

# 景德镇陶瓷学院

## 毕业设计说明书

题目：窑侧墙 90° 搅拌气幕对窑内流场温度场影响初探

学 号：201030453144

姓 名：朱萍萍

院（系）：科技艺术学院工程系

专 业：10 热工

指导老师：胡国林

日 期：2014. 5. 20

# 目 录

毕业设计任务.....	4
摘要.....	6
1 绪论.....	7
1.1 隧道窑预热带.....	7
1.2 隧道窑预热带温差产生的原因.....	7
1.3 缩小隧道窑预热带温差措施.....	7
1.4 本课题的目的与意义.....	8
2 Fluent 软件简介.....	9
2.1 Fluent 的功能及特点.....	9
2.2 Fluent 系列软件简介.....	10
2.3 Fluent 6.3 的功能模块.....	11
2.4 Fluent 6.3 的分析过程.....	11
3 仿真对象简介.....	14
3.1 仿真对象的主要尺寸.....	14
3.2 仿真对象的主要技术参考.....	17
4 用 Gambit 建立几何网格模型.....	19
4.1 文件的创建及其求解器的选择.....	19
4.2 建立一节隧道窑几何体模型.....	19
4.3 创建气幕几何体——直四棱柱.....	19
4.4 窑内阻力简化模拟.....	20
4.5 设置边界类型.....	21
4.6 确定边界面的内部各线分布并创建窑体的结构化体网格.....	22
4.7 输出网格并保存会话.....	22
5 运用 Fluent 进行流场与温度场的仿真计算.....	24

5.1 与网格相关的操作.....	24
5.2 建立求解模型.....	24
5.3 创建新流体.....	25
5.4 设置边界条件.....	25
5.5 求解.....	26
6 仿真结果与分析.....	28
6.1 计算结果的速度场.....	28
6.2 计算结果的温度场.....	28
6.3 计算结果的速度矢量场.....	29
6.4 计算结果的等压线.....	30
6.5 创建三个面上的温度曲线图.....	30
7 小结.....	33
8 参考文献.....	35

## 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	朱萍萍	指导教师	胡国林
题 目	侧墙 90° 方孔喷风搅拌气幕对窑内流场温度场影响初探		
<p><b>设计技术指标、参数或课题主要内容：</b></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（先用 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，窑两侧均匀设置一排 4~6 个 50×50mm 的方形气幕风通道）。</p> <p>2、运用 Fluent 软件进行侧墙 90° 方孔喷风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 10~30Nm/s 可变）。</p>			
<p><b>基本要求：</b></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>			

**工作进度：**

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。

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。

第 4-8 周：运用 Fluent 软件进行侧墙 90° 方孔喷风搅拌气幕对窑内流场与温度场仿真研究。

第 9-12 周：完成毕业论文初稿。

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）。

第 15 周：交毕业论文与仿真软件电子稿给指导老师审改。

第 16 周：按学院要求打印毕业论文上交，准备参加答辩。

## 摘 要

本次设计的题目是窑炉侧墙 90° 搅拌气幕对窑内流场温度场的初探。在本次设计中采用的是隧道窑来进行研究,在隧道窑的预热带垂直于侧墙添加一个搅拌气幕,利用 gambit 以及 fluent 软件进行模型的简化,对窑内温度场,流场的变化情况进行分析。本次设计的目的在于探究在窑炉的预热带怎样添加搅拌气幕才是对整个窑炉最好的。gambit 以及 fluent 软件在窑炉的建造设计上起了很大的作用,它可以把我们的想法赋予实践,可以让我们直接在电脑上看到自己的想法是否符合实际。同样的,它们可以简化模型,可以判断怎么样子做才能让整个窑炉做得更加节能,更加完善。

The design is the subject of the furnace sidewall 90 ° air curtain Study on the flow field inside the kiln temperature field mixing. In this design is used to study the tunnel kiln, tunnel kiln preheater with vertical sidewalls add a stir in the air curtain using gambit and fluent software for simplified model of the kiln temperature field, flow field changes were analyzed. The purpose of this design is to explore how the kiln with preheater add stir the air curtain is best for the entire furnace. gambit and fluent software built on the furnace design plays a big role, it can put our ideas confers practice allows us to see directly on the computer whether their ideas realistic. Similarly, they can simplify the model, you can determine how to do to make the whole look kiln done more energy, more perfect.

关键字: 隧道窑    gambit    fluent

# 1. 绪论

隧道窑属于连续性火焰加热窑炉，一般是一条长直线形隧道，其两侧及顶部有固定的墙壁及拱顶，底部铺设轨道上运行着窑车，主要用于耐火材料、日用陶瓷、建筑卫生洁具的烧成。

## 1.1 隧道窑预热带

隧道窑作为一种连续式窑炉，无论结构简单或者复杂，都可以根据制品在窑内经历温度变化过程而将窑划分为三带：预热带、烧成带、冷却带。对于隧道窑的具体划分，依据各有不同，有以温度分，有以外形分。最为合理的划分是按温度划分。

所谓隧道窑预热带，是指从窑头到最高烧成温度之前的窑体部位，一般占全窑长的30~40%。坯体从室温进入窑头后，受到来自烧成带热烟气的加热，逐渐升温而被预热，发生水分蒸发、碳素及盐类氧化分解等一系列物理化学变化。

## 1.2 隧道窑预热带温差产生的原因

(1) 由于隧道窑预热带要排走烟气，不得不处于负压下操作，从窑的不严密处必然会漏入大量的冷风，特别是窑头，冷风密度大，在隧道窑下部沉积，迫使密度较小的热烟气向上流动，增加窑内温差，漏风量越大，温差也就越大，这是产生窑内温差的重要原因。

(2) 窑车衬砖蓄热量大。隧道窑的烧成室，是由固定窑顶、窑墙以及活动窑车组成。窑墙、窑顶是连续加热属一次性蓄热。窑车衬砖是周期性间歇式加热，出现多次性蓄热。

(3) 空气过剩系数 $\alpha$ 值大。隧道窑预热带是负压下操作，调试不当，增大了预热带 $\alpha$ 值，加剧了预热带气体分层。

(4) 窑道几何尺寸高度。由于制品上部与窑段留出的窑道空间高度存在，是平焰窑出现几何压头而造成气体分层的客观因素。

## 1.3 缩小隧道窑预热带温差措施

(1) 全面推广低蓄热窑车。不仅能降低窑车蓄热量，而且还能缩小窑内上下

温差。

(2) 合理设置预热带低温炉。在预热带设置较多的小气量，多喷嘴，通过增加预热带底部的热量措施，是解决预热带上下温差有效方法。

(3) 添加搅拌气幕。在预热带添加搅拌气幕使得窑内气体混合，温差减小。

#### 1.4 本课题的目的与意义

如前所述，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。本毕业设计组四位同学就是研究不同位置不同方向设置的扰动气幕对窑内流场及温度场分布的影响，对今后设计与改进窑炉的搅动气幕设置与结构有重大的理论和实践意义，而且这无论对陶瓷生产实践还是对隧道窑其他方面的理论研究工作都有较大的指导意义。

本课题是借助 Fluent 软件来探讨侧墙 90° 搅拌气幕对窑内流场温度场影响，首先利用 Gambit 软件将窑的模型简化画出来，然后借助 Fluent 软件，求解窑内的流场与温度场，通过分析仿真计算结果得出科学合理的结论。本课题只是探究了在预热带的侧墙以 90° 的方向向窑内深入搅拌气幕，本课题组还有其他三位同学，他们分别对窑顶，窑侧墙深入 180°、90°、45° 的搅拌气幕进行了研究，综合起来就可以了解如何设置气幕的位置、形状、尺寸，更有利于改善窑内温度场。因此，本课题的研究对陶瓷窑炉的设计和改造都有积极的意义。



## 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。

### 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。

#### 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。

#### 5. 多种数值算法

Fluent 软件采用有限体积法，提供了三种数值算法：非耦合隐式算法、耦合显式算法、耦合隐式算法，分别适用于不可压、亚音速、跨音速、超音速乃至高超音速流动。是商用软件中最多的。

#### 6. 先进的物理模型

Fluent 软件包含丰富而先进的物理模型，例如：

- (1) Fluent 软件能够精确地模拟无粘流、层流、湍流。
- (2) 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。

(3) 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。

#### 7. Fluent 独有的特点

(1) 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。

(2) 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)。

(3) 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。

#### 8. 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:

(1) 基于压力的求解器。

(2) 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。

## 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。

### 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。

#### 1. Gambit 2.4.6 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。

#### 2. Fluent 解算及后置处理

如今, 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。

### 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 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) 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。

### (8) 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。

#### (9) 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。

#### (10) 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。

#### (11) 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。

#### (12) 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 仿真对象的主要尺寸

本仿真对象设计以高 95mm、口径 150mm、底径 55mm 的罗汉汤碗为产品的隧道窑，全窑长 44m，共 22 节，最高烧成温度是 1310℃，采用焦炉煤气。根据制品的化学组成、形状、尺寸、线收缩率及其他一些性能要求，制订温度制度周期 18 小时。

每节窑长为 2m，窑内宽为 2m，预热带、冷却带窑全宽为 2.86m，烧成带为 3.06m。窑内高为 1.37m，预热带以及冷却带窑全高为 1.943m，烧成带窑全高为 2.143m。

预热带 7 节，1 到 3 节为排烟，第 1 节前半节两侧墙及窑顶设置一道封闭气幕，气幕风由冷却带抽来的热空气提供。后半节上部和下部各设 1 对排烟口。目的是使窑头气流压力自平衡，以减少窑外冷空气进入窑体。第 2 节和第 3 节每节在窑车台面棚板通道处各设 2 对排烟口，尺寸：134×115mm 位置正对。共六对。

另外，为方便调节预热带温度，尽量减少温差，在第 4 到 7 节内相错布置搅拌气幕和烧嘴，搅拌气幕的形状为斜四棱柱，详细结构下文进行介绍，高速调温烧嘴喷出的热烟气与喷风管喷出风在窑内断面上形成气流循环，使窑内气流实现激烈的搅动，促进上下温度场的均匀，而且加快了窑内的对流传热，缩短烧成时间，共用四组。

第 8 节到第 12 节为烧成带，第 8 节，每节设置 2 支烧嘴，上下部分别是 1 烧嘴和 1 观火孔。第 9 节上下分别 2 观火孔和 2 烧嘴。第 10~12 节上下部均有高速调温烧嘴，上部设置 2 只烧嘴和 2 只观火孔，下部设置 4 只烧嘴和 4 只观火孔，上下部设置与窑墙均呈现交错布置，共 22 支。烧嘴和观火孔一一正对。

冷却带按照烧成工艺分成三段：

第 13~14 节为急冷段。该段采用喷入急冷风直接冷却方式，除急冷首节只在后半节设冷风喷管（尺寸  $\Phi 67$ ）（上设 3 个，下设 3 个）外，其余每节上部设 6 个冷风喷管，下部 6 个冷风喷管，上下喷管交错设置，前后正对，每侧共 15 个。第 15~19 节为缓冷段。本设计中采用直接热风冷却的方法，为了能使急冷段和快管。其余 3 节各设 1 对相错的抽热风口，共 3 对，热风口尺寸与排烟段尺寸一

样大小 210×180mm。。

第 20~22 节为快冷段。第 20~22 节上下部各设 1 对冷风喷管，交错排列，尺寸  $\Phi 67$ ，共 12 支，通过喷管鼓入冷风直接对窑内的制品进行冷却，以保证制品的出窑温度低于 80℃

本课题“侧墙 90° 搅拌气幕对窑内流场温度场影响初探”由于时间和计算机内存的关系，只能取上述仿真对象含搅拌气幕的隧道窑一节来做仿真。含有本结构的窑为第四节到第七节，故选择其中一节作为研究对象，该节窑长 2m、宽 2m、高 1.37m。搅拌气幕孔设计在离该节烟气入口 0.96m 处，窑侧墙设置一个直四棱柱形状的气幕喷口。该节窑的结构图见图 3-1~图 3-4。

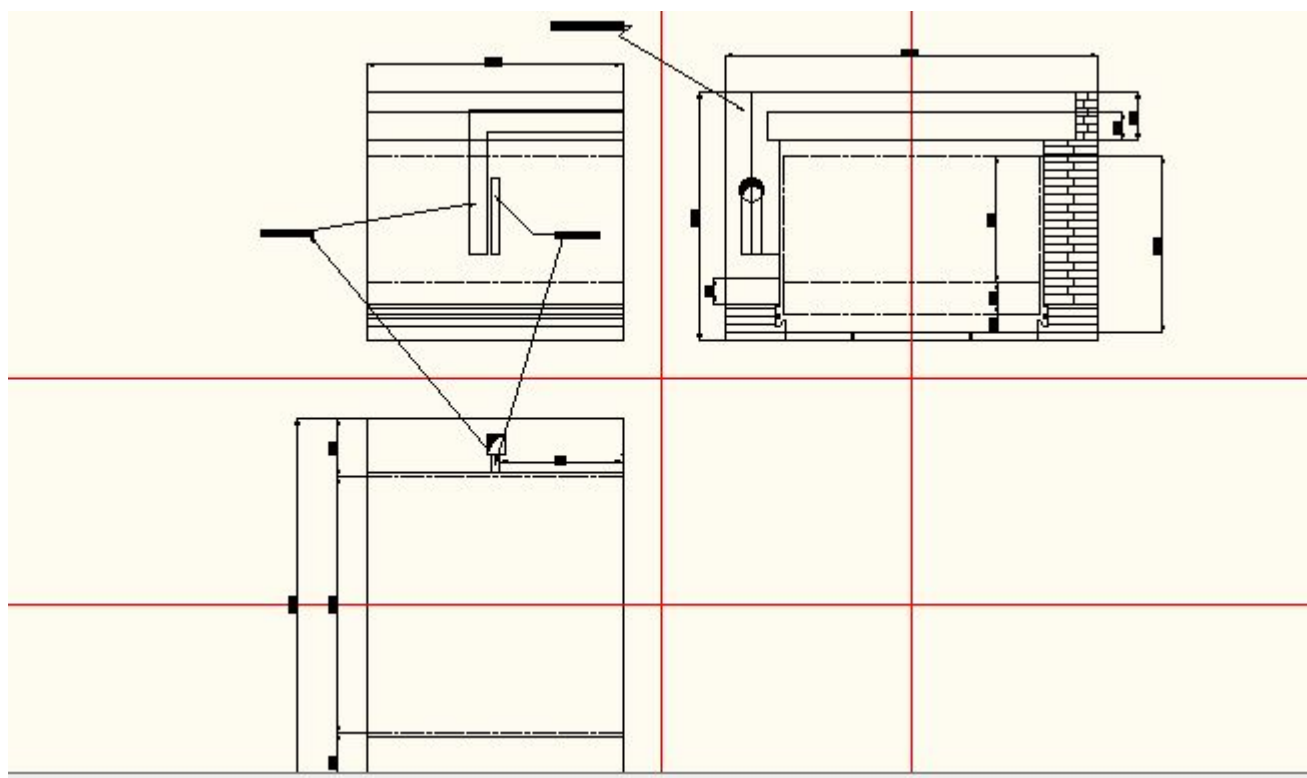


图 3-1 三视图

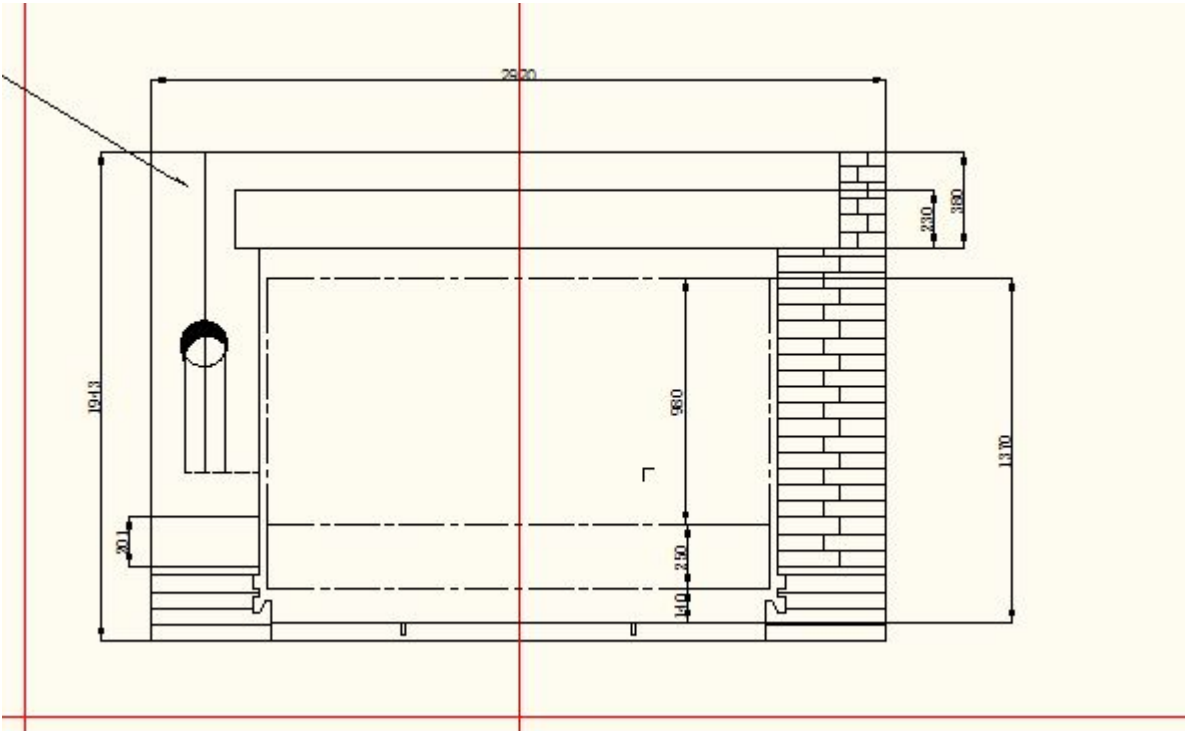


图 3-2 左视图

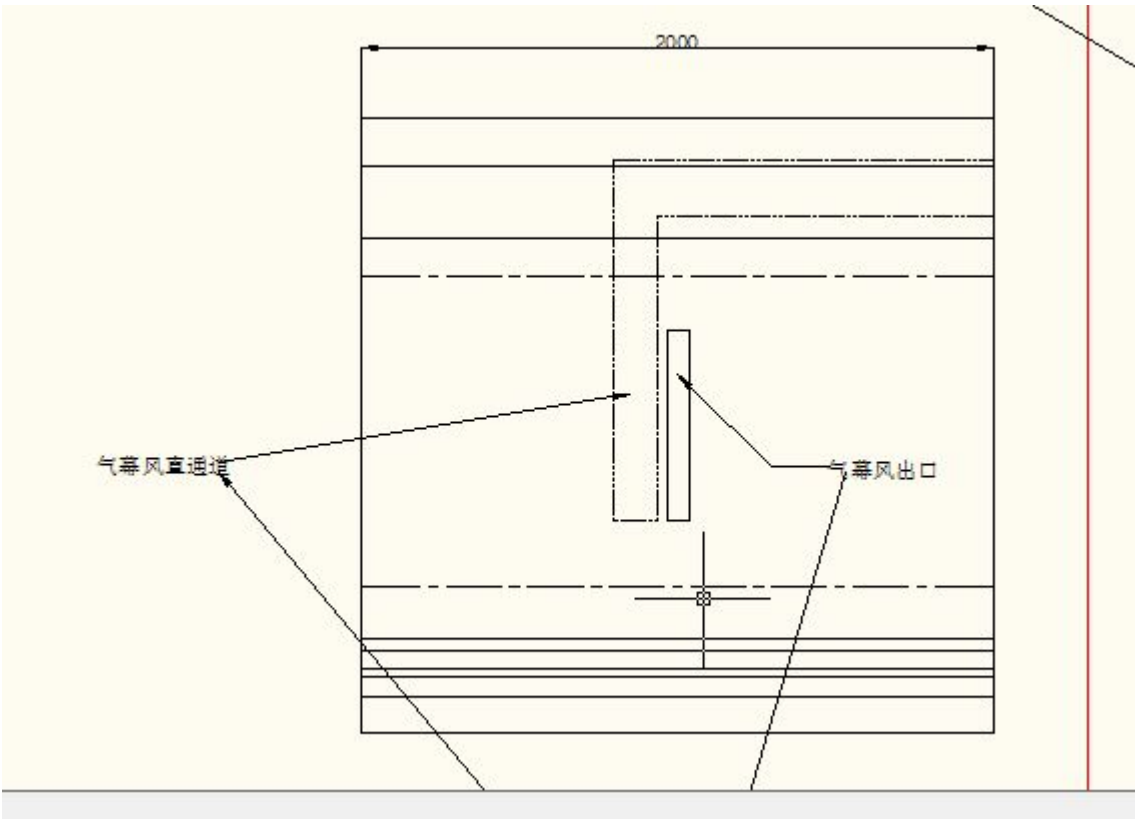


图 3-3 主视图



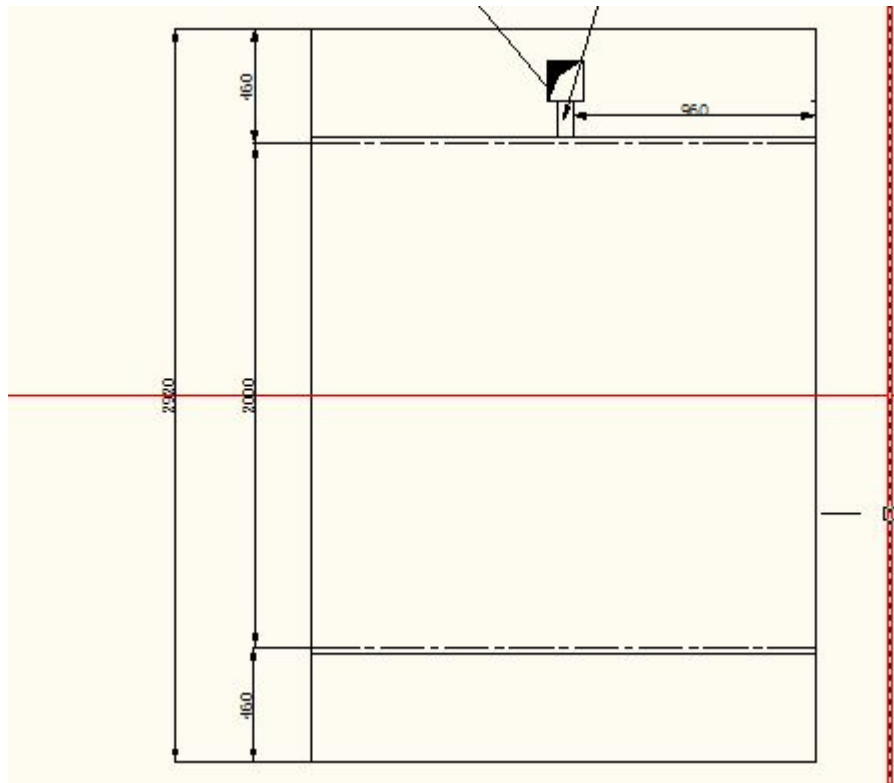


图 3-4 俯视图

### 3.2 仿真对象的主要技术参数

此设计“侧墙 90° 搅拌气幕对窑内流场温度场影响初探”的隧道窑，全窑在氧化气氛下烧成。此窑的长 2m、宽 2m、高 1.37m，在窑侧墙设置搅拌气幕管道与烟气流速方向成 90°。窑侧墙的搅动气幕管道长为 0.07m，高为 0.8m，深度为 0.03m 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℃。

搅拌气幕设计在离烟气入口 0.96m 处，窑侧墙设置一个直四棱柱形状的气幕喷口，流速定位 20Nm/s。此设计研究 1 节窑。入口烟气温度为 400℃，出口烟气温度为 500℃。此两节窑的烟气平均温度为 450℃。

隧道窑燃料为焦炉煤气，焦炉煤气的燃耗  $B=64.43 \text{ (Nm}^3/\text{h)}$ 。实际烟气量为：

$$V_g = 14.39 \text{ (Nm}^3/\text{Nm}^3\text{)}。$$

$$\text{由公式 } v = \frac{B \cdot V_g}{3600 \times \text{长} \times \text{高}} \times \frac{273 + t_{\text{平均}}}{273}$$

$$= (256 \times 14.39) / (3600 \times 2 \times 1.077) \times (273 + 450) / 273$$

=1.2581Nm/s

故取窑内烟气主流速度 v 为 1.3Nm/s

窑体材料及厚度的确定：列表表示所选预热带所用材料及厚度，见表 3-5。

见表 3-5 仿真对象预热带所用材料及厚度

所选预热带所用材料及厚度					
名称		材质	使用温度 (℃)	导热系数[λ / (m•℃)]	厚度 (mm)
窑顶	耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600℃	0.310+0.176×10 <sup>-3</sup> t	230
	隔热层	高纯型耐火纤维刺毯	1150	0.02+0.000175t	150
窑墙	耐火层	莫来石轻质高铝砖	1600℃	0.310+0.176×10 <sup>-3</sup> t	230
	隔热层	高纯型耐火纤维刺毯	1350	0.02+0.000175t	200

计算出窑墙的平均导热系数：

$$\lambda_1 = \frac{(0.310 + 0.176 \times 450 \times 10^{-3}) \times 0.23 + (0.02 + 0.175 \times 10^{-3} \times 450) \times 0.15}{0.23 + 0.15}$$

=0.274W/m • °C

窑顶的平均导热系数

$$\lambda_2 = \frac{(0.310 + 0.176 \times 450 \times 10^{-3}) \times 0.23 + (0.02 + 0.175 \times 450 \times 10^{-3}) \times 0.2}{0.23 + 0.2}$$

=0.254W/m • °C

## 4. 用 Gambit 建立几何网格模型

### 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：毕业设计）—在 Session ID 文本框中输入文件名—201030453144—[Run]—即启动了 Gambit 的布局窗口。

B. 确定求解器：选择菜单[Solver] | [FLUENT5/6]即可。

### 4.2 建立一节隧道窑几何体模型：

由于隧道窑在窑方向上是完全对称的，为了使计算机仿真时节约内存空间与计算时间，可以在窑宽度方向取中点作对称面，建几何体模型时只画出窑的一半，本文在建立仿真对象几何体模型时就是采用此方法的。在 Gambit 软件上建仿真窑几何体模型的具体步骤如下：

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, 0, 0); (0, 1.37, 0); (2, 1.37, 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]。

D. 面扫描为体：[Operation]—[Geometry]—[Volume]—[Sweep Faces]；在[Faces]里选中那个面；然后[Define]，选中 Z 中的[Positive]，由于只要画出窑宽的一半，窑内宽为 2 米，因此，这里在[Magnitude]中只要填入 1，最后点击[Apply]。

### 4.3 创建气幕几何体——直四棱柱

A: 首先确定风管侧面的四个点的位置：[Operation]—[Geometry]—[Vertex]—[Create Real]分别在 X、Y、Z 三个坐标中输入 (0.97, 1.2, 0); (1.04, 1.2, 0); (0.97, 0.6, 0); (1.04, 0.6, 0); 每个输入完后都要按键[Apply]。

B: 因为本气幕风口是 90° , 向窑内伸进 0.03m, 所以经过计算得出内侧四个点的坐标, 并依次在 gambit 中画出, 四个点的位置: [Operation]—[Geometry]—[Vertex]—[Create Real] 分别在 X、Y、Z 三个坐标中输入 (0.96, 1.2, 0.03); (0.96, 0.6, 0.03); (1.03, 0.6, 0.03); (1.03, 1.2, 0.03); 每个输入完后都要按键 [Apply]。

C: 由点连成线: [Operation]—[Geometry]—[Edge]—[Create Straight], 在 [Vertices] 里选中那八个点从 [Available] 移到 [Picked] 中, 两两连接成十二条直线。再点 [Apply]。

D: 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, 每四条直线组成一个面, 最后为六个面, 最后点击 [Apply]。

E: 由六个面组成为体: [Operation]—[Geometry]—[Volume]—[stitch Faces]; 在 [Faces] 里选中那六个面; 最后点击 [Apply]。

F: 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.2], 从 [Available] 移到 [Picked] 中. 最后点击 [Apply] 即可完成。

#### 4.4 窑内阻力简化模拟

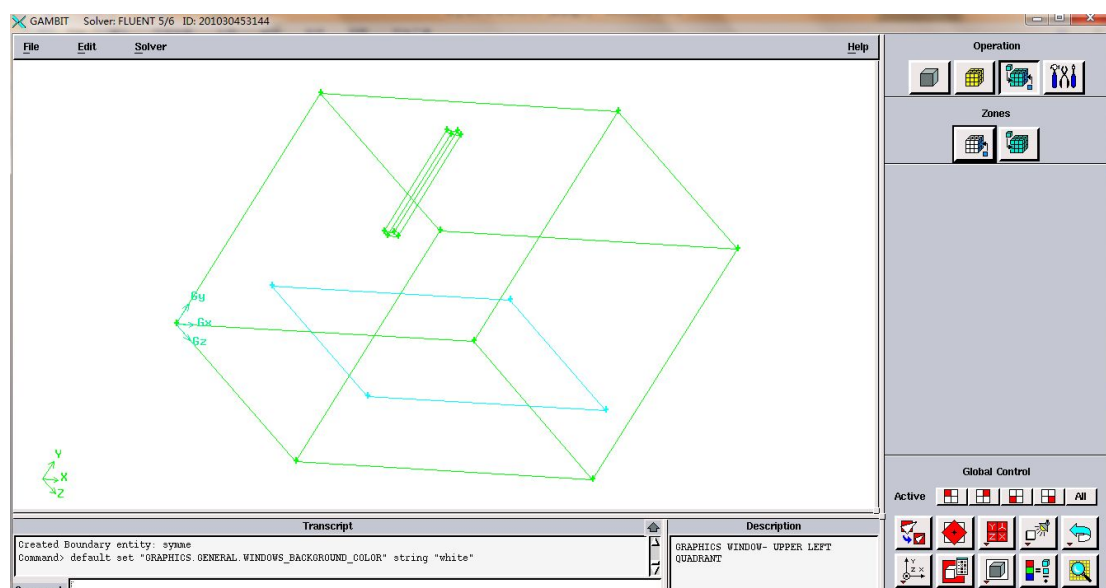
由于隧道窑内应有制品料垛, 但由于我们水平有限, 时间也有限, 只能按辊道窑内制品来处理, 在高中心建立一个离各个侧面为 0.2m 的一水平面代表瓷砖制品。

A: 经计算得到此平面的四个坐标 (1.8, 0.4, 0.2)、(1.8, 0.4, 0.8)、(0.2, 0.4, 0.2)、(0.2, 0.4, 0.8)。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 (0.2, 0.4, 0.2)、(1.8, 0.4, 0.2)、(0.2, 0.4, 1)、(1.8, 0.4, 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。

1) 完成所有的上述步骤即得到了一个侧墙设有 90° 搅拌气幕的一节窑的半个几何体模型, 如图 4-1 所示, 它即代表了仿真对象的几何模型。

图 4-1 仿真对象的几何体模型



#### 4.5 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 项填入边界面名称“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: 窑侧墙搅拌气幕口边界面: [Operation]—[Zones]—[Specify Boundary Types]—打开其对话框—选中 Add。在 Name 项填入边界名称“air jet”—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]。

#### 4.6 确定边界面的内部各线分布并创建窑体的结构化体网格

A: 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。

B: 将线网格转为面网格: [Operation]—[Mesh]— [Face] —[ Mesh Faces], 在 [Faces] 里选好对应的线条, 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。

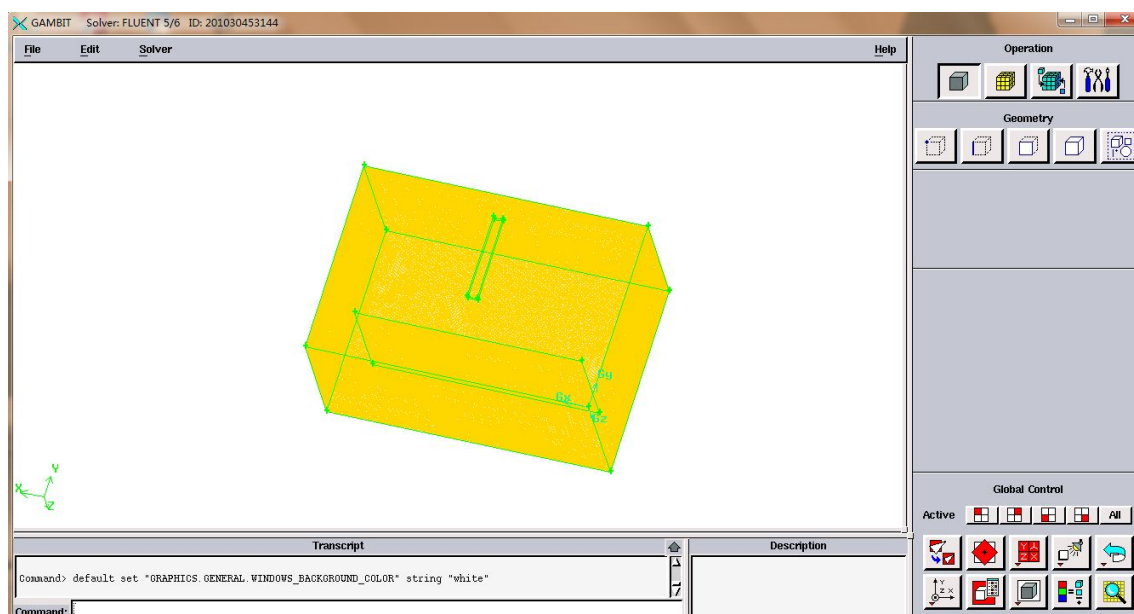
C: 建窑体的结构化体网格: [Operation]—[Mesh]— [Volume]—[ Mesh Volumes] 中选中对应的划分好的面网格, 转换成体网格, (转换的时候划分的网格为四面体网格)。最后最后点击 [Apply]。即完成了所有网格的划分, 所建网格模型如图 4-2 所示。

#### 4.7 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 201030453104.msh—[Accept], 则完成了网格文件的输出操作。

B. [File]—[Exit], 即退出 Gambit。

图 4-2 仿真对象的网格模型



## 5 运用 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. 启动 Fluent：[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“201030453144”—[OK]。
- C. 检查网络：[Grid] | [Check]—出现所检查的部分信息。
- D. 平滑网格：[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]。
- E. 设置区域尺寸及确定长度单位：[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—[Change Length Units]—对计算区域的尺寸进行设置—[scale]—[Close]。
- F. 显示网格：[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。

### 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；
    - B. Formulation-算法：Implicit-隐式算法，Explicit-显式算法；
    - 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；



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

根据窑内烟气流动特性为粘性流体的稳定流动, 故上列的五项分别选取三维、隐式、基于压力的分离算法和取绝对速度的定常流动。

(2) 设置  $k-\epsilon$  湍流模型: [Define] | [Models]—[Viscous...]—打开“Viscous Models”对话框—由于窑内烟气流动属湍流, 故在此选标准“k-epsilon”—保留模型常数默认值—[OK]。

(3) 选择能量方程: [Define] | [Models]—[Energy...]—打开对话框—点击 Energy Equation 左侧按钮—[OK]。

### 5.3 创建新流体

烟气, 取名为 gas, 并设置流体的物理性质:

点击菜单 [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—[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。

### 5.4 设置边界条件:

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

(1) 设置流体: 在 Zone 栏内选择 fluid 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) 设置窑内烟气入口速度边界条件: 在 Zone 栏内选择 gas in, 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;

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 0.8 (入口当量直径)。

(3) 对喷管口 air jet 进行设置速度边界条件:

在 Zone 栏内选择 air jet,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 473。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 6; 在 Hydraulic Diameter (水力直径)一栏内 0.13(搅动气幕喷风口入口当量直径)。

(4) 设置烟气出口边界条件: 在 Zone 栏内选择 gas out, 点击 outflow 然后再点击 Set, 点击 ok

## 5.5 求解

(1)流场初始化: [Solve] | [Initialize] — [Initialize...] — 打开 Solution Initialization 对话框 — 在 Compute from 列表中选 air jet, x 为 15, z 也为 15, 因为本设计为 90 度进气 — [Init] — [Apply] — [Close]。

(2) 设置监视窗口: [Solve] | [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 gas out — 在 Report Type 下拉列表中选 Area-Weighted Average(面积平均) — [OK] — 点击监视对话窗口的 [OK], 运行后监视图如图 5-1 所示。

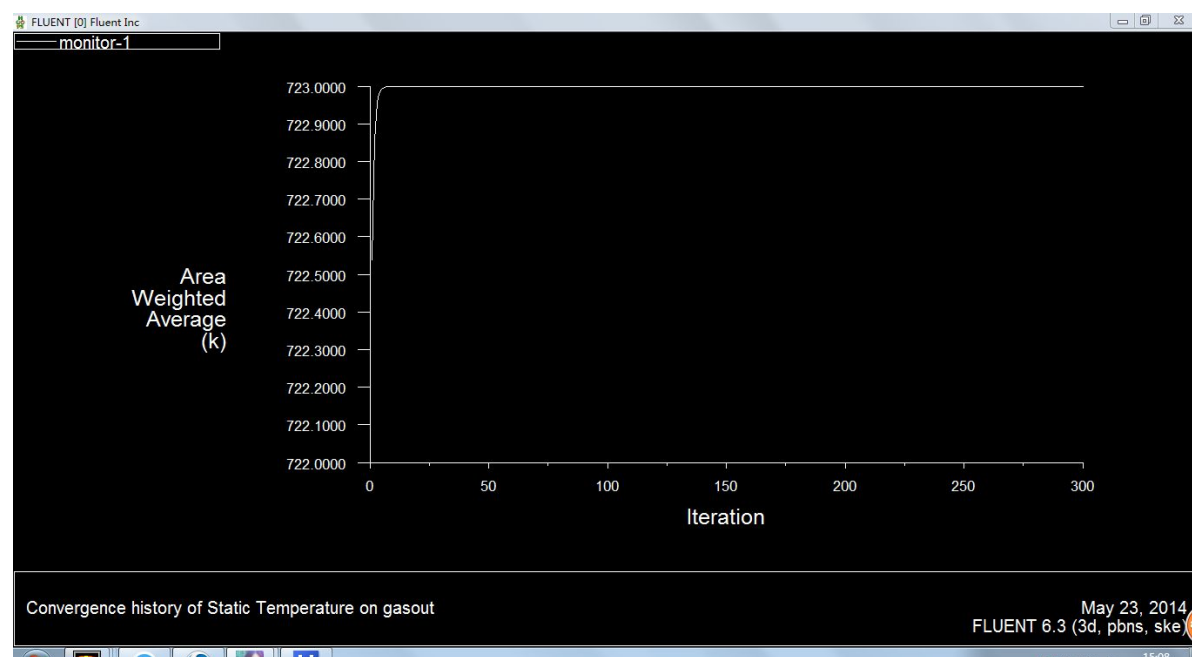


图 5-1 运算过程出口温度监视图

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

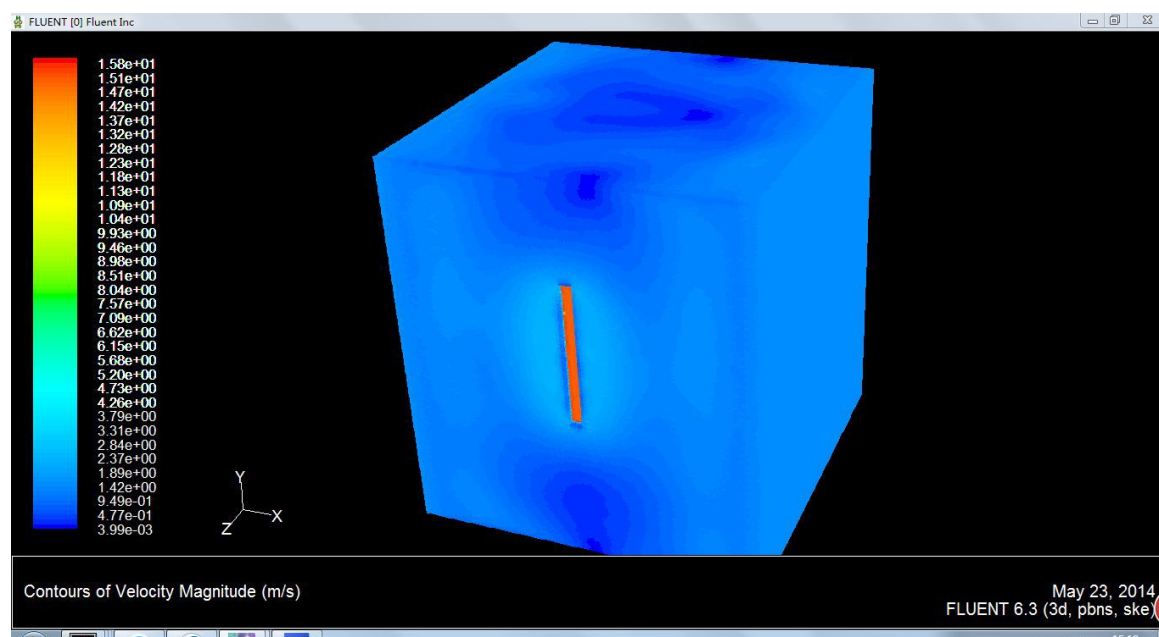
(4) 开始进行 300 次迭代计算: [Solver] | [Iterate...]—在打开的对话框中 Number of Iteration(迭代次数) 栏输入 300—[Iterate] (开始计算)。

## 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: [Display] | [Contours...]—在打开的对话框中设置: 在 Contours of 栏下选 Velocity...和 Velocity Magnitude(速度大小), 在 Options 下选 Filled(填充方式)—[compute]—[Display] ; 见图 6-1。

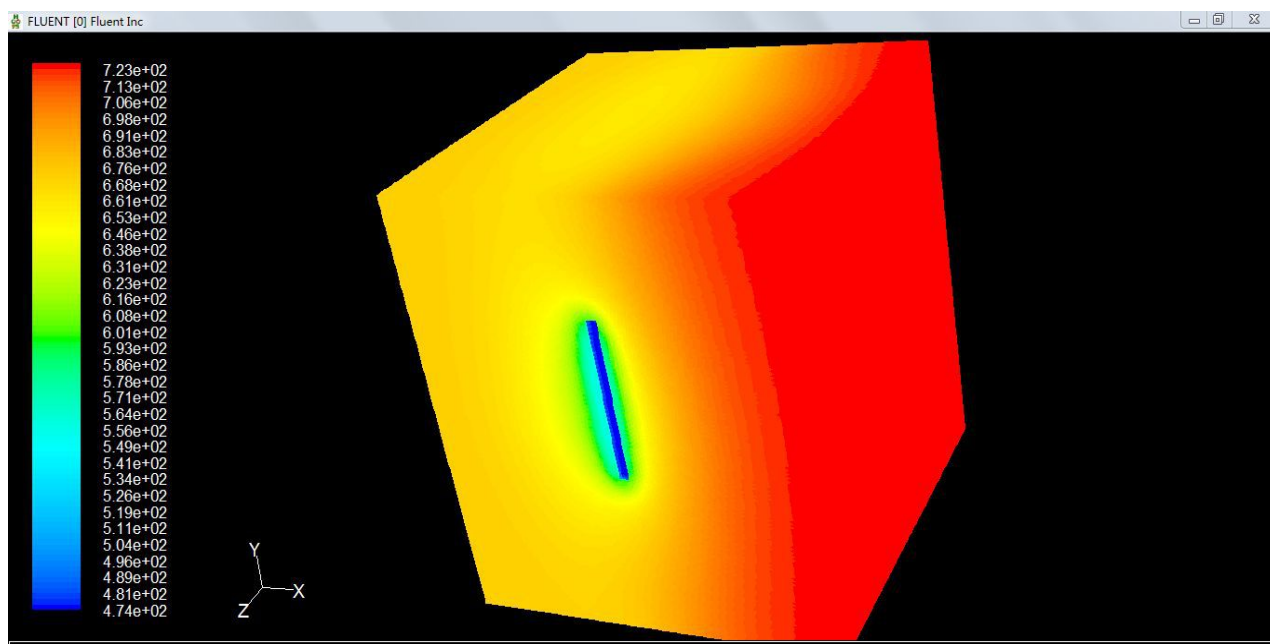
图 6-1 计算结果的速度场 (填充云图)



### 6.2 计算结果的温度场

显示温度场: [Display] | [Contours...]—在打开的对话框中设置: 在 Contours of 栏下选 Temperature...和 Static Temperature(静态温度), 在 Options 下选 Filled(填充方式) , 选 Global Range, Auto Range —Levels 中填 100 —Setup 填 5—[compute]—[Display] (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)如图 6-2。

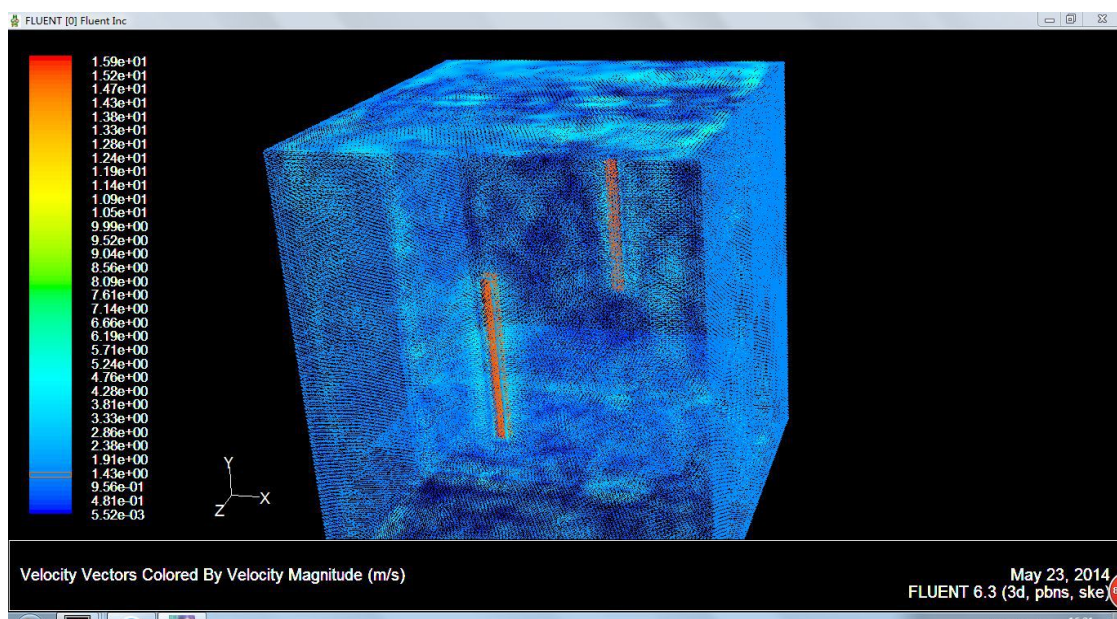
图 6-2 计算结果的温度场（填充云图）



### 6.3 计算结果的速度矢量场

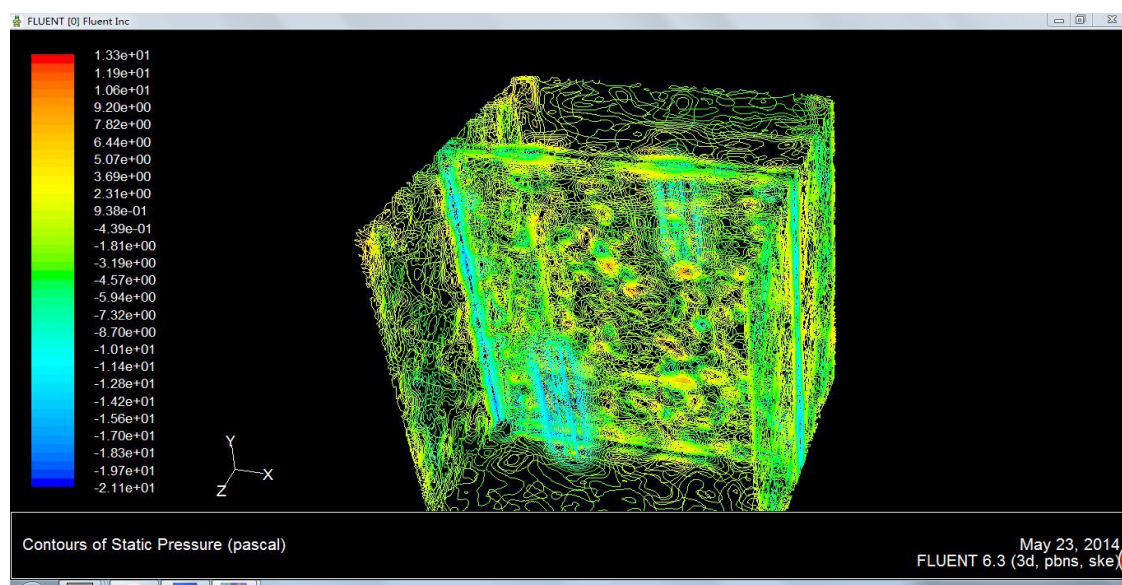
显示速度矢量场：[Display] | [Contours...]—在 Contours of 栏下选 Velocity...和 Velocity Magnitude(速度大小), 在 Options 下选 Global Range, Auto Range, Auto Scale—在 Style 选 arrow—在 Scale 中填 3—[compute]—[Display]得速度矢量场，如图 6-3 所示。

6-3 计算结果的速度矢量场



## 6.4 计算结果的等压线

显示流场中的等压力线: [Display] | [Contours...]—在 Contours of 栏下选 Pressure...和 Static Pressure, 在 Contours of 栏不选中 Filled—Levels 中填 50—Setup 填 3——[compute]—[Display]得等压线图, 如图 6-4



6-4 计算结果的等压线图

## 6.5 创建两个面上的温度曲线图

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 (0.3)—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 1.3, 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 Options 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 6-5 为 surf-1 的温度分布云图, 图 6-6 为 surf-2 的温度分布云图)

图 6-5 surf-1 的温度分布云图

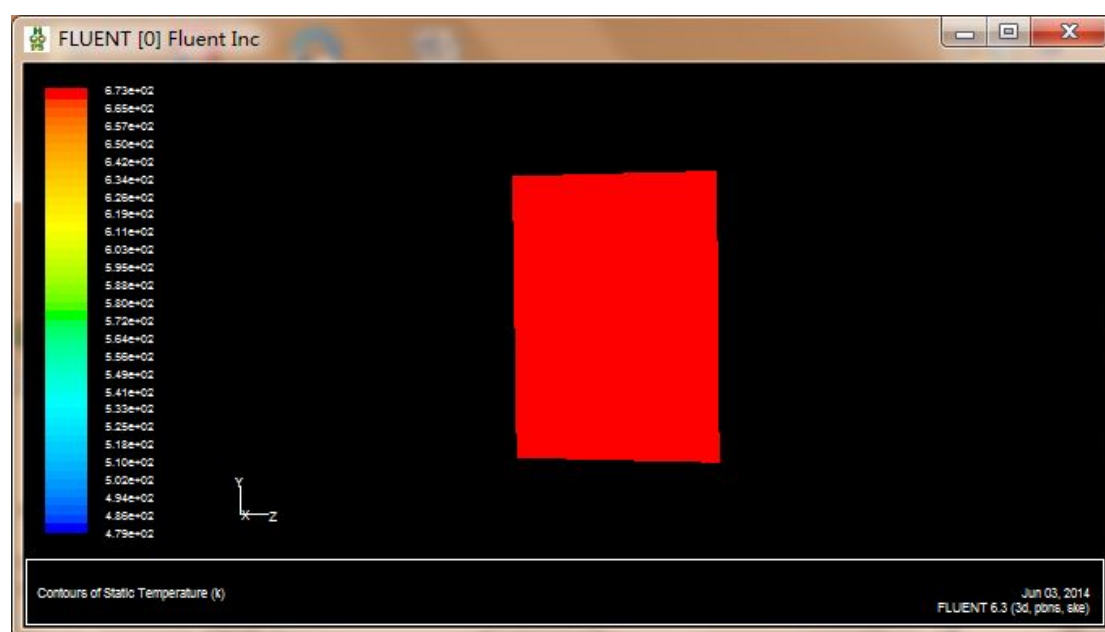
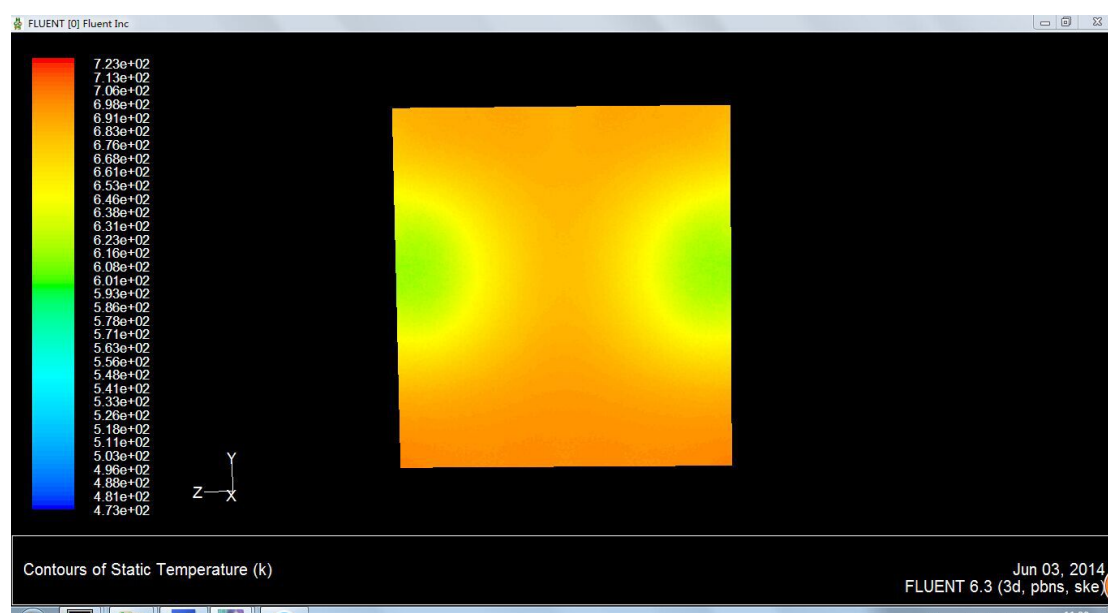




图 6-6 surf-2 的温度分布云图



**结论：**图 6-5 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 6-6 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。随着烟气从进入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。

## 7 小结

随着毕业日子的到来，毕业设计也接近了尾声。经过多次的修改，我的毕业



设计终于完成了。在此特别想感谢胡老师对我的教导，同样也非常感谢同组的其他同学，是我们一起的探讨，相互的帮助，才能完美的完成对大学的一次总结！感谢一路上有你们的陪伴。

在 2013 年 11 月份，胡老师就给了我们毕业设计的任务书。刚开始拿到任务书，很茫然，不知道怎么下手去做这个设计。好在细心的胡老师知道我们的烦恼，胡老师没有一开始就让我们直接做设计，而是让我们从最基本的工作入手，他让我们找资料，找关于这个设计的相关资料，同时，老师也一边帮我们找资料一边帮我们上课，他把他知道的知识交给我们。我记得，胡老师总是隔几个星期就给我们上课，一方面是看我们的进度，一方面也对我们所提出的问题，遇到的问题进行讲解。在胡老师的带领下，我们从用 CAD 软件做一节窑炉的三视图到用 Gambit 软件做二维的窑炉图。我们用了两个月的时间，对 Gambit 软件进行熟悉，当我们能熟练的用 Gambit 软件制作任何的二维模型时，老师又要求我们尝试用 Gambit 软件制作立体的三维窑炉图。这时，我们花了一个月的时间，在这个月的时间里，我们不仅学会了如何创建三维模型，还学会了如何设置边界条件，如何创建网格。在短短的三个月的时间里我们已经将一个新的软件运用的很熟练了，我们都很高兴。但是，我们不能忘记我们最终的设计要求——利用 Fluent 软件对窑炉内部的温度场流场进行仿真研究。于是我们又开始利用 Fluent 软件，对 Fluent 软件进行设置条件以及得出仿真模拟出来的温度场流场图。在 2014 年四月，我们四个就开始在学校进行一套完整的设计旅程。我们做了一遍又一遍，同样的，胡老师也帮我们修改了一遍又一遍，我们这样的追求完美目的就是一个，也就是想让我们的四年大学时光能有个完美的结局。

大学四年时光即将过去，对于在大学的最后一次作业，我能完成的如此的完善，和胡老师的悉心教导是分不开的，是胡老师平时加强毕业设计的辅导，对我们不懂的问题及时解决。胡老师还为方便我们联系，把电话号码和 Email 地址留给了我们，如果有什么事就可以及时得到解决，这样问题不致堆积、也不会因此拖了进度。在毕业设计期间，如果没有老师的细心指导，而是自己一个人独自做设计，也不与任何人交流，这是完全不行的，设计其实也是一个团队的工作，如果不能与他人进行良好的沟通与交流，做出的设计也只是只有自己一个人会欣

赏，而别人却不一定会认可你的设计，所以在这次毕业设计过程中，我懂得了一个道理，团结得力量，只有更好得与他人，进行沟通与交流，吸取别人的建议，工作才会更加的顺利。

## 8 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] 王秉铨 《工业窑炉设计手册》. 机械工业出版社》1996. 8