

宝钢热轧加热炉流动、燃烧和传热的 CFX 模拟

饶文涛 黑红旭 陈玉龙 刘日新
(上海宝钢集团公司热轧部) (北京赛维美高科技有限公司)

摘要 本文介绍了 AEA 技术公司开发的 CFX 软件的结构和功能 and 燃烧和辐射传热模型。以宝钢热轧加热炉为研究对象, 对其炉内的流动、燃烧和传热过程进行了计算机模拟, 得出了炉内的速度场、压力场和温度场, 模拟结果可以用于加热炉的最优燃烧控制和加热炉设计的优化。

关键词 加热炉 CFD CFX 模拟 优化

THE CFX PROCESS SIMULATION OF RE-HEATING FURNACES IN BAOSTEEL HOT ROLLING MILLS USING CFX SOFTWARE

Rao Wen Tao Hei Hongxu Chen Yulong
Hot Rolling Mill of Shanghai Baosteel Group Company
Liu Rixin
Beijing Savemation Technology Co., Ltd

Abstract The software constructions and functions of CFX which was developed by AEA Corporation were introduced. The combustion and radiation heat transfer models were introduced in details. The re-heating furnace in Baosteel Hot Rolling Mills was simulated. The flow, pressure and temperature patterns were obtained. The results could be used in optimum combustion control or the optimization of furnace design.

Keywords re-heating furnace cfd cfx simulation optimization

1 前言

随着高速计算机的出现, 各种数学模型的完善和数值算法的更新, 计算流体力学(CFD)的技术得到迅速发展, 在科学研究和实际工程中已经越来越受到现代科技界和工程界的重视。世界各发达国家在国防、航空航天、交通运输、冶金和化工、能源和环境、生物、气象、农业等各种不同的工程领域都开始了广泛利用计算流体力学的知识对各种过程进行数学模拟的工作, 以计算流体力学(CFD)为基础的计算机辅助工程分析(CAE)技术已进入实用阶段。

计算流体力学是近代流体力学, 数值数学和计算机科学结合的产物, 是一门具有强大生命力的边缘科学。它以电子计算机为工具, 应用各种离散化的数学方法, 对流体力学的各类问题进行数值实验、计算机模拟和分析研究, 以解决各种实际问题。

计算流体力学和相关的计算传热学, 计算燃烧学的原理用数值方法求解非线性联立的质

量、能量、组分、动量和自定义的标量的微分方程组，这种流动能预报流动、传热、传质、燃烧等过程的细节，并成为过程装置优化和放大定量设计的有力工具。计算流体力学的基本特征是数值模拟和计算机实验，它从基本物理定理出发，在很大程度上替代了耗资巨大的流体动力学实验设备，不断开拓新的研究课题和研究方向，在科学研究和工程技术中产生巨大的影响。

CFX 是由英国 AEA 公司开发，是一种实用流体工程分析工具。本文主要介绍 CFX 软件的结构和功能，前处理系统、求解器、后处理系统，流动模型、燃烧模型和辐射模型，以及在宝钢热轧加热炉上应用的实际结果。

2 CFX 软件的基本结构和功能

CFX 包括前处理系统，求解器和后处理系统。

2.1 前处理系统 CFX-BUILD

CFX-BUILD 是一种以结构分析软件 MSC/PATRAN 为基础的图形处理系统。CFX-BUILD 将计算机辅助设计(CAD)过程和计算流体力学(CFD)分析的工作相结合，使得工程师在做产品的工程设计时(CAD 阶段开发)即可对过程的特性进行分析。

CFX-BUILD 以下列先进的方法构造非结构化的多块化的网格。

- 1) 可以直接访问各种 CAD 软件：如 CADDSS5, CATIA, Euclid3, Pro/Engineer 和 Unigraphics。
- 2) 可以从任一 CAD 系统例如 MSC/PATRAN 和 I-DEAS, 以 IGES 格式直接读入 CAD 图形。
- 3) 具有很强的操作功能，例如可以自动调整和组合各种曲面，从 CAD 数据读入高质量网格。
- 4) 具有出色的几何造形能力，例如可向任意曲面扩展。
- 5) 带有很强的图形处理工具。
- 6) 具有高度自动的曲面和体网格划分能力，以保证生成高质量的网格。

2.2 CFX 4

CFX 4 能用于计算各种流体流动、燃烧和传热过程。适用于直角/柱面/旋转坐标系，稳态/非稳态流动，瞬态/滑移网格，不可压缩/弱可压缩/可压缩流体，浮力流，多相流，非牛顿流体，化学反应，燃烧，NO_x 生成，辐射，多孔介质及混合传热过程。CFX 4 还包括辐射换热模块 CFX-RADIATION 和材料数据库模块 CFX-INFOCHEM。

CFX 4 采用有限体法，自动时间步长控制，SIMPLE 算法，代数多网格、ICCG、Line、Stone 和 Block Stone 解法。差分格式包括：隐式、上风、高次上分、Quick、CONDIF、TVD/MUSCL、CCCT。壁面边界条件包括：线性/对数/平方，非滑移/滑移/混合、静止/运动/旋转，绝热/等温/恒热流/混合等。

其主要功能包括：

1) 非结构化多模块: CFX 4 有一个非结构化多模块求解器。能有效、精确地表达复杂几何形状,任意连接模块即可构造所需的几何图形。在每一个模块内,网格的生成可以确保迅速、可靠地进行,这种多块式网格允许扩展和变形,例如计算气缸中活塞的运动和自由表面的运动。

滑动网格功能允许网格的各部分可以相对滑动或旋转,这种功能可以用于计算混合容器中转动的叶片和隔板间的相互作用。

2) 先进的湍流模型: CFX 4 引进了各种公认的湍流模型。例如: $k-\epsilon$ 模型,低雷诺数 $k-\epsilon$ 模型, RNG $k-\epsilon$ 模型,代数雷诺应力模型,微分雷诺应力模型,微分雷诺通量模型等。

3) 多相流: CFX 4 的多相流模型可用于分析工业生产中出现的各种流动。包括单体颗粒运动模型,连续相及分散相的多相流模型和自由表面的流动模型。

4) 传热: CFX 4 可以计算对流、传导和辐射。CFX4-RADIATION 采用 Monte Carlo 法和区域离散法计算辐射。

5) 化学动力学和燃烧模型: 反应动力学模型可以用以分析包括几种化学物质和多个化学反应的化学体系。对于每一个反应物类,程序自动设置传递方程,计算速率常数、反应热和相的变化。燃烧模型可以求解任一燃料的燃烧过程。

2.3 CFX 5

CFX 5 是一种强大的新型耦合求解器。其优势在于处理流动物理现象简单而几何形状复杂的问题。CFX 5 能同时求解压力和动量方程,求解过程稳定可靠。目前发行的版本中提供稳态/非稳态流动,不可压缩层流/湍流,自然对流模型等,其它物理模型计划将于今后发行的版本中加入。与大多数 CFD 程序采用的 SIMPLE 算法相比,CFX 5 占用机时少,对于网格节点多的工程问题,这一优点尤其突出。

2.4 CFX-TASCflow

CFX-TASCflow 在旋转机械 CFD 计算方面具有很强的功能。它可用于不可压缩流体,亚/临/超音速流体的流动,采用具有壁面函数的 $k-\epsilon$ 模型、2 层模型和 Kato-Launder 模型等湍流模型,传热包括对流传热、固体导热、表面对表面辐射, Gibb's 辐射模型,多孔介质传热等。化学反应模型包括旋涡破碎模型、具有动力学控制复杂正/逆反应模型、Flamelet 模型、NO_x 和碳黑生成模型、拉格朗日跟踪模型、反应颗粒模型和多组分流体模型。CFX-TurboGrid 是一个用于快速生成旋转机械 CFD 网格的交互式生成工具,很容易用来生成有效的和高质量的网格。

2.5 CFX-VISUALISE

CFX-VISUALISE 应用了国际上知名的 Advanced Visual System Inc.的图形工具。以各变量的彩色等值图,除去隐藏线的视图和明暗视图,速度矢量和任一剖面的等值面图;彩色流线图

和动画球粒指示流程图；任意变量的彩色图；表面网格图；探测某一点的场参数等图形方式使用户充分理解计算结果。

3 CFX 4 的燃烧模型、辐射模型

燃烧过程的形式很多，有混合控制和化学反应控制等。使用的燃料有气体、液体和固体。燃烧过程的共同特点是存在快速的物理化学变化。CFX 4 可以用来求解流体流动、燃烧和传热过程，分析模拟的计算结果，可以对有燃烧过程的三维流动有一个清晰的了解。

3.1 燃气燃烧模型

CFX 4 气体燃烧模型有混合燃烧模型和旋涡破碎模型。旋涡破碎模型已成功地应用于许多实际问题中。

3.2 油燃烧模型

CFX 4 中的油燃烧模型使用的拉格朗日颗粒跟踪法，对油滴的轨迹和汽化进行仿真，油雾的燃烧采用混合燃烧模型 采用了一种浓度概率分布函数(PDF)来计算湍流脉动，这种湍流脉动会导致瞬时高温的出现，从而引起 NO_x 含量的增加。该模型功能在研究一台 60MW 前端墙供热式燃油炉时得到证实，该炉有六个燃油喷嘴，与旋转的空气混合后燃烧。

3.3 煤粉燃烧模型

CFX 同样采用拉格朗日颗粒跟踪法建立煤燃烧模型。模型中考虑了煤的挥发和碳的燃烧，煤中挥发物的燃烧采用 PDF/混合 燃烧模型。

本模型的最新应用是对一台 350MW 角燃式锅炉进行仿真。在该锅炉的四角处分上下两层布有烧嘴，粉煤和空气从喷嘴喷入。图 4 所示是靠近角部烧嘴处炉气在旋涡上升离开锅炉前燃烧时的流动情况。炉子中心高温区是因为碳粒燃烧造成的。在靠近炉子顶部，流动图像的对称性由于在两个不同水平高度的火焰区引入了空气射流而变形。

3.4 辐射模型

辐射传热在燃烧过程中非常重要。CFX-RADIATION 用于计算灰体和非灰体系统内三维复杂几何形状的辐射换热。CFX-RADIATION 可以与 CFX 流场求解器自动连接，对耦合的辐射场和流场进行仿真。CFX-RADIATION 有两种算法：Monte Carlo 法和区域离散法。

4 宝钢热轧加热炉的模拟

4.1 加热炉概述

宝钢热轧厂 1580 的 1、2#步进式加热炉系由日本中外炉公司设计, 炉子的燃耗模型由三菱电机提供, 3#炉由重庆钢铁设计院总包, 中外炉公司作技术支持, 并引进部分关键设备。基本尺寸为: 炉长为 42300mm, 有效炉长为 41000mm, 宽为 12000mm。

所采用的煤气成分(体积百分比)如表 1: 低位发热值为 2000kcal/Nm³

表 1 煤气的成分

CO	H ₂	CO ₂	N ₂	CH ₄	C _m H _n	O ₂
17.86	20.46	13.88	37.04	9.78	0.95	0.03

炉子共有 6 组烧嘴, 其进口空气与煤气流量分别为:

预上: 空气	13.22	km ³ /h, 预热温度为 600℃	煤气:	6.71km ³ /h
预下: 空气	18.85	km ³ /h, 预热温度为 600℃	煤气:	9.80km ³ /h
加上: 空气	17.73	km ³ /h, 预热温度为 600℃	煤气:	9.04km ³ /h
加下: 空气	13.33	km ³ /h, 预热温度为 600℃	煤气:	7.15km ³ /h
均上: 空气	3.81	km ³ /h, 预热温度为 600℃	煤气:	2.02km ³ /h
均下: 空气	3.91	km ³ /h, 预热温度为 600℃	煤气:	2.08km ³ /h

各种热损失在模型计算中根据热平衡表进行计算。热平衡表如表 2。

表 2 加热炉热平衡表

分类	项 目	热量×10 ³ kJ/h	百分数/%
热收入	1 燃料发热量	334552	100.0
	2 预热空气显热	66245.5	19.8
	3 钢氧化生成热	9769	2.9
	合 计	410566.5	122.7
热支出	1 板坯显热	208108.1	62.2
	2 氧化铁皮吸热	2563.5	0.8
	3 水冷热损失	23125.9	6.9
	4 砌体热损失	9166.8	2.7
	5 炉底开关热损失	7381.1	2.2
	6 装料炉门热损失	158.9	0.0
	7 出料炉门热损失	618.9	0.2
	8 出料炉门溢气热损失	899.1	0.3
	9 烟气带走热损失	155587.6	46.5
	10 其它热损失	2956.6	0.9
	合 计	410566.5	122.7

钢坯的黑度：0.7 炉墙的黑度：0.7

对于板坯物性参数，因随温度变化较大，必须考虑温度的影响。我们将板坯比热 C_p 和导热系数 λ 采用多项式拟合。其结果如下：

C_p 的多项式为： $C_p = 4E-12t^4 - 1E-08t^3 + 9E-06t^2 - 0.0019t + 0.5891$

λ 的多项式： $\lambda = -1E-10t^4 + 5E-07t^3 - 0.0005t^2 + 0.0325t + 177.41$

4.2 模型和边界条件

本计算中流动采用 $k-\epsilon$ 湍流模型，煤气燃烧采用旋涡破碎模型，辐射换热采用区域离散法，钢坯内部的导热采用有限差分法。

进口：采用 Dirichlet 边界条件，即进口给定空气和燃料速度，并给定燃烧所需燃烧标量。

出口：采用压力边界条件。考虑炉子微正压操作，取出口负压为 2mm 水柱；同时，由于板坯出炉，带走一部分热量，这部分热量处理为一个恒定热流。

壁面：对于速度，采用壁面函数处理。同时因为炉子有一定的散热必须考虑，为方便计算，给定壁面一个恒定热流。

4.3 模拟计算结果及分析

加热炉具体结构见图 1。加热的钢材为普碳钢，板坯厚度为 230 mm，长为 10000mm，宽为 1055mm。实际板坯间有 50mm 的间隔，这种间隔在模型中很难实现，把板坯假设为连续，进料段留出一空隙以便下部气体的排出，简化处理后加热炉进行网格划分如图 2。采用贴体网格和多块结构来划分复杂的炉膛结构，网格数为：34,593。板坯厚度方向为 7 层。

本文对宝钢钢坯加热炉产量为 230t/h 的工况进行了数值模拟，并给出了详细的计算结果，见图 3 至图 11。



图 1 给出了宝钢板坯加热炉结构图



图 2 钢坯加热炉数值模拟网格划分

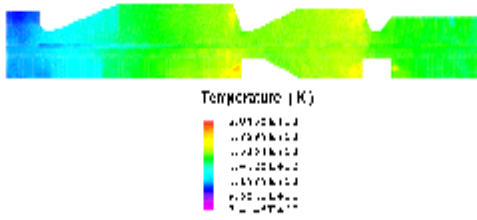


图 3 钢坯加热炉内温度分布图

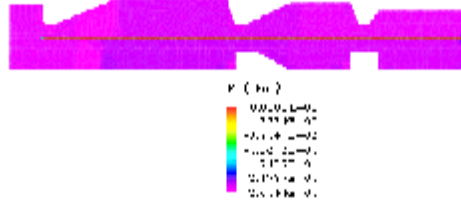


图 4 钢坯加热炉内压力分布云图

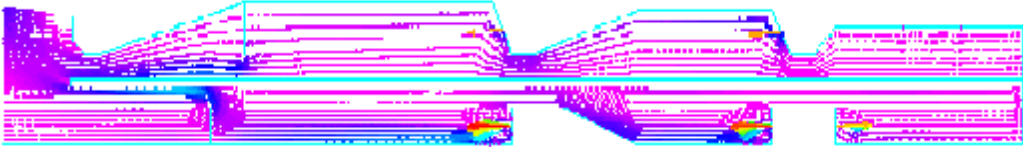


图 5 钢坯加热炉内速度矢量图

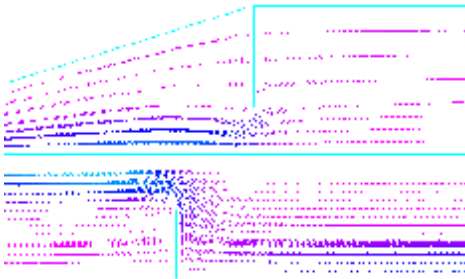


图 6 钢坯加热炉内挡板局部速度矢量图

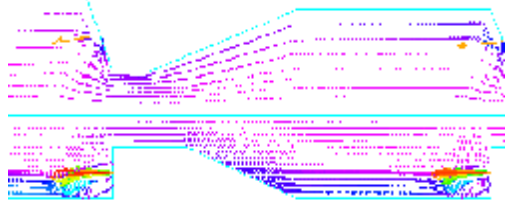


图 7 钢坯加热炉内局部速度矢量

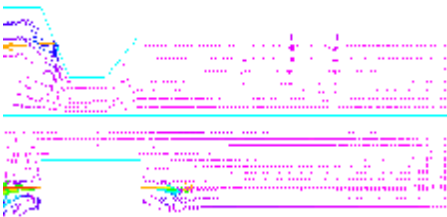


图 8 钢坯加热炉内局部速度矢量图

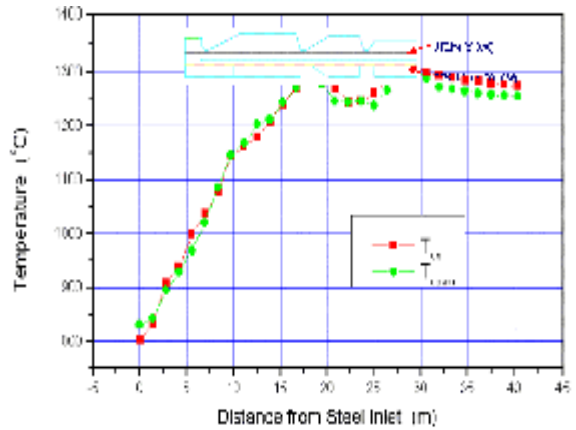


图 9 钢坯加热炉内不同位置温度分布线图

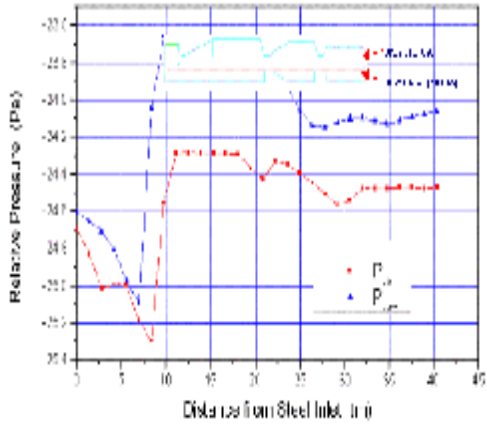


图 10 钢坯加热炉内不同位置压力分布线图

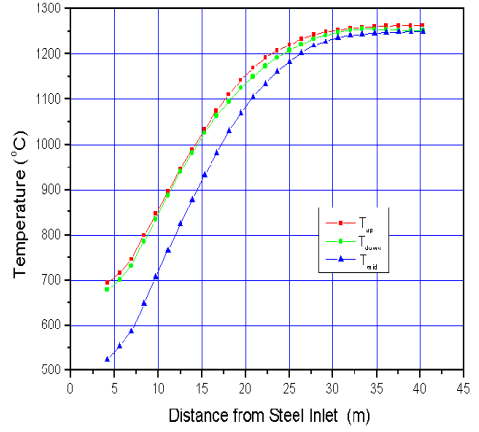


图 11 钢坯上下表面及中心温度分布线图

(下转 439 页)