

重庆科技学院



# 毕业设计（论文）

题目 重钢 210 t 钢包热状态的数值模拟研究

学院 冶金与材料工程学院

专业班级 冶金工程 2010-03

学生姓名 宋艳青 学号 2010444105

指导教师 王宏丹 职称 讲师

评阅教师 高艳宏 职称 副教授

2014 年 6 月 9 日

## 注 意 事 项

### 1. 设计（论文）的内容包括：

- 1) 封面（按教务处制定的标准封面格式制作）
- 2) 原创性声明
- 3) 中文摘要（300 字左右）、关键词
- 4) 外文摘要、关键词
- 5) 目次页（附件不统一编入）
- 6) 论文主体部分：引言（或绪论）、正文、结论
- 7) 参考文献
- 8) 致谢
- 9) 附录（对论文支持必要时）

2. 论文字数要求：理工类设计（论文）正文字数不少于 1 万字（不包括图纸、程序清单等），文科类论文正文字数不少于 1.2 万字。

3. 附件包括：任务书、开题报告、外文译文、译文原文（复印件）。

### 4. 文字、图表要求：

- 1) 文字通顺，语言流畅，书写字迹工整，打印字体及大小符合要求，无错别字，不准请他人代写
- 2) 工程设计类题目的图纸，要求部分用尺规绘制，部分用计算机绘制，所有图纸应符合国家技术标准规范。图表整洁，布局合理，文字注释必须使用工程字书写，不准用徒手画
- 3) 毕业论文须用 A4 单面打印，论文 50 页以上的双面打印
- 4) 图表应绘制于无格子的页面上
- 5) 软件工程类课题应有程序清单，并提供电子文档

### 5. 装订顺序

- 1) 设计（论文）
- 2) 附件：按照任务书、开题报告、外文译文、译文原文（复印件）次序装订
- 3) 其它

## 学生毕业设计（论文）原创性声明

本人以信誉声明：所提交的毕业设计（论文）是在导师的指导下进行的设计（研究）工作及取得的成果，设计（论文）中引用他（她）人的文献、数据、图件、资料均已明确标注出，论文中的结论和结果为本人独立完成，不包含他人成果及为获得重庆科技学院或其它教育机构的学位或证书而使用其材料。与我一同工作的同志对本设计（研究）所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

毕业设计（论文）作者（签字）：

年 月 日

## 摘 要

本文以重钢 210t 钢包为研究对象,针对当前钢铁企业出钢温度高、浇注温度命中率低的现象,采用数值模拟的方法,建立了描述钢包稳态和钢包瞬态的温度分布的数学模型,重点从热包状态、包衬结构以及覆盖剂保温性能等方面进行定量分析钢水温度和包衬温度的变化规律,利用 ANSYS 软件求解。得到了钢包在稳态和瞬态的温度分布规律,为减少钢包内钢水温降提供依据。研究表明:

稳态情况下:

① 在钢包内表面加载  $1580^{\circ}\text{C}$ ,当钢包侧壁绝热层导热系数大于  $0.08\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 左右时,侧壁温度分布变化明显,最高温度出现在渣线附近;小于  $0.08\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 左右时,温度变化趋于平缓,体现出绝热层显著的隔热效果;

② 在 40mm 渣层基础上,覆盖剂导热系数取  $0.05\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ,厚度从 15mm 增加到 30mm,热流密度减少  $2048.40\text{W}/\text{m}^2$ ;从 45mm 增加到 60mm,热流密度减少  $388.9\text{W}/\text{m}^2$ 。也就是说,在导热系数一定的情况下,随着覆盖剂厚度的增加,相等的增加量对上表面热流密度变化影响逐渐减弱;

③ 覆盖剂表面热流密度随导热系数的变化近似线性关系,对于添加 15mm 覆盖剂,导热系数每增加  $0.01\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ,覆盖剂表面热流密度增加约  $930\text{W}/\text{m}^2$ ;

④ 通过包壁的热损是钢包热损失的主要部分,它占整个热量损失的  $88.91\%\sim 95.12\%$ ;

⑤ 在增加相同烘烤温度  $50^{\circ}\text{C}$ 的前提下,侧壁最高温度升温约  $3^{\circ}\text{C}$ ,包底最高温度升温约  $5^{\circ}\text{C}$ 。

瞬态情况下:

① 在绝热层导热系数为  $0.12\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 时,钢包烘烤温度每增加  $50^{\circ}\text{C}$ ,钢液温降速率下降约  $0.15^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ;

②  $1050^{\circ}\text{C}$ 烘烤温度下,绝热层导热系数从  $0.03\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 增加到  $0.09\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ,钢液温降速率增加  $0.14^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ;绝热层导热系数从  $0.15\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 增加到  $0.21\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ,钢液温降速率增加  $0.05^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。钢液温降速率随绝热层导热系数的增加逐渐趋于平缓;

③  $1050^{\circ}\text{C}$ 烘烤温度下,覆盖剂导热系数每增加  $0.01\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ,钢液表面温降速率增加约  $0.003^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。相同的烘烤温度条件下,钢包绝热层导热系数的变化对钢液温降速率不会产生大的影响。

**关键词:** 钢包 钢液 热传递 温度场 耐火材料

## ABSTRACT

In this paper, regarding Chong gang 210t ladle as the research object, for the phenomenon of the current iron and steel enterprises high tapping temperature and low casting temperature hit rate, using numerical simulation method, both ladle steady-state and transient temperature distribution model are established, focusing from aspects of heat ladle status, lining structure and thermal insulation covering agent to quantitatively analyze the variation law of molten steel temperature and lining temperature, using the ANSYS software. Ladle has been in steady state and transient temperature distribution, and analysis of ladle and steel temperature drop factor, to provide the basis for reducing the temperature drop of the molten steel. The results show that:

Under steady-state conditions:

① Under the condition that ladle inner surface loads  $1580^{\circ}\text{C}$ , when the ladle sidewall insulation thermal conductivity is greater than about  $0.08\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ , the ladle outer sidewall temperature distribution changes significantly, the maximum temperature shows in the vicinity of slag line; when it is less than about  $0.08\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ , the ladle outer sidewall temperature distribution changes smoothly, reflecting the significant heat-insulating effect.

② Based on 40mm slag layer, the thermal conductivity of covering agent takes  $0.05\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ , when the thickness increases from 15mm to 30mm, the heat flux decreases  $2048.40\text{W}/\text{m}^2$ ; when it increases from 45mm to 60mm, the heat flux decreases  $388.90\text{W}/\text{m}^2$ . Namely, under certain circumstances of the thermal conductivity, equal increase has a waning influence to the heat flux of the upper surface with the increasing of the coating thickness.

③ It is approximate linear relationship when the heat flux of the coating surface changes with thermal conductivity. When the thermal conductivity increases  $0.01\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ , the heat flux of the coating surface increases about  $930\text{W}/\text{m}^2$  for 15mm coating.

④ Ladle heat loss is mainly dissipated through the walls of the ladle, it accounts for 88.91% ~ 95.12% of the whole heat loss.

⑤ Under the condition that the ladle baking temperature increases  $50^{\circ}\text{C}$ , the outer surface maximum temperature rises about  $3^{\circ}\text{C}$ , the ladle bottom maximum temperature rises about  $5^{\circ}\text{C}$ .

Under transient-state conditions:

① Under the condition that the thermal conductivity of heat-insulating layer takes  $0.12\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ , when the ladle baking temperature increases  $50^{\circ}\text{C}$ , the temperature drop rate of liquid steel decreases by about  $0.15^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

② Under the condition of 1050°C baking temperature, when the thermal conductivity of heat-insulating layer increases from 0.03W/(m·°C) to 0.09W/(m·°C), the temperature drop rate of liquid steel increases 0.14 °C/min; when it increases from 0.15W/(m·°C) to 0.21W/(m·°C), the temperature drop rate of liquid steel increases 0.05°C/min; the temperature drop rate of liquid steel is gradually leveling off with the increasing of thermal conductivity of heat-insulating layer.

③ Under the condition of 1050°C baking temperature, when the thermal conductivity of the covering agent increases 0.01W/(m·°C), the temperature drop rate of molten steel surface increases about 0.003°C/min. Under the same conditions of baking temperature, the change of the thermal conductivity of ladle heat-insulating layer does not have a significant influence to the temperature drop rate of molten steel.

**Keywords:** ladle; liquid steel; heat transfer; temperature field; refractory material

## 目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
1 绪 论.....	1
1.1 钢包传热机理研究.....	1
1.2 钢包传热的研究方法.....	1
1.2.1 实测法.....	1
1.2.2 数值模拟法.....	2
1.3 国内外现状分析.....	2
1.3.1 国外现状分析.....	2
1.3.2 国内研究现状分析.....	3
1.4 钢包钢液温降的原因分析及解决措施.....	4
1.4.1 钢包烘烤对钢水温度的影响.....	4
1.4.2 钢包周转流程对钢水温度的影响.....	5
1.5 本课题研究的目的意义.....	6
1.6 本课题研究的主要内容.....	6
1.7 本章小结.....	6
2 钢包稳态传热数值模拟.....	7
2.1 包体模型简化与建立.....	7
2.1.1 包体尺寸和材料参数.....	7
2.1.2 建立有限元模型.....	8
2.1.3 假设条件.....	9
2.1.4 边界条件.....	9
2.2 稳态温度场模拟结果及分析.....	11
2.2.1 钢包包底与侧壁的热状态分析.....	12
2.2.2 渣层稳态温度场模拟计算.....	15
2.3 烘烤温度对钢包热状态影响.....	18
2.4 本章小结.....	19
3 钢包瞬态传热模拟.....	20
3.1 模型建立.....	20
3.2 边界条件的确定及最终态计算.....	21
3.3 瞬态钢包外壁热状态分析.....	22
3.4 两种钢水瞬态温降计算方法说明.....	24

---

3.5 取点法计算钢水温降 .....	25
3.6 烘烤温度对钢液温降的影响 .....	25
3.7 钢包绝热层导热系数对钢液温降的影响 .....	26
3.8 钢包覆盖剂对钢水温降的影响 .....	28
3.9 本章小结 .....	30
4 结 论 .....	31
参考文献 .....	32
致 谢 .....	33

## 1 绪 论

众所周知，钢铁冶炼是在高温下进行的冶金过程，合理的温度控制，不仅有利于高炉、转炉内各种物理化学反应有序进行，也是保证整个后续环节顺行的关键。转炉出钢过程中，盛钢水的钢包，其热状态对钢水温度变化具有重大影响。而包衬蓄热未饱和与钢液上部渣层散热是其主要影响因素，因此为了能够准确掌握钢液在钢包内的温度变化，合理控制出钢时钢水的温度，减少出钢温降，首先要掌握钢液在钢包内的传热行为。

### 1.1 钢包传热机理研究

钢液在钢包内的热损失如图 1.1 所示。钢包内钢水的热损失有两种途径。第一是通过包壁散失的热量，其热量通过热传导进入包壁，其中部分热量蓄存在包壁内，部分热量通过包外壳以辐射和对流的方式发散到周围环境中；第二是经钢水上表面的辐射和对流传热散失掉热量，它同时包括了传导、辐射和对流 3 种传热的基本方式。

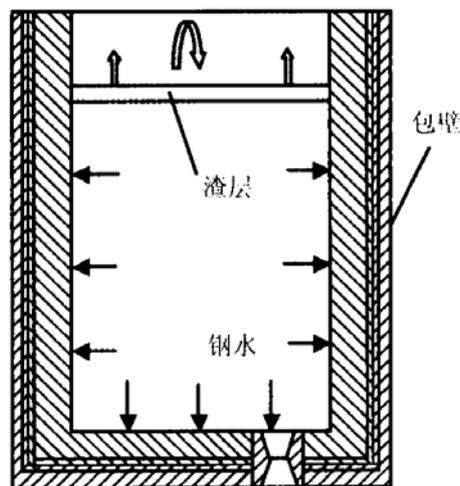


图 1.1 钢包传热示意图

### 1.2 钢包传热的研究方法

钢包传热过程的研究主要集中在钢包内钢水与钢包内衬的传热以及钢水、包衬的温度分布。从研究方法上来讲有实测法、物理模拟法、数值模拟法和综合研究法。现实中多用实测法与数值模拟法，下面简述这两种方法：

#### 1.2.1 实测法

实测法是在钢包内衬按事先设定的测点埋设热电偶，甚至将热电偶穿过包壁伸入钢水中，测定钢包温度分布及其在热循环中的变化，以及测定钢水在盛钢过程中的温度变化。这种方法能比较准确的检测出钢包或钢水中某点的具体温度，用以分析钢包钢水的热状态以及变化，但是这种方法很难准确的测定整个钢包内的温度状况，事先埋设热电偶也很不方便。

## 1.2.2 数值模拟法

数值模拟法可分为解析法和数值法。

采用解析法求解物体传热数学模型,大多局限于讨论简单的一维情况。钢包壁近似为圆柱体,但包壁厚度对于钢包的直径而言,其值很小,可以近似看作平板,但只有当内表面的边界条件的变化所引起的温度场扰动传到工作层与永久层的界面之前,才可以认为是半无限大平板。因此解析法一般用来定性分析充分烘烤的钢包出钢过程钢包工作层的温度分布。

解析法求解物体的导热过程,优点是可以得到物体温度分布的数学表达式,由数学表达式就很容易定性分析温度分布的影响因素及其变化趋势。但是当钢包传热条件变复杂后,再加之解析法计算过程中有一系列假设条件,导致结果往往与现实测量结果有较大偏差。随着计算机技术的不断进步,计算机的运算速度、存储单元呈几何级数提高,量大繁杂的计算不再成为限制环节,数值法在求解物体传热数学模型中已起着主导作用。

## 1.3 国内外现状分析

### 1.3.1 国外现状分析

上世纪 70 年代以前,炼钢厂钢水浇铸基本为钢锭模铸。由于其浇铸速度快、时间短,浇铸温度相对较宽,当时人们侧重钢水出炉后在盛钢期间将损失掉多少热量,需要出钢时补偿多少过热度来保证模铸的顺利进行。一般根据热平衡原理,将钢包内钢水看作一“充分混合”的温度均匀的总体,研究其在一定条件下的传热及热损失。

V. Paschkis<sup>[1]</sup>是早期从事这方面研究的代表人物之一。在 20 世纪 50 年代中期,他假定通过包壁和钢水上表面的热流为稳定热流,经电模拟,采用其称之为“热流分析”的方法来计算钢水温降。计算所依据的变量值,都是给定的常数值。这一理论虽近似提供了一种理解影响盛装钢水时间因素的途径,但由于一些理想化的假设,如假定装钢水时间为零、忽略上表面形成的渣层等,这种计算结果应用于生产将产生偏差。

J. W. Hlinka 和 T. W. Miller<sup>[2]</sup>设计了一热水模型试验系统,模拟研究钢水与耐火材料完全接触体系中的温度损失。以一厚渣层状态解决裸露的渣表面非线性辐射热损失不能模拟的问题,观察到不管表面渣层是厚是薄,钢水内部发生明显对流现象,且对浇铸温度有不同的影响。薄渣层时,钢水渣层交界面处的热损失大于钢包内部的温差,表面处的钢水因密度增加而下降,与包中心区域的钢水混合均匀,钢包内无温度分层;厚渣层时,因厚渣层能起到很好的绝热作用,可假定钢水渣层交界面处“无热损失”(实际存在热损失);而此时因侧壁的传导散热,使紧邻它的钢水温度降低、密度增大而下降,形成侧壁钢水对流。此钢流流至钢包底层,引起钢包内温度分层,直接影响浇铸温度。

R. Widdowson<sup>[3]</sup>在研究控制钢水成分和温度工作中,定量估算了钢包热损失。他分析了浇铸速度和自然对流速度的相互影响,进一步推算了钢包内钢水温度分层,经在

BSC（英钢联）钢厂间断测量铸流温度验证，结果表明当考虑温度分层时，计算值与测量值较好地吻合；反之，两者有一定的偏差。为了能定量描述钢包内钢水温度分层对浇铸温度变化的影响，T. Robertson 和 A. Perkins<sup>[4]</sup>将钢包内钢水分为 3 部分，分别定义为环状边界层、中心容积区和底层混合储存区，采用一由钢包大小和浇铸速度决定的混合系数来决定底层混合储存区的厚度，并用混合系数来分析对浇铸温度的影响。

H. Pferfer 等人<sup>[5]</sup>为了计算钢包内钢水上表面的热损失，分析了钢包锥形罩敞口及盖包盖的传热情况。他们假定钢包内钢水温度充分混匀，设渣面、渣面以上包衬表面、锥形罩和包盖内表面为 4 个等温表面，建立它们相互之间自辐射和反射之间的关系式，以此推导出射入辐射密度和表面纯热流的关系式。

### 1.3.2 国内研究现状分析

近十几年来，国内的许多钢铁厂对钢包的散热损失、钢包热循环过程中的温降也越来越重视。合理的温度制度是提高产品质量、降低生产成本的有效手段，但目前的实际情况表明，出钢温度偏高、钢水温度命中率低的现象仍是大部分钢厂共同面临的问题。就上海宝山钢铁公司而言，钢水温度命中率仅为 69.0%。因此对钢包流场温度场的计算，分析钢包热循环过程中的温降机理，寻求提高钢水温度命中率、减少钢包温降的措施成为国内许多冶金科研人员的研究工作。

上世纪 90 年代初期，李顶宜等人<sup>[6]</sup>对钢包的传热进行了研究，他们经过冷态和热态试验，研究了钢包吹 Ar 不同操作参数对钢包内钢水速度场和温度变化的影响，并用不同实验方法所获得的实测数据对理论计算值与实际值的偏差进行了检验。

王英哲等人<sup>[7]</sup>根据鞍钢第三炼钢厂的实际情况，对鞍钢 180t 钢包进行了全过程加保温盖工业试验，试验结果表明，钢包全过程加保温盖可提高包衬温度 400℃，降低转炉出钢温度 20℃等明显的节能效果。

刘晓等人<sup>[8]</sup>从导热基本方程出发，对宝钢电炉用钢包的吸热规律进行了系统的理论分析与数值模拟，在考察了不同的钢包状态及预热制度下钢包的传热情况后，计算了钢包吸热所导致的出钢温降，钢水在 LF 处理期间的温降速率等，最后将数值计算结果与实测值进行了对比。

李晶等人<sup>[9]</sup>根据对大冶钢厂钢水入包前包衬的温度分布进行实测，并经钢包传热数学模型计算，得出大冶特钢 60t 钢包内表面预热温度为 500℃和 900℃时，两者钢水温降相差约 50℃，前 20min 内钢液温度呈直线下降，而 35min 后钢包衬蓄热基本达到饱和，温降减慢；较大温降主要是包衬蓄热和吹氩过程中形成的钢液裸露面对外散热，还指出钢包内钢液温度的分层可以减少通过包衬散热所带来的热损失。

吴晓东等人<sup>[10]</sup>对宝钢炼钢厂 300t 钢包的整个周转过程的热状态进行了跟踪测试，对各阶段的测试结果进行了分析，并得出了周转过程中各阶段钢包包衬温度变化规律。他们在新钢包砌筑时，在钢包内衬埋入了热电偶，通过补偿导线连接到固定于钢包滑动

水口驱动机构处的快速接头上。通过研究发现钢包在烘烤后期 11h（实际钢包烘烤时间约 66h）内，包衬升温速率几乎为  $0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ；从热电偶的测试温度来看，新钢包投入使用的前 6 个周期，包衬一直处于蓄热状态，此时应该考虑钢水温度补偿，而 6 个周期后包衬蓄热和散热达到平衡，这与数值模拟法得出的结果是基本一致的。

杨治立等人<sup>[11]</sup>通过建立钢包传热数学模型和有限元模拟计算，分别采用代表值法和能量守恒法分析重钢炼钢厂 210t 钢包不同烘烤温度、不同绝热层材质对钢水温降速率的影响，并对不同工况的钢水温降速率作了预测。结果表明：代表值法和能量守恒法计算的钢水温降速率有较大差异；钢包烘烤温度对钢水温降速率影响很大；钢水浇注过程中温降速率比静置的要大。

吴鹏飞等人<sup>[12]</sup>结合永钢的实际情况，采用有限元分析法对新钢包温度场进行研究，进而采用 ANSYS 数值模拟软件对钢包从烘烤至周转过程进行了数值模拟，重点分析了预热烘烤对新钢包热状态及钢水温度的影响，并进行了试验验证。结果表明：新钢包预热烘烤 25h 虽然达到红包状态，且包壁温度趋于热饱和，但是包底仍有蓄热升温空间，周转后钢包造成钢水的最大温降约  $10^{\circ}\text{C}$ ；预热烘烤 55h 后，钢包整体趋于热饱和，周转后钢包造成钢水温降不到  $1^{\circ}\text{C}$ ，因此可知理想的预热烘烤时间为 55h，为炼钢厂钢包烘烤制度及出钢温度制度的制定提供了参考。

此外北京科技大学、武汉科技大学、内蒙古科技大学等运用数学模拟法，对钢包的温度场和应力场进行了数值模拟计算。由于理论推导假设条件带来的计算误差、数学模型所容纳的实际参数有限及各个钢厂的特殊条件等原因，以上所述的计算机模型在实际应用中还受到许多限制，这方面的研究还将在不断地深入和完善。

## 1.4 钢包钢液温降的原因分析及解决措施

钢液温降主要出现在出钢、精炼、浇注以及几个流程之间的转运过程。

钢液通过包壁、包底、渣层向外传热，其中钢包包衬蓄热是钢液散热的主要原因。此外，由于钢包的使用次数不同，包衬耐火材料的厚度也不相同，从而引起包衬蓄热量的变化。一般来讲，钢包的使用次数越多，包衬的吸热量越小，但包衬蓄热仍会使钢液温度明显降低。

### 1.4.1 钢包烘烤对钢水温度的影响

李晶等人<sup>[9]</sup>通过传热模型，在实测出钢前包衬温度分布的基础上，对大冶 60t 钢包在出钢温度为  $1640^{\circ}\text{C}$  时，不同烘烤温度对钢水温降的影响进行分析，其结果如图 1.2 所示，由图可以看出：前 20min 内钢液温度变化较快。这是因为钢水刚入包时，包衬温度未达到饱和，蓄热量大，使钢液温降快；之后，包衬蓄热逐渐减少，钢液温降变缓，35min 左右包衬蓄热基本达到饱和，通过包壁散热量又较少，因此钢液温度下降减少。

王明林、刘浏<sup>[13]</sup>通过建立钢水传热数学模型，分析了钢水温度随钢包内表面烘烤温

度的变化规律，模拟结果表明：如果将包壁烘烤温度由 600℃ 提高到 1200℃ 时，钢水温降减少 7℃，因此提高出钢前钢包工作层的烘烤温度，可以减少出钢过程钢水温降。

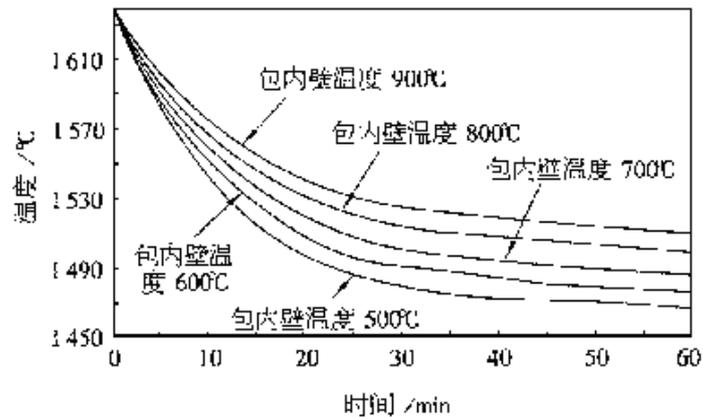


图 1.2 钢包烘烤温度对钢水温度的影响<sup>[9]</sup>

#### 1.4.2 钢包周转流程对钢水温度的影响

出钢过程造成钢水温降的主要原因是包衬的蓄热和合金的加入，因此对合金进行充分的烘烤有利于减少钢水温降。从出钢到浇注前过程中，钢液镇静时间虽然很短，但在全过程中其热损失最大。当钢液面裸露，80t 钢水运输 5min 时，钢水温度从 1598℃ 降到 1577.89℃；而钢水表面覆盖有 80mm 厚液渣和 40mm 厚碳化稻壳时，80t 钢水 5min 内温度降低仅为 2.3℃，因此钢液上面的覆盖剂对钢水保温起着重要的作用。钢水浇注过程钢水表面加覆盖剂和钢包加盖，减少表面散热，可以明显减少钢水温降。

钢包热循环过程各阶段，加与不加隔热层对钢水温度的影响示于图 1.3。从图中可以看出，在钢包周转过程中，经过相同的时间段，加隔热板的钢液温度明显高于未加隔热板的，并且，钢包从出钢到浇注完毕，周转的时间的长短对盛钢期间钢包内钢液温度变化具有的非常显著的影响，因此钢包周转过程的时间应尽可能缩短。

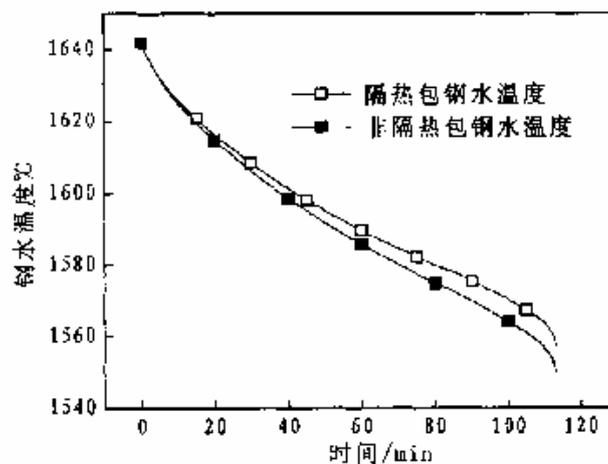


图 1.3 两种钢包钢液温度的变化

## 1.5 本课题研究的目的意义

在现有理论与实践经验基础上,针对当前钢铁冶炼过程对钢液纯净度、温度要求逐步提高以及重钢 210t 钢包的使用现状,通过使用 ANSYS 有限元模拟分析软件对钢包使用过程中的热状态进行数值模拟分析,更深入地了解其传热规律,以期得出优化措施,为减少钢液温降提供有力的理论依据,并与实际测量结果相对比。

## 1.6 本课题研究的主要内容

通过查阅发现,目前国内在钢包温度场有限元模拟研究方面所做的工作比较少。就公开发表的文献看,目前有北京科技大学的吴鹏飞等人<sup>[12]</sup>结合 H 钢厂的实际情况,采用有限元分析法对新钢包温度场进行研究,进而采用 ANSYS 数值模拟软件对钢包从烘烤至周转过程进行了数值模拟,重点分析了预热烘烤对新钢包热状态及钢水温度的影响,并进行了试验验证。结果表明:新钢包预热烘烤 25h 虽然达到红包状态,且包壁温度趋于热饱和,但是包底仍有蓄热升温空间,周转后钢包造成钢水的最大温降约 10℃;预热烘烤 55h 后,钢包整体趋于热饱和,周转后钢包造成钢水温降不到 1℃,因此可知理想的预热烘烤时间为 55h,为炼钢厂钢包烘烤制度及出钢温度制度的制定提供了参考。

本文针对重钢 210t 钢包钢水温度变化及波动大的现状,采用现场测试和数学模拟相结合的方法,从热包状态(烘烤温度、烘烤时间)、包衬结构(导热系数)、覆盖剂保温性能(导热系数、厚度)等方面进行定量分析钢水温度和包衬温度的变化规律。为减少钢包内钢水温降、保持钢水温度稳定、合理制定钢包温度制度、优化炼钢工艺提供理论依据,对重钢炼钢厂实际生产具有指导意义。

## 1.7 本章小结

本章简要介绍了关于钢包传热研究机理和方法、钢包传热研究的发展、钢包钢水温降的原因分析及解决措施,总结了国内外学者对钢包传热行为的研究概况,最后阐述了本课题的研究目的及主要内容。

## 2 钢包稳态传热数值模拟

随着工业化的进程加快，能耗加剧及资源短缺成为阻碍企业发展的重要因素，探索如何以较低的成本生产高质量的产品日益受到人们的重视，尤其是钢铁企业，作为能源、资源高度密集型企业，如不能及时落实推进节能降耗工作，在竞争激烈的市场将难以立足。出钢温度偏高、中间包温度命中率是当前多数钢企面临的共同问题，建立合理的温度控制制度将有助于节约能耗、降低生产成本。

得益于计算机科技的进步，一款大型工程结构分析软件 ANSYS，可以模拟实际工况下的辐射和对流换热，进行稳态和瞬态传热分析，其前处理模块(POST1)提供实体建模和网格划分，后处理模块 (POST26) 可将分析计算结果以曲线、图表等形式显示或输出。本章以重钢 210t 钢包为研究对象，根据现场实际数据和相关假设条件建立有限元传热模型，利用有限元模型对采用不同隔热层材质时钢包温度场变化进行模拟，以求出合理的参数，其结果可为现场生产实践提供重要的理论依据。

### 2.1 包体模型简化与建立

#### 2.1.1 包体尺寸和材料参数

210t钢包简化模型如图2.1所示。

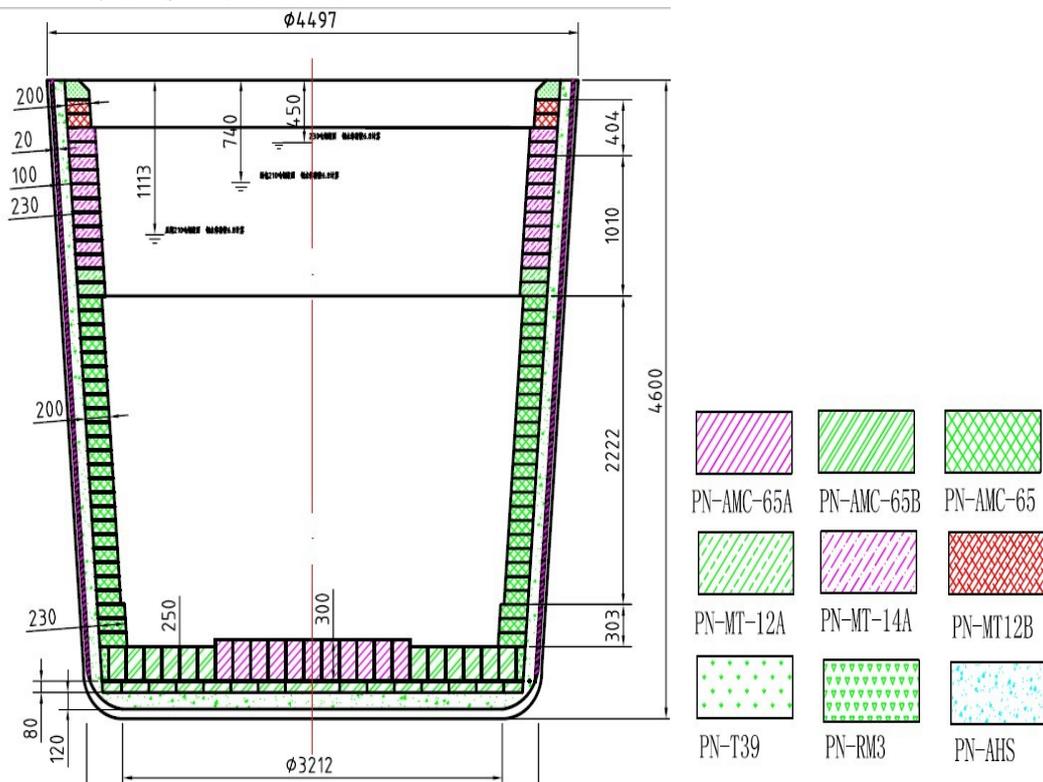


图2.1 包体材质尺寸示意图

具体尺寸参数为：高4.60m，内径3.84m，正常工作状态下盛装210t钢水，有效容积

为 $30\text{m}^3$ ，钢包外壁面积为 $55.26\text{m}^2$ ，上口面积 $16.57\text{m}^2$ ，下底面积 $11.48\text{m}^2$ ，钢包材料物性参数见表2.1。

表 2.1 钢包材质与尺寸(单位: mm)

项目	钢包工作层		钢包永久层		钢包绝热层		钢包包壳	
	材料	厚度	材料	厚度	材料	厚度	材料	厚度
侧壁上	镁铝不烧砖	200			绝热纤维	20	20#	40
侧壁中	镁碳砖	230	轻烧高	100				
侧壁下	镁铝不烧砖	200/230	铝砖					
包底	镁铝不烧砖	380/330		120	—	—		40

### 2.1.2 建立有限元模型

通过图 2.1 可以看出，钢包由工作层、永久层、绝热层以及外壳组成，几何形状以中心线为轴对称，包壁受到相同的温度载荷及边界条件。把包体简化为轴对称体，因此我们可以取包体纵截面的一半，建立相应的几何模型进行分析，利用四节点四边形单元 (PLANE55) 进行分析求解。

依据包体尺寸，利用 ANSYS 完善的处理功能建立几何模型，划分网格以及分析结果等。网格的划分时，粗细应尽量满足分析时的正确性及经济性，本模型采用对应网格化的方法，传热计算是利用二维实体中四节点四边形单元 (PLANE55) 进行。模型建立在以钢包底部中心为原点、水平方向为 x 轴，垂直于水平面为 y 轴的坐标系统上，计算网格划分如图 2.2 所示。

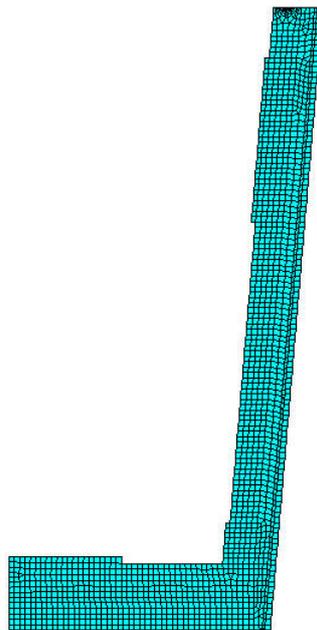


图 2.2 钢包稳态传热计算网格

### 2.1.3 假设条件

①流体为稳态、不可压缩流体；

②钢包在静置、运送过程中钢液的温度变化很小，为了简化计算，可以不考虑自然对流的作用。

### 2.1.4 边界条件

主要物性参数见表2.2，在模型计算时都以温度的函数形式输入。

表2.2 模型计算中用到的部分参数

材料	密度/ kg·m <sup>-3</sup>	导热系数/ W/(m·°C)	比热容/ kJ/(kg·°C)	黑度
镁碳砖	2700	$-3.8 \times 10^{-4}T + 13.647$	1.13	0.75
铝镁不烧砖	3150	$2.9 - 0.3 \times 10^{-3}T$	1.05	0.8
轻烧高铝砖	2390	$1.52 - 0.19 \times 10^{-3}T$	$0.2 + 0.56 \times 10.4T$	0.8
绝热纤维	200	$0.12 + 0.17 \times 10^{-5}T$	0.80	
20#钢	7800	$-1.02 \times 10^{-9}T^3 - 1.94 \times 10^{-5}T^2 - 1.5 \times 10^{-2}T + 52.1$	0.473	0.8
钢水	7000	23.3	0.88	0.4
炉渣	3500	4.0	1.34	0.6
炭化稻球	70	0.035	1	0.6

其中镁碳砖和钢板的导热系数随温度变化方程分别如式(2.1)与式(2.2)。

$$\lambda = -3.8 \times 10^{-4}T + 13.647 \quad (2.1)$$

$$\lambda = -1.02 \times 10^{-9}T^3 - 1.94 \times 10^{-5}T^2 - 1.5 \times 10^{-2}T + 5.21 \quad (2.2)$$

式中， $\lambda$ —导热系数，W/(m·°C)； $T$ —温度，°C。

由于包身是一个以中心线为轴的回转对称结构，因此可以把它简化为轴对称体进行分析。温度控制方程根据Fourier热传导定律和能量守恒定律建立，在建立包体传热物理模型时，将其简化为平面轴对称问题，由于钢包是轴对称物体，根据轴对称模型的传热计算方法。其导热偏微分方程为：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.3)$$

式中， $\rho$ —材料的密度，kg/m<sup>3</sup>； $t$ —过程进行的时间，s； $C_p$ —材料热容，kJ/(kg·°C)。

在建立模型的时候，包身的温度场按稳态温度场考虑，则稳态温度场热传导方程式(2.2)中的温度随时间变化项不存在，可进一步简化为：

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (2.4)$$

根据包体的实际工作状况，包体的温度场分布除由式(2.4)确定外，还要符合下列两

类边界条件:

①在包体内部可取为第一类边界条件:

$$T|_{\Gamma} = T_w \quad (2.5)$$

式中,  $\Gamma$ —物体边界;  $T_w$ —已知壁面温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

在包内, 钢液和包壁是接触传热, 求解时按第一类边界条件处理, 即已知工作层内表面温度为钢液温度 (按 $1580^{\circ}\text{C}$ 计算)。

②包壳外表面可取为第三类边界条件:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = h(T - T_f) \Big|_{\Gamma} \quad (2.6)$$

式中,  $T_f$ —环境温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $h$ —综合换热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

包壳表面的散热有两种方式: 一是与周围空气的对流散热, 二是通过辐射向周围环境散热, 将其折算成综合换热系数进行考虑。

炉壳表面与周围空气的对流换热是通过空气的自然流动实现的, 计算对流换热系数时按自然对流处理。自然对流换热的实验准则关系式

$$Nu_m = C(Gr_m \cdot Pr_m)^n \quad (2.7)$$

式中:  $m$ 表示定性温度,  $t_m = (t_w + t_f)/2$ ,  $Gr_m$ 、 $Pr_m$ 、 $Nu_m$ 分别为格拉晓夫准则、普朗特准则和努塞尔准则, 常数 $C$ 和 $n$ 由传热手册查得。 $Gr_m$ 和 $Nu_m$ 的表达式分别如下所示

$$Gr_m = \frac{gh^3 \beta_m \Delta t}{\nu_m^2} \quad (2.8)$$

$$Nu_m = \frac{a_1 h}{\lambda_m} \quad (2.9)$$

式中:  $\beta_m$ —定性温度下空气的容积膨胀系数,  $\text{K}^{-1}$ ;  $\nu_m$ —运动黏度,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\Delta t$ —炉壳表面与环境温度的差,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda$ —空气的导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

计算自然对流换热系数 $\alpha_l$ 时, 先假定炉壳外表面温度 $t_w$ , 然后计算出定性温度 $T_m$ , 由文献<sup>[14]</sup>查得定性温度下空气的导热系数 $\lambda_m$ 、空气的运动黏度 $\nu_m$ 、普朗特准则 $Pr_m$ 代入相关参数可由式(2.8)计算出 $Gr_m$ , 由此再查表选定适宜的 $C$ 、 $n$ , 联立解式(2.7)和式(2.9)即可求出对应条件下的 $\alpha_l$ 。

物体辐射换热量的能力取决于物体本身的温度 and 黑度, 物体本身温度的高低起着关键性的作用, 黑度的波动对炉壳温度的变化影响不大。单位面积辐射换热量的计算公式如下:

$$q = \varepsilon \cdot C_b \cdot \left( \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_f}{100} \right)^4 \right) \quad (2.10)$$

式中:  $\varepsilon$ —物体本身的系统黑度;  $C_b$ —物体的辐射系数, 其值为 $5.67\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $T_w$ 、 $T_f$ — $t_w$ 、 $t_f$ 对应的绝对温度。

由式(2.10)计算出假定炉壳外表面温度 $t_w$ 为某值时的 $q$ ，再由式(2.11)求出 $\alpha_2$ 。

$$q = \frac{\alpha_2(t_w - t_f)W}{m^2} \quad (2.11)$$

设定炉壳外表面温度 $t$ 为某值时，将上述计算得到的 $\alpha_1$ ， $\alpha_2$ 两项相加，就可算出对应炉壳表面温度的综合换热系数 $h$ 。

用以上方法计算出包壳的综合换热系数随温度的变化方程为：

$$h = 5.2792 \times 10^{-8} t^3 + 2.1493 \times 10^{-5} t^2 + 0.023076 t + 12.3198 \quad (2.12)$$

用同样的方法计算得出覆盖剂、镁碳砖、铝镁碳砖与周围空气的综合换热系数随温度变化的方程分别如式(2.13)~式(2.15)：

$$h = 4.3362 \times 10^{-8} t^3 + 9.2816 \times 10^{-6} t^2 + 0.022812 t + 11.5419 \quad (2.13)$$

$$h = 5.1867 \times 10^{-8} t^3 + 1.6672 \times 10^{-5} t^2 + 0.024967 t + 11.7535 \quad (2.14)$$

$$h = 5.4702 \times 10^{-8} t^3 + 1.9136 \times 10^{-5} t^2 + 0.025685 t + 11.8240 \quad (2.15)$$

## 2.2 稳态温度场模拟结果及分析

本模型采用对应网格化的方法，本次计算由于是二维模型，为了达到较好的模拟效果，对模型网格划分较细。另外稳态计算是对出钢后模拟，所以为了排除出钢温降的影响，钢液温度按 1853K 考虑，周围环境介质温度按 303K 进行加载，计算得到的温度场分布云图和热流密度云图分别如图 2.3、图 2.4 所示。从图中可以看出，由内向外沿包衬厚度方向，包体各层温度明显的降低；且工作层渣线附近的温度较高，这是由于该部位耐火材料采用的是导热系数相对较大的镁碳砖。

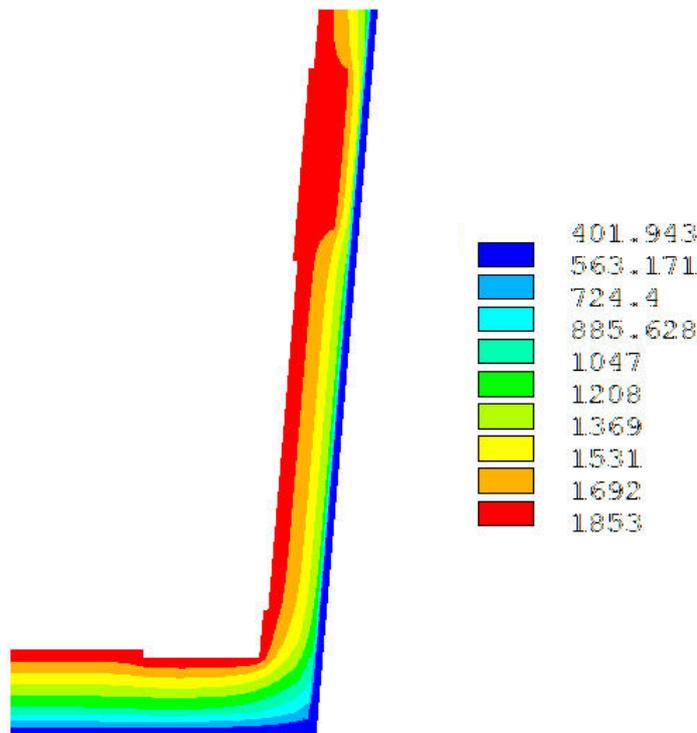


图 2.3 钢包稳态温度分布云图

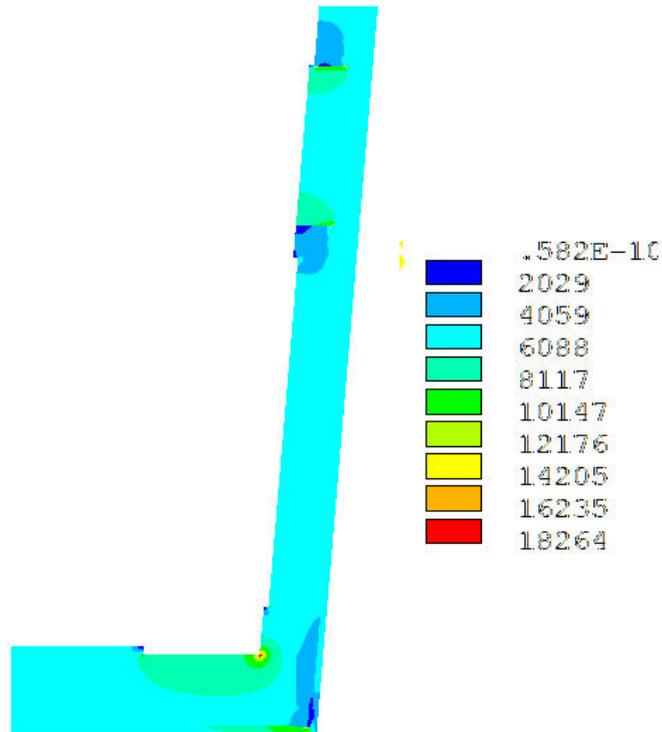


图 2.4 钢包稳态热流密度云图

### 2.2.1 钢包包底与侧壁的热状态分析

计算结束后，分别定义以侧壁、包底为输出路径，输出节点温度，从下到上沿钢包侧壁温度分布的曲线如图 2.5 所示。钢包侧壁渣线附近与包底和侧壁交界处分别出现表面最高温度 484.51K 和最低温度 401.94K。

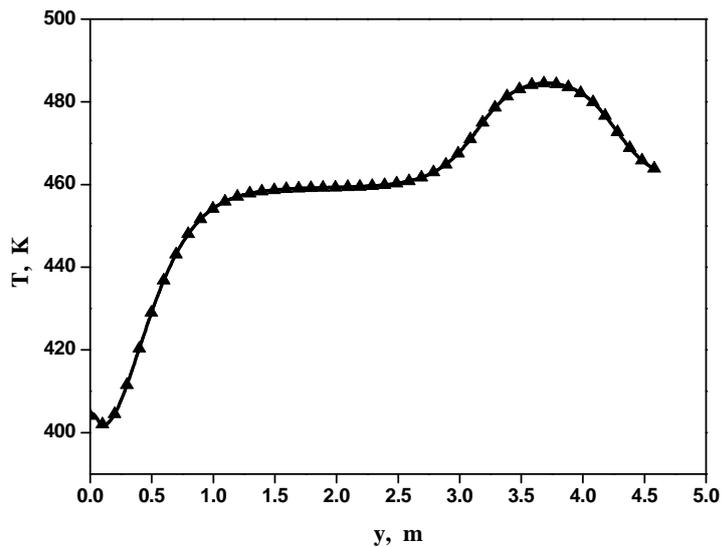


图 2.5 侧壁表面温度分布曲线

同样以坐标原点为起点，从左到右沿包底温度变化曲线如图 2.6 所示。最高温度为

504.09K，比钢包侧壁表面最高温度高 20K，说明侧壁绝热纤维板绝热效果明显，耐火材料的厚度变化对钢包隔热性能影响不大。

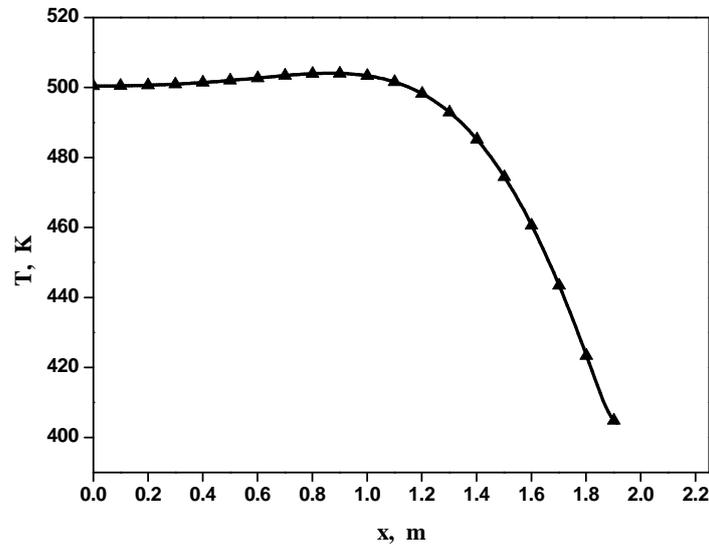


图 2.6 包底表面温度分布曲线

分别定义以侧壁、包底为输出路径，输出节点的热流密度，计算得包壁和包底的平均热流密度分别为  $4493.75\text{W/m}^2$ 、 $6294.30\text{W/m}^2$ 。依据钢包结构的几何参数，分别求得包壁和包底散热量为  $248324.63\text{W}$ 、 $72258.56\text{W}$ 。

计算时，绝热层导热系数是以温度的一次函数形式加载在模型中的，函数式为： $\lambda=aT+b$ ，其中， $a=0.17\times 10^{-5}$  对  $\lambda$  影响不大，因此在讨论绝热层的导热系数对钢包绝热性能的影响时，忽略  $a$  的影响。改变绝热层的导热系数分别计算出侧壁不同部位的温度，分别取  $b$  为 0.01、0.04、0.08、0.12、0.25、0.5，不同情况下侧壁温度变化如图 2.7 所示。

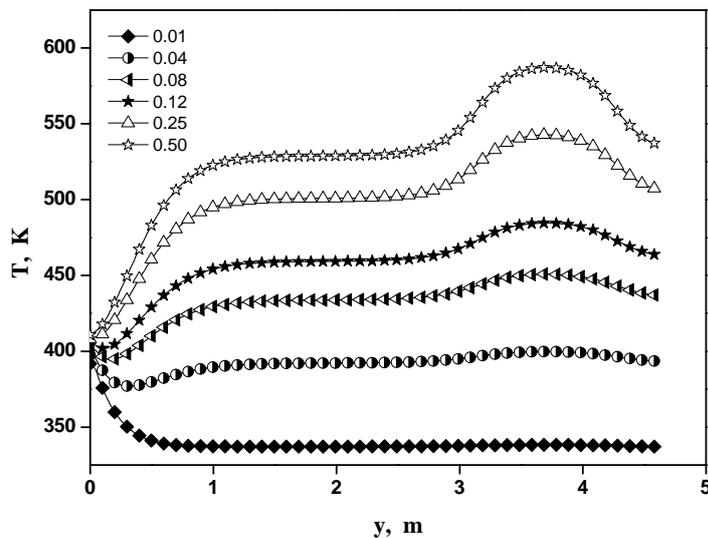


图 2.7 侧壁温度与绝热层导热系数的关系

从图中可以看出，在钢包内表面加载  $1580^{\circ}\text{C}$ ，当钢包侧壁绝热层导热系数大于  $0.08\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$  左右时，侧壁温度分布变化明显，最高温度出现在渣线附近；小于  $0.08\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$  左右时，温度变化趋于平缓，体现出绝热层显著的隔热效果。

同样，计算绝热层导热系数取不同数值时钢包包底和侧壁的平均热流密度，用 *originPro8* 作图，如图 2.8 所示。图中两条曲线有交点，对应的绝热层导热系数约为  $0.25\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，当导热系数小于此点临界值时，钢包包底热流密度较大；大于此点临界值时，钢包侧壁热流密度较大

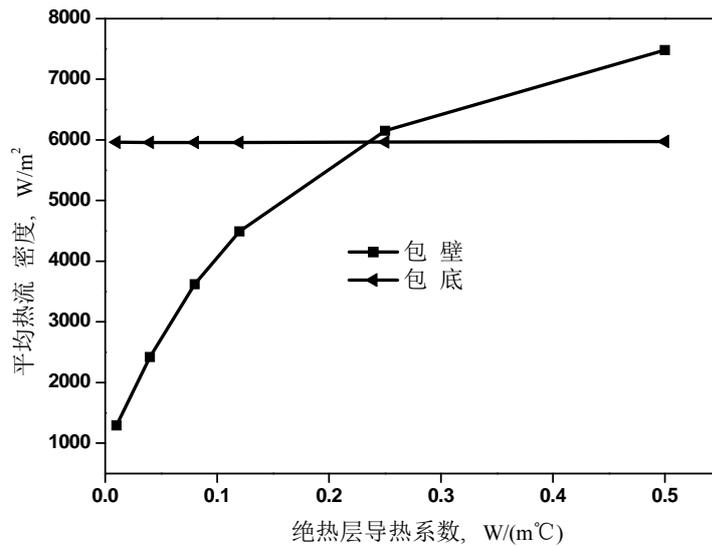


图 2.8 绝热层导热系数与包壳热流密度关系

在钢包渣线附近，取  $y=4.16\text{m}$  时，沿包衬厚度方向温度变化如图 2.9 所示。

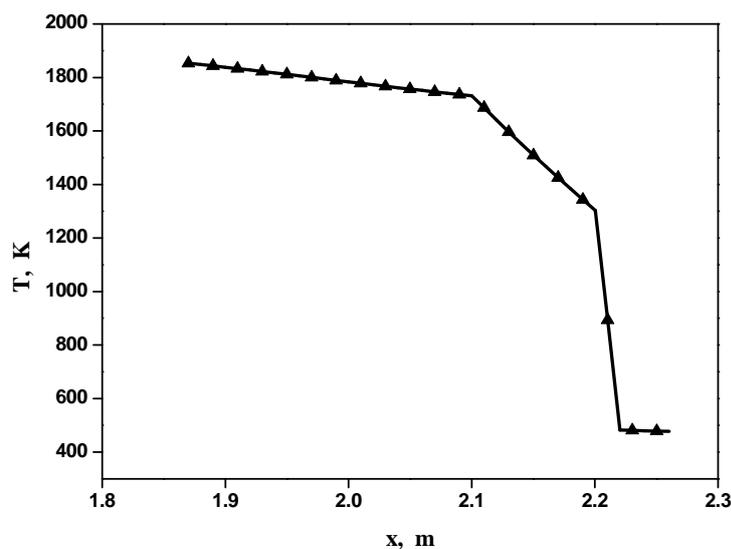


图 2.9 沿包衬厚度方向温度变化

图中从左到右四条折线中，第一条折线斜率很小，对应为镁碳砖工作层，导热系数大；第二条折线处在浇注料永久层，可以看出此时折线斜率明显增大，第三条折线为绝热层，虽然此层只有 20mm 厚，但是其温度梯度几乎为直线，隔热效果最明显，最后一条折线很平缓，原因是钢板的导热系数非常大，热阻很小，温降可以忽略。

### 2.2.2 渣层稳态温度场模拟计算

渣层稳态温度场计算应首先建立渣层网格模型，然后加载边界条件进行计算，得到不同条件下（40mm 渣层+0mm 覆盖剂、70mm 渣层+0mm 覆盖剂、40mm 渣层+30mm 覆盖剂），覆盖剂渣层温度场分布云图如图 2.10~2.12 所示。覆盖剂导热系数均取  $0.035\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 。

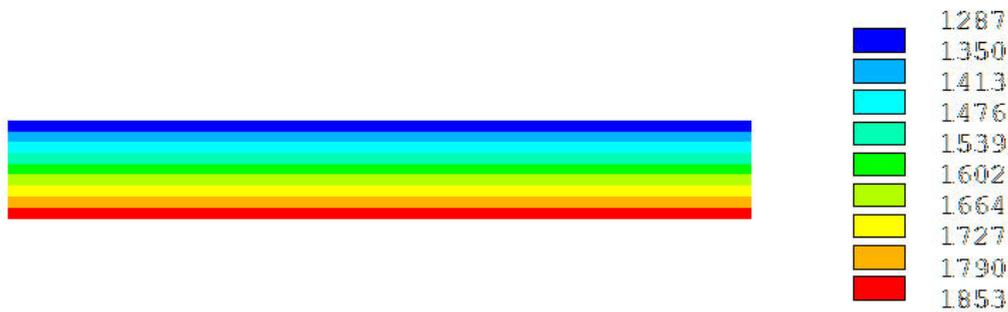


图 2.10 40mm 渣层+0mm 覆盖剂时温度分布 (K)

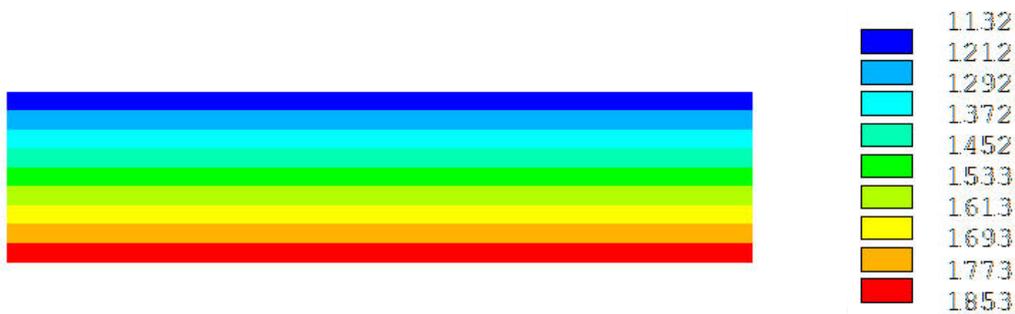


图 2.11 70mm 渣层+0mm 覆盖剂时温度分布 (K)

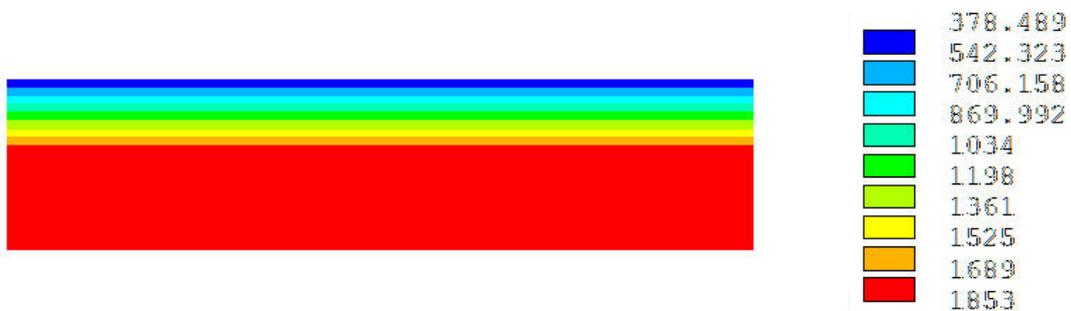


图 2.12 40mm 渣层+30mm 覆盖剂温度云图 (K)

对比图 2.10 和图 2.11，在 40mm 渣层基础上，增加 30mm 渣层钢渣表面温度减少约  $155^\circ\text{C}$ ；对比图 2.10 与图 2.12，在 40mm 渣层基础上，增加 30mm 覆盖剂表面温度减

少约  $910^{\circ}\text{C}$ ，可以看出，覆盖剂的添加对表面温度变化影响非常大，且比同样厚度条件下的渣层显著。

当钢液表面分别加 15mm、30mm、45mm 以及 60mm 覆盖剂，以及不同覆盖剂导热系数条件下的表面热流密度具体数据导入软件 originPro8 作图，得出图 2.13。观察图中关系曲线，都近似线性关系，横向看，对于添加 15mm 覆盖剂，导热系数每增加  $0.01\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，覆盖剂表面热流密度增加约  $930\text{W}/\text{m}^2$ ；纵向看，覆盖剂导热系数取  $0.05\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，厚度从 15mm 增加到 30mm，热流密度减少  $2048.40\text{W}/\text{m}^2$ ；从 45mm 增加到 60mm，热流密度减少  $388.9\text{W}/\text{m}^2$ 。也就是说，在导热系数一定的情况下，随着覆盖剂厚度的增加，相等的增加量对上表面热流密度变化影响逐渐减弱。

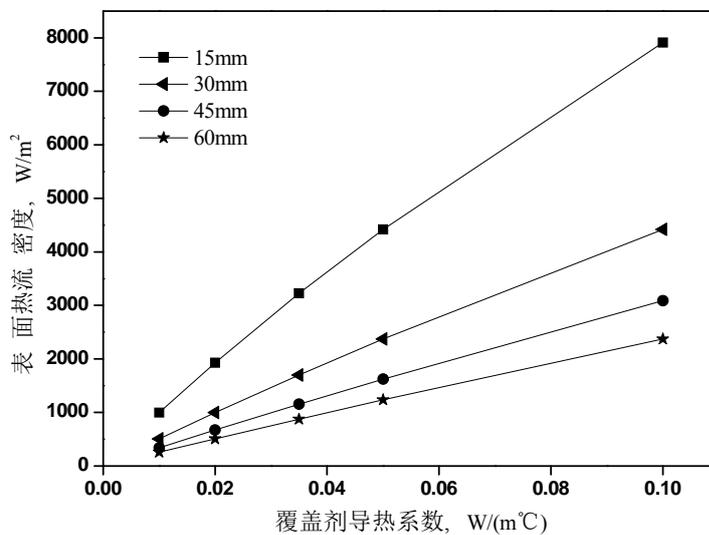


图 2.13 覆盖剂导热系数和厚度与钢水表面热流密度的关系

通过计算，发现钢包各层按表 2.2 中所列参数进行加载，在钢液面 40mm 渣层基础上分别添加 0mm、30mm 以及 60mm 覆盖剂时，热量损失分布情况分别如图 2.14~2.16 所示。从图中可以看出，钢包的热量损失主要是通过包壁散失掉的。它占整个热量损失的 88.91%~95.12%，包底散失热量占整个热量损失的 1.52%~1.65%。当覆盖厚度剂由 0mm 增加到 30mm 时，钢液面热量损失从占整个热量损失的 9.57%降低到 5.52%；由 30mm 厚度增加到 60mm 时，钢液面热损失所占比例降低到 3.23%。

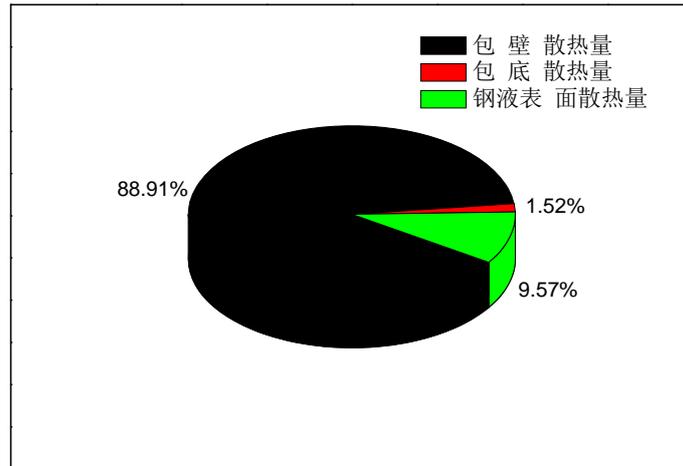


图 2.14 0mm 覆盖剂时钢包散热量比例

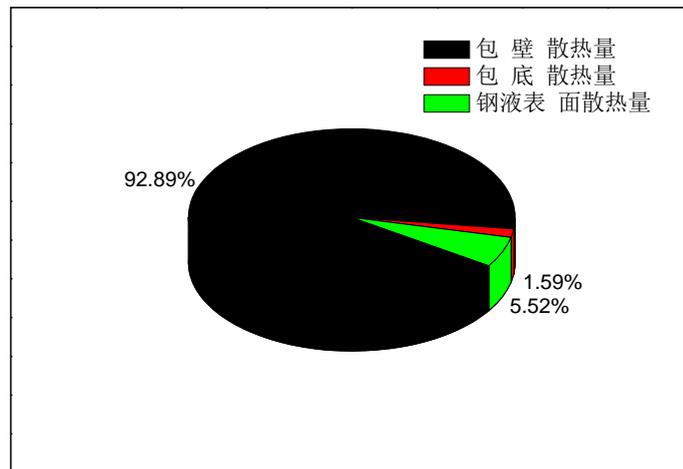


图 2.15 30mm 覆盖剂时钢包散热量比例

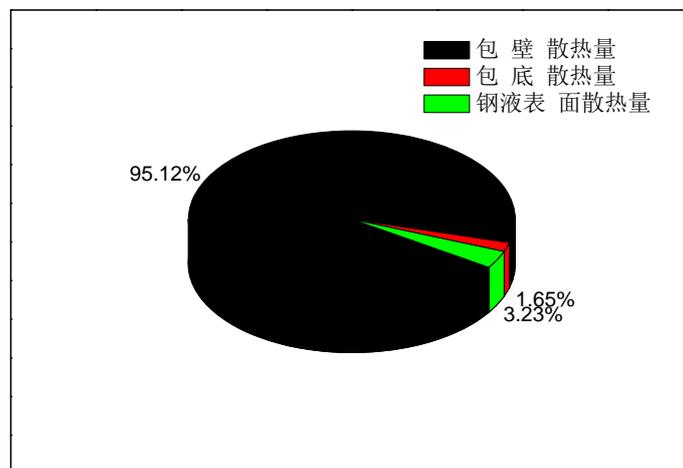


图 2.16 60mm 覆盖剂时钢包散热量比例

### 2.3 烘烤温度对钢包热状态影响

在使用前，钢包要经过一段时间的预热烘烤，使钢包内衬蓄热，以便减小出钢时钢液温降，而且保证钢包内壁耐火材料不会因为钢水注入后因温差太大而产生耐材剥落，进而污染钢水，影响钢包寿命及钢液纯净度。

以稳态模型为基础，将烘烤温度加载到钢包工作层内壁，将烘烤结束时的钢包温度场视为稳态情况，模拟烘烤终点钢包内节点温度分布。分别在不同烘烤温度下模拟钢包热状态，在不同烘烤温度下输出以钢包对称面为起点、包底为输出路径的节点温度，从左到右沿包底温度变化曲线如图 2.17 所示。可以看出，随着烘烤温度增高，包底温度有明显增高，烘烤温度每上升  $50^{\circ}\text{C}$ ，包壁最高温度上升  $5^{\circ}\text{C}$  左右。

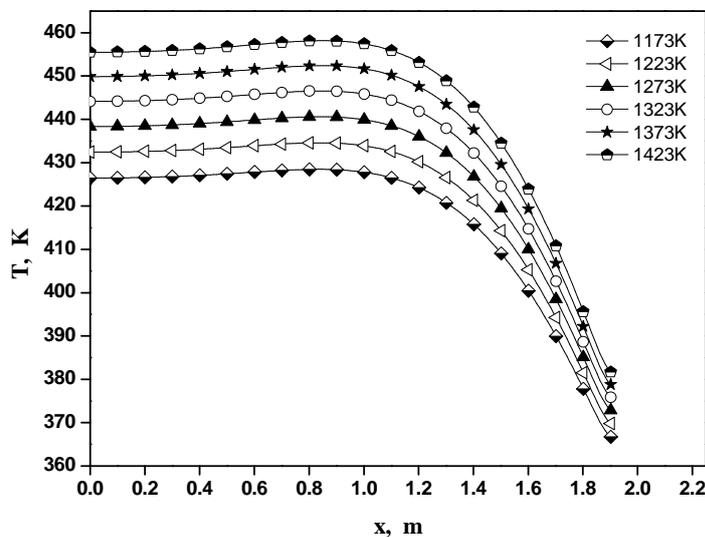


图 2.17 包底温度随烘烤温度变化规律（未盛钢）

同样在不同烘烤温度下分别输出以包底为坐标轴零点、侧壁为输出路径的结点温度，沿侧壁从下到上温度变化曲线如图 2.18 所示。可以看出，随着烘烤温度增高，钢包侧壁温度有明显增高，烘烤温度每上升  $50^{\circ}\text{C}$ ，侧壁最高温度上升约  $3^{\circ}\text{C}$ 。

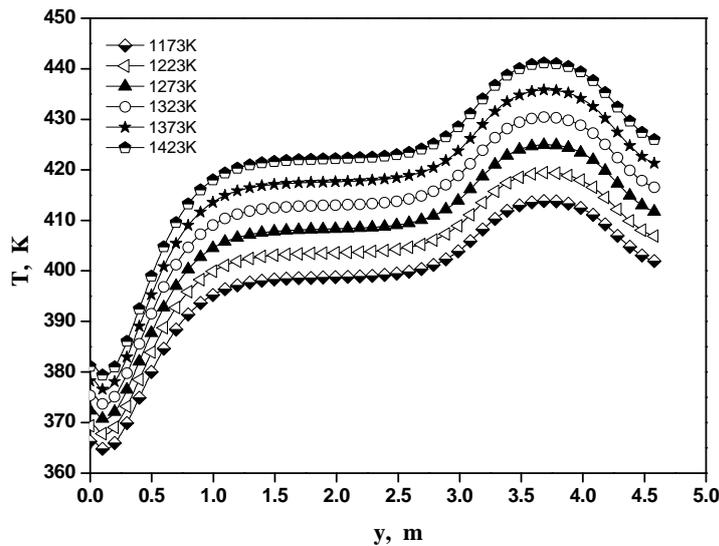


图 2.18 侧壁温度随烘烤温度变化规律（未盛钢）

在增加相同烘烤温度  $50^{\circ}\text{C}$  的前提下，侧壁最高温度升温约  $3^{\circ}\text{C}$ ，包底最高温度升温约  $5^{\circ}\text{C}$ ，包底升温速率大于侧壁升温速率，原因是由于侧壁有绝热板，故外壁升温较慢。稳态烘烤温度的计算结果也将作为后续瞬态计算的初始条件加载到瞬态模型中去。

## 2.4 本章小结

由上述分析可知，钢包的热损失主要是通过包壁，而影响包壁热损失的主要是绝热层。覆盖剂导热性能对钢水降温速率影响也很大，得出以下结论：

① 在钢包内表面加载  $1580^{\circ}\text{C}$ ，当钢包侧壁绝热层导热系数大于  $0.08\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$  左右时，侧壁温度分布变化明显，最高温度出现在渣线附近；小于  $0.08\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$  左右时，温度变化趋于平缓，体现出绝热层显著的隔热效果；

② 在  $40\text{mm}$  渣层基础上，覆盖剂导热系数取  $0.05\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，厚度从  $15\text{mm}$  增加到  $30\text{mm}$ ，热流密度减少  $2048.40\text{W}/\text{m}^2$ ；从  $45\text{mm}$  增加到  $60\text{mm}$ ，热流密度减少  $388.9\text{W}/\text{m}^2$ 。也就是说，在导热系数一定的情况下，随着覆盖剂厚度的增加，相等的增加量对上表面热流密度变化影响逐渐减弱；

③ 覆盖剂表面热流密度随导热系数的变化近似线性关系，对于添加  $15\text{mm}$  覆盖剂，导热系数每增加  $0.01\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，覆盖剂表面热流密度增加约  $930\text{W}/\text{m}^2$ ；

④ 通过包壁热损是钢包热损失的主要部分，它占全部热量损失的  $88.91\%\sim 95.12\%$ ；

⑤ 在增加相同烘烤温度  $50^{\circ}\text{C}$  的前提下，侧壁最高温度升温约  $3^{\circ}\text{C}$ ，包底最高温度升温约  $5^{\circ}\text{C}$ 。

### 3 钢包瞬态传热模拟

本章通过模拟计算,定量分析钢包转运、钢水浇铸过程中钢包钢水的温度变化规律,为生产提供依据。

钢水从转炉出钢到浇注结束的全过程可分为以下几个阶段:转炉出钢至钢包、钢包静置调运至 LF 炉精炼处理、处理完毕调运待浇以及钢包开浇至浇铸完毕。钢包在各阶段的热状态不尽相同,钢水温度均发生变化,影响因素复杂。通过现场实测可以在一定程度上提供经验数据,但现实中往往不可能全面把握各种复杂变化,对此,基于导热方程的研究与数值模拟计算可以为我们提供条件,获取系统的规律。要确切研究各种复杂因素对钢包在周转过程中热状态和钢液的温度变化产生的影响,作为一种有效且较为便利的途径,有限元模拟计算可获得热分析的定量结果。

#### 3.1 模型建立

进行瞬态分析,事实上是研究钢包的温度场随时间的变化关系。依据传热进行的特征,钢包内的导热是非周期性的,钢液温度随着时间的变化逐渐下降,然而包壁温度变化是随着时间的变化逐渐上升,随着时间的变化温度逐渐接近周围环境介质而趋于平衡。瞬态分析同样使用四节点四边形单元(PLANE55)进行求解。

与稳态分析一样,先建模划分网格,加载和后处理,依据新钢包计算 210t 钢水大致液面位置,模型划分网格后如图 3.1 所示。计算时,在稳态基础上增加了材料的密度、比热以及包体各层的初始温度载荷。钢包初始热状态是把稳态烘烤结束后包体的温度作为初始温度加载到模型中。

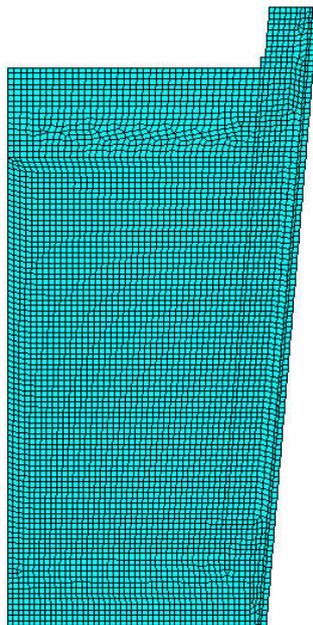


图 3.1 钢包瞬态传热计算网格

### 3.2 边界条件的确定及最终态计算

将烘烤温度设定为 1323K，出钢温度按 1853K 考虑，且假定钢液内部不存在分层现象。加载结束后进行计算，步长 5s，删除稳态中定义的节点温度，打开程序中的自动时间步长有助于求解的过程中自动调整时间步长。设置每一子步最大迭代次数为 25，适用于大多热分析问题。

对于瞬态热分析问题，ANSYS 有两种后处理方式（POST1 和 POST26）可供选择。POST1 用于在某一载荷步（时间点）的结果进行后处理。处理特定点在所有载荷步（整个瞬态过程）的结果可选择 POST26。计算完成后，利用 POST1 可查看烘烤温度为 1323K 时的最终钢包钢水温度云图，如图 3.2 所示，最终钢包钢水热流密度云图如图 3.3 所示，由图 3.2 可以看出，钢包壁在渣线附近温度较高，散热较快。由图 3.3 可知整个钢包钢水系统中，特别是渣线附近和包底和包壁交界处热流密度最大，散热最快。

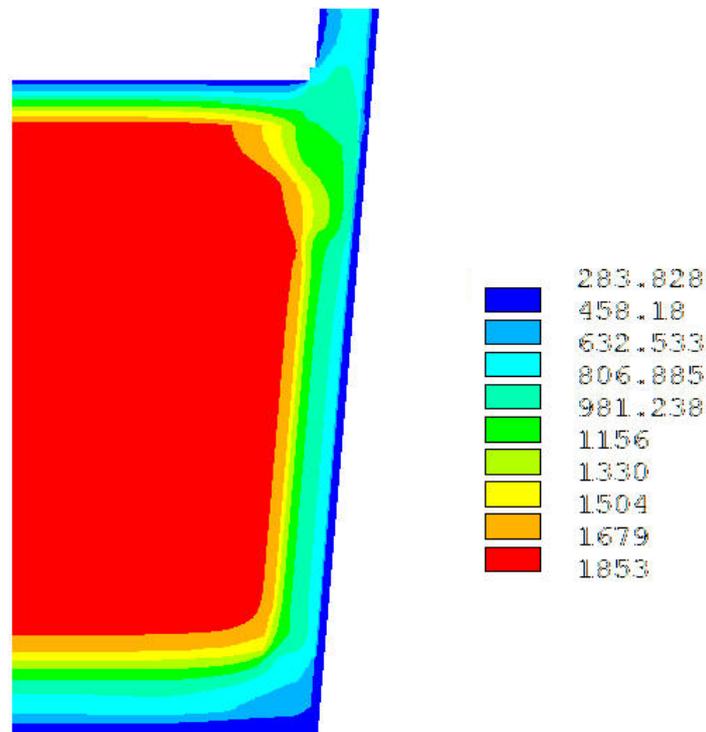


图 3.2 钢包钢液温度分布云图

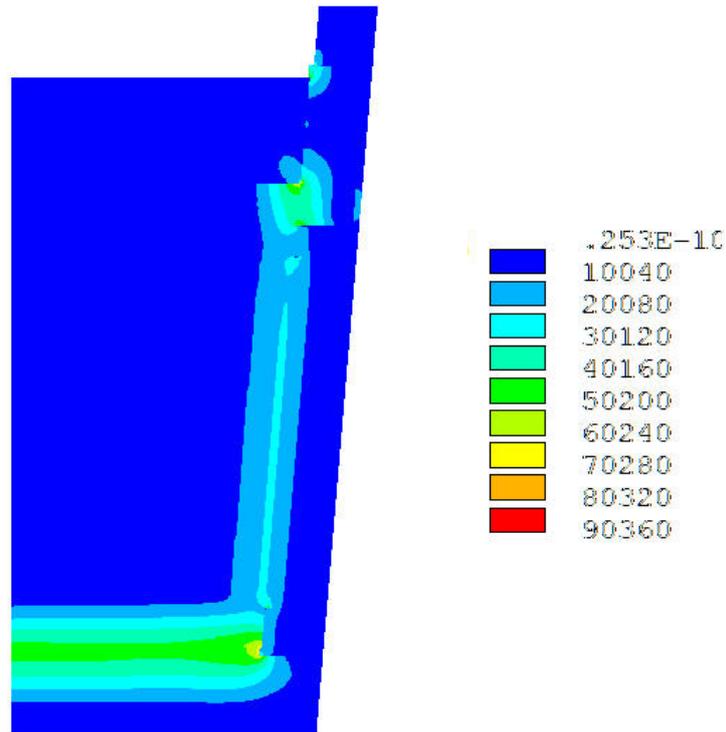


图 3.3 钢包钢液热流密度分布云图

### 3.3 瞬态钢包外壁热状态分析

绝热层导热系数设定为  $0.12\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，烘烤温度  $1423\text{K}$ ，计算完成后，用通用后处理器处理分析结果，时间设定在最后一步，分别设定以钢包侧壁、包底为输出路径，提取节点温度数据，使用 originPro8 作图，温度变化分别如图 3.4、3.5 所示。

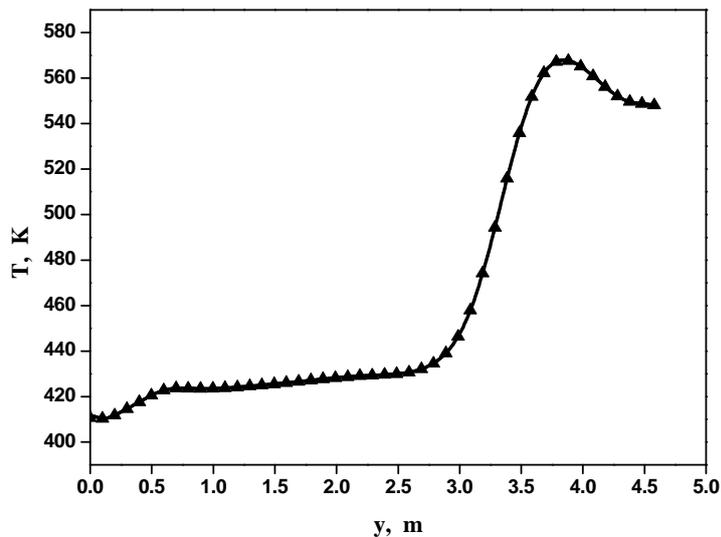


图 3.4 瞬态侧壁表面温度分布曲线

对比稳态包壁的最终温度分布，瞬态情况下最终侧壁最高温度要高  $83^{\circ}\text{C}$  左右，最低

温度高 10℃左右。这是由于钢包蓄热达到稳态后，通过钢包散热达到稳定状态，散热量变化变小，包壁由于对流辐射作用开始降温。

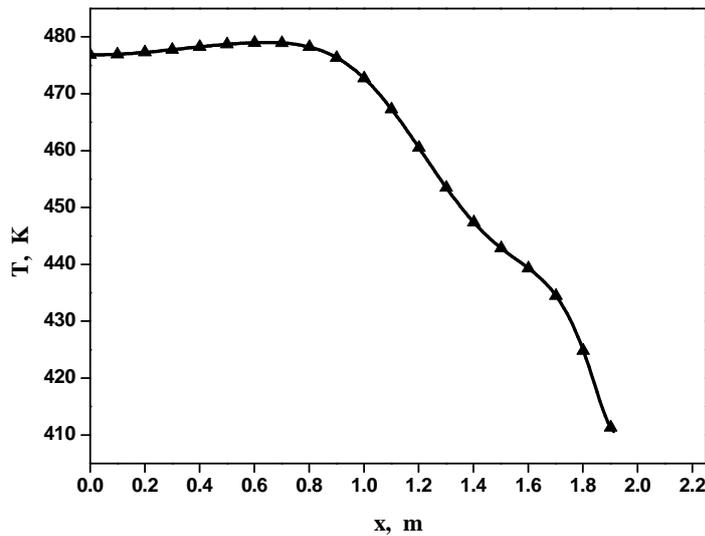


图 3.5 瞬态包底表面温度分布曲线

对比稳态包底的最终温度分布，瞬态情况下最终包底最高温度比稳态低 25℃左右，最低温度要高 5℃左右。

同理，在不同烘烤温度下，瞬态终点钢包侧壁包底最高最低温度如表 3.1

表 3.1 不同烘烤温度下包壁包底最高温度 (K)

烘烤温度	1173	1223	1273	1323	1373	1423
最高温度						
包底最高温度	445.21	452.17	459.03	465.79	472.45	479.02
包底最低温度	389.67	393.97	398.22	402.41	406.54	410.62
包壁最高温度	523.04	532.56	541.79	550.76	559.47	567.93
包壁最低温度	389.29	393.61	397.87	402.07	406.22	410.32

包底和包壁最高最低温度随烘烤温度的变化规律分别如图 3.6、3.7 所示。经过分析可知，钢包外表面温度随烘烤温度的升高而升高，在现有的烘烤技术下，根据稳态和瞬态热分析，在钢水静置阶段，钢包包壁外表面最高温度达到 541.79K 后随时间增加而逐渐趋于平稳，包底最高温度达 459.03K 后随时间增加而逐渐趋于平稳。

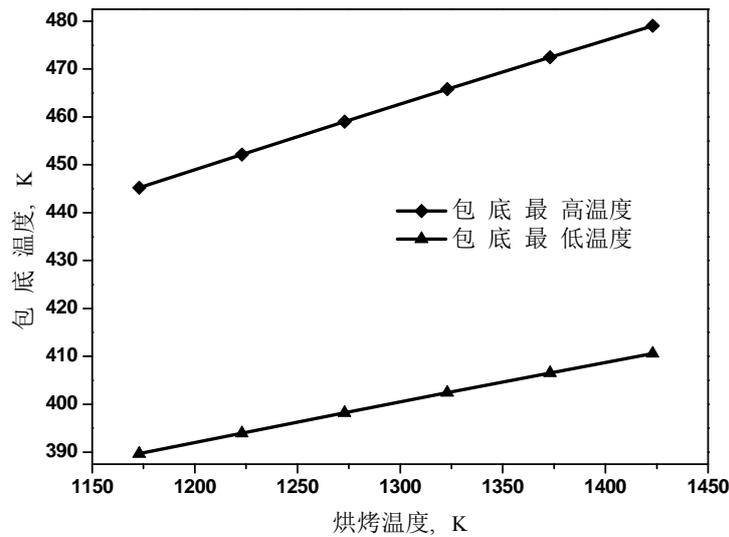


图 3.6 烘烤温度与瞬态终点包底最高最低温度关系

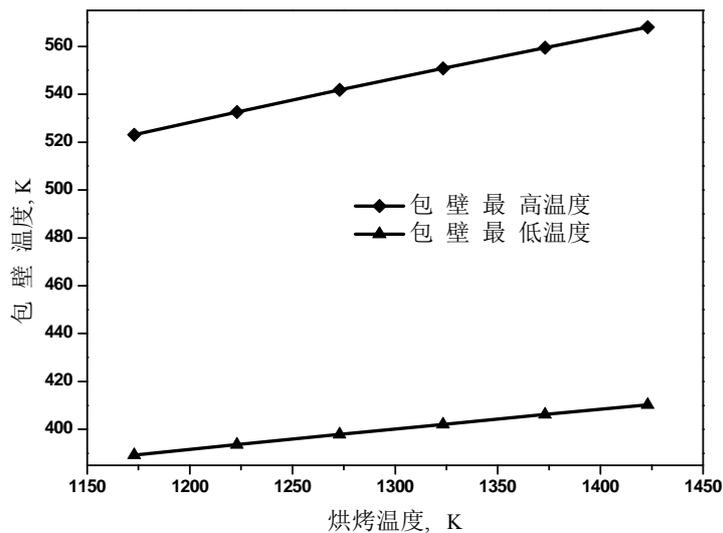


图 3.7 烘烤温度与瞬态终点包壁最高最低温度关系

### 3.4 两种钢水瞬态温降计算方法说明

模拟过程中有两种方法可以用来对比计算不同情形下钢水瞬态温降速率。

第一种是在钢液内部选取几个不同的有代表性的点，取平均温降速率；这种方法只能用来定性的描述钢液在整个过程的平均降温速率，不能细化到具体某一时刻，而且误差相对较大，难以精确反映钢水的热状态。

第二种方法是首先取整个过程中不同时间点的钢液与包壁以及渣层接触节点的平均热流量，再利用能量守恒定律式(3.1)计算钢水在某一特定时间点的温降速率，以不同时间点的钢水降温速率拟合出钢水在某一烘烤温度下的降温曲线以及方程。两种方法中

后者较为精确，拟合得出的方程能求解出在具体某一时刻钢水的温降速率。

$$Q = C \cdot V \cdot M \quad (3.1)$$

式中： $Q$ —每分钟热散失量，kJ/min； $C$ —比热容，kJ/(kg·°C)； $V$ —温降速率，°C/min； $M$ —质量，kg。

### 3.5 取点法计算钢水温降

为了能够定量分析钢液的温降情况，在后处理的过程中，依据图 3.2 钢液云图显示情况，在钢水内部选取 6 个节点单元，上部取渣面以下节点 72073、68973（靠近渣线）；中部取壁面附近节点 53488、42788（靠近钢液中部）；底部取包底附近节点 31471、28373（靠近底角）。利用 POST26 后处理绘制相同时间段温度随时间的变化曲线。

烘烤温度为 1323K 时，选取的各节点在出钢后 60min 内温度随时间的变化曲线如图 3.8 所示，从图可以看出渣线附近和靠底角部位是钢液内部降温最快的地方，平均温降速率分别是 3.70°C/min 和 4.37°C/min，渣线附近降温快是因为镁碳砖导热系数较大，散热比较快，钢包底角温降速度快是由钢包的结构决定的，因为包壁与包底交界的地方和钢水接触的比表面积比平面大，相同的钢水量和钢包壁的接触面积比平壁的大，所以在倒入钢水的时候造成内外温度梯度较大，因此也降温快；包壁靠里的平均温降速率为 0.88°C/min，温降速率最慢，这是因为包壁有绝热层，绝热效果好。

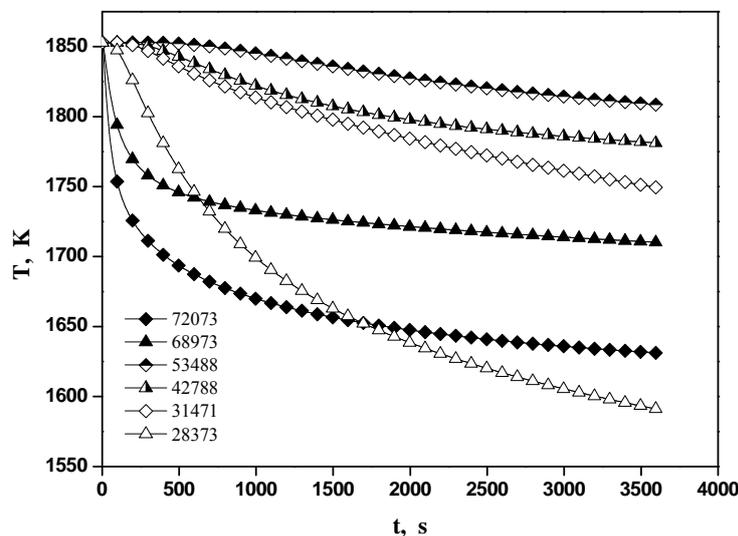


图 3.8 钢液选点温降与时间的关系

### 3.6 烘烤温度对钢液温降的影响

设钢包绝热层导热系数为定值 0.12W/(m·°C)，分析不同烘烤温度对钢液温降的影响。瞬态时长设为 60min，步长 5s，求解出在不同烘烤温度条件下钢液的平均降温速率，如表 3.2 所示。

表 3.2 不同烘烤温度下的钢液温降速率

烘烤温度 /K	72073 点 降温速率	68973 点 降温速率	53488 点 降温速率	42788 点 降温速率	31471 点 降温速率	28373 点 降温速率	平均降温 速率
1173	4.62	2.98	0.90	1.45	2.05	4.92	2.82
1223	4.31	2.78	0.84	1.36	1.94	4.73	2.66
1273	4.00	2.58	0.79	1.28	1.84	4.55	2.51
1323	3.70	2.38	0.74	1.20	1.73	4.37	2.35
1373	3.39	2.18	0.69	1.11	1.62	4.18	2.20
1423	3.08	1.98	0.64	1.03	1.51	4.00	2.04

由以上数据得出在绝热层导热系数为  $0.12\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$  时, 钢液温降速率与烘烤温度的关系, 如图 3.9 所示。

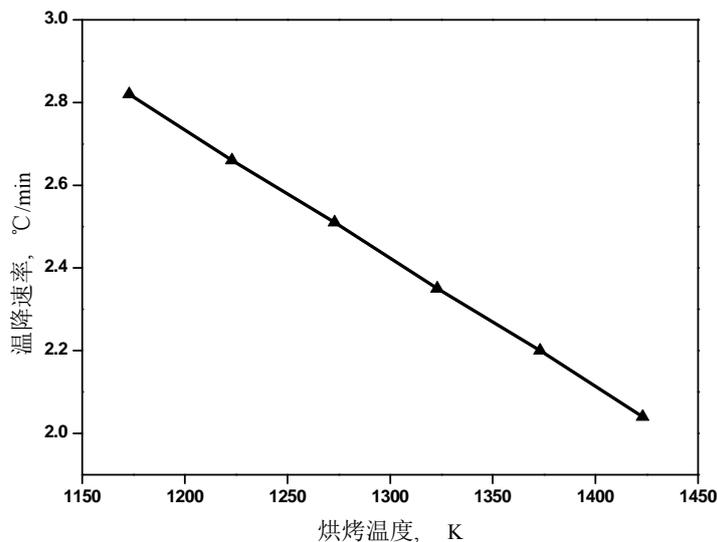


图 3.9 钢液平均温降速率与烘烤温度的关系

用 originPro8 拟合得到钢液平均降温速率随烘烤温度的变化规律函数为:

$$\eta = 6.465 - 0.003T + 9.212 \times 10^{-20} T^2 \quad (3.2)$$

式中,  $\eta$ —平均温降速率,  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ;  $T$ —烘烤温度,  $\text{K}$ 。

可见, 烘烤温度的变化对钢液温降有较大影响, 依据式 3.2 可知, 曲线拟合近似线性关系, 钢包烘烤温度每增加  $50^{\circ}\text{C}$ , 钢液温降速率下降约  $0.15^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

### 3.7 钢包绝热层导热系数对钢液温降的影响

设置钢包烘烤温度为  $1323\text{K}$ , 分别计算  $30\text{min}$  内不同绝热层导热系数的钢液温降速率, 通过定量分析钢包绝热层导热系数对钢液温降的影响。烘烤温度为  $1323\text{K}$  时, 钢温

液降温速率随绝热层导热系数的变化关系曲线如图 3.10 所示。

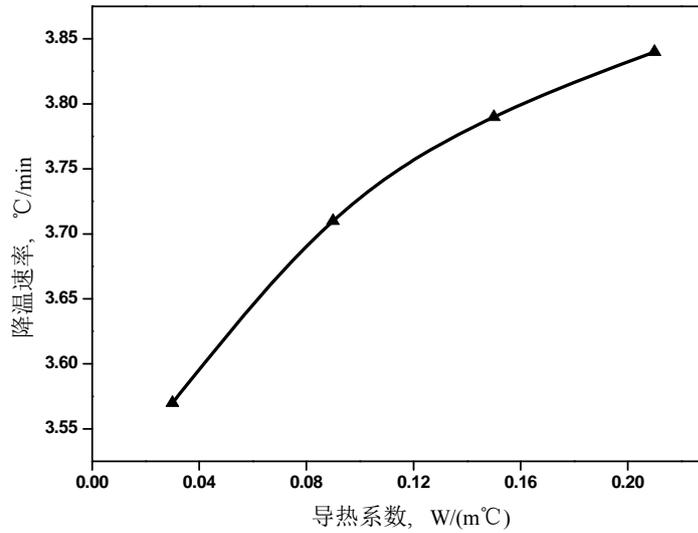


图 3.10 绝热层导热系数与钢液温降温率的关系

用 originPro8 拟合得到钢水在 1323K 烘烤温度下的平均降温速率随绝热层导热系数的变化规律函数为：

$$\eta = 3.488 + 2.983\lambda - 6.250\lambda^2 \quad (3.3)$$

式中， $\eta$ —平均温降温率， $^{\circ}C/min$ ； $\lambda$ —导热系数， $W/(m\cdot^{\circ}C)$ 。

从式(3.3)可以看出，绝热层导热系数对钢液温降的影响并不大。绝热层导热系数从  $0.03W/(m\cdot^{\circ}C)$  增加到  $0.09W/(m\cdot^{\circ}C)$ ，钢液温降温率增加  $0.14^{\circ}C/min$ ；绝热层导热系数从  $0.15W/(m\cdot^{\circ}C)$  增加到  $0.21W/(m\cdot^{\circ}C)$ ，钢液温降温率增加  $0.05^{\circ}C/min$ 。钢液温降温率随绝热层导热系数的增加逐渐趋于平缓。

用同样的方法，分别计算出烘烤温度为 1223K、1423K 情况下绝热层导热系数与钢水降温速率的关系，具体数据见表 3.3。

表 3.3 钢包烘烤温度及其绝热层导热系数对钢液温降的影响

绝热系数 $W/(m\cdot^{\circ}C)$	钢包不同烘烤温度下的钢液温降温率 $^{\circ}C/min$		
	1223K	1323K	1423K
0.03	4.11	3.57	3.04
0.09	4.23	3.71	3.19
0.15	4.30	3.79	3.27
0.21	4.35	3.84	3.32

相应的关系曲线如图 3.11 所示。

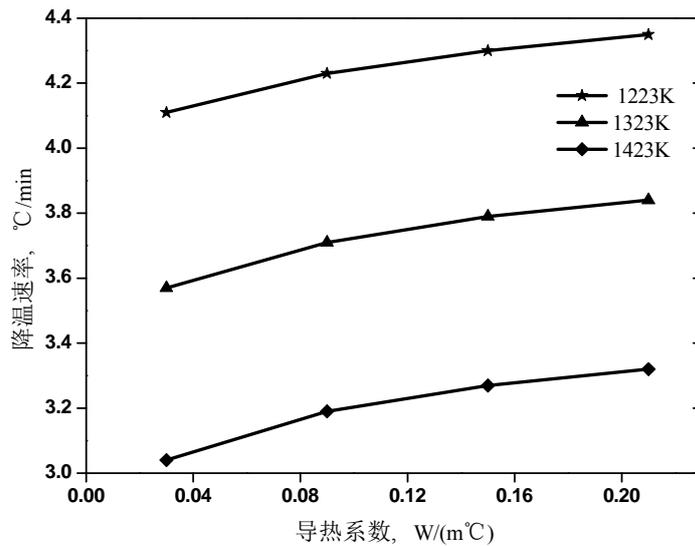


图 3.11 钢包烘烤温度及其绝热层导热系数对钢液温降的影响

同样，用 originPro8 分别拟合烘烤温度为 1223K 和 1423K 下，钢包绝热层导热系数对钢液温降影响的规律函数，如式 (3.4)，式 (3.5)：

$$\eta = 4.041 + 2.483\lambda - 4.861\lambda^2 \quad (3.4)$$

$$\eta = 2.952 + 3.200\lambda - 6.944\lambda^2 \quad (3.5)$$

### 3.8 钢包覆盖剂对钢水温降的影响

覆盖剂是出钢后添加在钢渣表面的保温物质，钢液表面温度很高，辐射散热量非常大，因此为了减少钢水温降，添加保温覆盖剂是必须的。本文采用碳化稻球作覆盖剂，由于改变覆盖剂导热性能对包壁和包底的热流密度影响很小，所以对包壁中下部和包底附近的钢水温降影响几乎可以忽略，对钢渣下的钢液温降影响较大。当烘烤温度为 1323K 时，取钢液表面附近点平均降温速率，统计计算出在添加不同导热系数的覆盖剂情况下钢水表面附近的温降速率如表 3.6。

表 3.4 不同覆盖剂下钢液液面附近部位温降速率(°C/min)

节点	覆盖剂	覆盖剂	覆盖剂导	覆盖剂	覆盖剂
	导热系数 0.01	导热系数 0.02	热系数 0.035	导热系数 0.05	导热系数 0.1
73179	0.563	0.566	0.569	0.573	0.584
73243	0.020	0.025	0.031	0.038	0.059
均值	0.292	0.295	0.300	0.305	0.321

1323K 烘烤温度下，钢液表面温降速率和覆盖剂导热系数的关系如图 3.12。

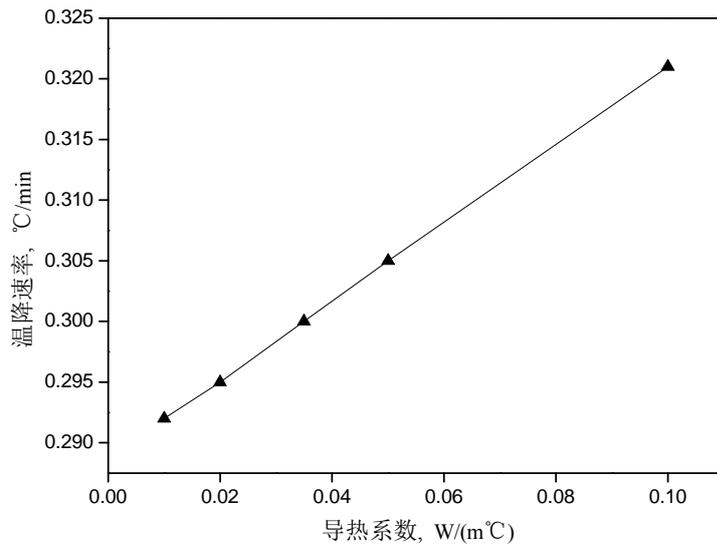


图 3.12 覆盖剂导热系数与钢液表面降温速率关系

通过 originPro8 拟合后的得到烘烤温度 1323K 下，钢液表面降温速率与覆盖剂导热系数的函数关系：

$$\eta = 0.289 + 0.328\lambda - 0.037\lambda^2 \quad (3.6)$$

由式 3.6 可以看出，拟合曲线近似线性关系，覆盖剂导热系数每增加  $0.01\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ，钢液表面温降速率增加约  $0.003^\circ\text{C}/\text{min}$ 。相同的烘烤温度条件下，钢包绝热层导热系数的变化对钢液温降速率不会产生大的影响

同理可得当钢包烘烤温度为 1423K 时，钢液表面温降速率和导热系数的类似关系，如图 3.13 所示。

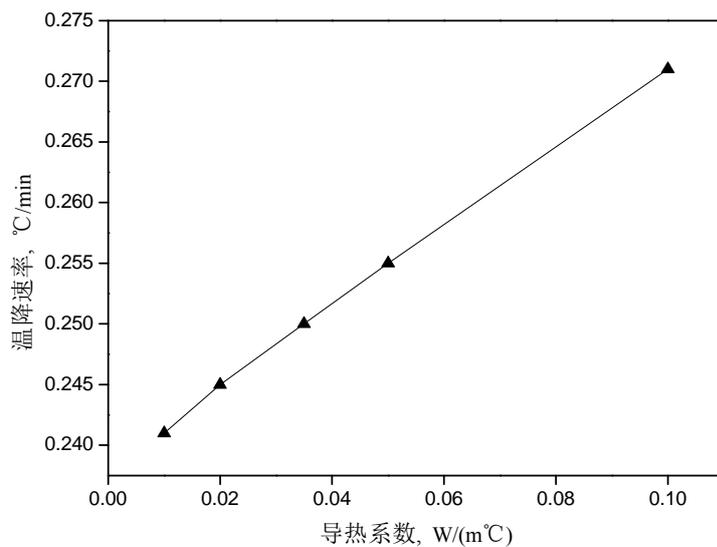


图 3.13 覆盖剂导热系数与钢液表面温降关系

对应的钢液表面温降速率与覆盖剂导热系数的函数关系:

$$\eta = 0.238 + 0.369\lambda - 0.340\lambda^2 \quad (3.7)$$

### 3.9 本章小结

由本章以上分析可以得出

① 在绝热层导热系数为  $0.12\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$  时, 钢包烘烤温度每增加  $50^\circ\text{C}$ , 钢液温降速率下降约  $0.15^\circ\text{C}/\text{min}$ ;

②  $1050^\circ\text{C}$  烘烤温度下, 绝热层导热系数从  $0.03\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$  增加到  $0.09\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ , 钢液温降速率增加  $0.14^\circ\text{C}/\text{min}$ ; 绝热层导热系数从  $0.15\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$  增加到  $0.21\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ , 钢液温降速率增加  $0.05^\circ\text{C}/\text{min}$ 。钢液温降速率随绝热层导热系数的增加逐渐趋于平缓;

③  $1050^\circ\text{C}$  烘烤温度下, 覆盖剂导热系数每增加  $0.01\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ , 钢液表面温降速率增加约  $0.003^\circ\text{C}/\text{min}$ 。相同的烘烤温度条件下, 钢包绝热层导热系数的变化对钢液温降速率不会产生大的影响。

## 4 结 论

对钢包稳态情况下热分析得出：

① 在钢包内表面加载  $1580^{\circ}\text{C}$ ，当钢包侧壁绝热层导热系数大于  $0.08\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$  左右时，侧壁温度分布变化明显，最高温度出现在渣线附近；小于  $0.08\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$  左右时，温度变化趋于平缓，体现出绝热层显著的隔热效果；

② 在  $40\text{mm}$  渣层基础上，覆盖剂导热系数取  $0.05\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，厚度从  $15\text{mm}$  增加到  $30\text{mm}$ ，热流密度减少  $2048.40\text{W}/\text{m}^2$ ；从  $45\text{mm}$  增加到  $60\text{mm}$ ，热流密度减少  $388.9\text{W}/\text{m}^2$ 。也就是说，在导热系数一定的情况下，随着覆盖剂厚度的增加，相等的增加量对上表面热流密度变化影响逐渐减弱；

③ 覆盖剂表面热流密度随导热系数的变化近似线性关系，对于添加  $15\text{mm}$  覆盖剂，导热系数每增加  $0.01\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，覆盖剂表面热流密度增加约  $930\text{W}/\text{m}^2$ ；

④ 通过包壁的热损是钢包热损失的主要部分，它占整个热量损失的  $88.91\%\sim 95.12\%$ ；

⑤ 在增加相同烘烤温度  $50^{\circ}\text{C}$  的前提下，侧壁最高温度升温约  $3^{\circ}\text{C}$ ，包底最高温度升温约  $5^{\circ}\text{C}$ 。

对钢包瞬态情况下计算得出：

① 在绝热层导热系数为  $0.12\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$  时，钢包烘烤温度每增加  $50^{\circ}\text{C}$ ，钢液温降速率下降约  $0.15^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ；

②  $1050^{\circ}\text{C}$  烘烤温度下，绝热层导热系数从  $0.03\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$  增加到  $0.09\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，钢液温降速率增加  $0.14^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ；绝热层导热系数从  $0.15\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$  增加到  $0.21\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，钢液温降速率增加  $0.05^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。钢液温降速率随绝热层导热系数的增加逐渐趋于平缓；

③  $1050^{\circ}\text{C}$  烘烤温度下，覆盖剂导热系数每增加  $0.01\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，钢液表面温降速率增加约  $0.003^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。相同的烘烤温度条件下，钢包绝热层导热系数的变化对钢液温降速率不会产生大的影响。

## 参考文献

- [1] V. paschkis. Temperature drop in pouring ladles[J]. Transactions AFS, 1956, 64: 565-576.
- [2] J. W. Hlinka and T. W. Miller. Temperature loss in liquid steel-refractory systems[J]. Iron and Steel Engineer, 1970, (8): 123-133.
- [3] K. Widdowson. Ladle composition and temperature control[J]. Ironmaking and Steelmaking, 1981, (5): 194-200.
- [4] T. Robertson and A. Perkins. Physical and mathematical modelling of liquid steel temperature in continuous casting[J]. Ironmaking and Steelmaking, 1968, 13(5): 301-310.
- [5] H. Pferfer, F. N. Fett, H. Schafer, et al. The maths-model for steel furnace[J]. S&I, 1985, (14): 1279-1287.
- [6] 李顶宜, 杨金鼎, 王志道, 等. 钢包顶吹氩调温热态实验研究[J]. 炼钢, 1991, 7(3): 36-40.
- [7] 王英哲, 冯志太, 李开强, 等. 连铸钢包全过程加盖保温试验[J]. 炼钢, 1994, (2): 10-15.
- [8] 刘晓, 顾文斌, 王洪兵, 等. 钢包的热分析[J]. 宝钢技术, 1998, (5): 6-11.
- [9] 李晶, 张志诚, 傅杰, 等. 60t 钢包的传热分析[J]. 特殊钢, 2001, 22(4): 16-22.
- [10] 吴晓东, 刘青, 职建军, 等. 宝钢炼钢厂 300t 整体钢包热循环实测研究[J]. 北京科技大学学报, 2001, 23(5): 418-420.
- [11] 杨治立, 朱光俊, 王宏丹. 基于数值模拟技术的钢水温降速率预测[J]. 热加工工艺, 2011, 40(1): 72-75.
- [12] 吴鹏飞, 徐安军, 贺东风, 等. 预热烘烤对钢包热行为的影响研究[J]. 炼钢, 2012, 28(3): 45-49.
- [13] 王明林, 刘浏. 抚顺炼钢厂钢水温降规律的研究[J]. Iron and Steel, 2002, 37(3): 14-16.
- [14] 钱之荣, 范广举. 耐火材料实用手册[M]. 冶金工业出版社, 1992.

## 致 谢

在此，我要特别感谢王宏丹老师。本课题的研究工作是在王宏丹老师的细心指导和热情关怀下完成的，她对我提出了许多具有指导性的建议及提供了许多相关本课题方面的资料，使得本课题能够较为顺利的深入下去。

本文也参考了许多前辈学者的学术成果，没有一一列出，在此一并致谢。