

· 试验研究 ·

NS1402 合金 ESR 7.85 t 电极棒缩孔优化的数值模拟

谢鑫¹ 严波² 曾建华¹ 王建¹ 吴国荣¹ 马晓涛¹ 龙木军³

(1 攀钢集团研究院有限公司,攀枝花 617000;2 攀钢集团长城特殊钢有限公司,江油 621704;

3 重庆大学材料科学和工程学院,重庆 400044)

摘要 NS1402 合金 (/% : 0.01C, 0.15Si, 0.34Mn, 0.004P, 0.004S, 22.33Cr, 40.07Ni, 3.22Mo, 2.29Cu, 0.87Ti, 0.11Al, 30.6Fe) 7.85 t 电渣重熔用 40 t EAF + VOD 冶炼的电极棒凝固收缩过程中容易产生严重的缩孔缺陷。借助商业软件 CAD, GEOMESH 和 MeshCAST, 建立了该电极棒的充型和凝固模型, 得出模拟中心缩孔直径为 248 mm, 与实测值比较, 相对误差为 4.6%。结果表明, 将电极棒倒置可以减小缩孔直径 32.2%; 随着绝热板长度的增加, 缩孔减轻, 将绝热板长度增加 200 mm, 可以基本消除冒口下的缩孔。

关键词 NS1402 合金 7.85 t 电极棒 缩孔 数值模拟 优化

Numerical Simulation on Optimization of Shrinkage Cavity in ESR 7.85 t Electrode of Alloy NS1402

Xie Xin¹, Yan Bo², Zeng Jianhua¹, Wang Jian¹, Wu Guorong¹, Ma Xiaotao¹ and Long Mujun³

(1 Pangang Group Research Institute Co Ltd, Panzhihua 617000; 2 Changcheng Special Steel Co Ltd, Pangang Group, Jiangyou 621704; 3 School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract The serious shrinkage cavity defect in 7.85 t electrode of alloy NS1402 (/% : 0.01C, 0.15Si, 0.34Mn, 0.004P, 0.004S, 22.33Cr, 40.07Ni, 3.22Mo, 2.29Cu, 0.87Ti, 0.11Al, 30.6Fe) melted by 40 t EAF + VOD for ESR forms easily in solidification process. By using commercial software CAD, GEOMESH and MeshCAST a model of the electrode filling and solidifying has been established to get the simulated diameter of center shrinkage cavity being 248 mm, as compared with measured value the relative error is 4.6%. Results show that as the electrode is located upside down, the diameter of shrinkage cavity decreases by 32.2%; with increasing the length of insulation board the shrinkage cavity reduces, and with increasing the length of insulation board by 200 mm, the shrinkage cavity below hot top is basically eliminated.

Material Index Alloy NS1402, 7.85 t Electrode, Shrinkage Cavity, Numerical Simulation, Optimization

NS1402 合金是一种用 Ti 稳定化的 Ni-Fe-Cr-Mo-Cu 高温耐蚀合金, 最早由 Inconel 公司于 1952 年开发成功^[1]。它具有良好的耐一般腐蚀和局部腐蚀性能, 及良好的工艺性能, 主要用于氢裂化和渣油加氢装置中的高压空冷器主体材料^[2], 具有较高附加值。

这种高温耐蚀合金采用模铸方锭或扁锭直接轧制板材时, 容易产生裂纹、中心疏松和夹杂等缺陷。目前, 主要通过模铸电极棒, 然后电渣重熔, 最后轧制的方式来生产。经过电渣重熔渣洗和逐步冷却, 可以得到夹杂少, 并且裂纹和疏松缺陷低的合金棒材。

然而, 通过模铸生产该高温耐蚀合金电极棒还有很多问题。如中心缩孔深度较大, 最大可达到 1 m; 缩孔半径较大, 超过 40 mm。这种缺陷会严重影响电渣重熔过程电压的稳定, 不利于电渣重熔工艺的顺行^[3]。而目前还未见该合金模铸电极棒缩孔

缺陷的相关研究报道。

因此, 本文通过数值模拟, 研究 NS1402 合金电极棒模铸凝固过程的传热行为, 优化工艺参数, 以减轻缩孔缺陷, 提高该高温耐蚀合金的铸锭质量和成材率, 为后续工艺顺行奠定基础。

1 模型的建立与验证

钢厂通过 40 t EAF + VOD 冶炼 NS1402 合金, 然后用下注法生产 5 支 7.85 t 电极棒。电极棒上端直径 510 mm, 下端直径 600 mm, 高 4 000 mm。考虑电极棒几何的对称性, 取 1/4 进行建模。使用 CAD 软件构建电极棒的 3D 模型, 用 GEOMESH 和 MeshCAST 软件对 3D 图形进行网格划分^[4], 网格数约 16.7 万。包括了绝热板、金属模、铸锭和模底砖。

对铸锭和金属模系统进行传热模拟, 采用如下假设:

(1) 该液态合金流动为粘性不可压缩流动, 导热系数各向同性; (2) 锭模、绝热板、模底砖的初始

温度为 60 ℃。

钢锭的浇注是一个准湍流流动,描述钢水流动的方程有连续性方程、动量方程 (Navier-Stokes 方程)、以及描述湍流的 $k-\epsilon$ 方程。

在数值模拟中,具有不同导热系数的金属模、钢锭、绝热板、模底砖和钢锭模内部及相互间的传热可以采用一个综合传热方程表示,控制方程的形式为:

$$\rho C_p \frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + S_0$$

式中: $a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$ - 热传导项; $\rho C_p \frac{\partial t}{\partial \tau}$ - 非稳态项,它代表局部温度随时间的变化导致的影响; S_0 - 方程源项,代表凝固潜热的释放。

对于该浇注系统,主要有合金、金属模、模底砖和绝热板 4 种材料。利用软件的计算模块,根据合金成分 (表 1),可以计算该合金主要物性参数随温

表 1 NS1402 合金电极棒的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of electrode of alloy NS1402 /%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	Al	Fe
0.01	0.15	0.34	0.004	0.004	22.33	40.07	3.22	2.29	0.87	0.11	30.6

度的变化情况,如图 1 所示;同时,金属模为灰口铸铁,其中 C 含量为 3.7%,Mn 为 1.5%,Si 为 1.2%,也可计算出其相应物性参数;另外假设绝热板和模底砖的密度为 2 300 kg/m³,其导热系数、热容与温度成线性关系。

另外,金属模与钢液的界面换热系数为 2 000 W/(m²·K),钢液与绝热板、模底砖的界面换热系数为 100 W/(m²·K),金属模与绝热板、模底砖的界面换热系数为 10 W/(m²·K)^[5]。此外,钢锭模外表面采用第三类边界条件,环境温度为 30 ℃,换热系数为 10 W/(m²·K)。发热剂加入量为 2 kg/t,其发热效率为 8 000 kJ/kg,点火后最高温度为

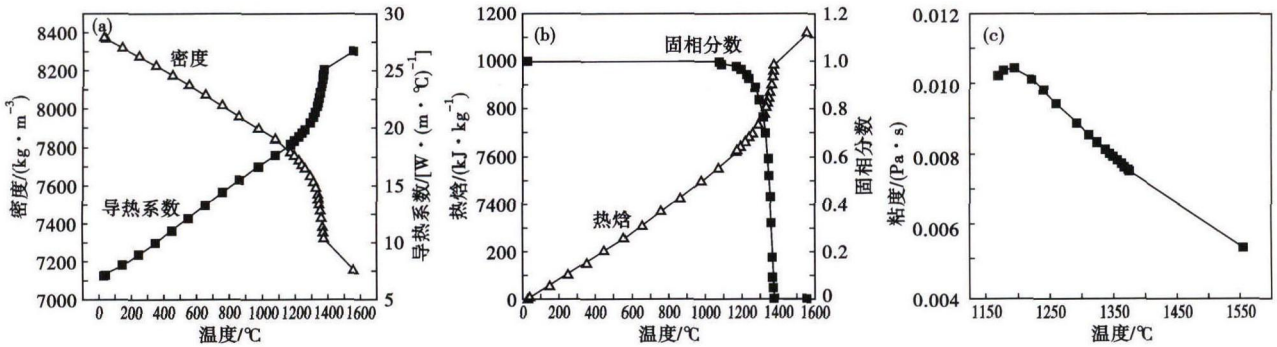


图 1 NS1402 合金的物性参数:(a)密度与导热系数,(b)热焓与固相分数,(c)粘度

Fig. 1 Physical parameters of alloy NS1402: (a) density and heat transfer coefficient; (b) thermal enthalpy and solid phase percentage; (c) viscosity

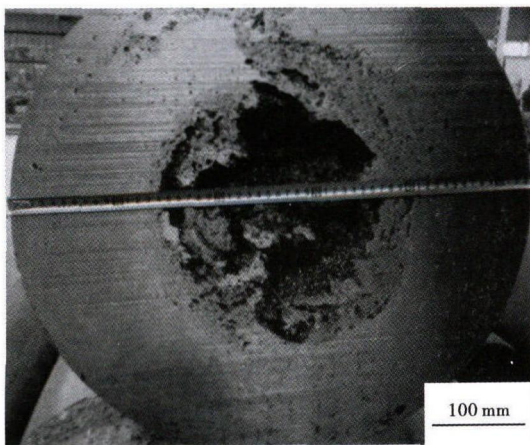


图 2 电极棒冒口下 40 mm 的缩孔形貌

Fig. 2 Morphology of shrinkage cavity of electrode below hot top 40 mm

1 350 ℃,点火开始至最高温度时间 9 min,发热剂持续发热时间 40 min。另外高温合金的浇注温度 1 510 ℃,锭身和冒口浇注时间分别是 840 s 和 300 s。

对于该电极棒,切开冒口后发现铸锭内部有很大的缩孔存在,如图 2 所示。据此,将实测缩孔与仿真缩孔进行了对比。实际生产中切割位置在冒口下 40 mm,测量得到其中心缩孔直径 260 mm (图 2);而仿真的结果 248 mm (图 3),两者相差 4.6%。因此认为该数学模型比较准确,可以开展后续的仿真计算。

2 电极棒的凝固特征

图 4(a) 是电极棒凝固时间,图 4(b) 是电极棒

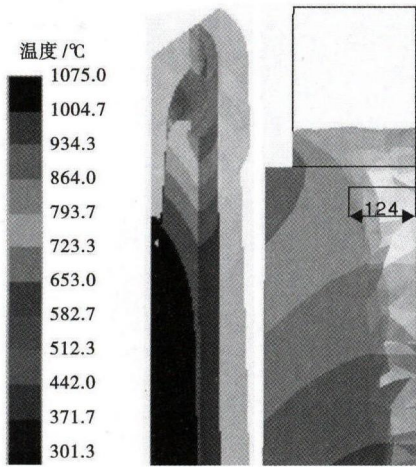


图 3 仿真的电极冒口和缩孔模拟云图

Fig. 3 Cloud diagram of simulated electrode hot top and shrinkage cavity

的完全凝固时的温度场。可以看出,完全凝固的时间为 25 368 s。另外,电极棒凝固过程中随着时间的增加,金属模中间区域的温度升高最快,说明热量主要从这一区域散发到环境中。但是由于浇注的持续进行,热量也会不断补充,铸锭中心温度仍然最高;此外,随着凝固的进行,绝热板下部区域铸锭传热明显更快,成为铸锭中上部最先凝固的区域,可能是该位置金属模最薄,热阻最小,并且与大气接触散热较快。这导致铸锭中心区域最后凝固时,钢液补缩不足,从而形成严重的缩孔。冒口下缩孔深度约 900 mm,冒口处缩孔直径 290 mm。

3 缩孔的优化

对于 NS1402 合金电极棒,计算出其冒口与容积比为 5.0%,而一般经验要求在 8% ~ 10%。由此提出两种方案,一是将金属模倒置(冒容比变为

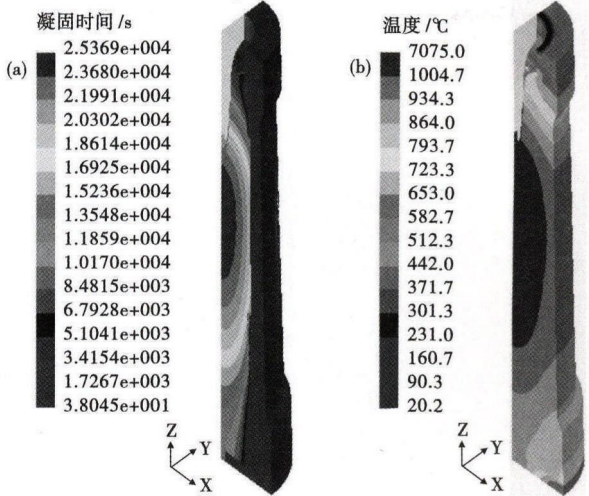


图 4 电极棒的凝固特征:(a) 凝固时间;(b) 温度场

Fig. 4 Characteristics of electrode solidification: (a) solidification time; (b) temperature field

7.2%),将铸锭变为上粗下细,加快下部凝固,减缓上部凝固,增加补缩的可能;另一个方案是增加绝热板高度,在原始高度的基础上分别增加 100 mm 和 200 mm,绝热板高度增加后冒容比分别为 6.9% 和 8.7%。

图 5 为原方案与倒置方案铸锭凝固情况的对比。可以看出,将金属模倒置后铸锭的高温区域下移,并且缩孔形状也有所变化。高温区下移是因为热源本身来自下部,倒置后上下部的散热面积发生改变,综合作用导致温度场有所变化。另外,对于缩孔,倒置后虽然深度变化不大,但冒口底部位置的缩孔直径减小到 168 mm,减小了 32.2%,说明增大冒容比对减轻缩孔有明显的效果。

根据上面的研究,针对倒置方案,保持总浇注时间不变,计算了不同锭身浇注时间电极棒的凝固情

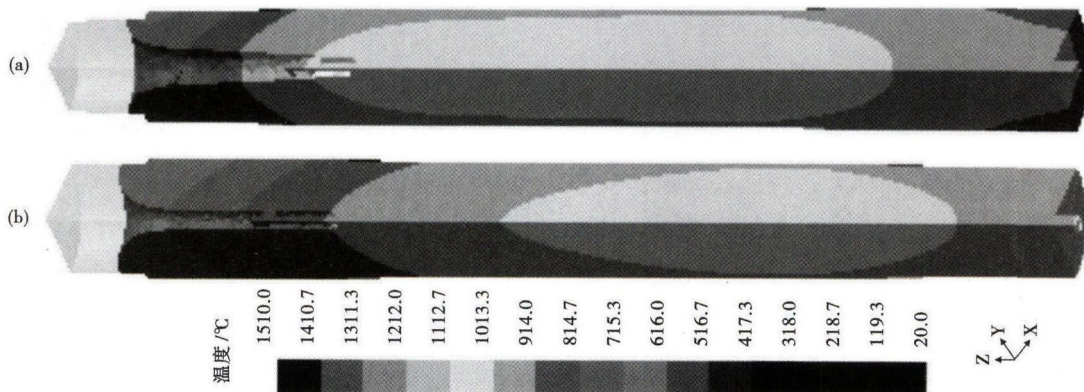


图 5 电极棒的缩孔模拟云图:(a) 原方案;(b) 倒置方案

Fig. 5 Cloud diagram of simulated electrode shrinkage cavity by (a) original scheme and (b) upside down location scheme

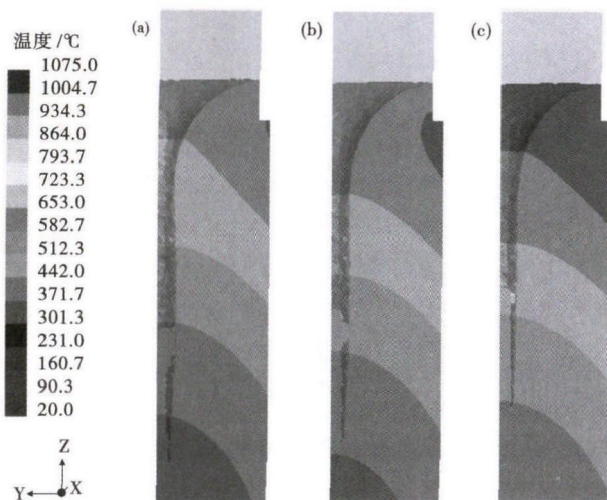


图 6 锭身浇注时间(a)640 s,(b)840 s,(c)1140 s时电极棒的缩孔云图

Fig.6 Cloud diagram of electrode shrinkage cavity by ingot body casting time for 640 s (a), 840 s (b) and 1140 s (c)

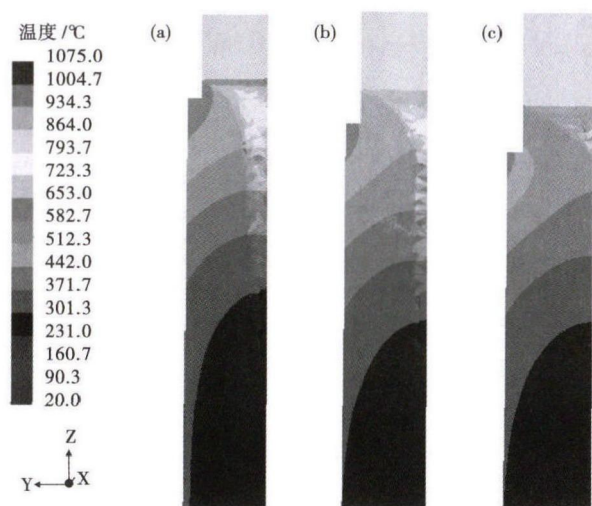


图 7 绝热板长度(a)300 mm,(b)400 mm,(c)500 mm时电极棒浇注的缩孔云图

Fig.7 Cloud diagram of shrinkage cavity of electrode casting with insulating plate length 300 mm (a), 400 mm (b) and 500 mm (c)

况,结果如图 6 所示。可以看出,增加锭身浇注时间,对于铸锭的缩孔深度有所减小,但不显著;而且缩孔直径基本没有变化。这说明该方案的效果不理想。

图 7 为不同绝热板长度下的缩孔情况。明显看出,随着绝热板长度增加,电极棒的缩孔直径和深度都显著减小,特别是在原绝热板长度基础上增加 200 mm 的条件下,液态合金的补缩效果最好,切除冒口后铸锭基本没有缩孔存在。

4 结论

(1) NS1402 合金 7.85 t 电极棒原方案的最终凝固位置在铸锭中下部,导致顶部补缩困难,缩孔缺陷严重。

(2) 将电极棒倒置可以减小缩孔直径 32.2%,但是缩孔深度变化不大,

(3) 随着绝热板长度的增加,缩孔减轻;将原绝热板长度增加 200 mm,可以基本消除冒口下的缩孔。

参考文献

- [1] 张菽浪,张红斌. Incoloy 825 耐蚀合金[J]. 特钢技术,2005,10(3):64-66.
- [2] 吴勇军,方 轶,郎宇平. 国产 NS1402(UNS N08825)合金管材的研制[J]. 钢铁研究学报,2011,23(S2):286-289.
- [3] 胡小东,孙兴龙,许长军,等. 细长电极锭凝固缺陷的模拟[J]. 特种铸造及有色合金,2015,35(10):1040-1043.
- [4] 杨万良,李京社,杨宏博,等. SCM822H 钢 3t 铸锭缩孔缺陷优化的数值模拟[J]. 特殊钢,2013,34(5):16-19.
- [5] 刘楚威. 基于 ProCAST 的 Φ450 电极锭浇注过程的模拟研究[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2014.

谢 鑫(1986-),男,博士(2015 年重庆大学),高级工程师,2009 年重庆大学(本科)毕业,连铸和模铸过程数值模拟研究。E-mail:xiexin@cqu.edu.cn

收稿日期:2016-12-25

欢迎订阅《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社