

1.9 t 扁锭浇铸 D2 冷作模具钢凝固过程及内部缺陷预报数学模拟

李英¹ 苑晓冬¹ 张东伟^{1,2} 李胜利² 陶军² 艾新港²

(1 鞍钢集团工程技术有限公司, 鞍山 114001; 2 辽宁科技大学材料与冶金学院, 鞍山 114051)

摘要 采用三维铸造软件 Procast 模拟了钢厂 1.9 t 扁 D2 钢锭(%:1.40~1.60C, 11.00~13.00Cr, 0.70~1.20Mo, ≤1.10V) 浇铸和凝固过程。模拟结果表明, 1.9 t 模具扁钢的本体凝固时间为 64 min, 完全凝固时间为 83 min, 与经验公式的计算结果相吻合; 钢锭柱状晶厚度为 150 mm 左右, 等轴晶宽度为 260 mm 左右; 1.9 t 扁锭内部无缩孔产生, 疏松轻微。

关键词 冷作模具钢 D2 扁钢锭 模铸 凝固过程 数学模拟

Math Simulation on Casting and Solidifying Process of 1.9 t Slab Ingot of Cold Working Die Steel D2 and Internal Defect Prediction

Li Ying¹, Yuan Xiaodong¹, Zhang Dongwei^{1,2}, Li Shengli², Tao Jun² and Ai Xingang²

(1 Engineering Technology Corp Ltd, Ansteel Group, Anshan 114001;

2 School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114001)

Abstract The casting and solidification process of 1.9 t slab ingot of steel D2 (%:1.40~1.60C, 11.00~13.00Cr, 0.70~1.20Mo, ≤1.10V) have been simulated by using three-dimension foundry software Procast. Results show that the solidification time of 1.9 t slab ingot body and whole ingot are respectively 64 min and 83 min, it corresponds with calculation results by experience formula; the columnar crystal thickness is about 150 mm and the width of equiaxed crystal zone is about 260 mm; and there is no shrinkage cavity in 1.9 t slab ingot only with slight porosity.

Material Index Cold Working Die Steel D2, Slab Ingot, Mould Casting, Solidifying Process, Math Simulation

D2(Cr12Mo1V1)钢^[1]浇铸困难,不能用连铸生产,必须用传统模铸的方法生产^[2,3],且钢锭易产生缺陷。本文采用数学模拟方法研究了 D2 钢的浇铸、冷却、凝固过程,以及钢锭和锭模的温度分布等重要冶金现象。

1 数学模型

1.1 几何模型和参数选取

根据 1.9 t 锭型尺寸,应用 Pro/E 软件建立了钢锭以及钢锭模(带有绝热板、耐火砖)的模型(图 1),对模型进行单元面网格划分,再剖分生成四面体网格。生成的面网格和体网格有限元数量见表 1。

按文献[4]计算, D2 钢(表 2)的固、液相线温度值分别为 1 231 ℃ 和 1 393 ℃。本计算 D2 的固相线和液相线密度分别为 6 720 kg/m³ 和 6 890 kg/m³。图 2(a, b, c)分别为 D2 钢的导热系数、凝固分数和比热容。

钢锭模材质为灰口铸铁。碳含量 4% 的铸铁模在常温下的密度为 7 300 kg/m³^[5]。图 3(a, b)分别为灰口铸铁的导热系数和比热容。绝热板采用国内

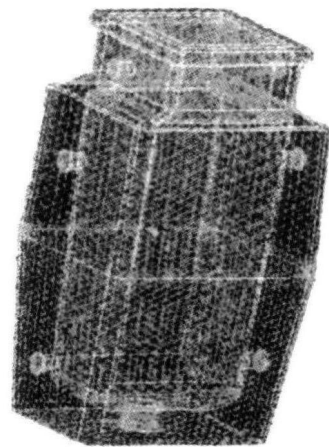


图 1 几何模型与网格划分
Fig. 1 Geometric model and grid division

表 1 有限元数量
Table 1 Number of finite elements

面网格		自动生成体网格		优化处理后体网格	
节点数	单元数	节点数	单元数	节点数	单元数
5 020	10 204	12 175	58 340	12 181	58 346

表2 D2钢的化学成分/%

Table 2 Chemical composition of Steel D2 /%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
1.4 ~ 1.6	≤0.60	≤0.60	≤0.03	≤0.03	11.00 ~ 13.00	0.70 ~ 1.20	≤1.10

优质板的热物性参数^[5]。耐火砖的导热系数采用 $0.75 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

1.2 初始条件及边界条件

D2钢的钢水生产工艺为:电弧炉-LF-VOD,采用下注方式浇铸钢锭,一盘浇铸5个钢锭。根据现

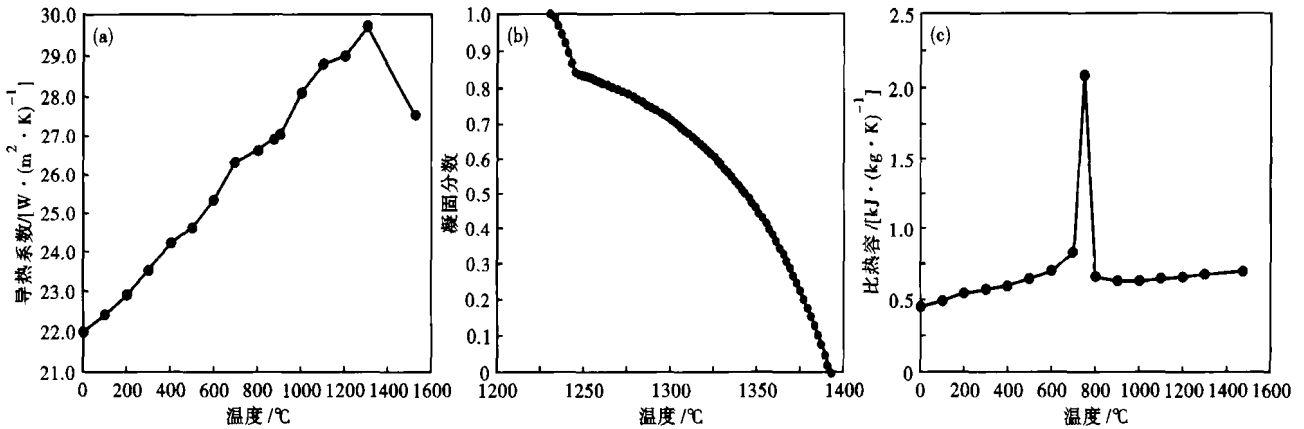


图2 D2钢的导热系数(a)、凝固分数(b)和比热容(c)

Fig. 2 Heat conductivity (a), fraction of solidification (b) and specific heat (c) of steel D2

场生产的实际情况,设定具体的初始条件和边界条件的值(见表3)。参考了文献[6],钢锭与锭模之间的换热系数取 $1800 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

2 结果分析

2.1 D2钢浇铸过程模拟

本研究对钢液浇铸过程流动及传热进行耦合计算。从图4中可以看出,钢锭在充型过程中,由于钢锭模的激冷作用,钢锭的边部和角部温度立即下降到固相线以下形成激冷层。钢锭下部温度下降速度很快,钢水凝固的速度也快,充型完成时,钢锭的凝固率为15%左右,主要集中在钢锭下部、角部和边部,这主要因为钢锭模下部较厚,钢水的凝固条件好,而且采用下注方式,钢锭下部的钢水凝固时间要比上部长,以及钢水热对流,热液面上升,冷液面下降。

表3 模拟的相关参数

Table 3 Related parameters for simulation

项目	参数	项目	参数
浇铸温度/°C	1470	耐火砖初始温度/°C	20
锭模初始温度/°C	100	1.9 t 本体浇铸时间/min	4.5
绝热板初始温度/°C	20	1.9 t 帽部浇铸时间/min	2.5
环境温度/°C	20		

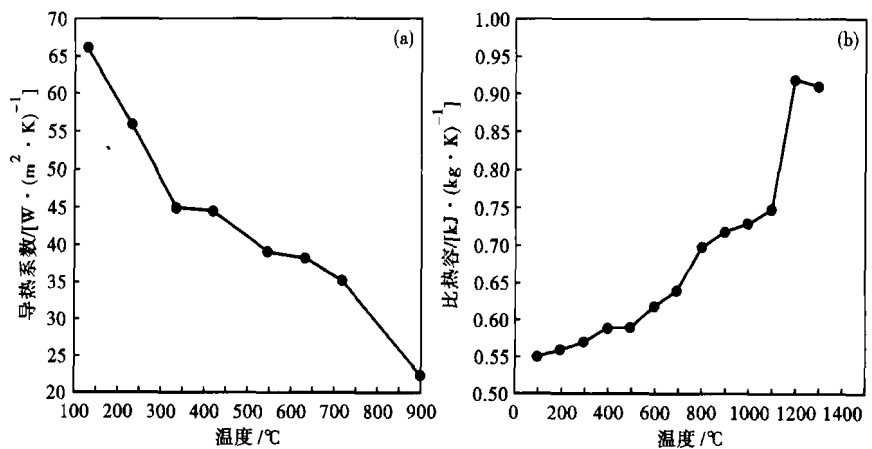


图3 灰口铸铁的导热系数(a)和比热容(b)

Fig. 3 Heat conductivity (a) and specific heat (b) of grey iron

2.2 钢锭模温度场

计算结果表明,在浇铸开始至19.5 min,钢锭模外表面温度变化很小,升温很慢,在19.5 min时钢锭模外表面温度开始显著升高,位置在距离钢锭模底200 mm附近。此后锭模外表面的温度不断升高,而且高温区位置缓慢向上移动。模拟计算发现其宽面温度始终高于窄面温度,这应该是由钢锭大面气隙生成较晚且气隙较小,宽面受到钢水的静压力大于窄面,导致大面与锭模的接触比窄面紧密造成的。在110 min时,钢锭模外表面温度在宽面上出现峰值,温度值为 $736 \text{ }^\circ\text{C}$,在宽面上距离钢锭底部900 mm附近,具体位置见图5(a)。此后,随着凝

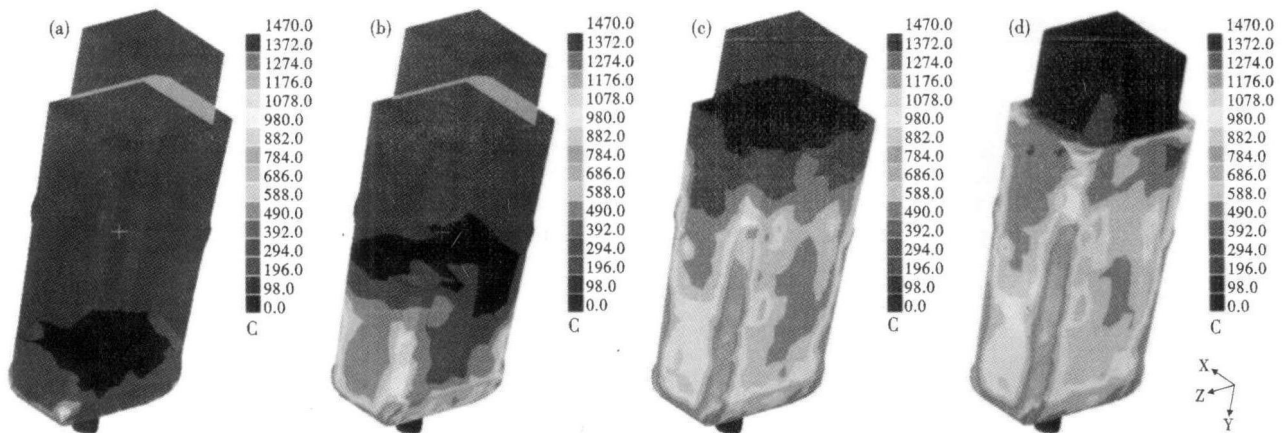


图4 1.9 t D2 钢扁锭温度场,浇铸 1.5 min(a),2.5 min(b),4.5 min(c)和 8 min(d)

Fig.4 Temperature field of 1.9 t slab ingot of steel D2, casting 1.5 min (a), 2.5 min (b), 4.5 min (c) and 8 min (d)

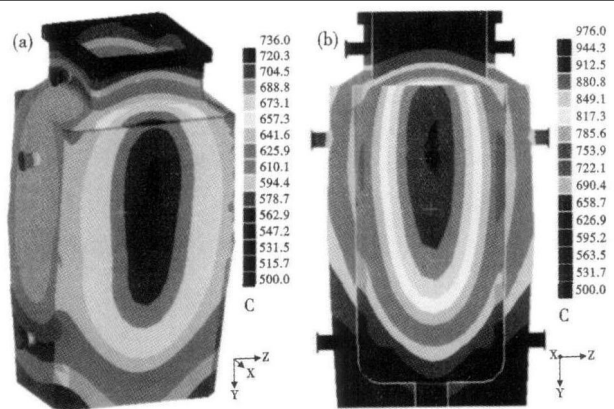


图5 1.9 t 扁锭模外表面(a)和内表面(b)温度场峰值
Fig.5 Temperature field peak value of outside surface (a) and inside surface (b) of 1.9 t slab ingot mould

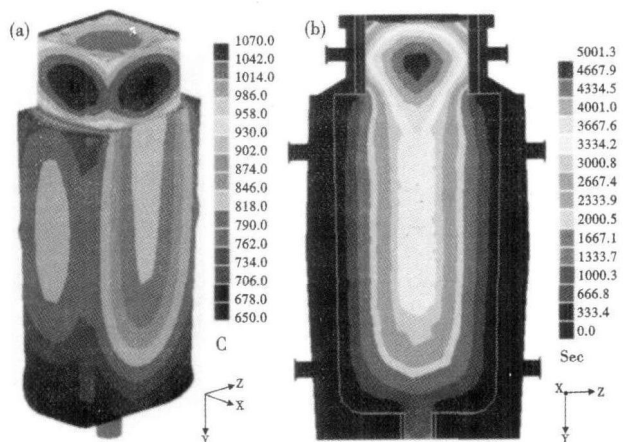


图6 1.9 t 扁锭表面 2 h 温度场(a)和扁锭各部位凝固进程(b)
Fig.6 Temperature field of 1.9 t slab ingot solidifying for 2 h (a) and solidifying process of each part of slab ingot (b)

固过程的进行,钢锭模外表面的温度开始不断下降。

在浇铸过程中,钢锭模内表面的温度升高很快,但高温区位置基本稳定在距离模底 300 mm 附近。浇铸完成后开始,高温区的位置开始缓慢上升。宽面的最高温度始终高于窄面的最高温度,这应该是由钢锭向宽面传导的热量多导致的。在 67 min 时,温度达到峰值为 955 °C,在宽面上距离钢锭底部 900 mm 附近,具体位置见图 5(b)。钢锭模内外表面温度峰值在同一高度。凝固后期,钢锭模内表面的高温区在距离钢锭模底 950 mm 附近,这主要是由于钢锭液芯上升到冒口附近,高温区稳定在相对固定位置而造成的。

钢锭模在凝固过程中有两个危险时刻,一是在开浇后 20 min 左右,此时钢锭模内外温差较大,热应力最大;二是在 110 min 左右,钢锭模外表出现最高温度的时候,铸铁强度也较低。

2.3 D2 钢钢锭温度场

图6(a)为模拟计算钢锭开始浇铸2h后钢锭

表面的温度场,钢锭本体宽面最高温度为 915 °C 左右,位置在距离钢锭底部 1 000 mm 附近,窄面最高温度为 830 °C 左右,位置也在距离钢锭底部 900 mm 附近,钢锭下部最低温度为 650 °C。钢锭帽口最高温度也为 1 070 °C,位置在帽口侧面的中部;最低温度为 900 °C 左右,位置在帽口头部及帽口与本体交界处。因而可据此制定相应钢锭的加热工艺制度。

2.4 D2 钢凝固进程

图 6(b)为钢锭宽面在中心截面处各部位凝固的时间。模拟计算得到钢锭本体的凝固时间为 64 min,完全凝固时间为 83 min。按照文献[2]中经验公式计算钢锭本体的凝固时间为 60 min,完全凝固时间为 81 min。

由于帽部绝热板及保温剂的作用,帽部导热系数在开始 20 ~ 30 min 基本没有变化,故帽部的钢水凝固进行的较慢,帽部钢液因补缩而平行下降。同

时伴随着钢锭的迅速冷却,钢锭模大量蓄热,模内壁温度迅速升高,而模外壁温度缓慢增加。

在浇铸开始后 25 min 左右,钢锭与钢锭模之间开始形成气隙,并且钢锭模温度不断升高,由于气隙界面热阻的作用和钢锭与锭模之间温度梯度减小,使得钢锭本体凝固速度趋于减缓。此时帽部绝热板、保温剂的导热系数开始增大,帽部的钢水凝固速度开始加快,帽口上部钢水部分开始凝固,导致钢锭帽口头部形状为浅盘形。由于钢锭凝固潜热的大量释放,模外壁温度迅速升高,模内壁温度变化不大。

2.5 D2 钢凝固组织预测

钢锭在浇铸开始后 34 min 左右,钢锭芯部的结晶潜热已大部分散尽,钢锭内部柱状晶生长基本结束,变为等轴晶生长,此时钢锭各部分的凝固分数分别见图 7(a),图中深灰色的区域可以认为是等轴晶与柱状晶的交界。计算结果表明柱状晶厚度为 150 mm 左右,等轴晶宽度为 260 mm 左右。钢锭与钢锭模之间形成稳定气隙,钢锭本体凝固速度变化的很慢。帽部由于绝热板导热系数一直增大,帽部凝固速度进行的很快,但凝固收缩量很小,缩孔形状和大小变化不大。模温趋于平衡,模外壁热流减小,且钢液粘度逐渐增加、补缩条件下降,中心偏析逐渐加大,钢锭内残留气体析出,可能导致中心部位出现疏松。

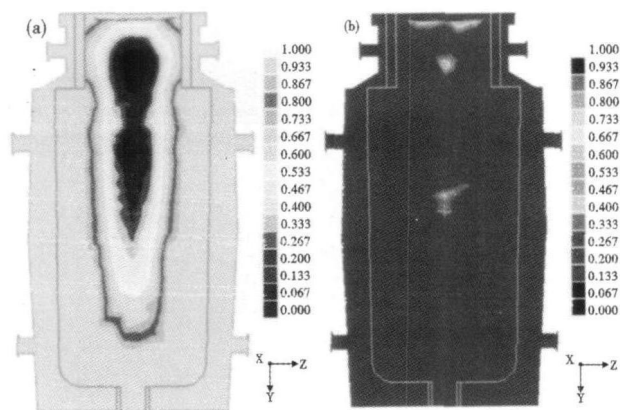


图 7 1.9 t 扁锭凝固分数(a)和疏松缩孔预报(b)

Fig.7 Solidification fraction (a) and forecast on porosity and shrinkage cavity (b) in 1.9 t slab ingot

2.6 缺陷预测

钢锭疏松缩孔形成的模拟预测是控制钢锭内部质量的一种重要手段^[7]。铸钢件疏松缩孔判据经过多年的发展,从最初的定性判据如温度场热节法、G/R(G 为温度梯度,R 为凝固率)法,到后来的定量判据,如等效液面收缩法、多个孤立域熔池法和多热节补法^[8]。

本文综合以上各种方法的优缺点,采用文献[9]的方法来判断疏松缩孔的情况。本模拟计算预报了钢锭最终凝固结构中疏松、缩孔可能产生位置和范围(图 7b)。从图 7(b)中可以读出内部的疏松级别均在 0.46 以下,钢锭的内部均无二次缩孔出现,而且疏松相对轻微。钢锭本体的芯部有疏松情况,分析认为造成钢锭本体芯部有疏松倾向的主要原因是,锭型矮胖、宽高比相对较大,钢锭的表面各部位与中心的距离差距小,导致芯部有最后凝固的倾向,不能充分补缩造成疏松。

虽然只是根据钢锭凝固过程的有关热物理参数计算出疏松产生的可能性和敏感性,并不能保证在现场生产钢锭的最终凝固结构中就一定存在和图中一样的疏松和缩孔缺陷,但是给出的可能产生疏松和缩孔缺陷的趋势还是值得重视的,这也对现场生产有一定的指导意义。模拟计算表明绝热板换热系数小、帽口头部绝热条件好时,钢锭内部疏松程度就减轻,甚至无疏松。

3 结论

(1) 钢锭模容易发生危险的时间:一是在开浇后钢锭模内外温差较大,此时热应力最大;二是钢锭模外表出现最高温度的时候,铸铁模强度较低。

(2) 1.9 t 的 D2 钢锭浇完时,凝固区主要集中在钢锭下部、边部和角部,完全凝固时间为 83 min,本体凝固时间为 64 min。

(3) 柱状晶厚度为 150 mm 左右,等轴晶宽度为 260 mm 左右。

(4) 在 1.9 t 钢锭本体中心和帽口中心有疏松、内部无缩孔,钢锭内部质量可以保证。

参考文献

- 1 陈再枝,蓝德年. 模具钢手册. 北京:冶金工业出版社,2002
- 2 蔡开科. 浇注与凝固. 北京:冶金工业出版社,1987
- 3 孟凡软. 钢锭浇注与钢锭质量. 北京:冶金工业出版社,1994
- 4 王廷浦. 轧钢工艺学. 北京:冶金工业出版社,1981
- 5 张国伟. 大型扁钢锭凝固过程及结构数值预报:[硕士学位论文]. 鞍山:鞍山科技大学,2003
- 6 苗信成,李激光. 铸件内部质量计算机数值模拟预报. 炼钢,1999,15(2):33
- 7 马志村. 大型锻造用钢锭缩孔疏松预测及程序设计:[硕士学位论文]. 北京:清华大学,1990
- 8 杨弋涛. 金属凝固过程数值模拟及应用. 北京:化学工业出版社,2009
- 9 赵勇. 大钢锭中疏松、缩孔及宏观偏析的数学模拟和物理模拟:[博士学位论文]. 北京:清华大学,1991

李英(1972-),女,工程师,1995年包头钢铁学院毕业,轧钢技术和工程设计。

收稿日期:2010-12-26