

重庆科技学院



毕业论文（设计）

题目 高炉块状带煤气流分布模拟研究

学院 冶金与材料工程学院

专业班级 冶金 2010-03

学生姓名 王劼 学号 2010440453

指导教师 高绪东 职称 讲师

评阅教师 杨治立 职称 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

学生毕业论文（设计）原创性声明

本人以信誉声明：所呈交的毕业设计（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

合理的煤气流分布在高炉炼铁生产中有着重要的意义，高炉顺行和煤气利用率直接受煤气流的分布状况的影响，煤气流分布是否合理与高炉生产是否高效紧密相关，本文在高炉煤气流分布基本特征及形式的基础上，分别探讨了影响煤气流分布的主要因素，从布料方面探讨了炉料分布对煤气流分布的影响，为煤气流分布向合理化发展提供一个方向。

本文使用Gambit制图软件建立二维模型，运用Fluent流体软件读取模型并对高炉煤气流的流动进行模拟。通过高炉料柱散料层中焦炭和矿石的不同布料制度，对煤气流流动状态的影响进行数值模拟，通过对比由不同布料制度建立的模型对煤气流速的模拟，分析煤气流的运动状态。从模拟结果可以发现料面倾角和料层孔隙度对煤气流有很大的影响，且块状带对煤气流分布有很强的“整流”作用。

关键词:高炉 煤气流 数值模拟

ABSTRACT

Rational distribution of gas flow has important significance in the blast furnace production, affect the rate of distribution directly affected by the gas flow and the blast furnace gas utilization, is reasonable and is closely related to the production of blast furnace is gas flow distribution, the basic features and basic flow distribution in blast furnace gas, discusses the analysis the main factors affecting the distribution of gas flow, discussed the influence of gas flow distribution of burden distribution from the cloth, and offer a direction for the development of the gas flow distribution.

In this paper, a two-dimensional model using Gambit software, were simulated by using Fluent software to read and fluid model of blast furnace gas flow. The blast furnace cloth system column bulk coke and ore material layer, numerical simulation of gas flow state, through the comparison of different fabric system established by the model of gas flow simulation, analysis of the state of motion of gas flow. From the simulation results can be found to have great influence on surface angle and the material porosity of gas flow, and the bulk of the gas flow distribution has a very strong " rectification " effect.

Keywords: Blast furnace; Gas flow; Numerical simulation

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
1 绪 论.....	1
1.1 高炉煤气流分布认识的发展.....	1
1.2 煤气流分布的重要性.....	1
1.2.1 高炉的高效与长寿.....	1
1.2.2 煤气流分布对高炉生产的影响.....	2
1.3 煤气流分布的基本特征.....	3
1.4 煤气流分布的影响因素.....	4
1.4.1 风口回旋区的分布.....	4
1.4.2 软熔带的分布.....	4
1.4.3 块状带的分布.....	4
1.5 课程研究的目的及意义.....	5
2 布料对高炉煤气流分布的影响.....	6
2.1 料层结构.....	6
2.1.1 料层倾角.....	6
2.1.2 料层厚度.....	7
2.1.3 料柱高度.....	8
2.2 炉料径向分布.....	9
2.2.1 炉料透气性.....	9
2.2.2 矿焦比.....	9
2.2.3 局部透气性差.....	10
2.3 中心加焦.....	11
2.3.1 中心加焦的发明.....	11
2.3.2 中心加焦的应用.....	12
2.3.3 中心加焦的优势和缺陷.....	12
3 高炉煤气流分布模拟.....	13
3.1 高炉散料层模型建立.....	13
3.2 数值计算.....	14
3.3 高炉散料层模拟结果.....	15
4 结 论.....	23

参考文献.....	24
致 谢.....	26

1 绪论

1.1 高炉煤气流分布认识的发展

对煤气流分布的控制及调节是高炉生产中相当重要的一项内容。煤气流的分布最终影响软熔带的结构、炉内温度分布、炉况顺行、高炉的长寿和煤气利用状况，最终影响到高炉的各项冶炼指标。高炉生产中往往是从上下部调剂来获得合理的煤气流分布，获得合理的煤气流分布是高炉操作主要的目的。高炉内部煤气流分布研究是非常重要的，因为当前高炉操作对经验有较大的依赖性，缺乏必要的理论基础。

早期高炉实际测量中一个非常著名的例子是：俄国索科洛夫于 1904 年在一座木炭小炉上凿了 4 圈洞，每圈有 4 个洞，每个洞之间相隔 90°，以此来实际测量炉料和煤气之间的关系。从这个实验发现 CO₂ 含量较高的地方，矿石分布多，CO₂ 低的地方，焦炭分布多。上世纪 20~30 年代，美国学者 S.Kinney 等人在高炉上对煤气温度、压力、速度分布进行实测，进一步了解高炉煤气的作用^[1]。

上世纪 30~40 年代，前苏联以 M. Павлов 为首的“大高炉研究组”为了研究炉料、煤气及压力等在高炉径向和高度方向分布，在多座高炉上进行测定研究，得到了丰富的研究成果^[1]。通过这些研究对煤气流分布和炉料分布有了更为全面的理解。

上世纪 50 年代，前苏联研究人员以“鼓风动能”和“风口风速”作为工具，来对下部调剂的尺度进行测量，从此下部调剂进入了可定量时代。维格曼的《高炉生产》对炉料运动、循环区、风口工作等的计算公式进行了总结，我国的炼铁教科书中也记载有这些研究成果。分别于 1955 年和 1956 年出版的与煤气运动相关的两本书“高炉内的煤气流运动”和“气体穿过块状带的运动”中提到了，改善中心部分的透气性可使用长风口、缩小风口截面积、增加风量、增大中心炉料的粒度等方法。

日本和前苏联从 70 年代开始进行高炉解剖，在这方面做了大量的研究，这些研究都表明软熔带在高炉中起着重要的作用。重见彰利著的《制铁ハンドブック》和日本钢铁协会主编的《B.F.Phenomena and Modelling》两书，全面的总结了高炉解剖的材料，深入的总结了煤气流分布、炉料运动等对高炉冶炼的影响。尤其是《B.F.Phenomena and Modelling》一书中提到，与数字仿真技术相结合，定量的解析了许多高炉冶炼过程。

1.2 煤气流分布的重要性

1.2.1 高炉的高效与长寿

随着我国大型高炉的不断建起，高炉的产量日益增加，及高炉冶炼技术的引进和开发，使得高炉冶炼的焦比不断降低，这使得高炉向高产低耗的方向迈进了一大步。但是，高炉高产低耗，冶炼强度的大幅提高，严重影响了高炉的寿命，成为摆在全球冶金工作

人员的新问题。另外，随着高炉冶炼强度的提高，高炉大修和中修的时间和费用大幅增加，这将严重影响到企业的经济效益。因此，要提高企业的经济效益，延长高炉寿命是企业必须解决的重要问题之一。

高炉的寿命直接影响大修周期，大修不但要花费大笔资金，更让企业难以承受的是铁水减产带来的经济损失。随着高炉逐步向大型化和现代化发展，高炉的长寿高效越来越受到重视。21世纪国际国内的钢铁市场竞争越发激烈，中国的钢铁企业想要在其中站稳脚步，那么势必要由“冶金大国”走向“冶金强国”，由于整个钢铁企业生产成本的50%都是生铁成本，那么钢铁企业必须要跨过的一道坎就是提高生铁质量和产量、降低生铁成本，建设长寿高效的高炉就是完成上述目标的有效措施之一。高炉长寿不仅能为钢铁企业节约一大笔大修费用，提高冶炼指标、生铁产量，还能提高整个企业的经济效益。

高炉在生产过程中，炉衬侵蚀是影响高炉寿命中最重要的因素，而炉身是高炉内部侵蚀最为严重的部位，直接决定着高炉炉衬的寿命。根据R.W.Brown的统计结果，炉身的侵蚀机理是：氧化蚀损约占20%，碱金属侵蚀约占40%，冷却不足约占10%，炉料下降磨损约占10%，热震剥落约占5%，炉渣粘附冲蚀约占5%，其它侵蚀约占10%^[2]。

不论高炉内部炉衬何种形式的侵蚀，何不为侵蚀，煤气流分布和温度的高低都起着重要的作，这就要求高炉操作者在高炉操作过程中，调节高炉内部煤气流合理分布，这样不仅提高了高炉的寿命，同时也提高了煤气的利用率。

1.2.2 煤气流分布对高炉生产的影响

高炉生产中，高炉操作的一项重要内容就是控制煤气流的分布。煤气流的分布是否合理、煤气流是否顺畅等对高炉生产起着重要的影响，煤气流分布合理、煤气流顺畅是高炉高产、低耗的关键。如果煤气流分布不合理，煤气在高炉料柱中不顺畅，这会造成高炉发生悬料、结瘤、炉衬冲刷严重，从而使各项生产技术指标大幅下降，对高炉的寿命产生严重的影响。

煤气流分布是否合理直接关系到高炉内部温度分布、软熔带的位置和结构、高炉顺行及煤气的利用率，最终将直接影响到高炉冶炼的能耗、产量，同时也影响着高炉的寿命。一方面煤气流分布是高炉操作者判断炉况的重要依据，另一方面煤气流分布合理，通行顺畅，热能和化学能的高效利用是高炉操作的重要内容，煤气流分布合理，不仅可以提高煤气利用率、充分发展间接还原而且可以降低焦比；如果煤气流分布不合理，会使煤气利用率下降，焦比升高，同时影响高炉顺行^[3]。综上所述，对高炉内部煤气流的分布的研究有非常重要的意义。

煤气流是影响炉料的间接还原、炉料的软化、熔融、造渣的重要因素，同时是决定炉衬寿命的重要因素。煤气流不仅具有高温、还原性，有些煤气流中还含有碱金属，这些是造成炉身下部化学侵蚀和机械磨损的根源。煤气温度的波动和分布造成炉衬温度波

动,进而造成炉衬耐火材料因热应力而破坏。煤气流分布多的地方炉料下降速度快,造成炉衬磨损加剧,煤气中含有大量的粉尘直接冲刷和侵蚀炉衬,高温煤气流使炉衬温度升高,直接促进和加剧炉衬的磨损,同时碱金属侵蚀炉衬也会加剧。当边缘气流不足时,又会造成炉墙结厚,严重时会造成炉衬结瘤,并且对边缘炉料正常预热、间接还原还原产生重要影响,使炉料下降到风口区时还未能完全熔化,引起风口磨损甚至烧坏,并且在洗炉时,还会造成炉墙粘结物粘连炉衬一同脱落的现象。上述两种煤气流的分布都会造成炉况恶化,影响高炉的顺行,因此控制边缘煤气流量在一个合理范围内,同时使边缘煤气流分布合理,是确保高炉稳产、顺行、低耗的关键因素,又是减轻炉衬侵蚀,减少风口磨损的重要条件。

1.3 煤气流分布的基本特征

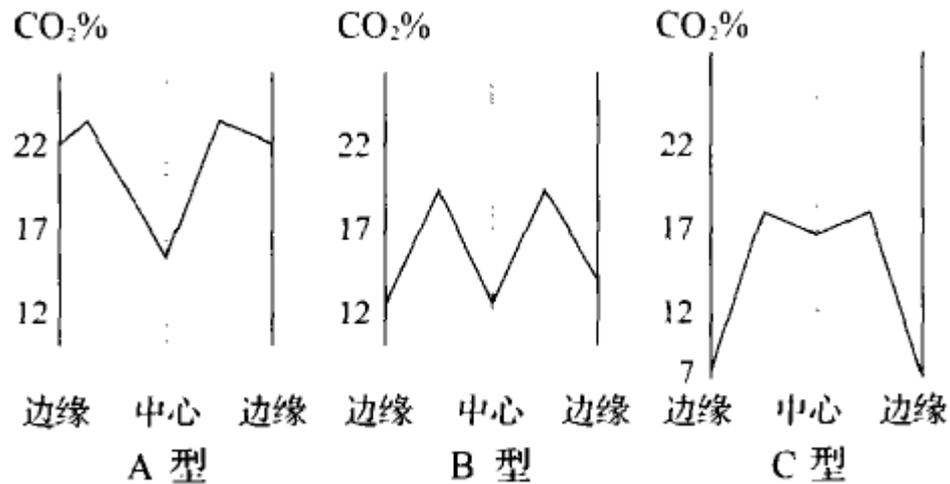


图1.1 三种基本型式煤气流分布曲线图

根据现有国内外高炉生产实践,高炉煤气流分布曲线大致可以分为三种:“喇叭花型”(边缘发展型)、“展翅型”(中心气流型)和“双峰型”(两道气流型)^[3]。图1.1是这三种煤气流分布型式,有以下几个特征:

①A型(中心发展型)的燃料比是最低的,C型(边缘发展型)燃料比最高,B型(两道气流型)介于二者之间。

②A型的煤气利用率 η_{CO} 最高,边缘的 η_{CO} 高于中心的 η_{CO} ;C型高炉的煤气利用率 η_{CO} 最低,边缘的 η_{CO} 低于中心的 η_{CO} ,B型介于二者之间,其中心的 η_{CO} 稍稍低于边缘的 η_{CO} 。

③A型高炉因边缘的 η_{CO} 较高,说明边缘的透气性较差,边缘气煤流较弱,这对于保护炉衬比较有利,而边缘煤气流较为发展的C型高炉炉衬容易受到煤气流侵蚀,炉衬寿命一般较短。

④ η_{CO} 较高的煤气流分布必须要有较高的透气性才能保证高炉顺行,这与炉料的理

化性质有很大的关系。如果要保持较高的 η_{CO} 高炉顺行，就要保持较炉料具有较高的强度，较低的还原粉化率。

1.4 煤气流分布的影响因素

实际生产中热风由风口鼓进，在下部形成风口回旋区，然后向上依次通过滴落带、软熔带、块状带，最终由炉顶排出，形成高炉煤气，进入高炉煤气处理装置。因此煤气流的分布受料柱透的气性影响，自下而上可分为风口回旋区的分布、炉腰至炉身下部的煤气流分布和炉身上部的煤气流分布，即煤气在高炉内的三次分布^[4]。

1.4.1 风口回旋区的分布

风口回旋区在高炉实际生产中起到了非常重要的作用。回旋区的大小及形状直接反映出风口的进风状态，决定炉内焦炭的燃烧状态，影响气流和温度在高炉内部的分布状况，是高炉顺行的基础。回旋区前方是透气性差且对煤气流有较大阻力的死料堆，回旋区上方是堆积焦炭非常松散，并且与软熔带相连，疏松的焦炭层虽然有液态的渣铁滴落，但是对煤气流的阻力较小，透气性相对较好。

高炉上部炉料的下降、下部煤气的分布以及整个高炉内的传热传质均受回旋区的形成和反应情况的影响。风口回旋区对煤气流分布的影响是非常重要的，因为煤气在回旋区产生，燃料中的碳与鼓风中的氧进行燃烧反应而生成。回旋区的深度对高炉下部气流有十分大的影响，过小或过大都将造成边缘或中心煤气流的过度发展。随着炉缸直径的增大，风口回旋区也会不成比例的增大，随着风口回旋区的扩大，使中心煤气接受更多的热量，温度保持稳定。通过控制风口回旋区和中心堆积的焦炭量，使炉料维持良好的透气性和透液性。

1.4.2 软熔带的分布

软熔带内由于炉料的软化，是孔隙率大大降低，这使得软熔带是高炉中透气性最差的区域。软熔层、矿石层、焦炭层之间的透气性之比为1: 4: 52，软熔层对煤气的运行阻力是最大的^[4]。所以，软熔带的形状、位置、结构对高炉的顺行和煤气的利用率有非常大的影响。矿石的高温冶金性能和品位与软熔带的结构有关，提高矿石软化温度和品位能使软熔层的宽度和厚度降低，从而使煤气运行阻力减小。炉内温度分布和矿石层焦炭层厚度之比对软熔带的形状、位置有直接的影响。由于焦炭层的透气性比较好，煤气流在焦炭多的区域容易发展，所以该区域的温度相对比较高。由于煤气温度提高，是高温区上移，软熔带的位置随之上移。煤气在经过软熔带之后，原来的流动方向被迫改变，逐渐向块状带流去，所以焦炭层数在软熔带中对煤气流的阻力有着很大的影响，而这也与软熔带的形状、位置有很大关系，而且它对煤气流在高炉中部、块状带、炉喉的分布有着很大的影响。

1.4.3 块状带的分布

高炉操作主要是通过上不调节和下不调节来控制煤气流的分布，上不调节是通过调节装料制度，下不调节通过调节送风制度。装料制度决定着炉料在高炉内部的分布，而炉料分布又直接影响煤气流分布及软熔带的形状^[5]。高炉块状带的传热和化学反应进行是否良好对煤气利用率有很大影响，同时压损和高炉顺行也受到块状带煤气流分布的影响，而块状带煤气流的分布取决于高炉炉料的传热和化学反应情况。炉料的分布状况不仅对软熔带的形状影响很大，还决定了高炉的操作方式。由于布料的重要性，高炉工作者在这方面进行了大量研究。这些研究结果表明，煤气流分布受散料层透气性的影响，而且煤气流在散料层内分布不均匀，即煤气流受实际装料的影响^[5]。料柱透气性越好，煤气流发展越好，反之则抑制，严重时还会产生悬料、管道行程等情况。炉料粒径、空隙率、矿焦比等径向分布决定了料层的透气性，而它们又与高炉的矿焦批重、布料方式和炉料冶金性能密切相关。所以布料方式是高炉控制煤气流分布的重要因素之一，它对高炉操作、低耗等方面影响很大。

1.5 课程研究的的意义

煤气流在高炉内部合理分布，是维持炉况稳定、提高煤气流利用率、高炉顺行的重要因素。合理的不调节和下部调节是调节高炉煤气流分布的重要手段。高炉生产的长期实践表明，上部调节对高炉内部煤气流的分布有着重要的影响。

由于高炉是一个封闭的生产环境，炉内温度较高，除了装料和产出，观察不到炉内的任何变化，这就给高炉的研究带了很大的困难。目前通常做法是通过实时监测炉顶煤气的温度和分布情况，来估计高炉内部煤气流分布。在实际生产中，自下而上分为风口回旋区的煤气流初始分布，软熔带煤气流再次分布及炉身部分煤气流分布。煤气经风口回旋区、软熔带的初始和再次分布后进入块状带，由于受炉料透气性的影响，煤气流又重新分布。

高炉煤气流分布状态是判别高炉炉况的重要凭据，调节和控制煤气流分布是高炉冶炼中相当重要的一部分。若中心煤气流过于发展，高炉内壁的煤气流容易被抑制，炉壁结厚或结瘤等现象就有很大几率产生，并且十分容易形成中心管道；若边缘煤气流过过于发展，高炉内壁就很容易受到侵蚀，且煤气流会变得不稳定。高炉操作实践表明，煤气流的分布状况对高炉内部出现的中间堆积、炉壁结厚、塌料、管道等异常现象有很大的影响。研究煤气流的合理分布，从而采取适宜的送风制度和装料制度来控制边缘气流和中心气流的发展程度，以免炉壁结厚、炉壁侵蚀等异常现象的发生，这对于保证高炉的顺行和长寿具有重要意义。

2 布料对高炉煤气流分布的影响

2.1 料层结构

2.1.1 料层倾角

装料制度对炉料的分布状况起着决定性作用，现实中高炉受装料设备条件所限，装入的各料层均存在一定倾角。炉料在下降过程中，炉料和煤气不断发生再分布，炉料在沿料层高度方向不断发生变化。大量的模拟及高炉解剖实验表明，随炉料的下降，料层分布形状逐渐由M型变为水平型，即炉料在炉内的堆角在逐渐变小^[6]。

料面倾斜，煤气温度在径向基本成中心温度高、边缘温度低的分布趋势。与料面水平相比，差别最大的地方为炉顶煤气温度的分布，料表面的倾角较大，中心高度相对较低，料表面附近的煤气趋于向中心流成，从而形成中心煤气流较强，煤气温度较高，而相对边缘煤气流变弱，且有炉墙冷却，因而边缘煤气温度降的相对较低。

煤气温度随高度上升不断下降，下部高温区与料表面温度变化趋势较大。在相同高度，在中间部位中心的煤气流温度相对边缘大，下部高温区由于边缘回旋区的存在，中心相对边缘温度低。与料层水平情况不同的是，料层水平时炉顶煤气在径向分布均匀，中心与边缘温差较小，而料层倾斜中心煤气温度相对边缘要大得多，这就是由料面的倾角引起的。

软熔带成“倒V”型时，炉料分布均匀、料层倾斜角度合理，根据炉内温度分布的特点，当炉料下降到中温区时，温度达到炉料软化和融熔温度时，这就形成了各由矿石软熔层和焦窗（焦炭夹层）相间隔的软熔带，软熔带的形状、结构和位置对煤气阻力有着较大的影响，同时对高炉内上下部的煤气流再分布也有着非常大影响^[7]。料柱内部之中，煤气流在“焦窗”部位的分布最大，然后是炉料表面的中心位置。煤气流速随高度上升也在不断增大，且在相同高度矿石层的煤气流速相对焦炭层的大。煤气在炉料表面流动方向与料面相垂直，由于中心料面低于边缘，加之外界为空区，这样能压损最大限度的减少。

从图2.1可见，高炉中矿石层和焦炭层交替分布，由于矿石层透气性较差，煤气上升过程矿石层受到的阻力最大，因此煤气流在上升过程中压损最小、路径最短，煤气流动方向必须趋于垂直料面。由于焦炭层透气性较好，轴向上方的矿石层透气性较差，煤气趋于透气性好的地方流动，有向壁边流动的倾向。图2.1的右图是炉料各层中煤气流动方向的简图，可见在某一层中，由于“整流”作用，煤气在各个料层中的流动方式趋于固定。由此可知，煤气在高炉内部上升过程中通过流动方向不断改变来减小压力损失^[8]。边缘煤气流沿炉壁上升，中心煤气流竖直上升，而处在中间的煤气呈波动向上流动，由于料层厚度和料层倾角的变化，这种波动幅度会不断发生变化^[9]。

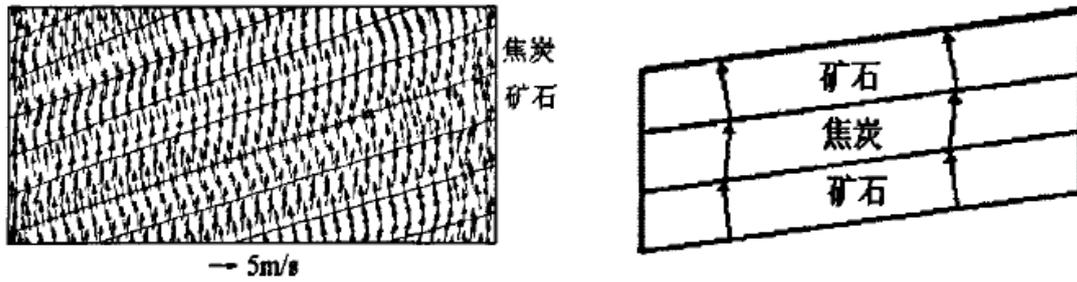


图2.1 料层倾斜时各料层内煤气流动方向

煤气在流过交替的矿焦层时流速在不断波动，但在上升过程煤气流速总趋势在增大，并在料面附近流速增大速率加快，直至达到最大。出料面后进入空区，煤气流速突然变小，但由于煤气流向中心，以至向上流速有所增大。煤气的流速在同种料层中的大小基本一致，这证明了均匀分布的料层对煤气流具有“整流”作用。但煤气流速在焦炭层和矿石层内不相等，由于此高度中心为矿石层，则在此标高下的水平面交叉穿过焦炭层和矿石层，由于矿石层孔隙度较小，煤气速度在矿石层相对要大些。高炉中心的煤气流速大，离壁面越近煤气流速越小，可见料面倾角的存在，较低的中心料面促进了炉顶中心煤气流的发展^[10]。因此料面形状对炉顶煤气流的分布有着较大的影响。

2.1.2 料层厚度

当炉料矿批增大时，矿石层的厚度增加，压差也会随之增大。对于无钟炉顶，由于依靠旋转溜槽布料，在布料时可以人为地控制矿焦比沿径向有较小的波动，因此对于无钟炉顶高炉，中心气流阻力只有在矿石批重增加到一定程度后才增大，同时边缘气流阻力也随之增大。高炉总压差有所增加，但远小于对钟式高炉的影响^[11]。

煤气在软熔带“焦窗”数减少，而厚度增大，煤气流更加集中于软熔带顶部某一“焦窗”，但随着均匀料层的“整流”，最终料层中煤气分布差别不大。料层厚度增大煤气流分布基本不变，所以料层厚度对煤气流的总体分布影响较小。但从局部流速分布可看出，由于料层增厚，煤气在矿焦层流动时波动更为明显，见图 2.2(a)和(c)。

图 2.2(d)为软熔带处煤气压力分布情况，可见当料层增大后煤气在软熔带的压损减小，因而料层增厚可以减小压损，同时料层数减少也可以减少界面效应带来的压力损失。从图 2.2(b)可看出煤气等压线在焦炭层更趋于水平，在矿石层更趋于平行料面，正是由于煤气压力这样的分布，减小了压力损失，才造成煤气波浪状的上升。从煤气的流动轨迹可看出，随高度上升煤气波浪状流动变剧烈，直至穿出料面，同时煤气这种流动方向在边缘较中心明显，在高炉中心煤气流向基本竖直向上。从各图中均可清楚看出煤气流在“焦窗”处聚集并改变流动方向，而在穿跃块状带各料层中向均匀分布发展的过程^[12]。因而，料层厚度增加，高炉煤气在料层间波动的越明显，即在矿石层煤气偏向炉壁的流动更显著，幅度更大，这样增大了煤气的流动距离，有利于提高煤气利用率。

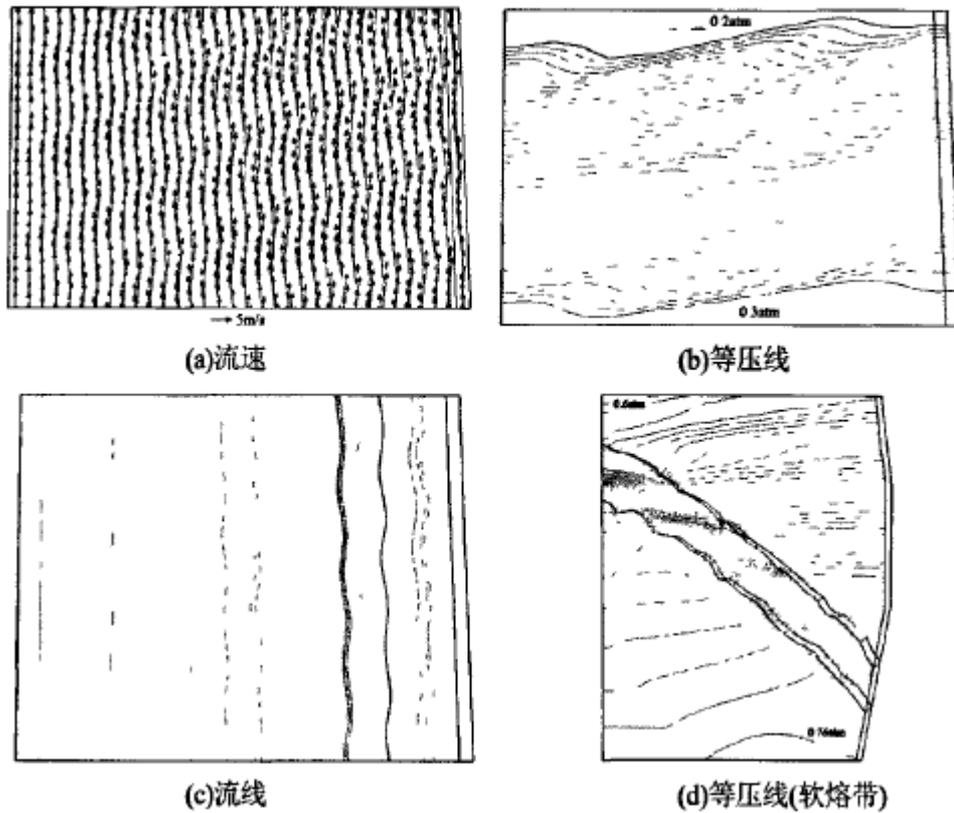


图 2.2 流线和等压线分布及局部煤气流速

2.1.3 料柱高度

高炉实际生产中，料线不仅影响料面堆尖的位置，也会影响料柱的总厚度。料柱总厚度减小，料层“整流”路径缩短，使炉顶煤气速度受下部软熔带的影响增大，同时也减小了煤气的总压力损失^[13]。图 2.3 为料线下降后，炉顶煤气温度在径向上的分布曲线。从曲线分布可见，煤气中心温度比边缘高，其平均温度高于原料柱炉顶煤气温度。因而料线降低，炉顶煤气温度升高，这不利于炉顶设备的长寿。

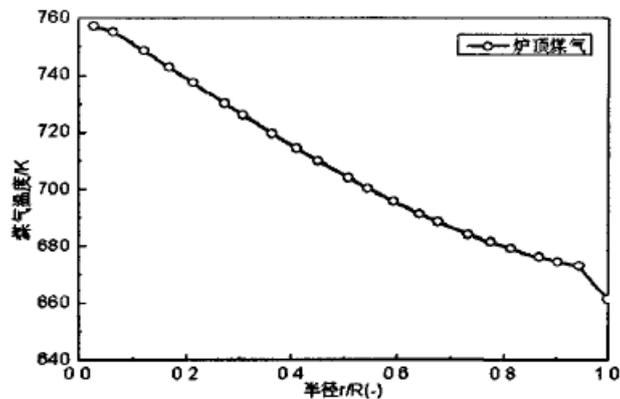


图 2.3 料线下降炉顶煤气温度分曲线

料柱厚度对“整流”的影响较大，如果料柱太厚，煤气“整流”作用过强，则出软熔带后的原始煤气分布将发生重新分布，从而使软熔带对上部煤气分布影响可以忽略，这也对软熔带形状的估测带来困难。

2.2 炉料径向分布

2.2.1 炉料透气性

炉料透气性的径向分布对高炉煤气流分布有着重要的影响，炉料透气性在径向分布差异很大，主要是炉料粒度不均匀引起的，大颗粒炉料由于空隙度较大，在布料时滑向底料面处，所以该料层透气性好。

中心煤气流发展好，热传递和间接还原发展较好，软熔带成呈 Δ 型，并且和炉料均匀分布时相比堆角要大些，这样就增加了软熔带位置的“焦窗”数目^[14]。同时，由于软熔带处的煤气流速增加，软熔带会逐渐厚度变薄，这些都将减少煤气流在软熔带的压损。炉身内煤气流在中心分布较大，尤其是在软熔带和料表面附近，即中心炉料透气性好，煤气流速相对大，并随高度上升流速在不断增大，表现煤气流中心发展，而炉墙边缘煤气流分布相对较小。由于中心透气性增强，炉顶煤气流速增大，而炉壁透气性虽未发生改变，但由于煤气趋向中心发展，则壁边煤气流速相应减小。中心煤气流比边缘要强，在径向上煤气流速从中心向边缘逐渐降低，但随高度上升流速都在增大，且中心与边缘的温差增大，流速在径向上的变化梯度变大。高炉中心具有较多的“焦窗”数，并“焦窗”在径向上显得很密集，这充分表明了中心分布有较强的煤气流。因而，煤气流分布受径向炉料透气性分布影响很大，各料层中径向透气性相对好的煤气流大，其他位置煤气流减小^[15]。

2.2.2 矿焦比

除透气性分布外，实际高炉操作中常通过装料方式来改变料层矿焦比在径向上的分布，从而来达到煤气流分布的控制。由于各种炉料自然堆角及装料落点不同，径向矿焦比分布不均，从而影响煤气流的分布^[16]。

由于中心分布的矿石较少，促进煤气流发展，从而将会有较大煤气流经过矿石层，虽然矿石层较薄，但由于流速较大，增加压损。高炉软熔带成“倒 V”型，煤气流中心发展，但各矿石层压损增大，这使高炉总压降上升。图 2.4 为煤气流速轴向和径向分布曲线，矿焦比小径向煤气流速大，而相对矿焦比大的抑制煤气流。

从 $r=0.5\text{m}$ 和 $s=3\text{m}$ 处煤气流速沿轴向的分布曲线可知，在软熔带顶点在中心，标高约为 11m ，而边缘位置约在 6m 处，两曲线比较可见，沿高度方向，中心煤气流一直比边缘要强，且随煤气上升中心流速增加的梯度比边缘大。从中心煤气流可看出，在软熔带顶部分布有很强的煤气流。从煤气流速径向分布图可看出，软熔带中心焦窗多，流速大，煤气流很大，而相对边缘煤气流很弱。从炉腰 $z=5.8$ 处流速曲线也能说明中心的强煤气流。随高度上升，软熔带影响下的初始煤气流在逐渐改变分布，边缘煤气流有所增大，从 $z=18\text{m}$ 和料表面煤气流的分布可见，中心煤气流速大，沿半径向边缘递减的分布趋势。

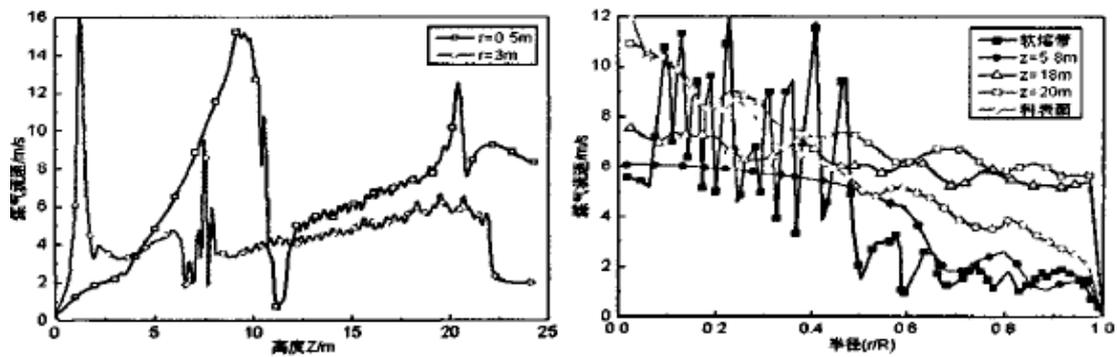


图 2.4 径向矿焦比分布不均时煤气流轴向体)与径向佑)分布曲线

2.2.3 局部透气性差

高炉生产中料柱常会出现局部料层透气性变差的现象,这将很大得改变内部煤气流的分布,增大煤气压损,甚至会导致悬料及管道的发生^[19]。简称透气性差区域为“LP区”(Low Permeability Zone)。

在“LP区”内,透气性差,煤气流速很小,而相对于“LP区”透气性好的区域煤气流速增大,且在其交界附近煤气流速达到最大,这是因为局部料层透气性差而使煤气发生“整流”,但“LP区”厚度较小,绕流的煤气未达到均匀分布,从而出现“LP区”外侧煤气流速较大。图 2.5 为“LP区”煤气流和压力分布的局部放大,从图 2.5(a)可清楚看出煤气绕流“LP区”的现象,同时也可发现其对周围料层煤气分布的影响。

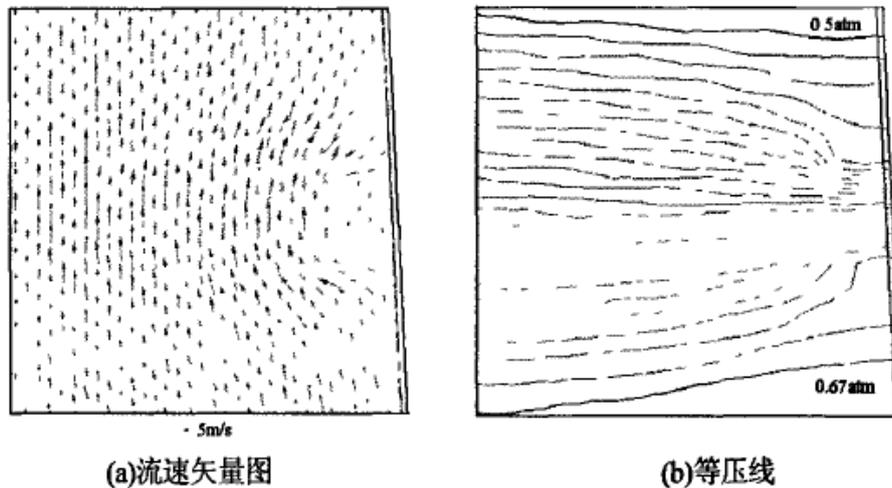


图 2.5 局部煤气流和压力分布图

煤气总压损增大,在“LP区”所在层压降梯度变大,压损增大,而相对“LP区”上下区域,由于壁边流速减小导致压力梯度相对变小^[20]。同时相对于“LP区”透气性好的区域压降梯度也有很大增加,这是由于料层易透气区域减小,煤气的流速增大而造成

的。由于炉料的“整流”，只有在“LP区”标高附近的料层压力分布发生变化，而对料柱其它区域的压力分布基本没影响。

煤气上升过程时，当接近“LP区”时，下方的煤气流在“LP区”受阻，开始改变方向绕过该区域，因而边缘气流聚集于“LP区”侧面，使径向煤气流分布发生巨变^[21]。随煤气继续上升，出“LP区”后，由于该区域上方煤气流少，压强较小，使煤气流再次发生变向，随煤气上升炉料对煤气快速“整流”，使煤气很快达到均匀分布，从而形成绕行“LP区”的现象。

随“LP区”宽度增大，料柱的总压损在快速上升，且宽度越大，压损增加速率也越大。可见当料柱有较大面积的“LP区”时，压力损失会增到很大，在实际操作中一定的鼓风压力，煤气总流量将减小，这与实际相符，当料柱透气性差时，高炉就不易接受风量。料柱总压损升高，意味着在“LP区”所在层的压损增大，而其宽度越大，压损上升地会更大，则煤气对料柱的作用力就大，这将很容易克服其上部料柱重力而导致悬料的发生。

在“LP区”较小时，其对上下煤气流分布的影响较小，在料层“整流”作用下，煤气上升过程中很快进行重新分布，以达到上部均匀炉料分布的煤气流分布情况^[18]。随透气差料层范围增大，其对上方的影响距离也在加深，可见，在一定的范围内，料层透气性对煤气流的影响距离随“LP区”的宽度增大而增大，但只要料柱足够厚，经过“整流”后的煤气流终将与上部炉料分布状况相一致。但当“LP区”的面积相当大，以致煤气绕行所用的压损大于穿过“LP区”，这时仅在“LP区”边缘的煤气才进行绕流，而在其下方的煤气流直接穿过料层，因而“LP区”对煤气流分布的影响距离不会增加，更有可能减小。

2.3 中心加焦

2.3.1 中心加焦的发明

由于高炉炼铁的炉料水平不高，尤其是焦炭的质量不好，使高炉块状带的透气性很差，而难以维持炉况顺行，这是一个在长久时间里让高炉工作者感到困扰的难题。直到90年代，随着国内外高炉不断向大型化发展，因精料技术的发展与高炉炉型的发展不同步，造成国内大量高炉常年处于失常状态，生产效率严重降低，为此众多炼铁厂付出了极大的代价^[17]。

国外学者为了解决这个始终困扰着高炉操作者的问题，从很早开始就对改善高炉顺行的操作技术这一问题进行了大量的研究。1987年，日本神户钢铁公司开发出了能够解决这一难题的技术即中心加焦技术^[22]。其技术原理是使高炉中心形成一个无矿区，在这个无矿区填充焦批的15%~25%左右的焦炭，使料柱上部形成一个中心焦柱，由于焦炭的孔隙度较大，这样能够有效的改善上部料柱的透气性。由于中心焦柱区焦炭的气化反应会因此降低，所以焦炭进入炉缸时依然有较大的粒度和较好的强度，并能使中心死料

柱的置换时间变短，从而改善炉缸中心死料柱的透气性和透液性^[18]。

2.3.2 中心加焦的应用

自 1991 年起，国内炼铁厂开始逐渐学习日本开发的这项中心加焦技术，鞍钢在 1992 年对其厂下的一座高炉应用中心加焦技术进行试验，结果成效非常好。1991 年武钢结合自身实际情况，对中心加焦技术进行改良，研发出了锥台溜管式中心加焦技术，获得了得了十分宝贵的经验。到了 20 世纪末，无钟炉顶布料技术迅速发展起来，促使邯钢、湘钢、攀钢开始将中心加焦技术运用到高炉生产当中。济钢自 2004 年以来，接连新建了三座 1750m³ 的高炉，并迅速投入生产当中，却一直没有使用中心加焦技术，直到 2008 年，因焦炭质量下降，高炉炉况频繁出现异常情况且得不到妥善解决，公司的生产秩序受到严重破坏，为了摆脱困境，济钢从 2008 年的年末开始在 3 座 1750m³ 高炉上使用该技术，2009 年，在燃料条件不佳的情况下，炉况异常问题得到解决，没有发生一次大的炉况失常。

2.3.3 中心加焦的优势和缺陷

中心加焦的优势：

①采用中心加焦技术可以提升块状带的透气性，使软熔带的形状趋于倒 V 型合理分布，使高炉能够接受更多的风量，遇到类似焦炭质量大幅度波动，高炉紧急休风等外部因素时，炉况更容易恢复，炉况失常的几率大幅度降低^[18]。

②采用中心加焦技术，能使缸死料柱的置换速度加快，提高炉缸的透气性和透液性，炉缸的寿命能得到大大的延长^[23]。

③采用中心加焦技术能为改善高炉操作提供技术支持，如提高煤比、降低焦比、扩大矿批等。

④采用中心加焦技术，使高炉中心煤气流较为发展，有利于高炉通过中心煤气流将锌排出，可减少锌富集而给高炉顺行带来的阻碍。

中心加焦的缺陷：

①采用中心加焦技术对炉顶设备条件要求较高。钟式炉顶实现中心加焦的难度比较大，无钟炉顶因中心加焦角度要求炉料不碰溜槽直接落在中心区域，所以在溜槽形式的选择，溜槽的倾动速度的设定都要满足中心加焦的要求，必须保证有 10%—15% 的焦炭垂直布到高炉中心区域^[17]。采用中心加焦技术的高炉为了保证效果尽量不要使用十字测温枪，因为十字测温设备对中心加焦的效果有相当大的影响。

②采用中心加焦技术会使中心煤气的利用率明显降低，高炉燃料消耗也会明显增加。因为溜槽在布料过程中，会造成中间环带有 50% 左右的焦炭，中间环带的煤气利用率则会因此而降低，这是中心加焦技术最大的缺陷，需要调节下料闸开度或扩大矿批来降低这个缺点带来的影响。

3 高炉煤气流分布模拟

3.1 高炉散料层模型建立

在高炉散料层 Fluent 模型建立中，利用 Gambit 软件模拟高炉散料层矿石和焦炭的分布状况，建立料柱模型。

表 3.1 模型假设条件

	入口数	入口速度 (m/s)	入口直径 (m)	出口直径 (m)	料层厚度 (m)	矿石层数	焦炭层数	矿石孔隙度	焦炭孔隙度
模型 1	6	1,2	2	8	1.8	3	3	0.38	0.52
		4,4							
模型 2	6	1,2	2	8	1.6	4	3	0.38	0.52
		4,4							
模型 3	6	1,2	2	8	1.6	4	3	0.48	0.62
		4,4						0.38,0.38	0.52
模型 4	6	1,2	2	8	1.6	4	3	0.58	0.72
		4,4						0.38,0.38	0.52
模型 5	6	4,2	2	8	1.6	4	3	0.38	0.52
		1,1							
模型 6	6	1,4	2	8	1.6	4	3	0.38	0.52
		2,2							
		4,1							

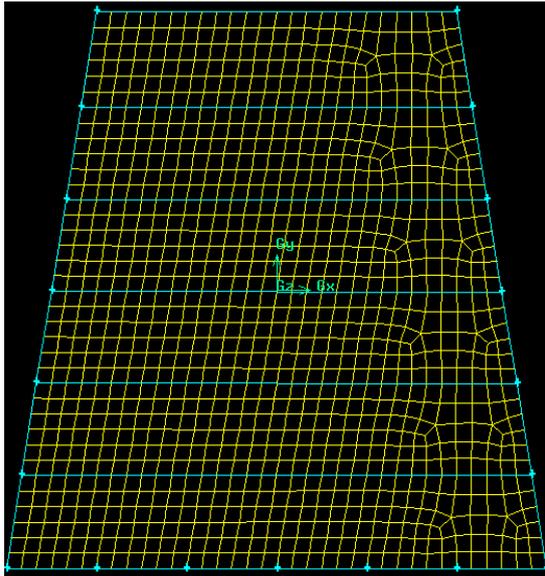


图 3.1 三层矿石三层焦炭布料模型

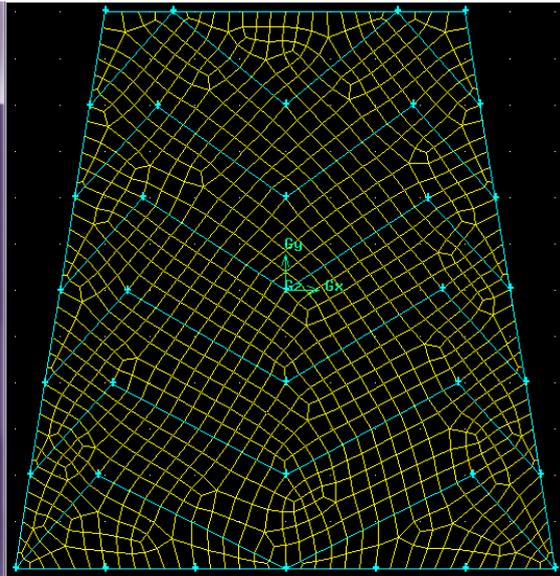


图 3.2 有倾角的布料模型

3.2 数值计算

炉料的孔隙度是影响料柱透气性的一个重要参数，对高炉的顺行有很大影响，在利用 Gambit 软件建立二维网格模型，Fluent 流体软件进行数值模拟的过程中，煤气流在多孔介质层中从下往上运动，煤气流是从散料层中的矿石和焦炭之间的缝隙以及介质本身的缝隙中流过，所以矿石和焦炭的孔隙度是在模拟过程中很重要的数据。

高炉散料层模拟过程中，散料层中矿石和焦炭的粘性阻力和惯性阻力也是需要考虑的因素，煤气流的流动的情况和运动方向变化情况与其有很大关系，如果粘性阻力和惯性阻力过大，煤气流的顺行就会受到阻碍。煤气流速也直接受其影响，煤气流速过大，高炉会出现悬料；煤气流速过小，会产生崩料，影响到高炉的正常生产。

煤气本身密度和粘性力对模拟过程也有很大影响，不仅对煤气的流动状态和运动方向有很大关系，而且对高炉炉料的稳定顺行有重要影响。根据以下公式可计算出上述参数。

$$\text{粘性阻力系数: } \frac{1}{\alpha} = \frac{150(1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3}$$

$$\text{惯性阻力系数: } C_2 = \frac{3.5(1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3}$$

查阅相关文献所得数据如表 3.2 和表 3.3 所示：

表 3.2 炉料参数设定

	孔隙度	直径 (mm)	密度 (kg/m ³)	比热容 (700℃)
焦炭	0.52	40	990	1127
矿石	0.38	15	3520	799

表 3.3 煤气参数设定

	密度 (kg/m ³)	粘度 (kg/m s)	比热容	导热系数	压强 (Pa)
煤气	2.67	3.14×10^{-5}	1.413	0.02	3.2×10^5

带入数据计算结果为：当焦炭 $\varepsilon = 0.32$ 时， $\alpha_{\text{焦}} = 5.8 \times 10^{-7}$ ， $C_{2\text{焦}} = 2073$

当焦炭 $\varepsilon = 0.42$ 时， $\alpha_{\text{焦}} = 1.8 \times 10^{-6}$ ， $C_{2\text{焦}} = 782$

当焦炭 $\varepsilon = 0.52$ 时， $\alpha_{\text{焦}} = 5.0 \times 10^{-6}$ ， $C_{2\text{焦}} = 341$

当焦炭 $\varepsilon = 0.62$ 时， $\alpha_{\text{焦}} = 1.4 \times 10^{-5}$ ， $C_{2\text{焦}} = 159$

当焦炭 $\varepsilon = 0.72$ 时， $\alpha_{\text{焦}} = 3.9 \times 10^{-5}$ ， $C_{2\text{焦}} = 75$

当矿石 $\varepsilon = 0.18$ 时， $\alpha_{\text{矿}} = 8.5 \times 10^{-9}$ ， $C_{2\text{矿}} = 41015$

当矿石 $\varepsilon = 0.28$ 时， $\alpha_{\text{矿}} = 4.1 \times 10^{-8}$ ， $C_{2\text{矿}} = 9568$

当矿石 $\varepsilon = 0.38$ 时， $\alpha_{\text{矿}} = 1.4 \times 10^{-7}$ ， $C_{2\text{矿}} = 3296$

当矿石 $\varepsilon = 0.48$ 时， $\alpha_{\text{矿}} = 4.0 \times 10^{-7}$ ， $C_{2\text{矿}} = 1372$

当矿石 $\varepsilon = 0.58$ 时， $\alpha_{\text{矿}} = 1.1 \times 10^{-6}$ ， $C_{2\text{矿}} = 628$

3.3 高炉散料层模拟结果

通过 Fluent 数值模拟得出结果：

① 模型 1

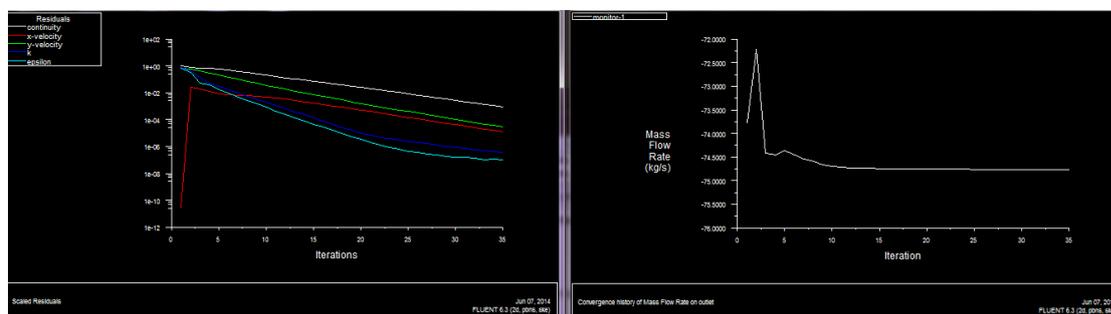


图3.3 收敛曲线

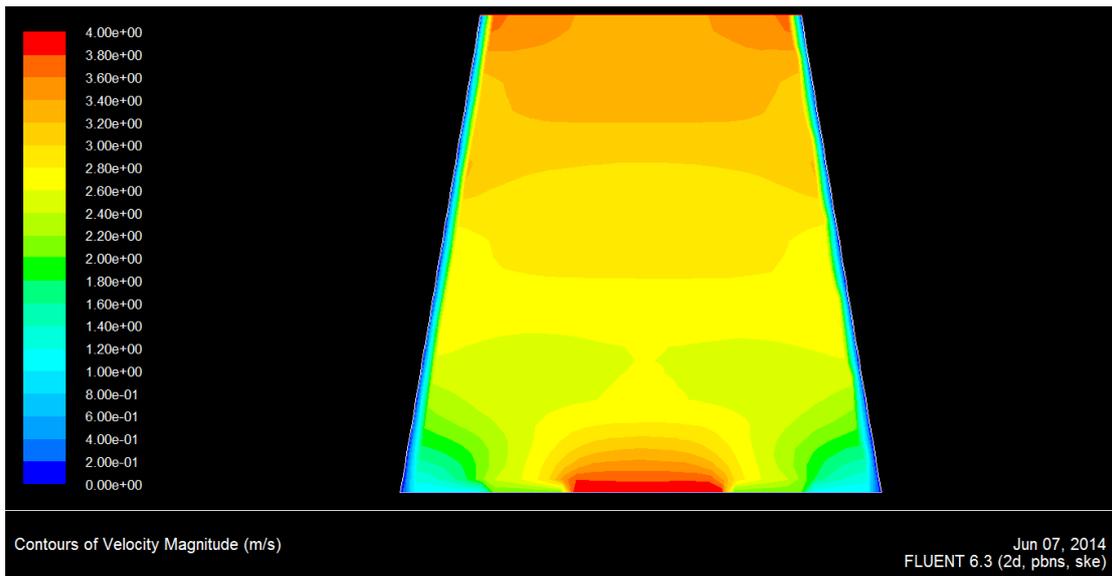


图3.4 速度分布模拟图

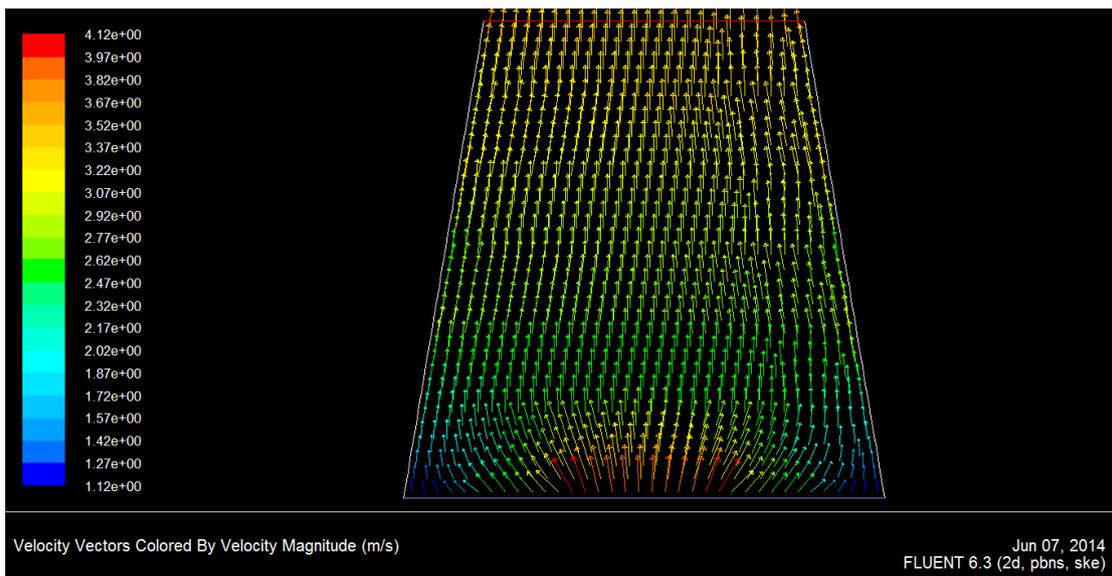


图3.5 速度矢量图

② 模型2

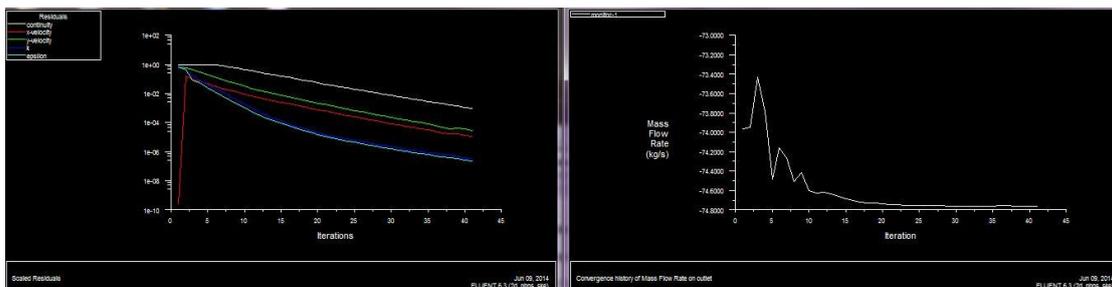


图3.6 收敛曲线

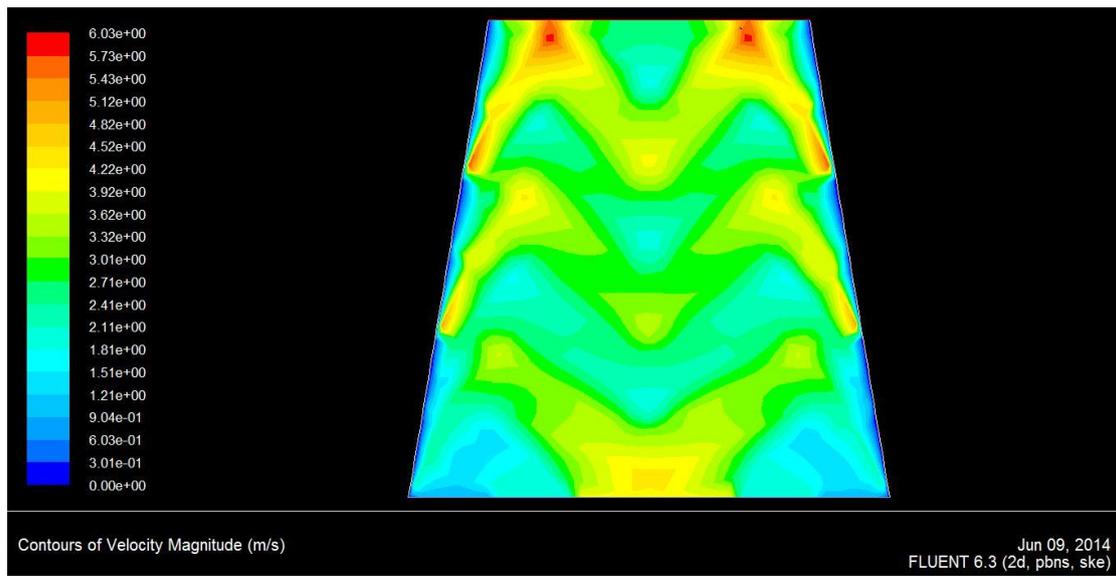


图3.7 速度分布模拟图

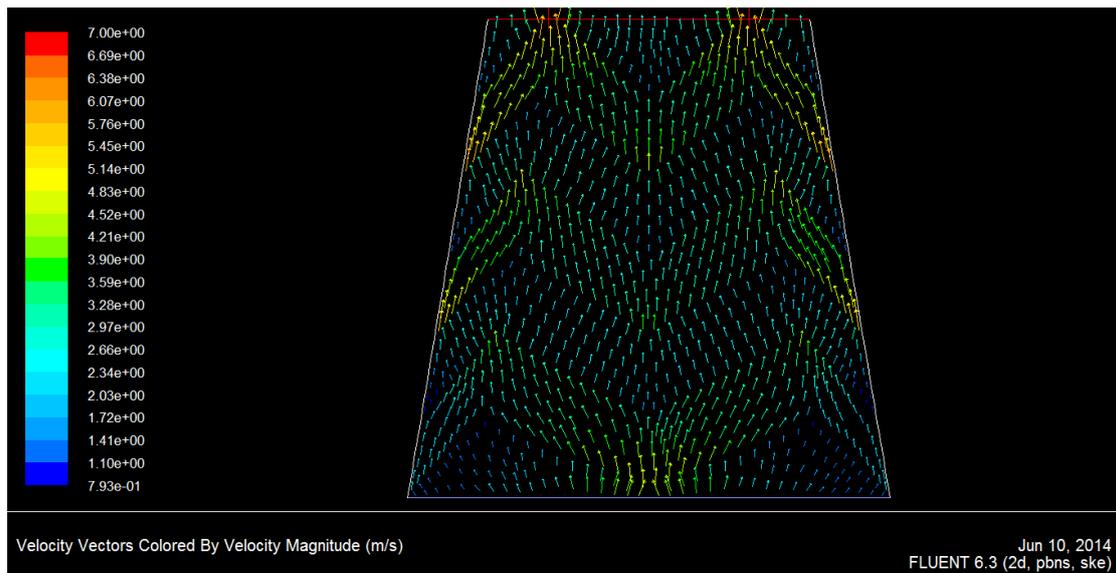


图 3.8 速度矢量图

③ 模型 3

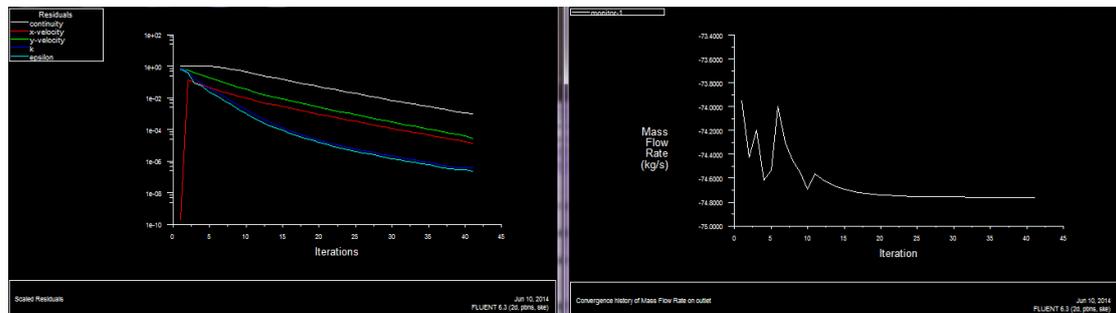


图3.9 收敛曲线

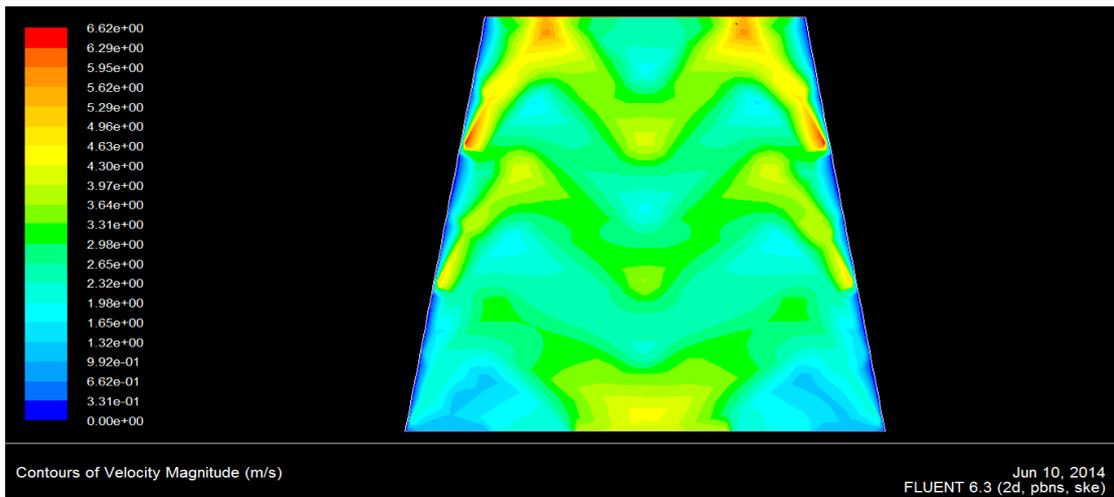


图3.10 速度分布模拟图

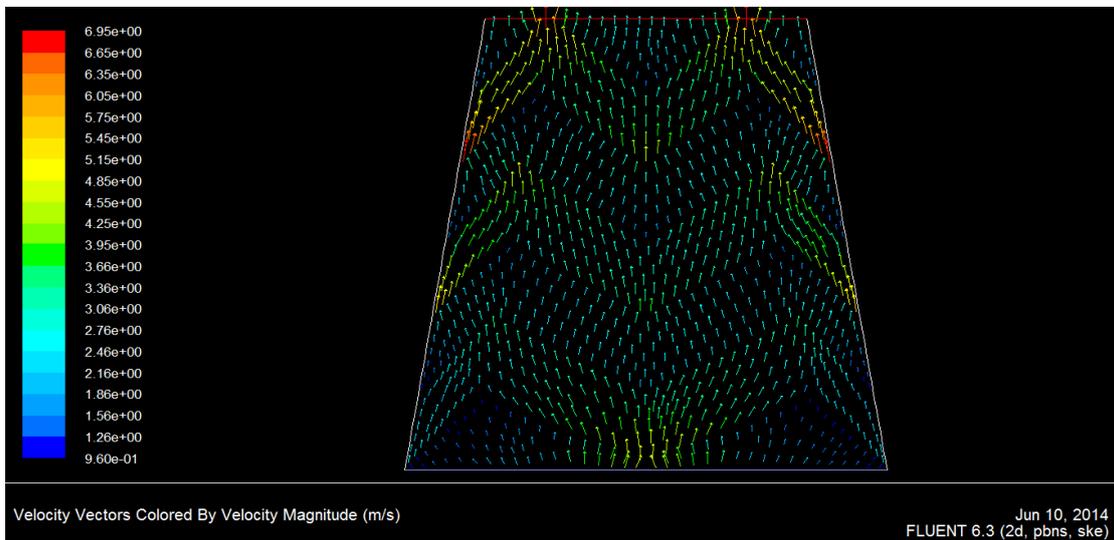


图 3.11 速度矢量图

④ 模型4

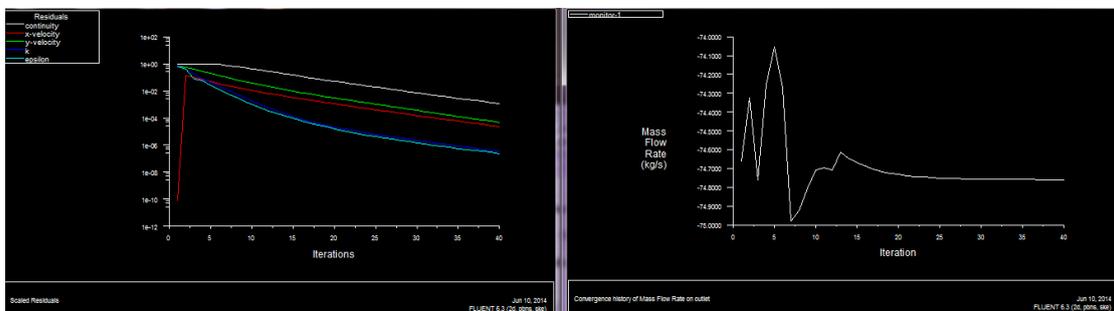


图 3.12 收敛曲线

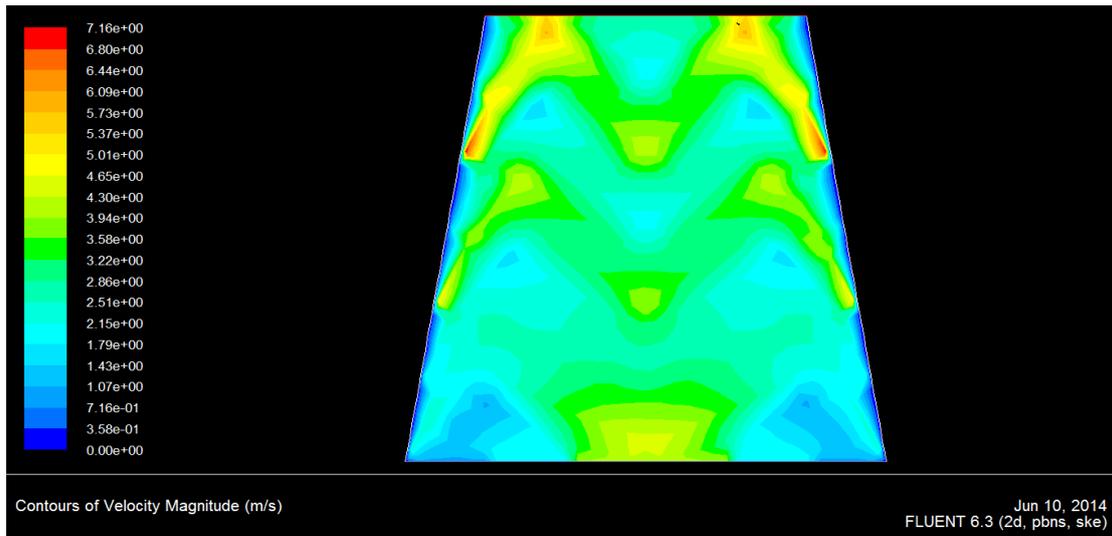


图 3.13 速度分布模拟图

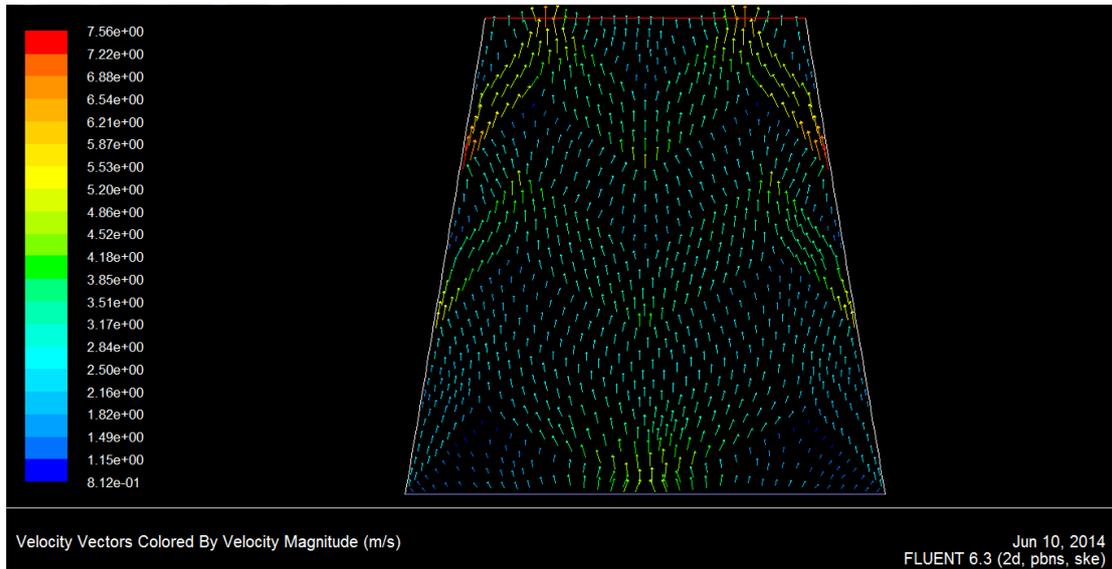


图 3.14 速度矢量图

⑤ 模型 5

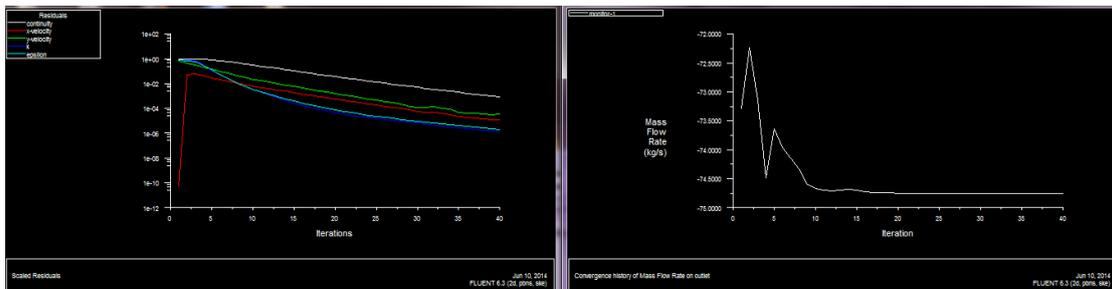


图 3.15 收敛曲线

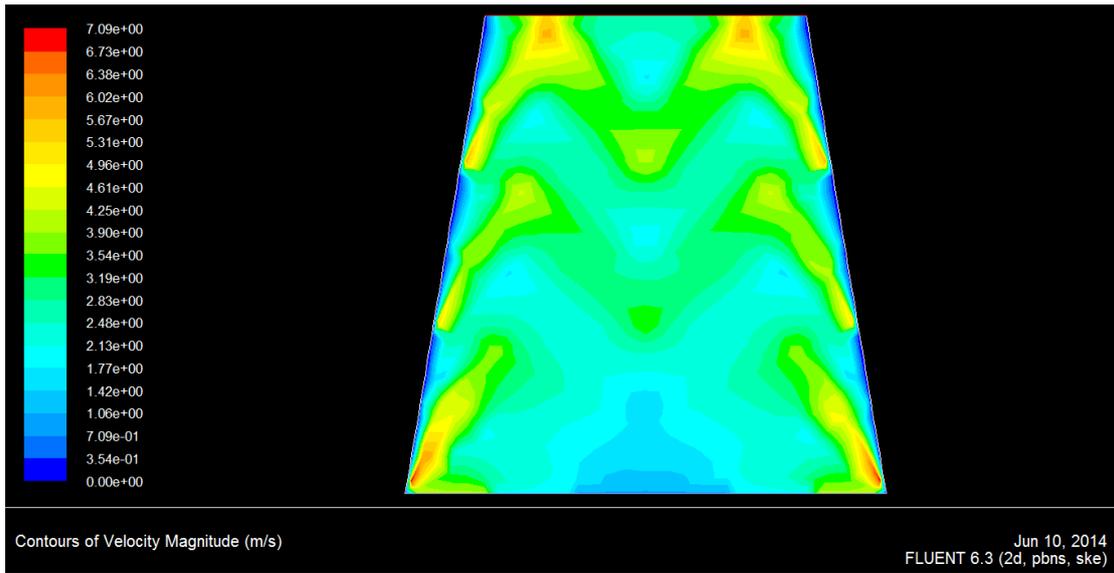


图 3.16 速度分布模拟图

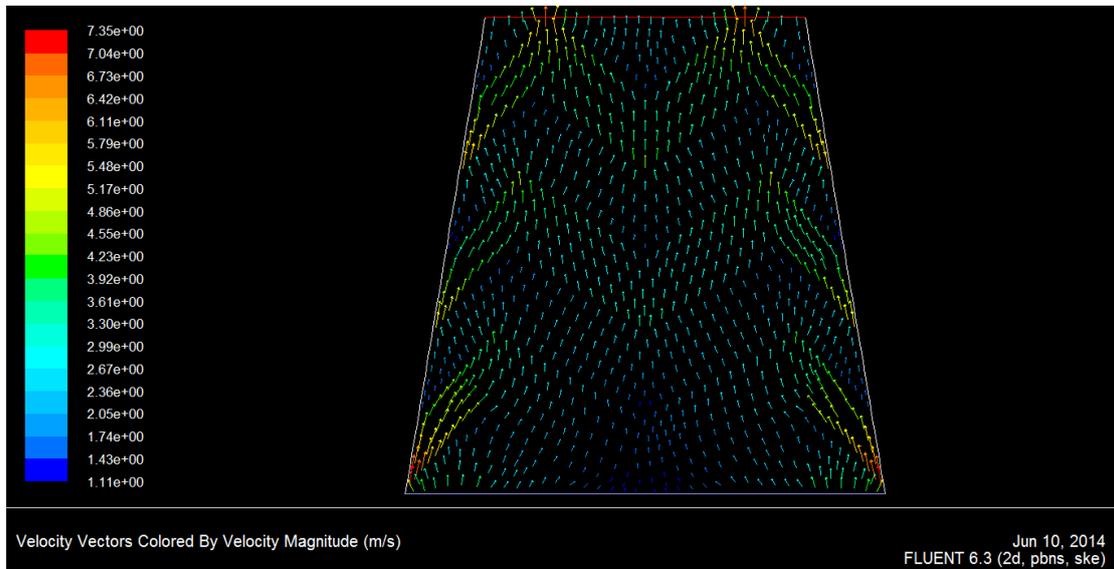


图 3.17 速度矢量图

⑥ 模型 6

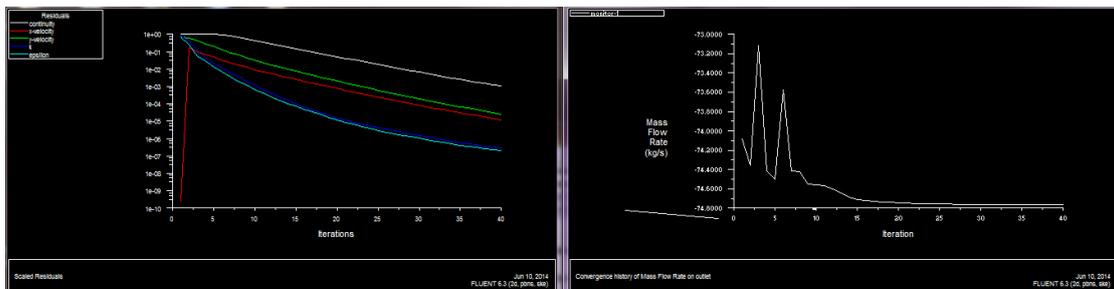


图 3.18 收敛曲线

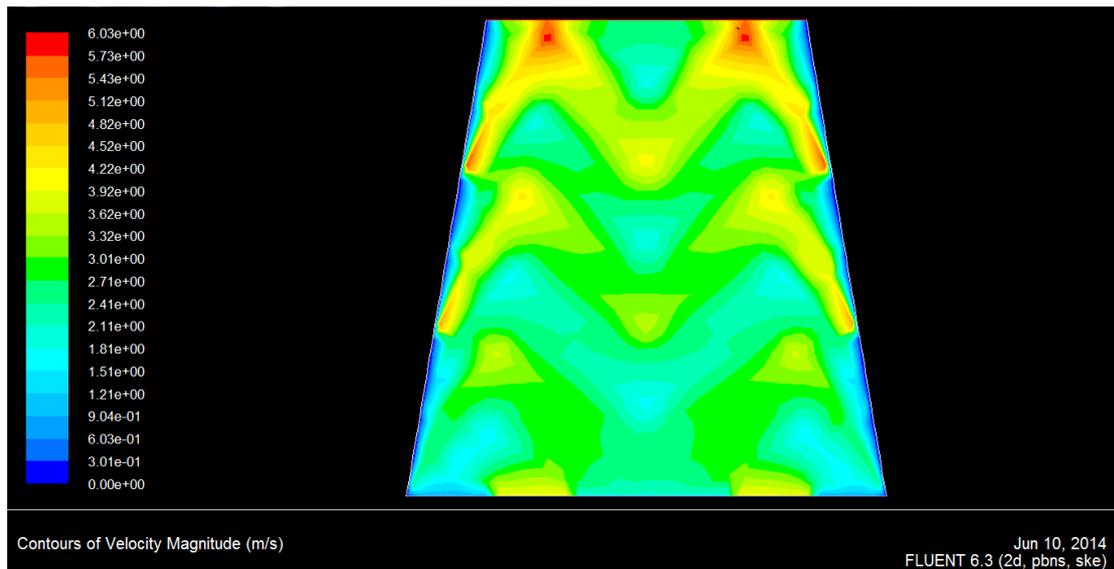


图 3.19 速度分布模拟图

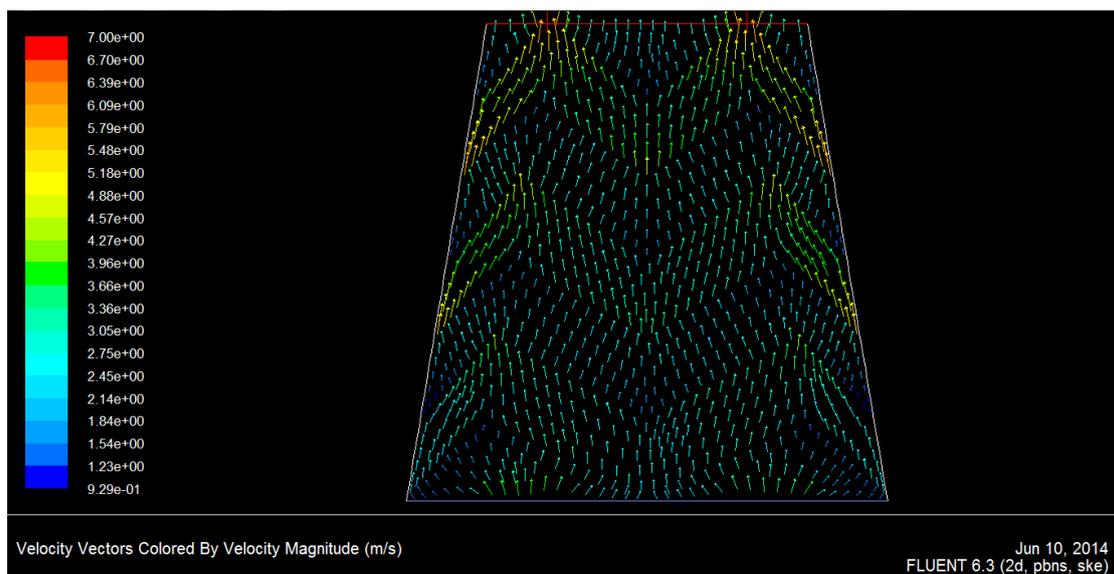


图 3.20 速度矢量图

图 3.4 和图 3.5 是模型 1 三层矿石三层焦炭的模拟图,图 3.4 从整体上看煤气流速分布均匀,矿石层和焦炭层有明显的界线,煤气流速自下而上逐渐增大。煤气刚进入散料层时因初始流速大小不同,在散料层和不同流速的煤气流相互之间的影响下流速的变化较大,但经过一层矿石层后煤气流速在下一层焦炭层中基本一致,速度均匀分布,这就是“整流”的结果。煤气流速在后面的散料层中也都均匀分布,总体上呈层状分布状态。煤气流速逐渐增大是因为煤气的流量是一定的,但随着高度的增大,横截面积减小,流

速就会增大，这符合实际情况。从图 3.5 还可以看出，煤气流是连续的。

图 3.7 和图 3.8 是模型 2 有倾角的布料模拟图，与图 3.4 和图 3.5 的速度分布图比较可以发现，煤气流速随高度上升也在不断增大，且在相同高度焦炭层的煤气流速相对矿石层的大。焦炭层与矿石层交替分布，煤气上升过程中常在透气性小的矿石层受阻，为达到煤气流经过路径最短、压损最小，煤气流动方向趋于垂直料面。由于轴向上方的矿石层影响，在透气性较好的焦炭层，则煤气流动方向偏向于壁边，可见在某一层中，煤气的流动方式趋于固定，这也是“整流”的结果。因而可知，煤气在上升过程中在不断地改变流动方向以减小压损，中心流动成竖直向上，边缘流动沿炉壁上升，而处于中间的煤气成波动状流动，且这种波动会随料层倾角和料层厚度的增大而变得剧烈。

图 3.10 和图 3.11 是模型 3 在模型 2 有倾角的布料模型的基础上，改变矿石层和焦炭层的孔隙度，将上部料层中矿石层和焦炭层的孔隙度适当增大，下部料层中矿石层和焦炭层的孔隙度适当减小而得到的模拟图。与图 3.7 和图 3.8 的速度分布图比较可以发现，煤气流速大的区域缩小，焦炭层流速整体减小。

图 3.13 和图 3.14 是模型 4 在模型 3 的基础上，进一步增大上部散料层的孔隙度，减小下部料层的孔隙度而得到的模拟图。与前两者相比可以发现焦炭层中流速大的区域越发缩小，流速小的区域越发扩大，且对下部比上部影响更大。孔隙度的改变对煤气流速下部有很大的影响，但上部受到的影响较小。

模型 2 中心入口煤气流速较大，模型 5 边缘入口煤气流速较大，而模型 6 介于二者之间。比较三种模型的模拟图图 7，图 16 和图 19 可以发现，下部煤气流分布有很大改变，但中部和上部改变不大。从中可以知道初始的煤气流分布影响距离十分有限，中下部煤气流分布对上部煤气分布影响较小。

4 结 论

本文以 **Fluent** 流体软件建立模型对高炉煤气流的流动分布进行模拟，通过改变高炉焦炭和矿石的布料方式对煤气流流动状态进行数值模拟，通过不同布料方式的模型模拟进行对比，可得出以下结论：

(1) 高炉散料层中，料面倾角对煤气流有很大的影响，当高炉布料有一定角度时，煤气流的运动状态发生改变，特别对矿石层的影响较为明显。所以在生产操作中对高炉布料的过程中，倾角对煤气流的影响必须考虑。

(2) 料层孔隙度对煤气流的分布有很大影响，料层孔隙度小的区域煤气流发展，孔隙度大的区域则抑制。初始的煤气流分布影响距离十分有限，中下部煤气流分布对上部煤气分布影响较小。

(3) 煤气流在上升过程中的流动路线成周期性变化，在矿石层煤气流动方向垂直料层面，而在焦炭层煤气偏向炉墙流动，而且该流动方式料层越厚表现的越明显。

(4) 块状带对煤气流分布有很强的“整流”作用，因而布料是煤气流合理分布的关键所在，合理的炉料分布决定了好的煤气流分布。

参考文献

- [1] 刘云彩. 高炉布料及控制煤气分布攀钢炼铁厂演讲[P], 2009.
- [2] 吴启常, 黄晓煌. 高炉长寿技术研究, 鞍钢技术[J], 2003, 2: 1-9.
- [3] 王玉庆. 高炉合理煤气流分布探讨[J]. 南钢科技与管理, 2004, 3: 19-23.
- [4] 冯广斌, 曹锋, 袁苗苗, 等. 长钢 9 号高炉煤气流分布的合理控制[J]. 铁, 2013, 32(4): 42-46.
- [5] 朱清天. 高炉内煤气流分布的研究[D]. 北京: 北京科技大学钢铁冶金系, 2007.
- [6] 朱清天, 程树森. 高炉上部煤气流调剂影响研究[J]. 钢铁, 2008, 43(2): 22-25.
- [7] 傅世敏, 刘子久, 安云沛. 高炉过程气体动力学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990.
- [8] 林成城, 项钟庸. 宝钢高炉炉身设计结构差异对煤气流分布影响[J]. 宝钢技术, 2009, (4): 53-56
- [9] 许永华. 基于料面温度场和布料模型的高炉煤气流分布在线检测方法及应用[D]. 湖南: 中南大学, 2007.
- [10] 唐顺兵. 大型高炉合理煤气流的分布及控制[J]. 钢铁研究, 2011, 39(3): 46-50.
- [11] 于苏杭, 毕学工. 基于模糊推理的高炉煤气流分布模式识别方法[J]. 河南冶金, 2011, 19(3):5-9.
- [12] 张雪松, 青格勒, 马丽, 等. 数学模型模拟高炉煤气流与压力分布[C]. 2010 年全国炼铁生产学术会议暨炼铁年会, 2010.
- [13] Brannbacka J, Torrkulla J, S axenH. Simple simulation model of blast furnace hearth. Ironmaking & Steelmaking, 2005. 32 (6):486-497.
- [14] Saxen H Brannbacka J . Dynamic model of liquid levels in the blast furnace hearth. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2005. 34(2):116-122
- [15] 吴敏, 聂秋平, 许永华, 等. 高炉煤气流分布性能可拓评价方法研究及其应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(3): 1001-1008.
- [16] 朱清天, 程树森. 高炉块状带煤气流分布的数值模拟[C]. 杭州: 中国金属学会, 2006.
- [17] 杨立春. 高炉中心加焦技术探讨[J]. 本钢技术, 2010, 5: 6-8.
- [18] 余乐安, 方颖. 中心加焦技术的理论性研究[J]. 浙江冶金, 2009, (1): 45-47.
- [19] Helle M, Saxen H .Simulation of tuyere-raceway system in blast furnace. Ironmaking and Steelmaking. 2006, 33(5): 407-415.
- [20] C.Q .Zhou, D.Huang,Z .Chen,et al .Simulation of Raceway Conditions in Blast Furnace.Osaka: Proceedings ICST'06,2006:500-507.
- [21] 安剑奇, 吴敏, 何勇, 等. 基于分层递阶融合算法的高炉料面煤气流分布软测量方法[J]. 自动化学报, 2011, 37(4):496-502.
- [22] 薛崇盛, 曹卫华, 吴敏, 等. 高炉料面煤气流分布识别方法[J]. 清华大学学报(自然学报), 2008, 48 (S2):1785-1789.

- [23] 陈川, 程树森. 炉缸煤气流分布的影响因素[J]. 钢铁, 2012, 47(12): 24-29.

致 谢

在毕业设计选题开始时，我是主动选择了高绪东老师的该课题。高老师从上学期期末开始就致力于我们的毕业设计中。寒假前帮我们搜集课题相关文献，让我们初步了解课题的研究方向。本学期开学以来，坚持每周至少两次的面对面辅导。从开题报告到文献综述再到软件学习等所有过程，高老师都和我们一起探讨。高老师孜孜不倦、治学严谨的工作态度值得我们学习。在本课题学习探讨的过程中还得到了李鹏、肖辉等同学的大力帮助。

同时，感谢相处四年的同学和舍友，他们在学习、生活上给我的鼓励和帮助，使我顺利完成学业。此外，还交到了好多好朋友和知己，使我四年大学生活变的丰富多彩。

在此，谨向所有关心，支持和帮助我的领导、老师、同学和朋友们表示最衷心的感谢！