

景德镇陶瓷学院 科技艺术学院

毕业设计说明书

题目：窑顶 180° 搅拌气幕对窑内流场温度场影响初探

学 号：201030453119

姓 名：李 剑 鹏

院（系）：科技艺术学院工程系

专 业：热能与动力工程

指导老师：胡 国 林

日 期：2014. 5. 30

目 录

毕业设计任务.....	3
中英文摘要.....	4
1 绪论.....	7
1.1 陶瓷辊道窑发展简介.....	7
1.2 陶瓷辊道窑特点.....	8
1.3 文献综述.....	9
1.4 本课题的目的与意义.....	10
2 Fluent 软件简介.....	13
2.1 Fluent 的功能及特点.....	13
2.2 Fluent 系列软件简介.....	15
2.3 Fluent 6.3 的功能模块.....	17
2.4 Fluent 6.3 的分析过程.....	19
3 仿真对象简介.....	22
4 几何网格模型的建立.....	26
4.1 文件的创建及其求解器的选择.....	26
4.2 建立辊道窑模型.....	26
4.3 创建气幕风管.....	27
4.4 窑顶 180° 的搅拌气幕管安置.....	27
4.5 窑内阻力简化模拟.....	28
4.6 设置边界类型.....	29
4.7 确定边界面的内部各线分布并创建窑体的结构化体网格.....	30
4.8 输出网格并保存会话.....	35
5 用 Fluent 进行流场与温度场的仿真计算.....	36
5.1 与网格相关的操作.....	36
5.2 建立求解模型.....	36
5.3 创建新流体.....	37
5.4 设置边界条件.....	37
5.5 求解.....	38
6 仿真结果与分析.....	40
6.1 计算结果的速度场.....	40
6.2 计算结果的温度场.....	40
6.3 计算结果的速度矢量场.....	41
6.4 计算结果的等压线.....	42
6.5 出口截面的温度曲线.....	43
7 结 语.....	46
7.1 收货与体会.....	46
7.2 论文结论.....	47
7.3 本课题的不足及今后研究方向.....	47
后 记.....	49
参考文献.....	50
附：文献调研报告.....	51

毕业设计任务

景德镇陶瓷学院科技艺术学院毕业设计任务书

系别： 工 程 系

时间： 2014 年 1 月 18 日

专 业	热能与动力工程	班 级	热工 2010
学生姓名	李剑鹏	指导教师	胡国林
题 目	窑顶 180° 搅拌气幕对窑内流场温度场影响初探		
<p>设计技术指标、参数或课题主要内容：</p> <p>1、用 Gambit 软件建立仿真对象的几何体网格模型并输出 **.msh 网格文件（用 ACAD 画出本课题仿真对象的一节窑的三视图，以加深对它结构的理解，窑结构数据可参照教材中例子的辊道窑数据，窑顶均匀设置一排 5~8 根直径为 50mm 的气幕风管）。</p> <p>2、运用 Fluent 软件进行 180° 窑顶搅拌气幕对窑内流场与温度场仿真研究（窑内烟气主流速度可参照教材中辊道窑数据约为 1.5~2.0Nm/s；气幕风温度 80~100℃，流速为 15~50Nm/s 可变）。</p>			
<p>基本要求：</p> <p>1、几何体网格模型要科学合理，要用图解加文字说明方式写出完整的建模过程（可作为毕业论文的一章）。</p> <p>2、建立科学的求解模型，流体参数与边界条件选择要尽量符合实际。</p> <p>3、计算结果要包括窑内烟气速度分布图、温度分布图、温度等值曲线图等（时间有可能可以选不同喷出风流速从而得出各图分析比较）。</p> <p>4、论文写作按学校要求规范、完整，语句通畅，条理分明。</p>			
<p>工作进度：</p> <p>春节前：学习掌握 Gambit 与 Fluent 软件，完成一个二维的网格模型（边学边做），春节后：尽可能完成三维的网格模型。</p> <p>第 1-3 周：参加毕业实习，结合课题任务收集并上网查阅相关资料。</p> <p>第 4-8 周：运用 Fluent 软件进行 180° 窑顶搅拌气幕对窑内流场与温度场仿真研究。</p> <p>第 9-12 周：完成毕业论文初稿。</p> <p>第 13-14 周：按学院要求撰写毕业论文正稿（含学校要求的英文摘要、英文文献与翻译等）。</p> <p>第 15 周：交毕业论文与仿真软件电子稿给指导老师审改。</p> <p>第 16 周：按学院要求打印毕业论文上交，准备参加答辩。</p>			

摘要

在陶瓷工业中,陶瓷成品烧成质量的优劣主要取决于陶瓷窑炉内的温度、气氛、以及压力三大制度,而其中温度制度对陶瓷烧成质量的影响尤为重要。陶瓷窑炉内的温度场分布除受到窑炉本身结构的影响外,还与烧嘴的空燃速比、烧嘴的布设、抽风压力、燃料的属性、以及窑内坯体码放形式等众多因素有关。在实际的生产中,往往由于温度控制不当使得陶瓷成品出现色差、尺差、变形、破裂等缺陷。本设计在计算流体力学、传热学、燃烧学等理论的基础上,采用有限体积的离散思想对陶瓷辊道窑的烧成带进行温度场数值模拟与分析研究,其主要内容包括:一、分析了辊道窑烧成带的结构特点及其主要功能,对辊道窑烧成带的实体结构进行合理的简化;分析了烧成带窑内气流的特征,采用 Gambit 建立了辊道窑烧成带的几何模型和网格模型;在网格划分过程中,充分考虑了网格梯度的重要性,对窑体以及烧嘴采用了不同网格划分方法,最后得到良好的网格模型。二、在 CFD 理论的基础上,根据辊道窑的实际热工特征,建立了辊道窑的三维数学模型,主要包括气体流动可实现性 $\kappa - \epsilon$ 标准方程湍流模型、PDF 化学反应燃烧模型求解。三、输入实际的边界条件,采用计算流体分析软件 Fluent 计算得出预热带加入搅拌气幕后的温度场以及流场的云图和等温线图等等,重点分析了预热带的三维截面的温度场分布以及截面温差特征,同时也分析了窑内气体流场对传热的影响。

Summary

In the ceramic industry , ceramic firing quality finished product depends on the merits of the ceramic kiln temperature , the atmosphere , and the pressure of the three systems , which temperature ceramic firing system on Quality of particularly important. Temperature distribution in addition to the furnace itself affected the structure , but also a number of factors associated with the air-fuel ratio of the burner , the burner layout, ventilation pressure , fuel properties , and the kiln body laying in the form of ceramic kilns , etc. related. In the actual production, often due to improper temperature control makes the finished ceramic chromatic aberration , poor feet , deformation, cracking and other defects. The design on the basis of computational fluid dynamics , heat transfer , combustion theory , based on the finite volume discrete ideas on ceramic roller kiln firing zone simulation and analysis of temperature field , its main contents include: a , analysis of the structural characteristics of its main features roller kiln firing zone , the physical structure of the roller kiln firing zone of reasonable simplification ; analysis of the flow characteristics of kiln firing zone , using Gambit established a roller kiln firing geometry and mesh model into a belt ; in meshing process, full account of the importance of the grid gradient of kiln burner and meshing with a different method , and finally get a good mesh . Second, on the basis of CFD theory, based on the actual thermal characteristics of roller kiln , the establishment of a three-dimensional mathematical model of roller kiln , including the gas flow can be realized standard $\kappa-\varepsilon$ turbulence model , PDF combustion model for solving chemical reaction . Third, enter the actual boundary conditions, using computational fluid analysis software Fluent calculated preheating zone behind a stirring gas flow field and temperature field contours and

isotherms map, etc. , focusing on the three-dimensional cross-section analysis of the temperature of the preheating zone field distribution and the temperature difference between the cross-sectional characteristics , but also the influence of the kiln gas flow field on heat transfer .

1. 绪论

随着经济不断发展,人民生活水平的不断提高,陶瓷工业在人民生产、生活中都占有重要地位。陶瓷的发展与窑炉的改革密切相关,一定结构特点的窑炉烧出一定品质的陶瓷。因此正确选择烧成窑炉是获得性能良好制品的关键。

陶瓷窑炉可分为两种:一种是间歇式窑炉,比如梭式窑;另一种是连续式窑炉,比如辊道窑。辊道窑由于窑内温度场均匀,从而保证了产品质量,也为快烧提供了条件;而辊道窑中空、裸烧的方式使窑内传热速率与传热效率大,又保证了快烧的实现;而快烧又保证了产量,降低了能耗。产品单位能耗一般在 2000~3500 KJ/Kg,而传统隧道窑则高达 5500~9000 KJ/Kg。所以,辊道窑是当前陶瓷工业中优质、高产、低消耗的先进窑型,在我国已得到越来越广泛的应用。

烧成在陶瓷生产中是非常重要的工序,烧成过程严重影响着产品的质量。在烧成过程中,温度控制是最重要的关键。没有合理的烧成控制,产品质量和产量都会很低。要想得到稳定的产品质量和提高产量,首先要有符合产品的烧成制度。然后必须维持一定的窑内压力。最后,必须要维持适当的气氛。这些要求都应该遵循。

1.1 陶瓷辊道窑特点

辊道窑是近几十年发展起来的新型快烧连续式工业窑炉,在釉面砖、墙地砖、彩釉砖等建筑陶瓷工业生产中已普遍用作主要的烧成设备,近几年正逐步在日用瓷等陶瓷工业中得到应用。

辊道窑又称辊底窑。主要用于瓷砖等陶瓷建材的生产。辊道窑是连续烧成的窑,以转动的辊子作为坯体运载工具的隧道窑。陶瓷产品放置在许多条间隔很密的水平耐火辊上,靠辊子的转动使陶瓷从窑头传送到窑尾,故而称为辊道窑。与隧道窑相比,辊道窑用连续多排辊子代替窑车输送制品,取消了窑车,取消了砂封,避免车下窑外冷空气漏入隧道,使窑内同一截面上下温度均匀,大大缩短烧成时间,为优质高产低热耗创造了条件。

辊道窑一般截面较小,窑内温度均匀,适合快速烧成,但辊子材质和安装技术要求较高。主要用于建筑卫生陶瓷制品的快速烧成。

编辑本段工作原理

其工作原理是:陶瓷坯体可直接置于辊子上或将坯体先放在垫板上,再将热

板放在辊子上,由于辊子不断转动,可使坯体依序前进。每根辊子的端部都有小链轮,由链条带动自转,为传动平稳、安全、常将链条分若干组传动。低温处的辊子用耐热的镍铬合金钢制成,高温处则以耐高温的陶瓷辊棒(如刚玉瓷辊棒或碳化硅辊棒)作为辊子。辊道窑的燃烧室在辊子的下方,用压缩空气雾化重油、柴油、煤油等燃料进行燃烧产生高温。燃烧室与辊道之间,有耐火材料隔离,火焰不直接接触被烧制的产品。用于生产陶瓷电容器的辊道窑,又叫电窑,体积更小,用电热丝棒、硅碳棒、或硅钼棒等电热元件加热烧制。

1.2 陶瓷辊道窑发展简史

辊道窑出现于 20 世纪 20 年代,最初是应用于冶金工业;30 年代,美国首先将辊道窑试验用于陶瓷烤花工序;40 年代,意大利开始研究将辊道窑用于快烧面砖并取得了成功。至 60-70 年代,国外先进国家已普遍使用辊道窑焙烧建筑瓷砖,技术也已相当成熟。另外,国外还研制出焙烧卫生瓷等制品的辊道窑,以及焙烧日用瓷的高温辊道窑,在实际应用中都取得了很大成功。

我国自 70 年代才开始在陶瓷工业中研究与推广应用辊道窑,由于当时国内保温材料的材质较差、陶瓷棍棒的长度较短等原因,主要是应用生产日用烤花的隔焰辊道窑。1973 年,沈阳陶瓷厂首先试验成功辊道窑焙烧釉面砖;1974 年,山西省闻喜县陶瓷厂建成我国第一条煤烧日用瓷烤花辊道窑;同年,辽宁省海城县陶瓷四厂建成我国第一条烧重油的日用瓷烤花辊道窑。

辊道窑在我国的迅猛发展是从 80 年代开始,经历了从全面引进、消化吸收并翻版建造到独立研制与国产化的发展历程。1982 年,广东石湾利华装饰砖厂首家从意大利唯高公司引进 FRW2000 型辊道窑。据不完全统计,以后的近二十年,全国先后从意大利(如 WELKO、SITI、POPPI、SACMI 等公司)、德国(如 HEIMSOTH 公司)、日本(如高砂公司)、美国等发达国家引进了 500 余座各种规格的辊道窑。这些辊道窑为我国设计与建造有自主知识产权的辊道窑提供了很好的样板。首先,不少企业与厂家对引进窑作了大量的消化吸收工作,翻版建造了一批辊道窑,并取得了成功。更重要的是,引进窑的技术为我国自行设计辊道窑提供了很好的借鉴,广东、山东、福建、四川、河北、江西、湖南、东北等各地分别根据各地燃料现状、材料实际状况设计建造了各种类型的辊道窑上千条。至 20 世纪末,辊道窑的设计与制造已基本实现了国产化,有的还远销国外。

辊道窑是近几十年发展起来的新型快烧连续式工业窑炉,在釉面砖、墙地砖、彩釉砖等建筑陶瓷工业生产中已普遍用做主要的烧成设备,近几年正逐步在日用陶瓷工业中得到应用。

1.3 文献综述

目前,陶瓷辊道窑已广泛用于建筑陶瓷、日用陶瓷、卫生陶瓷工业生产中。自 70 年代在我国推广应用以来,由于辊道窑窑内温度场均匀、传热速率快、效率高、能耗低以及烧成周期短等特点,在我国获得了广泛应用。在陶瓷工业中,陶瓷成品烧成质量的优劣主要取决于陶瓷窑炉内的温度、气氛、以及压力三大制度,而其中温度制度对陶瓷烧成质量的影响尤为重要。陶瓷窑炉内的温度场分布除受到窑炉本身结构的影响外,还与烧嘴的空燃速比、烧嘴的布设、抽风压力、燃料的属性、以及窑内坯体码放形式等众多因素有关。在实际的生产中,往往由于温度控制不当使得陶瓷成品出现色差、尺差、变形、破裂等缺陷。本文在计算流体力学、传热学、燃烧学等理论的基础上,采用有限体积的离散思想对陶瓷辊道窑的烧成带进行温度场数值模拟与分析研究,其主要内容包括:一、分析了辊道窑烧成带的结构特点及其主要功能,对辊道窑烧成带的实体结构进行合理的简化;分析了烧成带窑内气流的特征,采用 Gambit 建立了辊道窑烧成带的几何模型和网格模型;在网格划分过程中,充分考虑了网格梯度的重要性,对窑体以及烧嘴采用了不同网格划分方法,最后得到良好的网格模型。二、在 CFD 理论的基础上,根据辊道窑的实际热工特征,建立了辊道窑的三维数学模型,主要包括气体流动可实现性 $\kappa - \varepsilon$ 标准方程湍流模型、PDF 化学反应燃烧模型和 DO 辐射传热模型;而数学模型的离散主要采用有限体积法思想,利用一阶迎风离散格式得到网格模型内各节点上的离散控制方程组,最后采用 SIMPLE 算法求解离散控制方程组。三、结合给定的工况条件,采用计算流体分析软件 Fluent 计算得出了烧成带的温度场以及流场的云图以及等高线图,重点分析了烧成带的三维截面的温度场分布以及截面温差特征,同时也分析了窑内气体流场对传热的影响。四、在改变煤气入口速度的情况下,得到了不同空燃速比下烧成带三维截面的温度场分布、流场分布、以及截面温差的特征,分析了空燃速比与烧成带三维截面温度值以及温度差之间的联系,同时也得到了流场最值与空燃速比的关系。

(摘文: 吴武辉. 《陶瓷辊道窑温度场数值模拟与分析研究[D]》. 武汉理工大

学 2008)

陶瓷烧成的热工理论经过多年的发展已经比较成熟。而计算机技术、自动控制理论、新型耐火材料的高速发展和优质燃料的应用更是为热工理论的实践、干燥和烧成技术的进步提供了良好的条件。应用计算机等现代科学技术可对温度、湿度以及流量参数等进行控制,实现理想的热工制度,所以近年来陶瓷窑炉质量都有明显提高,在能耗方面有了非常明显的下降。而窑内的气体流动和对流换热的模拟研究仍主要在相似理论的指导下,用物理实体模型通过实验方式进行。在研究对流换热时,常采取反向热流的实验方法。近年来对隧道窑预热带、冷却带,梭式窑等都曾有过试验研究,并取得了成果。在辊道窑的预热带中,坯体将发生重要的变化,窑内热量的吸收和温度的均匀性都会产生重要影响,而目前关于辊道窑的研究中这方面的内容不多也不全。本文旨在应用数值模拟研究方法,利用 CFD 软件 Fluent 来模拟出不同内高下辊道窑预热带段的流场和温度场。通过对模型流场和温度场的分析,得出不同内高组合对窑内流场的影响。

综上所述:辊道窑的数值模拟有助于对窑内温度场和流场的研究,再对模拟结果辅以决策分析来获得最优模型,这无论对陶瓷生产实践还是对辊道窑其他方面的理论研究工作都有较大的指导意义。

(摘自:罗强.《辊道窑内高变化对窑内流场和温度场的影响研究[D]》.景德镇陶瓷学院)

1.4 本课题的目的与意义

作为热能转换设备,工业窑炉广泛地应用于建材、冶金、化工、电站等领域,其运行质量对生产效率、产品质量、能源消耗、环境污染等有直接影响。这就要求有相应的烧成制度和管理措施,准确而有效的对窑炉温度场进行检测以满足上述要求。目前,陶瓷窑炉在线检测主要是利用热电偶进行测量,这种方式存在着检测温度滞后,检测点数少的缺点,无法实时反映整个窑炉内火焰的温度分布。当窑炉火焰组织不合理时,会使窑内温度分布不均匀,这将直接影响制品的烧成制度,而且产品的质量不能得到保证。

本课题借助 Fluent 软件来探讨研究窑顶 180° 搅拌气幕对窑内流场温度场影响初探,为进一步烧好产品提供了重大依据,为以后陶瓷辊道窑企业打下良好的基础,让我们更加了解辊道窑。使我们构特征并获取温度场的瞬时分布,为辊道窑的实时控制提供可靠的依据。

本课题研究的目的是针对目前陶瓷窑炉行业缺乏具有自主知识产权的核心技术、整体技术和装备水平与国际先进水平相比差距较大、资源分散、市场竞争力不强等问题,重点建设为行业服务的共性技术平台,实现资源共享,为此进行陶瓷窑炉仿真的物理、数学建模,通过仿真技术来验证窑炉结构设计,以开发出高效、节能和低排放的高性能陶瓷窑炉,提高陶瓷窑炉效率、减少废气排放,同时实现陶瓷窑炉装备标准化、系列化、模拟化。

陶瓷窑炉的热工过程是传热、燃烧、气体流动在烧制陶瓷过程中综合作用,如果用实验的方式对其进行研究,工作量可想而知,而且在实际过程中,由于仪器设备的限制,窑炉的许多参数的测量准确度难度加大。随着计算机技术的发展,利用计算机对工程问题进行数值模拟自 70 年代以来取得了重大发展,逐步发展了能计算大部分流动与传热问题的通用化软件,可以模拟窑炉的生产过程,对温度场和速度场进行仿真,然后采用人工智能方法对陶瓷窑炉仿真系统进行决策分析。采用决策支持系统可以消减成本、提高生产率和节约时间。现在对陶瓷窑的决策分析是针对状态检测、故障诊断和用于新产品的开发,没有针对陶瓷窑炉结构和设计,但窑炉的结构对陶瓷产品的影响很大,这一影响因素不容忽视,对仿真系统的决策分析显得尤为重要,最终可以为窑炉结构设计和生产过程提供依据。

如今武汉理工大学已在陶瓷窑炉方面开展了多年研究开发工作,积累了一批科研成果,具有学科、人才和科研基地优势。因此以窑炉公司和武汉理工大学为主,组成产学研联合的研发团体,发挥各自优势,很好地完成项目的各种任务。

连续性陶瓷窑的预热带处于负压状态,容易造成断面温度不均匀,尤其是隧道窑预热带上下温差大,影响产品质量。在预热带设置扰动气幕是解决窑内上下温差的重要措施。因此,研究扰动气幕对窑内流场及温度场分布的影响对设计与改进窑炉结构有重大意义。扰动气幕的设置形式是多种多样的,可以设置在两侧窑墙,也可设置在窑顶,本课题是研究在窑顶设置 180° 出口向烟气来流方向喷

射的搅拌气幕对窑内流场和温度场的影响，是本组同学所研究课题群的一个分支。由于窑内况复杂，其流速与温度分布情况难以在实际窑或用实物模型实验来测得，随着计算机的普及，越来越多的研究采用数值模拟的方法。

Fluent 软件是目前国际上较流行的商用 CFD 软件包，只要涉及流体、热传递及化工反应等工程问题，都可以用 Fluent 进行解算。它具有丰富的物理模型、先进的数值解法以及强大的后台处理功能，在航空航天、涡轮机设计、石油天然气、热工设备等多方面工程领域都已有广泛的应用，因此拟将 Fluent 软件为本课题的研究工具。

2. Fluent 软件简介

Fluent 是用于模拟具有复杂外形的流体流动以及热传导的计算机程序，Fluent 软件采用 C/C++ 语言编写，从而大大提高了对计算机内存的利用率，因此，动态内存分配，高效数据结构，灵活的求解控制都是可能的。除此之外，为了高效执行，交互控制，以及灵活地适应各种机器与操作系统，Fluent 使用 client/server 结构，因此它允许同时在用户桌面工作站和强有力的服务器上分离地运行程序。

2.1 Fluent 的功能及特点

Fluent 软件所具有的功能及特点汇总如下：

1. 完全非结构化网格

Fluent 软件采用基于完全非结构化网格的有限体积法，而且具有基于网格节点和网格单元的梯度算法。

2. 定常/非定常流动模拟新功能

Fluent 软件新增快速非定常模拟功能。

3. 先进的动/变形网格技术

Fluent 软件中的动/变形网格技术主要解决边界运动的问题，用户只需指定初始网格和运动壁面的边界条件，余下的网格变化完全由解算器自动生成。

Fluent 解算器包括 NEKTON、FIDAP、POLYFLOW、ICEPAK 以及 MIXSIM。网格变形方式有三种：弹簧压缩式、动态铺层式以及局部网格重生式。其局部网格重生式是 Fluent 所独有的，而且用途广泛，可用于非结构网格、变形较大问题以及物体运动规律事先不知道而完全由流动所产生的力所决定的问题。

4. 多网格支持功能

Fluent 软件具有强大的网格支持能力，支持界面不连续的网格、混合网格、动/变形网格以及滑动网格等。值得强调的是，Fluent 软件还拥有多种基于解的网格的自适应、动态自适应技术以及动网格与网格动态自适应相结合的技术。

Fluent 软件包含丰富而先进的物理模型，例如：

● Fluent 软件能够精确地模拟无粘流、层流、湍流。湍流模型包含 Spalart-Allmaras 模型、 $k-\omega$ 模型组、 $k-\epsilon$ 模型组、雷诺应力模型 (RSM) 组、大涡模拟模型 (LES) 组以及最新的分离涡模拟 (DES) 和 V2F 模型等。另外用户还可以定制或添加自己的湍流模型 (包含了多种湍流模型, 针对不同的问题可以采用更恰当的模型进行模拟)。

● Fluent 软件适用于牛顿流体、非牛顿流体。

● Fluent 软件可以完成强制/自然/混合对流的热传导, 固体/流体的热传导、辐射等计算。

● Fluent 软件包含了多种化学反应及燃烧模型, 比如有限速率、PDF、层流火焰、湍流火焰等多种模型, 可以完成化学组分的混合/反应计算。

● Fluent 还具有离散相的拉格朗日跟踪计算功能。

Fluent 软件中还包含其他常用的模型, 汇总如下:

● 自由表面流模型, 欧拉多相流模型 (Euler), 混合多相流模型 (Mixture), 离散项模型 (Lagrangian Dispersed Phase Modeling: 主要用来模拟一些二次相的体积含量小于 10% 的多相流动)、空穴两相流模型 (Cavitation)、湿蒸汽模型等, 可以处理流场域中有多相流体存在时的流动, 也可以同时处理气液固三相同存在时的流动。

● 非均质渗透性、惯性阻抗、固体热传导、多孔介质模型 (考虑多孔介质压力突变)。

● Fluent 磁流体模块可以模拟电磁场和导电流体之间的相互作用问题。

● 连续纤维模块可以很好地模拟纤维和气体流动之间的动量、质量以及热的交换问题。

7. Fluent 独有的特点

● Fluent 可以方便设置惯性或非惯性坐标系、复数基准坐标系、滑移网格以及动静翼相互作用模型化后的接续界面。

● Fluent 内部集成丰富的物性参数的数据库, 里面有大量的材料可供选用, 此外用户可以非常方便地定制自己的材料。

- 高效率的并行计算功能，提供多种自动/手动分区算法；内置 MPI 并行机制，大幅度提高并行效率。另外，Fluent 特有动态负载平衡功能，确保全局高效并行计算。
- Fluent 软件提供了友好的用户界面，并为用户提供了二次开发接口 (UDF)。
- Fluent 软件后置处理和数据输出，可对计算结果进行处理，生成可视化的图形及给出相应的曲线、报表等。

上述各项功能和特点使得 Fluent 在很多领域得到了广泛的应用，主要有以下几个方面：

- 窑炉数值模拟。
- 航天和涡轮机械的应用。
- 汽车工业的应用。
- 热交换应用。
- 电子/HVAC 应用。
- 材料处理应用。
- 建筑设计和火灾研究。

2.2 Fluent 系列软件简介

自 1983 年问世以来，Fluent 就一直是 CFD 软件技术的领先者，被广泛应用于航空航天、旋转机械、航海、石油化工、汽车、能源、计算机/电子、材料、冶金、生物、医药等领域，使 Fluent 公司成为占有最大市场份额的 CFD 软件供应商。2006 年 5 月，Fluent 成为全球最大的 CAE 软件供应商—— ANSYS 大家庭中的重要成员。所有的 Fluent 软件将被集成在 ANSYS Workbench 环境下，共享先进的 ANSYS 公共 CAE 技术。Fluent 是 ANSYS CFD 的旗舰产品，ANSYS 将加大对 Fluent 核心 CFD 技术的投资，确保 Fluent 在 CFD 领域的绝对领先地位。

Fluent 系列软件包括：通用的 CFD 软件 Fluent、POLYFLOW、FIDAP，工程设计软件 FloWizard、Fluent for CATIA V5，前处理软件 Gambit、TGrid、G/Turbo，CFD 教学软件 FlowLab，面向特定专业应用的 ICEPAK、AIRPAK、MIXSIM 软件。

Fluent 是通用 CFD 软件，Fluent 软件包含基于压力的分离求解器、基于压力的耦合求解器、基于密度的隐式求解器、基于密度的显式求解器，多求解器技

术使 Fluent 软件可以用来模拟从不可压缩到高超音速范围内的各种复杂流场。Fluent 软件包含非常丰富、经过工程确认的物理模型，可以模拟高超音速流场、转捩、传热与相变、化学反应与燃烧、多相流、旋转机械、动/变形网格、噪声、材料加工等复杂机理的流动问题。

Fluent 软件的动网格技术处于绝对领先地位，并且包含了专门针对多体分离问题的六自由度模型，以及针对发动机的两维半动网格模型。

POLYFLOW 是基于有限元法的 CFD 软件，专用于粘弹性材料的层流流动模拟。它适用于塑料、树脂等高分子材料的挤出成型、吹塑成型、拉丝、层流混合、涂层过程中的流动及传热和化学反应问题。

FloWizard 是高度自动化的流动模拟工具，它允许设计和工艺工程师在产品开发的早期阶段迅速而准确地验证他们的设计。它引导你从头至尾地完成模拟过程，使模拟过程变得非常容易。

Fluent for CATIAV5 是专门为 CATIA 用户定制的 CFD 软件，将 Fluent 完全集成在 CATIAV5 内部，用户就像使用 CATIA 其他分析环境一样地使用 Fluent 软件。

Gambit 是专业的 CFD 前处理软件，包括功能强大的几何建模和网格生成能力。

G/Turbo 是专业的叶轮机械网格生成软件。

AIRPAK 是面向 HVAC 工程师的 CFD 软件。并依照 ISO7730 标准提供舒适度、PMV、PPD 等衡量室内外空气质量 (IAQ) 的技术指标。

MIXSIM 是专业的搅拌槽 CFD 模拟软件。

除 Fluent 外，常用的 CFD 软件及相关仿真软件还有：专业三维流场分析软件——CFX，三维 CFD 快速求解器——CART3D，流体系统仿真、设计与优化平台——Flowmaster，专业的离散元仿真分析软件——EDEM 等。

1.2.3 Fluent 软件先进的求解技术

在 Fluent 软件当中，有两种数值方法可以选择：

- 基于压力的求解器。
- 基于密度的求解器。

从传统上讲, 基于压力的求解器是针对低速、不可压缩流开发的, 基于密度的求解器是针对高速、可压缩流开发的。但近年来这两种方法被不断地扩展和重构, 使得它们可以突破传统上的限制, 可以求解更为广泛的流体流动问题。

Fluent 软件基于压力的求解器和基于密度的求解器完全在同一界面下, 确保 Fluent 对于不同的问题都可以得到很好的收敛性、稳定性和精度。

1. 基于压力的求解器

基于压力的求解器采用的计算法则属于常规意义上的投影方法。投影方法中, 首先通过动量方程求解速度场, 继而通过压力方程的修正使得速度场满足连续性条件。由于压力方程来源于连续性方程和动量方程, 从而保证整个流场的模拟结果同时满足质量守恒和动量守恒。由于控制方程(动量方程和压力方程)的非线性和相互耦合作用, 就需要一个迭代过程, 使得控制方程重复求解直至结果收敛, 用这种方法求解压力方程和动量方程。

2. 基于密度的求解器

基于密度的方法就是直接求解瞬态 N-S 方程(瞬态 N-S 方程理论上是绝对稳定的), 将稳态问题转化为时间推进的瞬态问题, 由给定的初场时间推进到收敛的稳态解, 这就是我们通常说的时间推进法(密度基求解方法)。这种方法适用于求解亚音、高超音速等流场的强可压缩流问题, 且易于改为瞬态求解器。

Fluent 软件中基于密度的求解器源于 Fluent 和 NASA 合作开发的 RAMPANT 软件, 因此被广泛地应用于航空航天工业。Fluent 6.3 中新增加了 AUSM 和 Roe-FDS 通量格式, AUSM 提供了对不连续激波提供更高精度的分辨率, Roe-FDS 通量格式减小了在大涡模拟计算中的耗散, 从而进一步提高了 Fluent 在高超声速模拟方面的精度。

2.3 Fluent 6.3 的功能模块

一套基本的 Fluent 软件包含了两个部分, 即 Gambit 和 Fluent。Gambit 的主要功能是几何建模和网格划分, Fluent 的功能是流场的解算及后置处理。此外还有专门针对旋转机械的几何建模和网格划分模块 Gambit/Turbo 以及其他专门用途的功能模块。

1. Gambit 2.3 创建网格

Gambit 拥有完整的建模手段, 可以生成复杂的几何模型。此外, Gambit 含有 CAD/CAE 接口, 可以方便地从其他 CAD/CAE 软件中导入建好的几何模型或网格。

在第二章中会重点介绍常用的两种建模手段。

2. Fluent 解算及后置处理

如前文提到的, Fluent 解算功能的不断完善确保了 Fluent 对于不同的问题都可以得到很好的收敛性、稳定性和精度。Fluent 具有强大的后置处理功能, 能够完成 CFD 计算所要求的功能, 包括速度矢量图、等值线图、等值面图、流动轨迹图, 并具有积分功能, 可以求得力、力矩及其对应的力和力矩系数、流量等。对于用户关心的参数和计算中的误差可以随时进行动态跟踪显示。对于非定常计算, Fluent 提供非常强大的动画制作功能, 在迭代过程中将所模拟非定常现象的整个过程记录成动画文件, 供后续的分析演示。

3. Gambit/Turbo 模块

该模块主要用于旋转机械的叶片造型及网格划分, 该模块是根据 Gambit 的内核定制出来的, 因此它与 Gambit 是直接耦合在一起, 采用 Turbo 模块生成的叶型或网格, 可以直接用 Gambit 的功能进行其他方面的操作, 从而可以生成更加复杂的叶型结构。比如对于涡轮叶片, 可以先采用 Turbo 生成光叶片, 然后通过 Gambit 的操作直接在叶片上开孔或槽, 也可以通过布尔运算或切割生成复杂的内冷通道等, 因此 Turbo 模块可以极大地提高叶轮机械的建模效率。

4. Pro/E Interface 模块

该模块用于同 Pro/E 软件直接传递几何数据、实体信息, 提高建模效率。

5. Deforming Mesh 模块

该模块主要用于计算域随时间发生变化情况下的流场模拟, 比如飞行器姿态的变化过程的流场特性的模拟, 飞行器分离过程的模拟, 飞行器轨道的计算等。

6. Flow-Induced Noise Prediction 模块

该模块主要用于预测所模拟流动的气动噪声, 对于工程应用可用于降噪。比如用于车辆领域或风机等领域, 降低气流噪声。

7. Magnetohydrodynamics 模块

该模块主要用于模拟磁场、电场作用时对流体流动的影响。主要用于冶金及磁流体发电领域。

8. Continuous Fiber Modeling 模块

该模块主要应用于纺织工业，用于纤维的拉制成型过程的模拟。

2.4 Fluent 6.3 的分析过程

使用 Fluent 解决某一问题时，首先要考虑如何根据目标需要选择相应的物理模型，其次明确所要模拟的物理系统的计算区域及边界条件，以及确定二维问题还是三维问题。在确定所解决问题的特征之后，Fluent 6.3 的分析过程基本包括如下步骤：

(1) 创建几何结构的模型以及生成网格。

可以使用 Gambit 或者一个分离的 CAD 系统产生几何结构模型及网格。

(2) 运行合适的解算器。

Fluent 包含两类解算器，分别包括 2D、3D、2DDP、3DDP。Fluent2d 运行二维单精度版本；相应的 Fluent3d、Fluent2ddp、Fluent3ddp 分别运行三维单精度、二维双精度、三维双精度。大多数情况下，单精度解算器高效准确，但是对于某些问题如几何图形长度尺度相差太多的模型，使用双精度解算器更合适。

(3) 读入网格。

通过选择菜单 File→Read→Case&Data 命令读入 case 和 data 文件(默认读入可识别的 Fluent 网格格式)，扩展名分别为.cas 和.dat。一般说来，一个 case 文件包括网格、边界条件和解的控制参数。如果网格文件是其他格式，相应的选择菜单为 File→Import 命令。另外，值得提一下几种主要的文件形式。

- .jou 文件：日志文档，可以编辑运行。
- .dbf 文件：Gambit 工作文件。
- .msh 文件：从 Gambit 输出的网格文件。
- .cas 文件：经 Fluent 定义后的文件。
- .dat 文件：经 Fluent 计算的数据结果文件。

(4) 检查网格。

读入网格之后要检查网格，相应的选择菜单为 Grid→Check。在检查过程中，读者可以在控制台窗口中看到区域范围、体积统计以及连通性信息。网格检查最

容易出现的问题是网格体积为负数。如果最小体积是负数，就需要修复网格以减少解域的非物理离散。

(5) 选择解的格式。

根据问题的特征来选择解算器的具体格式，后面章节会针对不同的物理模型具体展开说明求解的具体格式。分离解算器是 Fluent 默认的解算器。

(6) 选择需要解的基本模型方程。

例如层流、湍流(无粘)、化学组分、化学反应、热传导模型等。

(7) 确定所需要的附加模型。

例如风扇，热交换，多孔介质等。

(8) 指定材料物理性质。

可以在材料数据库中选择气体属性，或者创建自己的材料数据。

(9) 指定边界条件。

相应的选择菜单为 Define→Boundary Conditions，以设定边界条件的数值与类型。

(10) 调节解的控制参数。

相应的选择菜单为 Solve→Controls 子菜单，在打开的面板里可以改变压松弛因子、多网格参数以及其他流动参数的默认值。在后面章节中我们将详细介绍相关参数具体含义，一般来说这些参数不需要修改。

补充：一般计算过程需要监控计算收敛及精度的变化情况，例如需要激活残差图(Residual Plotting)：相应的选择菜单为 Solve→Monitors→Residual，在选项中，打开 Plot 选项激活残差图形，然后单击 OK，就可以在计算过程中查看残差，残差变化曲线由上向下逐渐减少的趋势表明计算有收敛的可能，结果可能比较理想。

(11) 初始化流场

迭代之前一般需要初始化流场，即提供一个初始解。用户可以从一个或多个边界条件算出初始解，也可以根据需要设置流场的数值，相应的选择菜单为 Solve→Initialize→Initialize。

(12) 计算解。

迭代计算时，需要设置迭代步数，相应的选择菜单为 Solve→Iterate。

(13) 检查结果。

通过图形窗口中的残差图查看收敛过程,通过残差图可以了解迭代解是否已经收敛到允许的误差范围了;以及观察流场分布图,相应的选择菜单为 Display→Velocity Vectors。

(14) 保存结果。

问题的定义和 Fluent 计算结果分别保存在 case 文件和 data 文件中。必须保存这两个文件以便以后重新启动分析。保存 case 文件和 data 文件相应的选择菜单为 File→Write→Case&Data。

3. 仿真对象简介

3.1 仿真对象主要技术参数

本课题为“窑顶 180° 搅拌气幕对窑内流场温度场影响初探”的辊道窑，全窑在氧化气氛下烧成。本课题仿真对象的辊道窑是：全窑长 110 米（每节窑长 2.2 米，共 50 节），窑宽 2.6 米，窑高 0.8 米。采用天然气为燃料烧制仿古砖的辊道窑。现取温度在 400℃ 左右的一节预热带作为研究对象进行建模。

由于计算机内存空间有限，模拟时以有搅拌气幕的一节做网格分析，该节为长 2.2m、宽 2.6m、高 0.8m，在窑顶设置搅拌气幕管道与烟气流速方向成 180°，图 3-1 为仿真对象的结构三视图分别为：主视图、俯视图、侧视图。

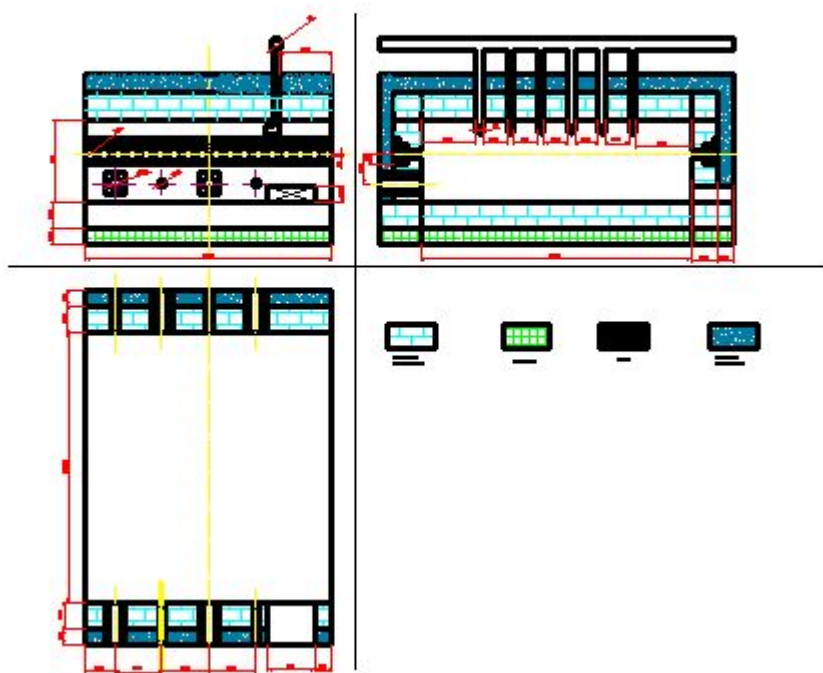


图 3-1-1 仿真对象的结构的主视图

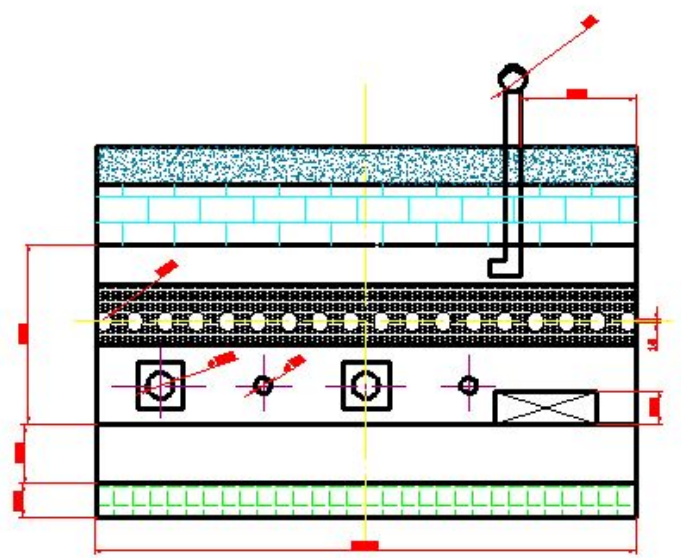


图 3-1-1 仿真对象的结构的主视图

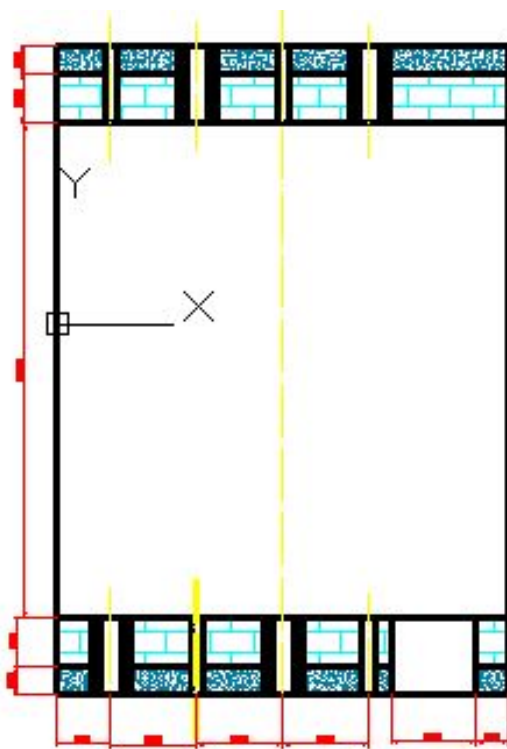


图 3-1-2 仿真对象的结构俯视图

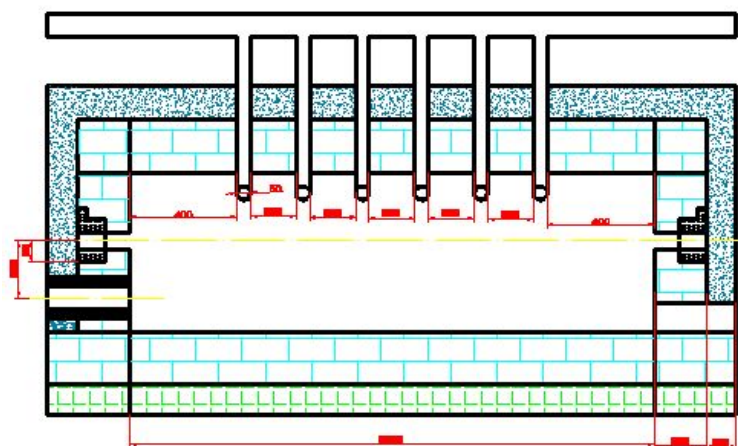


图 3-1-3 仿真对象的结构侧视图

窑顶的搅动气幕管道用直径（内径）为 0.05m，深度为 0.1m 的圆柱体管道通入搅拌气幕。搅拌气幕通入空气搅拌。气幕风温度定为 100℃。

搅拌气幕孔设计在离烟气入口 0.5m 处，窑顶均匀设置一排 6 根直径为 50mm 的气幕风管，流速定位 20Nm/s. 此设计研究 2 节窑。入口烟气温度为 400℃，出口烟气温度为 450℃。此两节窑的烟气平均温度为 425℃。辊道窑燃料为天然气，天然气的燃耗 $B=256$ (Nm^3/h)。实际烟气量为： $V_g=14.15(Nm^3/Nm^3)$ 。

$$\begin{aligned}
 \text{由公式 } v &= \frac{B \cdot V_g}{3600 \times \text{长} \times \text{高}} \times \frac{273 + t_{\text{平均}}}{273} \\
 &= \frac{256 \times 14.15}{3600 \times 2.2 \times 0.8} \times \frac{273 + 450}{273} \\
 &= 1.514 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

故取窑内烟气主流速度 v 为 1.5 m/s

3.2 仿真对象热物性参数的确定

表 3-1 所列为仿真对象窑体砌筑所选用预热带材料及厚度。

所选预热带所用材料及厚度					
名称		材质	使用温度 (℃)	导热系数 $[\lambda / (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})]$	厚度 (mm)
窑顶	耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600℃	$0.310+0.176 \times 10^{-3}t$	230
	隔热层	硅酸盐耐火纤维束	1150	0.1~0.3	150
窑墙	耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600℃	$0.310+0.176 \times 10^{-3}t$	230
	隔热层	硅酸盐耐火纤维束	1350	0.1~0.3	190
窑底	耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600℃	$0.310+0.176 \times 10^{-3}t$	230
	隔热层	硅藻土砖	900	$0.063+0.14 \times 10^{-3}t$	130
	膨胀层	硅酸盐耐火纤维束	1350	0.1~0.3	100

表 3-1 仿真对象窑体砌筑所选用预热带材料及厚度

由于用 Fluent 软件模拟,窑墙的边界条件只能输入一种材料的热物性参数,所以必须计算出窑体的平均导热系数。这里按材料厚度的加权平均法来计算窑体材料的平均导热系数:

1) 窑墙的平均导热系数

$$\lambda_1 = \frac{(0.310+0.176 \times 450 \times 10^{-3}) \times 0.23 + 0.2 \times 0.15}{0.23 + 0.15} = 0.315 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

2) 窑顶的平均导热系数

$$\lambda_2 = \frac{(0.310+0.176 \times 450 \times 10^{-3}) \times 0.23 + 0.2 \times 0.19}{0.23 + 0.19} = 0.304 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

3) 窑底的平均导热系数

$$\lambda_3 = \frac{(0.310+0.176 \times 450 \times 10^{-3}) \times 0.23 + (0.063+0.14 \times 10^{-3} \times 450) \times 0.13 + 0.2 \times 0.1}{0.23 + 0.13 + 0.1}$$

$$= 0.274 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

4. 几何网格模型的建立

要用 Fluent 求解流体的流场和温度场，必须先用预处理软件将仿真对象建立几何模型并划分合适的网格。本文运用 Gambit 软件建立一节带有搅拌气幕的辊道窑的几何网格模型。

4.1 文件的创建及其求解器的选择

A. 启动 Gambit 软件：[开始]—[运行]—在运行对话框中输入 Gambit—[确定]—出现 Gambit startup 对话框—[Browse]—选定要存的子目录（事先建个文件夹：kiln/lijianpeng）—在 Session ID 文本框中输入文件名—201030453119—[Run]—即启动了 Gambit 的布局窗口。

B. 确定求解器：[Solver] | [FLUENT5/6]

4.2 建立辊道窑模型

A. 画出窑墙角落的 4 个点：[Operation]—[Geometry]—[Vertex]—[Create Real] 分别在 X、Y、Z 三个坐标中输入 (0, 0, 0); (2.2, 0, 0); (0, 0.8, 0); (2.2, 0.8, 0); 每个输入完后都要按键 [Apply]。

B. 由点连成线：[Operation]—[Geometry]—[Edge]—[Create Straight], 在 [Vertices] 里选中那四个点从 [Available] 移到 [Picked] 中，两两连接成长方形。再点 [Apply]。

C. 由线组成面：[Operation]—[Geometry]—[Face]—[Create Face], 在 [Edges] 里选中那四条线从 [Available] 移到 [Picked] 中，最后点击 [Apply]，这样就画出了该节辊道窑的一个侧墙面。

D. 有了侧墙面，就可用 “Sweep Faces” 面扫描为体的功能键画出该节辊道窑的立体模型。为了使此设计节约计算机的空间与计算时间，在宽度方向取中点作对称面，可以更好的节约空间和计算时间。由于仿真对象窑内宽为 2.6 m，这里只要画出对称的一半，即宽度方向为 1.3 m。具体步骤如下：[Operation]—[Geometry]—[Volume]—[Sweep Faces]；在 [Faces] 里选中那个面；然后 [Define]，选中 Z 中的 [Positive]，点击 [Magnitude] 填入 1.3，最后点击 [Apply]。

4.3 创建气幕风管的几何模型

A: 首先确定风管底面的圆心位置: [Operation]—[Geometry]—[Vertex]—[Create Real]分别在 X、Y、Z 三个坐标中输入 (1.7, 0.8, 0.175); (1.7, 0.8, 0.525); (1.7, 0.8, 0.875); 每个输入完后都要按键[Apply]。

B: 沿着 Y 轴中心正方向建立一个风管长 0.1m, 底面半径为 25mm 的圆柱体: [Operation]—[Geometry]—[Volume]—[Create Real Cylinder], 在 Height、Radius 1、Radius 2 分别填入 0.1, 0.025, 0.025; 在 [Axis Location] 选择 [Centered Y], 最后点击[Apply]。

C: 同理沿着 X 轴中心正方向建立一个形状一样的圆柱体;

D: 将 X 轴上得到的圆柱体平移使与前一个圆柱体两底成 90° 重合: [Operation]—[Geometry]—[Volume]—[Move/Copy Volumes], 在 [Move] 情况下, 在 [Pick] 中选中 [volume. 3] 从 [Available] 移到 [Picked] 中, 在 [Operation] 选择 [Translate]. 在下面的 [Global] 的 X、Y、Z 中分别输入: -0.025, -0.025, 0; 最后点击[Apply]即可完成。

4.4 窑顶 180° 的搅拌气幕管安置

A: 将得到的两个气幕风管用并集的方法做成一个弯管: [Operation]—[Geometry]—[Volume]—[Unite Real Volumes]选择那两个圆柱体在 [Volumes] 中 [Available] 移到 [Picked], 最后点击[Apply]即可。

B: 将得到的气幕装置平移到空间直角坐标系原点上, 为了更好的设置到窑顶: [Operation]—[Geometry]—[Volume]—[Move/Copy Volumes], 在 [Move] 情况下, 在 [Pick] 中选中 [volume. 3] 从 [Available] 移到 [Picked] 中, 在 [Operation] 选择 [Translate]. 在下面的 [Global] 的 X、Y、Z 中分别输入: 0, 0.025, 0; 最后点击[Apply]即可完成。

C: 在窑顶创建三个气幕装置:

第一步: [Operation]—[Geometry]—[Volume]—[Move/Copy Volumes], 在 [Move] 情况下, 在 [Pick] 中选中 [volume. 3] 从 [Available] 移到 [Picked] 中, 在 [Operation] 选择 [Translate]. 在下面的 [Global] 的 X、Y、Z 中分别输入: 1.7, 0.725, 0.175; 最后点击[Apply]即可完成。

第二步：用同样的方法在 [Copy] 情况下，在 [Pick] 中选中 [volume.3] 从 [Available] 移到 [Picked] 中，在 [Operation] 选择 [Translate]。在下面的 [Global] 的 X、Y、Z 中分别输入：0, 0, 0.35；最后点击 [Apply] 即可完成。

第三步：在 [Copy] 情况下，在 [Pick] 中选中 [volume.3] 从 [Available] 移到 [Picked] 中，在 [Operation] 选择 [Translate]。在下面的 [Global] 的 X、Y、Z 中分别输入：0, 0, 0.7；最后点击 [Apply] 即可完成。这样就能完成窑顶 180° 的搅拌气幕管。

D：用体差集的方法使窑体与搅拌气幕成为一体：[Operation]—[Geometry]—[Volume]—[Subtract Real Volumes]，在 [Volume] 中选中 [volume.1] 从 [Available] 移到 [Picked] 中。在 [Subtract Volumes] 中选中 [volume.3]、[volume.4]、[volume.5]，从 [Available] 移到 [Picked] 中。最后点击 [Apply] 即可完成。

4.5 窑内阻力简化模拟

由于辊道窑中心是用棍棒进行传动的，在传动过程中有阻力，此时难以做出准确的模拟，为了简化建模操作，故在高中心建立一个离各个侧面为 0.2m 的一水平面。

A：经计算得到此平面的四个坐标 (2.0, 0.4, 1.1)、(2.0, 0.4, 0)、(0.2, 0.4, 0)、(0.2, 0.4, 1.1)。故在空间直角坐标系中画出这四个点：[Operation]—[Geometry]—[Vertex]—[Create Real] 分别在 X、Y、Z 三个坐标中输入 (2.0, 0.4, 1.1)、(2.0, 0.4, 0)、(0.2, 0.4, 0)、(0.2, 0.4, 1.1)；每个输入完后都要按键 [Apply]。

B：由上面的方法：点连成线，线组成面即可。

C：用阻力面将整个窑空间劈割 (SPLIT)。

完成所有的上述步骤即得到了一个窑顶设有 180° 搅拌气幕以窑宽中心为对称的半个辊道窑一节的几何体模型，即为本课题的研究对象，如图 4-1 所示。

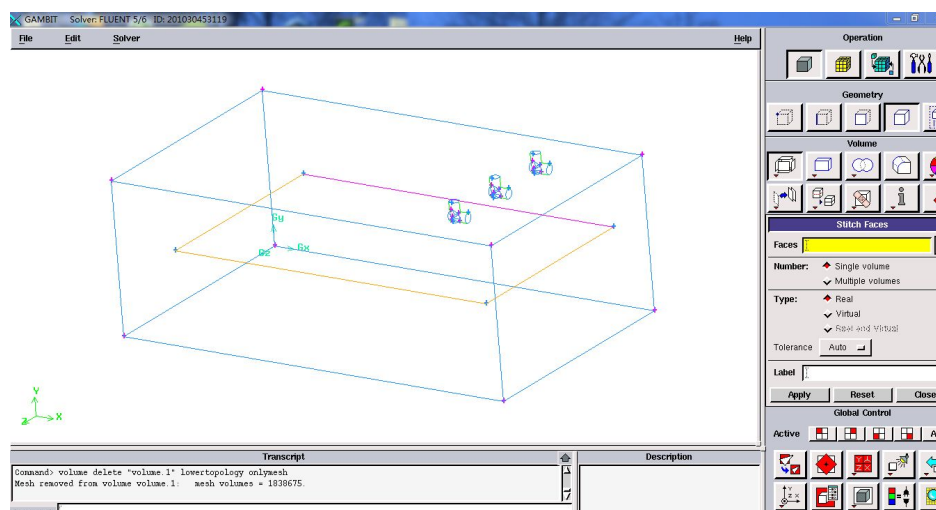


图 4-1 仿真辊道窑的几何体模型

4.6 设置边界类型

A: 烟气进口边界面: [Operation]—[Zones]—[Specify Boundary Types]—打开其对话框—选中 Add。在 Name 项填入边界名称 “gasin”, 鼠标右键点击 Type 按钮, 在出现的下拉列表中选 Velocity_Inlet—点击 Faces 右侧黄色区域—shift+鼠标左键点击窑右侧面—[Apply];

B: 烟气出口边界面: [Operation]—[Zones]—[Specify Boundary Types]—打开其对话框—选中 Add。在 Name 项填入边界名称 “gasout”—鼠标右键点击 Type 按钮, 在出现的下拉列表中选 Outflow—点击 Faces 右侧黄色区域—shift+鼠标左键点击窑左侧面—[Apply];

C: 窑顶搅拌气幕口边界面: [Operation]—[Zones]—[Specify Boundary Types]—打开其对话框—选中 Add。在 Name 项填入边界名称 “airjet”—鼠标右键点击 Type 按钮, 在出现的下拉列表中选 Velocity_Inlet—点击 Faces 右侧黄色区域—shift+鼠标左键点击窑顶垂直面—[Apply];

D: 内部阻力边界面: [Operation]—[Zones]—[Specify Boundary Types]—打开其对话框—选中 Add。在 Name 项填入边界名称 “obstruction”—鼠标右键点击 Type 按钮, 在出现的下拉列表中选 Internal—点击 Faces 右侧黄色区域—shift+鼠标左键点击窑内部一个面—[Apply];

E: 墙的边界面: [Operation]—[Zones]—[Specify Boundary Types]—打开其对话框—选中 Add。在 Name 项填入边界名称 “wall”—鼠标右键点击 Type

按钮，在出现的下拉列表中选 Wall—点击 Faces 右侧黄色区域—shift+鼠标左键点击窑的其他几个墙面—[Apply]；

F：对称面的设置：为节省计算机内存及缩短迭代计算时间，对于完全对称的几何体可取其一半甚至 1/4 来建立其模型与计算，计算完成后再由镜像映射来显示全局效果。步骤为：[Operation]—[Zones]—[Specify Boundary Types]—打开其对话框—选中 Add。在 Name 项填入边界名称“symme”—鼠标右键点击 Type 按钮，在出现的下拉列表中选 Symmetry—点击 Faces 右侧黄色区域—shift+鼠标左键点击窑内部一个面—[Apply]；

4.7 确定边界面的内部各线分布并创建窑体的结构化体网格

划分网格是建立有限元模型的一个重要环节，它要求考虑的问题较多，需要的工作量较大，所划分的网格形式对计算精度和计算规模将产生直接影响。为建立正确、合理的有限元模型，这里介绍划分网格时应考虑的一些基本原则。

1. 网格数量

网格数量的多少将影响计算结果的精度和计算规模的大小。一般来讲，网格数量增加，计算精度会有所提高，但同时计算规模也会增加，所以在确定网格数量时应权衡两个因数综合考虑。

图 1 中的曲线 1 表示结构中的位移随网格数量收敛的一般曲线，曲线 2 代表计算时间随网格数量的变化。可以看出，网格较少时增加网格数量可以使计算精度明显提高，而计算时间不会有大的增加。当网格数量增加到一定程度后，再继续增加网格时精度提高甚微，而计算时间却有大幅度增加。所以应注意增加网格的经济性。实际应用时可以比较两种网格划分的计算结果，如果两次计算结果相差较大，可以继续增加网格，相反则停止计算。

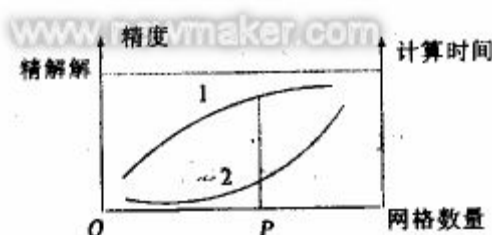


图 1 位移精度和计算时间随网格数量的变化

在决定网格数量时应考虑分析数据的类型。在静力分析时，如果仅仅是计算结构的变形，网格数量可以少一些。如果需要计算应力，则在精度要求相同的情况下应取相对较多的网格。同样在响应计算中，计算应力响应所取的网格数应比计算位移响应多。在计算结构固有动力特性时，若仅仅是计算少数低阶模态，可以选择较少的网格，如果计算的模态阶次较高，则应选择较多的网格。在热分析中，结构内部的温度梯度不大，不需要大量的内部单元，这时可划分较少的网格。

2. 网格疏密

网格疏密是指在结构不同部位采用大小不同的网格，这是为了适应计算数据的分布特点。在计算数据变化梯度较大的部位(如应力集中处)，为了较好地反映数据变化规律，需要采用比较密集的网格。而在计算数据变化梯度较小的部位，为减小模型规模，则应划分相对稀疏的网格。这样，整个结构便表现出疏密不同的网格划分形式。

图 2 是中心带圆孔方板的四分之一模型，其网格反映了疏密不同的划分原则。小圆孔附近存在应力集中，采用了比较密的网格。板的四周应力梯度较小，网格分得较稀。其中图 b 中网格疏密相差更大，它比图 a 中的网格少 48 个，但计算出的孔缘最大应力相差 1%，而计算时间却减小了 36%。由此可见，采用疏密不同的网格划分，既可以保持相当的计算精度，又可使网格数量减小。因此，网格数量应增加到结构的关键部位，在次要部位增加网格是不必要的，也是不经济的。

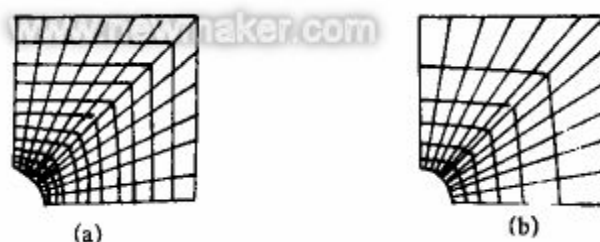


图 2 带孔方板的四分之一模型

划分疏密不同的网格主要用于应力分析(包括静应力和动应力),而计算固有特性时则趋于采用较均匀的网格形式。这是因为固有频率和振型主要取决于结构质量分布和刚度分布,不存在类似应力集中的现象,采用均匀网格可使结构刚度矩阵和质量矩阵的元素不致相差太大,可减小数值计算误差。同样,在结构温度场计算中也趋于采用均匀网格。

3. 网格质量

网格质量是指网格几何形状的合理性。质量好坏将影响计算精度。质量太差的网格甚至会中止计算。直观上看,网格各边或各个内角相差不大、网格面不过分扭曲、边节点位于边界等份点附近的网格质量较好。网格质量可用细长比、锥度比、内角、翘曲量、拉伸值、边节点位置偏差等指标度量。

划分网格时一般要求网格质量能达到某些指标要求。在重点研究的结构关键部位,应保证划分高质量网格,即使是个别质量很差的网格也会引起很大的局部误差。而在结构次要部位,网格质量可适当降低。当模型中存在质量很差的网格(称为畸形网格)时,计算过程将无法进行。图 3 是三种常见的畸形网格,其中 a 单元的节点交叉编号, b 单元的内角大于 180° , c 单元的两对节点重合,网格面积为零。

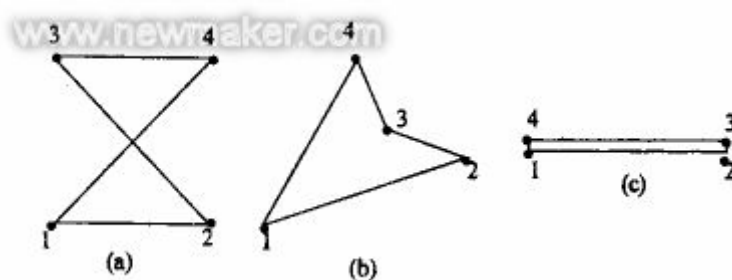


图 3 几种常见的畸形网格

4. 网格分界面和分界点

结构中的一些特殊界面和特殊点应分为网格边界或节点以便定义材料特性、物理特性、载荷和位移约束条件。即应使网格形式满足边界条件特点，而不应让边界条件来适应网格。常见的特殊界面和特殊点有材料分界面、几何尺寸突变面、分布载荷分界线(点)、集中载荷作用点和位移约束作用点等。图 4 是具有上述几种界面的结构及其网格划分形式。

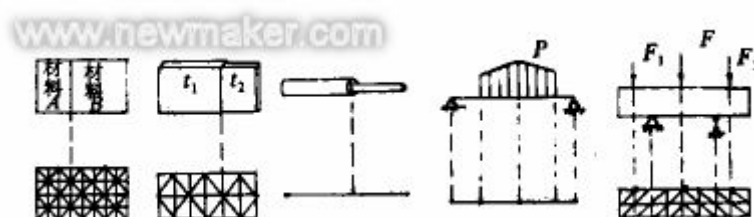


图 4 特殊界面和特殊点网格划分

5. 位移协调性

位移协调是指单元上的力和力矩能够通过节点传递相邻单元。为保证位移协调，一个单元的节点必须同时也是相邻单元的节点，而不应是内点或边界点。相邻单元的共有节点具有相同的自由度性质。否则，单元之间须用多点约束等式或约束单元进行约束处理。图 5 是两种位移不协调的网格划分，图 a 中的节点 1 仅属于一个单元，变形后会产生材料裂缝或重叠。图 b 中的平面单元和梁单元节点的自由度性质不同，梁单元的力矩无法传递到平面单元。

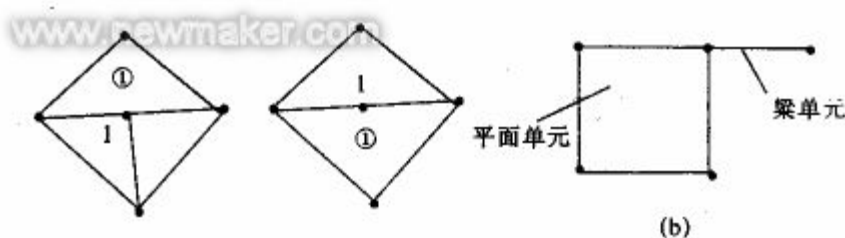


图 5 位移不协调的网格划分

6. 网格布局

当结构形状对称时，其网格也应划分对称网格，以使模型表现出相应的对称特性（如集中质矩阵对称）。不对称布局会引起一定误差，如在图 6 中，悬臂梁截面对称于 y 轴，在对称载荷作用下，自由端两对称节点 1、2 的挠度值本应相等。但若分图 b 所示的不对称网格，计算出的 $y_1=0.0346$, $y_2=0.0350$ 。若改用图 c 所示的网格，则 y_1 和 y_2 完全相同。

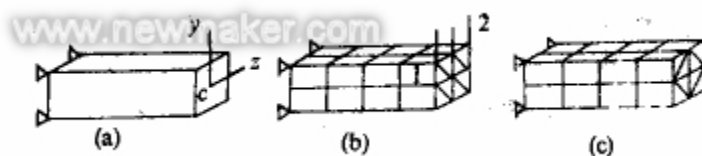


图 6 网格布局对计算结果的影响

所以按照上述的划分网格原则划分好该设计的网格如下：

第一步：画好每条对应的线网格划分：[Operation]—[Mesh]— [Edge] — [Mesh Edges]，在[Edges]中选中所需要划分的直线，把下面的[Spacing]中选中[Interval size]里填入 0.01，最后点击[Apply]。完成线网格的划分。

第二步：将线网格转为面网格：[Operation]—[Mesh]— [Face] —[Mesh Faces]，在[Faces]里选好对应的线条，每个选好的划分的线网格选中时要能构成一个完整的面，分别将封闭成面的线条选中，点按键[Apply]即完成面网格的划分。（注：对应、对称线的网格一次性划分，转换成面网格不能多选，不能少选，否则划分不出来）

第三步：建窑体的结构化体网格：[Operation]—[Mesh]— [Volume]— [Mesh Volumes]中选中对应的划分好的面网格，转换成体网格，（转换的时候划

分的网格为四面体网格)。最后最后点击[Apply]。即完成了所有网格的划分。
网格模型建立完成后如图 4-2 所示。

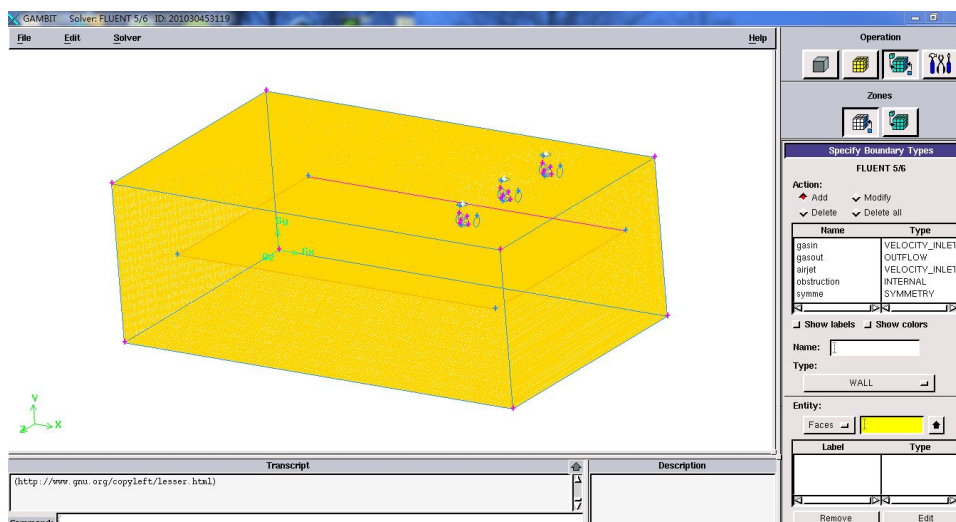


图 4-2 窑顶 180° 搅拌气幕的窑三维网格图及 Gamebit 操作界面图

4.8 输出网格并保存会话

A. [File]—[Export] | [Mesh...]—打开 Export Mesh File 会话框—输入要输出的文件名 201030453119.msh—[Accept]，则完成了网格文件的输出操作。

B. [File]—[Exit], 即退出 Gambit。

5. 用 Fluent 进行流场与温度场的仿真计算

5.1 与网格相关的操作:

A. 首先是启动 Fluent 软件, 具体步骤是: [开始]—[所有程序]—[Fluent Inc products]—[Fluent 6.3]—在出现的“Fluent Version”对话框中选“3d”—[Run]。

B. 读入网格文件: [File] | [Read] | [Case...]—在“Select File”对话框中找到相应的目录及其文件—[OK]。

C. 检查网络: 点击菜单[Grid] | [Check]—出现所检查的部分信息(注意: a. “Minimum Volume”是网格的最小体积, 它的值一定要大于 0; b. “Domain Extents”所列区域要符合想计算的区域)。

D. 平滑网格: 点击菜单[Grid] | [Smooth/Swap Grid]—先后点击出现的对话框中 Smooth, Swap 按钮直到 Fluent 报告没有需要交换的面为止—[Close]关闭对话框。—[Close] (这一步为确保网格质量, 对三角单元尤其重要)

E. 设置区域尺寸及确定长度单位: 点击菜单[Grid] | [Scale...]—打开“Scale Grid”对话框—在“Units Conversion”栏中点击右下箭头出现的下拉表中选需要的单位[cm]—[Change Length Units]—对计算区域的尺寸进行设置—[scale]—[Close]。(求解过程中, 除了长度外, 其他单位均采用 SI 制, 一般没有必要改动)。

F. 显示网格: 点击菜单[Display] | [Grid...]—出现“Grid Display”对话框—选中要显示的部分(通过 Surface 下面的列表框)—[Display]—即在屏幕中出现带网络的所建模型图样。(鼠标右键点击网格图的边界线在 Fluent 窗口看到该边界类型等, 这一方法在设置边界条件时非常重要)。

5.2 建立求解模型:

[Define] | [Models]—[Solver...]—打开“Solver”对话框。

(1) 设置求解器:

A. Pressure Based—基于压力的分离算法, Density Based—基于密度的耦合显式算法; 基于压力的求解器是针对低速、不可压缩流开发的, 因此这里选取基于压力的分离算法。

B. Formulation-算法: Implicit-隐式算法, Explicit-显式算法; 本文选取隐式算法。

C. Space-空间属性: 3D-三维, Axisymmetric-轴对称, Axisymmetric- Swirl-轴对称旋转空间;

D. Time-时间属性: Steady-定常流动, Unsteady-非定常流动; 窑内烟气在连续窑内流动属稳定流动, 故选取定常流动。

E. Velocity Formulation-速度属性: Absolute-绝对速度, Relative-相对速度。这里选取绝对速度。

(2) 设置 $k-\epsilon$ 湍流模型: [Define] | [Models] — [Viscous...] — 打开 “Viscous Models” 对话框 (Inviscid-无黏理想流体, Laminar-层流模型, 另四个为常见的湍流模型) — 本课题窑内烟气流动状态为粘性流体紊流状态, 所以选 “k-epsilon” — 打开 “Viscous Model” 对话框 — 保留模型常数默认值 — [OK]。

(3) 选择能量方程: 由于本课题要研究温度场, 所以必须激活能量方程: [Define] | [Models] — [Energy...] — 打开对话框 — 勾选 Energy Equation 左侧按钮 — 点击 [OK] 即可激活能量方程。

5.3 创建新流体

创建新流体——烟气, 取名为 gas, 并设置流体的物理性质:

[Define] | [Materials...] — 打开 “Materials” 对话框, 在 Name 栏填入 gas; 在属性栏内输入烟气的物理属性: Density-密度 0.457, Cp-等压比容 1.185, Thermal Conductivity-导热系数 0.0656, Viscosity-动力粘度 0.0000348 (以上物性数据取烟气平均温度为 450°C 时的数据) — [change/Create] — 在弹出的对话框点击 NO — 点击 Close 关闭流体属性设置对话框。(注意: a. 此项操作使名为 gas 的流体添加到材料选择列表 (Fluid Materials) 中, 可在其中查到它。另也可从材料库中选择已有的材料和拷贝属性 (点击 Database...), 若要改变其原有的属性, 也可在 Properties 栏编辑, 然后再点击 Change/Create 按钮进行修改。

5.4 设置边界条件:

[Define] | [Boundary...] — 打开 “Boundary Condition” 对话框。

- (1) 设置流体：在 Zone 栏内选择 flued 其类型在右边 Type 栏内选 Fluid—[点击 Set...]—打开 Fluid 设置对话框—在 Material Name 下拉列表中选 gas—[OK]。
- (2) 设置窑内烟气入口与喷管入口的速度边界条件：在 Zone 栏内选择 gasin，则在右边 Type 栏内显示其类型为 Velocity-Inlet，点击 Set...，则打开 Velocity-Inlet 设置对话框：a. 在 Velocity Specification Method(速度给定方式)下拉列表中选 Magnitude, Normal to Boundary(给定速度大小，速度方向垂直于边界)；b. 在 Velocity Magnitude (入口速度)一栏内填入 1.5，在 Temperature(入口温度)一栏内 673(K)；c. 在 Turbulence Specification Method(湍流定义方法)下拉列表中选 Intensity and Hydraulic Diameter(强度与水力直径)；d. 在 Turbulence Intensity(湍流强度)一栏内 3；e. 在 Hydraulic Diameter (水力直径)一栏内 1(入口直径)—(运用公式： $4A/L=4*(0.8*1.3)/2*(0.8+1.3)=0.99\text{m}$ ，即当量直径为 99cm)。
- (3) 用同样的方法对喷管口 jetin 进行设置(入口速度 15，入口温度 80，湍流强度 6，水力直径 0.05...)。
- (4) 设置烟气出口边界条件：在 Zone 栏内选择 gasout，点击 Set...，打开 outlet-vent 对话框设置温度 773 (K)，水力直径 99 (cm)。
- (5) 对于窑顶、窑底的 Wall 也可进行必要的设置：...

5.5 求解

- (1) 流场初始化：[Solver]—[Initialize]—[Initialize...]—打开 Solution Initialization 对话框—在 Compute from 列表中选 airjet，则表中数据与边界 airjet 相同(鉴于初始化仅是对内部流动的一个猜测值，可以对其数值更改，其结果影响到迭代计算的收敛速度)—[Init]—[Apply]—[Close]。
- (2) 设置监视窗口：[Solver]—[Monitor]—[Surface...]—打开 Surface Monitors 设置对话框—将 Surface Monitor 右侧文本框数目选为 1—选中 Plot—点击 Monitor-1 最右边的 Define...按钮—出现 Define...对话框—在 Report of 项选 Temperature 和 Static Temperature—在 Surfaces 项选择监测表面为 gasout—在 Report Type 下拉列表中选 Area-Weighted Average(面积平均)—[OK]—点击监视对话框的[OK]。(运行后监视图见图 5-1)

(3) 保存文件: [File] | [Read]—[Case...]—输入文件名—[OK].

(4) 开始进行 500 次迭代计算: [Solver] | [Interate...]—在打开的对话框中 Number of Iteration(迭代次数)栏输入 500—[Interate] (开始计算)。(由监视曲线图 2 可以明显看到迭代 300 次后出口截面平均温度已基本达到稳定状态了。

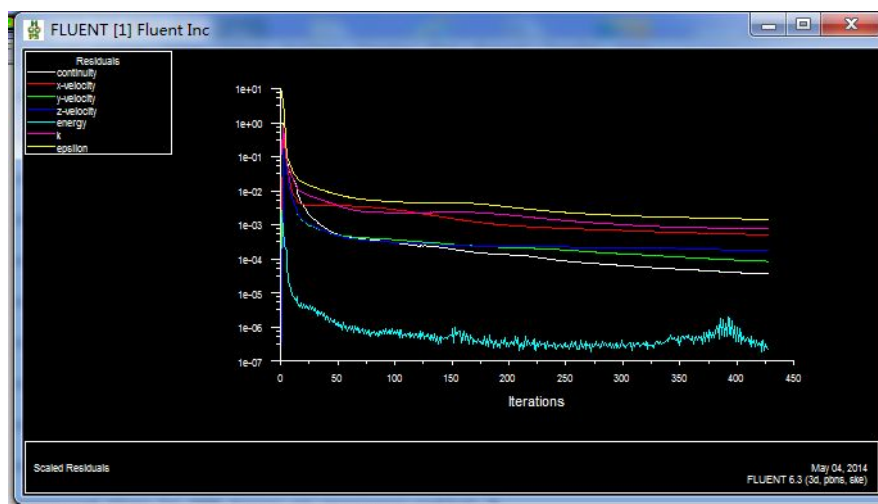


图 5-1 迭代监控图

6. 仿真结果与分析

6.1 计算结果的速度场

利用不同颜色显示速度分布步骤如下：

第一步：选中菜单栏[Display]，子菜单中选中[Contours...]

第二步：在打开的对话框中设置：在 Contours of 栏下选 Velocity...和 Velocity Magintude(速度大小)。

第三步：在 Options 下选 Filled(填充方式)

第四步：然后在对话框中点击[compute]。

第五步：点击对话框左下的 Disply 即可。(结果如图图 6-1)

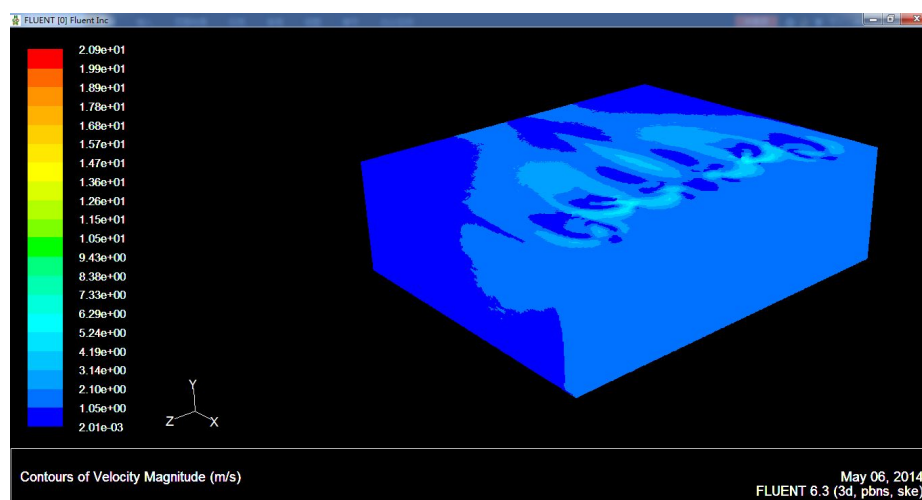


图 6-1 计算结果的速度场

结论：从此图可以看出，右前方的烟气入口面的速度相差基本不大，越到烟气出口流速越大，通入搅拌气幕的位置速度较大，速度变化面沿着流速方向缩小渐进。等速直径沿着流速方向直径越来越小速度越来越小。

6.2 计算结果的温度场

迭代完后显示温度场的具体步骤如下：

第一步：选择菜单栏[Display] | [Contours...]—在打开的对话框中设置：

第二步：在 Contours of 栏下选 Temperature...和 Static Temperature(静态温度)，在 Options 下选 Filled(填充方式)（不选 Filled 则为等温度曲线显示），

第三步：选 Global Range, Auto Range（自动定范围-默认，也可不选）—Levels

中填 20（显示等温线条数）。

第四步：在 Setup 填 1，然后单击[compute]，再次单击[Disply]（鼠标右键点击区域中任一点将会在信息反馈窗内显示此点的温度值）（图 6-2）

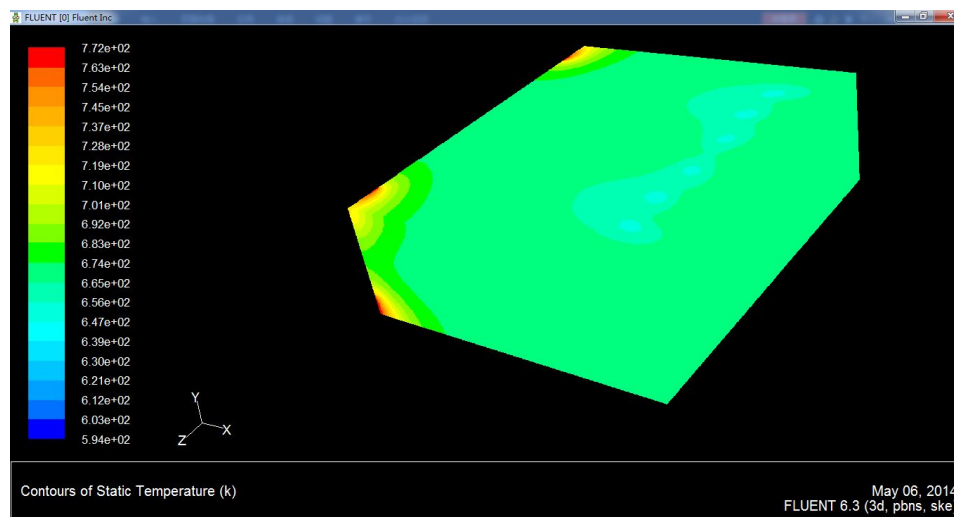


图 6-2 计算结果的温度场

结论：此图可以看出靠近烟气入口位置温度基本保持不变，就是在烟气出口的角落温度还是叫附近高一些。

6.3 计算结果的速度矢量场

显示速度矢量场操作步骤：

第一步：点击菜单栏的[Display]

第二步：选中子菜单栏的[Vectors...]

第三步：在 Vectors of 栏下选 Velocity...和 Velocity Magintude(速度大小)

第四步：在 Options 下选 Global Range, Auto Range, Auto Scale。

第五步：在 Style 选 arrow—在 Scale 中填 3

第六步：点击[compute]。

第七步：最后点击[Disply]得速度矢量场（见图 6-3）。

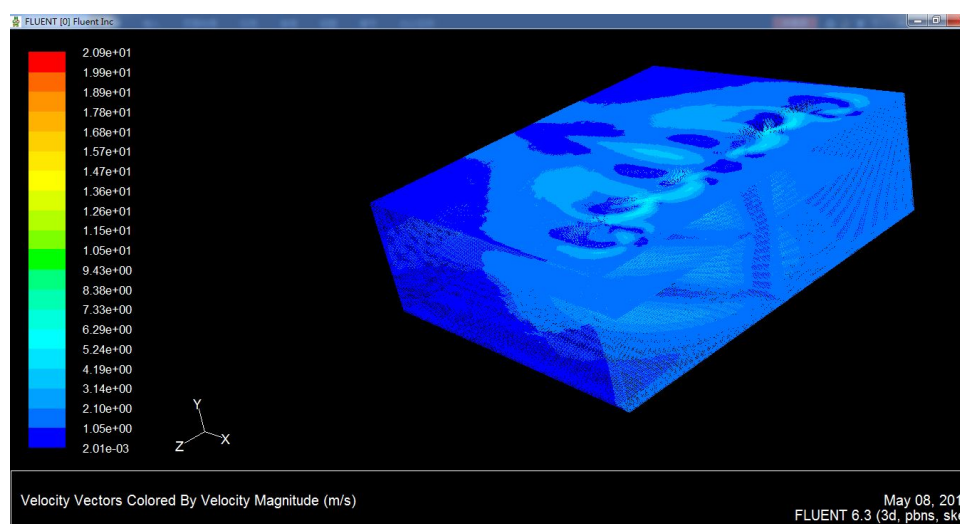


图 6-3 计算结果的速度矢量场

结论：从得到的速度矢量图中，可以看出速度的大小和烟气流动的方向，还有可以看出速度的密集程度等等。

6.4 计算结果的等压线

显示流场中的等压力线的步骤：

第一步：点击菜单栏[Display]。

第二步：在子菜单栏中选中[Contours...]

第三步：在 Contours of 栏下选 Pressure...和 Static Pressure。

第四步：在 Contours of 栏不选中 Filled—Levels 中填 50—Setup 填 3。

第五步：分别按顺序点击[compute]和[Disply]得等压线图（图 6-4）。

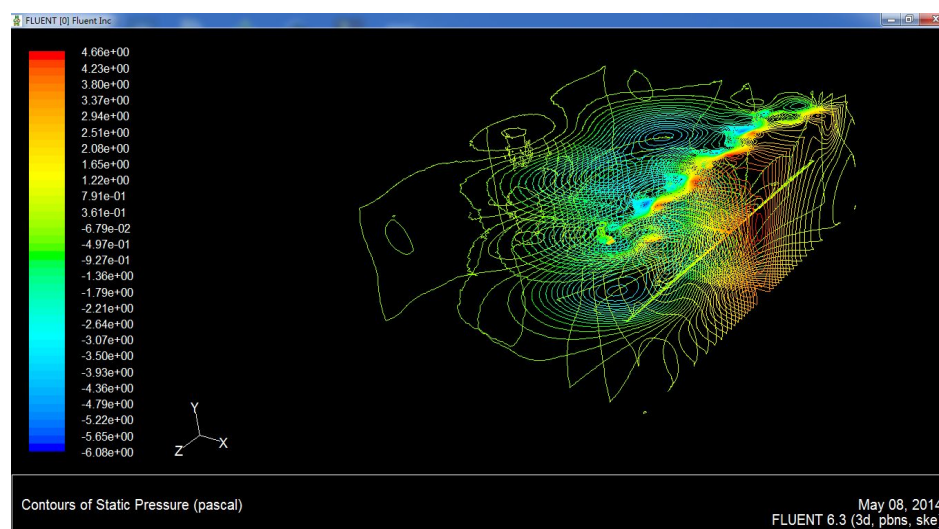


图 6-4 计算结果的等压线

结论：此图可以看出压力大的地方集中在搅拌气幕进口附近与烟气入口中间面上。沿着烟气方向，压力逐渐减小。

6.5 出口截面的温度曲线

创建出口截面上的温度曲线图步骤：

第一步：选中菜单栏中的[Plot]。

第二步：在子菜单栏中选中[XYPlot...]。

第三步：在出现的对话框中 Y Axis Function 项选 Temperature...和 Static Temperature,。

第四步：在 Surfaces 项选 gasout,在 Plot Direction 项 x 填 0, y 填 0.8,z 填入 0。

第五步：点击[plot]即可得出温度曲线图。如图得到图 6-5 所示。

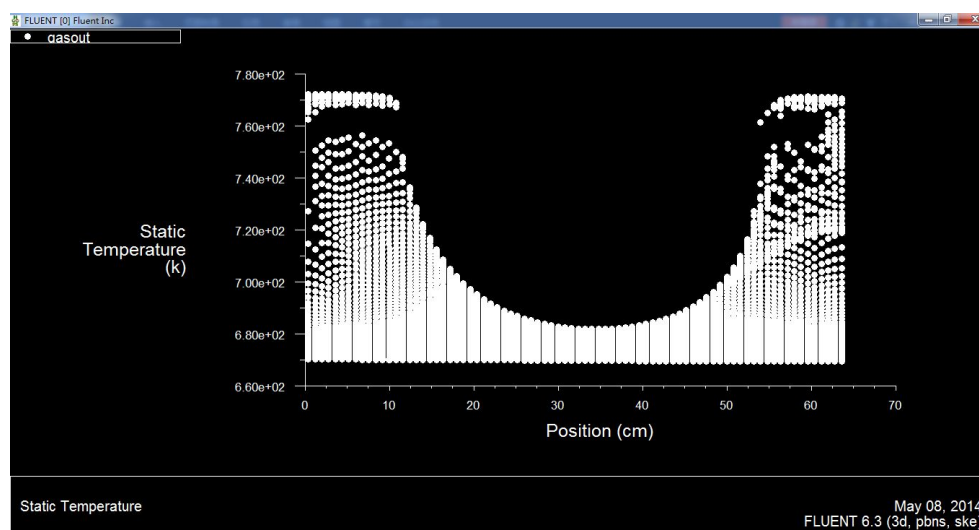


图 6-5 出口截面的温度曲线

结论：从温度曲线可以看出出口断面温度成开口向上的抛物线状，沿着中心线，温度逐渐向两边增大。

为比较有扰动气幕后温度场与没有的作比较,建议结果中给出气幕前后两个与烟气主流方向垂直截面的温度场图(云图和等温线图)。方法是:

1) 创建等(坐标)值面: 点击菜单栏[surface]-[Iso-Surface]—打开 Iso-Surface 对话框。在 Surface of Constant 下拉列表中选 Grid. 和 X-coordinate, 然后点击 Compute, 在 Min 和 Max 栏会显示区域内 X 值的范围为 0cm-220cm。然后在 Iso-Values 项填入数字(0)—在 New Surface Name 下填入该面的名称“surf-1”—[Create]

同理在扰动气幕后再创一个面“surf-2”: 步骤如下: 点击[surface]|[Iso-Surface]—打开 Iso-Surface 对话框—在 Surface of Constant 下拉列表中选 Grid.. 和 X-coordinate, 点击 Compute, 在 Min 和 Max 栏会显示区域(0cm-220cm), X 值的范围—在 Iso-Values 项填入数字 110, 最后在 New Surface Name 下填入该面的名称“surf-2”—[Create]

2) 显示该面的温度场: [Display]|[Contours...]—打开 Contours 对话框—在 Optiona 项选 Filled(取消选项下的 Auto Range 选项, 用户可定义图形的最大最小值, 缩小它们的差距以使云图更清晰)——在 Contour of 下拉列表中选择 Temperature 和 Static Temperature(或 Pressure 和 Static Pressure)—在 Levels 项选 30(如显示的图不清可调整)—在 Surfaces 项选刚创建的面 surf-1—[Display]:即可显示该面的温度分布云图(图 6-6 为 surf-1 的温度分布云图, 图 6-7 为 surf-2 的温度分布云图)

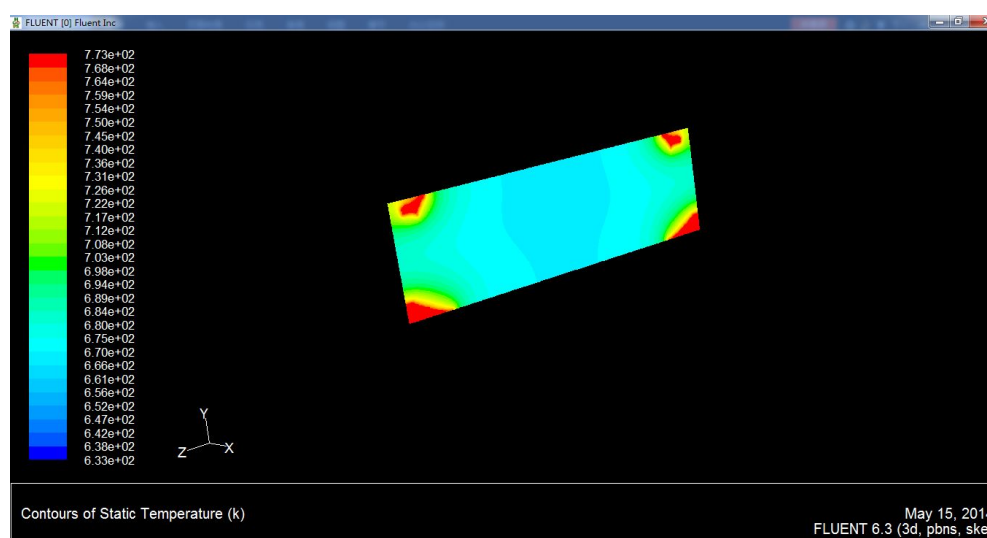


图 6-6 surf-1 的温度分布云图

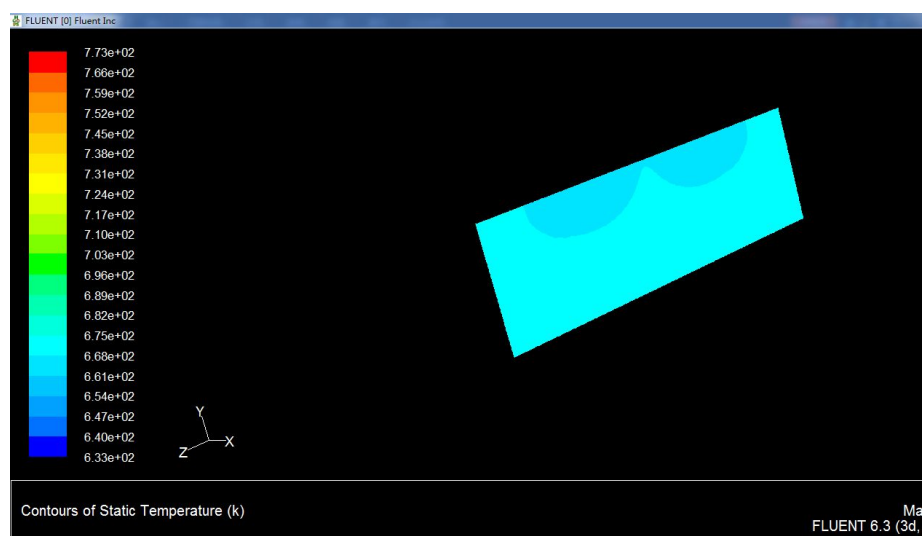


图 6-7 surf-2 的温度分布云图

结论：图 6-6 的 surf-1 的温度分布云图是烟气的出口处的温度分布图（垂直于水平面），图 6-7 的 surf-2 的温度分布云图是烟气中间面的温度分布云图（垂直于水平面），从这两个图中可以看出每个断面窑内中间温度都很接近，都保持在 675K 左右。而且温度分布相差挺大的。随着烟气从进出口往出口面流动时，窑内中间部分的温度慢慢降低，靠近窑顶的面上温度慢慢升高，窑内的低温处会聚集在中间。窑内的高温度会慢慢的集中到角落里。

所以搅拌气幕可以很好的搅动窑内气体温度的分布，更好的使窑内中间温度均匀。减少上下温差有很好的效果。

（同理还可制作其它截面的温度、速度曲线图…）

7. 结语

7.1 收获与体会

2013 年的寒假，我就开始了我的毕业设计工作，时至今日，历时将近半年的时间，毕业设计基本完成。想想这段难忘的岁月，从最初的茫然，到慢慢的进入状态，再到对思路逐渐的清晰，整个设计过程难以用语言来表达。遇到困难，我会觉得无从下手，不知从何做起；当困难解决了，我会觉得豁然开朗，思路打开了；当毕业设计经过一次次的修改后，基本成型的时候，我觉得很有成就感。毕业设计的写作是一个长期的过程，需要不断的进行精心的修改，不断地去整理各方面的资料，不断的想出新的创意，认真总结。历经了这么久的努力，紧张而又充实的毕业设计终要落下帷幕。在这次毕业设计的的过程中，我拥有了无数难忘的感动和收获。

1 月初，我们开始毕业设计的选题，我所选的设计题目是《窑顶 180° 搅拌气幕对窑内流场温度场影响初探》，在指导老师的指点下，寒假里通过各种渠道立刻着手于资料的搜集工作中。在我查找资料的过程中，让我对我所学过的知识有所巩固和提高，使我学到了新知识，增长了见识。

2 月到 3 月底，我们去了我们招聘会上投简历进去的公司—江苏宝能建筑材料有限公司。在那里实习，收获了很多很多。再这段时间我开始搜集资料已经查找完毕了，接下来我开始对所搜集的资料进行整理、分析研究。我在电脑中都进行分类的整理，整理指导老师给我们的模拟设计。然后针对不同设计部分的写作内容进行归纳和总结。尽量使我的资料和毕业设计的内容符合，这有利于毕业设计的研究。整理好资料后，在老师的指导基础上，完成了毕业设计的提纲，通过邮箱发给指导老师检查与修改。并及时提交给老师进行沟通，听取老师的意见。老师的意见总是很宝贵的，可以很好的指出提纲中的不足，以及需要什么样的资料来完善此次设计的说明书。

4 月初，当一切准备工作就绪，我开始着手毕业设计初稿的写作。在写作过程中遇到就及时和指导老师联系沟通，请教老师，并和同学互相交流。在指导老师的帮助下，困难一个一个解决掉。经过大约两个多月的时间，终于完成了毕业设计的初稿。此时我整个人都很累，但同时看着电脑荧屏上的毕业设计初稿，我的心里是甜的，我觉得这一切都很值。因为这次毕业设计的制作过程是我的一次

再学习、再提高的过程，同时也是对我大学三年所学知识的检验。

我在这次毕业设计的写作过程中可谓是获益匪浅，最大的收益就是让我培养了脚踏实地，认真严谨，实事求是的学习态度，不怕困难、坚持不懈、吃苦耐劳的精神。设计写作中，需要的是耐心，还要用心。每当无法实现自己的想法或者运行不下去的时候，我就会出现浮躁的情绪，但是我没有放弃，而是适时地调节自己的心态，最关键是在困难面前，理顺思路，寻找突破点，一步一个脚印的慢慢来实现自己既定的目标。越是不懂的东西才要去学，在学习的过程中你会收获很多，在学习之后你会感觉到很有成就感，这也是我在完成毕业设计之后体会到的。我想这是一次对意志的磨练，也是对我实际能力的一次提升，相信这对我今后走向工作岗位是至关重要的。

7.2 论文结论

通过用 Fluent 软件对窑顶设有 180° 搅拌气幕的辊道窑的窑内流场和温度场的初步研究，可以得出以下结论：

- 1) 运用 Fluent 软件对搅拌气幕影响窑内流场和温度场的各种因素是可行的。
- 2) 本仿真结果说明，窑顶设置向烟气来流方向的 180° 搅拌气幕可以降低窑顶部温度，有利于窑内断面温度的均匀。

7.3 本课题的不足及今后研究方向

本课题的不足之处：

- 1) 设备限制：不是所有的辊道窑设置搅拌气幕都可行的，有些辊道窑小，设置搅气幕很麻烦，或者根本设置不了。
- 2) 网格划分得不细：辊道窑在建立模型的时候都要划分网格，但是用 Gambit 划分网格的时候工作量大，网格数量多，都是计算机机械的制作，都是模拟出来的网格，可是模拟的网格不是所有的都很接近的，有些地方网格偏大，有些帝王则网格偏小，所以划分的不均匀，有些大的网格太大，导致那个体面的网格不细。最终用那些网格代替，结果做出来粗糙，故用电脑模拟出来的不恰当。
- 3) 时间问题：由于时间的因素导致没有对照的模型，导致做出来的结果误差大，以偏概全等等。（时间允许的话最起码可以对比一下结果效果会更好，如改变喷风流速等都是很好的对比）

4) 水平低：由于我们专业不是以研究这些建模为主的，理论不足，设计者水平低，导致做出的效果不佳。有些还没有考虑的很清楚，如烟气的浮力就没做考虑，也会导致效果不佳。

本课题今后研究方向：

陶瓷发展的快，最关键是要控制好它的烧成温度，控制的好，烧出的产品更能应用于我们生活中。

通过此次毕业设计，我认识到了此次毕业设计在陶瓷行业中的应用是多么重要。今后我们可以用次类似的设计可以准确的模拟出陶瓷窑炉在烧成制品过程中，窑炉的各个地方的温度、压力、流速的变化，这样可以更好的掌握和控制窑炉，以后的可以朝着不管设备多大多小都可以轻松的利用此数值模拟来控制窑炉内部的温度，网格会划分的更到位，是窑炉中的数值模拟更加准确更加完美。会让我们在很短的时间内掌握和运用此研究来开发更新更好更节能减排的窑炉，为以后陶瓷行业打下良好的基础，为以后发展做出贡献。为以后出新的陶瓷产品做出贡献。让如今一些难以控制温度而不好烧制出来的作品非常轻松的烧制出来。为我们的生活增添色彩，为以后的各式各样的陶瓷，一些精密仪器中的陶瓷产品更加贴近我们的生活。

有了 Fluent 研究来数值模拟陶瓷窑炉，做出的陶瓷产品更能满足我们的生活需要，以后在医药、航空、化工等发展趋势会越来越火，越来越美好。

后 记

随着盛夏的来临，通过老师的指导、同学的帮助、自身的努力，三个多月的毕业设计工作也接近了尾声，现在回过头去看看自己辊道窑的设计过程可以说是感触颇多、收获颇丰。

在此次设计以前，自己通过用 Gambit 建模、Fluent 求解，掌握对辊道窑的窑内各处压力场、温度场、速度场等的大小及分布有了一个感性的认识，但在结合实际，特别是毕业实习的所见进行操作的时候才发现理论结合实际的必要性。同时，在整个建模求解的过程中，自己也是在不断的修改、完善，通过这些，我不但更深入地了解了辊道窑设计的要点，更是提高了自身的绘图能力，也是一综合素质的提高了。当然，自己的设计也避免不了这样或那样的问题，通过老师的指导，与同学之间的讨论，虽然已经减少了许多，但还是谈不上完善。一些问题也留待到实际工作当中进行检验与解决。

在本次设计中，十分感谢胡国林等指导老师对自己的设计提出问题，并亲自指导自己进行修改以求完善，也感谢那些在设计过程中给自己提出意见的同学。

四年的大学生活即将结束，迎接自己的将是一个新的挑战，相信通过这次的毕业设计，一定会给工作岗位上的自己确定一个明确的方向，为自己的将来打下坚实的基础。

参 考 文 献

- 【1】胡国林，陈功备编《陶瓷工业窑炉》 武汉理工大学出版社，2010.8
- 【2】胡国林著.《建陶工业辊道窑》.北京:中国轻工业出版社，2009.2
- 【3】汪和平，冯青编.《窑炉砌筑与安装》.景德镇陶瓷学院，1998
- 【4】王瑞金，张凯编.《FLUENT 技术基础与应用实例》. 清华大学出版社.2007.2
- 【5】王瑞金，王刚.《GAMBIT 中文教程》. 清华大学出版社.2007.2
- 【6】吴武辉. 陶瓷辊道窑温度场数值模拟与分析研究[D]. 武汉理工大学 2008
- 【7】罗强. 辊道窑内高变化对窑内流场和温度场的影响研究[D]. 景德镇陶瓷学院

附：文献调研报告

Fluent software and its application in the ceramic kiln

Ceramic kiln is the main thermal equipment used in the ceramic industry , the application of computer technology to improve the design and operation of the equipment level , bring good economic and social benefits. Many scientists and made outstanding contributions to this end , such as Zeng Ke, Jerry Yang , WANG Shi-feng , etc., in computer-aided design and optimization, Sun Yutong , Zeng can wait in the numerical simulation of thermal processes , the Kang give glory , Bing , Zhang Xiaojun et automatic control has carried out extensive research . But the relevant software or system design time is too long, while the larger simplifies the mathematical modeling of the physical model , before and after treatment of complicated numerical limits , such as software development and applications , should seek new methods and tools.

First, the basic characteristics

Since the 70s of last century , CFD (Computational Fluid Dynamics, Computational Fluid Dynamics) technology is developing rapidly due to the occurrence of large computers. CFD technology for experimental study has its unique advantages , such as: low (1) research costs , short cycle ; (2) No test instrument interference ; (3) be able to get the full data ; (4) in the case of a computer screen can calculate reproduce the image and so on. Its engineering design and transformation equipment plays an important role.

CFD mathematical model consisting of a variety of common software are based Navier - Stokes equations with various turbulence models as the main body , plus the multiphase flow model , and the chemical reaction of combustion flow model , free

surface flow model and a non-Newtonian fluid model. Methods discrete finite volume method (FVM) or finite element method (FEM). Navier - Stokes equations module is the core part of the CFD software. The famous Universal CFD software PHOENICS, FLUENT, STAR-CD, CFX-TASCflow and so on NUMECA, PHOENICS CFD software is the first launch of generic software, FLUENT, STAR-CD and CFX-TASCflow is currently on the international market mainstream software, and NUMECA represents the common CFD software comer. In many of the world's CFD software development, research vendors, FLUENT software exclusively for more than 40 % market share, has the absolute market advantage. In the course of development of the commercial CFD, FLUENT software is the absolute leader and technology pioneer. FLUENT CFD software design concept is based on computer software group!, Against the flow of the physical characteristics of each kind of problem, it's suitable for the use of numerical solution to achieve the best in all aspects of computing speed, stability and accuracy. Since encompasses Fluent Dynamic International Belgium Poly flow and Fluent Dynamic International (FDI) in all the technical strength (the former is a recognized company occupied a leading position in the viscoelastic polymer flow simulation aspect, which is based on the finite element method CFD leading software companies), so FLUENT software has the following advantages:

(1) advanced mesh generation techniques. Gambit before using dedicated processing software, so the grid can have a variety of shapes. Two-dimensional flow can generate triangular and rectangular grid; For three-dimensional flow, you can generate tetrahedral, hexahedral, triangular prism and pyramid etc. grid; combined with the specific hybrid grid computing can also generate its adaptive function, able to network subdivide or coarse grid, or generate discontinuous grid, variable dynamic mesh grid and slippery.

(2) complete a variety of optimization of physical models. Such as: Computational fluid flow and heat transfer models (including natural convection, steady and unsteady flow, laminar flow, turbulence, turbulence, incompressible and compressible flow, cycle flow, rotational flow and time-dependent flow, etc.), the

radiation model , with variable model, discrete phase transition model multiphase flow model and chemical species transport and reacting flow model. On the flow characteristics of each kind of physical problem , it has a suitable numerical method , users can explicit or implicit difference scheme can be selected to achieve the best in terms of speed , stability and accuracy and so on.

(3) efficient numerical calculation and processing capabilities. FLUENT combining different areas of computing software up to become computer software CFD group can easily be exchanged between software values and uniform before and after the processing tools , which obviates the researchers in the calculation method of programming, after repeated handling and other inputs , inefficient labor , and can be used to focus on the physical and intellectual exploration of the problem itself .

FLUENT software mainly consists of the following components : (1) GAMBIT is mainly used to create geometric model and mesh generation . (2) FLUENT is used for flow simulation solver . (3) prePDF PDF to simulate the combustion process. (4) TGrid used to generate the volume mesh grid from the existing boundary . (5) Filters (Translators) to convert other programs generated mesh for FLUENT calculations. Program can interface include : ANSYS, I-DEAS, NASTRAN, PATRAN and so on. Use FLUENT software for fluid flow and heat transfer simulation processes. First performed with flow area GAMBIT geometry construction, border type and mesh generation, and output format FLUENT solver for calculation ; then FLUENT solver to solve the calculation of the flow area , and the results of post-processing.

Second, the basic application examples

FLUENT software is mainly used in aerospace, defense technology , power systems, automotive design , shipbuilding , chemical processing , household appliances and other fields. In civilian areas , the software in the automotive, air conditioning design the most widely used research results also quite fruitful . In the simulation of ceramic kilns , ceramic kilns because the internal structure is very complex flow field, temperature field measurement field and atmosphere are very

difficult , experimental research is still insufficient to fully reveal the flow and heat transfer law .

In recent years, some scholars began to use the software to simulate the flow conditions inside the kiln . Yang Fan , etc. using computational fluid dynamics software FLUENT, Xiangtan Iron and Steel Company of the second high-speed wire rod rolling mill furnace three-dimensional flow field numerical simulation to obtain the distribution of the gas flow within the furnace , flow rate and pressure. Gas flow conditions within the furnace , velocity and pressure distribution characteristics analysis showed that the local structure suited to the operational requirements of the furnace inside the furnace , the actual operation of the simulation results in line with the furnace for further furnace provide a basis for structural transformation . Changfu compared different turbulence models , such as FLUENT provided ; $k-\varepsilon$ model , RNGk $k-\varepsilon$ model , RNGk $k-\varepsilon$ model with a swirl correction , Realizable $k-\varepsilon$ model , Reynolds stress model for cold vapor Tangentially Fired Boiler flow numerical simulation effects ; explored to reduce the numerical false diffusion effect on reducing the mesh size used in the strong spin flow and improve the accuracy of the merits of difference schemes and other measures for the theoretical analysis strongly swirling turbulent flow and combustion of pulverized coal boiler tangentially the fluid flow to provide a reference for engineering design .

FLUENT software in ceramic kilns also have a preliminary application . Gao Hui, using CFD software FLUENT.TM 5.4.8, construct a non-conformal structured - unstructured hybrid grid , using standard turbulent energy - turbulent energy dissipation rate ($k-\varepsilon$) model, Wu Jianqing , such as the establishment of shuttle kiln internal aerodynamic model of turbulent flow and heat transfer numerical simulation. Come to the development process and distribution of flue gas burner jet velocity and temperature field. Between Boules and analyzed the characteristics and causes of the uneven distribution of the local heat transfer material stack . The results show that : the external heat exchanger material stack strong internal heat Boules weak , resulting in uneven heat transfer between the material stack . Boules gap periodically distributed circumferentially Boules cause uneven heat transfer , resulting in different

three- burner scope Boules vertical heat unevenly , about the numerical results are in good agreement with the experimental data . On this basis, the proposed measures to improve the convective heat transfer uniformity adjustment Boules code method, location and flow burner matching , and gives the adjustment principle. Feng Qing , Lu Lin and other applications turbulence $k-\varepsilon$ model for turbulent swirling flow roller kiln firing zone of theoretical analysis and numerical simulation using computational fluid dynamics software FLUENT, studied the spray angle burner for burning zone the effects of turbulent swirling flow of products within its firing role. Concluded that : (1) when the spray angle θ changes, the turbulent flow in the combustion chamber of the significant changes have taken place , the use of the interaction of the jet stream spray angle change airflow with the kiln , roller kiln can be adjusted swirl combustion chamber area the size, location and strength , so that the degree of disorder of the kiln flow strengthened, kiln temperature uniformity , and sufficient heat transfer products , stable kiln temperature field , improving heat transfer efficiency. (2) spray angle θ is not too big, too big , θ is not conducive to the flue gas flow resistance increases firing products , θ preferably not greater than 15 degrees. But this is just select a section roller kiln firing zone and only case of a burner for horizontal analysis for the entire roller kiln firing zone , burner staggered distribution , more complex flow field , which will also prompt us to lower do step deeper simulation .

Third, the application prospects

In fact , FLUENT provides users three kinds of turbulence models : Spalart-Allmaras model , $k-\varepsilon$ model , and $k-\varepsilon$ model . The fluid flow in the tunnel kiln , the choice of the $k-\varepsilon$ model under normal circumstances . The $k-\varepsilon$ model includes the standard $k-\varepsilon$ model , Renormalization-group (RNG) $k-\varepsilon$ model , with a swirl correction $k-\varepsilon$ model . In FLUENT , the standard $k-\varepsilon$ model have been proposed since Launder and Spalding, became the main flow field engineering tool. Applicable to a wide range of economic , reasonable accuracy, which is why it has

such a wide range of applications in the field of industrial flow and heat transfer simulation in it. It is a semi-empirical formula is a summary of the experimental phenomena out . After the two models is the transformation of the standard $k-\varepsilon$ model , with improved accuracy in the simulation , to consider the issue more fully . Without a turbulence model for all the problems are common , mainly rely on the simulation model ceramic kilns choose the following: whether the fluid pressure , the feasibility of the establishment of special accuracy requirements , capabilities and limitations of the computer time . In order to choose the best model , you need to understand the scope of application of different conditions and restrictions , which $k-\varepsilon$ model to use in order to meet specific engineering requirements is appropriate, not excessive pursuit of accuracy, convergence criteria should be appropriate.

Not only can simulate the furnace using FLUENT flow field , but also within the furnace for combustion simulation. Some Chinese and foreign literature on high temperature air combustion simulated. If YuanJ, NaruseI. Modeling of combustion characteristics and NOx emission in highly preheated and diluted air combustion FLUENT commercial software applications HiTAC numerical simulation . Among them, the use of PDF turbulent combustion model, a regional radiation heat transfer model, Soot formation using two -step Tesner models. The results reveal the impact of air preheat temperature, oxygen concentration in the combustion and emissions. Fan Xian Zhen etc. With FLUENT software platforms, applications Eulerian / Lagrangian method , in three different conditions, for 200MW Tangentially Pulverized Coal Combustion of flow , heat transfer and combustion were simulated . However, no specific analog ceramic kilns burning literature . We can choose the software inside the tunnel kiln system combustion model based on different combustion conditions . Vapor combustion model including premixed combustion model , partially premixed combustion model and diffusion combustion ; discrete phase model including coal combustion and spray combustion ; thermal radiation model , FLUENT software provides five radiation models : discrete propagation of radiation (DTRM) model , P-1 radiation model , Rosseland radiation model , the surface radiation (S2S) model , discrete ordinates radiation (DO) model ; pollutant models, including models NOx ,

smoke (Soot) model . Application software solving , should follow certain steps and principles , such as when some of the burning issues to initialize the problem can be solved cold , thus seeking to initial conditions by gas combustion problems , then solving the discrete phase problem, then solving the radiation of problems.

We can use specialized analog furnace heat conditions within FLUENT . Li Wei , Qi Haiying , the numerical study Changfu honeycomb regenerator heat transfer characteristics ! Using FLUENT5.2, honeycomb regenerator heat transfer characteristics of the numerical simulation, the temperature field and velocity field of regenerative body . Hatred in the column , such as the establishment of an infrared gas hot water boiler furnace flameless combustion flow and heat transfer in a three-dimensional mathematical model and its numerical simulation . The furnace heat exchanger is used to calculate the FLUENT radiation model DO (discrete ordinate) models. Ceramic kilns generally divided into preheating zone , firing zone and cooling zone , the heat transfer is much more complicated . FLUENT software can simulate a variety of thermal conduction modes , including natural complex , with or without other changes , such as thermal conductivity of the porous medium , and the forced convection mixing . Analog appropriate medium settings radiation model and sub- model can usually burn complexity into account. When using the software simulation zoning proposal to simulate , even refined.

FLUENT software, there are also some shortcomings , such as the very precise simulation of fluid flows in , but not enough accurate simulation of combustion , primarily reflecting the turbulence modeling software used by the existence of limitations. Contaminants in most cases to generate a model that can accurately predict the tendency of NOX , but the amount of NOX can not be accurately predicted .

中文翻译

Fluent 软件及其在陶瓷窑炉中的应用

陶瓷窑炉是陶瓷工业使用的主要热工设备, 计算机技术的应用提高了设备的设计与运行水平, 带来良好的经济与社会效益。许多科技工作者为此作出了杰出贡献, 如曾令可、杨志远、王世峰等, 在计算机辅助设计及优化方面, 孙宇彤, 曾令可等在热工过程数值模拟方面, 康赐荣, 陈兵, 张小军等在自动控制方面都进行了大量研究。但相关软件或系统的设计时间过长、数学建模时对物理模型进行的较大简化、数值计算前后处理的烦杂等限制了软件开发及应用, 应寻求新的方法和工具。

一、基本特点

上个世纪 70 年代以来, CFD (Computational Fluid Dynamics, 计算流体力学) 技术因大型计算机的出现得以迅速发展。CFD 技术相对于实验研究有其独特优势, 如: (1) 研究成本低, 周期短; (2) 无实验仪器干扰; (3) 能够得到完整的数据; (4) 能将计算情况在计算机屏幕上形象地再现等。其工程应用对设备的设计与改造起到了重要作用。

各种 CFD 通用软件的数学模型的组成都是以纳维叶—斯托克斯方程组与各种湍流模型为主体, 再加上多相流模型、燃烧与化学反应流模型、自由面流模型以及非牛顿流体模型等。离散方法采用有限体积法 (FVM) 或有限元素法 (FEM)。纳维—斯托克斯方程组的求解模块是 CFD 软件的核心部分。著名的 CFD 通用软件有 PHOENICS、FLUENT、STAR—CD、CFX—TASCflow 与 NUMECA 等, PHOENICS 软件是最早推出的 CFD 通用软件, FLUENT、STAR—CD 与 CFX—TASCflow 是目前国际市场上主流软件, 而 NUMECA 则代表了 CFD 通用软件中的后起之秀。在全球众多的 CFD 软件开发、研究厂商中, FLUENT 软件独占 40% 以上的市场份额, 具有绝对的市场优势。在商用 CFD 的发展历程上, FLUENT 软件是绝对的领导者和技术先行者。FLUENT 的软件设计基于 CFD 计算机软件群的概念!, 针对每一种流动的物理问题的特点, 采用适合于它的数值解法, 在计算速度、稳定性和精度等各方面达到最佳。

由于囊括了 Fluent Dynamic International 比利时 Poly flow 和 Fluent Dynamic International (FDI) 的全部技术力量(前者是公认的在黏弹性和聚合物流动模拟方面占领先地位的公司,后者是基于有限元方法 CFD 软件方面领先的公司),因此 FLUENT 软件具有如下优点:

(1) 先进的网格生成技术。采用 Gambit 的专用前处理软件,使网格可以有多种形状。对二维流动,可以生成三角形和矩形网格;对于三维流动,则可生成四面体、六面体、三角柱和金字塔等网格;结合具体计算还可生成混合网格,其自适应功能,能对网格进行细分或粗化,或生成不连续网格、可变网格和滑动网格。

(2) 完善的多种优化物理模型。如:计算流体流动和热传导模型(包括自然对流、定常和非定常流动,层流,湍流,紊流,不可压缩和可压缩流动,周期流,旋转流及时间相关流等),辐射模型,相变模型,离散相变模型,多相流模型及化学组分输运和反应流模型等。对每一种物理问题的流动特点,有适合它的数值解法,用户可对显式或隐式差分格式进行选择,以期在计算速度、稳定性和精度等方面达到最佳。

(3) 高效的数值计算及处理能力。FLUENT 将不同领域的计算软件组合起来,成为 CFD 计算机软件群,软件之间可以方便地进行数值交换,并采用统一的前、后处理工具,这就省却了科研工作者在计算方法、编程、前后处理等方面投入的重复、低效的劳动,而可以将主要精力和智慧用于物理问题本身的探索上。

FLUENT 程序软件主要由以下几个部分组成:(1)GAMBIT 主要用来建立几何模型和生成网格。(2)FLUENT 用于进行流动模拟计算的求解器。(3)prePDF 用于模拟 PDF 燃烧过程。(4)TGrid 用于从现有的边界网格生成体网格。(5)Filters(Translators)转换其他程序生成的网格,用于 FLUENT 计算。可以接口的程序包括:ANSYS, I—DEAS, NASTRAN, PATRAN 等。

利用 FLUENT 软件进行流体流动与传热的模拟计算流程。首先用 GAMBIT 进行流动区域几何形状的构建、边界类型及网格的生成,并输出用于 FLUENT 求解器计算的格式;然后用 FLUENT 求解器对流动区域进行求解计算,并进行计算结果的后处理。

二、基本应用实例

FLUENT 软件主要应用于航空航天、国防技术、电力系统、汽车设计、船舶、化学处理、家用电器等领域。在民用领域,该软件在汽车、空调设计上应用最为广泛,研究成果也颇为丰硕。在陶瓷窑炉模拟方面,由于陶瓷窑炉内部结构十分复杂,流场、气氛场和温度场的测量都十分困难,实验研究仍然不足以全面揭示流动和传热规律。

近几年来,国内一些学者开始用该软件模拟窑炉内的流动状况。杨帆等运用流体力学计算软件 FLUENT,对湘潭钢铁公司第二高速线材厂轧钢加热炉的三维流场进行了数值模拟,获得该加热炉内的气体流动、流速和压力的分布规律。对加热炉内的气体流动状况、速度分布和压力分布的特点分析表明,该加热炉内的局部结构不适应加热炉的操作要求,模拟计算结果与加热炉的实际运行相符,为加热炉的进一步结构改造提供了依据。由长福等比较了 FLUENT 所提供的不同湍流模型; $k-\varepsilon$ 模型、RNGk $k-\varepsilon$ 模型、带旋流修正的 RNGk $k-\varepsilon$ 模型、Realizable $k-\varepsilon$ 模型、雷诺应力模型对四角切向燃烧煤粉锅炉内冷态气相流动进行数值模拟的效果;探讨了为减小数值伪扩散对强旋流动的影响采用的减小网格尺寸和提高差分格式精度等措施的优劣,为理论分析强旋湍流流动和对四角切向燃烧煤粉锅炉内流体流动的工程设计提供了参考依据。

FLUENT 软件在陶瓷窑炉中也有了初步的应用。高晖等利用 CFD 软件 FLUENT. TM 5.4.8,构造了非保形结构化—非结构化混合网格,采用标准紊动能—紊动能耗散率($k-\varepsilon$)模型,对吴建青等建立的梭式窑空气动力模型内部紊流流动与传热进行了数值模拟研究。得出了烧嘴射流的发展过程以及烟气速度场和温度场的分布特征。分析了料垛之间以及料垛局部换热的不均匀分布特征和成因。结果表明:外围料垛换热较强、内部料垛换热较弱,造成料垛间换热不均匀。料垛间隙的周期性分布导致料垛周向换热不均匀,三层烧嘴作用范围不同导致料垛纵向换热不均匀,有关数值模拟结果与文献实验数据符合较好。在此基础上,提出了调整料垛码法、烧嘴位置和流量匹配等改善对流换热均匀性的措施,并给出了调整原则。冯青、陆琳等应用 $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型,对辊道窑烧成带的湍流旋流流动进行了理论分析,并用计算流体力学软件 FLUENT 进行数值模拟,研究了烧嘴的喷射角度对烧成带内的湍流旋流流动的影响及其对制品烧成的作用。得出结

论: (1) 当喷射角 θ 发生变化时, 燃烧室内的湍流流场也发生显著的变化, 利用喷射角度改变喷射气流与窑内气流的相互作用, 可以调节辊道窑燃烧室内旋流区域的大小、位置和强弱, 从而使窑内气流紊乱程度加强, 窑内温度均匀, 与制品充分换热, 稳定窑内温度场, 提高传热效率。(2) 喷射角 θ 不能太大, θ 过大, 烟气流动阻力增大不利于制品的烧成, θ 最好不能大于 15 度。但本文只是选取辊道窑烧成带的一小节且只有一个烧嘴的情况作横向分析, 对于整个辊道窑烧成带, 烧嘴交错分布, 流场更为复杂, 这也将促使我们下一步做更深层的模拟分析。

三、应用前景

事实上, FLUENT 提供给用户三种湍流模型: Spalart—Allmaras 模型、 $k-\varepsilon$ 模型和 $k-\varepsilon$ 模型。根据隧道窑内的流体流动情况, 一般情况下选用 $k-\varepsilon$ 模型。 $k-\varepsilon$ 模型包括标准 $k-\varepsilon$ 模型、Renormalization—group (RNG) $k-\varepsilon$ 模型、带旋流修正 $k-\varepsilon$ 模型。在 FLUENT 中, 标准 $k-\varepsilon$ 模型自从被 Launder and Spalding 提出之后, 就变成工程流场计算中主要的工具了。适用范围广、经济, 有合理的精度, 这就是为什么它在工业流场和热交换模拟中有如此广泛的应用了。它是个半经验的公式, 是从实验现象中总结出来的。后两个模型是对标准 $k-\varepsilon$ 模型的改造, 在模拟精度方面有了提高, 考虑问题也更全面。没有一个湍流模型对于所有的问题是通用的, 模拟陶瓷窑炉选择模型时主要依靠以下几点: 流体是否可压、建立特殊的可行的问题、精度的要求, 计算机的能力和时间的限制。为了选择最好的模型, 你需要了解不同条件的适用范围和限制, 具体用哪种 $k-\varepsilon$ 模型以满足工程实际要求为宜, 不要过分追求高精度, 收敛准则要适当。

利用 FLUENT 不仅可以模拟窑炉的流场, 还可以对窑炉内的燃烧情况进行模拟。中外文献中有人对高温低氧燃烧进行了模拟。如 Yuan J, Naruse I. Modeling of combustion characteristics and NOx emission in highly preheated and diluted air combustion 应用 FLUENT 商业软件对高温空气燃烧进行了数值模拟。其中, 对湍流燃烧采用 PDF 模型, 对辐射采用区域传热模型, 对 Soot 的形成采用二步 Tesner 模型。计算结果揭示了空气预热温度、氧浓度对燃烧及排放的影响。范贤振等借助 FLUENT 软件平台, 应用 Eulerian/Lagrangian 方法, 在 3 种不同工况下, 对 200MW 四角切向燃烧煤粉锅炉炉内的流动、传热及燃烧进行了数值模拟。

但是没有专门模拟陶瓷窑炉燃烧的相关文献。我们可根据隧道窑系统不同的燃烧状况选择软件里的燃烧模型。气相燃烧模型包括预混燃烧模型、部分预混燃烧模型和扩散燃烧;离散相模型包括煤燃烧与喷雾燃烧;热辐射模型, FLUENT 软件提供了五种辐射模型:离散传播辐射(DTRM)模型, P-1 辐射模型, Rosseland 辐射模型, 表面辐射(S2S)模型, 离散坐标辐射(DO)模型;污染物模型, 包括 NO_x 模型, 烟(Soot)模型。应用软件求解时, 应遵循某些步骤和原则, 如对一些燃烧问题进行初始化时, 可先求解冷态问题, 以此为初始条件求气相燃烧问题, 再求解离散相问题, 再求解有辐射的问题。

我们可以用 FLUENT 专门模拟窑炉内的传热情况。李伟、祁海鹰、由长福 蜂巢蓄热体传热特性的数值研究!采用 FLUENT5.2, 对蜂巢蓄热体的传热特性进行了数值模拟, 得到了蓄热体内的温度场和速度场分布。仇中柱等建立了燃气红外热水锅炉无焰燃烧炉膛内流动和传热的三维数学模型, 并对其进行数值模拟。对炉膛的换热计算用到了 FLUENT 辐射模型中的 DO(discrete ordinate)模型。陶瓷窑炉一般分成预热带, 烧成带和冷却带, 传热情况要复杂得多。FLUENT 软件对各种热传导模式都能模拟, 其中包括具有或不具有其它复杂性如变化热传导的, 多孔介质的自然的、受迫的以及混合的对流。模拟相应介质的辐射模型及子模型的设定通常可以将燃烧的复杂性考虑进来。用该软件模拟时建议要分带分别模拟, 甚至还要细化。

FLUENT 软件也存在某些不足, 如在模拟流体流动方面很精确, 但在模拟燃烧时精确度不够, 这主要是软件使用的湍流反映模型存在着局限性。污染物生成模型在大多数情况下, 能够准确地预测 NO_x 的变化趋势, 但是 NO_x 的量不能被精确预测。