

铝连铸连轧过程中铸嘴堵塞的原因与机理

沈吉¹, 邓腾飞¹, 姚振华²

(武汉理工大学 1. 硅酸盐建筑材料国家重点实验室, 2. 材料科学与工程学院, 武汉 430070)

摘要: 建立仿真模型模拟了连铸连轧过程中铝液流经铸嘴时的温度场及速度场, 试验研究了铸嘴材料与铝液在不同温度(850, 900, 950 °C)反应不同时间(2, 4, 6, 8, 10 h)后的形貌和成分, 分析了铸嘴堵塞的机理。结果表明: 在铝液流动过程中, 铸嘴在铁板固定处的温度梯度比其他区域的高; 铝液流速分布不均匀导致温度分布不均匀, 与铸嘴壁接触区域的铝液温度较低, 容易发生挂渣; 高温铝液与铸嘴材料中的 SiO_2 发生置换反应生成 Al_2O_3 夹渣和单质硅, Al_2O_3 的生成会增大铸嘴壁的表面粗糙度, 同时会进入铝液使其黏度增大、流速变慢, 不能及时冲刷掉铸嘴壁表面挂渣, 使得铸嘴壁上的夹渣不断增多, 最终导致铸嘴堵塞。

关键词: 铝液; 连铸连轧; 铸嘴堵塞; 有限元模拟

中图分类号: TG249.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2020)02-0007-06

Cause and Mechanism of Casting Nozzle Clogging During Aluminum Continuous Casting and Rolling

SHEN Ji¹, DENG Tengfei¹, YAO Zhenhua²

(1. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, 2. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The temperature field and velocity field of molten aluminum flowing through the casting nozzle during continuous casting and rolling were simulated by establishing a simulation model. The morphology and composition of the casting nozzle materials after reaction with molten aluminum at different temperatures (850, 900, 950 °C) for different times (2, 4, 6, 8, 10 h) were studied by experiments. The mechanism of the casting nozzle clogging was analyzed. The results show that during the molten aluminum flowing, the temperature gradient of the casting nozzle at the fixed position of an iron plate was higher than that of other regions. The uneven velocity distribution of molten aluminum resulted in uneven temperature distribution, and the temperature of the molten aluminum in contact with the nozzle wall was relatively low, which led to slag hanging easily. Al_2O_3 slag inclusions and silicon were formed by displacement reaction of high temperature molten aluminum with SiO_2 in the nozzle materials. The produced Al_2O_3 would increase the surface roughness of the nozzle wall, and also it would enter the molten aluminum to increase the viscosity and slow down the flow velocity; therefore the slag inclusions on the nozzle wall could not be washed away in time. The slag inclusions on the nozzle wall then continued to increase, and eventually caused the nozzle clogging.

Key words: molten aluminum; continuous casting and rolling; casting nozzle clogging; finite element simulation

0 引言

铝及铝合金具有密度小、强度高、加工性能好及

焊接性能优良等特点, 广泛应用于国民经济和国防军工等领域, 是一种重要的轻质高强结构材料^[1-2]。连铸连轧^[3-6]是目前较为先进的铝成形技术之一, 与传统铸轧方法相比, 能大幅提高金属收得率和铸坯质量, 并节约能源。但是, 由于高水平连铸生产线设备的关键部件目前均需进口, 连铸连轧铝板/带的成本居高不下。

收稿日期: 2019-01-25; 修訂日期: 2019-12-17

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51801140)

作者简介: 沈吉(1998—), 男, 安徽池州人, 硕士研究生

导师(通信作者): 姚振华副教授

铸嘴是将铝熔体送入连铸机的关键部件,属于消耗性产品,在实际生产中容易发生堵塞,而一旦堵塞,必须停机清理或更换后才能继续生产,这极大地降低了生产效率。为此,一些学者对连铸机铸嘴挂渣堵塞现象进行了研究。陈自伟等^[7]对连铸连轧AA8011铝合金时的堵塞铸嘴进行了组织观察与成分分析,发现该铝合金熔体中的杂质在接触到铸嘴表面时因温度降低而不断析出,增大了铸嘴的表面粗糙度,从而引起铸嘴挂渣;卢广玺等^[8]研究了哈兹列特连铸连轧AA5052铝合金过程中铸嘴挂渣的成分,并通过热力学计算分析了铸嘴挂渣的形成机理。然而,上述研究主要通过对铸嘴及挂渣的成分进行分析来反推铸嘴堵塞的机理,而鲜有通过研究高温铝液与铸嘴材料的反应来分析堵塞现象并探索挂渣形成机制的报道。为此,作者一方面采用有限元方法模拟了连铸连轧过程中铝液流经铸嘴时的温度场及速度场,另一方面通过试验研究了铸嘴材料和纯铝片在不同温度反应不同时间后的形貌和成分,综合分析了挂渣长大的机理。这对于明确铸嘴堵塞原因,改进铸嘴材料及其结构以提高生产效率有着重要的现实意义。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

试验用铝片材料为A837078纯铝,厚度为0.2 mm,纯度为99.99%,由上海麦克林生化科技有限公司提供;铸嘴材料由洛阳豫港龙泉高精度铝板带有限公司提供。采用荷兰PANalytical.B.V型波长色散型X射线荧光光谱仪测定其主要成分,结果见表1。

表1 铸嘴材料的主要成分(质量分数)

Table 1 Main composition of nozzle material (mass) %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	其他
83.119	12.110	0.615	0.037	0.057	0.256	1.423	0.057	2.326

从铸嘴材料上截取直径17 mm,厚度3 mm的圆柱形试样并置于氧化铝陶瓷坩埚中,在试样上放置铝片(质量3.5 g),盖上氧化铝陶瓷盖后放入TL1700型管式气氛烧结炉中,模拟铝液流经铸嘴时与铸嘴材料的反应过程。坩埚位于K型热电偶顶端的正下方,抽3次真空使真空度低于0.1 Pa,每次抽真空后均通入还原性气体(体积比为95:5的氩气和氢气)直至反应结束,气体流量为0.2 L·h⁻¹,反应温度分别为850,900,950 °C,反应时间分别为2,4,6,8,10 h,反应结束后以5 °C·min⁻¹的速率冷至室温。

1.2 试验方法

取与铝片反应后的铸嘴试样,在100 °C下保温12 h,使用D/max-RA型转靶X射线衍射仪(XRD)测定试样表面的物相组成,采用铜靶,K_{α1}射线,扫描速率10 (°)·min⁻¹,工作电压40 kV,工作电流30 mA,扫描范围5°~80°。采用QUANTA FEG 450型场发射环境扫描电镜(SEM)观察试样表面及截面微观形貌,利用附带的EDAX/TEAMTM型能谱仪(EDS)分析表面微区成分。

2 铝液在铸嘴中流动的有限元模拟

在workbench19.2平台上,分别通过SpaceClaim、Mesh、Fluent软件建立三维实体模型、划分网格及进行后处理,对铸嘴型腔内铝液的实际流动过程进行温度场与速度场的模拟计算。

建立的铸嘴三维实体模型和有限元模型如图1所示。铸嘴轮廓尺寸为255.5 mm×95.0 mm×18.0 mm(长×宽×高),铸嘴型腔尺寸为255.5 mm×66.5 mm×8.5 mm,连铸生产时铸嘴被尺寸为95.0 mm×45.0 mm×5.0 mm的铁板固定。有限元模型的网格尺寸均为0.5 mm。为了提高模型计算精度,型腔内采用沿铝液流动方向的结构网格,其他区域均采用四面体网格。为了反映铝液在铸嘴中的流动状况及铸嘴和铁板之间的传热过程,在铝液与铸嘴材料接触的边界层、铸嘴材料与铁板的边界层上添加了共节点网格。

在模拟时假设铝液流场全过程稳定,入料口处

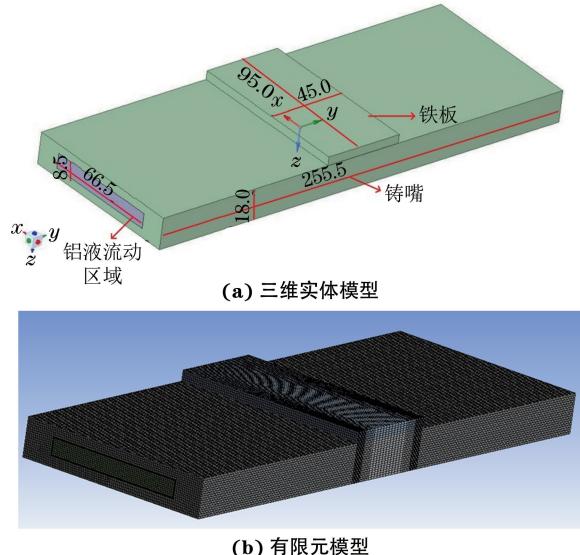


图1 铸嘴的三维实体模型以及网格划分后的有限元模型

Fig.1 Three-dimensional solid model (a) and finite element model after meshing (b) of casting nozzle

流体速度分布均匀,且不考虑铝液流入铸嘴时分流的影响和铝液中的化学反应。铝液在铸嘴中流动时属于共轭传热,涉及铝液与铸嘴材料、铸嘴材料与铁板之间的热传导,以及铸嘴材料、铁板与空气之间的热对流。在采用 Fluent 软件计算温度场时,涉及的材料性能参数主要包括铝液的密度、黏度、比热容、热导率,以及铸嘴材料和铁板的密度、比热容和热导率。采用 LabsysSTA 型高温同步热分析仪和 LFA457 型激光导热仪测定铸嘴材料在 273.15~1 073.15 K 时的比热容,并计算热导率,结果见表 2。

表 2 铸嘴材料的热导率和比热容

Table 2 Thermal conductivity and specific heat capacity of casting nozzle material

温度/K	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
301.35	783	0.276
371.85	908	0.326
574.85	1 024	0.371
775.45	1 086	0.428
975.55	1 131	0.549
1 075.05	1 155	0.645
1 174.65	1 179	0.751

由表 2 中的数据拟合得到铸嘴材料热导率、比热容与温度的关系式分别为

$$\lambda = 0.33505 - 2.7532 \times 10^{-4} T + 5.2613 \times 10^{-7} T^2 \quad (1)$$

$$C_p = 0.52637 + 1.11 \times 10^{-3} T - 4.87194 \times 10^{-7} T^2 \quad (2)$$

式中: λ 为铸嘴材料的热导率; C_p 为铸嘴材料的比热容; T 为温度。

从文献[9]中获取铝液的黏度 η ,拟合得到其与温度的关系式为

$$\eta = 2.185 + 10^{-8} \exp(106.36/T) \quad (3)$$

有限元模拟时,铝液、铸嘴材料和铁板的密度以及铝液和铁板的比热容、热导率均为定值。铝液的密度、比热容和热导率分别为 $2371 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $893 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $92 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;铸嘴材料的密度为 $1918 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;铁板的密度、比热容和热导率分别为 $7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $460 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $46.52 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。铸嘴材料的热导率、比热容和铝液的黏度均随温度的变化而变化,模拟时需在相应参数处分别导入式(1)、式(2)和式(3)。

流体的流动状态可以分为层流和湍流,主要由雷诺数 Re ^[10] 决定,当 Re 大于 2 070 时为湍流模型。 Re 的计算公式为

$$Re = \frac{vL}{D} = \frac{4vA}{DS} \quad (4)$$

式中: v 为流体截面平均速度; L 为特征长度(水力直径); D 为流体运动黏度; A 为过流断面面积; S 为过流断面上流体与固体接触的周长。

在单位时间内流入铸嘴的铝液质量等于单位时间内形成铸轧板的质量,因此

$$m_1 = q\rho_1 = v_1 L_1 h_1 \rho_s \quad (5)$$

$$q = vA \quad (6)$$

式中: m_1 为单位时间内流入铸嘴的铝液质量; q 为通过截面的铝液流量; ρ_1 为铝液密度; v_1 为铸轧速度; L_1 为铸轧板宽度; h_1 为铸轧板厚度; ρ_s 为铸轧板密度。

式(4)~式(6)中不同物理量的取值^[11]如下: $A = 565.25 \text{ mm}^2$, $S = 150 \text{ mm}$, $\rho_1 = 2371 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $v_1 = 0.95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $L_1 = 95.0 \text{ mm}$, $h_1 = 8.5 \text{ mm}$, $\rho_s = 2703 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $D = 0.717 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。由此计算得到 Re 为 22 700, 大于 2 070, 因此模拟时采用湍流模型。铝液流动的截面平均速度(进口速度) $v = 1.08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 进口温度为 1 073.15 K。

3 结果与讨论

3.1 连铸过程中温度场与速度场模拟结果

图 2 中 x , y 坐标位置见图 1(a)。由图 2 可知:在 x 轴方向上(横截面)铸嘴的最低温度为 974.19 K, 最高温度为 1 073.15 K;在 y 轴方向上(纵截面)铁板固定位置处铸嘴的最低温度为 799.01 K, 最高温度为 1 073.15 K, 其他区域最低温度为 763.46 K, 最

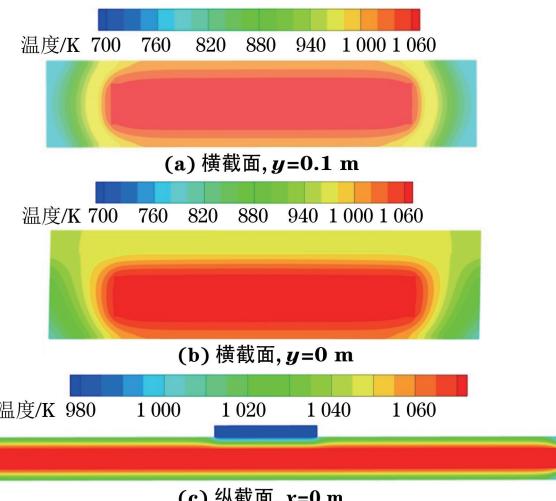


图 2 铝液在铸嘴中流动时的横截面和纵截面温度场

Fig. 2 Temperature fields of cross section (a-b) and longitudinal section (c) when the molten aluminum was flowing in the casting nozzle

高温度为1 073.15 K。在铁板固定位置处,铸嘴的温度梯度比其他区域的大,堵塞情况也比其他区域的严重。这是由于铁的热导率比铸嘴材料的大,即铁板的散热更快,其固定区域的温度更低,并且此处压力也相对较大,因此铝液流经该区域时黏度增大,流动变慢,从而加快了该区域堵塞。

由图3可知:铁板固定处铸嘴结构的最低温度为916.74 K,最高温度为985.86 K;其他区域的最低温度为673.15 K,与铝液接触部位的最高温度为1 063.16 K,出口温度仅比入口低295.15 K。由此可知,铸嘴材料的保温性能优良。

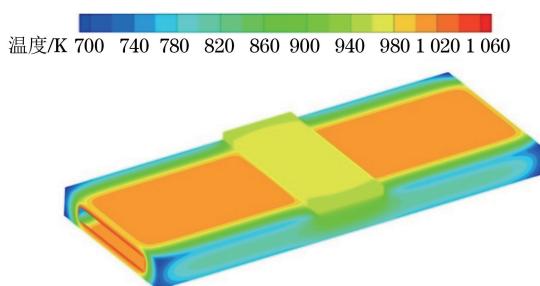


图3 铝液流动时铸嘴结构的温度场

Fig.3 Temperature field of casting nozzle solid structure when the molten aluminum was flowing

由图4可知,在接近铸嘴内壁处流体的最低速度为0.166 m·s⁻¹,在z方向中心区域最高速度为1.351 m·s⁻¹。这种速度分布的不均匀必然会导致温度分布的不均匀^[12],推测z方向中心区域的温度要比内壁处高10 ℃以上。与铸嘴内壁接触的铝液温度低且流速慢,更容易与铸嘴材料发生反应,从而加剧铸嘴堵塞。另外,在实际生产过程中,铝液流动速度和温度分布的不均匀会导致铝液在铸轧结晶时产生偏析,在铝板上产生明显的条纹,不利于铝板质量的提高。

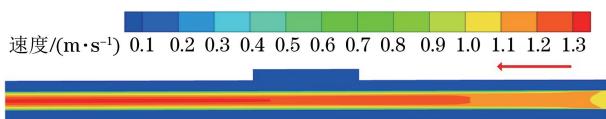


图4 铸嘴内部铝液的流动速度场

Fig.4 Velocity distribution of molten aluminum flowing inside the casting nozzle

3.2 宏观形貌

由图5可以看出,在不同温度下反应不同时间后,铸嘴材料表面几乎都出现了黑色物质。这与实际连铸生产后铁板固定区域铸嘴内壁存在较多黑点的形貌(见图6)存在相似性。

使用ImageJ软件测定试样表面黑色物质的面积。由图7可以看出,随着温度的升高和时间的延

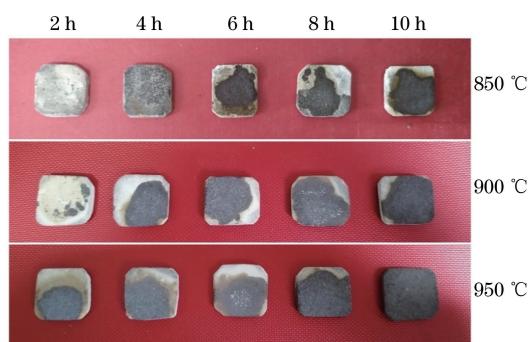


图5 铸嘴材料与铝液在不同温度反应不同时间后的宏观形貌

Fig.5 Macromorphology of casting nozzle materials after reaction with molten aluminum at different temperatures for different times

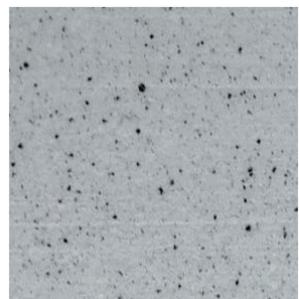


图6 实际连铸生产后铁板固定处铸嘴内壁的表面形貌

Fig.6 Morphology of inner-surface of casting nozzle at the fixed position of iron plate after actual continuous casting

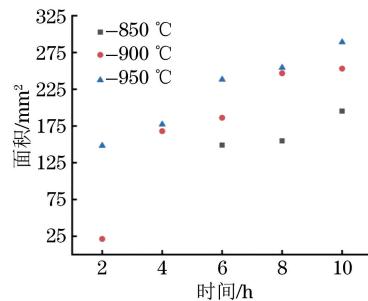


图7 不同温度反应不同时间后铸嘴材料表面黑色物质的面积

Fig.7 Areas of dark substances on surface of casting nozzle material after reaction at different temperatures for different times

长,铸嘴材料表面黑色物质的生成量增多、面积变大。

3.3 物相组成

在不同温度下与铝液反应不同时间后,铸嘴材料表面黑色物质的物相组成和微观形貌相似,后文均以在950 ℃反应12 h的试样为例进行说明。由图8可知:铸嘴材料的主要物相为莫来石($3\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}2\text{SiO}_2$)和石英,与铝液反应后表面生成的黑色物质的主要物相为 Al_2O_3 、硅、铝。铸嘴材料与铝发生反应后,莫来石和石英相消失,出现了硅、铝单质和大量 Al_2O_3 相。

3.4 微观形貌及微区成分

由图9可以看出:铸嘴材料表面的莫来石相呈纤维状交织^[13],直径在125~250 nm;黑色物质主

要呈团块状,其上有孔隙且附着有较多颗粒状和棒状物质,黑色物质边界处为针棒状纤维和块状团聚物混合相。由此分析认为,铸嘴表面的莫来石纤维

与铝液反应后产生了形状不规则、多间隙的块状团聚物,增大了铸嘴内壁的表面粗糙度,导致挂渣形成后难以被铝液冲刷掉,从而加剧了铸嘴堵塞。

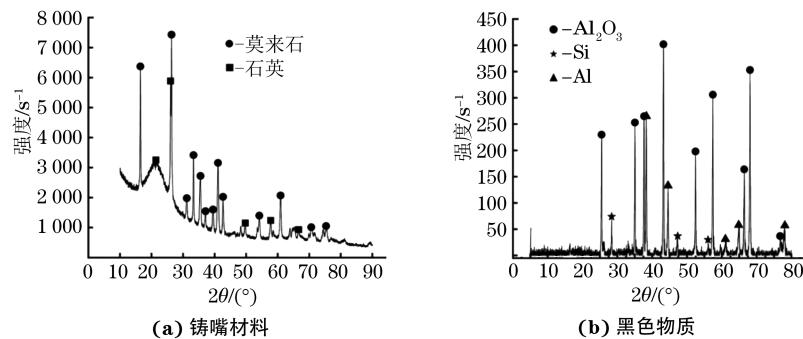


图 8 铸嘴材料及其与铝液在 950 °C 反应 12 h 生成黑色物质的 XRD 谱

Fig.8 XRD patterns of casting nozzle materials (a) and dark substances (b) produced by reaction of casting nozzle material with molten aluminum at 950 °C for 12 h

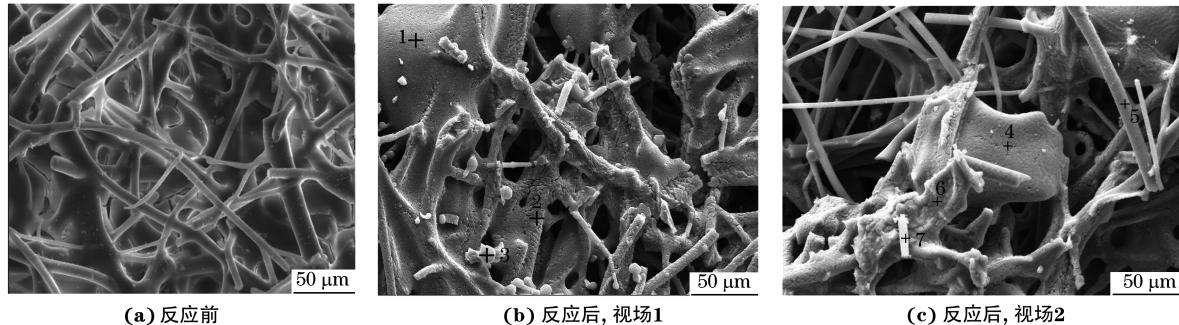


图 9 与铝液在 950 °C 保温 12 h 反应前后铸嘴材料的表面 SEM 形貌

Fig.9 SEM morphology of casting nozzle material surface before (a) and after (b-c) reaction with molten aluminum at 950 °C for 12 h: (b) field of view 1 and (c) field of view 2

由表 3 结合图 9 可以看出:位置 1 和位置 2 处的主要化学成分为铝和氧,说明黑色物质中的团聚物主要为 Al_2O_3 ;位置 3 处的主要化学成分为铝和硅,说明颗粒状物质为硅、铝单质;位置 4 和位置 7 处的主要成分为铝、硅、氧,推测该处块状和棒状物质含有莫来石和 Al_2O_3 ,此处为反应结合界面;位置 5 处为

表 3 与铝液反应后铸嘴材料表面不同位置的 EDS 分析结果(质量分数)

Table 3 EDS analysis results of different positions on surface of casting nozzle material after reaction with molten aluminum (mass)

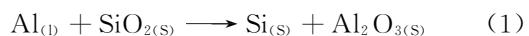
测试位置	O	Al	Si	%
1	35.29	64.71	—	
2	35.50	64.50	—	
3	—	95.12	4.88	
4	36.84	51.91	11.25	
5	35.42	52.02	12.56	
6	14.86	85.14	—	
7	48.80	27.27	23.93	

铸嘴材料中未发生反应的莫来石纤维,位置 6 处为反应析出的 Al_2O_3 颗粒。

由图 10 可以看出:与铝液反应后铸嘴材料的截面由具有明显分界的浅色区域和深色区域组成,其中浅色区域为铸嘴材料,深色区域为反应生成物;截面上的氧元素分布较为均匀;铝元素大部分以 Al_2O_3 的形式分布在反应后的深色区域,少部分分布在铸嘴材料中,以莫来石相呈现;硅元素主要以石英的形式分布在铸嘴材料中,少量分布在反应后的深色区域,主要以反应生成的单质硅形式存在。

3.5 铸嘴挂渣的组成及堵塞机理

综上所述,在一定温度下铝液与铸嘴材料中的 SiO_2 发生置换反应生成单质硅和 Al_2O_3 ,反应方程为



由热力学计算手册^[14]可知,在 850~950 °C 时,式(1)中各物质的吉布斯自由能 G 均小于 0;在氧势图^[15]中, Al_2O_3 比 SiO_2 位置要低,铝对氧的亲和力比硅对氧的亲和力强。故 850~950 °C 时该置换

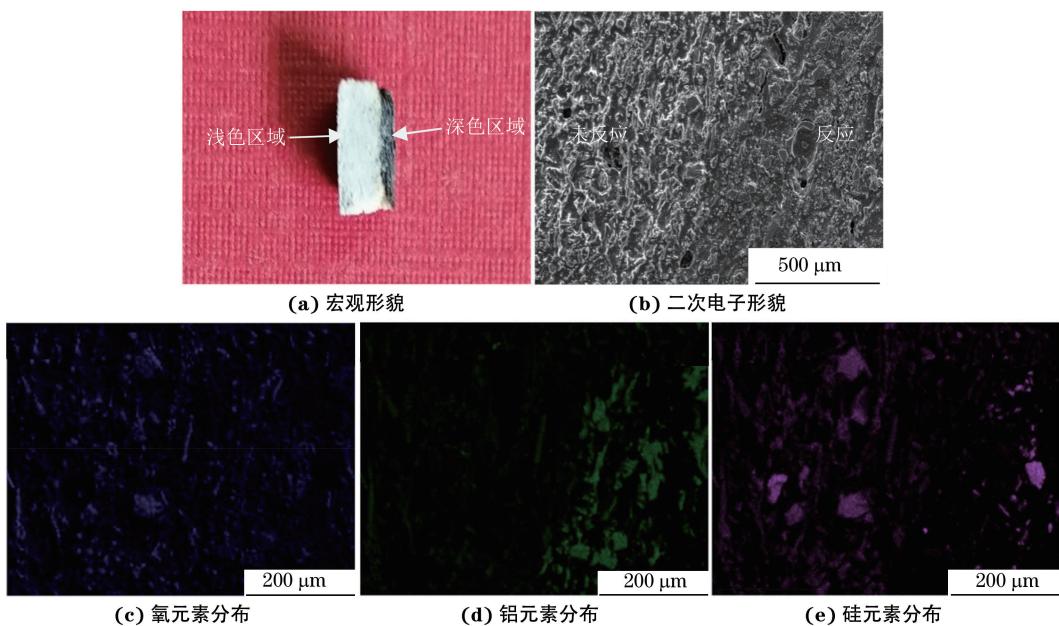


图 10 与铝液在 950 °C 反应 12 h 后铸嘴材料的截面形貌及元素面分布

Fig. 10 Morphology and element distribution of cross section of nozzle material after reaction with molten aluminum at 950 °C for 12 h:

(a) macromorphology; (b) secondary electron morphology; (c) distribution of O; (d) distribution of Al and (e) distribution of Si

反应能够发生,且温度越高, ΔG 越负,反应越容易发生。因此,随着反应温度的升高及反应时间的延长,铸嘴材料表面的黑色物质越来越多。

在连铸过程中铝液会不断与铸嘴材料发生反应形成 Al_2O_3 夹渣。在生产初始阶段,铸嘴内壁表面光滑,铝液流动速度较快,能够不断冲刷掉内壁表面的反应产物(Al_2O_3 和单质硅)。 Al_2O_3 和单质硅与铝形成的合金(硅含量较少时可部分溶于铝液)由此进入铝液,同时与铸嘴内壁接触的铝液温度较低,这两种因素共同作用造成铝液黏度升高、流速下降^[16],从而降低了铝液的冲刷能力,导致铸嘴内壁上的夹渣越来越多,型腔越来越狭窄。此外,由于铸嘴材料是一种多孔材料,铝液与铸嘴材料的反应不仅发生在表面,还会发生在内部。在铝液的冲刷作用下反应产物脱离时会在铸嘴表面形成微小凹坑,且反应生成物疏松多孔,这些均会增大铸嘴内壁的表面粗糙度;而熔融铝液在粗糙的表面更容易发生凝固。因此,随着连铸的不断进行,铸嘴内壁表面的夹渣越来越多,铝液通道不断变窄,最终导致铝液不能流动,铸嘴堵塞。

4 结 论

(1) 有限元计算结果表明在铝液流动过程中,铁板固定处铸嘴的温度较其他区域的低,温度梯度

较大,压力较大,导致该处铝液黏度增大、流速变慢,容易发生挂渣;铸嘴型腔中间区域的铝液流动速度比铸嘴内壁附近的大,导致铝液流动过程中温度分布不均匀,与铸嘴壁接触区域的铝液普遍温度较低,易发生挂渣堵塞。

(2) 铝液与铸嘴材料中的 SiO_2 会发生置换反应,生成 Al_2O_3 夹渣和单质硅; Al_2O_3 一方面会造成铸嘴内壁表面粗糙度增大,另一方面会进入铝液使其黏度增大、流速变慢,不能及时冲刷掉铸嘴内壁表面挂渣,从而使得内壁上的 Al_2O_3 夹渣不断增多,铝液通道不断变窄,最终导致铸嘴堵塞。

参 考 文 献:

- [1] 彭开香,童朝南,董洁,等.1 400 m 铝带箔冷轧机板形控制系统[J].冶金自动化,2004,28(4):32-35.
- [2] 旷亚非,许岩,李国希.铝及其合金材料表面处理研究进展[J].电镀与精饰,2000,22(1):16-20.
- [3] 关绍康.铝合金板带连铸连轧节能新工艺关键技术研究[C]//铝冶炼节能新技术研讨会论文集.焦作:河南省科学技术协会,2011: 5-30.
- [4] WU Y M, XIONG J, LAI R M, et al. The microstructure evolution of an Al-Mg-Si-Mn-Cu-Ce alloy during homogenization[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 475(1/2): 332-338.
- [5] HAGA T, NISHIYAMA T, SUZUKI S. Strip casting of A5182 alloy using a melt drag twin-roll caster[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 133(1/2): 103-107.

(下转第 17 页)

可知：脆化态 HR3C 钢管的缺口敏感度随应力集中系数呈单调非线性变化；当应力集中系数大于 3.5 时，脆化态钢管的缺口敏感度低于 1，说明材料对缺口较为敏感。

4 结 论

(1) 供货态未服役 HR3C 钢管无缺口敏感性，服役 5 万 h 后钢管发生脆化，对 V 型缺口的敏感性变大。

(2) 脆化态 HR3C 钢管对 V 型缺口的敏感性大于对 U 型缺口的；对于角度 60°、长度 1.00 mm、底部曲率半径 0.10~0.25 mm 或角度 45°、长度 0.50~1.00 mm、底部曲率半径 0.25 mm 的 V 型缺口，脆化态 HR3C 钢管较为敏感。

(3) 当缺口应力集中系数大于 3.5 时，脆化态 HR3C 钢管对缺口较为敏感。

参考文献：

- [1] 牟春华, 杨征, 赵新宝, 等. 超超临界锅炉用 HR3C 耐热钢的研究进展[J]. 热加工工艺, 2018, 47(2):23-27.
- [2] ZIELIŃSKI A, SROKA M, HERNAS A, et al. The effect of long-term impact of elevated temperature on changes in microstructure and mechanical properties of HR3C steel[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2016, 61(2):761-766.
- [3] 于鸿森, 董建新, 谢锡善. 新型奥氏体耐热钢 HR3C 的研究进展[J]. 世界钢铁, 2010, 10(2):42-49.
- [4] 李明, 强文江, 郑强, 等. 奥氏体钢氧化层影响因素及检测技术[C]// 电力系统第十届无损检测学术会议论文集. 长沙: 中国电机工程学会, 2005.
- [5] 王慧. HR3C 钢中 σ 相析出动力学研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [6] 赵军, 刘亚芬, 朱立新, 等. HR3C 超级不锈钢焊接工艺试验研究及应用[C]// 2011 年安徽省科协年会——机械工程分年会论文集. 合肥: 安徽省机械工程学会, 2011.
- [7] 吴刚. 超超临界火电用新型奥氏体耐热钢高温氧化性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [8] 杜宝帅, 魏玉忠, 张忠文, 等. 高温服役 4.2 万小时超超临界机组用 HR3C 钢组织与性能[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(12):84-89.
- [9] 罗坤杰, 赵彦芬, 张路, 等. 超超临界锅炉用奥氏体耐热钢 HR3C 的脆化机理[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(7):79-86.
- [10] 郑子杰. HR3C 钢管时效冲击韧性大幅降低的原因分析[J]. 锅炉技术, 2011, 42(4):46-48.
- [11] 陈国宏, 潘家栋, 王家庆, 等. 650 °C 时效 HR3C 耐热钢的显微组织与高温拉伸性能[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(2):104-109.
- [12] ISEDA A, OKADA H, SEMBA H, et al. Long term creep properties and microstructure of SUPER304H, TP347HFG and HR3C for A-USC boilers[J]. Energy Materials, 2007, 2(4):199-206.
- [13] 刘世刚, 黄桥生, 陈琨. 1000 MW 超超临界机组高温再热器管弯头失效分析[J]. 电力科技与环保, 2017, 33(2):60-62.
- [14] 刘海军, 曹睿, 何洪, 等. K418 合金缺口敏感性研究[J]. 稀有金属, 2010, 34(5):699-704.
- [15] 静永娟, 高帆, 付明杰, 等. 单一取向层片组织 TiAl 合金缺口敏感性的研究[J]. 物理测试, 2010, 28(2):24-27.
- [16] 李昂, 张毅, 高蔚, 等. 缺口效应对 7178 铝合金拉伸性能及断口形貌的影响[C]// 中国核学会 2017 年学术年会论文集第 5 册(核材料分卷、辐射防护分卷). 威海: 中国核协会, 2017.

(上接第 12 页)

- [6] HAGA T, SUZUKI S. Study on high-speed twin-roll caster for aluminum alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 143/144: 895-900.
- [7] 陈自伟, 吴立鸿, 卢广玺, 等. AA8011 铝合金高通量连铸连轧铸嘴堵塞的原因[J]. 轻合金加工技术, 2017, 45(7):32-36.
- [8] 卢广玺, 王鹏, 关绍康. 哈兹列特连铸连轧 AA5052 铝合金铸嘴挂渣成分及形成机理研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(5):112-115.
- [9] 康志成, 毛大垣, 邓圭玲. 铝熔体粘度测量的研究[J]. 湖南有色金属, 2001, 17(2): 18-20.
- [10] 韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUENT: 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004:9-10.
- [11] 刘慎, 王西科, 关绍康. 铝连续铸轧铸嘴型腔的数值模拟及

- 其结构优化[J]. 有色金属加工, 2013, 42(4):44-46.
- [12] 郭彦宏, 王金辉, 李戬. 铝合金双辊铸轧铸嘴内部熔体流动数值模拟及对表面质量的影响[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2012(16):60-61.
- [13] 谭宏斌. 连续莫来石纤维应用与制备[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(3):71-75.
- [14] 叶大伦, 胡建华. 实用无机物热力学数据手册(第二版)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002:987-992.
- [15] 黄希祐. 钢铁冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.
- [16] DENG T F, FANG J Y, LAN S. The relation of pyroplastic deformation and liquid viscosity in vitreous ceramics [J]. Journal of the Australian Ceramic Society, 2017, 53 (2): 635-643.