

1934424

分类号_____

密级_____

UDC_____

学 位 论 文

蛭石珍珠岩复合耐火材料的研究

作 者 姓 名：方 勇

指 导 教 师：陈文仲 副教授

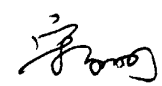
东北大学材料与冶金学院

申请学位级别：硕 士 学 科 类 别：工 学

学 科 专 业 名 称：工程热物理

论文提交日期：2008年7月 论文答辩日期：2008年7月7日

学位授予日期：2008年7月 答辩委员会主席：

评 阅 人：王忠心 

东 北 大 学
2008年7月

AL44021

A Thesis for the Degree of Master in engineering thermophysics



Y1843991

**Research of vermiculite and perlite combined
refractory**

by Fang Yong

Supervisor: Vice professor Chen Wenzhong

Northeastern University

July 2008

独创性声明

本人声明，所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本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谢意。

学位论文作者签名： 

日期： 2008. 7. 7

学位论文授权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

半年 ☐ 一年 ☐ 一年半 ☐ 两年 ☐

学位论文作者签名：

导师签名：



签字日期：

签字日期：

蛭石珍珠岩复合耐火材料的研究

摘 要

为了满足目前钢铁企业炼钢工艺提高产量,改善冶炼质量的要求,基于河南舞钢钢包扩容的实际需要,开发了蛭石珍珠岩复合耐火材料替换钢包衬现有永久层材料,以实现减薄包壁扩容的同时又减低包壁散热。此新型材料在首钢二炼钢部分钢包上部三分之一处试用,取得了较好的效果。

本论文研究的主要依据为郑州祥通耐火陶瓷有限公司制定的“十一五”国家科技支撑计划课题可行性研究报告—《复合型珍珠岩蛭石综合利用产业化技术》。

论文主要内容包括分析目前炼钢设备耐火材料使用情况及不足,轻质耐火材料隔热原理介绍,蛭石珍珠岩复合耐火材料研发方案探讨—指出其重点在于通过控制热膨胀过程及复合过程大幅度提高材料的耐火度和抗压强度。对复合材料的基本晶相莫来石进行了晶相学分析,提出了钢包复合炉衬温度场、应力场计算的解析解法。重点用 ANSYS 有限元软件对钢包衬进行了稳态线性模拟,确定了蛭石珍珠岩符合耐火材料应用后钢包衬的温度场和应力场分布,得出了温度和应力数据,明确了新型材料代替传统材料的可行性及优势。

新型材料的应用可以大幅度减轻高温炉窑的重量、扩大炉容、降低能耗,简化施工和维修,对耐火材料行业的产业升级和钢铁行业的技术改造有较大意义,因此有广泛的发展前景。

关键词:蛭石;珍珠岩;耐火材料;复合材料;钢包;ANSYS 数值模拟

Research of vermiculite and perlite combined refractory

Abstract

To satisfy the iron and steel industry need of improving volume of production and steel metallurgy quality, based on the ladle furnace capacity expansion need of HeNan WuYang steel mill, vermiculite and perlite combined refractory was developed to change the available ladle furnace permanent heat insulation layer refractory to realize reduction of ladle furnace heat insulation layer to enlarge ladle furnace capacity as well as depress heat loss of ladle furnace sidewall. This refractory has been tested on the ladle furnace upper part of ShouGang and good results has been attained.

This paper was based on the eleventh five year plan feasibility study report of country technological supporting plan assignment which is industrial technology of vermiculite and perlite combined refractory versatility.

The main part of this paper includes the analysis of present steelmaking equipment refractory and its defects, introduction of light weight refractory thermal insulation principle, study of vermiculite and perlite combined refractory ,assigning that the key point is to greatly improve the limit of fire resistance and compression strength of combined refractory by controlling the heating expansion and complexion process. Mullite, the basic composition phase of combined refractory was studied. Temperature field and field of stress of combined ladle furnace side wall analytical method were presented. The major job is to stable state linear simulate of ladle furnace side wall, determinate ladle furnace temperature field and field of stress, temperature and stress data was attained. The feasibility and superiority of replacing traditional refractory by new combined refractory was confirmed.

The application of new combined refractory will greatly reduce the weight of high temperature industrial furnace, enlarge furnace capacity, reduce energy consumption, simplify construction and maintenance. It is valuable for upgrading of refractory industry and iron steel industry technical innovation so it has broad developing prospects.

Key words: vermiculite; perlite; refractory; combined refractory; ladle furnace; ANSYS numerical simulation

目 录

独创性声明	I
摘 要	II
Abstract	III
第一章 绪论	1
1.1 课题背景	1
1.1.1 耐火材料对钢铁冶金行业的重要意义	1
1.1.2 本课题的工程背景	1
1.2 国内外应用及研究进展情况	2
1.3 轻型耐火材料介绍	5
1.3.1 轻质不定形耐火材料概况	5
1.3.2 轻质耐火材料的主要特点	5
1.3.3 轻质耐火材料的隔热原理	7
1.3.4 影响轻质耐火材料隔热的因素分析	8
1.4 炼钢设备耐火材料使用情况	10
1.4.1 耐材-钢复合结构	10
1.4.2 转炉	12
1.4.3 中间包	13
1.4.4 钢包	14
1.5 传统炼钢设备永久层耐火材料的不足	16
1.6 本课题研究内容	17
1.7 本章小节	17
第二章 蛭石珍珠岩复合耐火材料的研发方案	19
2.1 蛭石珍珠岩介绍	19
2.1.1 分类	19
2.1.2 蛭石珍珠岩介绍	19
2.2 生产工艺设备	21
2.2.1 膨胀珍珠岩的生产	21
2.2.2 膨胀蛭石的生产	22
2.2.3 复合耐火材料工业化生产技术路线及重点	22

2.2.4 主要生产设备简介.....	23
2.2.4.1 球形闭孔膨胀蛭石膨胀珍珠岩生产简介.....	23
2.2.4.2 生产膨胀蛭石珍珠岩复合耐火材料的主要设备.....	25
2.3 检测方法和设备.....	28
2.3.1 检测方法.....	28
2.3.2 检测设备.....	29
2.4 蛭石珍珠岩复合耐火材料的成分及热工指标.....	29
2.4.1 组成成分.....	29
2.4.2 热工指标.....	30
2.4.3 复合材料的优越性.....	31
2.5 本章小结.....	31
第三章 复合耐火材料的晶相分析及在钢包上应用的热力学分析	33
3.1 耐火材料分析.....	33
3.1.1 Al ₂ O ₃ -SiO ₂ 系相图	33
3.1.2 莫来石.....	34
3.2 钢包热力学解析分析.....	36
3.2.1 钢包温度场计算的基本理论.....	36
3.2.2 钢包热应力场计算的基本理论.....	39
3.2.3 钢包的几何参数的选取.....	41
3.2.4 钢包材料物化参数的选取.....	42
3.2.5 计算温度的选取.....	44
3.3 有限元法及 ANSYS 介绍	44
3.3.1 有限元法.....	44
3.3.2 ANSYS 介绍.....	44
3.4 模拟条件.....	46
3.4.1 有限元模型.....	46
3.4.2 物性参数.....	47
3.4.3 边界条件与初始条件.....	48
3.4.4 稳态与瞬态热线性与非线性热分析.....	49
3.5 钢包温度场数值模拟仿真.....	50
3.5.1 模拟结果.....	51

3.5.2 模拟结果分析.....	52
3.6 钢包应力场数值模拟仿真.....	53
3.6.1 模拟结果.....	54
3.6.2 模拟结果分析.....	56
3.7 本章小结.....	57
第四章 复合耐火材料推广应用的 价值及结论.....	59
4.1 在冶金设备上的应用.....	59
4.2 社会经济效益.....	59
4.2.1 有利于增加经济效益.....	59
4.2.2 有利于节能降耗.....	60
4.3 结论及下一步工作的设想.....	60
4.3.1 结论.....	60
4.3.2 下一步工作的设想.....	61
4.4 本章小结.....	61
参考文献	63
致 谢.....	65

第一章 绪论

1.1 课题背景

1.1.1 耐火材料对钢铁冶金行业的重要意义

耐火材料是服务于高温技术的基础材料，特别是于钢铁工业的发展有极为密切的关系。一个多世纪以来钢铁冶炼技术的发展证明，每次重大工艺变革，都依赖于耐火材料新品种的开发。没有优质和新品种的耐火材料与之匹配，很多冶炼新技术就不可能实现^[1]。

当前，我国钢铁工业正处于向生产技术现代化过渡时期，耐火材料已成为提高冶炼设备寿命，提高产品质量、扩大产品品种、提高经济效益的关键之一，从而也把耐火材料工业推向一个新的阶段。一些耐火材料将由传统的“筑炉材料”发展为“功能耐火材料”。

我国是一个经济和社会正处于迅速发展的大国，也给我国非金属矿高效与综合利用技术的发展带来前所未有的挑战和机遇。以提高非金属矿产资源的利用效率为目标，加速发展非金属矿产资源综合利用和矿物深加工，不仅可以满足我国经济、科技和社会发展对非金属矿产资源日益增长的需求，而且还将成为国民经济发展新的增长点。

多种非金属矿物材料不但能降低复合型制品的生产成本，特别是采用新技术、添加无机结合剂后，还改善和提高了复合制品的（单一材料没有的）主要性能，还可以重复利用，减少了对环境产生的污染，成为环境友好矿物材料^[15]。

1.1.2 本课题的工程背景

目前我国的钢铁行业年产量已突破 4 亿吨，是世界上最大的产钢基地，炉窑的节能降耗、炉窑的延长使用寿命是目前钢铁企业的重中之重。

以炼钢工业高温炉窑为例：通过对柳州钢铁公司、舞阳钢铁公司的 45t 钢包，90t 钢包实际考核，通过扩容使其钢包容量从 45t 扩大到 60t，90t 扩大容量到 120t，如果减薄工作衬，抗静压力减少，使用寿命就会降低，去掉永久衬根本不能保证其寿命，减薄绝热衬，节能降耗就失去意义，并且钢壳就会在短时间内出现发红变形现象，更不能保证钢水的洁净质量。为解决以上问题，保证炼钢炉窑扩容，达到节能降耗、高效长寿的要求，在做“九五”、“十五”国家科技攻关项目期间，行业专家、研究人员的共同努力已针对损毁机理进行了研究，通过基础研究工作证实，开发一种多材质“多层复合型壳体”的绝热材料，既达到绝热又能代替永久衬的工作衬，才能满足炼钢高温转炉、钢包、中间包扩容之需。依靠我国丰富的资源优势通过多次反复基础试验，最终选择材料为低成本、低导热系数达到高绝热性能的“膨胀珍珠岩加膨胀蛭石”作为复合型的选材，并且二

者的基础材料在物理性能上还有互补性,为钢铁工业高温炉窑节能降耗扩容提供了技术支撑。研究成果首先在首钢二炼钢 200-300t 转炉、钢包、中间包技术改造工程中进行实验,同时也为全国钢铁企业做出了示范^[15]。

通过舞阳钢铁公司电炉钢包上的制品试验,在钢包上扩容首先应解决和考虑的问题如下:(1)全方位更换钢包,达到 90t 钢包更换成 120t 的目的,这个需要费用太大,舞钢就得重新投入几百万元的投资。如果减薄原钢包工作内衬就会降低使用寿命;(2)减薄永久层及保温层,热能耗浪费太大^[15]。

以上问题在技术部门及专家的建议下,合适的解决途径为:保证工作衬的厚度不变,把永久衬及保温衬更新为一种既保温又能达到永久衬抗静压的多层复合型壳体、即多功能材料,才能达到钢包扩容、节能的效果。

除用于以上项目外,本课题针对炼钢生产设备的转炉、中间包的炉衬结构、耐火材料进行分析,认为同样可以通过减薄熔炼炉永久层厚度扩大容积;通过改变永久层材料、降低炉衬导热系数减少冶炼炉热损失,保证钢水温度,从而达到在不增加设备和大规模改装设备的条件下实现扩大炼钢生产能力,提高冶炼质量的目标^[15]。

据此,课题旨在开发新型蛭石珍珠岩复合耐火材料作为熔炼炉新的永久层材料。通过新材料的高使用温度、高高温强度、低导热系数、低比重来达到熔炼设备保温、扩容、减重的目的。

1.2 国内外应用及研究进展情况

轻质耐火材料从六十年代开始迅速发展,日,美,西欧,苏等都十分重视这种新型耐火材料的研究,进入七十年代,轻质耐火材料的品种大为增加,使用范围也逐渐扩大,在冶金工业和其他工业部门的消耗量也日趋增长。目前我国轻质耐火材料主要为各种轻质耐火砖。

工业发达国家研制和生产使用的轻质耐火材料品种很多,主要用于炉窑隔热层的定型制品,又有用于接触火焰工作层、兼起保温作用的不定形耐火材料,最高工作温度有的已经到达 1600℃ 以上。由于轻质耐火材料具有隔热保温和耐火内衬两种性能,可以减少能源消耗,成为很有发展前途的新型耐火材料,其优点概述如下:

(1) 节约能源,提高炉窑作业率:一般耐火材料筑炉,其炉衬吸收的热量和通过炉衬向四周辐射对流散失的热量,占燃料发热量的 25-40%,当炉衬越重越厚,吸收的热量就越多,炉衬的导热系数越大,则散失的燃料也就越大。采用轻质耐火材料后,由于热容量低导热系数小,可以减少热损失 20-80%,节约燃料 10%左右。同时,可以缩短炉窑的加热和冷却时间,提高了热工设备的作业率;(2) 减轻设备重量,节省钢材:轻质耐火材料容重轻、隔热效果好,可以减少衬里厚度。所以,减轻了炉窑钢结构负荷,节约钢材,以便于安装;(3) 轻质不定形耐火材料更便于施工制作,可以采用整体浇注或预制成型等方法,做成所需形状,便于使用^[3]。

轻质不定形耐火材料以浇注料和喷涂料为主，按其用途可以分为：轻质隔热浇注料和喷涂料；轻质高强浇注料和喷涂料；还原气氛用轻质浇注料和喷涂料；耐酸轻质浇注料、喷涂料^[6]。

轻质不定形耐火材料的使用温度为 800℃-1600℃，而经常使用的温度以 1400℃以下居多。轻质浇注料与轻质耐火砖相比，热传导率增加 30-50%，容重大 50-100%，强度相应增高，见表 1.1^[18]；

表 1.1 轻质浇注料与轻质耐火砖参数的对比

Table 1.1 Parameters comparison of light castable refractory and light fire brick

		温度/℃	体积密度	热传导率	耐压强 度	收缩率	化学成 分
		材质		千卡/米.时.℃	千克 /cm²	%	Al ₂ O ₃ %
1000	浇注料	蛭石质	0.70-1.00	350-500	20-40	1.00	25-30
		珍珠岩质		0.15-0.20			
	砖	硅藻土质	0.46-0.65	0.13-0.16	11-13	0.6-0.7	12-13
		珍珠岩质					
1200	浇注料	珍珠岩质	1.15-1.25	0.23-0.25	30-60	0.8-1.2	35-45
		轻质粘土质					
	砖	粘土质	0.47-0.52	0.13-0.16	8-10	0.1-0.7	30-40
		钙长石质					
1400	浇注料	珍珠岩质	1.20-1.40	0.25-0.28	80-100	1.0-1.4	35-55
		轻质粘土质					
	砖	粘土质	0.65-0.14	0.17-0.31	14-80	0.1-0.8	35-40
1600	浇注料	纯氧化铝质	1.60	0.69	180	1600 1.60	96
1800	砖	纯氧化铝质	1.30-1.53	0.67-0.77	75-184	1800 0.10	99

轻骨料耐火浇注料具有良好的耐火和隔热性能，可以直接浇注成任何现状作为炉衬或承重构件，使用温度一般小于 1400℃，氧化铝空心球耐火浇注料的使用温度可以达到 1600℃。浇注料与喷涂料往往只有施工方法的差异，为轻质不定形耐火材料最主要的品种。

轻骨料耐火浇注料的配制方法和成型工艺与一般耐火浇注料相同，但因轻骨料的容重较小，容易上浮于制品表面造成分层，因此对振动时间需加以控制。一般应比普通耐火浇注料缩短，可以根据骨料容重不同而定^[18]。

(1) 轻骨料：一般常用的轻骨料有蛭石、陶粒、轻质耐火砖块和膨胀珍珠岩、氧化

铝空心球等。表 1.2 列出常用的几种轻骨料的松散容重。

表 1.2 几种轻骨料的松散容重 (kg/cm³)

Table 1.2 Volume weight of light-weight aggregates

粒径 (mm)	蛭石	陶粒	轻质粘土 砖块	轻质高铝 砖块	氧化铝空 心球	烧结珍 珠岩	膨胀珍珠 岩
10-20		407	474				
2-10	125	480	487	750-800	470-700	720	40-300
1.2-5	185	680	536	750-800	700	720	40-300
<1.2	375	990	745	750-800	700-970	720	40-300

表 1.3 比较全面地概况了轻骨料及其制造方法：

表 1.3 轻骨料及其制造方法

Table 1.3 Light-weight aggregate and manufacture method

制造方法	材料名称	一般使用温度 (℃)	容重 (kg/m³)
天然原料	浮石	<500	500-800
烧结	硅藻土	<500-800	250-400
	蛭石	<800-1000	80-150
加热膨胀	陶粒	<1000	
	珍珠岩	<1200	50-400
	黑曜岩珍珠岩	<1400	70-500
可燃物	多孔燃料	<1400	
加气剂	发泡硅石	<1500	200-350
	氧化铝空心球	<1500	
熔融	氧化锆空心球	<2200	600-800
	硅胶球	<1200	

(2) 胶结剂：轻骨料耐火材料浇注料的胶结剂通常采用火山灰水泥、硅酸盐水泥、矾土水泥、水玻璃、磷酸、磷酸铝和硫酸铝等，与一般浇注料所用的材料相同，可以根据使用温度、要求性能与经济原则选用。

(3) 轻质浇注料：用轻骨料与胶结剂配合，测定各项性能指标，与近几年来国外大量引进的轻质浇注料对比，其重要区别是使用温度在 1100-1600℃之间，国外采用了多孔耐火材料，我国正在研制与试生产^[17]。

尽管轻质耐火材料应用越来越广泛，但多层复合型壳体绝热材料从现在市场来看，在国内是刚刚起步的初级研究、试验阶段，特别是在高温工业炉窑代替永久衬的多层复合型绝热材料，国内尚属首创。

复合炉衬热力学性能研究目前则开展的比较广泛,北京科技大学、宝钢等单位均对熔炼炉复合炉壳结构的温度场、应力场进行了研究。所采用的主要研究方法有对设备进行实测、建立实验设备、数值模拟仿真、求解解析解等。其研究内容探讨了复合炉壳各层材料采用不同材质、不同厚度对熔炼炉热力学性能的影响;研究了钢水温度与炉壳工作衬厚度及炉壳钢壳的函数关系及熔炼炉稳态、瞬态工作条件下的温度场、应力场分布情况,为熔炼炉设计、使用、维护提供了理论依据。

1.3 轻型耐火材料介绍

1.3.1 轻质不定形耐火材料概况

轻质耐火材料指气孔率高(40-85%)、体积密度小(一般小于 1.3g/cm^3)、导热系数低($0.2\sim 0.7\text{W/m}\cdot\text{k}$)的耐火材料,又称隔热耐火材料。可制成具有一定形状的制品,也可制成散状料。轻质耐火材料的品种较多,主要有粘土质、高铝质、硅藻土质、空心球制品及纤维制品等。轻质耐火材料为多孔结构,故强度低,不耐冲刷和侵蚀,不宜用于承重结构和与溶液接触的部位,多用于工业窑炉的隔热层。它包括隔热耐火制品、耐火纤维和耐火纤维制品。轻质耐火材料是晶相、非晶相等固相和气相的多相组合体(见图 1.1),其中的固相大多数是非金属氧化物(结晶相和玻璃相),相对来说这些非金属氧化物本身的导热系数很高,但都有着较高的耐火度(耐火材料在无荷重时抵抗高温作用而不熔化的性能),不起隔热作用。由于气体存在于固相内的气孔中,气体的导热系数很低,空气在 0°C 时导热系数为 $0.023\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$,常温下导热系数小于 $0.03\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$, 500°C 时为 $0.06\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$ 。因此由固相与气相构成的气孔率很高的轻质耐火材料具有很好的隔热效果,而充满气体的散状材料或纤维状材料 also 具有良好的隔热作用^[7]。

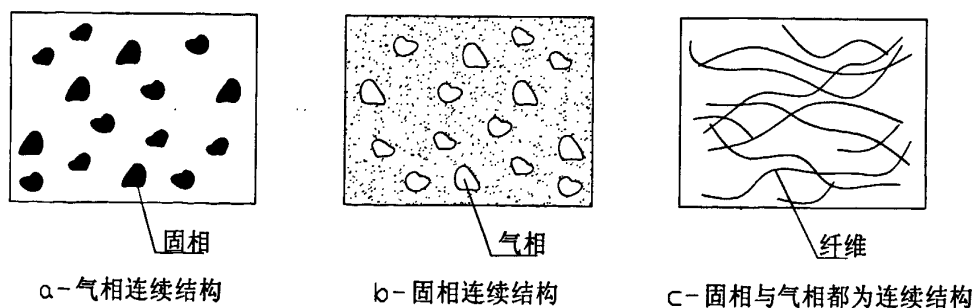


图 1.1 轻质耐火材料的组织结构

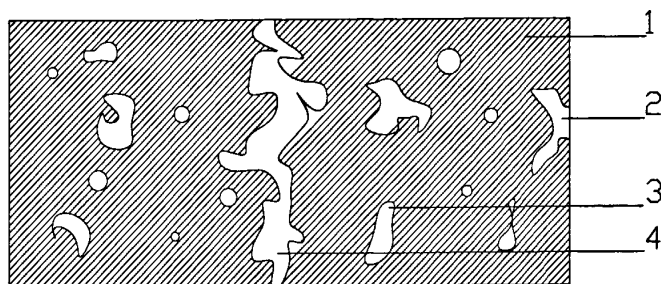
Fig. 1.1 Organization of light weight refractory

1.3.2 轻质耐火材料的主要特点

作为耐火材料的一种,轻质耐火材料也有着一定的高温力学性能和良好的体积稳定性,是各种高温热工设备必需的材料。与致密耐火材料相比,充满气体的轻质耐火材料

其气孔率高、体积密度小、具有良好的绝热性能，对热量起到屏蔽的作用。因此，轻质耐火材料的主要特点是^[13]：

(1)气孔率高：衡量轻质耐火材料质量的一个主要性能指标是气孔率。气孔是由耐火材料原料中的气孔和成型后颗粒间的气孔构成的。可分为三种类型(见图 1.2)：



1.固相 2.开口气孔 3.闭口气孔 4.贯通气孔

图 1.2 轻质耐火材料气孔类型

Fig. 1.2 Air-vent type of light weight refractory

封闭在制品中不与外界相通的闭口气孔；一端封闭，另一端与外界相通的开口气孔；贯通制品内部，两端都与外界相通的贯通气孔。气孔率是指耐火材料中的气孔体积与材料总体积之比(见公式 1.1)，通常以百分率表示。致密耐火材料的气孔率一般都小于 20%，轻质耐火材料的气孔率很高，一般为 65-78%。

$$p = \frac{v_c + v_o}{v_b} \times 100\% \quad (1.1)$$

式中 p -总气孔率，%；

v_c -封闭气孔体积， cm^3 ；

v_o -开口气孔（包括贯通气孔）， cm^3 ；

v_b -制品总体积， cm^3

(2)体积密度小：体积密度是指干燥制品质量与总体积之比(见公式 1.2)。轻质耐火材料的体积密度很小，不超过 $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ ，目前工业上常用的轻质耐火材料体积密度为 $0.5\text{-}1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 。耐火材料的体积密度可以体现制品中气孔率的多少，它是判断制品烧结程度的手段，标志着耐火材料的密实程度。在轻质耐火材料生产中，为了提高气孔率、降低导热系数，要想办法降低制品的体积密度。

$$d_b = \frac{M}{v_b} = \frac{M}{v_t + v_c + v_o} \quad (1.2)$$

式中 d_b -体积密度， g/cm^3 ；

M -制品质量， cm^3 ；

v_b -总体积， cm^3 ；

v_t -制品的实体积， cm^3 ；

v_c -封闭气孔体积, cm^3 ;

v_o -开口气孔体积, cm^3

(3)导热系数低: 导热系数的物理意义是, 单位温度梯度下, 单位时间内通过单位垂直面积的热量。它是轻质耐火材料质量的重要性能指标, 也是热工设计中的重要指标。它间接体现了制品的气孔率和体积密度。对于耐火材料制品, 导热系数越低, 气孔率越大。轻质耐火材料的导热系数很小, 大多小于 $1.26\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$ 。

(4)耐压强度低: 轻质耐火材料由于气孔率大, 体积密度低, 晶体间没有形成致密的连接。因此相对于致密耐火材料, 其耐压强度低, 耐磨性能差。

(5)多被用做工业窑炉的隔热层、内衬及保温部位轻质耐火材料由于导热系数低, 可以降低工业窑炉砖砌体的热损耗, 节省燃料消耗, 提高生产效率。但由于制品的气孔率大, 组织结构疏松, 抵抗化学侵蚀能力差, 轻质耐火材料只能用于热工设备的隔热层、内衬和保温层等部位, 而一般不宜用在与炉料直接接触的炉膛和承重较大的部位^[8]。

综上所述, 轻质耐火材料的特点标志着它是热工设备和阻挡热量损耗的必须材料。随着工业的发展和科技的进步, 大型、连续、高效率的先进设备的投产, 使轻质耐火材料的发展向着使用温度高、低导热率、耐侵蚀性能好、高强度的目标发展。随着全球范围内的能源日趋紧缺, 轻质耐火材料在节能方面显得更加突出。

1.3.3 轻质耐火材料的隔热原理

轻质耐火材料是由不同种类的晶相、玻璃相和气相组成的非均质多相体系材料。因此其隔热原理不仅与材料的化学矿物组成有关, 还与结晶状态、显微结构、各相的分布、含量、排列等有关。一般耐火材料本身的导热系数并不一定很小, 但由于轻质耐火材料的内部存在许多气孔并充满了气体, 而气体的导热系数比其它任何固相的导热系数都低(表 1.4), 因此轻质耐火材料有很低的导热系数。

表 1.4 一些气体的导热系数 W/m.k

Table 1.4 Coefficient of thermal conductivity of some gases

温度/ $^\circ\text{C}$	水蒸气	空气	氢气	二氧化碳
0	0.01716	0.02452	0.1716	0.01442
500	0.06346	0.03364	0.3476	0.05192
1000	0.11971	0.07788	0.5135	0.08221
1500	0.18317	0.09084	0.6274	0.1024

轻质耐火材料的导热方式依然遵循传导、对流和辐射三种形式及其相互作用。表 1.5 是气孔率为 70%的轻质耐火砖中各种传热机制所占的传热比例。可以看出即使是在 1500°C 的高温下, 轻质耐火材料中固相对热量的传导也起着主要的作用。因此相对于致密耐火材料, 轻质耐火材料为松散的多孔结构, 可以近似看作固相被气相分隔, 气体在

结构中起到很好的隔热作用，因此导热系数很低。

表 1.5 气孔率为 70% 的轻质耐火砖中各种传热机制所占的比例

Table 1.5 Heat transfer proportion of 70% air-vent light weight refractory

温度/℃	固相传导/%	气相传导/%	辐射传热/%
500	80	12	8
1000	74	11	15
1500	70	11	19

1.3.4 影响轻质耐火材料隔热的因素分析

轻质耐火材料由于结构复杂、工作环境恶劣，因此影响其隔热效果的因素很多。而且各个因素相互影响，相互联系，很难精确的进行分析研究。但是，在众多的影响因素中，材料的组成与结构、气孔率及气孔的特征、体积密度、温度为主要因素^[34]。

(1) 材料的组成与结构

材料的化学矿物组成与结晶结构是影响轻质耐火材料导热系数的首要因素。一般来说，轻质耐火材料的晶体结构越复杂，其导热系数越小。材料的固相可简单分为结晶相和玻璃相。当原子(离子)由于振动以及相互碰撞作用把动能从动能较高的原子(离子)传递给动能较低的其它原子(离子)，且玻璃相中的原子(离子)为无序排列，运动时遇到的阻力比有序排列的结晶相要高。因此，玻璃相要比结晶相的导热系数低。但是，当温度升高到一定程度时，玻璃相的粘度降低，原子(离子)的运动阻力减小，玻璃相的导热系数也就随之增加了。而结晶相则与之相反，当温度升高，原子(离子)的动能增加，振动增大，导致自由程缩短，导热系数随之下降。在轻质耐火材料的内部结构中，固相间被许多大小不一的气孔所分隔，对热量不能形成连续的固相传递，气相传热代替了大部分的固相传热，因此导热系数很低。

(2) 气孔率及气孔的特征

耐火材料的气孔率与导热系数成反比(见公式 1.3)，随着气孔率的增加，导热系数直线下降。在这一点上，轻质耐火材料表现的尤为突出。但是对于相同的气孔率来说，气孔的尺寸越小、分布越均匀、则导热系数越小。当气孔尺寸小到一定程度后，气孔内的空气完全被气孔壁吸附，使气孔内部接近于真空状态，导热系数降到最低。而当气孔尺寸增大到一定程度时，气孔内壁间的热辐射和气孔内的空气进行的对流换热增加了，导热系数增加(见图 1.3)，据相关文献指出，小气孔中热辐射很小，气孔很大时，特别是沿着射流方向的长形气孔，能增大热辐射的效能，有时甚至出现带有气孔制品的热传导要比致密制品大的个别现象。闭口气孔的导热系数要比开口气孔的导热系数低。

$$\lambda_v = \lambda_k (1 - p) \quad (1.3)$$

式中 λ_v - 轻质砖的导热系数；

λ_k - 连续相的热导率；

P-制品气孔率

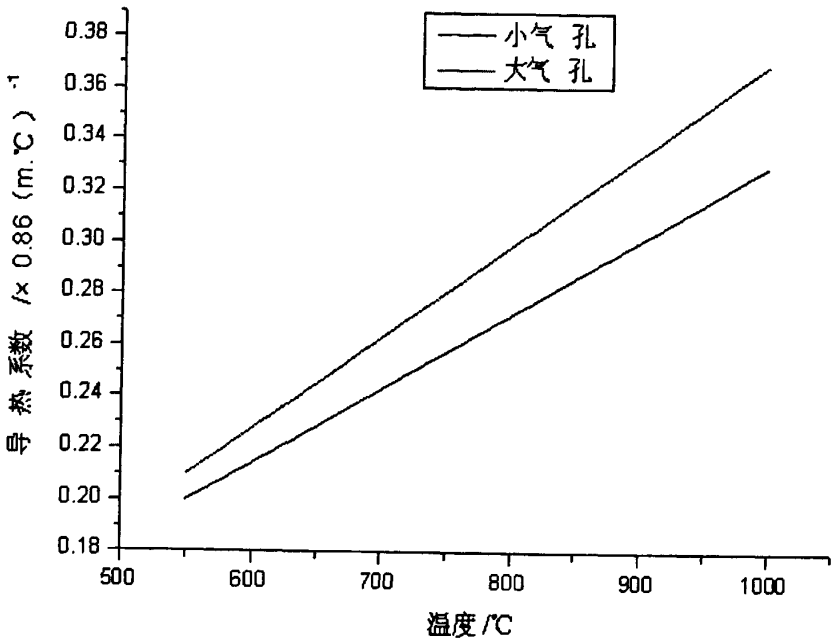


图 1.3 轻质耐火材料的导热系数和温度及气孔大小的关系

Fig. 1.3 Relation between coefficient of thermal conduction, temperature and air-vent dimension of light weight refractory

(3) 体积密度

轻质耐火材料的导热系数与体积密度成线性关系(见图 1.4), 即导热系数随体积密度的增加而增大。体积密度的大小直接体现了轻质耐火材料内部气孔率的多少。体积密度小, 说明制品内部的孔隙多, 固体粒子之间的接触点减小, 热量的固相传导率降低, 从而导热系数下降。

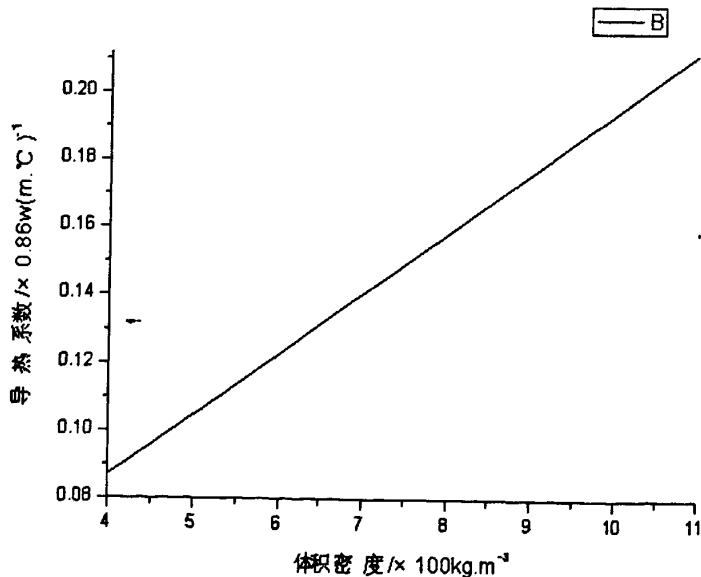


图 1.4 轻质耐火材料的导热系数和体积密度的关系

Fig. 1.4 Relation between coefficient of thermal conduction and volume density of light weight refractory
(4)温度

轻质耐火材料的导热系数与温度呈线性关系见图(1.5)，即导热系数随着温度的升高而增大。但相对于致密耐火材料，轻质耐火材料的导热系数随温度的增加幅度小得多。这是由于致密耐火材料主要为固相传热，温度增加时制品内的分子的热运动加剧，提高了导热系数。在轻质耐火材料中，其组织结构大多为气相结构(65-78%)，温度升高时气相的导热系数的变化幅度总是小于固相。

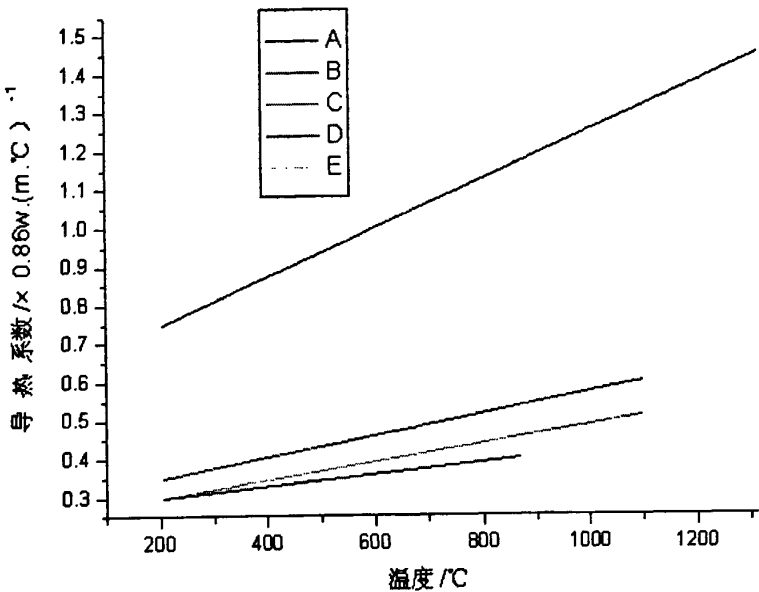


图 1.5 轻质耐火材料的导热系数和温度的关系

Fig. 1.5 Relation between coefficient of thermal conduction and temperature of light weight refractory

1.4 炼钢设备耐火材料使用情况

本课题背景源于舞阳钢铁公司熔炼设备中的钢包扩容，但由于项目进展情况，对该公司设备资料掌握不足，因此仅以宝钢炼钢设备^[2]为例做一般性研究。另外本课题主要研究钢包，对转炉、中间包仅做一般性介绍，旨在说明蛭石珍珠岩复合耐火材料在其上同样适用。

1.4.1 耐材-钢复合结构

转炉、钢包、中间包均为耐火材料-金属复合炉壳结构，对于其耐火炉衬的永久层来说，其工作条件有一定的相似性：即均受到冶炼、精炼时的高温作用；装出钢水时的热震作用；冶炼时的静荷载、装出钢水时的动荷载及钢水、钢渣的化学侵蚀作用。在工作条件下，复合炉壳内侧与钢水接触，外侧与大气接触^[8]。

一般来说，由两种或者两种以上不同材料构成的结构就认为是一种复合结构。复合结构就是把异种材料结合成整体结构而共同工作，并能取得比单一材料结构更优的特性。复合结构(Hybrid Structure)是组合结构(Composite structure)和混合结构(Mixed Structure)的总称。欧美国家通常用 Composite Construction 表示^[29]。

组合结构是构件断面由金属和耐火材料异种材料组成并用剪力键连成整体而共同工作的结构体系。混合结构是指金属或耐火材料等不同材料的构件用接头连接成整体的结构体系。图 1.6 表示复合结构的构成。其耐火材料-金属复合炉衬炉衬结构的一般形式为：

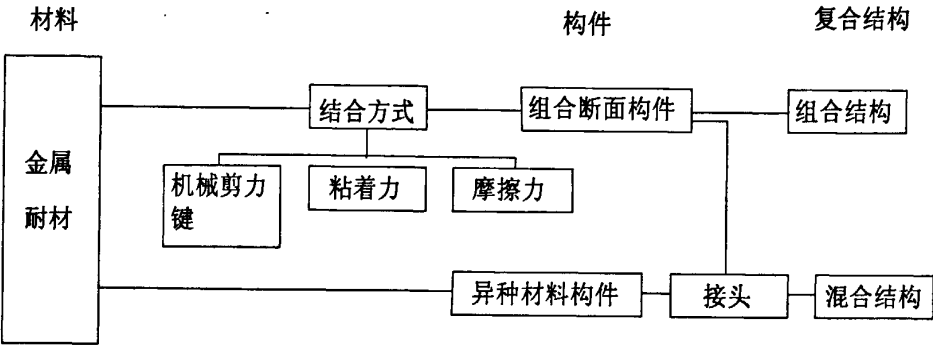


图 1.6 钢铁-耐材复合结构原理图

Fig. 1.6 Principle diagram of steel- refractory complex structure

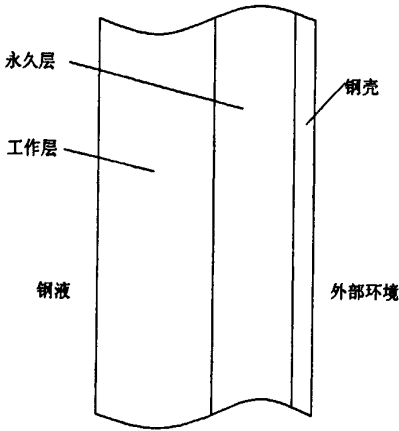


图 1.7 钢铁-耐材复合结构示意图

Fig. 1.7 Scheme of steel- refractory complex structure

在钢铁-耐材复合结构中，耐材部分通常称为炉衬。目前，炼钢连铸熔炼炉通常采

用综合炉衬,即炉衬各部位根据使用条件、损毁条件和侵蚀速度的不同采用不同材料,不同结构的耐火材料,以确保炉衬整体发挥最佳综合性能,最大限度地延长使用寿命。当仅考虑热力学条件时,在平衡状态下,炉衬高温侧为冶炼或存储状态下的钢水,温度在 1500-1600℃之间,炉衬低温侧为钢壳,温度在 200-400℃之间;在非平衡状态下,有较大的温度变化范围室温至 1700℃不等,及变化速度每分钟几十℃至几百℃不等。其中永久衬工作温度范围在约 200-1400℃之间^[16]。

1.4.2 转炉

以宝钢 300 吨转炉为例。

1.4.2.1 转炉结构

转炉结构如图 1.8 所示,转炉炉衬结构如图 1.9 所示:

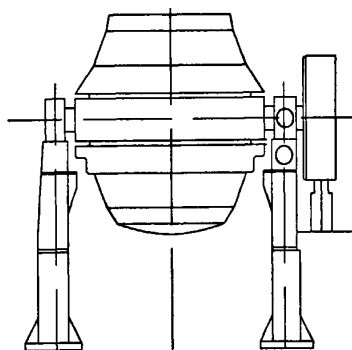


图 1.8 转炉外形示意图

Fig. 1.8 Outline scheme of Bessemer converter

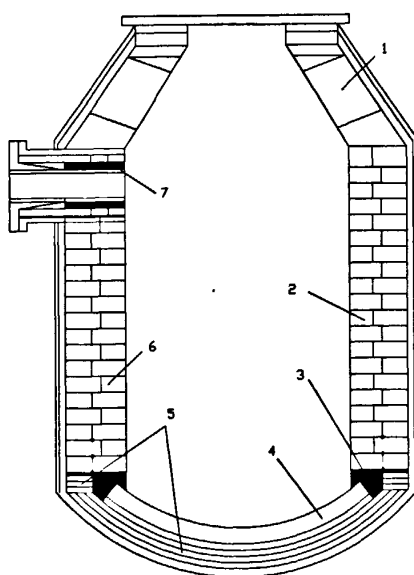


图 1.9 转炉炉衬结构示意图

Fig. 1.9 Scheme of Bessemer converter construction

1.4.2.2 转炉耐火材料

以宝钢 300t 转炉为例，氧气转炉炉衬采用的耐火材料：渣线镁碳砖；包壁铝镁尖晶石质浇注料；包底铝镁质预制块和高铝不烧砖组合转。

永久层：包底永久层和大部分包壁永久层使用高铝质浇注料，另有一部分包壁永久层使用蜡石砖或高铝砖；渣线：镁碳砖（碳含量 14%，已试验过碳含量 7% 左右的镁碳砖）；包壁工作层：主要有二种，一种是高铝砖，另一种是铝镁尖晶石质浇注料；包底工作层：主要是蜡石-碳化硅砖，使用寿命较低，小修周期仅 25 次，导致包底耐火材料消耗较高。也有部分钢包使用整体浇注料，方法是在冲击区用预制块，四周用浇注料，寿命在 70-100 次。

永久层浇注料的开发应用，永久层原来使用的是蜡石砖和高铝砖，每次大修时永久层均无法保留，严格意义上不能称永久层，只能称安全层，而蜡石砖和高铝砖砌筑的永久层由于有大量砖缝，安全层也并不安全。为使永久层既能长寿，又能安全，开发了一种供永久层使用的较为高档的高铝莫来石质浇注料，其特点是在浇注料厚度较薄的条件下具有高的强度、良好的热震稳定性及高温体积稳定性。钢包永久层整体浇注的好处主要有两点：一是提高钢包使用的安全可靠；二是延长永久层使用寿命，降低工人劳动强度，使隔热保温材料可多次使用，降低钢包生产成本。目前永久层使用寿命最低为 500 次^[8]。

1.4.3 中间包

以宝钢连铸 80 吨中间包为例。

1.4.3.1 中间包结构

中间包结构如图 1.10 所示，中间包衬结构如图 1.11 所示：

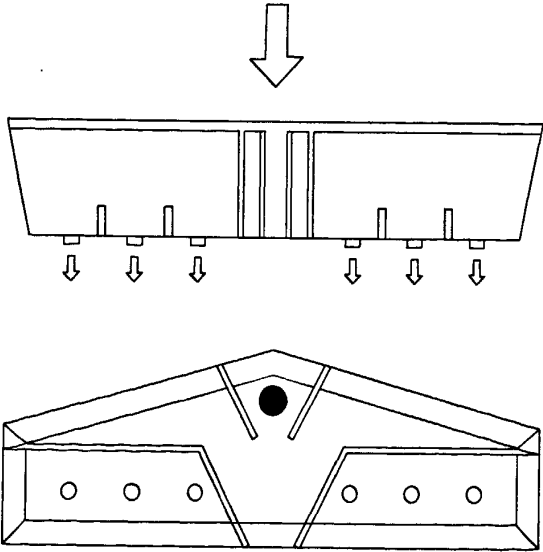


图 1.10 中间包外形示意图

Fig. 1.10 Outline scheme of intermediate ladle

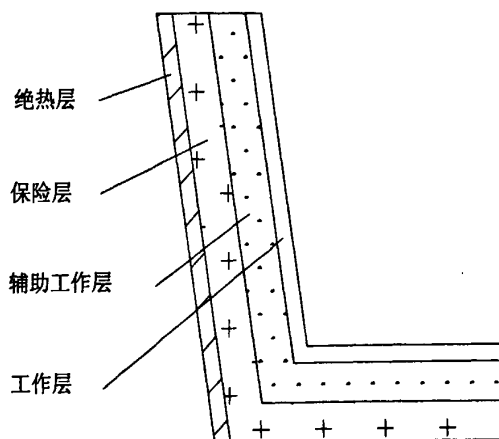


图 1.11 中间包衬结构示意图

Fig. 1.11 Scheme of intermediate ladle construction

1.4.3.2 中间包耐火材料

中间包衬一般有四层：第一层为绝热衬，有 12.7-63.5mm 厚的绝热纤维板或耐火砖砌成；第二层为保险衬，由 63.5-144.3mm 厚含 Al_2O_3 40%-55% 的耐火砖砌成；第三层为辅助工作衬，由含 Al_2O_3 60%-70% 的低水分浇注料浇注成；第四层为工作衬，由 12.7-25.4mm 厚的 MgO 喷涂/涂抹衬或 25.4-50.8mm 绝热板组成^[16]。

1.4.4 钢包

以宝钢 300t 钢包为例。钢包由钢包壳和耐火材料两部分组成，钢包壳的基本结构是一个回转的桶形容器，耐火材料紧靠钢包壳的内壁进行砌筑或浇注，通常由安全层、永久层、工作层和上、下渣线组成^[2]。

1.4.4.1 钢包结构

整个钢包的形状如图 1.12 所示，钢包衬结构如图 1.13 所示：

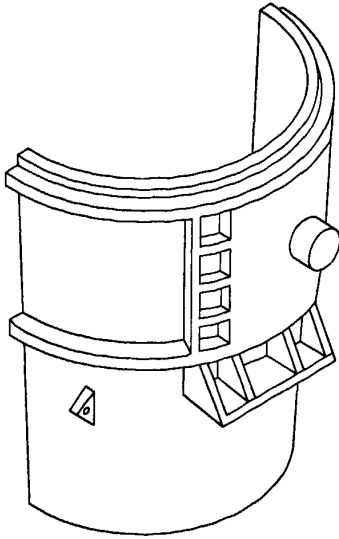
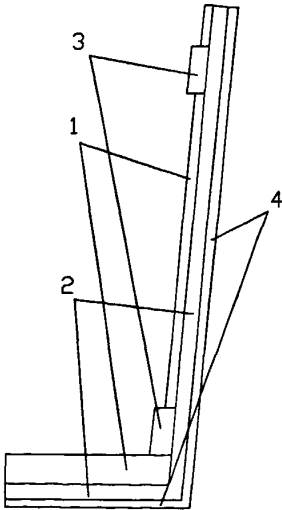


图 1.12 1/2 钢包外形示意图
Fig. 1.12 1/2 outline scheme of ladle furnace



1.工作层 2.永久层 3.上下渣线 4.钢包壳
图 1.13 300 吨钢包炉衬结构图
Fig.1.13 Scheme of 300t ladle furnace construction

1.4.4.2 钢包耐火材料

钢包壳的材质为 SM41CN(日本钢号), 密度为 7860kg/m^3 ; 内衬材料中, 工作层内衬为含 80%氧化铝的高铝砖, 永久层内衬为含 60%氧化铝的高铝砖, 密度取为 2840kg/m^3 ; 上下渣线采用的是镁碳砖, 密度为 2890kg/m^3 。

以上分析了目前转炉、钢包、中间包结构及耐火材料使用情况和工作条件, 从对设备的分析可以看出, 转炉、钢包、中间包结构和工作条件的相似性为其使用通用的炉衬材料提供了可能性。蛭石珍珠岩复合耐火材料即是基于这种共性而开发的可以通用于这

三种熔炼炉综合炉衬永久层的新型复合材料。

1.5 传统炼钢设备永久层耐火材料的不足

为了满足对精炼盛钢桶更严格的冶炼要求,国外钢厂普遍将盛钢桶工作衬用耐火材料由粘土质改为高铝质、锆英石质、铝镁质或碱性耐火材料。进入 90 年代以来,在盛钢桶工作衬中使用含碳耐火材料的数量也有了明显的增加。由于这些优质材料的导热率高,使盛钢桶的钢水温度下降很多,易造成冷钢事故,同时使盛钢桶桶壳温度明显超出极限值,导致钢壳变形而报废。为了避免结冷钢事故的发生,有时不得不提高出钢温度,因此影响了设备效率的发挥和经济效益的提高。许多钢厂为了降低盛钢桶的热损失,开展了在永久衬和钢壳之间衬砌隔热材料的实验,如武钢采用绝热板、首钢采用纤维毡等,在减少钢水温降方面都起了一定作用。但采用上述隔热层,大都仍需砌筑安全衬,增加了砌筑工序,同时由于永久衬与保温衬之间的结合性差,增加了维修次数。为了解决上述问题,许多钢厂试用容重为 1.5g/cm^3 左右的轻质浇注料,取得了较好的使用效果,但这种方式烤包时间较长,并且需增加施工设备^[15]。

依靠单一材质的绝热材料运用在工业炉窑上存在不足之处,主要表现在以下几个方面:(1)单一材质的绝热材料到使用后期都出现收缩比大、粉化、特别是受机械外力的作用而发脆;(2)如果工作炉窑内衬出现漏洞,单一材质的绝热材料没有长时间抵抗侵蚀能力;(3)在更换维修过程中浪费大量的人力、物力和财力;(4)在同一型号吨位的炼钢炉窑上增加其容量,即扩容是非常困难的。

由于单一的复合型绝热材料有它明显的不足之处,在于受到机械外力及静压力的作用后就容易发脆及抗静压力减弱,不能达到长寿命的保温效果,所以就造成炉窑寿命的降低。

21 世纪是新材料研究开发和不断创新的世纪,随着现代工业及高温技术的发展,单一组分材料已经难以满足使用现状,复合材料因具有高强、高韧、超硬、耐高温、耐腐蚀等特性,成为材料研究的热点之一。复合材料是由两种或两种以上的材料,用物理或化学的方法复合而成的一种多相新材料,是材料领域的后起之秀,是科学技术发展的重要物质基础先导。复合材料的各组分之间虽保持其相对独立性,但却不是各组分材料性能的简单加合。由于复合材料各组分之间“取长补短”、“协同作用”,极大地弥补了单一材料的不足。

复合材料的发展方向大致包括:一是结构与功能的复合,即要求材料不仅能作为结构材料使用,而且能具有特定的功能或者多种功能。二是要求新材料在满足正常的高强度、耐腐蚀等条件以外,还要求材料本身具有感知、自我调节和反馈的能力,具有敏感和驱动的双重功能,就如同模仿生命体系的作用一样,具有智能性。第三,少污染,即为了人类健康,要求材料在制作和废弃的过程中尽可能少地对环境产生污染,可再生,不为地球积存太多的废料。本课题旨在开发既能隔热又能承受温度、机械应力的耐火材

料,集安全和保温为一体,简化砌筑工序,降低劳动强度^[15]。

1.6 本课题研究内容

(1) 分析目前转炉、钢包、中间包的结构、材质,指出永久层耐火材料存在的问题。主要分析对象为宝钢 300 吨转炉、80 吨连铸中间包、300 吨钢包。

(2) 研究蛭石珍珠岩复合耐火材料的矿物、配方、生产工艺设备、检测方法和热工指标。耐火材料的配方在各主要组成部分确定的前提下,对添加剂、结合剂的选用仅做一般性探讨;生产工艺介绍的重点是电加热膨胀法;以上研究的主要依据是祥通耐火陶瓷公司提高的可行性研究报告。

(3) 对复合材料进行晶相学分析;基于传热学理论对钢包热力学进行解析分析和数值模拟,重点运用 ANSYS 有限元软件对新型复合材料与传统耐火材料在钢-耐材复合炉衬结构中的使用情况对比分析,对复合炉衬永久层采用新型复合材料并减薄的条件下,钢包的温度场、应力场进行分析。

(4) 探讨了蛭石珍珠岩复合耐火材料研发的技术经济效益。

1.7 本章小节

耐火材料对于高温工业具有重要意义,目前国内外对轻质耐火材料应用变得更加广泛,对应用轻质耐火材料的高温熔炼设备热力学行为研究也具有一定的基础。轻质耐火材料主要依靠其多孔结构形成隔热性能,其主要不足是耐火度、强度较低。炼钢设备壳体均为钢-耐材复合结构,工作条件相似,这为其使用通用的耐火材料提供了基础,目前正在应用的永久层耐火材料存在诸多不足,而复合耐火材料具有广泛发展前景,是传统耐火材料良好的替代品。

第二章 蛭石珍珠岩复合耐火材料的研发方案

2.1 蛭石珍珠岩介绍

明确蛭石珍珠岩复合耐火材料在耐火材料体系中的类别,有利于对其进行系统的研究。

2.1.1 分类

耐火材料是耐火度不低于 1580℃的材料,一般是指由无机非金属材料构成的材料和制品。耐火材料按不同标准有多种分类方法,按发展年代一般分为三代:第一代,烧成定型耐火材料;第二代,不定形耐火材料;第三代,耐火纤维^[3]。

不定形耐火材料又称耐火混凝土,由耐火骨料,粉料,黏结剂,添加物和气孔构成,在平常和提高温度下凝固,并在使用温度下具有有限的收缩。耐火度超过 1580℃的不烧材料称不定形耐火材料,它具有生产简单,施工方便,整体性好、性能优良等优点。浇注料按气孔率分为致密浇注料(采用致密骨料)和气孔率大于 45%的隔热耐火浇注料。蛭石珍珠岩复合耐火材料即属于轻质高强绝热耐火浇注料类别^[13]。

按化学成分,蛭石、珍珠岩属于 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系耐火材料。按硅酸铝耐火材料的氧化铝含量,我国分为: Al_2O_3 含量小于 30%的半硅质, Al_2O_3 30%-48%的黏土质和 Al_2O_3 含量 48%以上的高铝质耐火材料。珍珠岩、蛭石 Al_2O_3 含量基本小于 30%,应属于半硅质耐火材料^[15]。

2.1.2 蛭石珍珠岩介绍

2.1.2.1 矿物

珍珠岩是一种酸性玻璃质岩,硅酸盐类物质,其化学成份比较稳定,该类矿石主要元素氧化物含量为 SiO_2 68-74%, Al_2O_3 11%-15%,含少量钾、钠、钙、镁混合物,具有吸音性,不燃性,微孔高,比表面及吸附性,密度在 70-250 kg/m^3 ,导热系数 0.047-0.072 $\text{w/m}\cdot\text{k}$,耐火度 1280-1360℃,焙烧温度 1180-1250℃,吸水率 40%-84%^[15]。

蛭石是一种层状硅酸盐类物质,其化学成份波动范围比较大:主要氧化物含量 SiO_2 38.2%-63.1%, Al_2O_3 36.37%-25.49%, MgO 9.35%-24.22%,密度 80-220 kg/m^3 ,导热系数 0.047-0.07 $\text{w/m}\cdot\text{k}$,耐火度 1300-1350℃,焙烧温度 850-1000℃,吸水率 37.6%^[15]。

2.1.2.2 膨胀产品

膨胀蛭石、膨胀珍珠岩之所以绝热,根本原因在于材料的导热性差。绝热材料是多相组合体,构成绝热材料的固相大多数是非金属氧化物(晶质和玻璃质)。它本身导热系数并不一定很小,但是,当此种制品内存在许多气孔并充满气体时,则由于气体的导

热性很低，如空气在 0℃时导热系数为 0.023W/m·k，常温下导热系数小于 0.03W/m·k，500℃时为 0.06 W/m·k，从而使固相和气相构成气孔率很高的轻质材料，或颗粒状材料间充满气体的散装材料，具有很低的导热性^[15]。

膨胀珍珠岩是一种多孔的粒状物料，颗粒呈蜂窝状结构，孔壁很薄，气孔率很大，所以膨胀珍珠岩具有质轻、隔热、吸声、耐火等特点，并且无毒、无味、不腐蚀、不燃。

膨胀珍珠岩的膨胀机理：珍珠岩在酸性熔岩喷出地表时，由于空气温度相差悬殊，岩浆骤冷，具有很大黏度，使大量水蒸气未能逸散而存于玻璃质中。焙烧时，珍珠岩突然受热达到软化点温度，玻璃质结构内的水汽化，产生很大压力，使粘稠的玻璃质体积迅速膨胀，当冷却到其软化点以下时，便凝成具有孔径不等空腔的蜂窝状物质，即为膨胀珍珠岩。珍珠岩的玻璃质是引起矿石膨胀的基础条件，珍珠岩的玻璃质中的结合水是引起矿石膨胀的内在原因。

珍珠岩矿中的水分含量与膨胀珍珠岩的质量关系密切：珍珠岩含水量大时，高温焙烧时水分气化产生的压力过大，将冲破颗粒中玻璃质薄弱的地方，产生炸裂、粉化等，时产品密度增大；当水分含量小时，高温焙烧时没有足够的水变为气态，产生的气体压力小，膨胀不充分，也使密度增大。

膨胀珍珠岩的性能：膨胀珍珠岩的容重为 0.07-0.25t/m³，大颗粒膨胀珍珠岩容重可达 0.45-0.55t/m³，化学成分见表。导热系数为 0.047-0.072w/(m·k)，化学稳定性好 (ph=7)，使用温度可从-200-800℃，吸湿能力小 (<1%)。

表 2.1 膨胀珍珠岩化学成分 单位：%

Table 2.1Chemical composition of expanded perlite unit: %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	烧失
72-77	10-15	0.4-1.2	0.7-1.8	0.2-0.5	4-5	3-4.2	0.2-0.5

蛭石在 850-1000℃的温度下煅烧，其颗粒单片体积能膨胀 20 倍以上，许多颗粒的总体积膨胀 5-7 倍。膨胀后的蛭石，细薄的叠片构成许多间隔层、层间充满空气，因而具有很小的容重和导热系数，是一种很好的绝缘材料。

膨胀蛭石的膨胀机理：蛭石颗粒在 1 分钟内通过窑的高温区（1000℃左右），结合水迅速蒸发，层间水蒸气压增大，致使蛭石剧烈膨胀，再经骤然冷却便获得膨胀蛭石。蛭石的膨胀温度，一般从 200℃开始，850-1000℃时，膨胀达最大值。

膨胀蛭石性能：膨胀蛭石的容重为 0.08-0.3t/m³，膨胀蛭石的导热系数为 0.047-0.07w/(m·k)。常温下，膨胀蛭石容重与导热系数的关系见表。耐热性 膨胀蛭石属无机矿物类，它不仅具有很高的熔点（1370-1400℃）和不燃性，而且还有较好的耐热性能。

表 2.2 导热系数与容重的关系

Table 2.2 Relation of coefficient of thermal conduction and volume weight

容重/(t/m³)	蛭石粒度/mm	导热系数（常温）/[w/(m·k)]
0.113	5	0.053
0.120	3	0.052
0.150	2	0.048

膨胀蛭石的化学成分及技术性能指标见表。

表 2.3 膨胀蛭石化学成分 单位：%

Table 2.3 Chemical composition of expanded vermiculite unit: %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	烧失
35-45	11-19	7-25	0.5-3	3-23	1-7	1-4	3.4-12.2

表 2.4 膨胀蛭石性能指标

Table 2.4 Performance index of expanded vermiculite

项目	等级		
	1	2	3
容重/(t/m³)	0.1	0.2	0.3
最高使用温度/℃	≤1000	≤1000	≤1000
导热系数/[w/(m·k)]	0.04-0.05	0.045-0.055	0.05-0.06
粒径/mm	2.5-20	2.5-20	2.5-20
颜色	金黄	淡灰	暗黑

配制耐热混凝土的蛭石必须为膨胀完全的 1 级膨胀蛭石。膨胀蛭石耐热混凝土的长期使用温度以不超过 850℃为宜，主要考虑蛭石在 900℃时有可能产生二次膨胀问题^[17]。

2.2 生产工艺设备

2.2.1 膨胀珍珠岩的生产

膨胀珍珠岩的生产需要经过破碎、预热、焙烧等 3 个工序。

(1) 破碎:产生珍珠岩时，膨胀珍珠岩矿石经过破碎后的粒度以 0.15-0.5mm 为宜。

表 2.5 珍珠岩矿石粒度与膨胀倍数的关系

Table 2.5 relation of pearlite ore size and expansion multiple

粒度范围/mm	<0.15	0.15-0.5	0.5-1.5
矿石的膨胀率/倍	5.8	16-25	5
产品容重/(t/m³)	0.22	0.05-0.08	0.256

(2) 预热:预热的作用是使矿石的含水率控制在有效含水量范围内。矿石粒度在

0.15-0.5mm 时,为使膨胀效果最佳,有效含水量应控制在 2%左右。由珍珠岩残存含水量与加热温度的关系曲线图可见:相应于残余含水量为 2%的温度为 400-500℃。

(3)焙烧:焙烧是生产膨胀珍珠岩的关键。经预热的矿石粒进入温度为 1250-1300℃ 的竖窑,用 2-3s 快速通过窑内高温区并迅速冷却,当突然受热达到岩石软化温度时,玻璃质中的结合水气化,产生很大压力,体积迅速膨胀,此时,使其迅速冷却,便凝成空腔结构,形成多孔的颗粒状膨胀珍珠岩。

2.2.2 膨胀蛭石的生产

膨胀蛭石的生产工艺主要有选矿、烘干、破碎、筛分和煅烧 5 道工序。

(1)选矿是将蛭石原料中的、在煅烧时不膨胀或膨胀倍数小的矿物分离出去的过程。这是膨胀蛭石生产过程中的重要工序。选矿的方法包括空气分离法、电力分离法、浮选-沸腾分离法和振动分离法。

(2)烘干:蛭石原料一般含 6%-10%的水分,为了很好地破碎和筛分,为了保证蛭石的膨胀质量,对含水量>5%的蛭石原料需进行烘干处理,使水分含量保持在 3%-5%范围内,烘干温度<150℃。

(3)破碎:为适应烧成工艺的要求,保证膨胀质量,需对蛭石原料进行破碎。蛭石用做混凝土轻骨料和填充料时,原料颗粒粒度可为 2-15mm,厚度可为 0.5mm-1mm,一般采用锤式破碎机进行破碎。

(4)筛分:筛分的主要设备时振动筛和回转筛,筛网的筛孔尺寸根据所需颗粒确定。

(5)煅烧:可用立窑或回转窑进行煅烧^[17]。

2.2.3 复合耐火材料工业化生产技术路线及重点

膨胀蛭石珍珠岩复合耐火材料生产工艺流程图如图所示^[15]。

其中最主要工艺是蛭石珍珠岩的膨胀和添加无机填料、无机结合剂后的制球,前者形成微观球形闭口气孔,后者形成良好的宏观包容复合结构。

珍珠岩、蛭石二者性质相似,导热率低,隔热防火;但耐火度低,使用强度低。要想使二者能够依靠自身条件并用无机结合剂,无机填充料,制成多层复合型壳体绝热材料制品,在工业炉窑的高温区域发挥其更大的作用,必须提高耐火使用温度和强度,其研究对象为:(1)在无机结合剂,无机填充料的作用下提高使用温度达到 1400-1500℃;

(2)形成多层复合型壳体的绝热材料保证并增加其强度>20Mpa,提高抗折能力>1Mpa-2 Mpa;(3)保持低的导热率,在不同使用环境下,导热系数控制在 0.13-0.15 w/m·k 范围内^[15]。

为达到以上指标,应该真正使“珍珠岩”、“蛭石”在制作过程中使二者的闭口气孔率有一定的严密性,复合型蛭石包围复合型珍珠岩,依靠中、高温无机结合剂使二者产生多元相 Si、Al、Mg 晶相体反应,达到晶体状态,才能提高多层复合型的强度保证其

使用性能。

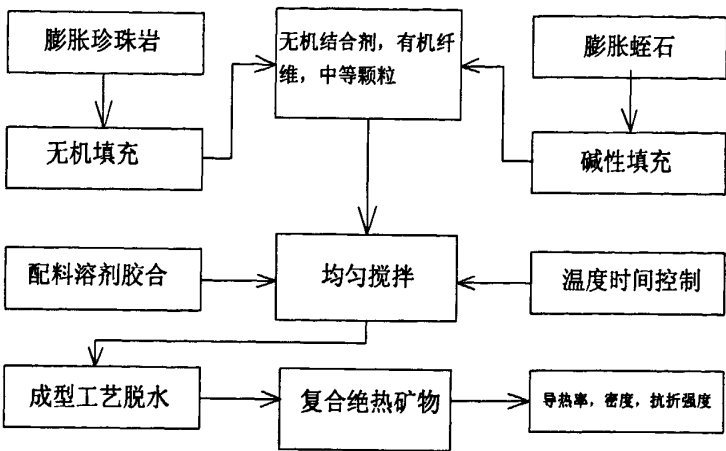


图 2.1 蛭石珍珠岩复合耐火材料生产工艺流程图

Fig. 2.1 Process flow sheet of vermiculite pearlite composite refractory

此项目的研究开发，已经运用在首钢二炼钢一个钢包的上部三分之一处进行了试验，达到了比较理想的效果，但是还有不足之处。计划用三年的时间进行整体批量试用，此项目开发成功后可以在多个行业的炉窑上广泛运用，特别是在炼钢工艺的中间包、钢包、转炉上应用^[15]。

2.2.4 主要生产设备简介

主要生产设备指蛭石和珍珠岩的电加热膨胀设备及形成复合结构的预混合、混炼设备。

2.2.4.1 球形闭孔膨胀蛭石膨胀珍珠岩生产简介

蛭石珍珠岩的膨胀机理为：结合水+玻璃质—受热—玻璃质熔融—结合水急剧膨胀形成气孔—玻璃质冷却—疏松多孔结构形成。传统膨胀生产过程由于原料、工艺控制不当，膨胀产品易形成开放孔隙结构，使微观真空气孔结构被破坏，影响了制品的导热性和强度。为克服这一不足，开发了新型球形闭孔膨胀蛭石珍珠岩生产工艺，利用该工艺膨胀出的蛭石珍珠岩,是一种球形闭孔结构,由于外壳封闭,气体很难流动,减小了导热系数，因呈球形,增加了自身强度和密度稳定性,克服了多孔结构的自身缺陷,是传统膨胀蛭石珍珠岩的理想升级换代产品^[20]。

球形闭孔的形成原理为：传统膨胀工艺中,预热后的矿砂直接进入火焰中或与火焰相遇,火焰温度至少有 1400℃,加之颗粒在膨胀室内滞留时间很短,大约只有几到几十微秒,颗粒受热成为塑性状态时,其中的水分突然蒸发,冲破颗粒表面塑性壁壳而逸出,结果使形成的膨胀颗粒带有大量的爆裂口和裂缝,因而产品呈图 2.3 多孔状结构。本工艺实施过程中,温度是分区控制的,在加热区形成的是比较均匀的温度,峰值温度较低；加热方向与矿砂流动方向垂直；颗粒在膨胀区滞留时间较长,大约 1~20 秒；矿砂颗粒在膨胀室以渐进

方式膨胀,颗粒内部水份蒸发时,其表面仍保持塑性而不致爆裂成多孔状,冷却后形成的即是球形闭孔结构,如图 2.2。



图 2.2 球形闭孔膨胀珍珠岩点扫描照片

Fig. 2.2 Electrical scanning photo of

ball closed pore expanded perlite



图 2.3 多孔结构膨胀珍珠岩电扫描照片

Fig. 2.3 Electrical scanning photo of

polyporous expanded perlite

从扫描电镜可以看出,传统膨胀珍珠岩外形凹凸不平,极不规则,为多孔结构。球形闭孔膨胀珍珠岩外形平滑、连续、成近似球形,内部空心,为闭孔结构。

蛭石珍珠岩性能及膨胀原理的相似性,使其用同一条生产线,只需进行必要的设备参数和操作参数的调整即可同时满足两种膨胀产品的生产。本课题主要用立式电加热膨胀炉进行膨胀珍珠岩膨胀蛭石的生产。蛭石珍珠岩电加热膨胀技术原理:采用立式电加热多温区膨胀炉生产,热源对物料的加热为隐形保护加热,即物料在炉芯管内自上而下流动,电加热元件在炉芯管外加热,热流方向与物料流动方向垂直,温度分区设定且控制准确,物料流经每一温区都能得到均匀稳定的加热,因而得到较好的膨胀效果。电加热膨胀工艺见图^[21]。

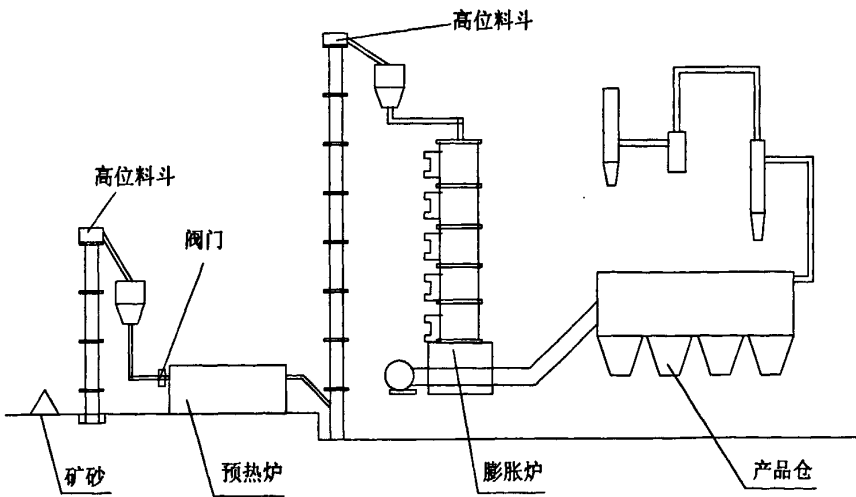


图 2.4 蛭石珍珠岩电加热膨胀工艺流程示意图

Fig. 2.4 Electric heating process flow sheet of vermiculite and perlite

矿砂经一次斗提升进入预热高位料斗,由高位料斗下阀门控制矿砂流量,进入预热炉,预热后的矿砂经二次斗提升至膨胀炉前高位料斗,再由高位料斗控制流量,进入膨胀炉膨胀,由膨胀炉下部出来的膨胀产品经风送系统进入产品仓,根据需求筛分后包装或直接包装。工艺特点:(1)预热炉和膨胀炉均为电加热,温度设定和调节集中控制,可手动、自动调节。物料受到均匀稳定的多温区加热,热流方向与物料流动方向垂直;(2)温度控制精度高($\pm 5^{\circ}\text{C}$),调节灵活;(3)原料从预热到膨胀连续进行,整个过程约 15 分钟,流程短,自动化程度高;(4)整个流程封闭运行,无粉尘、烟尘污染;(5)产品料仓采用自然沉降—折流板阻挡—旋风分离—二次袋除尘思路设计,具有结构独特,原理简单,投资少,除尘效果理想的特点;(6)工人劳动强度低;(7)膨胀炉炉膛为金属材料,蛭石为非金属矿,二者物料不相容,因此不易结炉;(8)可以膨胀多种矿物,如珍珠岩、蛭石、松脂岩等和不同粒度的矿砂,实现了一机多用。

以膨胀蛭石为例,其工艺参数为:预热温度 200°C ,预热时间 3 分钟;膨胀温度:1 区 750°C ,2 区 800°C ,3 区 850°C ,4 区 900°C ,5 区 950°C ,6 区 1000°C ^[19]。

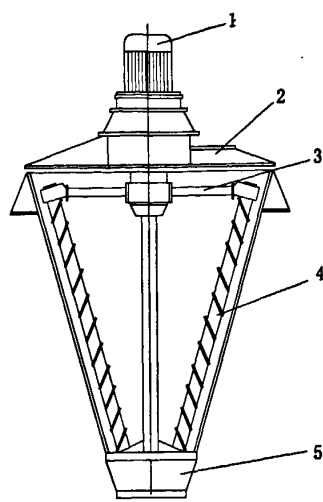
2.2.4.2 生产膨胀蛭石珍珠岩复合耐火材料的主要设备

耐火材料的配料是将各种不同品种、组分和性质的原料以及将各级粒度的熟料颗粒按一定比例进行配合的工艺。各种原料的配合是为了获得一定性质的制品。粒度的配合是为了获得最紧密堆积的或特定粒状结构的坯体。配料是通过提高混合过程实现的。耐火材料工艺的混炼过程,也是在混合的同时,促进颗粒接触并塑化的操作过程。因此耐火材料生产的混炼过程,伴随着各种颗粒与粉料混合的同时,还受到挤压,捏合,排气过程,使混合料适应成型的要求。

混合设备通常分为预混合设备、混练设备及其他专用混合设备,主要包括:湿碾机、强力逆流混合机、高速混合机、双锥混合机和混练造粒机等^[18]。

预混合设备是生产各类不定形耐火材料及特殊耐火材料过程中,混合细粉和微量添加剂时所使用的设备,可使细粉和微量添加剂充分混合均匀。常用的预混合设备有螺旋锥型混合机、双锥型混合机等。

(1)螺旋锥型混合机:螺旋锥型混合机结构简单,能耗低,混合均匀,适合于粉料及密度相差小的各种物料的干混合。螺旋锥型混合机有单螺旋、双螺旋、三螺旋等多种,每批次混合量较大、混合均匀度要求较高时可选用双螺旋或三螺旋锥型混合机。螺旋锥型混合机由固定的锥形筒体、螺旋轴和传动装置等部分组成,容积为 $0.5\text{--}6\text{m}^3$ 。其结构见图 2.5:

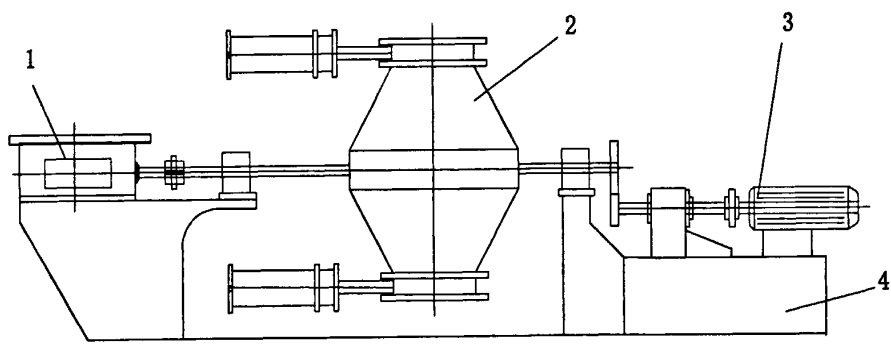


1-转臂拉杆；2-电动机及摆线针轮减速器；
3-加料口；4-螺旋轴；5-卸料伐

图 2.5 螺旋锥形混料机

Fig. 2.5 Screw taper mixer

(2) 双锥型混合机：双锥型混合机是通过回转罐体将各种微细粉混合均匀的混合设备。双锥型混合机适合于混合具有流动性好的干粉物料。如设置套管，还可以对混合物料进行加热和干燥等作业。双锥型混合机由罐体、驱动装置、滑环箱、支撑台和机架组成，容积为 0.5-2.2 m³。其结构见图 2.6：



1-滑箱环；2-罐体；3-驱动装置；4-支撑台架

图 2.6 双锥形混合机结构示意图

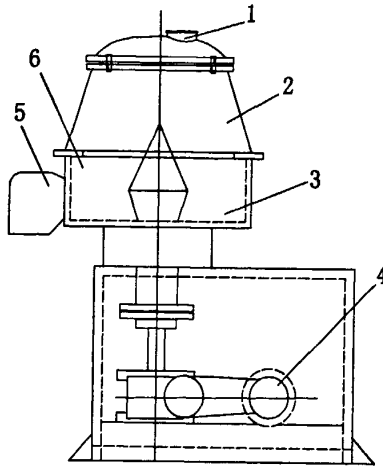
Fig. 2.6 Double screw taper mixer

主要的混练设备：

(1) 行星式强制混合机：行星式强制混合机的中心立轴担有一对悬挂轮行星铲和一对侧括板，盘不转，中心立轴转，带动轮、行星铲和侧括板顺时针转，行星铲又作逆时

转，泥料在三者之间为逆流相对运动，在机内既平运动又被垂直搅拌，5-6min 可得到均匀混而颗粒不破碎。根据工艺需要，可以增添加热装置。该机效率高、能耗低、混合均匀；整机密封好，无粉尘，噪音低，出料迅速、干净。可混合干料、半干料或胶状料。行星式强制混合机适应混合镁质制品等泥料型号有 PZM-750，QHX-250。

(2) 600L 高速混合机：高速混合机由混合槽、旋转叶片、传动装置、出料及冷却、加热装置等部分组成。结构见图 2.7：



1-入料口；2-锥形壳体；3-旋转叶片；
4-传动装置；5-碾盘；6-出料门

图 2.7 600L 高速混合机

Fig. 2.7 600L high speed mixer

混合槽是由空心圆柱形碾盘、锥形壳体和圆球形顶盖等组成的容器。下部碾盘为夹套式结构，由冷却、加热装置向夹套供给冷水或热水，控制物料混合温度。主轴上安装特殊形状的搅拌桨叶，构成旋转叶片。旋转叶片的转速有两种，分别是 60 r/min 和 120r/min，在工作过程中可以变换速度，从而使物料得到充分的混合。传动装置由电动机、皮带轮及减速机组成。电动机为变级调速型式。出料门是安装在混合槽侧面的出料机构，混合好的物料由此排出。开门机构由一套连杆系统组成，由气缸直接带动。冷却、加热装置由冷却水槽、热水槽、冷却和热循环装置等组成。为了保证混合物料的温度，设计了冷、热水量自动调控装置。参与混合的各种原料及结合剂，由上部入料口投入。电动机通过皮带轮、减速机带动旋转叶片旋转，在离心力的作用下，物料沿固定混合槽的锥壁上升，向混合机中心作抛物线运动，同时随旋转叶片作水平回转，处于一种立体旋流状态，对于不同密度、不同种类的物料易于在短时间内混合均匀，混合比率比一般混合机高一倍以上。混合后的物料由混合槽的侧面出料门排出。为适应某些物料混合温度要求，由冷却、加热装置对物料进行冷却、加热和保温等调控，从而获得高质量的混料。高速混合机不破碎泥料颗粒，混合均匀，混料效率高，能控制物料温度，特别适应混合含石墨的耐火泥料。该机已在生产高级含碳耐火材料制品的厂家得到推广^[18]。

以上介绍了生产闭孔膨胀蛭石、膨胀珍珠岩及蛭石珍珠岩复合耐火材料的工艺和设备。通过分级膨胀可以获得结构完整的球形膨胀结构，从而使膨胀材料具有高强度和低比重、低导热系数的特性；两种基本材料与其他成分的复合以形成复合耐火材料的过程与传统不定形耐火材料的生产过程基本相同，即通过预混合、混炼获得成分均匀具备浇注使用条件的轻质耐火混凝土。

2.3 检测方法和设备

2.3.1 检测方法

2.3.1.1 导热系数

导热系数是表征材料传热能力的重要物理参数,是工程材料尤其是窑炉材料的热物理特性之一。在研究和开发新型耐火材料中,各国都很重视导热系数这项技术指标,并在冶金工程材料、建筑中作为选择材料的重要依据之一。所以，准确测定材料的导热系数至关重要^[10]。

导热系数的测定。本实验采用中国标准(GB/T17106-1997)耐火材料导热系数试验方法(平行热线法)测定导热系数。其原理是，试样组件在炉内加热到规定温度，并在此温度下保温，再用沿试样长度方向埋设在试样中的线状电导体(热线)进行局部加热，热线载有已知恒定功率的电流，即在时间上和试块长度方向上功率不变。热电偶安放在离热线规定的位置，且平行于热线(见图 2.8)从接通加热电流的瞬间开始，热电偶便开始测量温升随时间的变化，此温升与时间的函数就是被测试样的导热系数。导热系数计算如公式 2.1 所示：

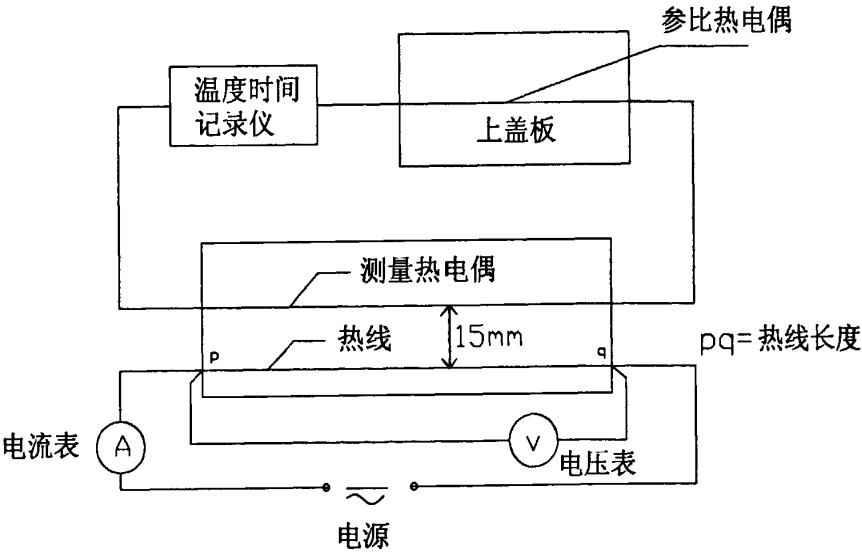


图 2.8 导热率测量示意图

Fig. 2.8 coefficient of thermal conductivity measure scheme

$$\lambda = \frac{VI}{4\pi L} \times \frac{-E_f\left(\frac{-\gamma^2}{4at}\right)}{\Delta\theta(t)} \quad (2.1)$$

式中 λ -导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;

I-电流, A;

V-电压, A;

L-见图 2, 在热线 P, Q 之间的长度, m;

$\Delta\theta(t)$ -在 t 时刻测量热电偶和示差热电偶之间的温差, K;

t-在接通和切断热线回路时的时间差, s;

γ -热线和测量热电偶之间的间距, m;

a-热扩散系数, m^2/s

$-E_f\left(\frac{-\gamma^2}{4at}\right)$ 为 $\int_x^\mu \frac{e^{-\mu}}{\mu} d\mu$ 的指数积分, 确定了 $\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$ 之后, $-E_f\left(\frac{-\gamma^2}{4at}\right)$ 从表中差得, 当 $\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$ 有 1.5~2.4 之间, λ 值认为是准确的。

2.3.1.2 常温耐压强度

本实验试样采用中国标准(GB/Y5072.1-1998)无衬垫仲裁试验方法测定致密定形耐火制品的常温耐压强度。其原理是: 在特定温度下, 对已知尺寸的试样以恒定的加压速度施加负荷直至破碎, 根据试样破碎时所承受的最大压力和平均受压断面的面积计算出试样的常温耐压强度。常温耐压强度计算如公式 2.2 所示:

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{A_0} \quad (2.2)$$

σ -试样的常温耐压强度, N/mm^2 ;

$F_{\max}$ -记录的最大荷载, N;

A_0 -试样受压面初始端面积, mm^2 。

2.3.2 检测设备

导热系数测定仪: 采用中国标准(GB/T17106-1997)测量试样导热系数的设备。室温下测量试样抗压强度的设备: LJ500 型拉力试验机, 测量范围: 0-5000N^[10]。

2.4 蛭石珍珠岩复合耐火材料的成分及热工指标

复合材料具有了其单一成分都不具有的优越性能。

2.4.1 组成成分

蛭石珍珠岩复合耐火材料是以膨胀蛭石膨胀珍珠岩为主要成分, 配合其他原料来适

应对制品性能的要求,这种计算出来的各种原料配合比例关系称为配方,配制的工艺过程成为配料。

(1)选材“珍珠岩”、“蛭石”选用强度比较高的原料在膨化后自然形成的颗粒结构作为粒状料。根据制造工艺,除劣去杂后完全使用的“珍珠岩”、“蛭石”根据工艺需要的颗粒球体,进行热混,依靠无机结合剂、无机填充料,让珍珠岩与蛭石球状体依靠机械外力作用包容为一体,达到并制成单一的复合型球体,然后二者重热混掺入有机纤维,达到并制成复合型多层复合体。

(2)选材无机填充料及无机、有机结合剂。浇注料中的填充料(粉状料),对实现瘠性料的紧密堆积,避免粒度偏析,保证混合料的流动性,提高浇注料的致密性与结合强度,保证其体积稳定性,促进其在服役中的烧结和提高其耐侵蚀性都是及其重要的,因此,粉状料的质量必须得到保证。结合剂是浇注料中不可缺少的重要组分。由于不定形耐火材料在使用前未经高温烧结,瘠性物料之间无普通烧结制品所具有的那种陶瓷结合或直接结合,只有靠结合剂的作用,才可以使其粘接为整体,并使构筑物或制品具有一定的强度。不定形耐火材料结合剂根据化学成分分为无机结合剂和有机结合剂。

无机填充料:采用高铝熟料粉。①耐火度 $>1790^{\circ}\text{C}$;②使用温度 $>1400-1500^{\circ}\text{C}$;③密度在1.8-2.2,1#、2#无机填充料在不同制球工艺中使用。无机结合剂:采用水硬性结合剂,拟采用铝酸盐结合剂(铝酸盐水泥类)。是一种中性材质,在工艺制作过程中使之发生反应,依靠有机纤维的机理,复合“蛭石”与复合“珍珠岩”在低中温度反应达到其使用时所需要的强度大于20Mpa。有机结合剂:拟采用纸浆废液,树脂等,使用有机纤维粘接“珍珠岩”、“蛭石”的复合体的目的使二者的闭口气孔不被制造工艺外力所破坏,还能在高温使用过程中产生一定的气孔,这样才能保证多层复合型壳体的绝热保温能力,使之有效地发挥更大的绝热效果。多层复合型壳体制品的导热率在热面 800°C 时小于 $0.1-0.11\text{w/m}\cdot\text{k}^{[15]}$ 。

2.4.2 热工指标

鉴于以上两种材料的性能基本一样,依靠二者自身的低导热系数,蛭石珍珠岩通过二次加工成球体后形成了封闭式的闭口气孔,再多次配混成球体,外加无机填充料使之主要性能达到:(1)提高自身强度,用二种以上互补性能非常好的材料相互渗透及粘结,压缩25%后的强度应 $>15-20\text{Mpa}$ 。多层复合型壳体绝热材料必须在使用过程中抗机械,抗静压能力强,保温强度及柔性的抗折力 $>1-2\text{Mpa}$,提高复合壳体的强度;(2)保持低的导热率,导热系数应在 $<0.03-0.05\text{w/m}\cdot\text{k}$;(3)增加增强耐火度的熔点 $>1790^{\circ}\text{C}$,提高强度后的使用温度 $\geq 1450^{\circ}\text{C}$ 。研究开发此类型的多层壳体复合型耐高温绝热材料才能运用在高温炉窑的隔热层及永久衬^[15]。

蛭石珍珠岩及其膨胀产品是隔热耐火材料中性能较好者,具有低比重,低导热系数的突出优点,但使用温度和高温强度尚显不足,通过两者的复合及添加成分的加入可以

达到大幅度提高使用温度和高温强度的目标,获得膨胀蛭石或膨胀珍珠岩单一成分都不具有的优良性能。实现复合材料性能的研发的方向:低导热率、低比重通过控制蛭石、珍珠岩的膨胀实现;复合材料高温强度和耐火度的大幅提升,通过控制膨胀,无机填料、无机结合剂、有机纤维的加入实现^[15]。

2.4.3 复合材料的优越性

复合材料具有了其单一成分都不具有的优越性能:从其生产成本来看,纯的蛭石成本高于珍珠岩成本的 50%,总体利用成本才是其它材料的 70%;从其物理性能来看二者有很好的互补性,蛭石制品的脆性及使用性较差,珍珠岩有它的韧性和较高的使用温度;从性质上都属于硅酸盐类矿物无机非金属材料属层状结构进行膨化后而使用,都能实应于无机、有机结合剂的构成体;其耐火度都较低,吸水性特大,必须在试制时首先用憎水剂浸泡来减少吸水性及吸湿性;需提高使用温度,因为其自身的使用温度都在 1000℃ 以下。

在非金属矿物类中二者是最好的绝热材料,从国内外来看对二者的使用都是单一的使用,没有二者混合成壳体层状结构,并且加上无机填充料之后在高温区域就能代替高能耗高成本的其它保温材料。取材方便,我国有着丰富的资源优势,二者材料均分布在全国十多个省。开发此材料的综合利用无环境污染,强度又高,耐酸碱性能好,耐冲刷,使 Si、Al、Mg 形成单元三位一体绝热材料。在高温使用范围内所产生的绝热性能达到耐火、绝热、阶梯式的绝热效果。可应于多种工业窑炉,打破了过去单一的使用温度所限制的小范围中低温炉窑及管道。研究开发生产应用此产品,可就地取材,低成本高效益、在其它产品的基础上能下降成本结构的 20%,带来了社会经济效益^[15]。

2.5 本章小结

蛭石珍珠岩复合耐火材料属于半硅质轻质不定形耐火材料,蛭石、珍珠岩均属于酸性玻璃质岩,均通过加热得到膨胀产品。膨胀蛭石的容重为 0.08-0.3t/m³,导热系数 0.047-0.07w/(m·k);膨胀珍珠岩的容重为 0.07-0.25t/m³,导热系数 0.047-0.072w/(m·k)。复合耐火材料导热系数<0.1w/m·k,抗压强度应>15-20Mpa,抗折强度>1-2Mpa。复合耐火材料生产工艺重点是控制加热膨胀过程形成微观球形结构和控制混炼过程形成宏观包覆结构。复合材料具有其单一成分都不具有的优越性能^[15]。

第三章 复合耐火材料的晶相分析及在钢包上应用的热力学分析

3.1 耐火材料分析

3.1.1 Al₂O₃-SiO₂ 系相图

相图又称状态图，相图可以指出某组成系统，在指定条件下达到平衡时系统中存在的相数目和每个相的组成及其相对数量。Al₂O₃-SiO₂ 系相图是硅酸铝质耐火材料工艺的基础。相图的最大价值是它可以确定在给定的温度下的平衡系统的组元，指出存在什么相以及其组成和数量。有些均匀体系的熔融耐火材料熔蚀反应形成的段带的相组合关系，都可以用相应的多元系相图予以解释，并据其分析过程的机制^[9]。

Al₂O₃-SiO₂ 系耐火材料是品种最多的一个耐火材料系统,按所用原料和工艺的不同,可以形成多种显微结构类型。Al₂O₃-SiO₂ 系耐火材料应用范围广泛,工艺参数可变化范围也很广。以上各种原料都可以按需要任意组合和配比,因此可以生产出类型繁多的、性能各异的制品,该系耐火材料的主晶相是莫来石。莫来石的生成反应和它在材料中的分布特征,是控制显微结构的关键因素。

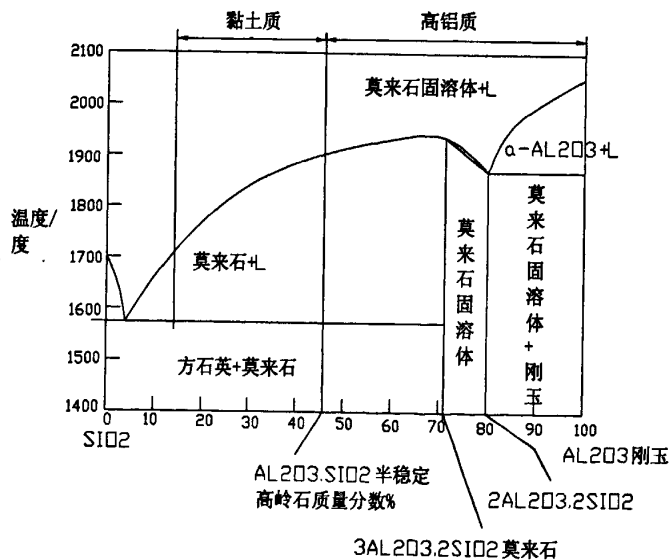


图 3.1 AL₂O₃-SiO₂ 系状态图

Fig. 3.1 AL₂O₃-SiO₂ series graph

相图是用几何图形的方法来描述多相平衡体系中各聚集状态与它们所处条件即影响因素（温度、压力和组成等）的关系的，因此通过相图的分析，可以找出体系中物质

各聚集状态与其影响因素之间的关系以及各影响因素之间的关系。

对于二元相图, 根据相率, 最大自由度是 3, 所以二组分体系应以压力, 温度, 组成三度空间的相图来描述。但若考虑在恒压或恒温的情况下, 体系状态可以简化为用 T-X 平面图来描述。二元体系相图的基本特征和相图分析的一些共同规律: (1) 二组分能互溶成液态或固态溶液的部分便是单相区。(2) 二相区总是至少有两条相线所围成或处于单相区之间。(3) 与纯组分的固相线相邻的区域必含有该组分的固相。(4) 二组分体系相图中, 只有纯组分的单相线而无纯组分的单相区, 凡是垂直线都可以看成为单组分纯物质。(5) 凡是曲线都是二相平衡线, 线上的一点表示一个平衡线的状态, 与之平衡的另一相的状态, 有另一条平衡线上的水平对应点表示^[35]。

3.1.2 莫来石

3.1.2.1 莫来石的物化性质及晶体形貌

莫来石是 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系中在标准大气压下从室温到高温唯一稳定的晶相, 其化学成分在 $3 \text{ Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2\text{-}2\text{Al}_{203} \cdot \text{SiO}_2$ 范围内, 也有报道存在 Al_2O_3 含量更高的莫来石, 即 $3 \text{ Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 。关于莫来石是否为一致熔化合物的问题, 一直是近几年来各研究工作者争论的焦点。莫来石为斜方晶系, 晶体中硅铝氧结构是由 SiO_4 四面体连接成的双链, 连接一条条双链的是六配位的铝离子。由于莫来石的结构为双链状排列, 故它的晶体一般呈针状、柱状结构, 在一些高铝质, 特别是电熔莫来石中可形成密集交错的针状莫来石结晶网。莫来石中 Al^{3+} 及 Si^{4+} 的半径小且电价高, 因静电引力的作用, 其迁移势垒很高, 晶格扩散困难, 所以纯莫来石的烧结温度很高, 也正是因晶格扩散困难使其高温抗蠕变性极优。由于莫来石晶格质点结合力强, 迁移势垒高, 纯莫来石膨胀系数较小, 一般在 $5.2\text{-}5.6 \times 10^{-6} \text{ m}/^\circ\text{C}$ ^[35]。

莫来石的密度为 $3.16\text{-}3.22 \text{ g}/\text{cm}^3$, 摩尔质量为 425.94。莫来石的晶格常数随 Al_2O_3 含量的不同而变化, 而莫来石晶体的形貌似乎一般与成分无关, 为针、柱状晶形, 但有文章报道说: 当采用无液相烧结方式制备莫来石时形成了块状结构, 而针、柱状晶体多与液相同时出现; 文献指出 Al_2O_3 含量较低时(约 68-72%)的莫来石陶瓷中莫来石为大片状结晶和针状结晶, Al_2O_3 含量高的(37.8%)莫来石形成尺寸较小的大体上为等轴晶形的结晶, 即为粒状结晶, 且前者经常产生粘性较低的熔融物包裹莫来石晶体, 也即为针状莫来石经常在液相下形成; 而有文献则进一步说明 40% SiO_2 , 即 Al_2O_3 为 60%的莫来石具有针柱状结构, 特别适用于抗热震性要求高的部位。可见莫来石的结晶状态随其 Al_2O_3 含量的不同而变化。

莫来石材料由于其优越的性能, 耐火度高、热震稳定性好、热膨胀系数低、高温抗蠕变性好、具有很高的耐磨性及耐剥落、耐侵蚀性等, 其应用极其广泛。但天然存在的莫来石矿物很少, 一般多采用人工合成的莫来石原料。莫来石基耐火材料的发展近况: 莫来石基耐火材料由于其优良的性能而广泛应用于冶金、建材、石油化工、电子机械等

各部门。例如人们利用莫来石良好的耐磨性、耐腐蚀性而将其作为连铸用水口砖以及莫来石-氧化铝质滑板。

莫来石可作为大部分耐火材料和结构陶瓷的结合相。有文献指出,用共沉淀法及其它新的化学方法制取莫来石前驱体,这些前质体有助于降低烧结温度。烧结法和电熔法合成的莫来石可用于玻璃和熔炼铁、铜、铝等金属熔炉的内衬材料或用作高铝砖的原料和不定形耐火材料的骨料。莫来石可与许多材料复合制成性能优越的复相材料,例如,莫来石可与刚玉复合,在莫来石:刚玉为 75:25 或 25:75 时,材料的高温力学性能、高温抗蠕变性能均优于单相材料,莫来石:刚玉为 75:25 时,莫来石为柱状晶体交织网络,粒状刚玉填充于网络空隙;莫来石:刚玉为 25:75 时,粒状刚玉堆积成骨架结构,莫来石柱状结晶穿插于骨架之间,结构紧密。不同的应用场合对材料性能的要求不同,同一种材质的制品应用于不同部位效果亦不一样。例如电熔莫来石砖机械强度高、荷重软化温度高、密度大、气孔率小、结晶含量多,已成功用于玻璃窑中温度低于 1450℃ 区域的砌体,但这类制品与大量碱类物质接触时莫来石不稳定,在使用温度 1400-1450℃ 会分解成刚玉和熔融的玻璃相;又比如纯刚玉材料具有高的耐火度和化学稳定性,用于筑造直接接触火焰的工作温度可达 1800℃ 的高温窑炉中效果很好,但其抗热震性不够好,用作窑具材料则很不理想。正是由于上述原因,目前对莫来石质材料的研究不再单纯追求其纯度高和高性能,而是根据不同的情况对含有一定量杂质的莫来石材料也加以利用。

大量的研究表明,莫来石的性能随其 Al_2O_3 含量的波动而不同。就抗热震性、抗蠕变性来说, Al_2O_3 含量在 72% 左右的,即在 $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ 附近的莫来石性能较优,与刚玉复合后这些性能得到改善和提高;但就抗热震性来说 Al_2O_3 含量在 60% 左右的,即在 $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ 附近的莫来石质(硅线石)材料性能较优; Al_2O_3 含量在 85% 左右的莫来石-刚玉材料也具有较好的抗热震性。这些研究对于有效地利用莫来石基材料具有重要的参考价值。

莫来石在玻璃相参与下具有针、柱状结构,材料抗热震性优良,这实际上是一种莫来石-玻璃复相材料,属于热膨胀系数存在差异的一类,并且日益得到人们的重视。这种材料中莫来石结晶为针、柱状交织网络结合,故材料强度高,而玻璃相可缓冲晶粒各向异性造成的应力集中,因而这是一种优越的显微结构^[35]。

3.1.2.2 莫来石显微结构

无机非金属材料的显微结构分析已经有百余年的历史,早年的分析工作是沿袭了岩相学的原理和方法,在光学和电子显微镜下分辨出的试样中所含有相的种类及各相的数量、形状、大小、分布取向和它们相互之间的关系称为显微结构。材料显微结构是材料内部各种物理化学过程所产生的结果在空间结构上的表现,因此,不同的物料化学过程,如耐火材料常涉及的热分解反应、氧化反应、相变过程、烧结过程以及熔渣侵蚀等都可以使材料产生各不相同的显微结构^[34]。

耐火材料显微结构包括气孔、玻璃相和结晶相的形态、空间分布和相互结合状态等。

根据热力学相平衡原理可以初步确定显微结构的物相组成和它们的形成过程。图 3.2 是两种莫来石材料的显微结构

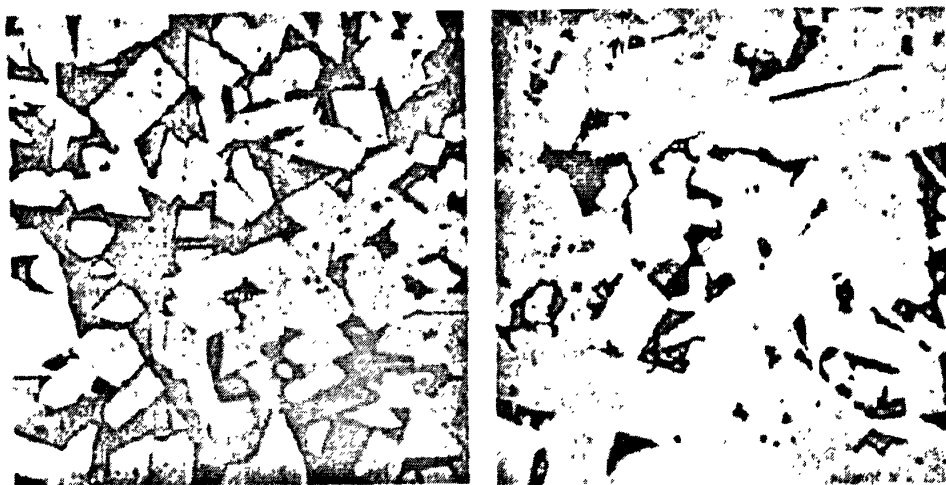


图 3.2 两种莫来石材料的显微结构

Fig.3.2 Microstructure of two kinds of mullite

前者的莫来石晶相多为玻璃相所包围，莫来石晶体之间较少有直接结合形式，而后者的玻璃相明显减少，主要为莫来石晶体间的直接结合。材料的化学矿物组成决定了其化学性质和主要物理性能，然而对于陶瓷和耐火材料，物相之间的结合状态对其性能，尤其是高温力学性能将产生直接影响。物相之间的结合方式有晶相与晶相的直接结合、晶相通过玻璃相或气孔连接等^[34]。

3.2 钢包热力学解析分析

钢包温度场和温度应力的解析计算。

3.2.1 钢包温度场计算的基本理论

经研究测试表明钢包在整个工艺过程中温度的变化幅度不大，在某一瞬时整个钢包的温度分布可以看成是轴对称的，在浇注回转台上，可以认为钢包的温度变化是趋于平衡状态的。基于这个假设，本章采用了轴对称的传热模型和双层法理论公式分别对不同结构尺寸、不同材料参数的钢包温度和温度应力进行了计算^[31]。

钢包温度计算的基本理论。采用轴对称模型的传热计算方法是把整个钢包看作成一个圆桶，钢包壳的传热主要是以对流和热辐射进行的。在计算时，把工作层、安全层、隔热层、钢壳这四层壁看作是一维稳态的温度场，周围环境温度按 30°C 计算，钢包内衬热面的温度按钢水的温度 1550°C 计算，不考虑钢水在靠近工作层附近的热分层现象。传热模型如下图 3.3 所示^[29]。

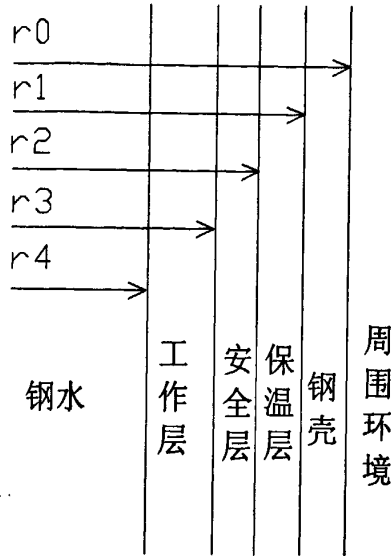


图 3.3 钢包传热模型图

Fig. 3.3 Ladle furnace heat transmission model graph

钢包传热模型图中， r_0 ， r_1 ， r_2 ， r_3 ， r_4 分别是钢包壳、保温层、安全层和工作层的半径，对应图 3.3 中 r_0 - r_4 相应位置的温度分别是 T_0, T_1, T_2, T_3, T_4 ，钢包壳、保温层、安全层和工作层的热导率分别是 k_w/h ，平衡状态时， L 长度的圆桶断面上的热流量为 Q ：

$$Q = \frac{2\pi KL(T_x - T_y)}{\ln\left(\frac{r_y}{r_x}\right)} \quad (3.1)$$

其中：

Q ：平衡状态时的热通量；

K ：断面的热导率；

r_x ： x 位置上的半径；

T_x ： x 位置上的平衡状态时的温度；

r_y ： y 位置上的半径；

T_y ： y 位置上的平衡状态时的温度

该断面的热阻如下式所示：

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_y}{r_x}\right)}{2\pi KL} \quad (3.2)$$

如果采用图 3.3 所示的耐火材料结构中的 4 个连续的热阻来表示，则总的热阻可以用下式表示出来：

$$R = \frac{1}{2\pi L} \left[\frac{\ln(\frac{r_0}{r_1})}{K_1} + \frac{\ln(\frac{r_1}{r_2})}{K_2} + \frac{\ln(\frac{r_2}{r_3})}{K_3} + \frac{\ln(\frac{r_3}{r_4})}{K_4} + \frac{1}{a} \right] \quad (3.3)$$

其中：

K_1 -钢包壳材料的导热率；

K_2 -保温层耐火材料的导热率；

K_3 -安全层耐火材料的导热率；

K_4 -工作层耐火材料的导热率；

a -考虑包壳辐射和对流的综合换热系数，取 $9.01 \text{ w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 。

如果上式中的任何一个热阻不使用，比如没有保温层，那么把相应的内外半径，比如 r_2 和 r_1 的值，调整到相同的值以减小热阻。计算时耐火材料的热导率由图 3.4 给出：

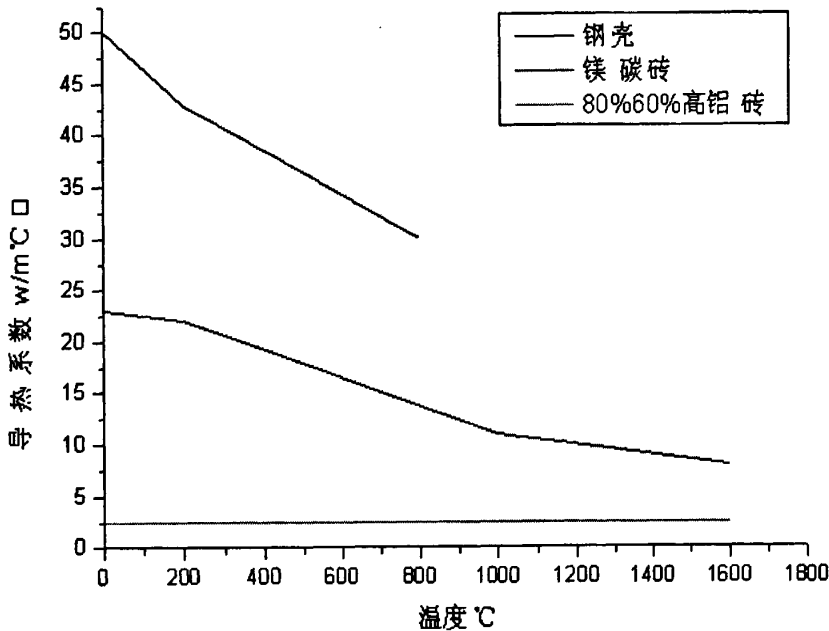


图 3.4 包壳和耐火材料的导热率

Fig. 3.4 Coefficient of thermal conduction of ladle furnace shell and refractory

求出单位长度上的热通量后，可以用下面的公式 3.4 计算各个交界面上和钢包壳表面的温度值，这里只给出包壳的温度计算公式，对于包衬内交界面上的温度值，只要去掉不相关的热阻项即可算出相应的温度值。

$$T_0 = T_4 - Q \left[\frac{\ln(\frac{r_0}{r_1})}{K_1} + \frac{\ln(\frac{r_1}{r_2})}{K_2} + \frac{\ln(\frac{r_2}{r_3})}{K_3} + \frac{\ln(\frac{r_3}{r_4})}{K_4} \right] \quad (3.4)$$

式中：Q 为通过钢包侧壁的热流量，单位为 W/m²。

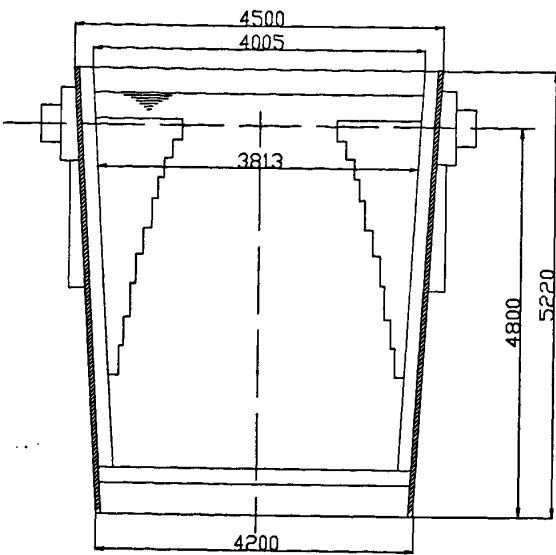


图 3.5 300 吨钢包结构图

Fig. 3.5 300t ladle furnace structure plan

计算时钢包壳和耐火材料的物性参数和几何参数由下表 3.1 给出：

表 3.1 钢包壳和耐火材料的物性参数和几何参数

Table 3.1Physical and geometry parameter of ladle furnace shell and refractory			
几何参数 (mm)	导热系数 λ (W/m·℃)	T_4 (℃)	T 空气 (℃)
图 3.5	图 3.4	1550	30

3.2.2 钢包热应力场计算的基本理论

各国的工程师们都进行过用以定量估算热负荷引起的包壳与耐火衬应力的公式推导，但是所用的方法要么过于复杂，不方便计算，要么推导过程中的假设和模拟方式太理想化。因此，急需有一种简化方法，既能采用切合实际的假设进行模拟，又能快速而准确地确定出耐火衬和包壳的应力值，从而计算出不同类型耐火材料与厚度对钢包温度应力产生的影响、耐火砖的膨胀对钢部件应力的影响、以及对钢包使用寿命的影响。正是在这种情况下，美国的学者 MiletLWei 推导了单层法和双层法计算公式，用于计算钢包的温度应力，本文只介绍双层法^[29]。

双层法的基本理论：钢包包衬通常由工作衬和安全衬组成，这两层包衬的耐材类型不同，可以用双层法来提高钢包应力计算的精度。双层法建立在以下概念上：在两个界面之间，一个是工作层与安全层的界面，另一个是安全层与钢壳的界面，各加入一个间隙。下面是计算两个砖层之间以及衬砖与包壳之间的相互作用的公式。图 3.6 所示是双层法的计算简图。

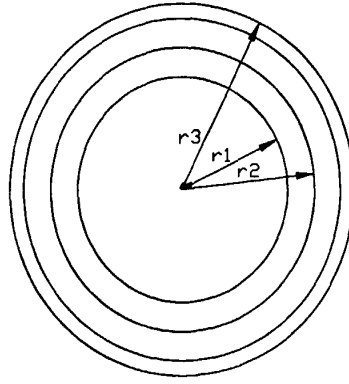


图 3.6 双层法示意图

Fig. 3.6 Double layers method schematic

钢包壳上的最大应力发生在钢包预热期间，其应力值可用如下公式来计算：

$$\sigma_s = \frac{p_3 r_3}{t_s} \quad (3.5)$$

工作衬的应力可以用如下公式来计算：

$$\sigma_{b1} = \frac{-2p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \quad (3.6)$$

安全衬的作用压力可由如下公式来计算：

$$\sigma_{b2} = \frac{p_2(r_3^2 + r_2^2) - 2p_3 r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} \quad (3.7)$$

工作衬与安全衬之间的相互作用压力可以用如下公式来计算：

$$p_2 = \left(\frac{C}{B} + \frac{G}{F} \right) / \left(\frac{A}{B} - \frac{D}{F} \right) \quad (3.8)$$

安全衬与钢包壳之间相互作用压力由如下公式来计算：

$$p_3 = \left(\frac{C}{A} + \frac{G}{D} \right) / \left(\frac{F}{D} - \frac{B}{A} \right) \quad (3.9)$$

其中：

$$A = \frac{r_2}{E_{b1}} \left(\frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} - \nu_{b1} \right) + \frac{r_2}{E_{b2}} \left(\frac{r_3^2 + r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} - \nu_{b2} \right) \quad (3.10)$$

$$B = \frac{2r_2 r_3^2}{(r_3^2 - r_2^2) E_{b2}} \quad (3.11)$$

$$C = 1/2 [a_{b1} \Delta T_{b1} (r_1 + r_2) - a_{b2} \Delta T_{b2} (r_2 + r_3)] - g_1 \quad (3.12)$$

$$D = \frac{2r_2^2 r_3}{(r_3^2 - r_2^2) E_{b2}} \quad (3.13)$$

$$F = \frac{r_3}{E_{b2}} \left(\frac{r_3^2 + r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} - \nu_{b2} \right) + \frac{r_3}{E_s} \left(\frac{r_3}{t_s} + \nu_s \right) \quad (3.14)$$

$$G = 1/2 [a_{b2} \Delta T_{b2} (r_2 + r_3) - a_s \Delta T_s r_3] - g_2 \quad (3.15)$$

式中:

a_{b1} -工作层的热膨胀系数, 英寸/°C;

a_{b2} -安全层的热膨胀系数, 英寸/°C;

ΔT_s -钢包壳温度增量, °C;

ΔT_{b1} -工作衬的温度增量, °C;

ΔT_{b2} -安全衬温度增量, °C;

E_s -钢的弹性模量, 磅/平方英寸;

E_{b1} -工作衬的弹性模量, 磅/平方英寸;

E_{b2} -安全衬的弹性模量, 磅/平方英寸;

ν_s -钢的泊松比;

ν_{b1} -工作衬的泊松比;

ν_{b2} -安全衬的泊松比;

σ_s -砖衬膨胀引起的包壳应力, 磅/平方英寸;

σ_{b1} -砖衬膨胀引起的工作衬的应力, 磅/平方英寸;

σ_{b2} -耐火衬膨胀引起的安全衬的应力, 磅/平方英寸;

g_1 -工作衬与安全衬界面上的经验等效间隙, 为 0.0375% 界面半径 r_2 , 英寸;

g_2 -钢壳上的等效间隙, 为 0.075%, 英寸;

g -总的等效间隙, 英寸;

p_2 -工作衬与安全衬之间的相互作用压力, 磅/平方英寸;

p_3 -安全衬与包壳之间的相互作用压力, 磅/平方英寸;

t_s -钢包壳厚度, 英寸;

a_s -钢的热膨胀系数, 英寸/°C;

r_1 -工作层的内径, 英寸;

r_2 -工作层的外径, 英寸;

r_3 -安全层的外径, 英寸

3.2.3 钢包的几何参数的选取

双层法计算涉及到的钢包几何参数有: 安全层的外半径 R_3 , 工作层的外半径 R_2 , 工作层的内半径 R_1 , 钢包壳的厚度 T , 工作层的厚度 T_{b1} , 安全层的厚度 T_{b2} , 以上钢包的几何参数可由图 3.6 确定。计算中用到的工作层与安全层的间隙及钢包壳与安全层的

间隙是双层法中的一个很重要的参数，其值按双层法中给出的公式计算^[29]。

3.2.4 钢包材料物化参数的选取

单层法和双层法涉及到的物化参数有钢包壳钢板、安全层、工作层的弹性模量、热膨胀系数以及泊松比。如图 3.7、图 3.8 所示，耐火材料的弹性模量、热膨胀系数以及泊松比都是温度的函数，而钢包由于耐火材料的种类和结构不同，造成了在不同的高度上，沿钢包侧壁的温度分布不尽相同。

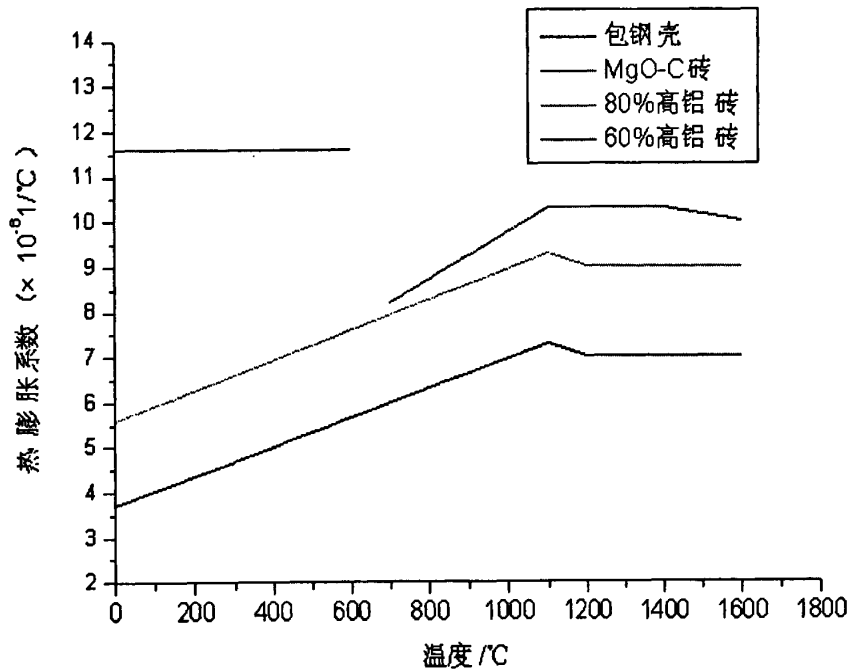


图 3.7 包壳材料和包壳砖的热膨胀曲线

Fig. 3.7 Ladle furnace shell and refractory heat expansion curve

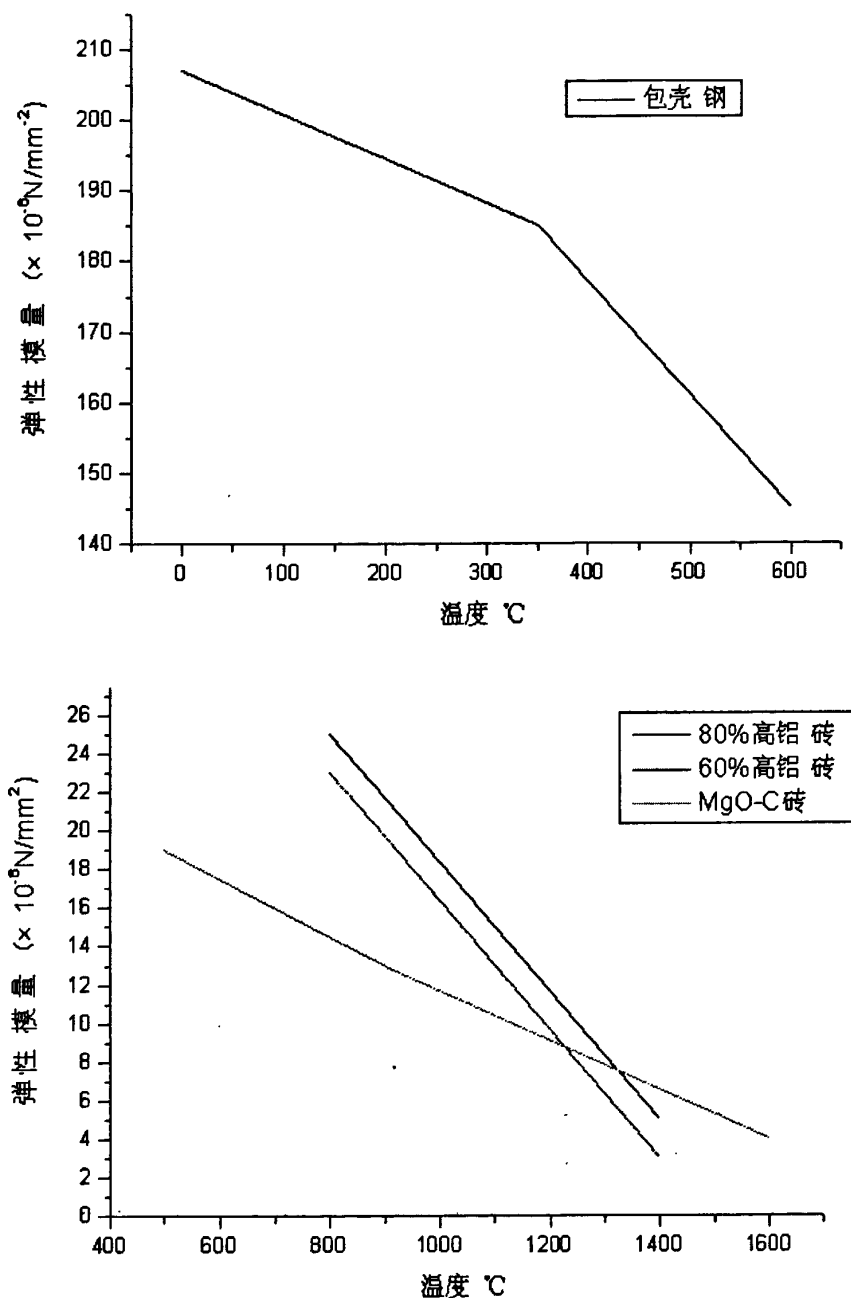


图 3.8 包壳材料和包衬砖的弹性模量曲线

Fig. 3.8 Modulus of elasticity curve of ladle furnace shell and refractory

计算时,考虑到温度分布的这种特殊性,采取了以下措施:首先计算出指定高度上钢包侧壁的径向温度分布;其次根据这一高度侧壁的温度分布确定耐火材料的物化参数;最后代入公式计算。在根据温度选取物化参数时,要用到耐火材料的定性温度,这里假设温度在每一种耐火材料内部是线性分布的,把每种耐火材料中间点的温度作为这种耐火材料的定性温度,进行物化参数的选取。

3.2.5 计算温度的选取

本文计算时，不考虑钢包内部钢水靠近工作层热面区域的热分层现象，把工作层内表面的温度取钢液温度值为 1550℃，周围环境的温度为 30℃。在给定高度的侧壁上，温度是应用轴对称传热模型进行计算所求得^[29]。

表 3.2 应力分析使用的有限元参数

Table3.2 Finite element parameter of stress analysis

	质量密度 (g/mm³)	弹性模量 (1/℃)	热膨胀系数 (1/℃)	泊松比
MgO-C 砖	2.83e-6	图 3.8	图 3.7	0.30
80%高铝砖	2.60e-6			0.17
60%高铝砖	2.50e-6			0.17
包 壳	7.64e-6			0.17

3.3 有限元法及 ANSYS 介绍

3.3.1 有限元法

有限单元法是用分块(单元)构造单元的逼近函数(含有若干个结点基本未知量)，去计算每个单元的能量泛函，而后通过集合得到整体结构的能量泛函，由能量泛函极小条件导出的是求解结点基本未知量的代数方程。

有限单元法具有很多优点，主要有以下几点：(1)理论基础简明，物理概念清晰，并且可在不同的水平上建立起对该法的理解。既可通过直观的物理途径来学习和运用这一方法，也可以为该法建立严格的数学模型。(2)具有灵活性和适用性，应用范围极为广泛。它不仅能成功的处理如应力分析中的非均匀材料、各向异性材、非线性应力应变关系以及复杂的边界条件等难题，且随着其理论基础和方法的逐步完善，还能成功的用来求解如热传导、流体力学及电磁场领域的许多问题。(3)该法在具体推导运算中，广泛采用了矩阵方法。矩阵代数能把繁冗的分析和运算用矩阵符号表示成非常紧凑简明的数学形式，因而最适合于电子计算机的存贮，便于实现程序设计的自动化^[12]。

因此，本课题采用有限单元法解决钢包高温复合衬结构热行为问题。

3.3.2 ANSYS 介绍

ANSYS 程序是进行热和结构分析的好工具，它在钢包上的应用非常广泛。以钢包二维截面为研究对象，讨论温度工况下钢包耐火材料物性参数和不同的工作层厚度对包壁温度场分布的影响，为钢包设计提供一些依据。

软件主要包括三个部分：前处理模块，分析计算模块和后处理模块。前处理模块提

供了一个强大的实体建模及网格划分工具,用户可以方便地构造有限元模型;ANSYS 的前处理模块主要有两部分内容:实体建模和网格划分。

(1)实体建模:ANSYS 程序提供了两种实体建模方法:自顶向下与自底向上。自顶向下进行实体建模时,用户定义一个模型的最高级图元,如球、棱柱,称为基元,程序则自动定义相关的面、线及关键点。用户利用这些高级图元直接构造几何模型,如二维的圆和矩形以及三维的块、球、锥和柱。无论使用自顶向下还是自底向上方法建模,用户均能使用布尔运算来组合数据集,从而“雕塑出”一个实体模型。ANSYS 程序提供了完整的布尔运算,诸如相加、相减、相交、分割、粘结和重叠。在创建复杂实体模型时,对线、面、体、基元的布尔操作能减少相当可观的建模工作量。ANSYS 程序还提供了拖拉、延伸、旋转、移动、延伸和拷贝实体模型图元的功能。附加的功能还包括圆弧构造、切线构造、通过拖拉与旋转生成面和体、线与面的自动相交运算、自动倒角生成、用于网格划分的硬点的建立、移动、拷贝和删除。自底向上进行实体建模时,用户从最低级的图元向上构造模型,即用户首先定义关键点,然后依次是相关的线、面、体。

(2)网格划分:ANSYS 程序提供了使用便捷、高质量的对 CAD 模型进行网格划分的功能。包括四种网格划分方法:延伸划分、映像划分、自由划分和自适应划分。延伸网格划分可将一个二维网格延伸成一个三维网格。映像网格划分允许用户将几何模型分解成简单的几部分,然后选择合适的单元属性和网格控制,生成映像网格。ANSYS 程序的自由网格划分器功能是十分强大的,可对复杂模型直接划分,避免了用户对各个部分分别划分然后进行组装时各部分网格不匹配带来的麻烦。自适应网格划分是在生成了具有边界条件的实体模型以后,用户指示程序自动地生成有限元网格,分析、估计网格的离散误差,然后重新定义网格大小,再次分析计算、估计网格的离散误差,直至误差低于用户定义的值或达到用户定义的求解次数。

(3)分析计算模块:分析计算模块包括结构分析(可进行线性分析、非线性分析和高度非线性分析)、流体动力学分析、电磁场分析、声场分析、压电分析以及多物理场的耦合分析,可模拟多种物理介质的相互作用,具有灵敏度分析及优化分析能力;

(4)后处理模块:后处理模块可将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流迹显示、立体切片显示、透明及半透明显示(可看到结构内部)等图形方式显示出来,也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。

软件提供了 100 种以上的单元类型,用来模拟工程中的各种结构和材料。该软件有多种不同版本,可以运行在从个人机到大型机的多种计算机设备上,如 PC, SGI, HP, SUN, DEC, IBM, CRAY 等。目前最新版本 ANSYS 10.0^[14]。

3.4 模拟条件

3.4.1 有限元模型

有限元模型的假设条件：钢包组成材料为各向同性均质材料，不考虑不同材质层间接缝的影响；热应力场模拟仅做永久层的温度应力分析，不考虑工作层、钢壳对永久层的作用力。

钢包由钢包壳和耐火材料两部分组成，钢包壳的基本结构是一个回转的桶形容器，耐火材料紧靠钢包壳的内壁进行砌筑（浇注），通常由工作层、永久层和上、下渣线组成，整个钢包的形状如图 3.9 所示，其原型为宝钢 300t 钢包。

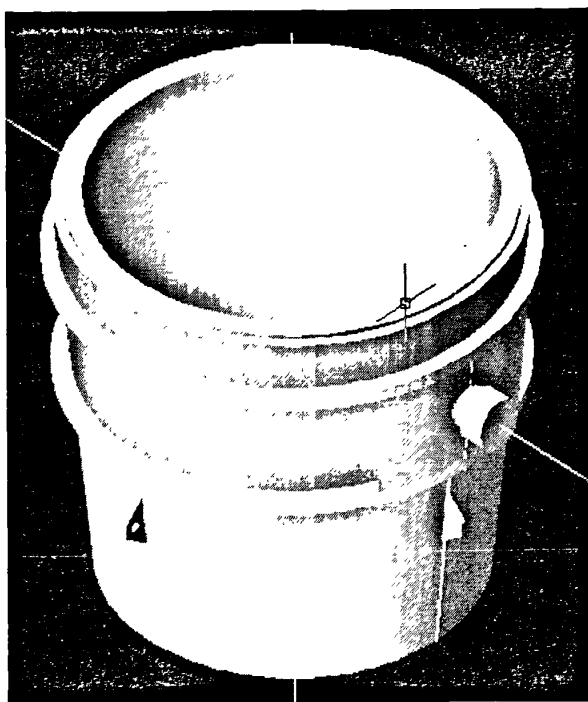
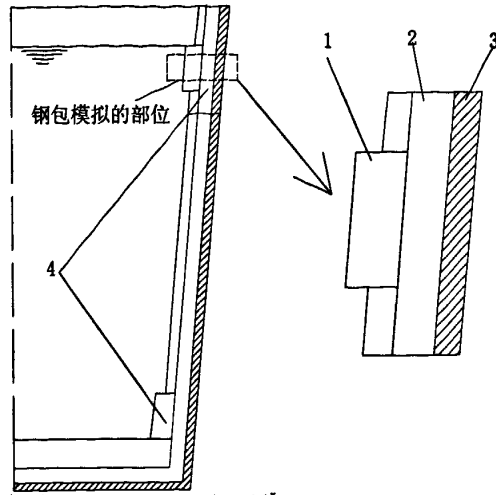


图 3.9 钢包三维几何模型

Fig. 3.9 Three-dimensional geometric model of ladle furnace

本课题重点探讨新型蛭石珍珠岩复合耐火材料在钢包等炼钢设备上应用的可行性及对设备的影响，故此只对钢包耐火材料工作条件较复杂的上部渣线 200mm 高的环形带进行二维模拟，蛭石珍珠岩复合耐火材料若能在此部位应用则也能在钢包其他部位上应用。有限元模型模拟位置如图 3.9 所示。



1. 镁碳砖 2. 永久层 3. 钢包壳 4. 上下渣线

图 3.9 钢包模拟部位示意图

Fig. 3.9 Simulation site of ladle furnace

所模拟部位的结构形式及几何尺寸如图 3.10、图 3.5 所示。其中包壁内半径取 2m。

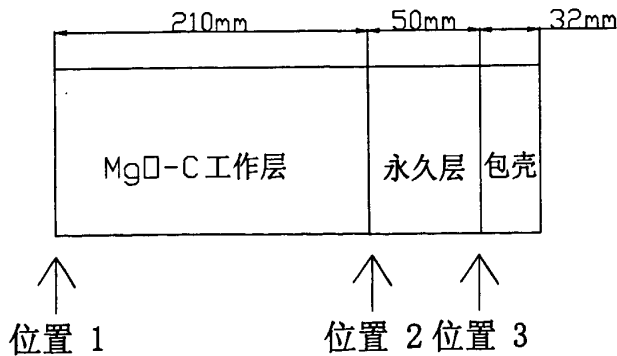


图 3.10 宝钢 300 吨钢包包壁示意图

Fig. 3.10 Schematic of 300t ladle furnace shell of Bao Steel

3.4.2 物性参数

用有限元模拟钢包温度场时，物化参数的选取非常重要，它直接影响到钢包温度场计算的准确性。在有限元温度场的模拟中，涉及到的物化参数主要为材料的导热系数；在热应力场模拟中涉及到的物化参数主要有材料的弹性模量、泊松比、线膨胀系数和导热系数。不同的材料上述物化参数的差别较大，同一种材料在不同的温度下，上述物化

参数的取值差别也较大^[31]。

有限元计算时选用的耐火材料物化参数主要是根据宝钢炼钢厂 300t 钢包数据并参考有关文献确定。本课题研究对象为宝钢 300t 钢包，使用的包壳材料材质为 SM41CN，为日本钢种，厚度 30mm；在包身部位壳体部位耐火材料中，永久层包衬为 50mm 厚含 60% Al₂O₃ 的高铝砖；工作层包衬为含 80% Al₂O₃ 的高铝砖，包身部位厚 210mm；上下渣线为镁碳砖，镁碳砖中的 MgO 含量为 76%，C 含量约为 16%；蛭石珍珠岩复合耐火材料的性能参数由祥通耐火材料厂提供。计算所要求的材料物性参数和计算常量列于表 3-1 及表 3-2 中，永久层材料参数取 1550℃时数据，工作层材料参数取 1000℃时数据，钢包壳材料参数取 100℃时数据：导热系数为 MgO-C 砖取 1550℃数据为 10w/(m·℃)；Al₂O₃ 含量 90%的高铝隔热砖取 1000℃的数据为 0.6-0.8 w/(m·℃)，体积密度 1.2g/cm³；蛭石珍珠岩取 800℃的数据为 0.1 w/(m·℃)；钢取 30℃数据为 70w/(m·℃)。蛭石、珍珠岩物性参数如表 3.3 所示^[15]：

表 3.3 蛭石、珍珠岩物性参数

Table 3.3 Physical parameter of vermiculite and pearlite			
弹性模量 E (pa)	泊松比 v	线膨胀系数： (/℃)	导热系数 K w/(m·k)
7.0 E-8	0.17	3.0 E-6	0.1

3.4.3 边界条件与初始条件

为了使得每一节点的热平衡方程具有唯一解，需要附加一定的边界条件和初始条件，统称为定解条件。三类边界条件分别为^[14]：

第一类边界条件：物体边界上的温度函数已知，用公式表示为：

$$T|_r=T_0;T|_r=f(x,y,z,t)$$

(3.16)

r 为物体边界；T₀ 为已知温度；f(x,y,z,t)为已知温度函数。

第二类边界条件：物体边界上的热流密度已知，用公式表示为：

$$-k\frac{\partial T}{\partial n}|_r=q;-k\frac{\partial T}{\partial n}|_r=g(x,y,z,t)$$

(3.17)

q 为热流密度（常数）；g(x,y,z,t)为热流密度函数。

第三类边界条件：与物体相接触的流体介质的温度和换热系数已知，用公式表示为：

$$-k\frac{\partial T}{\partial n}|_r=a(T-T_f)|_r;$$

(3.18)

T_f 为流体介质的温度；a 为换热系数。T_f 和 a 可以是常数，也可以是随时间和位置而变化的函数。

初始条件,初始条件是指传热过程开始时物体在整个区域中所具有的温度为已知值，

用公式表示为:

$$T|_{r=0} = \varphi(x, y) \quad (3.19)$$

$\varphi(x, y)$ 为已知温度函数^[14]。

钢包表面的散热有两种途径, 一是与周围环境的对流散热; 二是通过辐射向周围发散热量。由于钢包表面的温度一般在 300℃-500℃, 散热主要是通过与周围空气的对流实现。一般的钢包的表面没有采取任何的降温措施, 因此在确定钢包表面的对流边界条件时, 按自然对流进行处理。在钢包的数值模拟边界条件的设定中, 温度场模拟高温侧取第一类边界条件, 低温侧取第三类边界条件。应力场模拟高温、低温侧均取第一类边界条件。

在温度场模拟中, 钢包工作层温度取钢液温度 1550℃, 钢壳空气侧温度 30℃; 空气对流系数: 12.5w/(m²·℃); 应力场模拟, 只模拟永久层, 其两侧的温度由温度场模拟的结果确定。

3.4.4 稳态与瞬态热线性与非线性热分析

稳态传热: 如果系统的净热流率为 0, 即流入系统的热量加上系统自身产生的热量等于流出系统的热量, 则系统处于热稳态。热稳态的条件可以表示为:

$$Q_{input} + Q_{generate} - Q_{output} = 0 \quad (3.20)$$

在稳态热分析中任一节点的温度都不随时间变化。稳态热分析的能量平衡方程为 (以矩阵形式表示):

$$[K]\{T\} = \{Q\} \quad (3.21)$$

式中: $[K]$ 为传导矩阵, 包含导热系数、对流系数、辐射率和形状系数; $\{T\}$ 为节点温度向量; $\{Q\}$ 为节点热流率向量, 包含热生成。ANSYS 利用模型几何参数、材料热性能参数以及所施加的边界条件, 生成 $[K]$ 、 $\{T\}$ 及 $\{Q\}$ 。

瞬态传热: 瞬态传热过程是指一个系统的加热或冷却过程。在这个过程中系统的温度、热流率、热边界条件已经系统内能随时间都有明显变化。根据能量守恒原理, 瞬态热平衡可以表达为 (以矩阵形式表示):

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\} \quad (3.22)$$

$[K]$ 为传导矩阵, 包含导热系数、对流系数及辐射率和形状系数;

$[C]$ 为比热矩阵, 考虑系统内能的增加;

$\{T\}$ 为节点温度向量;

$\{\dot{T}\}$ 为温度对时间的导数;

$\{Q\}$ 为节点热流率向量, 包含热生成。

线性与非线性热分析, ANSYS 在热分析过程中, 如果有下列情况中的一种或几种出现, 则该分析为非线性热分析: 材料热性能随温度变化; 边界条件随温度变化; 含有非线性单元; 考虑辐射传热。非线性热分析的热平衡矩阵方程为:

$$[C(T)]\{\dot{T}\} + [K(T)]\{T\} = \{Q(T)\} \quad (3.23)$$

本课题模拟主要考虑稳态工况下的钢包温度场、热应力场。因此不考虑材料参数、边界条件随时间和温度的变化, 为线性热分析, 所以材料热力学参数均不考虑随时间、温度而变化, 取定值^[14]。

3.5 钢包温度场数值模拟仿真

工程上很多设备在稳态运行时处于稳态传热状态, ANSYS10.0 稳态热分析可以通过计算来确定有稳定热载荷引起的温度参数。

稳态热分析基本步骤(1)建立有限元模型: 过滤图形用户界面-确定工作文件名, 工作标题与单位制-进入 PRE7 前处理器-选择单元类型, 设置单元选项, 定义单元实常数-定义材料热性能参数-创建几何模型-划分网格。(2)施加载荷: 定义热分析类型-施加载荷。ANSYS10.0 共提供了 6 种热载荷: 温度、热流率、对流、热流密度、生热率和辐射率。ANSYS10.0 施加载荷的方式分为两种, 即在有限元模型上施加载荷和在实体模型上施加载荷。有限元模型是指单元和节点, 而实体模型包括关键点、线段、面和体, 在实体模型上施加的载荷可以转变为有限元模型载荷。温度: 在有限元模型上施加温度载荷-在所有节点上施加均匀温度载荷。(3)求解。(4)后处理: 稳态热分析, 使用 POST1 进行后处理。可以通过以下三种方式查看结果: 彩色云图显示, 矢量图显示, 列表显示^[14]。

蛭石、珍珠岩二者材料的本身是同等性质的低导热系数, 但耐火度低、强度低的特点, 限制了它在工业炉窑的高温区域既保温又能达到工作衬强度的使用, 所以必须提高耐火度和高温使用强度。在温度场的模拟中, 重点在于分析蛭石珍珠岩复合材料替换隔热高铝砖厚永久层的温度分布, 以确定其耐火度能否达到使用要求。

3.5.1 模拟结果

以下分别为永久层为隔热高铝砖 50mm 厚（图 3.11）、蛭石珍珠岩复合材料 50mm 厚（图 3.12）、蛭石珍珠岩复合材料 40mm 厚（图 3.13）、蛭石珍珠岩复合材料 30mm 厚（图 3.14）的钢包温度场彩色云图。

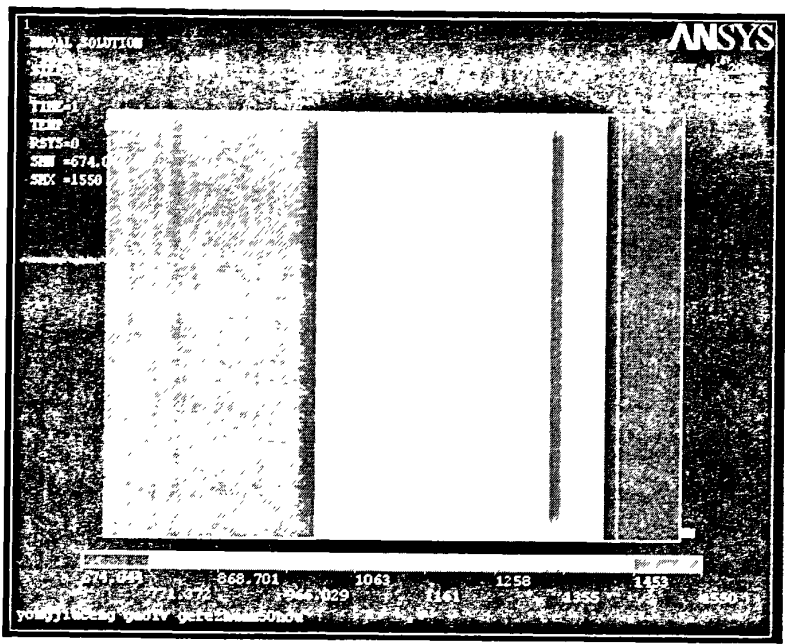


图 3.11 永久层为 50mm 厚的隔热高铝砖

Fig. 3.11 Heat-insulated high-alumina brick of 50mm permanent layer

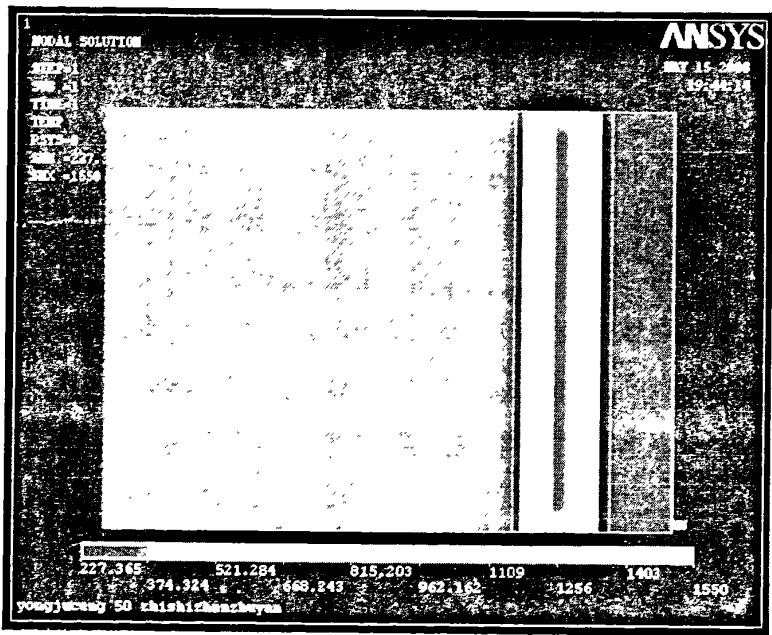


图 3.12 永久层为 50mm 厚的蛭石珍珠岩

Fig. 3.12 Vermiculite and pearlite composite refractory of 50mm permanent layer

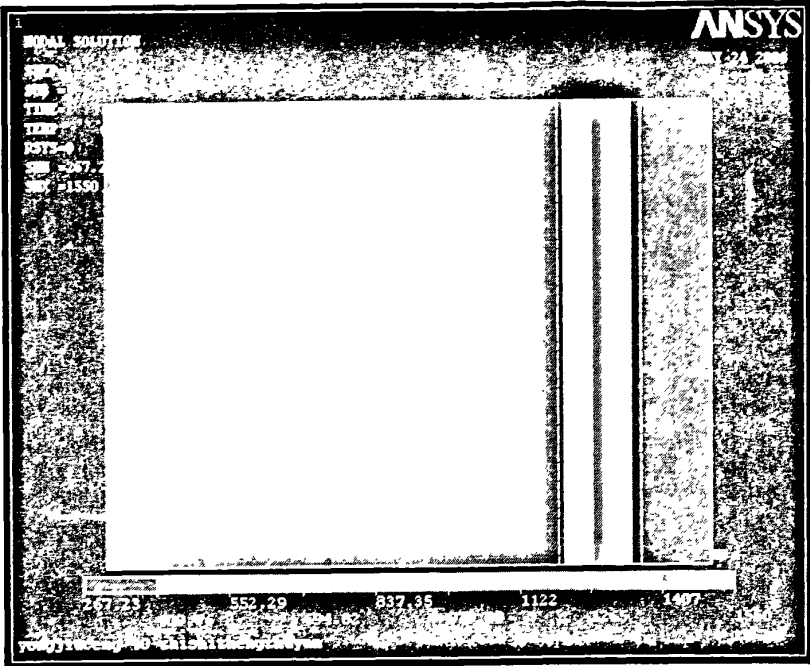


图 3.13 永久层为 40mm 厚的蛭石珍珠岩

Fig. 3.13 Vermiculite and pearlite composite refractory of 40mm permanent layer

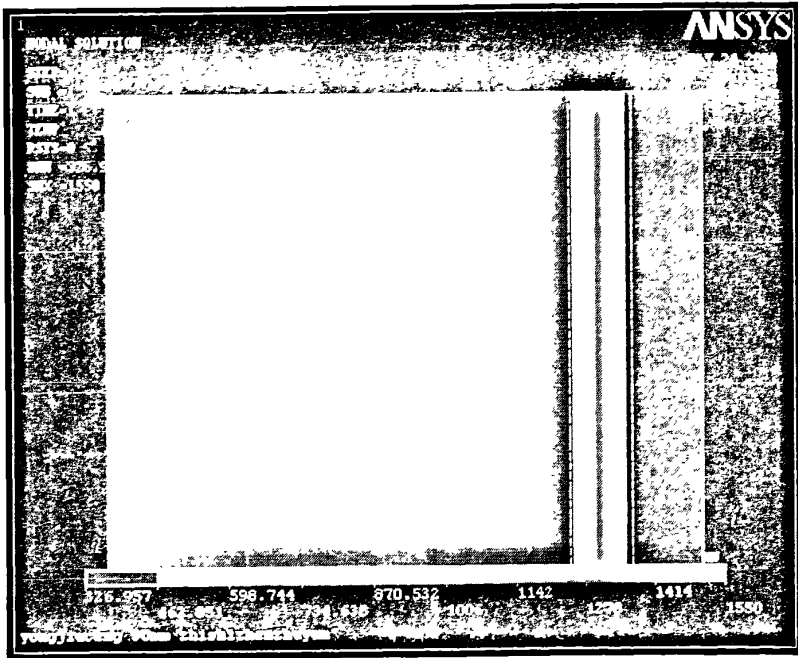


图 3.14 永久层为 30mm 厚的蛭石珍珠岩

Fig. 3.14 Vermiculite and pearlite composite refractory of 30mm permanent layer

3.5.2 模拟结果分析

在钢包永久层为 50mm 厚隔热高铝耐火材料的情况下，永久层的温度范围为 674-1355℃；永久层为 50mm 厚蛭石珍珠岩复合耐火材料的情况下，永久层的温度范围

为 227-1403℃；永久层为 40mm 厚蛭石珍珠岩复合耐火材料的情况下，永久层的温度范围为 267-1407℃；永久层为 30mm 厚蛭石珍珠岩复合耐火材料的情况下，永久层的温度范围为 327-1414℃。不同情况模拟结果对比曲线如图 3.14 所示：

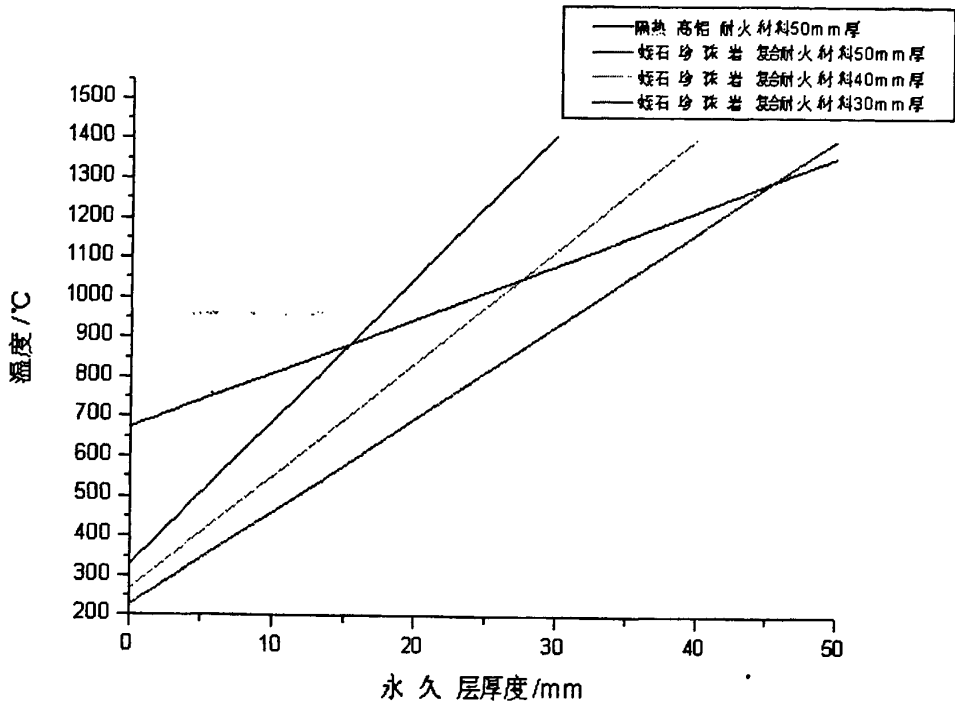


图 3.14 温度场分析图

Fig. 3.14 Stemperature field analysis graph

从图中可以看出，永久层由隔热高铝材料换为蛭石珍珠岩复合耐火材料后，永久层的最高温度有所增加、最低温度有所下降。当厚度同为 50mm 时，使用蛭石珍珠岩较隔热高铝材料温度有较大幅度下降，其中靠钢壳侧温度降幅最大，达到 447℃；当使用蛭石珍珠岩并减少永久层厚度时，随着厚度的减薄，温度有一定的上升，但永久层工作温度范围变化不大，其中靠工作层的高温侧上升幅度不大，最大仅 11℃。

可见，蛭石珍珠岩复合耐火材料导热系数在 0.1-0.15 w/m·k 范围内，在无机结合剂、无机填充料的作用下提高使用温度达到 1400-1500℃，可以满足作为钢包永久层替换材料及减薄、扩容的需要。

3.6 钢包应力场数值模拟仿真

由于相互接触的不同结构或同一结构体的不同部分之间的热膨胀系数不匹配，在加热或冷却时彼此的膨胀或收缩程度不一致，从而导致热应力的产生。热应力问题实际上是热和应力两个物理场之间的相互作用，故属于耦合场分析问题。与其他耦合场的分析方法类似，ANSYS 提高了两种分析热应力的方法：直接法和间接法。直接法是指直接

采用具有温度和位移自由度的耦合单元，同时得到热分析和结构应力分析的结果；间接法则是指先进行热分析，然后将求得的节点温度作为体载荷施加到结构应力分析中。

本文的模拟采用直接法。直接法热应力分析基本步骤：（1）建立有限元模型：过滤图形用户界面-确定工作文件名,工作标题与单位制-进入 PRE7 前处理器-选择单元类型,设置单元选项,定义单元实常数-定义材料热性能参数-创建几何模型-划分网格。（2）施加载荷：在采用直接法进行热应力分析过程中，不仅可以在模型上施加温度、热流率、对流、热流密度、生热率和辐射率 6 种基本热荷载外，还可以在模型上施加集中力（力矩）、压力、位移、角速度等基本结构载荷。温度：在有限元模型上施加温度载荷-在所有节点上施加均匀温度载荷。（3）求解：在热应力求解过程中，需要对多个求解控制选项进行设置，其中稳态热应力分析设置：稳态热应力类型-分析属性设置。（4）后处理：与稳态热分析的后处理过程类似^[14]。

钢包模型上作用的载荷包括机械载荷和热载荷两大类。机械载荷包括包体自重和钢液静水压作用，热载荷是由包体温度场施加的。北京科技大学章博老师等人对宝包钢 300t 转炉炉壳综合应力分布规律的研究表明：机械载荷作用下的炉壳机械应力很低，和热应力叠加后其影响不明显；机械载荷、热载荷作用下的炉壳综合应力水平和分布规律与炉壳综合热应力十分相似。有文献表明，对钢包的综合应力分布规律研究中，也有同样的结论。由此可知：热载荷对这种“金属-耐火材料”复合衬结构的高温容器造成很大破坏。因此，本文仅对钢包的热应力进行了模拟计算^[29]。

在应力场的模拟中，重点在于分析蛭石珍珠岩复合材料替换隔热高铝砖永久层的应力分布，以确定其热应力强度能否达到使用要求。

3.6.1 模拟结果

以下分别为永久层为蛭石珍珠岩复合材料，分别为 50mm 厚（图 3.15）、40mm 厚（图 3.16）、30mm 厚（图 3.17）的钢包热应力场彩色云图。其高温侧、低温侧的温度边界条件由以上的温度场模拟得出。

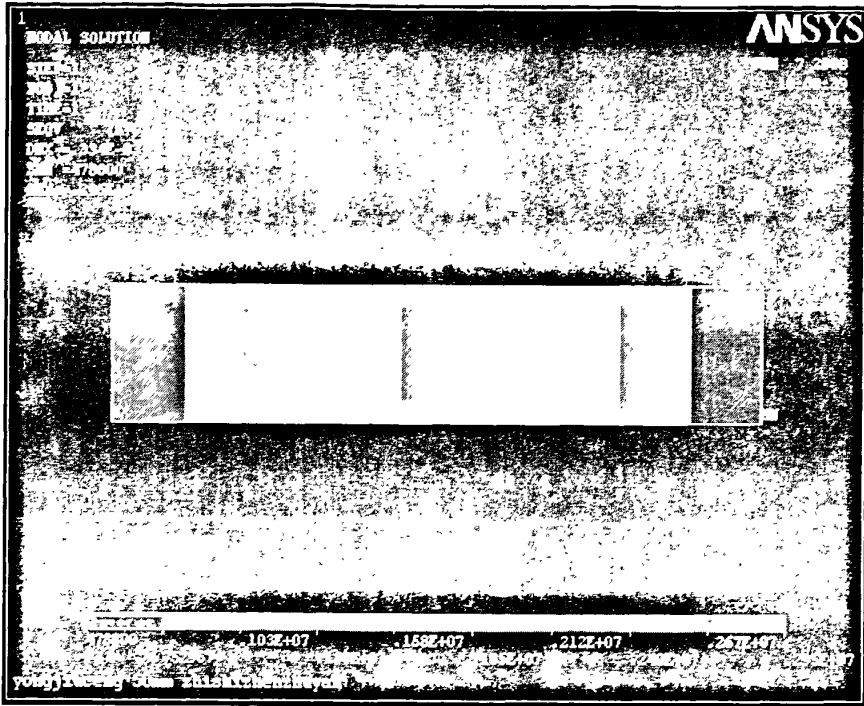


图 3.15 蛭石珍珠岩 50mm 厚的应力场(内侧温度 1403℃，外侧温度 228℃)

Fig. 3.15 Vermiculite and pearlite composite refractory of 50mm permanent layer field of stress(inside temperature 1403℃, outside temperature 228℃)

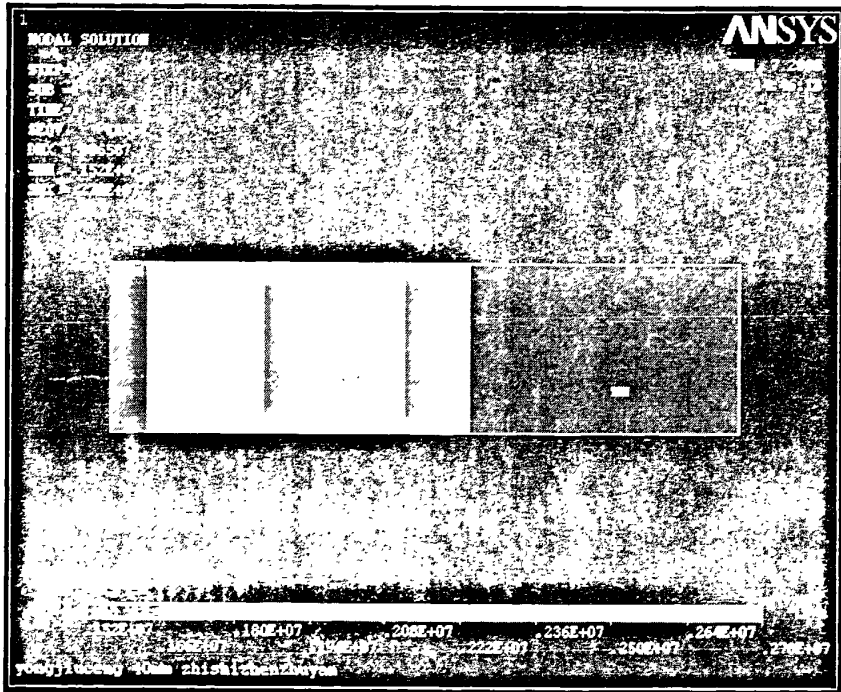


图 3.16 蛭石珍珠岩 40mm 厚的应力场(内侧温度 1407℃，外侧温度 268℃)

Fig. 3.16 Vermiculite and pearlite composite refractory of 40mm permanent layer field of stress(inside temperature 1407℃, outside temperature 268℃)

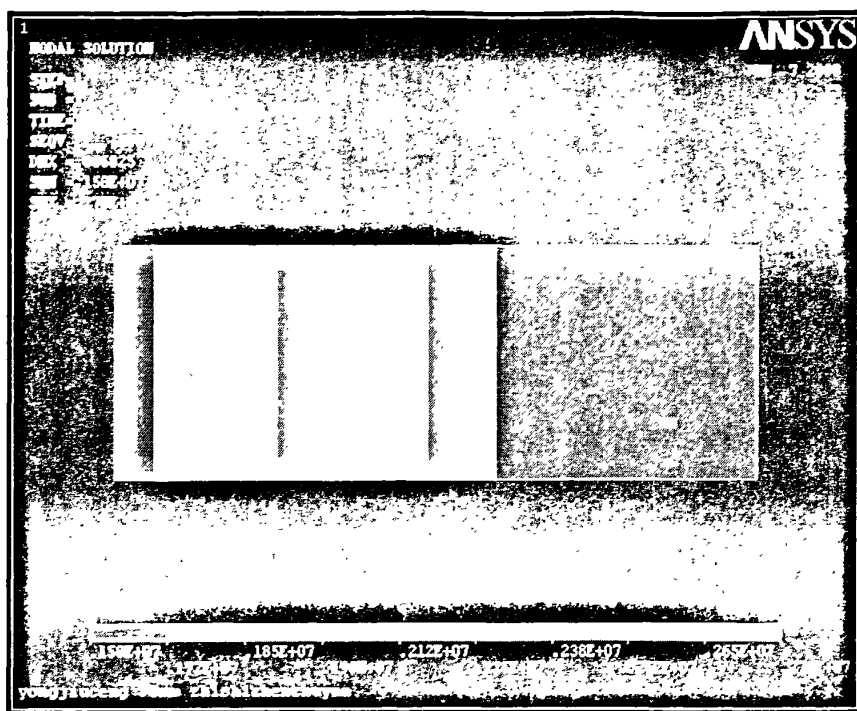


图 3.17 蛭石珍珠岩 30mm 厚的应力场(内侧温度 1414℃，外侧温度 227℃)

Fig. 3.17 Vermiculite and pearlite composite refractory of 30mm permanent layer field of stress (inside temperature 1414℃, outside temperature 227℃)

3.6.2 模拟结果分析

在钢包永久层为 50mm 厚蛭石珍珠岩复合耐火材料的情况下，永久层的热应力范围为 0.479-2.95MPa；永久层为 40mm 厚蛭石珍珠岩复合耐火材料的情况下，永久层的热应力范围为 1.52-2.78MPa；永久层为 30mm 厚蛭石珍珠岩复合耐火材料的情况下，永久层的热应力范围为 1.58-2.78MPa。不同情况模拟结果对比曲线如图 3.15 所示：

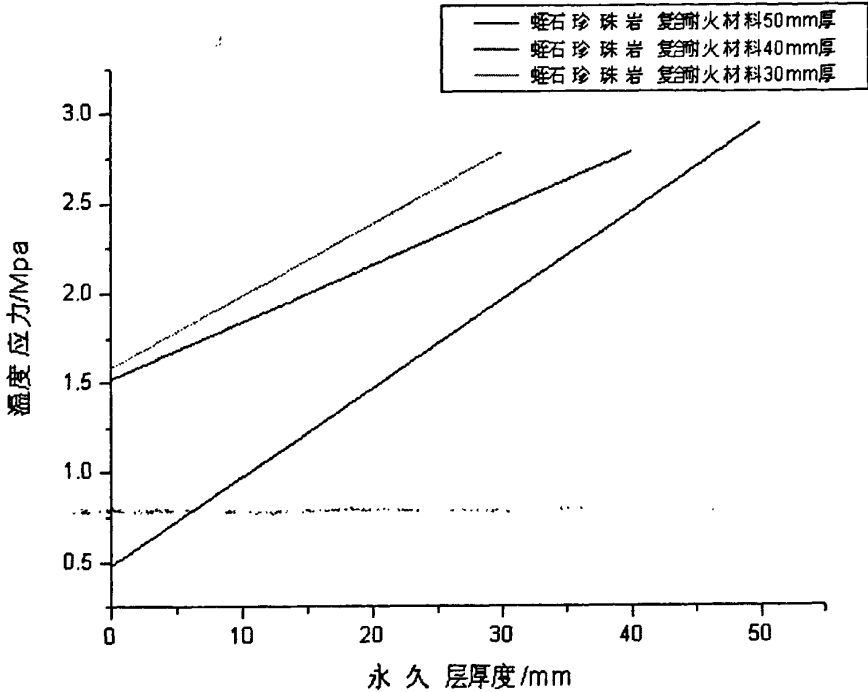


图 3.15 应力场分析图

Fig. 3.15 Stress field analysis graph

从图中可以看出，永久层由隔热高铝材料换为蛭石珍珠岩复合耐火材料后，热应力范围基本在 0.5-3.0Mpa 之间。随着厚度的减薄，热应力有一定的上升，但上升范围变化不大，其中靠钢壳侧由 50mm 减至 30mm 后，热应力上升幅度最大，仅 1.1Mpa。

根据祥通耐火材料厂提供蛭石珍珠岩复合耐火材料的性能参数，由其形成多层复合型壳体的绝热材料强度>20Mpa；并且提高抗折能力>1Mpa-2 Mpa。这样在使用过程中可以抗热应力作用，耐冲刷耐机械外力的碰撞作用，并能提高耐浸蚀能力。

3.7 本章小结

蛭石珍珠岩属于硅铝系耐火材料，其主要晶相为莫来石。复合耐火材料为气固两相结构，其中固相为晶体和玻璃体莫来石。美国学者提出了“双层法”可以用于钢-耐材复合结构炉壳的温度场、应力场的解析计算。有限元法及 ANSYS 软件是用来分析钢-耐材复合结构炉壳的温度场、应力场的良好工具。数值模拟表明：用蛭石珍珠岩复合耐火材料代替隔热高铝砖作为钢包永久层材料，耐火度满足使用要求，在减薄永久层厚度后，钢包壳温度仍有较大幅度降低；抗压强度也满足替换和减薄永久层的使用要求。

第四章 复合耐火材料推广应用的价值及结论

4.1 在冶金设备上的应用

蛭石珍珠岩复合耐火材料可以在钢铁冶金炼铁、炼钢、轧钢的工艺设备（主要是炉窑）上有广泛的应用。

以炼钢设备为例，可以给高温炼钢炉带来以下几方面节能降耗的经济效益：（1）能减少炉体的总重量 20%，增加盛钢容量的 15%-20%，能减少机械运行电耗费用的 5%；（2）减少炉体砌筑的更换次数，缩短炼钢工艺流程中停产检修的时间，提高使用寿命 30%。在砌体的工作层，只要内衬不出现任何问题，对工作层就可以实行同材质热补法，在短时间之内继续使用的效果，及节省人力物力，又节省了多方面的能源的浪费；（3）对出钢温度的降温起到一个关键的作用，保住了钢液温度促使产品质量的稳定；（4）生产过程中的节约成本，减少耐火材料的消耗量 10%—15%；（5）操作工序不会出现波动；（6）对环境污染也能克服，因为从低温到高温需要一个烘炉过程，减少了烘炉的次数及时间^[15]。

轻质耐火材料作为窑炉、锅炉、热工容器、热力管道等设备的重要组成部分，在工业上应用十分广泛。由于轻质耐火材料气孔率高的特点，使其在高效节能，降低热损耗方面占据着不可替代的位置，但其制品气孔率高抗化学侵蚀性能差，仍不能直接与烧料接触。到目前为止，轻质耐火材料还是多用于高温设备的保温层。

4.2 社会效益

4.2.1 有利于增加经济效益

近年来，非金属矿产业是我国出口创汇增长最快的产业，虽然我国许多重要非金属矿产资源储量和贸易量居世界前列，但主要以原料或初加工产品为主，由工业发达国家进行加工并返销高级制品的产销格局基本未变。非金属矿深加工产品与原矿及初加工产品比较，技术含量极大提高，属高附加值出口产品，出口价格会大幅度增长。由此可见，只有依靠科技，大力发展核心加工技术，才能既保护国家矿产资源，又能保持出口创汇的持续增长。因此发展非金属矿深加工产品技术势在必行，对非金属矿物材料特别是绝热材料经过深度复合加工制成耐高温、抗侵蚀、耐静压智能化产品，能在国内外高温工业领域增加效益，提高创新点^[15]。

非金属矿资源和其他资源一样是不可再生的资源，从可持续发展战略的角度来看，必须重视优势非金属矿资源合理利用。对低品味矿物进行如生态化处理、循环增值等综合利用，整体促进非金属矿产业从粗放型经营向集约化方向发展，强化非金属矿行业产

业结构调整,对提高我国非金属矿产品竞争力、减少资源消耗和环境成本具有重要意义。重点发展对高效节能与长寿低耗有特殊贡献的非金属矿产品,使之适合我国钢铁、有色、火电、水泥、煤炭、石化等高能耗行业发展需要,减少对高档制品进口的依存度,开创集成创新能力,形成系列化的功能基础原材料,促进资源的增值,进一步催生行业的可持续发展^[15]。

4.2.2 有利于节能降耗

我国冶金工业制品能耗远高于世界先进国家,这与冶炼技术、筑衬质量、保温结构、材料性能、炉体寿命和操作管理等因素关系密切。当前我国筑衬消耗与国际先进国家相比差距十分明显。筑衬消耗指数越大意味着炉窑寿命越短,也表明非金属筑衬品质不高。我国高炉普遍使用低档氧化物初级产品,平均寿命徘徊在 6-8 年;国外高炉使用优质非氧化物转型产品,平均寿命在 15-20 年。大力发展适用性强、质量稳定的优质非金属矿产品,构建重化工业节能长寿新体系已成为科技攻关的重中之重。

本课题设立蛭石-珍珠岩节能炉衬开发,对其共性与关键技术的掌握,有利于非金属矿资源的合理设计以及深加工水平的提高,对金属冶炼的长寿技术支撑均有新的突破。努力突破资源和能源对经济发展的瓶颈制约,为构建资源节约和环境友好型社会做出应有的贡献。本项目重点缩短与先进国家在同类技术上的差距,消化吸收国外先进经验及工艺装备,并建立材料-设计-设备-砌筑-工艺-管理-环保节能技术新体系,提高非金属材料核心技术能力,为达到当前国际先进水平奠定基础。

4.3 结论及下一步工作的设想

4.3.1 结论

(1) 本论文研究了目前炼钢主要设备转炉、钢包、中间包的钢-耐材复合结构,其永久层一般为高铝质耐火材料,具有使用寿命有限、导热系数高等不足。分析了炼钢设备壳体结构、工作条件的相似性,指出可以使用通用的新型复合耐火材料,达到设备扩容、节能的目标。

(2) 蛭石珍珠岩均为半硅质酸性玻璃质岩,复合耐火材料的生产工艺主要由矿石的加热膨胀和膨胀产品的复合两部分组成,重点是通过电加热控制膨胀过程形成结构完整的微观闭孔球形结构及控制混炼过程形成宏观包覆结构,从而大幅度提高复合材料的耐火度和强度。复合材料具有其单一成分都不具有的优越性能。

(3) 蛭石珍珠岩复合耐火材料主要性能参数为:抗压强度应 $>15\sim20\text{Mpa}$,抗折强度 $>1\sim2\text{Mpa}$,多层复合型壳体绝热材料在使用过程中抗热应力、机械应力能力强;导热系数应在 $<0.1\text{w/m}\cdot\text{k}$,保温效果好;复合耐火材料的耐火度 $>1790^{\circ}\text{C}$,使用温度 $>$

1450℃, 适应于各种高温设备。

(4) 蛭石珍珠岩主要为气固两相结构形式, 大量微观气孔的存在是其具有良好隔热性能的原因。晶相研究表明, 蛭石珍珠岩固相主晶相为莫来石, 它又有晶体和玻璃体两种形态; 莫来石在玻璃相参与下具有针、柱状结构, 这是一种优越的显微结构。

(5) 本课题源于钢铁厂炼钢设备, 主要是钢包扩容的实际需要, 重点研究新型材料代替传统材料的可能性的方法, 数学解析法和有限元模拟法是比较有效的方法。美国学者提出了“双层法”可以用于钢-耐材复合结构炉壳的温度场、应力场的解析计算。有限元法及 ANSYS 软件是用来分析钢-耐材复合结构炉壳的温度场、应力场的良好工具。

数值模拟表明: 用蛭石珍珠岩复合耐火材料代替隔热高铝隔热材料作为钢包永久层, 耐火度、强度满足扩容要求, 在减薄永久层厚度后, 钢包壳温度仍有较大幅度降低。对钢包的扩容、节能有重要意义。

4.3.2 下一步工作的设想

本论文为研究开发新型耐火材料提供了一种整体思路, 对炼钢设备上新型耐火材料的设计、选用提供了一种研究方案, 但仍有许多工作未能完成, 若能完成以下工作, 对于提高研究的系统性和深度都会有很大的帮助: (1) 对耐火材料试样进行实验室分析。

(2) 对使用中的炼钢设备进行实测, 是分析耐火材料应用效果的有效手段。(3) 仅对钢包稳态进行了模拟, 由于其工作的瞬态过程温度场应力场更加复杂, 对耐火材料使用的要求更高, 因此应该对其瞬态过程进行模拟。

4.4 本章小结

蛭石珍珠岩复合耐火材料在炼钢设备上应用可以取得很好的经济效益, 开发此新型材料对耐火材料行业的产业升级、扩大出口也有积极意义。

参考文献

- [1] 钱之荣, 范广举.耐火材料实用手册[M],冶金工业出版社.
- [2] 筑炉工培训教材[M],宝钢设备部炉窑车间.
- [3] 炼钢耐火材料应用[M],冶金工业出版社.
- [4] 轧钢加热炉节能[M] 冶金工业出版社, 92-97.
- [5] 工业炉耐热炉衬[M], 化学工业出版社.
- [6] 徐平坤,魏国钊.耐火材料新工艺技术[M],冶金工业出版社.
- [7] 胡世平,龚海涛 蒋良志等.短流程炼钢用耐火材料[M].
- [8] 高振晞,平增幅 张战营等.耐火材料显微结构[M],冶金工业出版社,2002.
- [9] 于景坤,姜茂发.耐火材料性能测定与评价[M], 冶金工业出版社.
- [10] 王诚训,孙炜明,张义先,孙宇飞.《钢包用耐火材料》[M],冶金工业出版社.
- [11] 薛守义.有限单元法[M],中国建筑工业出版社.
- [12] 刘麟瑞,林彬荫.工业炉窑用耐火材料手册[M], 冶金工业出版社,2007.
- [13] 张朝晖.ANSYS 热分析教程实例解析.[M], 中国铁道出版社,2007.
- [14] 祥通耐火材料厂.蛭石珍珠岩可行性报告[M],2006.
- [15] 阎传政,王庆奎.净化钢液的中间包耐火材料技术[J], 炼钢, 1989, 40-45.
- [16] 孙启俊.轻质不定形耐火材料[J].
- [17] 尹高, 曹旗, 魏同.我国耐火材料生产装备的现状与发展[J]耐火材料 2006, 40: 265-273.
- [18] 刘鹏, 王志新, 陈世富.年产 7200t 球形闭孔膨胀珍珠岩生产线设计[J], 2004, 27: 24-25.
- [19] 陈世富, 刘鹏.球形闭孔膨胀珍珠岩的制造方法_球形闭孔膨胀珍珠岩的膨胀工艺研究[J], 信阳师范学院学报 2000, 13: 227-228.
- [20] 刘鹏, 郭忠, 胡新中, 陈世富.蛭石电加热膨胀新工艺[J] 保温材料与建筑节能 2004, 13: 57-58.
- [21] J.Szekely and J.W.Evans. Radiative Heat Loss from the Surface of Molten Steel Holding Ladle[J],Trans.Met.Sco.AIVIE,1969(6):1149-1175.
- [22] J.Szekely and R.P.Lee. The effects of Slag Thickness on Heat Loss from ladles Holding Molten Steel[J],Tans.Met.Xoc.AIME,1968(6):961-965.
- [23] G.D.MorrowandK-Drussell. Thermal Moldeling in Melt Shop Application[J],Theory and Process of Ceramic Nulletin,1985(7):1067-1072.
- [24] C.E.Tomazinetal.The Effects of Ladle Refractories and Practice son Steel Temperature Control[J],I&SM, 1986(6):317-323.

- [25] Y.S.Kooeta]. Thermal Cycle Model of Ladle for Steel Temperature Control in Melt Shop and its Application [J], Steel making Conference Proceedings, 1989(1):415-422
- [26] W.Hoppman and F.N.Fett. Energy Balance of a ladle furnace[J],MPT,1989(3):38-51.
- [27] G.W.Hallum and R.O.Russell,Thermal chemical Studies of O broad Ladles During Preheating Use[J], Refractory, 1993(1)
- [28] 盛垒. “金属—耐火材料”高温复合结构热行为分析及其应用研究[D], 北京科技大学, 2007.
- [29] 陈艳芳. LF 炉精炼过程温度预报与控制模型[D], 北京科技大学, 2007.
- [30] 宝钢 300 吨钢包的热行为研究[D], 北京科技大学, 2007.
- [31] 孟庆新. 钢包外壁热像与内衬厚度之间关系的模拟研究[D], 武汉科技大学, 2007.
- [32] 董志民.转炉扩容对转炉力学行为的影响研究[D], 北京科技大学, 2007.
- [33] 耐火材料显微结构分形特征的研究[D], 钢铁研究总院,2000.
- [34] 程本军. 刚玉-莫来石复相陶瓷窑具的使用过程数学模拟、纳米改性及其设计与制备[D], 浙江大学,2006.
- [35] En-sheng Chen and Richard.W. Thermal Chemical analysis of a 255-ton BOF vessel[D],Iron and Steel Engineer,1993(11):43-51.

致 谢

本文是在导师陈文仲副教授的指导下完成的。在学期间，导师渊博的知识，严谨的治学态度，忘我的工作精神，严于律己，宽以待人的崇高品质使我受益匪浅，不仅学到了许多专业知识，而且拓宽了视野、提高了科研能力。值此论文完成之际，谨向陈老师致以最崇高的敬意和最真挚的感谢！

在论文完成过程中还得到了吴成涛、李德伟及实验室其他同学的诸多帮助，在此表示衷心的感谢！

我要感谢我的亲人，他们的支持和鼓励陪伴我度过了两年的校园生活。

最后，衷心感谢在百忙之中抽出时间为论文的评审工作付出辛勤劳动的各位老师！

