

含水金属盐化合物对覆膜砂强度及抗吸湿性影响

罗圆圆^{1,2} 夏 露^{1,2} 张友寿^{1,2} 夏增权^{1,2} 胡汉基^{1,2}

(1.湖北工业大学材料与化学工程学院;2. 绿色轻工材料湖北省重点实验室)

摘 要 含水金属盐化合物是制备磷酸盐干态覆膜砂的关键原材料之一。采用射芯机制样加热固化成型,研究了含水金属盐化合物的种类及其加入量对干态覆膜砂试样的抗拉强度和抗吸湿性的影响。结果表明,同时使用九水合柠檬酸镁和二水合磷酸二氢钠两种含水金属盐化合物,覆膜砂试样具有较高的即时强度和较好的抗吸湿性。试样的即时抗拉强度可达 1.72 MPa,在相对湿度为 50%~60% 的恒温恒湿箱中放置 12 h 后试样抗拉强度降幅在 25% 以内。

关键词 含水金属盐化合物;磷酸盐;干态覆膜砂;抗吸湿性

中图分类号 TG242.1 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.09.024

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Metal Salt Aquo-compound on Strength and Humidity Resistance of Coated Sand

Luo Yuanyuan^{1,2}, Xia Lu^{1,2}, Zhang Youshou^{1,2}, Xia Zengquan^{1,2}, Hu Hanji^{1,2}

(1. School of Materials and Chemical Engineering, Hubei University of Technology;
2. Hubei Provincial Key Laboratory of Green Light Industrial Materials)

Abstract: Metal salt aquo-compound is one of the key raw material for preparing phosphate dry coated sand. Dry coated sand was curing heated by core shooting machine, and effects of type and addition of metal salt aquo-compound on tensile strength and humidity resistance of specimens were investigated. The results indicate that the coated sand exhibits higher instant strength and humidity resistance by synergy of trimagnesiumdicitrate nonahydrate and sodium dihydrogen phosphate dihydrate. The instant tensile strength can reach 1.72 MPa, which is reduced by less than 25% after storage in the constant temperature oven with relative humidity of 50%~60% RH for 12 h.

Key Words: Metal Salt Aquo-compound, Phosphate, Dry Coated Sand, Humidity Resistance

磷酸盐干态覆膜砂是一种新型无机覆膜砂,与传统有机树脂作粘结剂的覆膜砂相比,具有无毒环保的特点,与水玻璃砂相比,具有较好的溃散性^[1],与磷酸盐自硬砂^[2]和热硬砂^[3]相比,具有良好的流动性,因此其具有较好的应用前景。目前国内外还没有能够应用于生产的干态无机覆膜砂,近几年来本课题组^[4-6]一直致力于无机磷酸盐干态覆膜砂的研发,取得了一定的成效,同时也存在一些问题,如抗吸湿性较差、覆膜砂制样及浇注过程中会产生 SO₂ 刺激性气体等,在一定程度上无法完全发挥无机覆膜砂的优点。分析表明,刺激性气体主要来源于覆膜砂制备过程中加入的含水金属盐化合物 Al₂(SO₄)₃·18H₂O。本研究在前期研究的基础上,寻找新的含水金属盐化合物,探讨含水金属盐化合物的种类及其加入量对无机磷酸盐干态覆膜砂试样抗拉强

度和抗吸湿性的影响。

1 试验设备与方法

采用的仪器和设备有 DZTW 型调温电热式加热三口反应釜、烧杯、玻璃棒、EX-TECHRH390 精密温湿度仪、HLJT-3380-GX5A-51 热风机、S1105 碾轮机、CF3.8BDE 工业除湿机、YM-100L-1600 空气压缩机、SHY 混砂机(搅拌速度为 200 r/min)、SWG 杠杆式型砂强度测试仪、30 目、40 目网格筛、RXH-I 覆膜砂射芯制样机、FA2204B 电子天平、HWS-80 恒温恒湿培养箱。

试验材料为 85% 的工业 H₃PO₄、Al(OH)₃ 粉末、H₃BO₃、H₂SiO₃、MgO、Y₂O₃、CuO、DTPA、HEDP、纯净水;大林焙烧砂(NBS50/100);十八水合硫酸铝、九水

收稿日期:2022-12-03;修改稿收到日期:2023-01-25
第一作者简介:罗圆圆,男,1998 年出生,硕士研究生,武汉(430068),E-mail:2290304452@qq.com
通信作者:夏露,女,1971 年出生,教授,武汉(430068),E-mail:308006959@qq.com
引用格式:罗圆圆,夏露,张友寿,等. 含水金属盐化合物对覆膜砂强度及抗吸湿性影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(9):1 287-1 291.
LUO Y Y, XIA L, ZHANG Y S, et al. Effects of metal salt aquo-compound on strength and humidity resistance of coated sand[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(9):1 287-1 291.

合柠檬酸镁、二水合磷酸二氢钠、柠檬酸水溶液(柠檬酸:水=1:2)、偶联剂 KH-550、亲水性纳米二氧化硅、硬脂酸钙。

试样抗拉强度测定:冷却后的试样放到 SWG 杠杆式型砂强度测试仪上测抗拉强度,称为即时抗拉强度。

试样抗吸湿性测定:试样放到相对湿度为 50%~60% 的 HWS-80 恒温恒湿培养箱,一段时间(即 X 小时)后进行抗拉强度的测定。

强度下降率的计算:下降率=[(即时抗拉强度- X 小时抗拉强度)/即时抗拉强度] $\times 100\%$

2 试验过程

2.1 磷酸盐粘结剂的合成

磷酸盐粘结剂合成流程见图 1。加热时,温度设为 110℃,纯净水分 3 次加入,每次加水量为总量的 1/3。合成磷酸盐粘结剂的物质较多,每一步澄清后再加入下一步,依次加入 H_3PO_4 、 $Al(OH)_3$ 、 H_3BO_3 、 H_2SiO_3 、 MgO 、 Y_2O_3 、 CuO 、DTPA、HEDP。

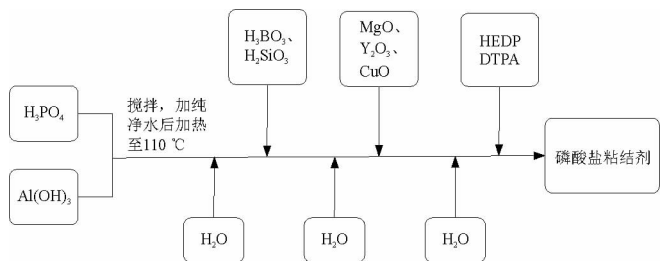


图1 磷酸盐粘结剂的制备流程图

Fig.1 Flow chart of phosphate binder preparation

2.2 覆膜砂的制备

称取 1 000 g 的 50、100 目大林焙烧砂,占砂质量分别为 3% 的磷酸盐粘结剂、1.46% 的柠檬酸水溶液、0.009% 的 SiO_2 以及一定量的含水金属盐化合物(混砂前预先混合备用),0.4% 的偶联剂。首先将原砂加入混砂机中,加入偶联剂混砂 60 s,再加入磷酸盐粘结剂混合液混砂 140 s,即得到混合好的湿态砂;然后将湿态砂倒入碾轮机中通入 45℃ 左右热风干燥 15 min 成散砂,散砂出碾轮机后分别过 30 目和 40 目的网格筛,最后再加入占散砂质量 0.01% 的硬脂酸钙均匀混合,得到干态覆膜砂。

2.3 覆膜砂试样固化成形原理及其制备

无机磷酸盐干态覆膜砂固化成形原理:芯盒加热后使砂粒表面干态粘结膜中的含水金属盐化合物放水,润湿粘结膜并形成粘结桥,将砂粒连结,然后在保温过程中粘结剂脱水固化,砂样获得强度。含水金属盐化合物的种类决定了射芯机的加热温度和保温时间。不同的

含水金属盐化合物因其放水温度及含水量不同,射芯机加热温度也不同;同一种含水金属盐化合物,加热温度越高,含水金属盐化合物释放水的速度越快,保温时间越短,反之,保温时间越长;但射芯机加热温度过高,虽然加热时间短,但砂样表面安定性则较差。

根据含水金属盐化合物的种类,芯盒加热到相应的温度,将干态覆膜砂填入射芯机的射砂筒中,射芯机吹气 4 s 后射砂制样,加热保温相应的时间后试样固化,脱模取样,冷却后测试抗拉强度。每 1 种方案制取 5 个标准试样,取其平均值。

3 试验结果及讨论

3.1 九水合柠檬酸镁加入量的影响

由于磷酸盐砂对环境温湿度比较敏感,为保证改性效果的可比性,在寻找新的含水金属盐化合物时,将十八水合硫酸铝作为对照组。

十八水合硫酸铝的放水温度为 86.5℃^[5],为了使其充分放水,芯盒的加热温度必须高于放水温度;同时芯盒加热温度也不能过高,加热温度过高,砂样表面和心部温差大,会导致砂样表面放水后又快速脱水,表面安定性变差;由于十八水合硫酸铝含水量较高,为了得到形状完整、轮廓清晰的覆膜砂试样,在反复试验的基础上,确定芯盒加热温度为 150℃,保温时间为 210 s。

九水合柠檬酸镁的放水温度不低于 110℃^[7],由于含水量少于十八水合硫酸铝,适当降低芯盒加热温度,以减小试样表面与心部的温差,在不降低试样表面安定性的前提下,适量延长保温时间,增加九水合柠檬酸镁放水率,达到润湿粘结膜的目的。试验表明,使用九水合柠檬酸镁水合物制备的覆膜砂试样较佳的芯盒温度为 125℃,保温时间为 300 s。

图 2 为十八水合硫酸铝、九水合柠檬酸镁的加入量对覆膜砂砂样即时强度的影响及存放不同时间的强度。从图 2a 可以看出,随着十八水合硫酸铝加入量的增加,试样的即时抗拉强度逐渐提高,在加入量超过 3% 时,试样的抗拉强度基本保持不变,在加入量为 3% (0 h) 时,试样的即时抗拉强度为 1.74 MPa。随着存放时间延长,试样的抗拉强度迅速下降,存放 6 h 后,由于砂样大量吸收空气中的水分,砂粒表面粘结膜吸湿软化,导致试样完全失去抗拉强度。

从图 2b 可以看出,随着九水合柠檬酸镁加入量的增加,即时强度逐步提高,但加入量超过 2.5% 后,即时强度的增加并不明显,当加入量为 2.5% 时,试样的即时强度为 1.16 MPa,加入量为 3.5% 时,试样的即时强度为 1.20 MPa。可能是,在芯盒加热时,随着九水合柠檬酸镁加入量的增加,虽然也增加了结晶水的总量,使粘

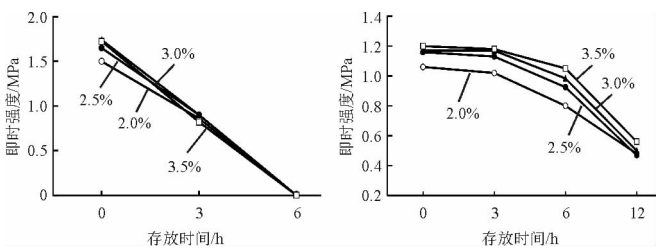


图2 不同加入量的十八水合硫酸铝和九水合柠檬酸镁砂样随存放不同时间的抗拉强度

Fig.2 Tensile strength variation of different $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ and $\text{C}_{12}\text{H}_{10}\text{Mg}_3\text{O}_{14} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ sand specimens with storage time

结膜润湿更充分,但也有更多的柠檬酸镁与粘结剂发生反应生成磷酸氢镁,原来具有优良粘结性能的 AlPO_4 、 $\text{Al}_2(\text{HPO}_4)_3$ 等有一部分转变成粘结性能较弱的 MgHPO_4 ,所以即时强度不再随九水合柠檬酸镁的增加而提高。

表1和表2为十八水合硫酸铝、九水合柠檬酸镁加入量对试样即时强度下降率的影响。

表1 十八水合硫酸铝加入量对试样即时强度下降率的影响
Tab.1 Effect of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ addition on reduction rate of instant strength

十八水合硫酸铝加入量/%	3 h下降率/%	6 h下降率/%
2.0	42.67	100
2.5	45.45	100
3.0	48.28	100
3.5	52.46	100

表2 九水合柠檬酸镁加入量对试样即时强度下降率的影响
Tab.2 Effect of $\text{C}_{12}\text{H}_{10}\text{Mg}_3\text{O}_{14} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ addition on reduction rate of instant strength

九水合柠檬酸镁加入量/%	3 h下降率/%	6 h下降率/%	12 h下降率/%
2.0	3.77	24.53	54.72
2.5	2.59	20.26	59.48
3.0	0	15.98	57.26
3.5	1.67	12.50	53.33

从表1可以看出,随着十八水合硫酸铝加入量增加,下降率不断增大。在加入量为3.5%,3h时下降率为52.46%;6h时不论加入量为多少,试样的下降率均为100%。十八水合硫酸铝是酸性物质,加入到磷酸盐粘结剂中会进一步增加粘结剂体系的酸性,降低了体系中和度,加入量越多,试样的即时强度下降率越大,抗吸湿性也越差。

从表2可以看出,随着九水合柠檬酸镁加入量增加,试样即时强度的下降率整体上不断减小,在3h时,不同加入量的试样即时强度下降率变化不大,在6h时,3.5%加入量的试样即时强度下降率最小,为12.50%。在12h时,3.5%加入量的试样即时强度下降

率也最小,下降率为53.33%。这是由于九水合柠檬酸镁的加入量越多,和粘结剂之间发生反应生成的 MgHPO_4 非水溶性产物越多,所以抗吸湿性越好^[8]。

从以上分析可知,九水合柠檬酸镁可以提高覆膜砂试样的抗吸湿性,但由于放水量偏少,粘结膜润湿不够,形成的粘结桥较少,即时强度低于十八水合硫酸铝。因此,需要进一步引入含水金属盐化合物。

3.2 九水合柠檬酸镁和二水合磷酸二氢钠复合的影响

在含水金属盐化合物中,尽管二水合磷酸二氢钠含水量较低,在磷酸盐干态覆膜砂制备中单独使用不能使砂样成形,但与九水合柠檬酸镁联合使用,既可以弥补九水合柠檬酸镁放水量的不足,又能与九水合柠檬酸镁反应,生成磷酸氢镁非水溶性产物,有提高砂样抗吸湿性的可能。研究表明,过多的镁离子增加磷酸盐粘结膜的脆性,对试样强度不利^[1,8]。结合图2b和表2可知,将九水合柠檬酸镁的加入量固定为占原砂质量的2.5%,探究二水合磷酸二氢钠的加入量对覆膜砂性能的影响。

试验中控制射芯机加热温度为135℃,保温时间为210s。这是因为引入了二水合磷酸二氢钠,增加了总放水量,所以芯盒加热温度也随之提高;由于二水合磷酸二氢钠的放水温度为60℃,二水合磷酸二氢钠比九水合柠檬酸镁优先放水,导致粘结剂膜和九水合柠檬酸镁处于湿润环境中,芯盒温度达到135℃,也会加快九水合柠檬酸镁放水,因此保温时间缩短到210s。

图3为二水合磷酸二氢钠对覆膜砂砂样即时强度的影响及砂样存放不同时间的强度。可以看出,随着二水合磷酸二氢钠加入量增加,试样的即时强度逐渐升高,在二水合磷酸二氢钠加入量为1.5%时,试样的即时强度达到最大值,为1.72MPa,但继续增加二水合磷酸二氢钠的加入量,强度又出现下降。表3为二水合磷酸二氢钠加入量对试样即时强度下降率的影响。可以看出,3h时,试样抗拉强度基本保持不变,甚至还有小幅上升;当6h时,试样即时强度下降率较小;12h时,

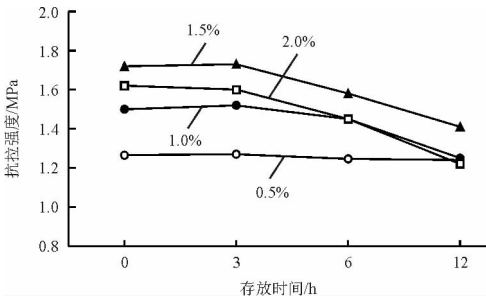


图3 不同加入量的二水合磷酸二氢钠砂样不同存放时间的抗拉强度

Fig.3 Tensile strength variation of different $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sand specimens with storage time

试样即时强度有一定幅度下降,但下降率基本保持在 25% 以内。同时随着二水合磷酸二氢钠加入量的增加,试样即时强度下降幅度越来越大,可能原因是当九水合柠檬酸镁加入量固定时,即其与粘结剂和二水合磷酸二氢钠发生反应的量固定,二者达到平衡点后,再随着二水合磷酸二氢钠加入量的增加,加热固化产物中的分子靠“O”键连结的数量增加,“O”键与水分子的亲和力很强,极易与空气中的水分子形成氢键,从而降低粘结剂的粘结强度,导致抗吸湿性变差。

表 3 二水合磷酸二氢钠加入量对砂样即时强度下降率的影响

Tab.3 Effect of $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ addition on reduction rate of instant strength			
二水合磷酸二氢钠加入量/%	3 h 下降率/%	6 h 下降率/%	12 h 下降率/%
0.5	-0.39	1.50	1.98
1.0	-1.32	3.33	16.67
1.5	-0.58	8.14	18.02
2.0	1.23	10.49	24.69

3.3 关于含水金属盐化合物作用的机理分析

图 4 是九水合柠檬酸镁与二水合磷酸二氢钠加热反应产物的红外图谱。与化学专业数据库^[9]中三水合磷酸氢镁标准图谱对比可以看出,两种红外图谱在 4 000~400 cm^{-1} 波长范围内的走势很相似。标准图谱在 1 248、1 164、1 067、896、722 和 499 cm^{-1} 处吸收峰的位置与九水合柠檬酸镁和二水合磷酸二氢钠加热反应产物在 1 269、1 182、1 073、891、726 和 526 cm^{-1} 处吸收峰的位置很接近,可以认为九水合柠檬酸镁与二水合磷酸二氢钠加热反应产物中有磷酸氢镁。

图 5 是不同种类的含水金属盐化合物加入到相同磷酸盐粘结体系中反应产物的红外光谱。可以看出,十八水合硫酸铝、九水合柠檬酸镁、九水合柠檬酸镁加二水合磷酸二氢钠都具有一些共同的吸收峰,其中,1 646 cm^{-1} 和 1 637 cm^{-1} 处吸收峰均为结晶水 H-O-H 弯曲振动峰,506、524 和 520 cm^{-1} 处吸收峰均为 PO_4^{3-} 振动吸收峰。十八水合硫酸铝单独所具有的吸收峰有 1 139 cm^{-1} 处吸收峰为 SO_4^{2-} 振动吸收峰。九水合柠檬酸镁与九水合柠檬酸镁加二水合磷酸二氢钠红外图谱走势相似,吸收峰的位置相近。在 1 723 cm^{-1} 处吸收峰和 1 728 cm^{-1} 处吸收峰为 C=O 键伸缩振动吸收峰,1 416 cm^{-1} 处吸收峰为 COO^- 吸收峰,1 087 cm^{-1} 和 1 091 cm^{-1} 处吸收峰处吸收峰为 HPO_4^{2-} 振动吸收峰^[9-12]。由此可知,九水合柠檬酸镁与九水合柠檬酸镁加二水合磷酸二氢钠比十八水合硫酸铝最主要是多了一个 HPO_4^{2-} 的吸收峰,这是由于在芯盒加热时,九水合柠檬酸镁与二水合磷酸二氢钠和粘结剂之间发生反应生成磷酸氢镁非水溶性产物,形成的胶凝产物受湿度

的影响较小,使原来粘结桥中热固化产物中分子主要是靠 O 键连结成桥,变成现在一部分以 Mg 键为桥。因为 O 键与水分子的亲和力很强,极易与空气中的水分子形成氢键,从而破坏粘结剂的粘结强度,而 Mg 键不易与水分子结合,从而提高抗吸湿性^[1]。同时图 5 中九水合柠檬酸镁谱图在 1 723、1 637、1 087、524 cm^{-1} 处的吸收峰,九水合柠檬酸镁+二水合磷酸二氢钠谱图在 1 728、1 637、1 091、520 cm^{-1} 处的吸收峰与三水合磷酸氢镁标准图谱在 1 706、1 650、1 067、499 cm^{-1} 处的吸收峰位置很相近,可认为有磷酸氢镁产生,从而提高了砂样的抗吸湿性。

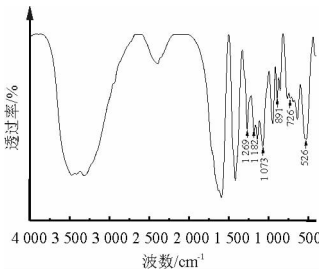


图 4 九水合柠檬酸镁和二水合磷酸二氢钠反应产物的 FTIR 谱图

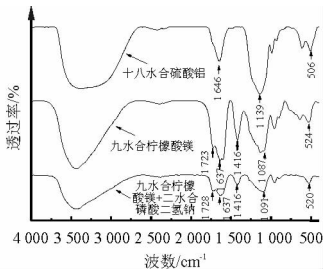


图 5 不同含水金属盐化合物的磷酸盐粘结体系反应产物的 FTIR 谱图

Fig.4 FTIR spectra of reaction products of $\text{C}_{12}\text{H}_{10}\text{Mg}_3\text{O}_{14} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ and $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Fig.5 FTIR spectra of phosphate binding system reaction products of different metal salt aquo-compounds

4 结 论

(1)含水金属盐化合物对磷酸盐干态覆膜砂试样的即时强度和抗吸湿性影响较大。当含水金属盐化合物采用九水合柠檬酸镁时,试样的即时强度较低,最高为 1.2 MPa,但抗吸湿性明显好于十八水合硫酸铝,存放 6 h 后,试样即时强度的下降率由 100% 降为 20% 左右,存放 12 h 后,试样即时强度的下降率为 55% 左右。

(2)当九水合柠檬酸镁和二水合磷酸二氢钠两种含水金属盐化合物联合加入时,覆膜砂试样具有较高的即时强度,最高可达 1.72 MPa,同时也具有良好的抗吸湿性,存放 12 h 后,试样即时强度的下降率在 25% 以内。

(3)同时使用九水合柠檬酸镁和二水合磷酸二氢钠两种含水金属盐化合物时,在加热固化过程中粘结体系发生化学反应,生成了磷酸氢镁非水溶性产物,形成的胶凝产物受湿度影响较小,因此,覆膜砂砂样具有较好的抗吸湿性。

参 考 文 献

[1] 张友寿. 磷酸盐无机铸造粘结剂研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.

SP700 钛合金铸锭中 Fe 含量控制

张开发^{1,2} 负鹏飞^{1,2,3} 李佳佳^{1,2} 刘 华^{1,2} 弋 可^{1,2} 王超南^{1,2} 李 维^{1,2}

(1.西部钛业有限责任公司; 2.钛合金加工技术国家地方联合工程研究中心; 3.西安交通大学材料科学与工程学院)

摘 要 对比了两种工艺路线下真空自耗电弧熔炼 SP700 铸锭中的 Fe 元素分布和宏观组织,发现 Fe 在钛合金中呈现明显的正偏析,铸锭冒口心部 Fe 含量为 2.38%,其截面极差为 0.58%,锭底心部为 1.90%,其截面极差为 0.23%,Fe 含量沿着凝固方向增加,易在铸锭心部和头部富集。通过对工艺路线进行调整,选用合适的中间合金和布料方式,提高了 Fe 在电极块中的均匀性,同时采用强冷却、低电流、大搅拌和长补缩的熔炼参数有效地抑制了 Fe 的结晶偏析。改进后铸锭成分分布更加均匀,冒口心部 Fe 含量为 2.03%,其截面极差为 0.21%,且晶粒尺寸细化、组织更加均匀,Fe 在等轴晶区内的偏析减弱。

关键词 SP700 铸锭;真空自耗电弧熔炼;Fe 元素;偏析;凝固组织

中图分类号 TF823;TG146.23

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.09.025

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Control of Fe Content in SP700 Titanium Alloy Ingot

Zhang Kaifa^{1,2}, Yun Pengfei^{1,2,3}, Li Jiajia^{1,2}, Liu Hua^{1,2}, Yi Ke^{1,2}, Wang Chaonan^{1,2}, Li Wei^{1,2}

(1.Western Titanium Technologies Co., Ltd.; 2.National and Local Joint Engineering Research Center for Titanium Alloy Processing Technology; 3.School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University)

Abstract: Fe distribution and macrostructure of SP700 ingot melted by vacuum arc remelting under different processes were analyzed comparatively. The results indicate that Fe in the titanium alloy presents an obvious positive segregation trend. Fe content in the core of the ingot riser is 2.38%, and cross-section range is 0.58%, while that in the core of the ingot bottom is 1.90%, and the cross-section range is 0.23%. Fe content is increased along the solidification direction and aggregate in the core and head of the ingot. The uniformity of Fe element in the electrode block is improved by adjusting the process route and selecting the appropriate intermediate alloy and distribution method. Meanwhile, Fe segregation is effectively inhibited by taking melting parameters such as strong cooling boundary, 1 000 melting current, strong stirring intensity, and long feeding time. After optimization, the composition distribution of the ingot is more uniform, and Fe content in the center of the riser is 2.03% with cross-section range of 0.21%. The grain size is reduced with homogeneous structure, and Fe segregation in the equiaxed crystal region is weakened.

Key Words: SP700 Ingot, Vacuum Arc Remelting, Fe Element, Segregation, Solidified Structure

收稿日期:2023-03-26;修改稿收到日期:2023-05-09

第一作者简介:张开发,男,1995 年出生,助理工程师,西安(710201),E-mail:1480660696@qq.com

通信作者:负鹏飞,男,1985 年出生,高级工程师,西安(710201),E-mail:yunpengfei@126.com

引用格式:张开发,负鹏飞,李佳佳,等. SP700 钛合金铸锭中 Fe 含量控制[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(9):1 291-1 296.

ZHANG K F, YUN P F, LI J J, et al. Control of Fe content in SP700 titanium alloy ingot[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(9):1 291-1 296.

[2] 商宏飞,张友寿,夏露,等.型砂磷酸盐粘结剂用氧化镁固化剂的研究[J].特种铸造及有色合金,2010,30(2):96,165-166.

[3] 喻双喜,张友寿,夏露,等.磷酸盐无机铸造粘结剂改性及其热固化砂研究[J].特种铸造及有色合金,2020,40(10):1 067-1 071.

[4] 蔡鹏.磷酸盐无机覆膜砂研究[D].武汉:湖北工业大学,2020.

[5] 唐文卓,张友寿,夏露.辅料对磷酸盐粘结剂覆膜砂性能的影响[J].铸造,2021,70(6):712-716.

[6] 夏增权,张友寿,夏露,等.无机磷酸盐干态覆膜砂用粘结剂的改性研究[J].铸造,2022,71(9):1 111-1 115.

[7] 李北,周勇,许贵珍,等.一种柠檬酸镁晶体及其生产方法.中国:CN106854145A[P].2017-06-16.

[8] 夏露,黄晋,张友寿,等.铝磷酸盐热硬砂抗吸湿机理探讨[J].铸造,2011,60(2):188-191.

[9] 陈宁,高祀建,霍冀川,等.不同固化剂对磷酸铬铝固化行为的影响[J].硅酸盐通报,2014,33(6):1 347-1 353.

[10] 陈智鹏.几种过渡金属磷酸盐功能材料的合成及其热分解动力学研究[D].南宁:广西大学,2013.

[11] 黄霞.镁磷酸盐发射性能调控及其用于日间辐射制冷研究[D].广州:华南理工大学,2020.

[12] 李娜.铝磷酸盐新型辐射制冷材料的制备、结构与性能[D].广州:华南理工大学,2019.

(编辑:彭瑾)