

大高径比钢锭铸造过程中缩管的研究

俞占扬 张 慧 干 勇 王明林 王学兵
(钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心)

摘 要 采用数值模拟和工业试验相结合的方法研究了大高径比铸锭内缩管的分布。利用 5.3 t 钢锭解剖结果,验证了所建立数学模型的准确性。在此基础上,研究了 10.5 t 钢锭内缩管的形成机理,并进一步探讨了不同浇注工艺对铸锭内缩管分布的影响。结果表明,浇注温度、浇注速度和铸模外表面冷却强度的变化对铸锭内缩管分布的影响较小。随着绝热砖长度增加,缩管深度会降低。当绝热砖长度超过 500 mm 后,增大绝热砖长度对铸锭缩管分布影响不大。

关键词 铸锭;缩管;浇注工艺

中图分类号 TP311;TG249.3 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.02.021 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Shrinkage Pipe in Ingot with Large Ratio of Height to Diameter During Casting

Yu Zhanyang, Zhang Hui, Gan Yong, Wang Minglin, Wang Xuebing
(National Engineering and Research Center for Continuous Casting Technology,
Center Iron and Steel Research Institute)

Abstract: The distribution of shrinkage pipe in ingot with large ratio of height to diameter was investigated by numerical simulation and industrial experiment. The accuracy of the mathematical model was verified by the anatomical result of 5.3 t ingot. On this basis, the formation mechanism of shrinkage pipe in 10.5 t ingot was analyzed and the influence of different casting parameters on the distribution of shrinkage pipe in ingot was further discussed. The results indicate that the change of pouring temperature, pouring speed and cooling strength of the outer surface of the mold have little effect on the distribution of shrinkage pipe in ingots. With the increase of the insulation brick length, the depth of shrinkage pipe is decreased, and the increase of length of insulating brick of effect on the distribution of shrinkage pipe can be ignored when the length exceeds 500 mm.

Key Words: Ingot, Shrinkage Pipe, Casting Process

钢锭内钢水的收缩分为 3 个阶段:即液态收缩、凝固收缩以及固态收缩。金属液态收缩和凝固收缩大于固态收缩值是铸件内产生缩管的根本原因。随着计算机应用技术的发展与应用,铸造过程的研究已经从一个不可见的过程发展到一个可视的过程^[1~3],数值模拟技术具有降低成本和缩短试生产时间等诸多优点。铸件内产生的缩管会严重影响成材率,在铸锭或铸件内缩松、缩孔和缩管缺陷等方面研究者做了大量工作^[4~9],但对大高径比钢锭内缩管的研究报道较少。

本课题通过对 5.3 t 钢锭进行解剖试验验证了钢锭内缩管数学模型的正确性。在此基础上,分析了 10.5 t 钢锭凝固过程中缩管形成机理,探讨了浇注工艺对钢锭内缩管分布的影响,为钢锭的实际生产提供参考。

收稿日期:2020-09-22;**修改稿收到日期:**2020-10-09
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0304802)
第一作者简介:俞占扬,男,1988 年出生,博士研究生,北京(100081),E-mail:15842028530@163.com
通信作者:张慧,男,1963 年出生,教授,北京(100081),E-mail:zhangh@cisri.com.cn
引用格式:俞占扬,张慧,干勇,等. 大高径比钢锭铸造过程中缩管的研究[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(2):227-230.
YU Z Y, ZHANG H, GAN Y, et al. Shrinkage pipe in ingot with large ratio of height to diameter during casting[J]. Special Casting & Non-ferrous Alloys, 2021, 41(2):227-230.

1 10.5 t 钢锭凝固过程数值模拟

1.1 数学模型的建立

1.1.1 控制方程与几何模型

模型假设:①在真空条件下,从顶部注入铸型内的钢水温度和速度分布均匀;②液态金属为不可压缩牛顿流体;③对流由热浮力驱动;④忽略溶质对流;⑤传热与充型耦合。基于控制方程建立了三维模型,包括 Navier-Stokes 方程、连续性方程、能量方程、 $k-\epsilon$ 方程和 VOF 函数。钢锭、铸型、保温砖和底垫的几何模型见图 1,然后将铸型、铸锭、绝热砖和底垫的几何模型划分网格。

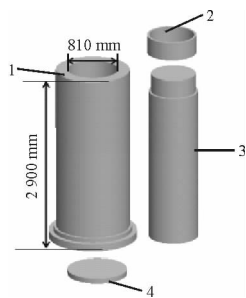


图 1 铸型、绝热砖、钢水和底垫的几何模型

Fig.1 Geometric models and finite element mesh of the mold, steel ingot, insulation brick and bottom pad

1.铸型 2.绝热板 3.铸锭 4.底垫

1.1.2 热物性参数

底垫和保温砖的物性参数见表 1。

表 1 底垫和绝热砖的物性参数

Tab.1 The thermophysical parameters of bottom pad and insulation brick

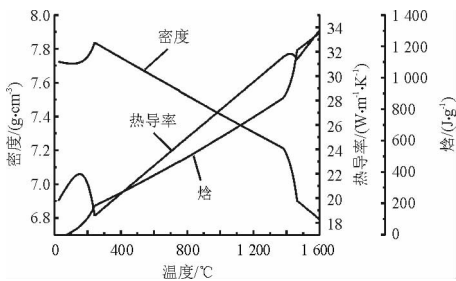
材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	热导率/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
底垫	2 900	1.5	4
绝热砖	500	1.08	0.78

钢锭和铸型材料成分见表 2,利用仿真软件计算钢锭和铸型物性参数,见图 2。

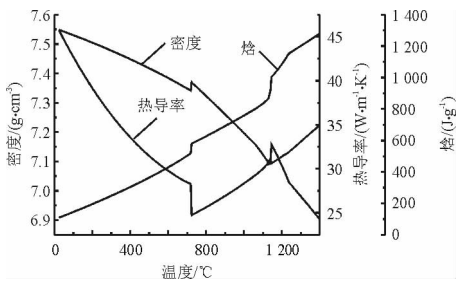
表 2 钢锭与铸型的化学成分

Tab.2 Chemical composition of the ingot and mold %

材料	w_B						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
铸锭	0.27~0.32	1.40~1.70	0.70~1.00	≤ 0.013	≤ 0.010	1.00~1.30	0.23~0.27
铸型(铸铁)	3.2~3.5	—	0.8~1.2	< 0.005	< 0.005	—	—



(a) 铸锭的密度、热导率与熔值



(b) 铸型的密度、热导率与熔值

图 2 铸锭和铸型的物性参数

Fig.2 Thermophysical parameters of the ingot and mold

1.1.3 边界和初始条件

由于钢锭与铸型之间存在间隙,金属/铸型之间界面的传热系数随温度变化^[10,11],铸型/绝热砖界面和钢锭/绝热砖界面的传热系数均为 $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$;钢锭与底垫、铸型与底垫、底座与底垫之间的传热系数分别为 200、200、100 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$;铸型外壁和铸锭顶部的传热系数随时间变化,其中考虑了辐射传热和对流传热。

各种材料的初始温度见表 3。

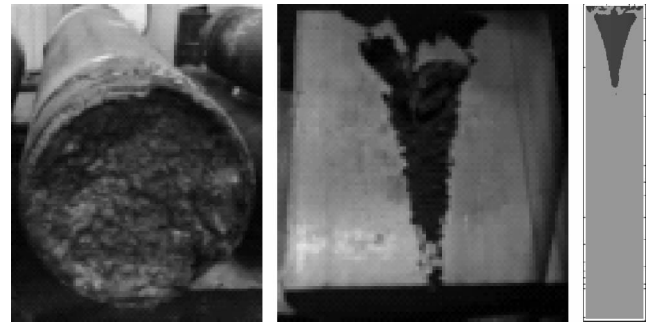
表 3 各种材料的初始温度

Tab.3 Initial temperature values for each material $^{\circ}\text{C}$

钢锭	铸型	绝热砖	底垫
1 560	80	40	200

1.2 数学模型验证

图 3 为 5.3 t 钢锭照片、顶部剖切面截面形貌及模拟计算结果。可以看出,缩管分布模拟结果与试验结果符合,这验证了数学模型的准确性。



(a) 5.3 t 钢锭照片 (b) 钢锭顶部剖切面 (c) 模拟结果

图 3 5.3 t 钢锭照片、顶部剖切面截面形貌及模拟计算结果

Fig.3 The orphology of section surface at top of the ingot

2 试验结果与讨论

铸锭充型和凝固过程中的固相率分布见图 4。当铸型被充满钢水后,由于铸型的冷却作用,钢水温度不断降低。钢液上表面与外界环境接触传热,其他部位与铸型接触冷却。随着凝固进行,由于铸型与钢水的冷却速度较快,与之接触的钢水会快速形成坯壳并发生凝固收缩,此时钢水上表面还未发生凝固,因此钢水界面会下降。随着凝固进一步发展,当钢水上表面温度降到固相线温度时会形成一层坯壳,此时钢水上表面不会再下降,见图 4c 和图 4d,由于钢锭顶部的钢水与外界环境直接接触,冷却速度相对较快,因此液面下降量较小。随着凝固时间推移,钢水凝固前沿向铸锭内部继续推进,未凝固钢水随着温度降低发生液态收缩和凝固收缩,与此同时,已凝固的坯壳因温度降低发生固态收缩,由于钢水液态收缩和凝固收缩的总和大于固态收缩,在

重力作用下,未凝固的钢水与钢锭顶部已凝固坯壳脱离,形成缩管。由于铸锭侧边坯壳厚度的增加和未凝固钢水液面的不断降低,因此缩管呈现漏斗形状,见图

4f~图 4h。在钢锭凝固末期,直到剩余的钢水在铸锭中心几乎凝固,缩管完全形成,见图 4i。铸锭凝固完全结束后,在铸锭顶部形成较深的缩管,这是大高径比钢

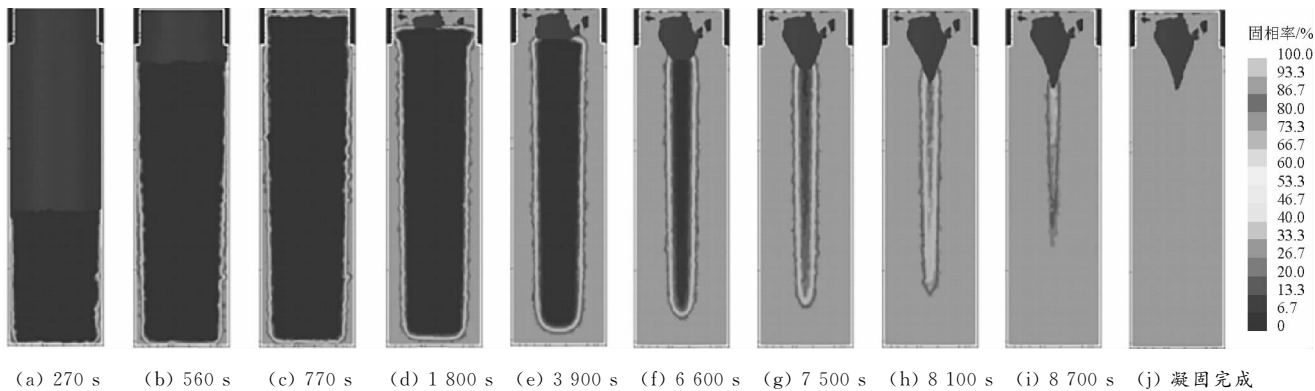


图 4 钢锭凝固过程中固相率分布情况

Fig.4 Distribution of solid fraction during solidification of the steel ingot

锭凝固特点之一,见图 4j。

在绝热砖长度为 300 mm,浇注速度为 15 kg/s,铸模的冷却方式为空冷,在 1 540、1 560 和 1 580 ℃浇注时铸锭内缩管分布情况见图 5。可以看出,浇注温度的改变对铸锭内缩管的分布影响较小。

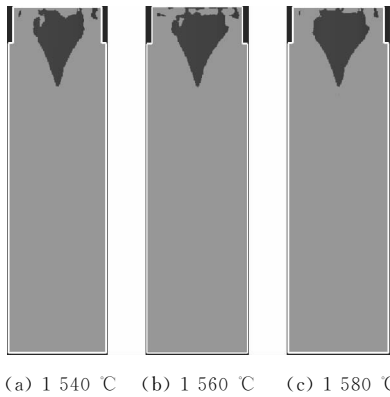


图 5 不同浇注温度下铸锭缩管的形态

Fig.5 Effect of pouring temperature on distribution of shrinkage pipe in the ingot

绝热砖长度为 300 mm,浇注温度为 1 560 ℃,铸型外表面为空冷条件下,浇注速度分别为 12、15 和 18 kg/s 时铸锭内缩管的分布情况见图 6。可以看出,浇注速度对铸锭内缩管的分布影响较小。

在浇注温度为 1 560 ℃,浇注速度为 15 kg/s,绝热砖长度为 300 mm,铸型外不同冷却条件下的铸锭内缩管分布见图 7。可以看出,冷却条件的变化不会改变铸锭内缩管分布。

当浇注温度为 1 560 ℃,浇注速度为 15 kg/s,铸型空冷时,不同绝热砖长度的铸锭内缩管分布见图 8。可以看出,随着绝热砖长度增加,缩管深度降低,这是因为随着绝热砖长度变高,最后凝固区域向绝热砖内移动。随着绝热砖长度的增加,相应绝热砖内的未凝固钢水量

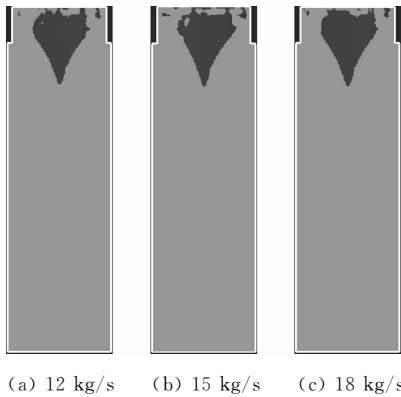


图 6 不同浇注速度下铸锭缩管分布的形态

Fig. 6 Effect of pouring rate on distribution of shrinkage pipe in the ingot

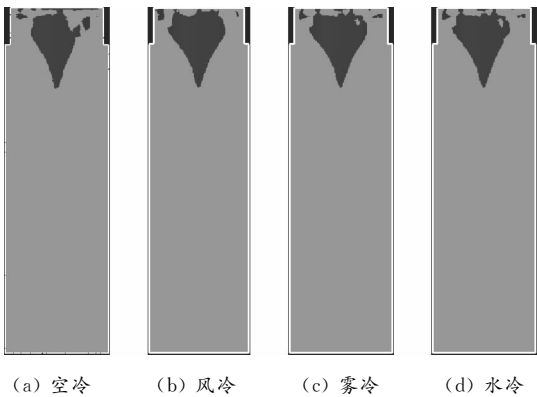


图 7 不同冷却方式下铸锭缩管分布形态

Fig.7 Effect of cooling rate on distribution of shrinkage pipe in the ingot

也增加,且绝热砖对钢水保温效果好,凝固速度慢,对下部的钢水有很好的补缩作用,因此缩管长度变短。图 9 为绝热砖长度对缩管深度的影响。可以看出,当绝热砖长度超过 500 mm 后,增大绝热砖长度不会进一步影响缩管深度。

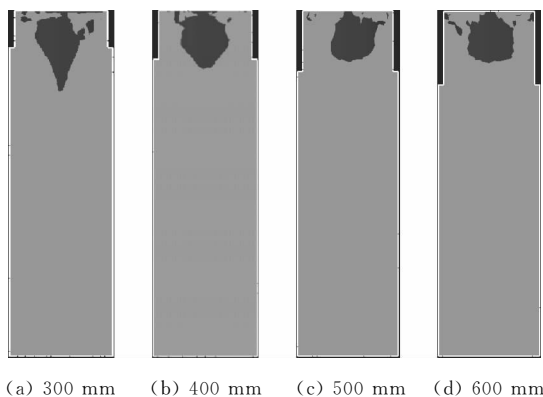


图 8 不同绝热砖长度的铸锭缩管分布形态

Fig.8 Effect of insulating brick with different length on distribution of shrinkage pipe in the ingot

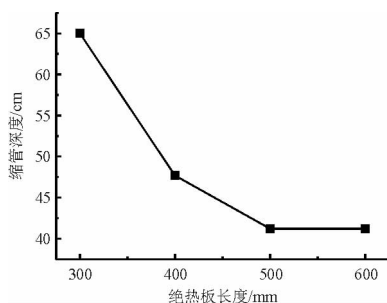


图 9 绝热砖长度对缩管深度的影响

Fig.9 Effect of insulating brick with different length on depth of shrinkage pipe in the ingot

3 结 论

大高径比的铸钢锭浇注过程中,浇注温度、浇注速度和铸型外表面冷却强度的改变对铸锭内缩管分布的影响较小。绝热砖长度对缩管深度影响最大,随着绝热砖长度的增加,缩管深度降低。当绝热砖长度超过 500 mm 后,增大绝热砖长度不会进一步影响缩管深度。

控制 10.5 t 大高径比钢锭内缩管最有效的方法是在钢锭顶部加绝热砖并且长度在 500 mm 以上。

参 考 文 献

[1] LI D Z, CAMPBELL J, LI Y Y. Filling system for investment cast Ni-base turbine blades[J].Journal of Materials Processing Technology, 2004, 148(3): 310-316.

[2] HU B H, TONG K K, NIU X P, et al. Design and optimisation of runner and gating systems for the die casting of thin-walled magnesium telecommunication parts through numerical simulation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 105(1): 128-133.

[3] HEIDARZADEH M, KESHMIRI H. Influence of mould and insulation design on soundness of tool steel ingot by numerical simulation[J]. Journal of Iron and Steel Research(International), 2013, 20(7): 78-83.

[4] TASHIRO K, WATANABE S, KITAGAWA I, et al. Influence of mould design on the solidification and soundness of heavy forging ingots[J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1983, 23(4): 312-321.

[5] 由洪功, 宋崇哲. 采用新型钢锭模消除二次缩孔[J].钢铁, 1994, 29(1): 18-21.

[6] 张熹夫, 赵伟庆. 缩孔深度与保护渣保温性能及补缩时间的关系[J].天津冶金, 1995, 2(3): 1-3.

[7] 赵红昌, 顾涛, 王明家, 等. 铸锭冒口感应加热技术研究[J].大型铸锻件, 2016(6): 10-14, 21.

[8] 王晓莉.大型钛锭补缩工艺的研究[J].热加工工艺, 2016, 45(15): 102-103, 106.

[9] KUBO K, ROBERT D P. Mathematical modeling of porosity formation in solidification[J]. Metallurgical Transactions, 1985, B16(2): 359-366.

[10] NISHIDA Y, DROSTE W, ENGLER S. The air-gap formation at the casting-mold interface and the heat transfer mechanism through the gap[J]. Metallurgical Transactions, 1986, B17(4): 833-844.

(编辑:刘晨辉)

日本金属试供应镁蓄电池负极用新合金

近日,日本金属公司(NipponKinzoku)对外宣称,将展开镁合金蓄电池用负极新合金的试供应服务。与目前唯一具有高速充放电实绩、以活性碳作为正极的镁合金蓄电池相比,确认利用新开发的合金作为负极,将可以以前所未有之速度进行 200 次的反复充放电。日本金属自 1 月起开始,提供负极用新合金,供应给企业或研究机构的开发人员,加速推动镁合金蓄电池的制品化。

据悉,日本金属自 2017 年起就着手展开镁合金蓄电池用电极材料的开发,并在 2019 年 7 月开始申请镁合金的国际专利。日本金属通过添加铜,让电池活性急速提高,而添加铜的合金之中存在金属间化合物(Mg₂Cu)的粒子状析出物质,此为充放电的核心,并发挥优异的充放电性能。此外,在正极采用活性碳电极时的充放电特性方面,不仅保有活性碳原本的充放电动作,也确认反覆充放电时具有高度稳定性。

镁具有密排六方结构,为了提高电池活性,日本金属透过露出面以外的面,利用微量添加钙等元素的方法,对结晶方位进行了控制。由于结晶方位经过控制的合金已将电池活性较高的结晶面整合于电极面,因此,可以观察到电池活性提高的状况。

(摘自中国有色网)