枝晶的形成,会阻碍金属液流动,还需要对动量方程加入源项来对这一现象进行处理^[12]。采用的源项方程为:

$$S = [(1 - \beta)^2 / (\beta^3 + \epsilon)] A_{\text{mush}} (v - v_p) \quad (4)$$

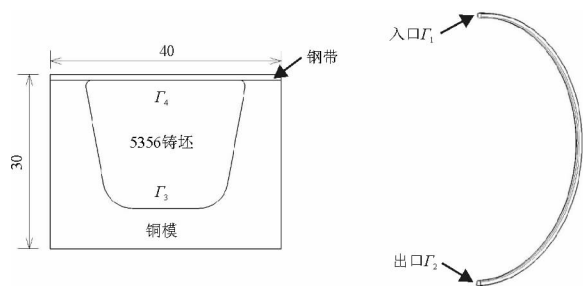
式中, ϵ 为一无穷小量,目的是为了避免分母为 0,避免出现计算错误; A_{mush} 为糊状区常数; v_p 为铸造速度。对于描述湍流的控制方程也需加入源项进行控制,源项为:

$$S = [(1 - \beta)^2 / (\beta^3 + \epsilon)] A_{\text{mush}} \Phi \quad (5)$$

式中, Φ 为湍动能 κ 或耗散率 ϵ 。

1.1.2 边界条件

5356 铝合金铸坯的截面为梯形,长边为 28 mm、短边为 20 mm、高为 22 mm,3 面与铜模接触,1 面与钢带接触,结晶器(即铜模)半径为 600 mm。模拟计算域为结晶器的 1/2,铸坯温度场和流动场模拟所需边界条件包括,入口边界 Γ_1 、出口边界 Γ_2 、铸坯与铜模边界 Γ_3 、铸坯与钢带边界 Γ_4 ,见图 1^[9]。



(a) 铸坯横断面形状及边界 (b) 铸坯整体形状及边界

图 1 铸坯模拟计算区域几何尺寸及边界条件

Fig.1 Geometry size and boundary conditions of casting ingot in simulation region

入口边界 Γ_1 ,出口边界 Γ_2 :入口和出口热边界条件为第 1 类边界条件,其值为铸造温度;入口和出口速度与铸造速度相关,满足流量守恒原则,湍动能 κ 和其耗散率 ϵ 由下式确定:

$$\kappa = 0.01 u_{\text{inlet}}^2 \quad (6)$$

$$\epsilon = \kappa^{1.5} / R_{\text{inlet}} \quad (7)$$

式中, u_{inlet} 为入口速度; R_{inlet} 为入口水力半径。

铸坯与铜模边界 Γ_3 :该边界上速度和湍流边界设置为壁面,热边界条件类型为第 3 类边界:

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = h (T_w - T_{\text{en}}) \quad (8)$$

式中, λ 为材料热导率; h 为传热系数; T_w 为铸坯接触面温度; T_{en} 为铜模接触面温度。

ProCast 软件根据与铜模接触的铝液温度来自动计算气隙的形成位置和大小,采取不同的传热系数。当铸坯与结晶器壁接触时,传热系数的计算公式为:

$$h = h_0 \cdot \left(1 + \frac{P}{A} \right) \quad (9)$$

当铸坯凝固后与铜模壁分离,会产生气隙,此时传热系数的计算公式为:

$$h = \frac{1}{\frac{1}{h_0} + R_{\text{gap}}} \quad (10)$$

$$R_{\text{gap}} = \frac{1}{\frac{k}{h_{\text{gap}}} + h_{\text{rad}}} \quad (11)$$

式中, h_0 为初始传热系数; h_{rad} 为热辐射传热系数; h_{gap} 为气隙宽度; k 为空气热导率; A 为与接触压力相关的

常数。

铸坯与钢带边界 T_4 :该边界条件类型与铸坯和铜模边界 T_3 相同,温度边界调用式(8),其中 h 为铸坯和钢带的传热系数; T_w 为铸坯接触面温度; T_{en} 为钢带接触面温度。

1.1.3 材料性能

ER5356 铝合金焊丝成分见表 1。模拟铸造过程所需的 5356 铝合金性能主要为合金的热物性能,包括固液相线温度、黏度、固相率、密度、等效比热容、热导率,

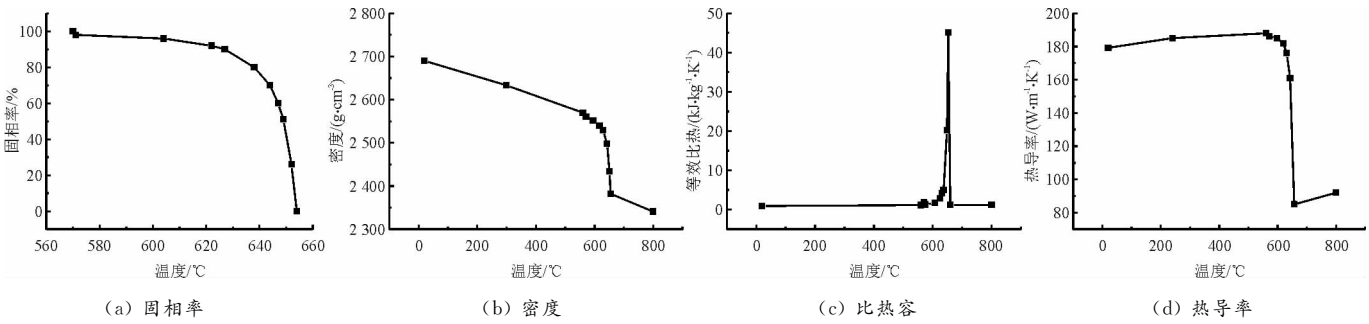


图 2 不同参数随温度变化的曲线

Fig.2 Variation curves of different parameters with temperature

表 2 黏度随固相率变化关系

Tab.2 Variation of viscosity with solid fraction		
状态	固相率	黏度/(Pa·s)
液态	0	0.001
枝晶搭接前	$0 < f_s \leq f_s^*$	$0.001 \times 10^{10} f_s$
枝晶搭接后	$f_s^* < f_s \leq 1$	0.001
固态	1	0.001

注: f_s 为合金的固相率; f_s^* 为枝晶搭接时的固相率

1.1.4 模拟模型验证

为了验证模拟模型的准确性,铸造过程中将直径为 1 mm 的线形热电偶埋入铸坯内,并且随铸坯同时凝固,在线检测铸坯指定位置从进入结晶器到离开结晶器的温度变化历程,线偶埋入方式见图 3[8]。铸坯截面较小,测量点选取截面头部位置,实测温度数据和模拟温

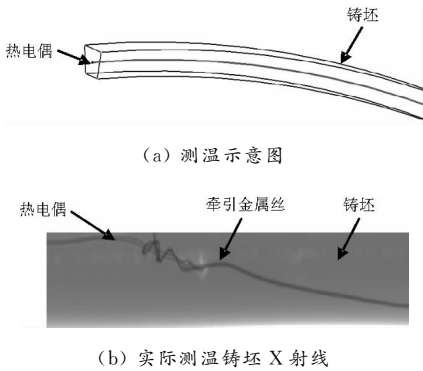


图 3 铸坯测温示意图及实际测温铸坯 X 射线照片

Fig.3 Schematic diagram of temperature measurement and X-ray image of actual temperature measured for the billet

均利用软件 Jmatpro 计算得出。其中,固相线温度和液相线温度分别为 638 ℃和 574 ℃,其他参数性能见图 2 和表 2。

表 1 ER5356 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ER5356 aluminum alloy %									
标准	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
5356 标准	0.25	0.40	0.10	0.05~0.20	4.5~5.5	0.05~0.20	0.10	0.06~0.20	余量
内控标准	0.1~0.25	0.08~0.2	0.01	0.08~0.17	4.5~5.5	0.05~0.20	0.02	0.06~0.15	余量

度结果的对比曲线见图 4。可以看出,实测温度数据和模拟温度结果一致性较好,证明模拟模型准确度较高,可以用来优化 5356 铝合金连铸过程的工艺参数。

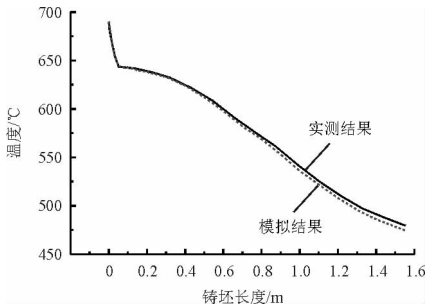


图 4 实测温度数据与模拟温度结果的对比曲线

Fig.4 Comparison curves of measured and simulated temperatures

1.2 焊丝制备

$\phi 1.2$ mm 5356 铝合金焊丝的制备过程主要包括线杆铸轧、焊丝拉拔和表面处理 3 大工序。

制备的 5356 铝合金连续铸造锭坯生产设备主要包括熔炼炉、流槽系统、在线除气装置、过滤装置、水循环系统、铸造机等。由于 5356 铝合金中含有 Mg,流槽系统增加氩气气氛保护,防止氧化。5356 铝合金连铸锭坯经过两次热轧退火制备成 $\phi 2.6$ mm 线杆。

$\phi 2.6$ mm 5356 铝合金线杆经过拉拔制成 $\phi 1.2$ mm 焊丝。随后进行表面处理,主要包含常温清洗剂清洗、

超声波清洗剂清洗和高温清水清洗,随后通过 135 ℃干燥箱烘干,最后大卷收丝、小卷烘干成成品焊丝。

1.3 焊接工艺及质量评价

选取 300 mm×150 mm×10 mm 的 5083-H113 铝合金板材进行平焊,对接 V 形坡口,对焊接工艺试件制备示意图见图 5。焊前用丙酮擦拭焊接母材以去除油污,并使用打磨工具清除待焊部位的氧化膜。焊机采用 MIG 弧焊机,主要参数为:焊接电流为 200~240 A,电弧电压为 21~25 V,焊接速度为 8~11 mm/s,保护气流量为 21~25 L/min。

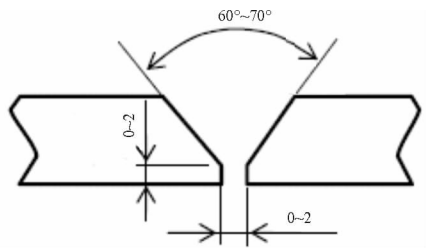


图 5 焊接接头坡口形式和尺寸

Fig.5 Groove type and dimension of welded joint

焊接接头气孔率检测采用 MOXYD-150 型 X-Ray 探伤仪进行;采用 TO-100ST 型拉伸机对焊接接头进行室温拉伸性能测试,拉伸试样尺寸见图 6。拉伸速率为 1 mm/min(屈服前)和 8.4 mm/min(屈服后)。

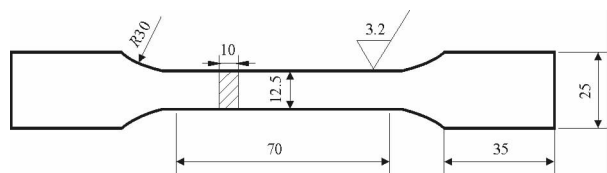


图 6 拉伸试样尺寸示意图

Fig.6 Schematic diagram of tensile specimens

2 试验结果与分析

2.1 铸造工艺对缩松的影响

2.1.1 凝固角优化

保持铸造温度、冷却水流量不变,通过改变铸坯生产速度(即铸造速度)获得不同的铸坯液穴深度(铸坯中心和边部固相线高度差)和凝固角度(固相线在铸坯边部和心部的高度差值)。采用验证过的 5356 铝合金连铸过程模型,模拟 4 种生产速度下铸坯温度和凝固场的分布,获得对应的液穴深度和凝固角度,见图 7 和图 8。

通过对铸坯模拟结果进行处理,提取铸坯温度分布数据,获得不同生产速度对应的结晶器内铸坯凝固数据,见表 3。

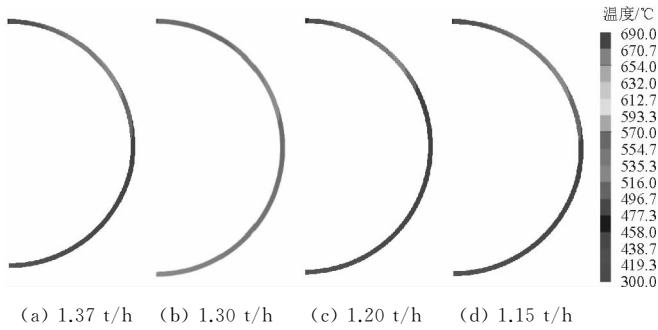


图 7 不同生产速度下铸坯温度分布

Fig.7 Temperature distribution of casting billet with different casting speeds

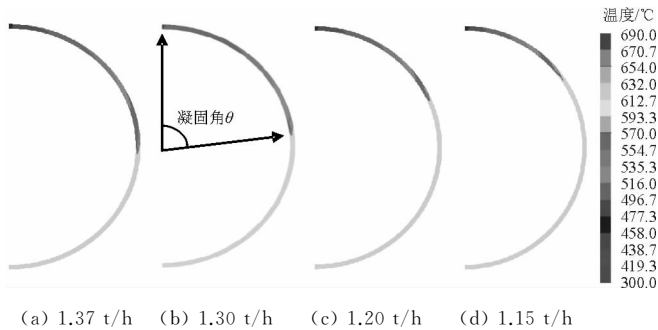


图 8 不同生产速度下铸坯凝固角

Fig.8 Solidification angle of casting billet with different casting speeds

表 3 5356 合金铸造工艺及凝固数据

Tab.3 Casting parameters and solidification data of 5356 alloy

工艺 编号	生产速度/ (t·h ⁻¹)	浇注 温度/℃	冷却水流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	液穴 深度/mm	凝固角/ (°)
1	1.37	690~700	9~10	40.2	97
2	1.30	690~700	9~10	34.3	85
3	1.20	690~700	9~10	25.1	65
4	1.15	690~700	9~10	21.3	56

通常,5356 铝合金连铸坯生产过程中,生产速度越快,铸坯液穴越深,铸坯最后凝固的位置越难补缩,铸坯产生缩松缺陷的倾向越大。另外,生产速度越快,形成的液穴越深,铝液进入结晶器到完全凝固与钢带和铜壁接触距离越长,对应的凝固角范围越大,铸坯形成的初始凝壳被钢带和铜壁间的高温气隙加热,冷却减慢、液穴温度回升,凝壳产生局部软化和融化现象破坏了初始凝壳的固体表面,造成填充在枝晶间和晶界间尚未凝固的低熔点共晶相在大气压力和金属静压力的作用下,沿着枝晶或晶粒间隙流到铸坯表面,形成偏析瘤等表面缺陷^[11]。因此,在保证铸坯生产过程顺利进行的前提下,降低生产速度、减小凝固角范围,有利于提高铸坯内部和表面品质。

从表 3 可以看出,4 种生产速度均能保证铸坯生产过程顺利进行。保持其他铸造参数不变,生产速度从 1.37 t/h 降低到 1.15 t/h,铸坯液穴深度从 40.2 mm 减小到 21.3 mm,液穴越浅越容易补缩,铸坯产生缩松缺

陷的倾向越小。因此,生产速度为 1.15 t/h 时,液穴深度最小,最有利于抑制铸坯内部缩松缺陷的形成。同时,生产速度从 1.37 t/h 降低到 1.15 t/h,凝固角从 97° 减小到 56°,凝固角最小,表示铸坯与钢带和铜壁接触距离越短,铸坯表面越光滑,越难形成偏析瘤、冷隔等表面缺陷。因此,生产速度为 1.15 t/h 时,偏析瘤和冷隔等缺陷越难形成,铸坯表面最为光滑。

2.1.2 铸坯缩松检测

4 种生产速度下 5356 铝合金铸坯均能顺利铸造,铸坯中心为熔体最后凝固位置,缩松缺陷多发生在该处,生产速度为 1.30 t/h 的铸坯横截面见图 9。可以看出,该生产速度下,铸坯心部存在少量缩松缺陷。

在 4 种生产速度的铸坯横截面中心位置取样,通过对试样进行腐蚀,观察缩松缺陷^[13],见图 10。从图 10 可以看出,当生产速度为 1.37 t/h 时,铸坯横截面心部缩松严重,占比约为 10.38%;当生产速度降低为 1.30 t/h 时,缩松减少至约 5.62%;当生产速度进一步降低至 1.20 t/h 时,铸坯缩松完全消除,铸锭表面光滑。这

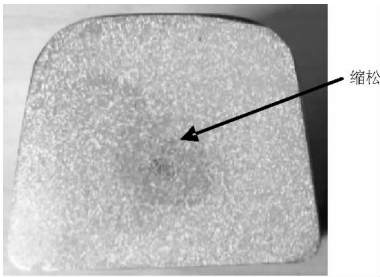


图 9 5356 铸坯横截面(生产速度为 1.30 t/h)
Fig.9 Cross section of 5356 casting ingot

表明生产速度越小,铸坯液穴越浅,铝液越容易对铸坯最后位置凝固实现补缩,铸坯产生缩松缺陷的倾向越小,微观组织越致密。当生产速度进一步降低至 1.15 t/h 时,铸坯保持无缩松状态,但此时铸坯表面光滑程度稍有下降,局部存在细小偏析瘤缺陷,证明生产速度越小,液穴越浅,铸坯与钢带和铜壁接触距离越短,铸坯表面越光滑,越有利于抑制偏析瘤和冷隔等表面缺陷的形成。连铸坯在进入热轧工序前会进行铣面,铣面量约为 2 mm,因此细小偏析瘤不会影响后续加工质量。

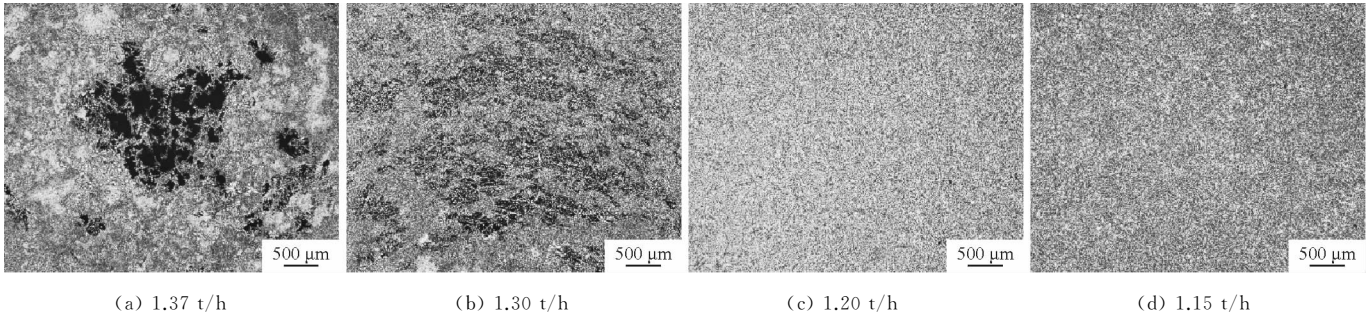


图 10 不同生产速度下 5356 铸坯中心位置腐蚀组织

Fig.10 Corrosion microstructure of 5356 casting ingot at center position with different casting speeds

2.1.3 焊丝力学性能

对 4 种工艺对应的 $\phi 1.2$ mm ER5356 铝合金焊丝进行室温拉伸试验,力学性能结果见表 4。

表 4 ER5356 铝合金焊丝的力学性能

Tab.4 Mechanical properties of ER5356 Al alloy welding wire			
焊丝编号	生产速度/(t·h ⁻¹)	抗拉强度/MPa	伸长率/%
1	1.37	473	5.7
2	1.30	486	6.2
3	1.20	504	6.9
4	1.15	503	6.5

5356 铝合金连铸坯微观组织致密、无缩松夹杂等缺陷,会提高成品焊丝的力学性能,最直接的表现就是焊丝的抗拉强度和伸长率提高。从表 4 可以看出,保持其他生产工艺不变的情况下,连铸坯生产速度在 1.15~1.37 t/h 范围内时,焊丝的力学性能随着生产速度的减小而增强,直到达到稳定。结合生产速度与铸坯缩松结果可以看出,当生产速度为 1.15~1.20 t/h,铸坯不存在缩松时,焊丝力学性能最好且稳定,抗拉强度为 503~

504 MPa,伸长率为 6.5%~6.9%。当铸造速度为 1.30~1.37 t/h,铸坯存在缩松时,焊丝的力学性能明显降低,抗拉强度为 473~486 MPa,伸长率为 5.7%~6.2%。

2.2 焊接性能评价

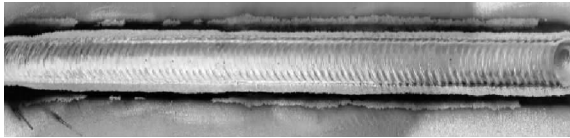
2.2.1 气孔率测试

使用 Image-Pro Plus 软件对焊接接头 X 射线探伤照片进行处理,计算气孔和焊接接头面积比,获得气孔率数据。4 种 $\phi 1.2$ mm ER5356 铝合金焊丝焊接接头气孔率测试结果见表 5。

表 5 焊接接头气孔率

Tab.5 Porosity of ER5356 welded joints	
焊丝编号	气孔率/%
1	<0.78
2	<0.60
3	<0.30
4	<0.43

可以看出,铸坯心部存在缩松缺陷的 1 号和 2 号焊丝对应的焊接接头孔隙率相对较高,分别为<0.78%和<0.60%。铸坯心部无缩松缺陷的 3 号和 4 号焊丝对应的焊接接头气孔率最低,分别为<0.30%和<0.43%。其中,3 号焊丝焊接过程,电流电压无波动,电弧稳定且穿透力强,接头外观整齐,达到一级焊接接头要求,焊缝外观和 X 射线探伤照片见图 11。根据轨道交通焊接使用要求,焊接接头气孔率需小于 0.60%,因此 4 种焊丝中的 2 号、3 号和 4 号均满足使用要求。



(a) 宏观照片



(b) X 射线探伤照片

图 11 3 号焊丝焊接接头宏观照片及 X 射线探伤照片
Fig.11 Macro images and X-ray detection of the 3rd welded joint

2.2.2 拉伸试验

对 4 种 ER5356 铝合金焊丝焊接接头进行室温拉伸试验,力学性能见表 6。

表 6 ER5356 铝合金焊丝焊接接头力学性能

Tab.6 Mechanical properties of ER5356 welded joints			
焊丝编号	生产速度/(t·h ⁻¹)	抗拉强度/MPa	伸长率/%
1	1.37	269.25	8.9
2	1.30	276.91	10.8
3	1.20	282.13	11.0
4	1.15	283.38	11.2

根据 GB/T32181-2015 要求,焊接接头强度应大于 275 MPa。在保持焊接工艺不变的情况下,ER5356 铝合金焊丝焊接接头的力学性能会受到焊丝质量和焊接效果的影响。从表 5 和表 6 可以看出,生产速度为 1.37 t/h,铸坯缩松最严重的 1 号焊丝,焊接过程电弧稳定性最差,熔池存在飞溅,其焊接接头气孔率最高,力学性能最低,抗拉强度为 269.25 MPa,不能满足要求。生产速度为 1.30 t/h,含少量缩松的 2 号焊丝,焊接过程较为稳定,焊接接头气孔率降低,力学性能提高,抗拉强度为 276.91 MPa,基本满足要求,这说明铸坯少量缩松,可以通过后续轧制工序进行焊合,使得焊丝和焊缝力学性能达到使用标准。生产速度降低到 1.15~1.20 t/h,铸坯缩松完全消除的 3 号和 4 号焊丝,焊接过程最具稳定性,电流电压无波动,电弧稳定且穿透力强,焊缝气孔率最低,焊接接头组织致密,力学性能最高,抗拉强度为

282.13~283.38 MPa,完全满足要求。综上,ER5356 铝合金焊丝焊接接头的力学性能会随着生产速度的降低、铸坯缩松的减小而提高。

3 结 论

(1)通过模拟仿真和试验结果表明,降低 ER5356 铸坯生产速度、减小凝固角,有利于铸坯抑制缩松形成,减少焊丝心部缺陷。

(2)当铸坯生产速度为 1.15~1.20 t/h,凝固角控制在 56°~65°,铸坯缩松得到完全抑制,焊丝心部无缺陷。此时焊接后接头的气孔率最低,力学性能最好,满足 GB/T32181-2015 对焊接接头强度>275 MPa 的要求。

(3)当铸坯生产速度为 1.30~1.37 t/h,凝固角控制在 65°~85°,铸坯心部存在缩松缺陷。此时焊接后接头孔隙率相对较高,焊接接头力学性能低。

参 考 文 献

[1] 葛佳棋,李帅贞,汤旭祥,等.国产与进口 ER5356 铝合金焊丝质量性能对比研究[J].焊接与切割, 2021, 11(2): 31-34.

[2] 陕倩. 高性能 5356 铝合金焊丝制备及组织性能研究[D].内蒙古包头:内蒙古科技大学, 2021.

[3] 李世林. 5356 铝合金线材坯材料净化工艺研究[D]. 北京:北京有色金属研究总院, 2022.

[4] 徐晓龙,朱艳丽,李欣雨,等.连铸连轧与水平连铸连拉 ER5356 铝合金焊丝线材冶金品质对比[J].焊接设备与材料, 2018, 47(10): 67-70.

[5] 李国栋. 半连续铸造 ER5356 焊丝制备及接头性能研究[D].济南:山东大学, 2020.

[6] WU F, GANG Y, YAN J K. Impact of SAL5356 and ER5356 aluminum alloy weldingwires on weld structure and joint performance [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(6): 1 928-1 934.

[7] 张艳辉,苗佳,唐立国,等.ER5356 铝合金焊丝焊接接头组织及力学性能[J].焊接设备与材料, 2022, 51(2): 74-77.

[8] 毛津,侯击波,许凯,刘雅鑫,等.采用铝基焊丝 MIG 焊接 AZ91D 镁合金的性能[J].特种铸造及有色合金, 2018, 38(4): 425-428.

[9] 薛冠霞,郭世杰,刘金炎,等. 3104 铝合金低液位铸造过程多场耦合模型的开发及工艺优化[J].有色金属加工, 2016, 45(3): 20-26.

[10] 薛冠霞. 感应凝壳熔炼过程温度场及流场耦合数值模拟[D]. 辽宁大连:大连理工大学, 2007.

[11] XUE G X, WANG T M, SU Y Q. Numerical simulation of thermal and flow fields ininduction skull melting process[J].Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(5): 761-765.

[12] 陕倩,李振亮,赵帆,等. 连铸连轧法生产的铝合金焊丝表面质量及影响因素分析[J]. 内蒙古科技大学学报, 2021, 40(1): 20-24.

[13] 于钧宇,丛意明,许鸿吉,等.国产 ER5356 与 ER5087 铝合金焊丝焊接接头在盐雾环境下的腐蚀行为研究[J].电焊机, 2022, 5(7): 128-133.

(编辑:栗万仲)