

## 7 t 锭型本体高度对凝固过程和冶金质量影响的数学模拟

肖卿鹤 李胜利 艾新港 韩 昆 沙明红 张连望

(辽宁科技大学材料与冶金学院, 鞍山 114051)

**摘 要** 锭型对钢锭凝固过程中的疏松、缩孔等缺陷有一定影响。对本体高度1 885 mm 矮粗型(A)和2 075 mm 细长型(B)两种7 t 钢锭,通过铸造模拟分析温度场、凝固分数、凝固时间以及中心疏松缩孔情况进行分析对比,7 t(B)细长型钢锭本体中心长970 mm 的封闭高温液相区,并且本体中心疏松率超过20%的疏松区域大约为180 cm<sup>3</sup>,7 t(A)矮粗型钢锭只有保温帽处有少量轻微疏松,本体基本没有。综合各项考虑,建议7 t 钢锭采用7 t (A)矮粗型的钢锭设计。

**关键词** 7 t 钢锭 凝固过程 疏松 钢锭设计

### Mathematical Simulation of Effect of 7 t Steel Ingot Shape Body Height on Solidification Process and Metallurgical Quality

Xiao Qinghe, Li Shengli, Ai Xingang, Han Kun, Sha Minghong and Zhang Lianwang  
(School of Material and Metallurgy, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051)

**Abstract** The ingot shape has certain influence on the defects such as porosity and shrinkage in the solidification process of ingot. Based on body height 2 075 mm long and slim shape (B) and 1 885 mm short and thick shape (A) two kinds of 7 t ingot, by casting simulation analysis of temperature field, solidification fraction, analyses the effect of solidification time and center loose shrinkage cavity, 7 t (B) center is 970 mm long and slim ingot ontology high temperature liquid phase, closed area, and the body center loose loose rate more than 20% of the area is about 180 cm<sup>3</sup>, 7 t (A) short thick steel ingot only had A few minor loose insulation cap, basic no ontology. In this paper, 7 t steel ingots are recommended to be designed with 7 t(A).

**Material Index** 7 t Steel Ingot, Solidification Process, Loose, Ingot Shape Design

随着近些年连铸、近终形铸轧、薄板坯连铸连轧等冶金技术的日益革新,一部分钢厂已经达到100%的连铸率,但钢锭主要使用在锻造和轧制行业中,在钢铁生产中仍有不可替代的地位,并且产品的附加值高,所以仍有一部分钢种和一些大型工件不能使用连铸连轧技术进行生产,如模具钢只能依靠模铸的方法进行生产<sup>[1-5]</sup>。模具钢生产普遍面临降低内部缺陷和提高成材率的问题<sup>[6]</sup>,解决此类问题的关键是通过研究钢锭的锭型结构对钢锭凝固过程的影响规律,对锭型进行系统性优化设计,减少钢锭中心产生缩孔疏松等缺陷的趋势,从而达到降低钢锭内部缺陷和提高成材率的目的<sup>[7-9]</sup>。国内钢厂在实际生产中,有两种不同锭型尺寸的7 t 钢锭,第一种锭型为“矮粗”型,即高宽比小,第二种为“细长”型,即高宽比较大。两种钢锭在同样的处事条件下进行充型,凝固,最后得到的钢锭,质量和成材率均

有很大的不同。综上所述,为了降低凝固缺陷,提高凝固效率,故使用铸造模拟软件对两种7 t 钢锭的凝固过程进行数值模拟,通过对比两种7 t 钢锭的模拟结果,预测不同锭型对钢锭质量和成材率的影响。

#### 1 材料的热物性参数

##### 1.1 模具钢 42Cr Mo4 热物性参数

本模拟计算所选用浇铸的钢种是 42CrMo4 模具钢,具有较高淬透性和高强度等特性。42CrMo4 模具钢的固、液相线温度分别为1 425 ℃、1 494 ℃,42CrMo4 模具钢的化学成分如(表1)所示<sup>[10]</sup>。

根据文献得出 42CrMo4 钢导热系数和温度的关系如图1,密度与温度的关系如图2,42CrMo4 钢的比热容与温度的关系如图3所示。

##### 1.2 钢锭模铸铁的热物性参数

通讯作者:李胜利,教授,辽宁科技大学材料与冶金学院,鞍山 114051

E-mail:lishengli@ustl.edu.cn

表 1 42CrMo4 模具钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of die steel 42CrMo4

元素	含量/%
C	0.38 ~ 0.45
Si	≤ 0.40
Mn	0.60 ~ 0.90
P	≤ 0.003 5
S	≤ 0.035
Mo	0.025
Cr	0.90 ~ 1.20

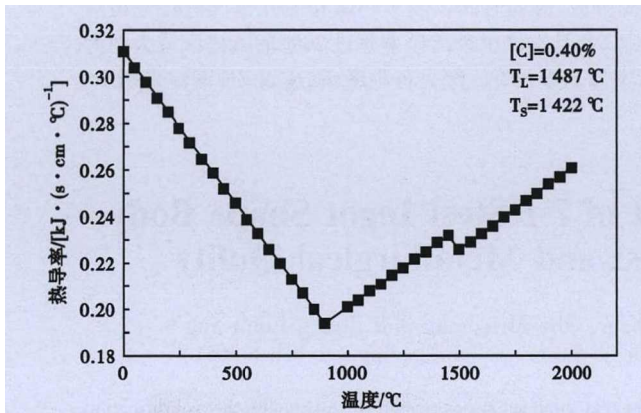


图 1 42CrMo4 模具钢的热导系数随温度的变化曲线  
Fig. 1 Curve of thermal conductivity of die steel 42CrMo4 with temperature

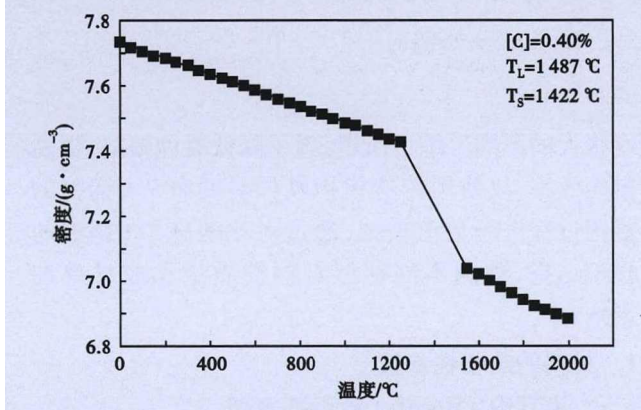


图 2 42CrMo4 模具钢的密度随温度的变化曲线  
Fig. 2 Curves of density of die steel 42CrMo4 with temperature

本模拟计算选用灰口铸铁为钢锭模材料,此材料具有导热性强和性价比高等优点。由文献[11]可知灰口铸铁化学成分如(表 2)。

灰口铸铁的导热系数随时间的变化曲线如图 4,灰口铸铁的密度随时间的变化曲线如图 5。

### 1.3 设置初始条件以及边界条件

(1)初始条件。初始温度场的分布对凝固过程中温度的变化有着深远的影响。初始条件的设定如表 3 所示。

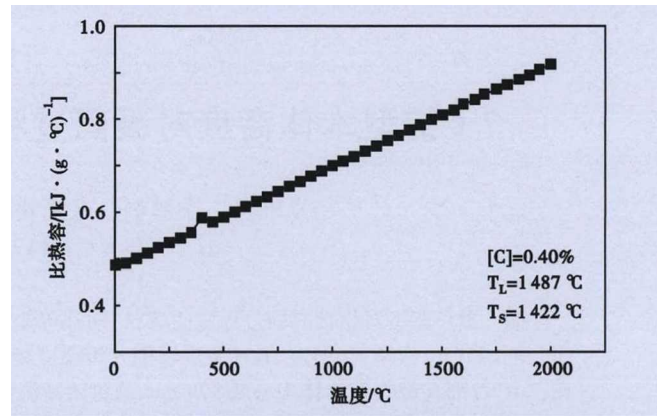


图 3 42CrMo4 模具钢的比热容随温度的变化曲线  
Fig. 3 Curves of specific heat of die steel 42CrMo4 with temperature

表 2 钢锭模铸铁化学成分/%  
Table 2 Chemical composition of cast iron for ingot mould/%

C	Si	Mn	P	S	Fe
3.77	1.81	0.4	0.037	0.096	93.887

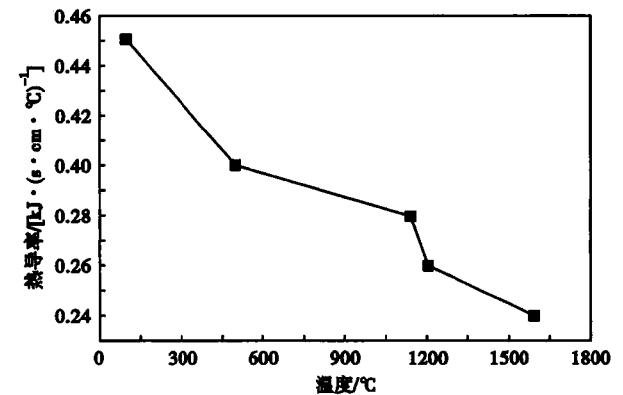


图 4 灰口铸铁的导热系数随温度的变化曲线  
Fig. 4 Curve of thermal conductivity of gray cast iron with temperature

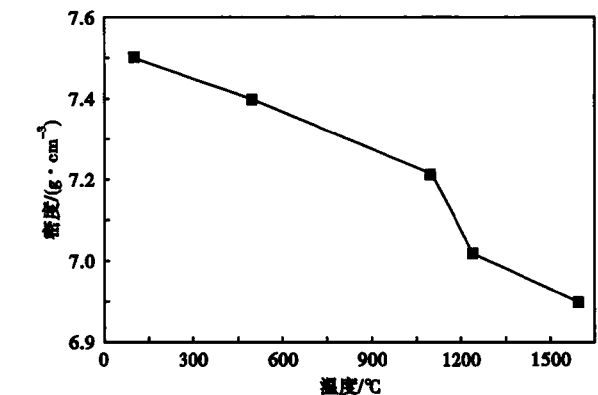


图 5 灰口铸铁密度随温度变化曲线  
Fig. 5 Curves of density of gray cast iron with temperature

表 3 模拟所需的相关参数

Table 3 Related parameters needed for simulation

初始条件	参数
锭模初始温度/°C	100
绝热板初始温度/°C	100
浇注温度/°C	1 585
浇铸速度/(kg · s <sup>-1</sup> )	7.78
浇铸时间/min	15
耐火砖初始温度/°C	100
环境温度/°C	25
计算终止温度/°C	800

表 4 界面换热系数

Table 4 Interface heat transfer coefficient

界面	换热系数/(W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> )
钢锭模/钢锭(液)	1 200
钢锭(液)/绝热板	750
钢锭模/绝热板	400
钢锭(液)/保温砖	20
钢锭模/保温砖	20
钢锭(液)/环境	0

(2)边界条件。在凝固过程的模拟中,需要着重考虑钢锭与钢锭模之间、钢锭模与地面之间、钢锭模与大气之间接触面的设定。尤其钢锭与锭模从完全接触,到由于冷却而体积缩小脱离接触过程,接触面积改变的同时,伴随着换热系数的剧烈变化,其换热机制十分复杂。因此,这两者间的边界条件的处理,是凝固过程数值模拟中最需要着重考虑的问题<sup>[12]</sup>。其具体参数设定表 4 所示。

## 2 模型建立

### 2.1 几何建模

运用三维建模软件,建立两个 7 t 八角形锭的实体模型,模型 A 为 7 t 矮粗型钢锭,模型 B 为 7 t 细长型钢锭,实体模型如图 6。分别对两种锭型的实体进行不均匀网格划分,划分后的网格模型如图 7 所示,两种钢锭模型的网格总数分别为 23.398 万及 24.543 7 万。

### 2.2 钢锭主要参数

两种 7 t 钢锭的参数比较见表 5。

## 3 模拟结果与分析

### 3.1 温度场模拟结果对比分析

在凝固前期,两种钢锭的温度场分布总体上没有显著差别。从钢锭结构上来看,高温区始终集中在中心和上部,而底部和四周的温度最低,如图 8 所示。由于设定顶部绝热以及上部绝热板的使用,保证了钢锭凝固的最后阶段在其上部进行,从而有利于凝固过程中钢水的补缩。

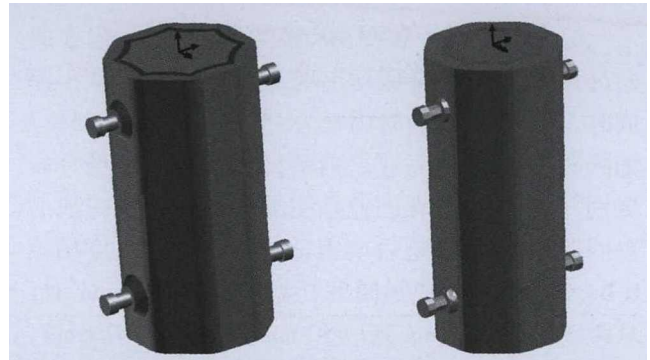


图 6 7 t(A) 钢锭(左)和 7 t(B) 钢锭(右)的三维集合模型  
Fig. 6 Three dimensional geometry model of ingot 7 t (A) (left) and 7 t (B) (right)

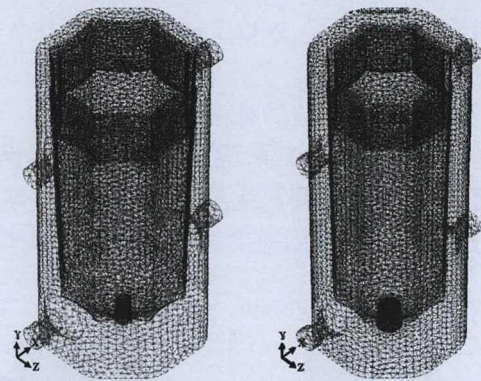


图 7 7 t(A) 锭(左)和 7 t(B) 钢锭(右)的网格划分  
Fig. 7 Mesh generation of ingot 7 t (A) (left) and 7 t (B) (right)

表 5 两种 7 t 钢锭相关参数

Table 5 Relevant parameters of 7 t ingot of two kinds

锭型	7 t 矮粗钢锭(A)	7 t 细长钢锭(B)
帽容比/%	19.53	16.66
本体锥度/%	6.89	4.58
本体高度/mm	1 885	2 075
本体平均直径/mm	810	747.5
尾部占比/%	3.63	3.73

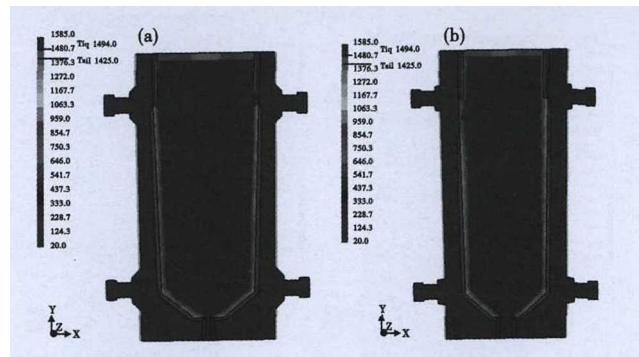


图 8 充型完成时温度分布对比:(a)7 t(A) 钢锭;(b)7 t(B) 钢锭

Fig. 8 Temperature distribution comparison between (a) ingot 7 t (A) and (b) ingot 7 t (B) at end filling

综合分析图 9 和图 10, 虽然锭型不同, 但在凝固过程中, 快速降温区均出现于铸锭的下部, 充型完成时, 7 t(A) 钢锭的凝固率为 14%, 细长的为 25%。如图 9 所示, 充型完成之前两种钢锭的温度场分布区别并不显著, 二者的差别主要集中于充型完成后凝固的过程, 特别是后期钢锭的自体中心温度场, 7 t(B) 自体中心形成封闭的高温液相区(80 min 时, 从距离模底 680 mm 到 1 650 mm 处, 共长 970 mm), 导致凝固后期中心没有上部的液相补缩, 形成较严重的疏松, 而 7 t(A) 钢锭温度是严格的由下而上、由外到内依次升高, 没有封闭高温液相区, 中心也就没有疏松, 如图 10 所示。但 7 t(A) 锭模的最高温度比细长型高 130 ℃, 所以 7 t(A) 的模耗比 7 t(B) 的严重, 如图 11 所示。

### 3.2 凝固分数模拟结果对比分析

在钢水凝固的初期阶段, 由于钢锭模和钢液二者之间温差的存在, 其产生的热流有助于柱状晶的生长, 从而加快了凝固速度, 此时, 钢锭本体迅速凝

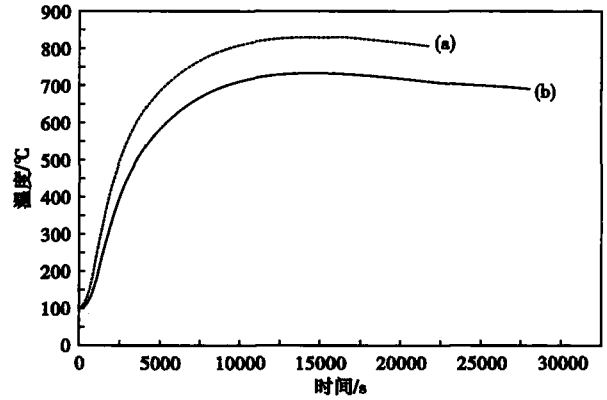


图 11 (a) 7 t(A) 粗形和 (b) 7 t(B) 细形锭模最高温度对比  
Fig. 11 Ingot mold max temperature contrast between (a) 7 t (A) thick shape and (b) 7 t (B) slim shape

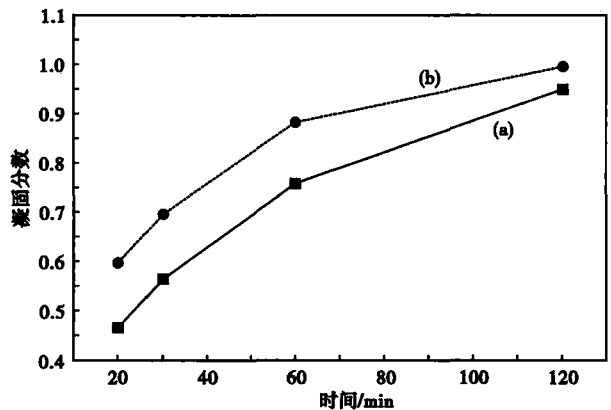


图 12 (a) 7 t(A) 粗形和 (b) 7 t(B) 细形钢锭不同时间点凝固分数对比  
Fig. 12 Contrast of solidification fraction at different time points between (a) 7 t (A) thick shape and (b) 7 t (B) slim shape ingot

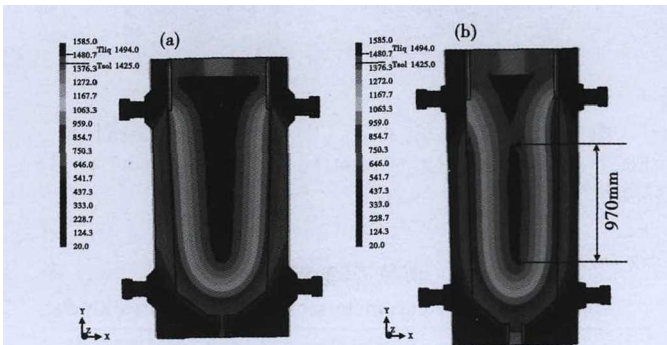


图 9 浇铸后 80 min 温度分布对比: (a) 7 t(A) 钢锭; (b) 7 t(B) 钢锭

Fig. 9 Temperature distribution comparison after casting for 80 min between (a) ingot 7 t (A) and (b) ingot 7 t (B)

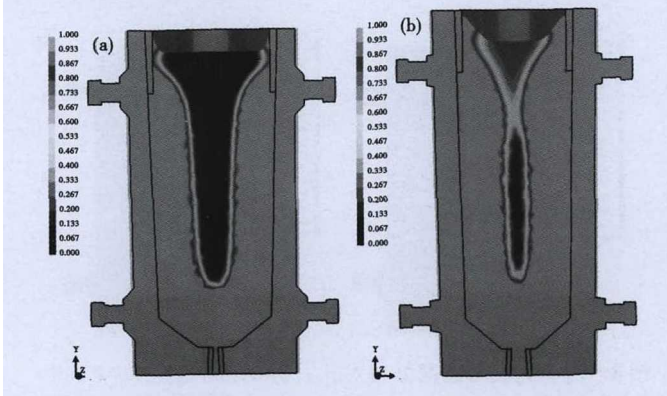


图 10 浇铸后 80 min 凝固分数对比: (a) 7 t(A) 钢锭; (b) 7 t(B) 钢锭

Fig. 10 Solidification fraction comparison after casting for 80 min between (a) ingot 7 t (A) and (b) ingot 7 t (B)

固, 主要表征为钢锭模内凝壳的迅速增厚。同时, 顶部绝热和上部绝热板的存在, 导致钢锭模内, 上部凝固速度缓慢, 而四周钢液的补缩, 保证了该位置钢锭凝固的最后阶段的顺利进行。60 min 之前, 7 t(B) 钢锭凝固分数比矮粗型大 12% 左右, 之后差距慢慢缩小(如图 12)。同一时刻, 凝固分数越大, 冷却速度也就越大, 偏析越小, 所以细长型钢锭偏析较小。

### 3.3 凝固时间模拟结果对比分析

7 t(A) 钢锭全凝时间为 220 min, 本体凝固时间为 125 min; 7 t(B) 全凝时间为 140 min, 本凝时间为 100 min。7 t(A) 全凝时间是 7 t(B) 的 1.57 倍, 本凝时间是 1.25 倍。在锭重一定的条件下, 钢锭的细长比越大, 钢锭的比表面积越大, 冷却强度就越大, 有利于增厚表层细晶区和细化晶粒, 有利于减少偏析、缩短凝固时间。从晶粒细化方面看, 7 t(B) 本体钢锭晶粒比 7 t(A) 细; 从偏析程度来看, 7 t(B) 本体

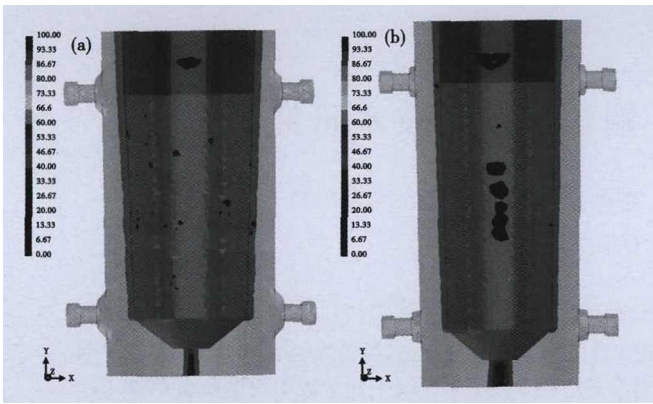


图13 (a)7 t(A)钢锭;(b)7 t(B)钢锭疏松率大于2%的疏松分布

Fig. 13 Distribution porosity with porosity ratio more than 2% in (a) 7 t (A) ingot and (b) 7 t (B) ingot

钢锭凝固比7 t(A)快,偏析程度小,本体溶质分布比7 t(A)要均匀。

### 3.4 疏松缩孔模拟结果对比分析

钢锭的内部缺陷主要分为宏观缺陷和微观缺陷两种。在凝固过程中,钢锭的体积会发生收缩,正是由于这种体积收缩造成了其组织的疏松,而在凝固的末期,如果这种收缩得不到流动钢液的补充,就会在最终的钢锭内部形成缩孔。如图13是模拟计算得到的7 t两种钢锭缩孔疏松预报结果。7 t(A)本体由于没有形成封闭的高温液相区,本体基本没有疏松;而7 t(B)本体中心有封闭的高温液相区,形成了较多的疏松(疏松率大于2%的疏松从距离锭模底部960 mm到1 490 mm处,共长530 mm),且疏松率超过20%的疏松区域大约为180 cm<sup>3</sup>,疏松都分布在钢锭的中心位置。两种钢锭保温帽处虽都有少量疏松,但对本体质量没影响,这里不予考虑。

### 参考文献

- [1] 曹震. 2.8 t扁钢锭凝固过程数学模拟研究[A]. 中国金属学会炼钢分会. 第十七届(2013年)全国炼钢学术会议论文集(A卷)[C]. 中国金属学会炼钢分会, 2013.
- [2] 高菲, 张凯, 李静生, 等. 铸造钢锭工艺的研究[J]. 现代制造技术与装备, 2011(6): 38-40.
- [3] 陈再枝, 蓝德年. 模具钢手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 10-12.
- [4] 李胜利, 关锐, 艾新港, 等. 模具钢用2.8 t矩形锭替代3.0 t方锭的优化及实践[J]. 中国冶金, 2016, 26(2): 55-61.
- [5] 陈进, 余连权. 大型钢锭模的设计[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2010, 12(5): 116-118.
- [6] 耿鑫明. 模具业与模具钢生产现状及压铸模钢材的选用[J]. 金属加工(热加工), 2009(09): 20-24.
- [7] 陈晋阳. 钢锭锭型与锭模设计中的关键参数探析[J]. 特钢技术, 2016, 22(3): 1-4.
- [8] 李娟. 系列模铸钢锭锭型优化设计及宏观偏析模拟[D]. 北京: 中国科学院大学; 中国科学院研究生院, 2012.
- [9] 项利, 耿明山. 大型扁钢锭锭型设计和评价[J]. 中国冶金,

综合以上分析得出,虽然7 t(B)的偏析程度相对于矮粗型较小,模耗较轻,但中心疏松程度很严重,危害很大。7 t(A)钢锭本体质量好,两种锭模中选7 t(A)矮粗型。

### 4 结论

(1)通过温度场的对比分析得出7 t(B)钢锭本体中心在开始凝固80 min时有封闭的高温液相区,高温相区的范围是从距离模底680 mm到1 650 mm处,共长970 mm,而7 t(A)钢锭没有这种现象;7 t(B)锭模最高温度比矮粗型低130 ℃。

(2)通过凝固时间的对比分析得出7 t(A)钢锭的本体凝固时间和全凝时间比7 t(B)钢锭长,两者的全凝时间分别为220 min和140 min,两者本体凝固时间分别为125 min和100 min。通过凝固分数的对比分析得出60 min之前,7 t(B)钢锭凝固分数比7 t(A)大12%左右,之后差距慢慢缩小。

(3)通过疏松缩孔的对比分析得出7 t(A)钢锭只有在保温帽处有少量轻微疏松,本体基本没有;在7 t(B)钢锭的本体中心发现疏松率大于2%的疏松,疏松的分布范围从距离锭模底部960 mm到1 490 mm处,共长530 mm,且其中疏松率超过20%的疏松区域约为180 cm<sup>3</sup>。

十三五国家重点研发计划重大专项(2017YFB0304201);国家自然科学基金面上项目(51774179);辽宁省教育厅创新团队项目(LT2016003);海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室开放基金课题(SKLM EA-K201801)资助

2016, 26(5): 8-14.

- [10] 李胜利, 关锐, 艾新港, 等. 42CrMo4钢39 t锭真空浇铸和凝固过程数值模拟和生产实践[J]. 特殊钢, 2016, 37(1): 1-4.
- [11] Ruiz J and López V. Effect of Surface Laser Treatment on the Microstructure and Wear Behaviour of Grey Iron[J]. Materials & Design, 1996, 17(17): 267-273.
- [12] 董洁. 锻造用钢锭凝固过程温度场、应力场的数值模拟及其应用[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005.

肖卿鹤(1989-),男,博士生(2017年辽宁科技大学),讲师,2011年辽宁科技大学(本科)毕业,钢铁冶金研究。

E-mail: 15841294590@126.com

收稿日期: 2018-04-23