

铁铬铝合金电渣重熔锭内裂纹的分析和工艺改进措施

白李国¹ 李京社¹ 杨树峰¹ 李刚^{1,2} 杨宏博¹

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 北京首钢吉安泰新材料有限公司,北京 102200)

摘要 通过工业试验研究了铁铬铝合金(质量分数:0.024C,0.26Si,0.17Mn,20.1Cr,5.3Al,0.05RE)200 kg 电渣重熔结晶器的结构、冷却强度、电压电流、缓冷方式等对内裂纹的影响。结果表明,通过将原结晶器底水箱改为间接水冷装置,提高进水量,将电流、电压分别由原来的5 400 A 和 55 V 降至5 000 A 和 50 V 以降低熔池温度,采用膨胀珍珠岩覆盖剂保温均热等措施,使电渣锭低倍组织致密均匀,无内裂纹。

关键词 铁铬铝合金 电渣重熔 内裂纹 工艺措施

Analysis on Internal Cracks in Fe-Cr-Al Alloy Electroslag Remelting Ingot and Improved Process Measure

Bai Ligu¹, Li Jingshe¹, Yang Shufeng¹, Li Gang^{1,2} and Yang Hongbo¹

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083;

2 Beijing Shougang Gitane New Materials Co Ltd, Beijing 102200)

Abstract The effect of structure of electroslag remelting (ESR) mold, cooling intensity, voltage, current and slow-cooling method on internal cracks of 200 kg ESR ingot of Fe-Cr-Al alloy (mass fraction: 0.024C, 0.26Si, 0.17Mn, 20.1Cr, 5.3Al, 0.05RE) has been studied by pilot-scale production. Results show that with the measures including modifying original mold bottom water box to indirect water cooling unit, increasing inlet water rate, decreasing voltage and current respectively from original 5 400 A and 55 V to 5 000 A and 50 V to lower bath temperature, and using expanding perlite shielding material for holding and soaking, the macrostructure of ESR ingot is compact and uniform, and there is no internal cracks.

Material Index Fe-Cr-Al Alloy, Electroslag Remelting, Internal Cracks, Process Measures

铁铬铝合金在使用过程通常被加工成超细丝,对铸锭的洁净度和内部质量要求都很高,目前主要通过电渣重熔工艺进行精炼^[1-4]。在电渣重熔冶炼过程中如果工艺参数控制不当,就很容易产生内裂纹。内裂纹藏在电渣锭内部,不易被发现,严重影响材料的力学性能连续性和成材率^[5-6]。

1 工艺路线和内裂纹形貌及分布

试验所用电极是由电弧炉冶炼浇铸而成,电极直径为 140 mm,电渣重熔炉为 200 kg 锭型的单臂电渣炉,主要冶炼参数及测定数据如表 1 所示,Fe-Cr-Al 钢主要成分如表 2 所示。

通过对 200 kg 锭型的 Fe-Cr-Al 钢电渣锭进行解剖侵蚀,发现锭身内裂纹较多。Fe-Cr-Al 钢锭身的裂纹如图 1 所示。

该电渣锭的裂纹均为内裂,钢锭的外边缘部位没有裂纹产生,裂纹主要出现在锭身 1/4 半径以内,产生在钢液最后凝固的部位。裂纹多沿熔池形状产生,部分裂纹与熔池形状相反,相互构成菱形裂纹,长度最长可达到 230 mm;存在大量的龟裂,集中在下半部锭身中心部位,龟裂密度较大。

2 工艺改进措施及效果

2.1 调整冷却结构

表 1 电渣重熔过程冶炼参数及测定数据

Table 1 Melting parameters and measured data in ESR process

锭型/ kg	冶炼时 间/min	渣量/ kg	渣层厚 度/mm	渣成分/ %	水压/ MPa	进水管尺 寸/mm	电流/ A	电压/ V	水温/°C		渣温/ °C	电极直 径/mm	缓冷 方式	脱锭时锭身温度/°C		
									进口	出口				上部	中部	下部
200	82	12	130	24Al ₂ O ₃ - 5CaO- 71CaF ₂	4	20	5 400	55	27	50 ~ 56	1 840	140	沙埋	854	749	370

通讯作者:杨树峰,博士,讲师,北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083

表 2 铁铬铝合金主要成分/%

Table 2 Main analysis of Fe-Cr-Al alloy / %

C	Si	Mn	Al	Ni	RE	Cr
0.024	0.26	0.17	5.3	0.1	0.05	20.1

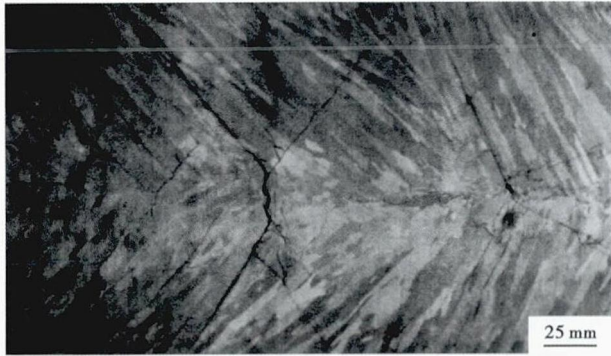


图 1 200 kg Fe-Cr-Al 电渣锭锭身裂纹形貌及分布

Fig. 1 Morphology and distribution of internal cracks in 200 kg ESR ingot body

为降低电渣锭下半部应力,减少电渣锭纵向应力差,特将原结晶器底水箱更换为间接式水冷装置,以减小底部的冷却强度和电渣锭的热裂倾向。

间接冷却装置底部是冷却水箱,顶部是安放结晶器的底座,冷却水箱和底座之间是一个约 30 mm 高的导热性能良好的紫铜柱。此冷却装置由于电渣锭与底水箱不直接接触,底部的冷却强度会显著减小。

脱锭后分别对原工艺和采用间接冷却装置后冶炼的电渣锭的底部、中部和顶部进行测温(图 2)。工艺表明用间接冷却方式冶炼的电渣锭脱锭后比原工艺的纵向温差明显减小,特别是底部温度,由原来的 370 °C 提高到 600 °C 左右。这极大的减小了电渣锭纵向的应力差,减小锭子的热裂倾向。

由图 3(a)可知,采用间接冷却装置后,底部冷却强度大幅度下降,纵向温差减小,应力减小,因此裂纹产生的几率降低。将电渣锭解剖后,只在电渣

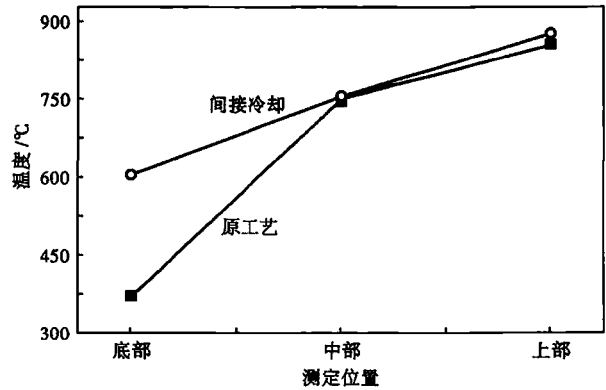


图 2 原工艺和间接冷却工艺电渣重熔锭底、中、上部测试的温度

Fig. 2 Temperature measured at bottom, middle and top of ESR ingot with original cooling process and indirect cooling process

锭的中心部位出现裂纹。

2.2 增大冷却强度

为了研究冷却强度对晶粒大小的影响,将进水管由原来的 20 mm 改为 33.33 mm 进行冶炼,其它工艺参数与原工艺保持一致,电压电流分别为 55 V 和 5 400 A,进行温度为 27 °C,电极直径 140 mm,渣量 12 kg。由图 3(b)可以看出,提高冷却水进水量后,钢锭凝固速度加快,二次枝晶间距减小,得到的电渣锭更为致密均匀,裂纹缺陷去除效果较好,只有少量大裂纹出现。

2.3 调整熔池温度

电极直径、进水管直径以及冷却水进水温度等工艺参数与原工艺保持一致,分别为 140 mm、20 mm 和 27 °C,分别将电流由原来的 5 400 A 降至 5 000 A,电压由原来的 55 V 降至 50 V 进行冶炼。

由图 3(c)可以看出,降低电压电流以后,熔池温度下降,同样的冷却强度下,冷却水需要带走的热量变少,冷却速率上升,晶粒形核数目增多,晶粒得到细化,裂纹产生几率降低,冶炼得到的电渣锭只在

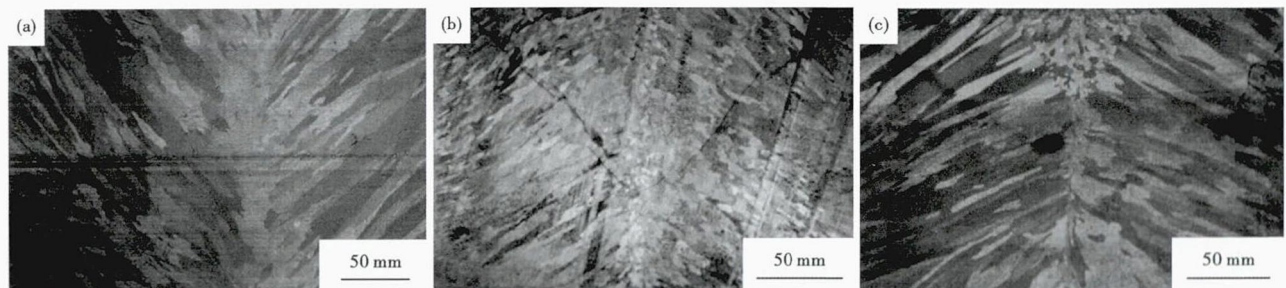


图 3 采用间接冷却装置(a),提高冷却水进水量(b)和降低熔池温度(c)的电渣重熔锭的冶金效果

Fig. 3 Metallurgical effect for ESR ingot using internal cooling unit (a), increasing inlet cooling water rate (b) and decreasing bath temperature (c)

表 3 各种覆盖剂的热物性参数

Table 3 Thermo-physical parameters of various shielding materials

覆盖剂	容重/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	导热系数/ [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]	蓄热系数/ [$\text{W} \cdot (\text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$]
沙石	2 500	0.31	-
蛭石	300	0.14	1.79
珍珠岩	120	0.07	1.85

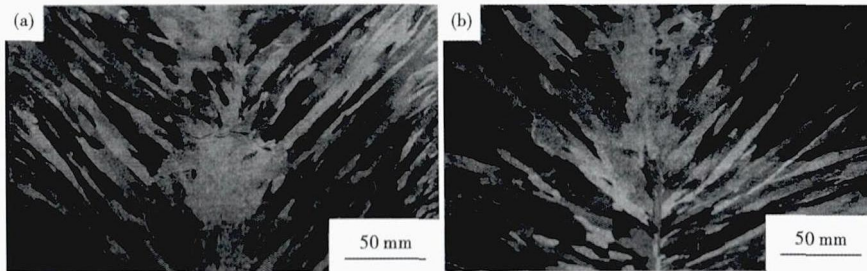


图 4 采用蛭石(a)和膨胀珍珠岩(b)保温缓冷后的 Fe-Cr-Al ESR 锭低倍组织
Fig. 4 Morphology of macrostructure of Fe-Cr-Al ESR ingot with holding and slow cooling by vermiculite (a) and expanded perlite (b)

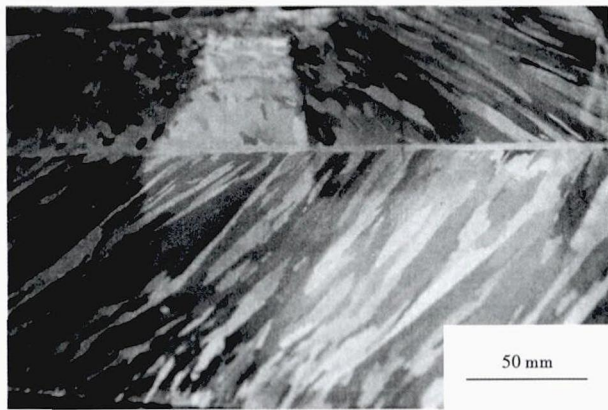


图 5 改进工艺后的 Fe-Cr-Al 电渣锭低倍组织
Fig. 5 Morphology of macrostructure of Fe-Cr-Al ESR ingot with improved process

局部少量微裂纹产生。

2.4 改善保温缓冷措施

脱锭后原工艺采用沙石掩埋,保温均热效果不理想。为了改善保温均热效果,在冶炼工艺不变的条件脱锭后分别采用蛭石和膨胀珍珠岩(表 3)作为覆盖剂进行保温均热处理。

蛭石对小断面铁铬铝钢锭缓冷速度仍然过快,保温均热后裂纹虽比原工艺大幅度减少,但仍有少许微裂纹出现(图 4a)。

膨胀珍珠岩具有更低的导热系数和较高蓄热系数,钢锭表层向外界散热速度更慢,且很少吸收钢锭热量,使钢锭自身热量能够保持长久,基本能满足电渣锭实现“均温”所需的热量和时间,使钢锭最低温度区域的底部温度回升,钢锭各点温度梯度更小,减

小热应力倾向,得到几乎无裂纹电渣锭(图 4b)。

2.5 工艺优化冶炼试验

结晶器底部采用间接冷却装置,进水管由 20 mm 管改为 33.33 mm 管,电压 50 V,电流 5 000 A,进行优化调整冶炼,冶炼结束后脱锭采用膨胀珍珠岩进行保温均热,重熔的电渣锭低倍组织见图 5。

由图 5 可以看出,经过对冷却结构、冷却强度、工艺参数和保温均热方式等工艺参数调整后,应力得到有效释放和去除,冶炼出的电渣锭,组织均匀致密,没有裂纹缺陷产生。

3 结论

(1)调整水冷结构能够有效降低结晶器底部的冷却强度,缩小结晶器上下部位的冷却强度差,减少钢锭纵向应力,

减小电渣锭的热裂倾向。

(2)降低电压电流,调节熔池温度,能有效的增加形核数量,细化晶粒;采用膨胀珍珠岩作为保温均热覆盖剂,能有效均匀锭身纵向温度,释放应力,消除应力缺陷。

(3)综合采用间接冷却装置,提高进水量,降低熔池温度,脱锭后置入膨胀珍珠岩内进行保温均热,得到的电渣锭低倍组织致密均匀,没有裂纹产生。

国家自然科学基金资助(51304016)

参考文献

- [1] 陆锡才. 真空自耗与熔铸[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2000: 35-39.
- [2] 施 璇. 电渣熔铸的质量与成型规律的探讨[J]. 北京钢铁学院学报, 1980(2): 32-43.
- [3] 柳百城, 黄天佑. 中国材料工程大典[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 504-507.
- [4] Ares A E, Schvezov C E. Influence of Solidification Thermal Parameters on the Columnar-to-equiaxed Transition of Aluminum-zinc and Zinc-aluminum Alloys[J]. Metall Mater Trans A, 2007, 38A: 1485-1492.
- [5] Ares A E, Gueijman S F, Caram R, et al. Analysis of Solidification Parameters during Solidification of Lead and Aluminum Base Alloys [J]. Journal of Cryst Growth, 2005, 275(1): 319-327.
- [6] Martorano M A, Beckermann C, Gandin Ch A. A Solutal Interaction Mechanism for the Columnar-to-equiaxed Transition in Alloy Solidification[J]. Metall Mater Trans A, 2003, 34A: 1657-1662.

白李国(1984-),男,博士研究生(北京科技大学),2008年河北理工大学(本科)毕业,金属材料的凝固研究。

收稿日期:2013-09-05