



Classified Index: X 701

**A Thesis Submitted to
the Faculty of Graduate of Shandong University
For the Degree of Master of Engineering**

**Numerical Simulation Research on the Flow Field of the
Entrance Flue of SCR DeNO_x Reactor**

**Candidate: Wang Wei
Specialty: Chemical Process Machinery
Supervisor: Prof. Zhou Shenjie**

Shandong University, Jinan, P. R. China

April, 2010



原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名： 王伟 日期： 2010.5.30

关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解山东大学有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权山东大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

(保密论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名： 王伟 导师签名： 周中 日期： 2010.5.30



摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
符号说明.....	V
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 SCR 脱硝技术综述.....	2
1.2.2 数值模拟在 SCR 中的应用.....	5
1.3 主要研究内容.....	8
第 2 章 SCR 脱硝反应器流场的数值模拟方法.....	11
2.1 引言.....	11
2.2 流场的数值分析方法.....	11
2.3 SCR 脱硝反应器模型.....	14
2.4 CFD 模拟方法.....	17
2.4.1 CFD 数值模拟方法的选择.....	17
2.4.2 流场数值模拟的求解过程.....	17
2.5 本章小结.....	20
第 3 章 SCR 脱硝反应器入口烟道流场分析.....	23
3.1 引言.....	23
3.2 导流板数量对入口烟道流场的影响.....	23
3.3 喷射管道对入口烟道流场的影响.....	34
3.4 本章小结.....	42
第 4 章 SCR 脱硝系统混合的数值模拟.....	45
4.1 引言.....	45
4.2 数值模拟求解.....	46

4.3 模拟结果分析	48
4.4 本章小结	51
总结与展望	53
参考文献	55
致谢	61

CONTENTS

CHINESE ABSTRACT	I
ENGLISH ABSTRACT	III
Nomenclature	V
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background and Significance of the Research	1
1.2 Research Status	2
1.2.1 Review of SCR DeNO _x	2
1.2.2 Numerical Simulation in SCR	5
1.3 The Main Research Contents	8
Chapter 2 Numerical Simulation in SCR DeNO_x Reactor	11
2.1 Introduction	11
2.2 Numerical Analysis Principle	11
2.3 The Model of SCR DeNO _x Reactor	14
2.4 The Method of CFD Simulation	17
2.4.1 The Choice of CFD Simulation	17
2.4.2 The Solution Process of Numerical Simulation	17
2.5 Conclusion	20
Chapter 3 Numerical Simulation Results in the Entrance Flue of SCR DeNO_x Reactor	23
3.1 Introduction	23
3.2 the Influence of the Number of Guide Vanes to the Flow Field of Entrance Flue of SCR Reactor	23
3.3 the Influence of Injection Grid to the Flow Field of Entrance Flue of SCR Reactor	34
3.4 Conclusion	42
Chapter 4 Numerical Simulation of Flue Gas Mixed with the Reductant in the	

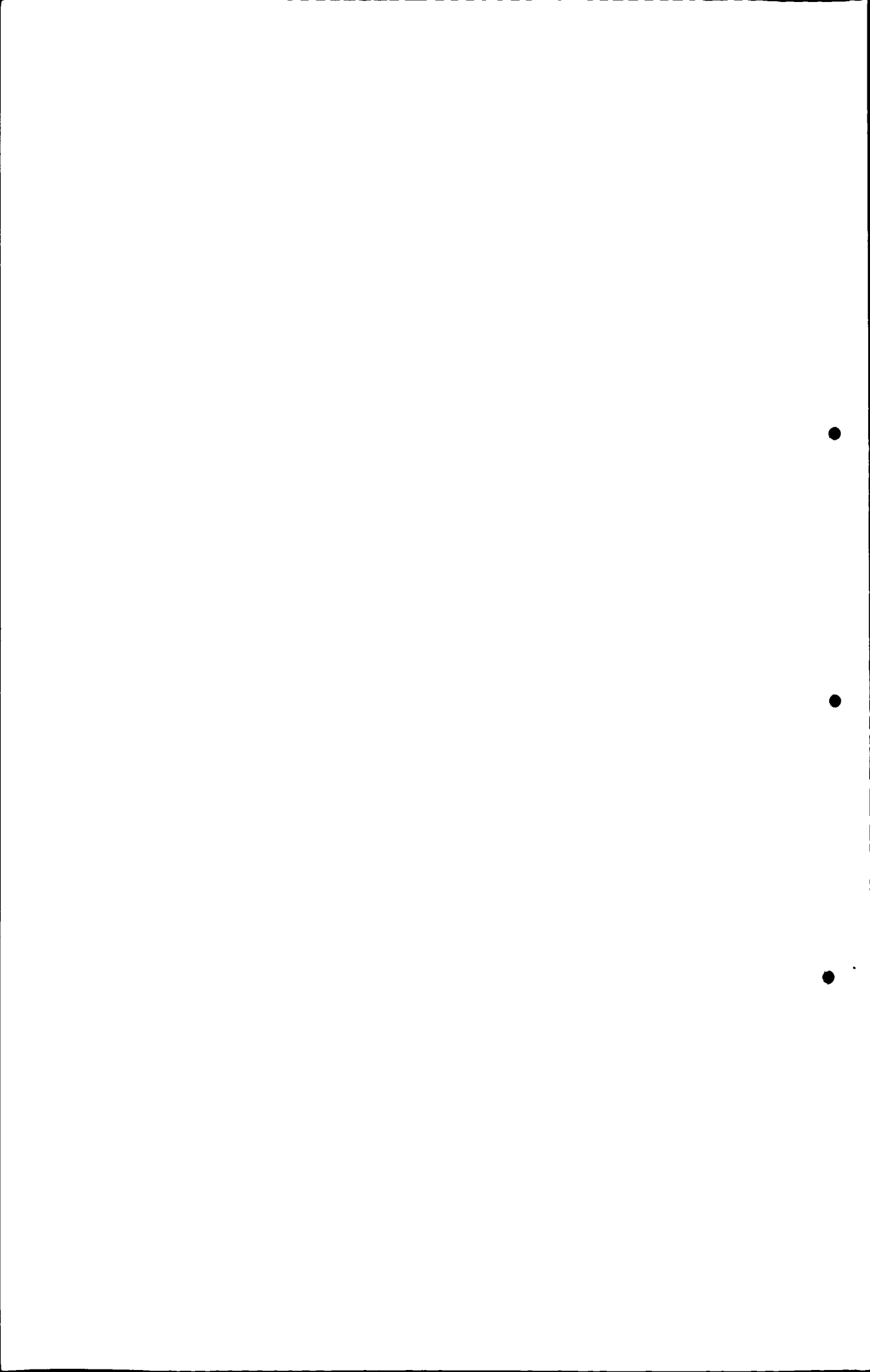
SCR DeNO_x System	45
4.1 Introduction.....	45
4.2 Numerical Simulation	46
4.3 Analysis of Simulation Results	48
4.4 Conclusion	51
Summary and Outlook	53
References	55
Acknowledge	61

摘要

随着我国对氮氧化物(NO_x)排放标准的提高,以燃煤为主的火电厂如何减少氮氧化物的排放越来越受到重视。在众多的脱硝方法中,选择性催化还原(SCR)烟气脱硝技术具有脱硝效率高、运行可靠、无副产物、装置结构简单等优点,在世界上得到了广泛的应用。近年来,对 SCR 脱硝技术的研究主要集中在脱硝反应器流场优化和催化剂的研发上,如何提高脱硝效率,延长催化剂的寿命等相关问题是研究的热点。随着计算流体力学和计算机技术的发展,利用高效、便捷的计算流体力学软件对 SCR 脱硝系统进行数值模拟仿真,可以为脱硝反应器烟道、导流板及喷射系统的设计和改进行提供重要参数。

本文以某电厂 600 MW 机组所配置的 SCR 烟气脱硝装置为研究对象,利用 FLUENT 流体力学数值计算软件,对 SCR 反应器入口烟道流场进行了数值仿真计算。主要研究内容如下:通过对 SCR 反应器入口烟道流场的数值模拟,分析了不同数量的导流板时入口烟道流场分布,结果表明随着导流板数量的增加,入口烟道流场变得更均匀,但导流板数量的增加给 SCR 反应器带来更大的压降;当导流板的分布到一定程度后,导流板数量的增加对入口烟道流场的改善变得非常微弱。通过分析喷射格栅对入口烟道流场的影响,结果表明构成喷射格栅的管路对烟道流场有改善作用,且双层管路排布的喷射格栅比单层管路的作用更好。通过对入口烟道内烟气与还原剂混合的数值模拟,结果表明通过对喷嘴分区并设定不同的喷射速度,可以很好的改善烟气与还原剂的混合,且单层管路的喷射格栅比双层管路更有利于烟气与还原剂的分布。

关键词 烟气脱硝; SCR; 入口烟道; 流场; 数值模拟



ABSTRACT

With nitrogen oxides(NO_x) emission standards to be more stringent, it attracts more and more attention to reduce nitrogen oxides from coal-fired power plants. The selective catalytic reduction(SCR) technology for flue gas has been used widely in power plants all over the world, which has the advantage of the high denitration efficiency, reliability service, no by-products, simple device, and so on. In recent years, the research on SCR De NO_x technology mainly focuses on the optimization of flow field of SCR and the preparation of catalyst. Research focus is how to improve denitration efficiency, extend the life of the catalyst, and so on. With the development of computational fluid dynamics and computer technology, we can simulate SCR De NO_x system using of efficient, convenient computational fluid dynamics software. The results can provide important parameters for the design and improvement of flue, guide vanes and the injection system.

Using computational fluid dynamics software FLUENT, the flow field of the entrance flue of SCR in a 600MW power plant unit is simulated in this paper. The main research contents and results are as follows. The flow field of the entrance flue of SCR is simulated when the number of guide vanes is different. The results show that with the increase of the number of guide vanes, the flow field of flue becomes more uniform and the pressure drop is greater. Meantime, the effect of guide vanes becomes weak when the distribution of guide vanes gets to a certain extent. The role of injection grid to the flow field of flue is analyzed, the results show that injection grid pipings can improve the flow field of flue and the role of double-pipe arrangement is better than single pipeline. The mixing of flue gas and reducing agent in entrance flue of SCR is numerical simulated. The results show that it can improve the mixing and the concentration distribution of flue gas and reducing agent in the flue by dividing the nozzles as different areas and setting different injection speeds. Moreover, single-pipeline in the injection grid is more beneficial to the distribution of flue gas and reducing agent than double-pipelines.

Key words: Flue gas denitration; SCR; Entrance flue; Flow field; Numerical simulation

符号说明

- R_e —— 雷诺数;
- u —— 沿 X 轴方向的流动速度, m/s;
- v —— 沿 Y 轴方向的流动速度, m/s;
- w —— 沿 Z 轴方向的流动速度, m/s;
- D —— 当量直径, m;
- Q —— 气体流量, m^3/h ;
- T —— 气体温度, $^{\circ}\text{C}$;
- ρ —— 密度, kg/m^3 ;
- μ —— 动力粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$;
- g —— 重力加速度, m/s^2 ;
- t —— 时间, s;
- ϕ —— 通用变量;
- τ —— 粘性应力, Pa;
- c_p —— 比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;
- S —— 广义源项;
- Γ —— 扩散系数;
- k —— 湍动能;
- ε —— 湍动能耗散率;



第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

我国是能源消费大国，多年以来煤炭在我国的能源结构中所占比重约为70%。近几十年来我国经济发展迅速，对能源(特别是电力)的需求旺盛，以燃煤为主的火电发展很快，火电装机容量占总容量的比例约为75%，火电发电量占总发电量的80%以上^[1]。火电厂排放的烟气中含有粉尘、二氧化硫(SO₂)和氮氧化物(NO_x)等大气污染物，这给我国的环境治理带来了巨大的压力。根据中国环境监测总站提供的数据，我国2007年的NO_x排放量为1643.4万吨，其中电力行业占排放总量的45.5%^[2,3]。随着我国火电装机容量的不断增长，火电行业排放的NO_x量呈快速增长的趋势，如不加以有效控制，将会给我国的生态环境带来严重的危害。

氮氧化物的危害主要包括：NO_x在强光下与碳氢化合物形成有刺激性、腐蚀性的光化学烟雾，降低空气的能见度，同时可伤害人的眼睛并导致呼吸系统疾病，而且烟雾中还含有致癌物质；NO_x易与血液中血色素结合，使血液缺氧，引起中枢神经麻痹症，同时对人体的心脏、肝脏、肾脏和造血组织等都有损害；NO_x能破坏臭氧层，使之失去了对紫外光辐射的屏蔽作用，并影响人的免疫系统；NO_x可导致酸雨的形成，破坏农业生产和生态环境^[4-6]。

为保护生态环境，减少NO_x的排放，各国政府纷纷制定了相应的减排法规和标准，日本和欧美等发达国家走在世界的前列，2003年我国国家环保总局颁布了新修订的火电厂大气污染物排放标准(GB13233-2003)，对火电厂NO_x的排放做出了明确的限制^[7-12]。目前，控制燃烧产生的NO_x的方法主要有燃烧前脱硝、燃烧中脱硝和燃烧后脱硝三类^[13,14]。在众多脱硝技术中，由于选择性催化还原法(Selective Catalytic Reduction, 简称SCR)具有没有副产物、不形成二次污染、装置结构简单、运行可靠、便于维护且脱硝效率高等诸多优点，得到了广泛的商业应用，是目前国际上应用最广泛的烟气脱硝技术^[15-17]。目前，国内部分火电厂已经安装SCR脱硝系统，一些院校及科研院所也在积极的进行SCR脱硝技术的研究，并取得了一定的成果^[14,18]，这为SCR脱硝技术的推广应用打

下了基础。

选择性催化还原脱硝技术工艺已经比较成熟，并且该技术实现了广泛的商业化应用，许多大公司和科研院所都致力于这项技术的发展和推广应用。SCR 脱硝技术的早期基础研究主要集中在反应机理上，后来随着对反应机理的研究深入及计算流体力学和计算机技术的快速发展，数值模拟技术得到广泛应用。如今，计算机模拟技术已经是国内外能源领域众多研究者普遍采用的手段，模拟的方向也趋向于实用性。作为一种更加直接有效、经济节约、方便快捷的开发方式，计算机模拟技术很快在烟气脱硝设备的设计和 optimization 方面得到应用。随着计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, 简称 CFD) 及计算机技术的发展，使得对于复杂的流动、换热、混合及化学反应的数值预测成为可能。在实际的大型电站锅炉中，SCR 烟气脱硝过程非常复杂，通过计算流体力学软件我们可以对 SCR 脱硝反应器及其相关的烟道系统的流体流动、传热传质、多组分输运、化学反应等过程进行预测，这将有助于设计更为合理高效的 SCR 烟气脱硝系统，并为系统调节建立理论依据，降低工程风险。

通过计算流体力学软件，我们可以模拟分析 SCR 脱硝系统内部烟气流动特性及烟气与还原剂的混合和化学反应特性，这为 SCR 脱硝工艺的制定及 SCR 脱硝设备的设计提供一定的参考依据，对实现 SCR 烟气脱硝技术及设备的国产化具有积极意义。本文通过对 SCR 脱硝反应器入口烟道流场的数值模拟，分析入口烟道中导流板的数量和喷射格栅管路对入口烟道流场的影响，同时还比较分析了喷嘴在不同喷射速度分布时和不同管路排布的喷射格栅时，烟气与还原剂的混合情况，为 SCR 脱硝反应器烟道的设计、流场优化及喷射格栅的设计提供一定的参考依据。

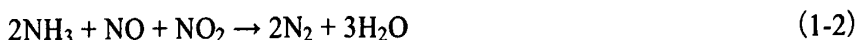
1.2 国内外研究现状

1.2.1 SCR 脱硝技术综述

SCR 烟气脱硝技术最早是在 20 世纪 50 年代由美国人首先提出来的，并由美国 Egelhard 公司于 1959 年申请了该技术的发明专利，在 20 世纪 70 年代由日本率先对其实现了工业化应用^[14]，目前这一技术在发达国家已经得到了比较

广泛的应用。

SCR 脱硝技术是根据催化还原的原理将烟气中的氮氧化物转化为对大气没有污染的物质方法,其中,选择性是指还原剂(一般为 NH_3)只与 NO_x 进行还原反应,催化的作用是降低分解反应的活化能,使其反应温度降低至 $150\sim 450\text{ }^\circ\text{C}$ 之间^[19~25]。SCR 脱硝系统中,还原剂 NH_3 与烟气均匀混合后一起通过一个由催化剂(如 $\text{V}_2\text{O}_5\text{-TiO}_2$)填充的脱硝反应器,反应器中的催化剂分上下多层(一般为 3~4 层)有序放置。在催化剂作用下, NO_x 与 NH_3 发生还原反应,生成 N_2 和 H_2O 。经过最后一层催化剂后,使得烟气中的 NO_x 含量在排放限值以下。其原理图如图 1-1^[19]。其主要的化学反应如下:



其中,反应(1)是主反应,因为烟气中的大部分 NO_x 大多是以 NO 的形式存在的。

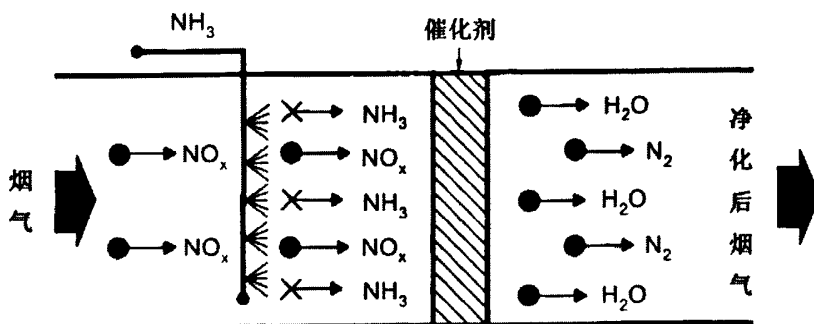


图 1-1 SCR 技术还原 NO_x 的原理图

SCR 脱硝系统主要由装有催化剂的反应器、氨储存罐、氨/空气混合器、氨喷射器(Ammonia Injection Grid, 以下简称 AIG)、省煤器旁路等组成。SCR 脱硝系统在电厂中一般安装在省煤器与空气预热器之间,处于高灰、热烟气一侧,这样布置虽然会影响催化剂的寿命,但是烟气温度满足催化还原反应要求,避免对烟气再加热而降低整个系统的热效率。脱硝系统的工艺流程图见图 1-2^[26]。SCR 脱硝工艺的核心装置是反应器,在反应器的入口烟道中,有导流板、多孔板、分离器及喷射格栅等辅助装置,如图 1-3 所示^[19]。SCR 反应器中的烟气温度可通过调节经过省煤器的烟气和与通过旁路烟气的比例来控制,氨喷射器的安装位置在 SCR 反应器的上部以保证喷入的氨与烟气充分混合。

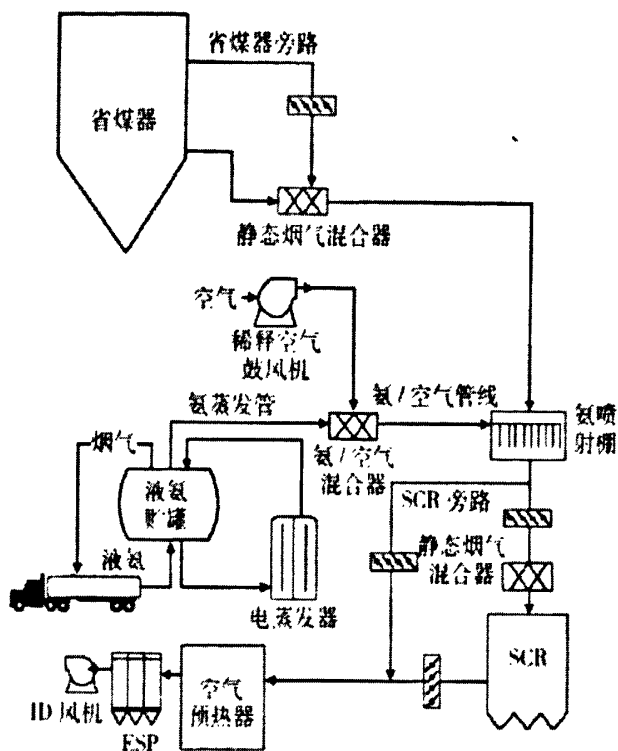


图 1-2 SCR 工艺系统流程图

目前，选择性催化还原脱硝技术已经在许多国家的火电厂中得到广泛应用。到 2004 年为止，世界范围内应用 SCR 烟气脱硝技术的电站燃煤锅炉容量超过 178.1 GW，其中日本安装有 SCR 装置的机组容量约有 23.1 GW，欧洲安装有 SCR 装置的机组容量约有 55 GW，美国安装有 SCR 装置的机组容量约有 100 GW^[30]。我国最早是在台湾台中电厂 4×550 MW 机组安装的 SCR 脱硝装置，大陆最早是福建后石电厂 6×600 MW 机组的 SCR 脱硝装置^[30~32]。近几年，随着国家对 NO_x 排放标准不断提高，烟气脱硝产业发展迅速，国内一些实力较强的环保公司和科研院所采用技术引进或者合资的方式与国外大的环保科技公司广泛开展合作^[5]，为我国烟气脱硝技术的开发及推广打下了坚实的基础。

在 SCR 脱硝技术中，影响 NH_x 脱除效率的因素很多，主要有反应温度、反应接触时间、催化剂的选择、NH₃/NH_x 摩尔比、氨泄漏等^[27~29]。此外，烟气与还原剂的混合程度及反应器烟道流场分布的均匀性也是影响脱硝效率的重要因素。因此，对 SCR 反应器流场分布状况进行研究，优化流场分布并寻求合理的导流布置方案，有利于提高 SCR 脱硝系统的脱硝性能。

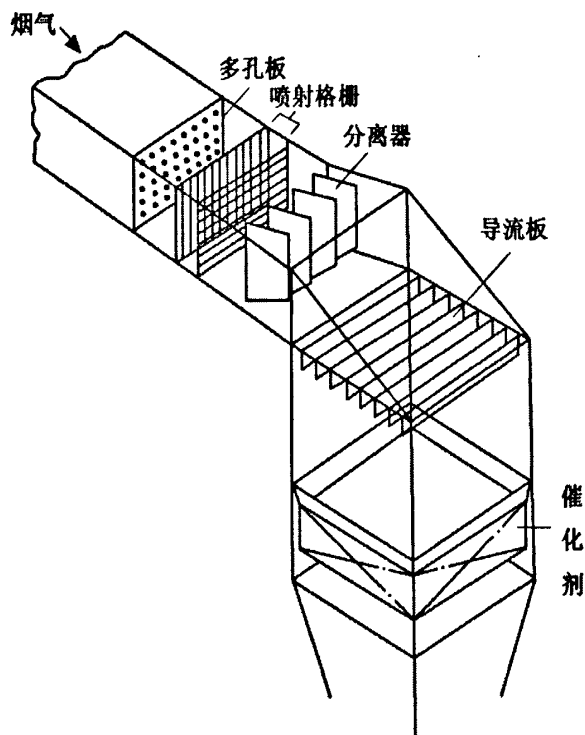


图 1-3 SCR 反应器结构图

1.2.2 数值模拟在 SCR 中的应用

采用数值模拟方法研究 SCR 法烟气脱硝系统内流场分布及烟气与还原剂的混合情况，分析气流调节装置对流场及混合器对烟气与还原剂的混合均匀程度的影响，实现气流流态的可控化，使烟气与还原剂的混合达到要求的均匀程度，为导流板、混合器的设计及合理配置等提供重要参考依据。随着各种数值计算方法和计算软件的不断完善，计算结果的准确性不断提高，数值模拟方法会受到越来越广泛的应用。

借助于数值模拟对 SCR 脱硝反应器及其烟道进行流场计算，使 NH_3 与 NO_x 达到最佳湍流混合，确保烟气速度分布、烟气温度分布及还原剂浓度分布最佳，压力降低最小，实现 SCR 脱硝系统的预期性能目标，这成为 SCR 工程设计的一项重要内容。经过多年的 SCR 系统运行及多个 SCR 系统的数值模拟，国外已经积累了大量的经验和数据，形成一个比较完整的数据库，可以用来判断、比较和预测 SCR 系统设计的优劣^[33]。我国在烟气脱硝技术研究方面起步较晚且经验

较少，与国际水平相比还有着较大的差距。数值模拟在 SCR 脱硝系统中的应用主要包括：

1) 烟道流场的数值模拟

合理均匀分布的 SCR 反应器烟道流场对于减小脱硝系统造成的阻力，防止烟道积灰、催化剂层阻塞，降低高温高速烟气对反应器的冲击等有十分重要的作用。通过对 SCR 反应器烟道流场的数值模拟，可以很清晰的反映出烟气在反应器烟道内的分布，为流场的优化及烟道结构的改进提供指导依据。根据国外的经验，在进行脱硝装置设计的时候，都有必要采用数值模拟方法对脱硝反应器烟道进行流场分析，为烟道形状及其内部导流组件的合理设计提供依据。

对 SCR 反应器烟道流场的数值模拟研究中，导流板的设计、布置、烟道结构优化是一个重要的内容。蔡小峰等模拟研究了 SCR 脱硝反应器入口段烟道流场，分析比较了空塔下和加置导流板时烟道流场的分布，得出导流板对优化 SCR 脱硝反应器烟道流场有重要作用^[34]；沈丹等分析了直板、弧度板和弧度直板三种不同形式的导流板下反应器内的流场分布，得出弧度直板为较合理的导流板形式，为脱硝系统内的导流设计和改进提供了参考^[35]；杜云贵等通过 CFD 模拟分析比较了几种不同导流装置布置方案，初步确立了导流板、AIG 及混合器等的布置方式，通过适当调整导流板的布置，使催化剂层烟气速度达到了工程要求，并进行了相关实验验证，从而证明了 CFD 模拟对 SCR 系统设计有非常有效的指导作用^[36]；袁景淇等应用计算流体力学软件模拟研究了关键导流板对烟气速度分布的影响，确定了其尺寸和安装位置，为导流板的设计和安装提供了重要参考^[37]。

除了关于导流板的研究外，SCR 反应器烟道内流场的优化分析及其他装置对反应器流场作用的研究，也是一个重要方面。Morita 等对 SCR 烟道和反应器中的流型进行了计算，对反应器烟道形状和导流板位置进行优化，为烟道设计和导流板的布置提供了重要参考^[38]；周丽丽等通过 CFD 方法对 SCR 预分布器系统进行了数值模拟，分析了均流装置对 SCR 反应器速度场的影响，并与俞逾等^[39]的试验结果进行了对比，结果表明喷射格栅的结构与催化剂层入口截面的浓度场分布密切相关^[40]；隋莉莉等应用计算流体仿真软件 FLUENT 对 SCR 脱硝系统中烟气与氨气的流场分布进行了仿真，分析了格栅型混合器对流场速度分布的作用，结果表明格栅型混合器改善了气体的混合均匀程度且压力损失较

小^[41]；徐芙蓉等通过冷态模型试验和数值模拟相结合的方法，对脱硝装置烟道中的整流装置、均流格栅及导流板等装置进行优化设计研究^[42]；吕同波等利用 FLUENT 软件数值模拟研究了 SCR 法烟气脱硝装置的流动特性，分析了导流装置和喷射格栅对系统阻力的影响，结果表明导流板可有效降低流场阻力，整流格栅对系统造成的阻力不大^[43]。

2) 烟气与还原剂混合的数值模拟

在 SCR 脱硝技术中，烟气与还原剂的混合程度直接关系到脱硝系统的脱硝效率、氨泄漏量等。通过数值模拟方法对 SCR 反应器内烟气与还原剂混合进行研究，调整优化喷射格栅中喷嘴的开孔形状和排布，可以很好的改善两者混合。

对烟气与还原剂混合的研究主要是围绕如何增进两者混合进行的。Adams 等应用 CFD 软件对 SCR 反应器中还原剂的喷入进行了模拟，通过调整喷射速度使得还原剂在催化剂层入口处的浓度分布达到了设计要求^[44]；贾双燕应用 FLUENT 软件研究了 SCR 反应器内烟气与氨的混合情况，经过对反应器几何模型的不断优化，使催化剂层入口处的速度分布、氮氧化物浓度分布及氨硝比等达到均匀分布，满足了设计要求，但是该结果并未得到现场或者相关实验的验证^[45]。

除对烟气与还原剂混合的研究外，喷射格栅作用以及喷射格栅中喷嘴的研究也是一个重要方面。Naqvi 等采用数值模拟的方法研究了 SCR 脱硝系统中喷射格栅和静态混合器对烟道流场分布的作用^[46]；Choi 等通过模拟和实验结合的方法研究了 SCR 反应器喷射格栅中的喷嘴开单孔和多孔时的喷射效果，结果表明多孔喷嘴的喷射范围更广，更有利于烟气与还原剂的湍流混合^[47]；俞逾应用 FLUENT 软件模拟了不同尺寸喷嘴的喷射格栅时烟气与还原剂的混和情况，通过对结果的分析发现，同一根喷管上喷嘴的喷射速度由近及远逐渐增加，而采用小尺寸的喷嘴可减缓这种变化^[18]。

3) 催化剂层的数值模拟

催化剂是 SCR 脱硝工艺的核心技术之一，它的性能优劣直接关系到脱硝效率的高低，直接关系到 SCR 脱硝系统的运行成本。国外对 SCR 催化剂的研究始于 20 世纪中后期，经过多年的发展已经实现了商业化，而国内对 SCR 催化剂的研究和利用还处于起步阶段，核心技术仍然掌握在国外少数公司手中。催化剂寿命有限且价格较高，因此催化剂的成本问题也是制约 SCR 脱硝技术在我国

推广的关键问题之一。开发拥有自主知识产权的 SCR 脱硝催化剂，对于打破国外的技术垄断、降低催化剂成本、推进 SCR 脱硝技术在我国的应用有重大意义。

Chae 等模拟研究了蜂窝状 $V_2O_5-WO_3-TiO_2$ 催化剂的催化反应，模型中充分考虑了蜂窝状反应器的扩散阻力，预测了蜂窝状反应器的催化剂壁厚和孔结构等对 NO_x 脱除活性和 NH_3 泄漏的影响，结果表明扩散阻力对 SCR 反应器的设计具有重要作用^[48]；Khodayari 等对催化剂的毒物积累进行了数值模拟和实验研究，表明通过改进催化剂形态可以提高催化剂的抗中毒性^[49]；Roduit 等采用有限元法建立了蜂窝状催化剂的三维模型，从传质平衡方程和浓度平衡方程中计算出了外部传质系数，在考虑附面层影响以及氧化副反应的前提下，对采用蜂窝状催化剂的脱硝过程进行了三维模型的数值模拟，结果表明， NO_x 脱除效率和 NH_3 泄漏量与催化剂、氨氮比、空速比及氨氮混合度等几个因素有关^[50]；Tronconi 等对 SCR 脱硝反应过程中的内、外传质过程建立了数学模型，结果表明当催化剂长度小于 5 cm 时，轴向扩散不可忽略；在相同的测定条件下改变蜂窝状催化剂孔的水力半径，发现当水力半径增大时由于边界层扩散阻力的增加， NO_x 的转化率下降^[51]。

4) 烟道优化设计

与 SCR 反应器相连的烟道结构设计的优劣对于减小烟气系统的阻力，降低系统的磨损、积灰、阻塞等十分重要。根据国外的经验，在进行脱硝装置设计时，都有必要采用模拟的方法进行烟道形状及其内部导流组件的合理设计，较复杂的烟道结构可以采用 CFD 模拟和冷态模型实验结合的方式进行。

Wilhite 采用 CFD 方法模拟研究了 SCR 脱硝反应器内流场分布，并对 SCR 脱硝装置烟道进行了优化改进，提出烟道在拐角处应尽量采用圆弧过渡^[52]；张彦军等利用 FLUENT 软件对 SCR 反应器烟气流场变化进行了模拟计算，经过对反应器模型的调整优化，使烟气在反应器内分布均匀，并提出了合理的烟道设计方案^[53]。

1.3 主要研究内容

目前关于 SCR 脱硝系统数值模拟方面的研究主要集中在 SCR 反应器内部流

场均匀分布优化、还原剂喷射系统、SCR 反应器内烟气与氨气的混合状况及 SCR 反应器内催化剂层等几个方面。本文应用计算流体软件 FLUENT, 主要针对 SCR 反应器入口烟道系统的流场和入口烟道内烟气与还原剂氨气的混合进行数值模拟研究。主要内容如下:

1) 分析导流板的数量对 SCR 反应器入口烟道流场的影响, 包括烟道流场速度的均匀性、给系统带来的压降分析等, 为 SCR 反应器烟道流场优化提供参考。

2) 分析 SCR 反应器入口烟道中喷射格栅对入口烟道流场的影响, 包括对烟道流场速度分布的影响、给系统带来的压降分析等。

3) 分析不同氨喷速度分布时, 烟气与还原剂的混合情况, 同时比较单层和双层喷管排布的喷射格栅喷射效果及对烟气与还原剂混合的影响, 为喷射格栅的设计和生产应用提供参考。

•

•

•

第2章 SCR脱硝反应器流场的数值模拟方法

2.1 引言

近十几年来,计算流体力学有了很大的发展,使得对于复杂的流动、换热、混合及化学反应的数值预测成为可能,国内外众多科研院所和专家学者都开始利用流体力学软件这一方便的工具对流体力学问题进行深入的研究。利用计算流体力学软件,我们可以模拟分析SCR脱硝系统内部烟气流动特性及烟气与还原剂的混合和化学反应特性,一方面可以增强我们对其内部反应机理的深入了解,另一方面可以对SCR脱硝设备进行结构优化改进,使反应器内部流场更均匀,使烟气与还原剂的混合更均匀,以提高烟气脱硝效率。本章主要阐述SCR脱硝反应器流场的数值分析原理,并结合计算软件FLUENT及本文所研究SCR脱硝机组,对SCR脱硝反应器的几何模型、软件的设置方法和步骤进行了较详细的说明。

2.2 流场的数值分析方法

流场计算的基本过程是在空间上用有限体积法或其他类似方法将计算域离散成许多小的体积单元,在每个体积单元上对离散后的控制方程进行求解。因此,流场计算方法的本质就是对离散后的控制方程组进行求解。SCR脱硝反应器的流场计算,主要包括控制方程的建立、控制方程的离散以及控制方程的求解三个部分。

1) 控制方程

流体流动必须要遵守物理守恒定律,基本守恒定律包括质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律。如果流动处于湍流状态,还需遵守附加的湍流输运方程;如果流动包含有不同成分的混合或相互作用,还要遵守组分守恒定律^[54]。以上这些守恒定律及方程的数学描述便是控制方程。在SCR脱硝反应器的流场计算中,根据雷诺数 Re 计算得流动处于湍流状态,因此采用标准 $k-\varepsilon$ 模型模拟反应器内的流动问题,标准 $k-\varepsilon$ 模型控制方程的通用表达形式为^[55]:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \cdot \text{grad}\phi) + S \quad (2-1)$$

式中， ρ 为流体密度， t 为时间， ϕ 为通用变量， u 为速度矢量， Γ 为广义扩散系数， S 为广义源项。在直角坐标系下， $k-\varepsilon$ 模型的控制方程所对应的 ϕ 、 Γ 和 S 各自的表达式见表 2-1^[55]。

 表 2-1 直角坐标系下 $k-\varepsilon$ 模型的控制方程

方程	ϕ	Γ	S
连续	1	0	0
x-动量	u	$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial x} \right) + S_u$
y-动量	v	$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + S_v$
z-动量	w	$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial z} \right) + S_w$
湍动能	k	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$G_k + \rho\varepsilon$
耗散率	ε	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}$	$\frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} G_k - C_{2\varepsilon} \rho\varepsilon)$
能量	T	$\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_T}$	S 按实际问题而定

控制方程经过适当的数学处理,化为通用微分方程,通过求解通用微分方程的数值解,并写出求解方程的源程序,这样就可以求解不同类型的流体流动及传热问题。

2) 控制方程的离散

网格是离散的基础,网格节点是离散化的物理量的存储位置,网格在离散过程中起着关键作用。网格的形式和密度等,对数值计算结果有着重要的影响。本文研究的 SCR 脱硝反应器模型为三维模型,在三维问题中,网格单元有四面体、六面体、棱锥体和楔形体等。

在对控制方程进行离散时,常用的方法有有限差分法、有限元法和有限体积法等,其中有限体积法是目前 CFD 领域广泛应用的一种离散化方法,也是本文在对控制方程离散时采用的方法。其基本思想是:将计算区域划分为网格,并使每个网格点周围有一个互不重复的控制体积,将要求解的控制方程对每一个控制体积积分,从而得出一组离散方程。有限体积法的特点是计算效率高。

使用有限体积法建立离散方程时,很重要的一步是将控制体积界面上的物理量及其导数通过节点物理量插值求出。不同的插值方式对应于不同的离散结果,这种插值方式称为离散格式。有限体积法常用的离散格式有中心差分格式、一阶迎风格式、混合格式、指数格式、乘方格式、二阶迎风格式及 QUICK 格式等,这几种常见离散格式的性能对比见表 2-2^[55]。本文对控制方程的离散格式采用一阶迎风格式。

3) 控制方程的求解

流场计算方法的本质就是对离散后的控制方程组进行求解,可分为耦合式解法和分离式解法两大类。目前工程上应用最为广泛的一种流场计算方法是压力耦合方程组的半隐式方法(SIMPLE 算法),其核心是:采用“猜测-修正”的方法,在交错网格的基础上来计算压力场,求解离散形式的动量方程,若不收敛,用修正后的压力值作为给定的压力场,进行下次的计算,直到得到收敛解^[55]。本文对 SCR 脱硝反应器流场的模拟计算中,采用 SIMPLE 算法对控制方程进行求解。

表 2-2 常见离散格式的性能对比

离散格式	稳定性及稳定条件	精度与经济性
中心差分格式	条件稳定 $P_e \leq 2$	在不发生振荡的参数范围内, 可以获得较准确的结果 虽然可以获得物理上可接受的解, 但当 P_e 数较大
一阶迎风格式	绝对稳定	时, 假扩散较严重。为避免此问题常需要加密计算网格
混合格式	绝对稳定	当 $P_e \leq 2$ 时, 性能与中心差分格式相同; 当 $P_e > 2$ 时, 性能与一阶迎风格式相同
指数格式、乘方格式	绝对稳定	主要适用于无源项的对流-扩散问题。对有非常数源项的场合, 当 P_e 数较高时有较大误差
二阶迎风格式	绝对稳定	精度较一阶迎风高, 但仍有假扩散问题
QUICK 格式	条件稳定 $P_e \leq 8/3$	可以减少假扩散误差, 精度较高, 应用较广泛, 但主要用于六面体或四边形网格

2.3 SCR 脱硝反应器模型

本文以某电厂装机容量为 600 MW 机组所配备的 SCR 脱硝反应器为研究对象, 由于该机组装机容量较大, 锅炉排放的烟气流量较大, 需要配置较大尺寸的 SCR 脱硝反应器, 但受电厂预留空间的限制, 无法满足脱硝反应器的空间要求, 所以采用两台并联的稍小尺寸的 SCR 脱硝反应器来进行烟气脱硝作业。这两台并列安装的脱硝反应器尺寸及性能完全一样, 所以本文选择其中一台 SCR 脱硝反应器进行流场的数值模拟分析。

该机组的 SCR 脱硝反应器被布置在省煤器之后, 空气预热器之前, 其中氨喷射系统设置在 SCR 脱硝反应器的入口烟道内, 反应器的几何模型见图 2-1。SCR 脱硝反应器的入口处的尺寸为: $Y=3.80\text{ m}$, $Z=11.65\text{ m}$; 喷氨段烟道的尺寸为: $X=3.70\text{ m}$, $Z=11.65\text{ m}$, 其中喷射格栅布置于距离入口处上壁面 5 m 处; 催化剂部分尺寸为: $X=11.60\text{ m}$, $Z=11.65\text{ m}$; 喷氨段烟道与催化剂部分间距为 1.50

m。整个反应器宽度(沿 Z 轴方向)为 11.65 m。

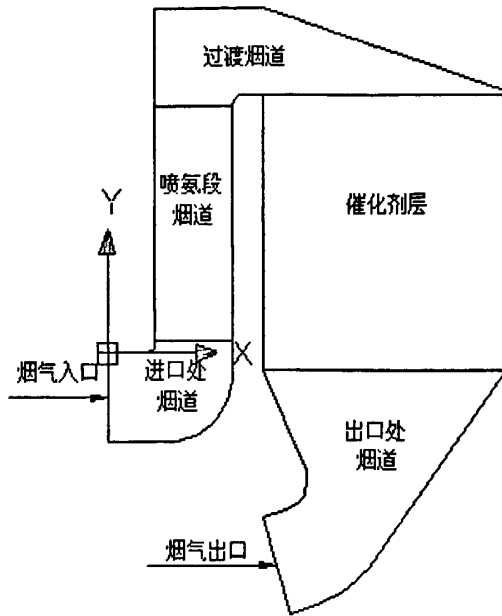


图 2-1 SCR 脱硝反应器几何结构

网格是 CFD 模型的几何表达形式，也是模拟与分析的载体，网格质量对 CFD 的计算精度和计算效率有着重要影响。网格分为结构化网格和非结构化网格两种。结构化网格划分具有规则的连续性，即网格中节点排列有序、邻点间的关系明确，每个节点都有相同数量的邻点；非结构化网格划分具有不规则的连接性，每个节点可以有不同数量的邻点。结构网格的计算结果比非结构网格更容易收敛，也更加准确。

本文网格的生成采用 FLUENT 软件的前处理软件 GAMBIT，其中三维单元网格形式包括六面体、四面体、金字塔以及楔形单元等。网格的选择依赖于具体的问题，在选择网格的时候，应该考虑下列问题：初始化的时间、计算花费和数值耗散。划分网格时，应在保证网格质量过关的前提下，根据计算机的运算能力及计算精度来确定网格的数量。根据 SCR 脱硝反应器模型的构造，对反应器进行了分区划分，结构规则直线段烟道区域采用结构化六面体网格划分，在结构相对复杂、流场变化大的区域(比如烟道拐角处、喷氨段烟道与催化剂部分的连接烟道处等)则采用非结构化的网格或混合网格划分，入口烟道的网格划分如图 2-2 所示。考虑到计算精度及计算机的运算能力，在设置导流板的烟道

拐角处和喷射格栅所在的喷氨烟道部分，进行网格加密，其余部分的网格密度要小些。由于不同方案时，SCR 脱硝反应器的模型有所不同，主要是导流板数量不同及喷射格栅管路排布的不同，所以划分网格的数量也不尽相同，网格数约为 100 万，节点数约为 40 万。

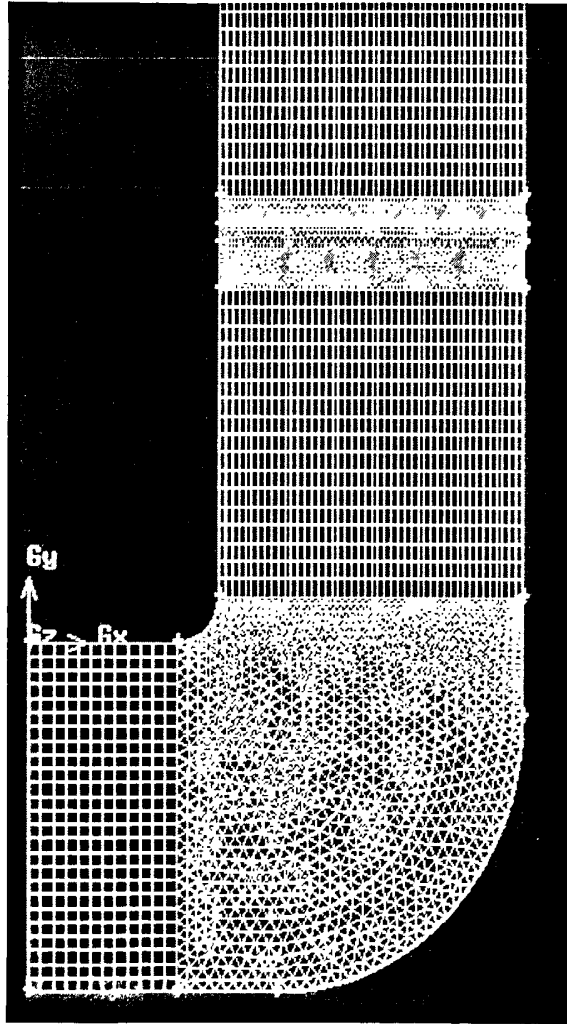


图 2-2 SCR 脱硝反应器网格划分

网格划分完成后，设定边界区域及边界类型。烟气入口为速度入口边界，烟气出口为压力出口边界，其余为烟道壁面，为无滑移、无热传导的壁面条件。最后输出 mesh 文件，并导入到 FLUENT 求解器中。

2.4 CFD 模拟方法

2.4.1 CFD 数值模拟方法的选择

SCR 脱硝过程十分复杂,它涉及到反应器结构的设计,烟气与还原剂在烟道和反应器里面的湍流流动、传热传质、多组分运输以及化学反应等。在实际电厂的 SCR 脱硝系统内,烟气成分及流动情况非常复杂,要将这种流动过程完全模拟出来是非常困难的。本文对 SCR 脱硝反应器内流场的数值模拟对烟气流动作了简化,并且忽略了部分其他因素对流场的影响,数值模拟中做以下假设:烟气流动是定常流动;不考虑烟气中灰分和粉尘等固体颗粒的影响;烟气各组分、氨气及空气均为理想气体;忽略系统中的热扩散;不考虑流场中各成分间的化学反应及影响。

SCR 脱硝反应器内烟气的流动属于湍流流动,湍流流动是一种高度非线性的复杂流动。目前的湍流数值模拟方法可分为直接数值模拟方法和非直接数值模拟方法。非直接数值模拟方法又分为大涡模拟、统计平均法和 Reynolds 时均方程法(也称为 RANS 法)。Reynolds 时均方程法是目前使用最为广泛的湍流数值模拟方法,它的核心是不直接求解瞬时的 Navier-Stokes 方程,而是想办法求解时均化的 Reynolds 方程。

根据对 Reynolds 应力作出的假定或处理方式的不同,目前常用的湍流模型有 Reynolds 应力模型和涡粘模型两大类。其中,涡粘模型中的两方程模型——标准 $k-\varepsilon$ 模型是工程中应用最广泛的。本文对 SCR 脱硝反应器湍流流场的数值模拟计算中,湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型。

2.4.2 流场数值模拟的求解过程

1) 设置求解器及运行环境

FLUENT6.3 提供的求解器有压力基和密度基求解器两种,这两种求解器都可以求解很大的流动速度范围,但是密度基求解器的计算量较大且对计算机内存的要求较高^[56,57]。本文选用 FLUENT 6.3 中的压力基求解器,在时间上是稳

态的，计算时速度按绝对速度处理。设置方法是，单击 Define/Models/Solver 命令，进行相关设置。

运行环境中参考压力为默认的标准大气压，即 101325 Pa，同时计算中不考虑重力的影响。设置方法是，单击 Define/Operating Conditions 命令，进行相关设置。

2) 设置计算模型

计算模型是确定 FLUENT 在计算过程中是否考虑传热，流动是无粘、层流还是湍流，是否多相流，是否包含相变以及是否存在化学组分变化和化学反应等。本文在 SCR 脱硝反应器烟道流场的计算过程中，不考虑传热，不考虑化学组分的变化及化学反应。经计算，反应器烟道内烟气处于湍流状态，因此在模拟烟道流场的时候，选择标准 $k-\varepsilon$ 模型。设置方法是，单击 Define/Models/Viscous Model 命令，进行相关设置。

在烟气与还原剂混合的流场数值模拟中，不考虑两者的化学反应，除了选择标准 $k-\varepsilon$ 模型来模拟湍流流动外，还应选择组分模型。组分模型用于对化学组分的输运和燃烧等化学反应进行模拟。FLUENT 提供的组分模型包括：通用有限速率模型、非预混燃烧模型、预混燃烧模型、部分预混合燃烧模型和组分 PDF 输运模型。本文对 SCR 脱硝反应器内烟气与还原剂的混合选择通用有限速率模型。设置方法是，单击 Define/Models/Species 命令，进行相关设置。

3) 定义材料

烟气是经由省煤器之后进入 SCR 脱硝反应器的，烟气的组成成分及各组分的体积分数见表 2-3。不同工况下入口烟气的流量及温度见表 2-4。

由表中数据计算得，进入 SCR 脱硝反应器的烟气(BMCR 工况下)的密度 $\rho=0.600 \text{ kg/m}^3$ ，速度 $u=14.83 \text{ m/s}$ ，动力粘度为 $\mu=3.588 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ，温度 $T=647 \text{ K}$ 。设置方法是，单击 Define/Materials 命令，进行相关设置。

由喷射格栅喷入烟道的还原剂为氨气与空气的混合气体，其中氨气的体积分数为 5%。氨气、空气等的相关物性参数直接从 FLUENT 自带的材料数据库中提取使用。

表2-3 SCR脱硝系统入口烟气组分

组分	体积分数	数据
氮气(N ₂)	Vol%	74.33
二氧化碳(CO ₂)	Vol%	14.58
水蒸气(H ₂ O)	Vol%	7.68
氧气(O ₂)	Vol%	3.57
氮氧化物(NO _x)	Vol%	0.06
二氧化硫(SO ₂)	Vol%	0.06

表2-4 几种工况下SCR脱硝系统入口烟气情况

项 目	BMCR	THA	75%THA	50%THA
省煤器出口湿烟气量 (设计煤种) (m ³ /h)	4726878	4130054	3241502	2160642
省煤器出口烟气温度 (设计煤种) (°C)	374	359	332	298

4) 设置边界条件

边界条件是在求解区域的边界上所求解的变量或其一阶导数随地点及时间的变化规律。在所研究区域物理边界上,一般速度与温度的边界条件设置方法如下:在固体边界上对速度取无滑移边界条件,即在固体边界上流体的速度等于固体表面的速度。当固体表面静止时,有: $u = v = w = 0$ 。

假定SCR脱硝反应器烟道流场为稳态流场,针对本节所研究的SCR脱硝反应器入口烟道流场问题,边界条件设置如下:

(1) 入口:采用速度入口条件

烟气入口(BMCR工况下)inlet1: $u=14.83$ m/s, $v=0$, $w=0$; $T=647$ K; 入口水力直径为 $D=5.73$ m, 湍流强度 $I=0.02554$ 。

(2) 出口：为了减少网格数量，减小计算工作量，将反应器的尾部出口管段省略，此时出口平面的流动可能存在有回流现象，因此将出口边界定义为压力出口类型

$P_{out}=0$ Pa; $T=645$ K; 出口水力直径为 $D=5.73$ m, 湍流强度 $I=0.02554$ 。

固体壁面边界为无滑移、无热传导的壁面条件。

设置方法是，单击 Define/Boundary Conditions 命令，进行相关设置。

5) 设置求解控制参数

为了更好的控制求解过程，需要在求解器中进行某些设置。控制方程的离散采用一阶迎风格式，欠松弛因子采用默认值。设置方法是，单击 Solve/Controls/Solution 命令，进行相关设置。

在开始对流场进行求解之前，必须向 FLUENT 提供对流场的解的初始猜测值。有两种方法来初始化流场的解：一是用相同的场变量值初始化整个流场中的所有单元，另一个是在选定的单元区域里给选择的流场变量覆盖一个值或函数。本文选择第二种方法，从入口处初始化。设置方法是，单击 Solve/Initialize/Initialize 命令，进行相关设置。

在求解的过程中，通过检查变量的残差、统计值、力、面积分和体积分等，可以动态地监视计算的收敛性和当前的计算结果、显示或打印升力、阻力、力矩系数、表面积分及多个变量的残差。对连续性及速度在 x 、 y 、 z 三个方向的速度分量的残差设为 10^{-3} ， k 和 ε 的残差设为 10^{-5} 。设置方法是，单击 Solve/Monitors/Residual 命令，进行相关设置。

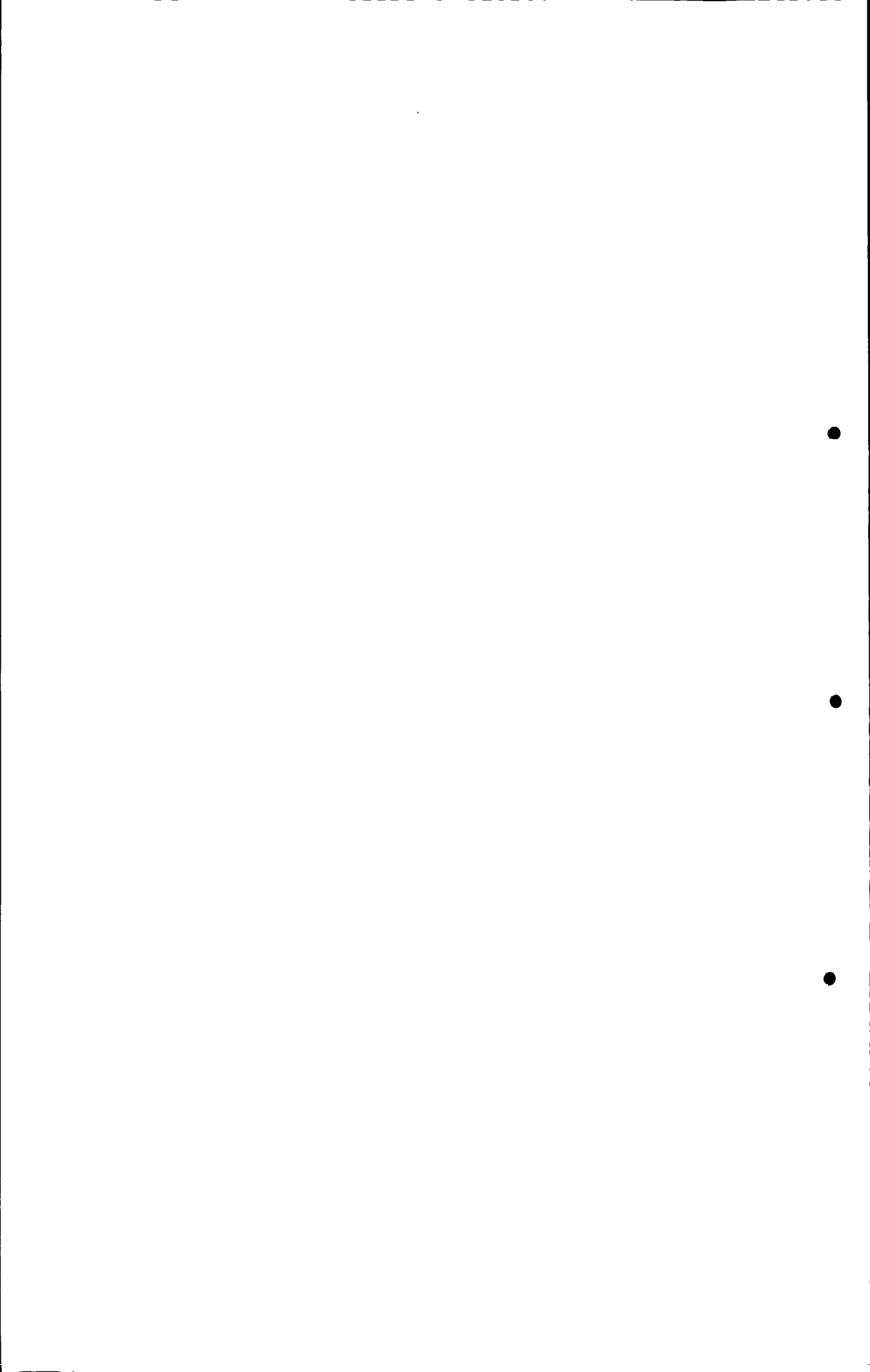
6) 流场迭代计算

前面各项设置完成后，便可以流场的迭代计算。本文是稳态问题的计算，可直接启动计算进程。设置方法是，单击 Solve/Iterate 命令，进行相关设置。

2.5 本章小结

本章对 SCR 脱硝反应器流场的数值分析原理进行了介绍，同时对脱硝反应器网格的划分及流场数值模拟的设置进行了说明。为充分利用计算机资源，网格划分时尽量采用结构化的网格单元，同时对脱硝反应器模型结构相对复杂、流场变化大的位置加大了网格密度，以得到更准确的计算结果。对 SCR 脱硝反

反应器流场的模拟采用标准 $k-\varepsilon$ 模型, 本章对 SCR 脱硝反应器流场模拟计算时的相关设置进行了较详细的说明。



第3章 SCR 脱硝反应器入口烟道流场分析

3.1 引言

导流板对 SCR 脱硝反应器流场的优化作用已经得到了证明,且有研究表明弧度直边导流板是一种比较合理有效的导流板形式^[34,35]。本章采用商用 CFD 软件 FLUENT6.3 对 SCR 脱硝反应器入口烟道流场进行了模拟计算,主要分析了入口烟道中弧度直边的导流板数量和喷射格栅管路对入口烟道流场的影响。将第2章中建模后输出的 mesh 文件导入到 FLUENT 中,求解时的相关设置参照第2章第4节。采用不同方案对比的方法,从流场云图、速度分布及压降三个方面,对流场模拟结果进行了比较。

3.2 导流板数量对入口烟道流场的影响

为便于对结果进行查看和分析,在 SCR 脱硝反应器模型中选取两个代表性的截面,分别为:脱硝反应器正中垂直面截面 1($Z=5.825\text{ m}$),喷射格栅上方的截面 2($Y=5.0\text{ m}$)。SCR 脱硝反应器入口处截面尺寸: $11.65\times 3.8\text{ m}$; 喷氨段烟道截面尺寸: $11.65\times 3.7\text{ m}$ 。本文中 SCR 反应器烟道中加置的导流板均为圆弧直边导流板,其结构形状见图 3-1,经多次调整,导流板的布置位置在下文中详细讲述。截面的位置示意图见图 3-2。



图 3-1 导流板的结构形状图

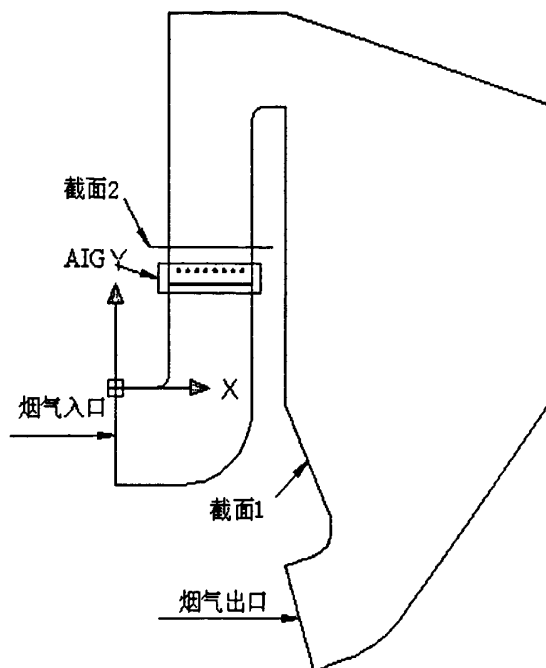


图 3-2 截面位置示意图

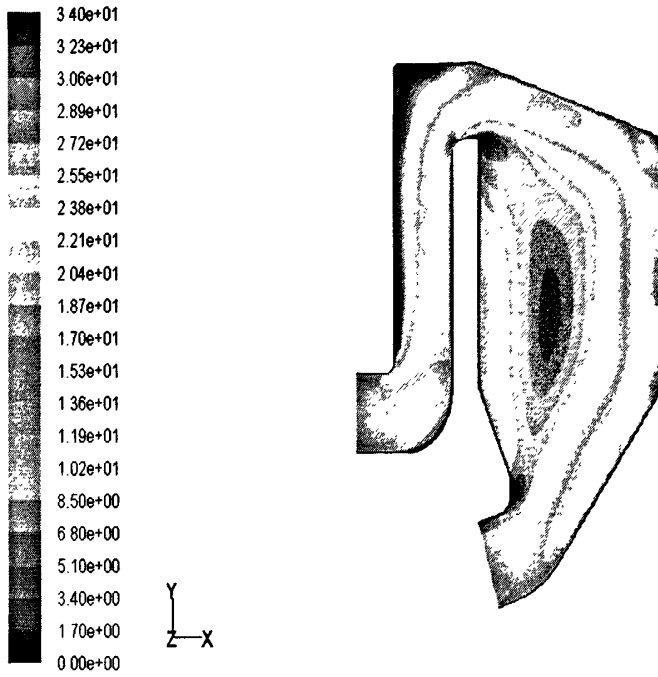
1) 流场分析

(1) 空塔下的流场分布

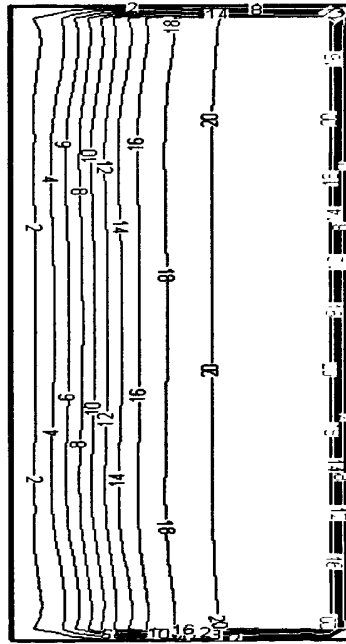
空塔时，SCR 反应器截面 1 处的流场分布截面云图如图 3-3 a) 所示，截面 2 处速度分布图如图 3-3 b) 所示。由图可见，反应器入口烟道内烟气分布极不均匀，上升烟道内烟气速度从右往左逐渐减小，左侧壁面处几乎没有烟气流通，烟气分布不均不利于烟气与还原剂的混合，而两者混合不均将会降低脱硝效率、增加氨泄漏量，因此必须改善脱硝反应器入口烟道内烟气分布。

(2) 方案 1(一块导流板)

分别在 SCR 反应器入口烟道内上拐角靠内侧 2/5 处和下拐角靠左侧 2/5 处加置一块导流板，其中圆弧半径为 1 m，直边段长度为 1 m。图 3-4 为 SCR 反应器的流场及速度分布截面图。与方案 1 相比，入口烟道内烟气分布得到一定改善，但是入口烟道内速度偏差较大，烟道右侧速度较高，烟道左侧速度较低，速度偏差较大对烟气与还原剂的混合是非常不利的。

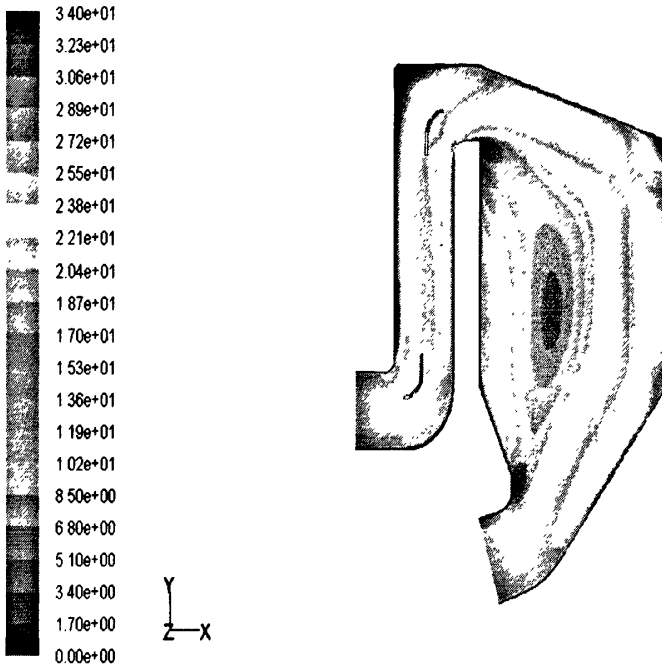


a)

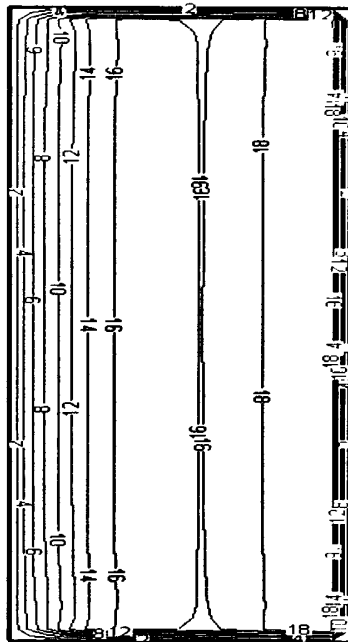


b)

图 3-3 空塔时 SCR 反应器流场及速度分布图



a)



b)

图 3-4 方案 1 时 SCR 反应器流场及速度分布图

(3) 方案 2(两块导流板)

分别在 SCR 反应器入口烟道上下两拐角处加置两块导流板, 图 3-5 为 SCR 反应器的流场及速度分布截面图, 其中第一块板圆弧半径为 0.5 m, 直边段长度为 1 m, 布置在距左侧烟道壁面 1/5 处, 第二块板圆弧半径为 2 m, 直边段长度为 0.7 m, 布置在距右侧烟道壁面 1/3 处。由图可见, 入口烟道内烟气分布和速度分布得到显著改善, 但烟道中间处烟气速度值相对较高, 烟气速度分布还不够均匀, 存在较大偏差。

(4) 方案 3(三块导流板)

分别在 SCR 反应器入口烟道上下两拐角处等间距加置三块导流板, 第一块板圆弧半径为 0.5 m, 直边段长度为 1 m, 第二块板圆弧半径为 1 m, 直边段长度为 1 m, 第三块板圆弧半径为 2 m, 直边段长度为 0.7 m。图 3-6 为 SCR 反应器的流场及速度分布截面图。由图可见, 入口烟道内流场的分布较均匀, 仅烟道壁面处烟气速度低, 基本满足了烟气分布要求, 对速度偏差有待进一步分析。

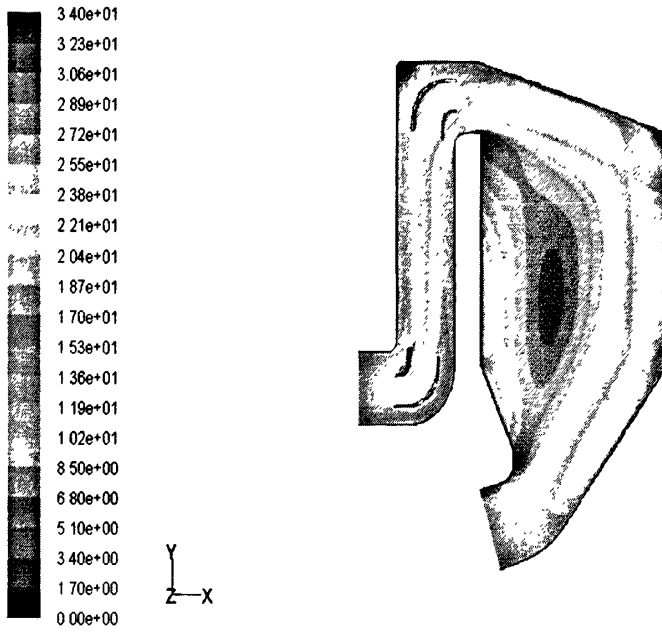
(5) 方案 4(四块导流板)

分别在 SCR 反应器入口烟道上下两拐角处等间距加置四块导流板, 第一块板圆弧半径为 0.5 m, 直边段长度为 1 m, 第二块板圆弧半径为 1 m, 直边段长度为 1 m, 第三块板圆弧半径为 1.5 m, 直边段长度为 0.7 m, 第四块板圆弧半径为 2 m, 直边段长度为 0.7 m。图 3-7 为 SCR 反应器的流场及速度分布截面图。与方案 3 相比, 导流板数量增加后, 从流场分布图来看, 对烟气分布没有多大的改善; 从速度分布图来看, 截面处烟气速度分布也无多大改善, 对速度分布偏差的影响需要进一步的数据分析。

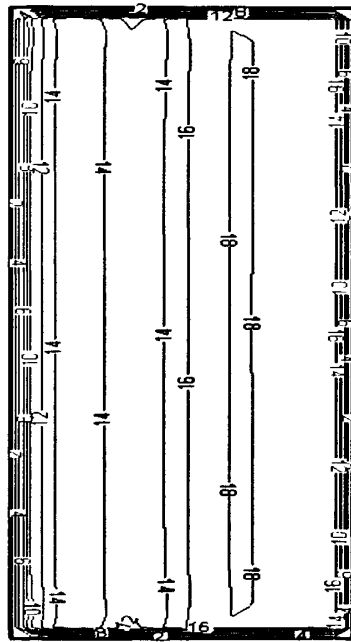
(6) 方案 5(五块导流板)

分别在 SCR 反应器入口烟道上下两拐角处等间距加置五块导流板, 第一块板圆弧半径为 0.5 m, 直边段长度为 1 m, 第二块板圆弧半径为 1 m, 直边段长度为 1 m, 第三块板圆弧半径为 1.5 m, 直边段长度为 0.7 m, 第四块板圆弧半径为 2 m, 直边段长度为 0.7 m, 第五块板圆弧半径为 2.5 m, 直边段长度为 0.7 m。图 3-8 为 SCR 反应器的流场及速度分布截面图。与方案 3, 4 相比, 导流板数量增加后, 从流场分布图来看, 对烟气分布的改善作用微弱; 从速度分布图来看, 截面 2 处烟气速度分布较均匀, 仅烟道壁面处烟气速度较低, 这是受烟道壁面的影响, 烟气速度分布偏差仍需进一步数据分析。整个烟道烟气分布较

均匀且烟气速度适宜，有利于烟气与还原剂的混合。

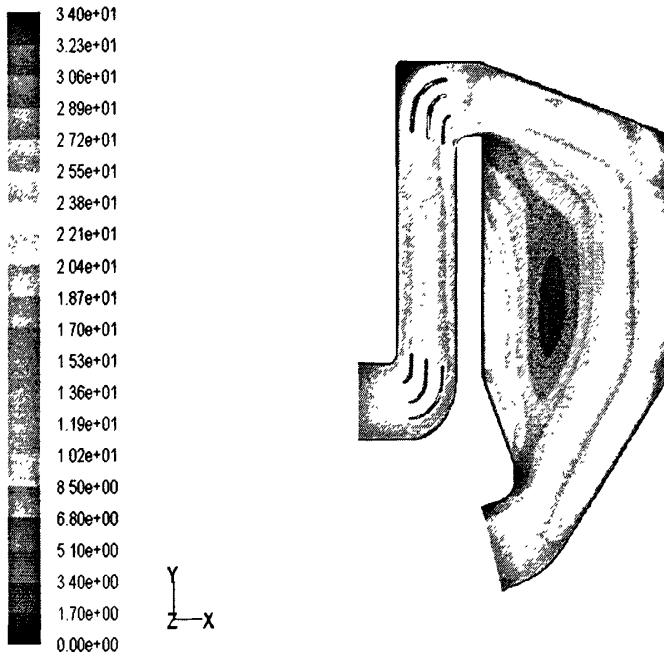


a)

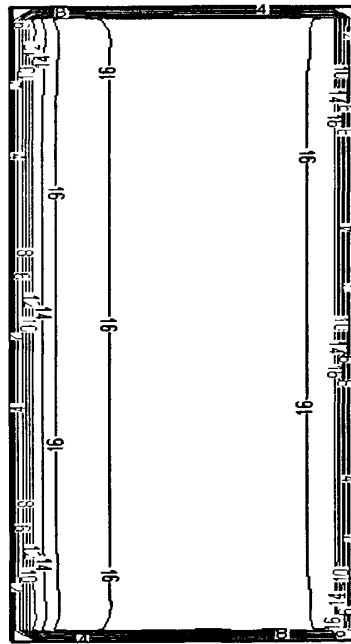


b)

图 3-5 方案 2 时 SCR 反应器流场及速度分布图

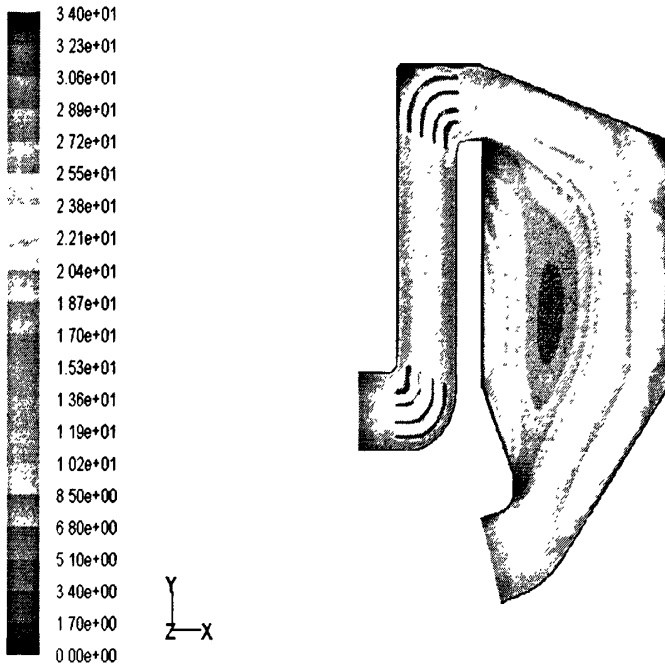


a)

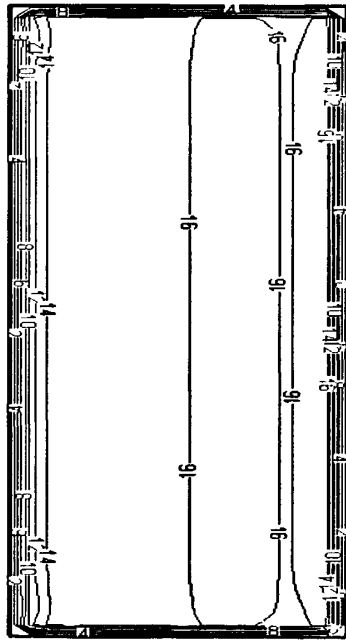


b)

图 3-6 方案 3 时 SCR 反应器流场及速度分布图

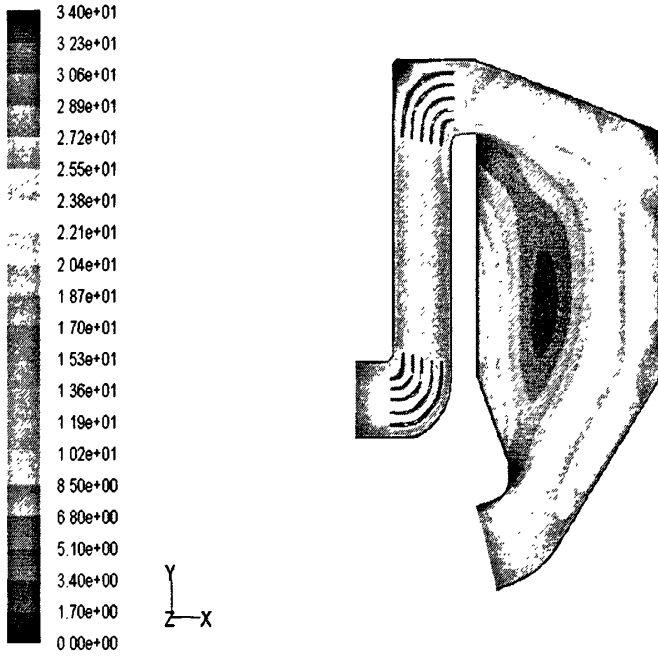


a)

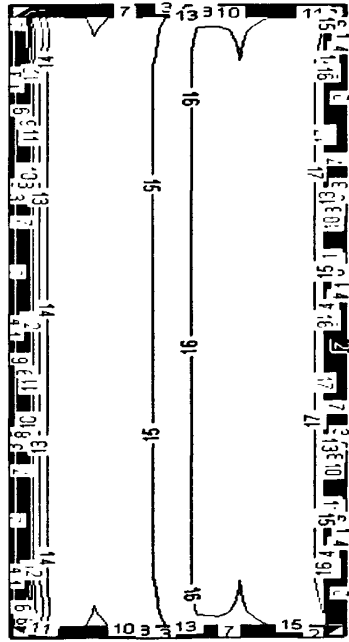


b)

图 3-7 方案 4 时 SCR 反应器流场及速度分布图



a)



b)

图 3-8 方案 5 时 SCR 反应器流场及速度分布图

2) 速度分布分析

对速度分布的不均匀性分析, 采用不均匀系数, 定义为:

$$c_v = \frac{\sigma_v}{v_0} \times 100\% \quad (3-1)$$

其中, $\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum (v_i - v_0)^2}{n-1}}$, v_i 为某取值点处的速度, v_0 为平均速度。速度取值点

位于截面 2 的 Z 轴的中线处, 沿着 X 轴的方向等间距提取 50 个点的速度值,

计算得各方案下的速度不均匀系数依次为:

$$\text{空塔时: } c_v = \frac{\sigma_v}{v_0} \times 100\% = \frac{6.64906}{15.46356} \times 100\% = 43.00\%$$

$$\text{方案 1: } c_v = \frac{\sigma_v}{v_0} \times 100\% = \frac{3.83102}{15.34264} \times 100\% = 24.97\%$$

$$\text{方案 2: } c_v = \frac{\sigma_v}{v_0} \times 100\% = \frac{2.57381}{15.23453} \times 100\% = 16.89\%$$

$$\text{方案 3: } c_v = \frac{\sigma_v}{v_0} \times 100\% = \frac{1.61589}{15.17816} \times 100\% = 10.65\%$$

$$\text{方案 4: } c_v = \frac{\sigma_v}{v_0} \times 100\% = \frac{1.8328}{15.19929} \times 100\% = 12.06\%$$

$$\text{方案 5: } c_v = \frac{\sigma_v}{v_0} \times 100\% = \frac{1.76756}{15.1252} \times 100\% = 11.69\%$$

由计算所得速度不均匀系数可以看出, 方案 1、2 的系数较大, 方案 3、4、5 的不均匀系数都在 15% 以内, 满足烟气速度分布的基本要求。将各方案下采集的速度值分别绘制成速度分布曲线, 见图 3-9。由图可见, 当 SCR 脱硝反应器入口烟道内导流板的数量由一块增加到三块的过程中, 烟道内的速度分布逐渐趋于均匀, 而导流板数量由三块到五块过程中, 对烟道内速度分布的改善作用很小。说明, 随着 SCR 脱硝反应器烟道内导流板数量的增加, 烟气的速度分布逐渐趋于均匀, 但当导流板数量到一定值后, 再持续增加导流板的数量, 对烟气速度的分布改善作用就很小。对于本节所研究 SCR 脱硝反应器而言, 导流板数量在三块以上时, 烟道内烟气的速度分布较均匀, 达到了设计要求。

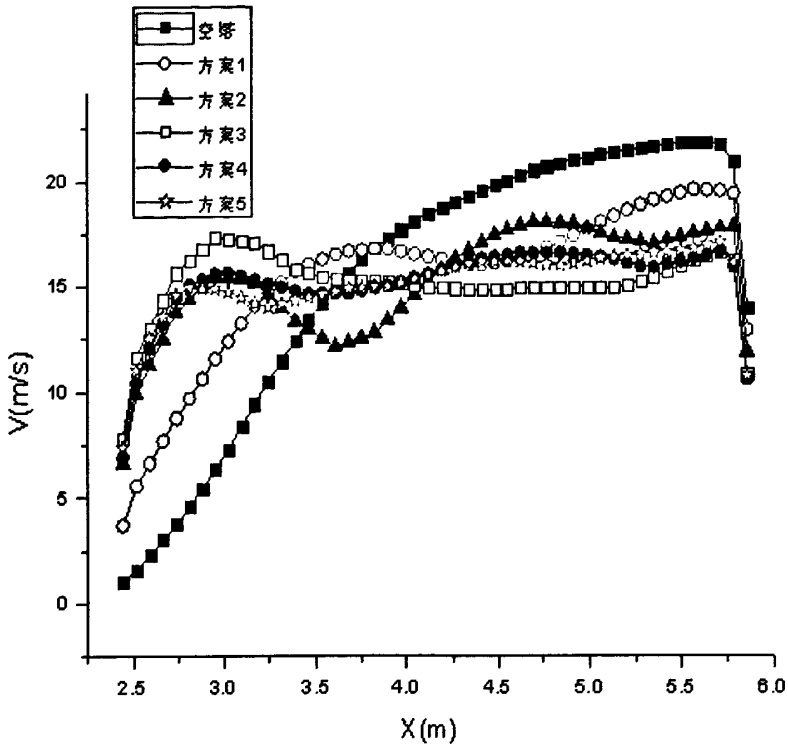


图 3-9 不同方案时 SCR 反应器截面 2 处的速度分布曲线

3) 压降分析

由计算结果取值得, 各方案下 SCR 反应器入口与出口间的平均压降依次分别为: 57.4 Pa, 51.4 Pa, 94.4 Pa, 104.7 Pa, 114.8 Pa, 130.2 Pa。由结果可得, 刚加置一块导流板时, 优化了烟道流场, 对减少系统压降起到了一定的作用, 但随着 SCR 脱硝反应器烟道内导流板数量的增加, 整个 SCR 脱硝系统所造成的压降也在增大, 因此应合理的选择导流板的数量, 使得反应器流场均匀且系统压降较小。

通过前面导流板的数量对烟道流场、速度场及压降的分析, 说明导流板对于改善烟道流场和速度分布有重要作用, 同时, 随着导流板数量的增加, 烟道流场和速度分布变得更加均匀, 但导流板分布到一定程度后, 导流板数目的增加对流场和速度场分布的改善作用变的很微弱, 而系统的压降却随着导流板数量的增加而不断增大, 这就造成了两个矛盾的方面。为解决这个矛盾, 我们应该合理的选择并确定导流板的形式和数量, 一方面使得烟道的流场和速度分布均匀, 另一方面尽量减小给系统造成的压降和负荷。通过数值模拟仿真的方法, 对 SCR 脱硝反应器流场和速度场进行分析, 从而确定出导流板的形状和数量,

是一种非常经济有效的途径和方法，也是目前国内外广泛应用的一种优化方法。

3.3 喷射管道对入口烟道流场的影响

分析喷射格栅对入口烟道流场的影响时，建立 SCR 脱硝反应器入口烟道部分的几何模型。在 SCR 脱硝反应器入口烟道中选取两个代表性的截面，用来查看和分析流场和速度分布，分别是：反应器正中的垂直面截面 1 ($Z=5.825\text{ m}$)，喷射格栅上方的截面 2 ($Y=8\text{ m}$)，如下图 3-10 所示。入口烟道的尺寸如第 2 章中讲述，喷射格栅 (AIG) 布置在距烟气入口上壁面 4.35 m 处，一般由两层喷管组成，本文选择的喷管管径为 140 mm，分为上下两层，上层为 8 根纵管，下层为 18 根横管。

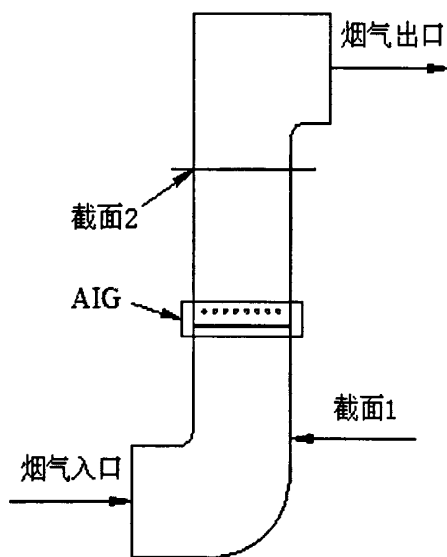


图 3-10 SCR 脱硝反应器入口烟道截面示意图

1) 流场分析

(1) 方案 1 空塔下的流场分布

空塔时，入口烟道截面 1 处的流场分布截面云图如图 3-11 a) 所示，截面 2 处速度分布图如图 3-11 b) 所示。由图可见，反应器入口烟道内烟气分布极不均匀，左侧壁面处几乎没有烟气流通，截面 2 处烟气速度从右往左逐渐减小，烟气速度分布不均匀对烟气与氨气的混合很不利，会降低脱硝效率。

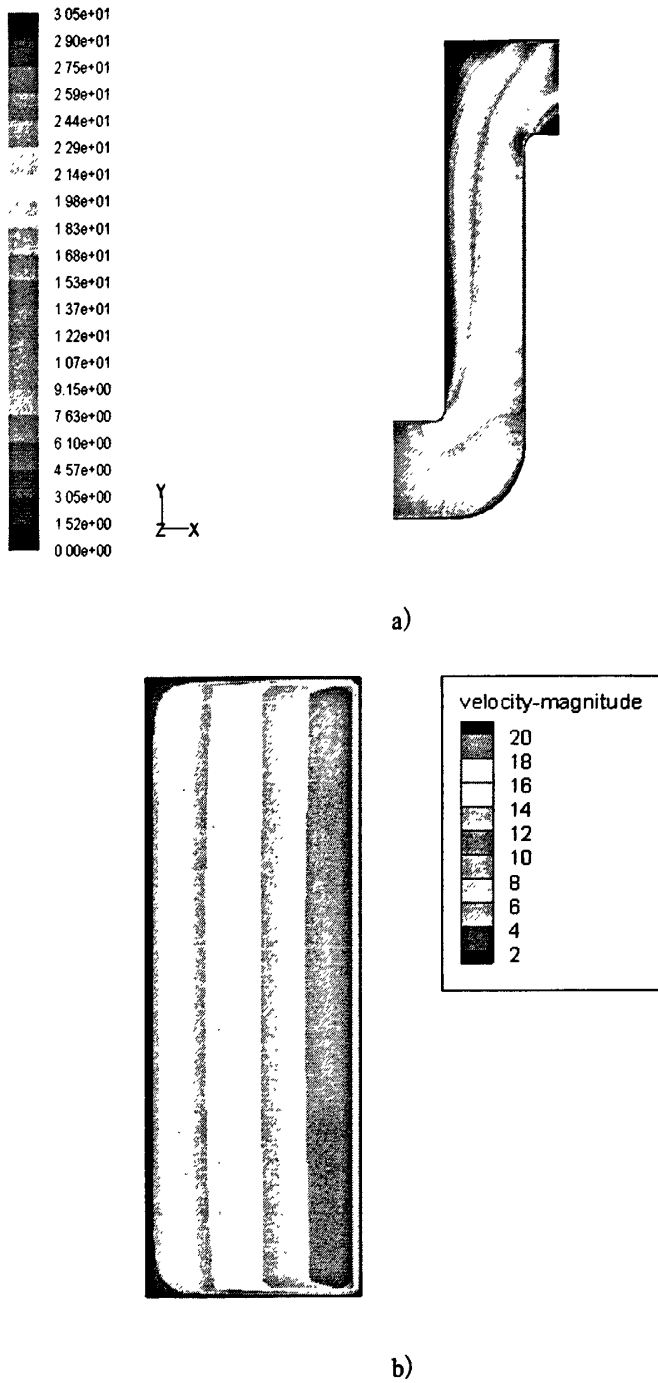


图 3-11 截面处流场及速度分布

(2) 方案 2 单层纵管时的流场分布

在入口烟道内加置单层纵向排列的喷氨管道，图 3-12 为反应器的流场及速度分布截面图。与方案 1 相比，加置单层喷氨管道后，入口烟道内流场得到改善，左侧壁面处的烟气速度得到提高，但烟道左右壁面处速度偏差仍较大。

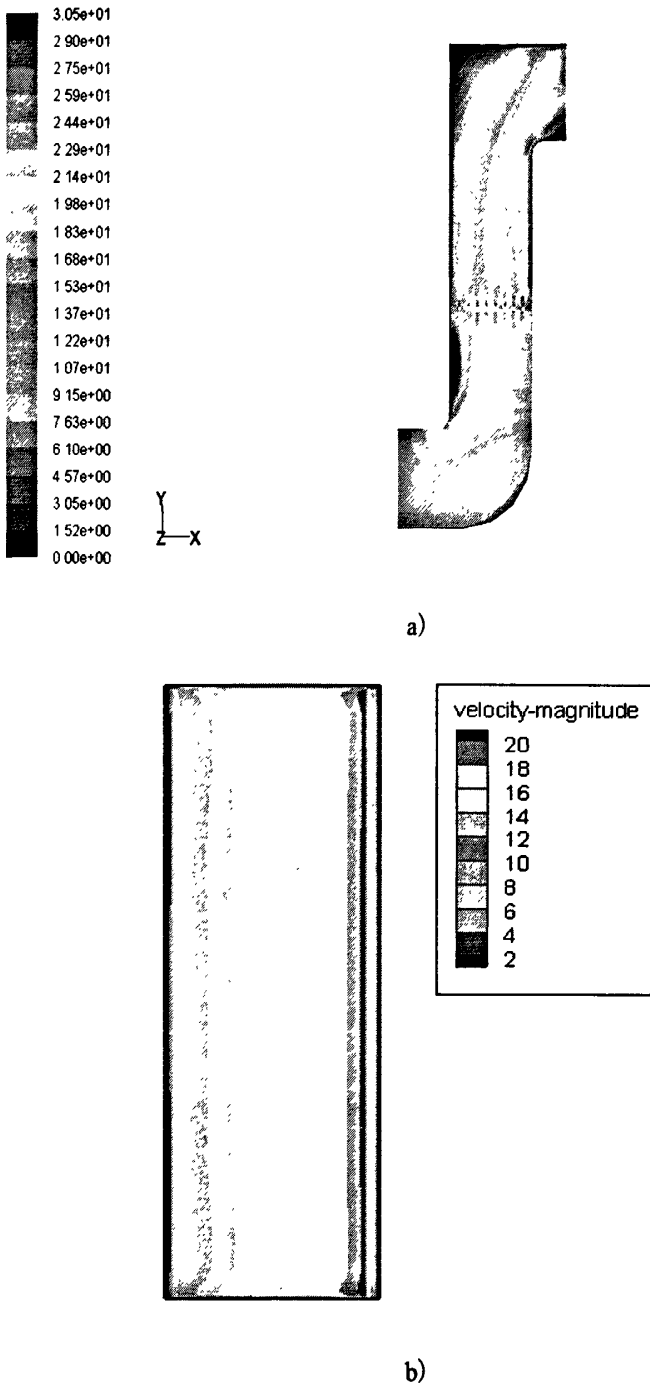


图 3-12 截面处流场及速度分布

(3) 方案 3 单层横管时的流场分布

在入口烟道内加置单层横向排列的喷氨管道，图 3-13 为反应器的流场及速度分布截面图。与方案 1 相比，入口烟道内流场得到改善，左侧壁面处的烟气速度得到提高，同方案 2 相似，速度偏差较大。

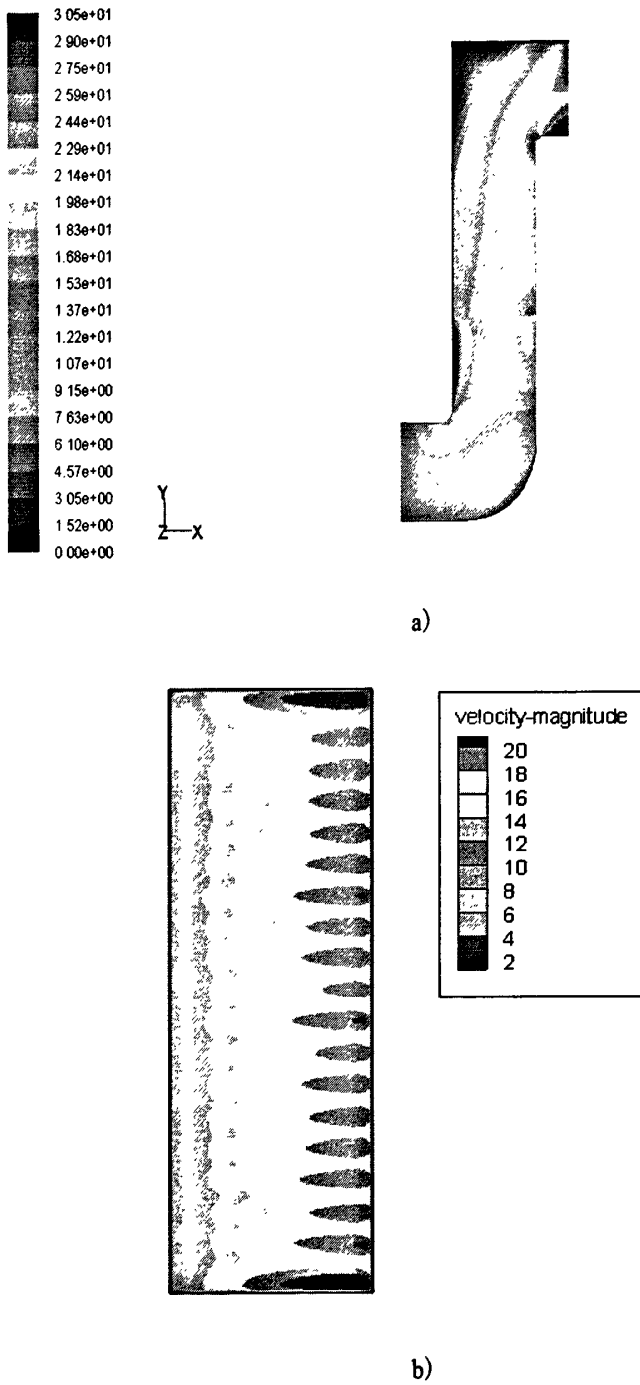


图 3-13 截面处流场及速度分布

(4) 方案 4 加置两层喷管时的流场分布

在入口烟道加置纵横排列两层的喷氨管道，图 3-14 为反应器的流场及速度分布截面图。加置两层喷氨管道时要比单层横向或纵向管道时的流场分布更均匀，但是烟道右壁面处烟气速度较高，速度偏差需进一步计算。

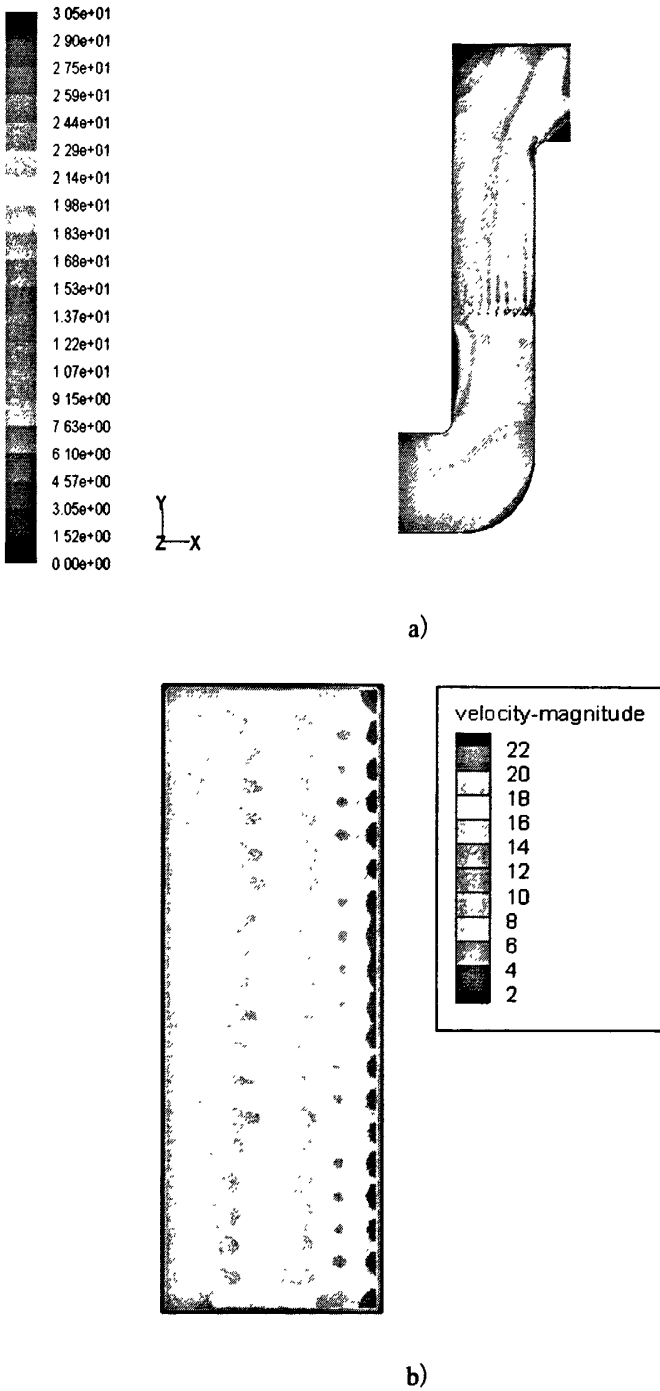


图 3-14 截面处流场及速度分布

(5) 方案 5 加置导流板时的流场分布

分别在反应器入口烟道上下两拐角处等间距加置三块圆弧直边形状的导流板，尺寸同上一节中方案 3，图 3-15 为反应器的流场及速度分布截面图。与前几个方案相比，加置导流板后，对烟气的流动起到很好的导流作用，烟道内烟

气的分布较均匀，极大的改善了速度分布。

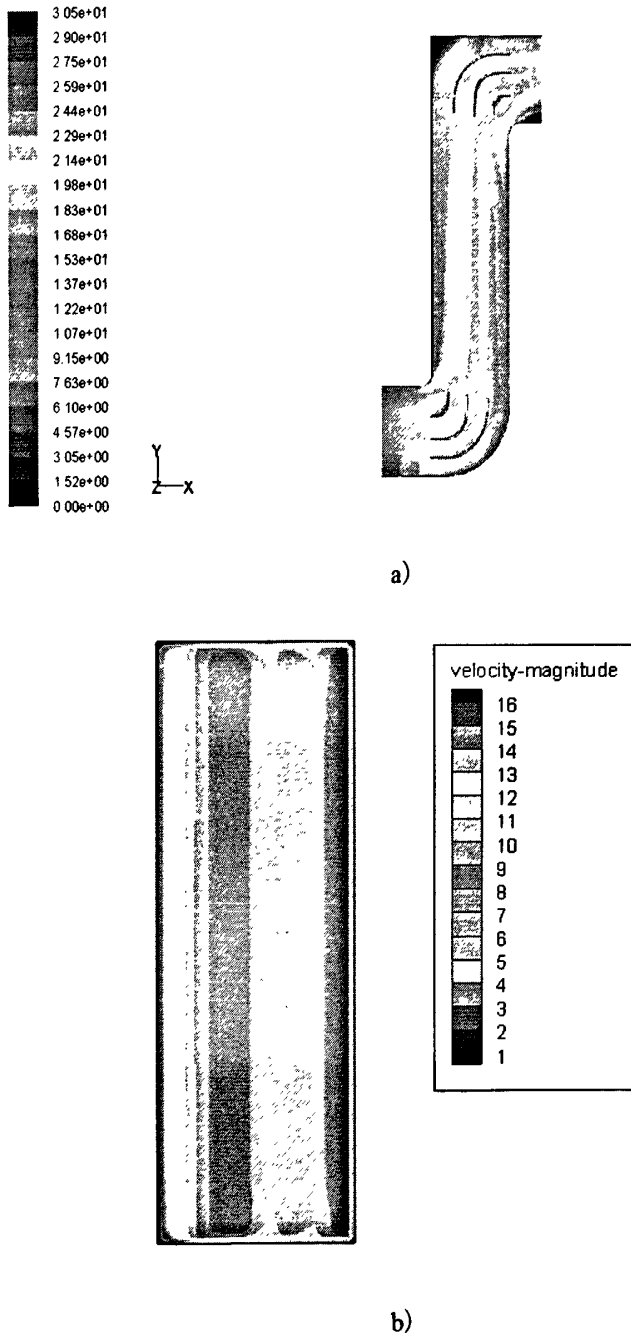


图 3-15 截面处流场及速度分布

(6) 方案 6 导流板和两层喷管时的流场分布

在反应器入口烟道上下两拐角处等间距加置三块块导流板，同时加置两层纵横排布的喷氨管道，图 3-16 为反应器的流场及速度截面分布图。该方案下的烟气分布较均匀，烟气速度分布均匀，仅在烟道壁面处较高，对速度偏差需进

一步计算分析。

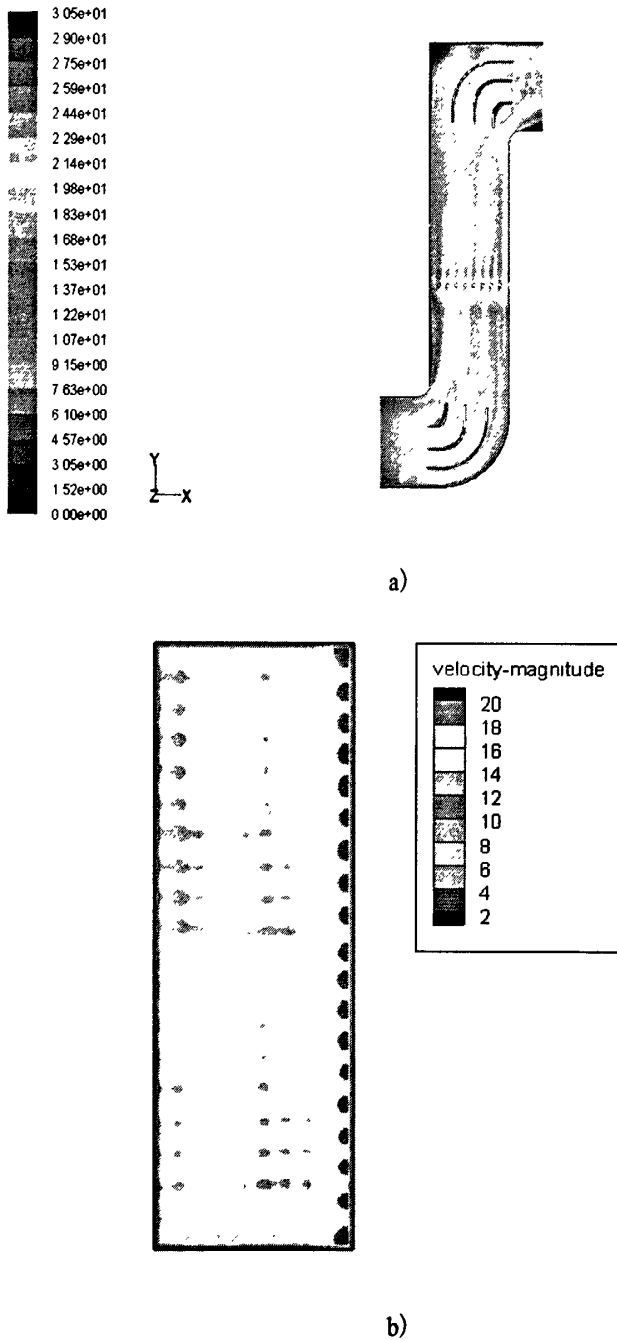


图 3-16 截面处流场及速度分布

2) 速度分布分析

对速度的分布分析仍然采用速度不均匀性系数 σ_v ，速度取值点位于截面 2 的 Z 轴的中线处，沿着 X 轴的方向均匀提取 50 个点的速度值，计算得各方案下的速度不均匀系数依次为：

$$\text{方案 1: } c_v = \frac{\sigma_v}{v_0} \times 100\% = \frac{6.20333}{15.26008} \times 100\% = 39.47\%$$

$$\text{方案 2: } c_v = \frac{\sigma_v}{v_0} \times 100\% = \frac{3.48271}{14.46146} \times 100\% = 24.08\%$$

$$\text{方案 3: } c_v = \frac{\sigma_v}{v_0} \times 100\% = \frac{3.24265}{15.37738} \times 100\% = 21.09\%$$

$$\text{方案 4: } c_v = \frac{\sigma_v}{v_0} \times 100\% = \frac{2.36789}{15.16928} \times 100\% = 15.61\%$$

$$\text{方案 5: } c_v = \frac{\sigma_v}{v_0} \times 100\% = \frac{1.75673}{15.46987} \times 100\% = 11.35\%$$

$$\text{方案 6: } c_v = \frac{\sigma_v}{v_0} \times 100\% = \frac{1.08748}{15.50821} \times 100\% = 7.01\%$$

从计算所得速度不均匀系数来看,与空塔时相比,在加置单层的纵向或横向的喷管后,对入口烟道的烟气分布起到了一定的改善作用,但是烟气速度不均匀偏差较大;两层喷管对流场的改善作用更好些,但是烟道右侧烟气速度仍较高,速度不均匀系数仍比较大,超过 15%,这说明喷氨管道可以对流场起到一定的优化作用,但对烟气速度分布的改善作用有限。烟道加置导流板后,导流板对烟气流动起到很好的导流作用,使得烟气速度在烟道内分布相对均匀,速度不均匀系数小于 15%,说明导流板可以明显的改善烟道内速度分布,使得烟气分布均匀,导流板和喷氨管道的结合可以使烟道内烟气的速度分布更合理。

将各方案下采集的速度值分别绘制成速度分布曲线,得图 3-17。通过方案 2、3、4 与方案 1 的曲线比较,说明喷氨管道可以对烟道流场起到一定的优化作用,但是不能改变烟气速度在烟道内左低右高的状况。在加置导流板(方案 5)后,对烟气起到很好的导流作用,改变了烟气速度在烟道内左低右高的状况。导流板和喷管都加置(方案 6)后,烟道内的烟气分布较均匀。上述分析说明,喷氨管道可以对烟道内烟气分布起到一定的优化作用,但要改善烟气速度在烟道内的分布,必须要加置导流板。

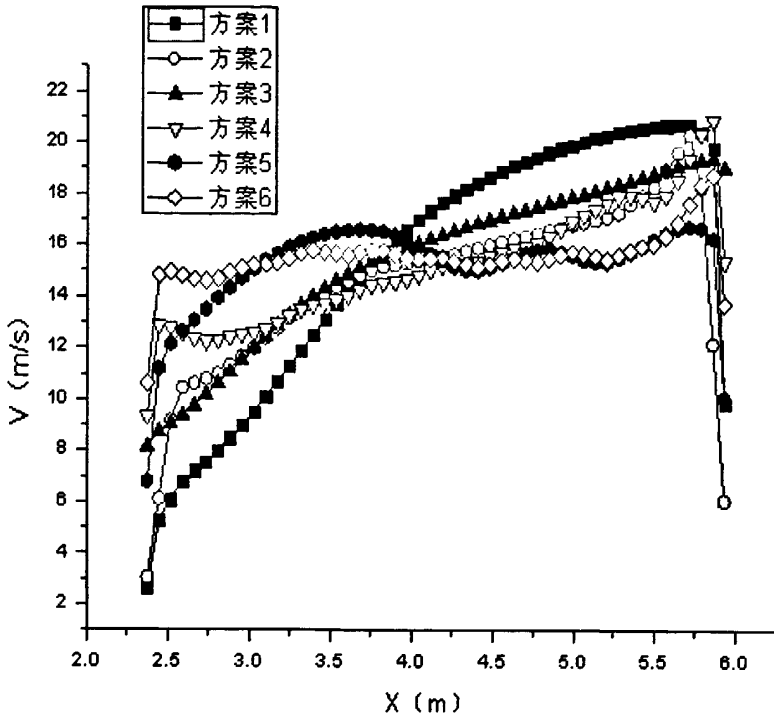


图 3-17 不同方案时 SCR 反应器入口烟道截面 2 处的速度分布曲线

3) 压降分析

经计算得各方案下入口与出口间的压力损失依次为：117.46 Pa, 177.77 Pa, 147.13 Pa, 171.02 Pa, 77.04 Pa, 147.57 Pa。由这些数据可知，喷射格栅中的喷管使得 SCR 反应器入口烟道的压降增大，而导流板的加入可以适当降低入口烟道造成的压降。SCR 脱硝系统中喷射格栅是必不可少的，它会给系统造成一定的压力损失，因此在设计布置喷射格栅的时候，我们应该充分发挥喷射格栅对流场的优化作用，同时尽量减小喷射格栅给系统造成的压降。

3.4 本章小结

本章通过对 SCR 反应器入口烟道流场的数值模拟，分析了导流板的数量和喷射格栅的加置对入口烟道流场的影响，根据模拟结果的分析，总结如下：

1) 通过对 SCR 反应器流场的数值模拟，结果清晰地反映反应器内部的流场情况，说明 FLUENT 软件对模拟研究 SCR 反应器内烟气流场变化有较强的可操作性。

2) 通过分析导流板数量对 SCR 反应器入口烟道流场的影响,表明导流板可以改善烟道内烟气分布,但当导流板数目较少时,对烟气分布的改善作用有限;随着导流板数目的增加,烟气的分布变得越均匀,同时给反应器造成的压降也在增加。结果还发现,当导流板分布到一定程度后,再持续增加导流板的数量,对烟道流场的改善作用微弱,而压降增大。因此,在设计和选用 SCR 反应器导流装置的时候,应合理控制导流板的数量。通过数值模拟仿真确定最佳导流板的形式和数量,是一种很好的途径和方法。

3) 通过分析喷氨管道对 SCR 反应器入口烟道流场的影响,表明喷氨管道可以对烟道流场起到一定的改善作用,且双层管道比单层管道的效果更好,但喷氨管道的作用有限,必须借助导流板才能使烟道内速度分布偏差减小到设计要求以内。



第4章 SCR 脱硝系统混合的数值模拟

4.1 引言

SCR 脱硝系统设计的关键之一就是使反应器中烟气与喷入的还原剂混合均匀。其中,还原剂(本文还原剂采用氨气)首先与空气混合,再由喷射格栅的喷嘴喷入到反应器烟道内,通过导流和均流装置使还原剂与烟气达到最佳混合。如果烟气流场分布不均匀或者喷射格栅选择设置不合理都会造成 NO_x 与 NH_3 混合不均匀,从而造成较高的氨逃逸率,降低催化剂利用率,最终影响脱硝效果及脱硝系统的经济运行。因此,在前章反应器烟道流场分布研究的基础上,本章对 SCR 反应器入口烟道内烟气与还原剂的混合进行了数值模拟研究。

喷射格栅的设计,主要考虑两个方面:一方面喷嘴所喷出的氨气要能够在设计的混合长度内与该区域内的烟气均匀混合;另外方面要使得喷入的氨气的量与烟气中 NO_x 的量相匹配,即氨氮摩尔比的分布尽量均匀。喷射格栅主要分为三大类型^[58]:

第一类:配合涡流式静态混合器使用的喷射技术,格栅的喷嘴数量与静态混合器的片数一致,数量较少,一般只有几个,因此喷嘴直径较大;

第二类:线性控制式喷射格栅,沿着烟道的两个相互垂直的方向或者其中一个方向分别配置若干喷管,每根喷管上又设置若干喷嘴,每根喷管的流量可以单独调节,以匹配烟气中 NO_x 的分布;

第三类:分区控制式喷射格栅,一般把烟道截面分成 20~30 个大小相同的区域,每个区域有若干个喷射孔,每个分区的流量可单独调节,以匹配烟气中 NO_x 的分布。

在以上三种喷射格栅类型中,第一类在氨喷入的初始阶段,氨气和烟气的混合最差,氨氮摩尔比的分布也最差,因此,这类喷射格栅需配合静态混合器使用;第二、三类在氨喷入的初始阶段,氨氮摩尔比分布较均匀,第三类要更好一些,因此,这两类喷射格栅可单独使用,无需混合器相配合。

本文喷氨装置选用线性控制式喷射格栅,氨气与空气混合后由喷射格栅喷入 SCR 反应器烟道。根据脱硝效率设计值,系统设计要求喷入的 NH_3 与烟气中

NO_x 的摩尔比为 1.05。根据烟道入口 NO_x 浓度(见表 2-3)、烟气流量(见表 2-4)以及氨氮摩尔比可计算出氨气流量,从而进一步计算得出喷嘴的喷射速度。本章采用 FLUENT6.3 软件对 SCR 脱硝反应器入口烟道烟气与还原剂的混合进行了模拟计算,并对采用不同配置的单层和双层喷管的喷射格栅时,烟气与还原剂混合情况进行了对比分析。

4.2 数值模拟求解

本章所采用的 SCR 脱硝反应器模型除喷射格栅加装喷嘴外,其余尺寸与第 2 章中模型相同。FLUENT 求解时的相关设置,边界条件设置有所不同,求解器中引入了输运模型,其他与第 3 章设置一致,可参照第 2 章第 4 节,本节对这两个不同的地方进行说明。

1) SCR 脱硝反应器入口烟道模型

烟气与还原剂的混合是在 SCR 反应器入口烟道系统内,因此计算模型仅选取 SCR 反应器入口烟道系统,导流板设置在入口烟道拐角处,根据上一章计算结果比较,决定采用三块圆弧直板导流板,同时增加喷射格栅系统的几何模型。在考虑对流场影响不大的情况下,将喷射格栅中喷嘴建模简化为喷口。

喷射格栅由圆形喷管组成,喷管直径为 140 mm,在每根喷管上加装直径为 60 mm 的喷嘴,喷射方向与烟气流向一致。本模型采用的是 1:1 原尺寸模型,尺寸较大,网格划分较多,同时考虑到计算机运算能力,计算模型仅截取 Z 方向(原模型长 11650 mm)一部分 3700 mm 来进行计算,喷嘴的排布与原模型基本一致,所建模型如图 4-1。

网格划分时对反应器进行了分区,直线段烟道结构规则,采用结构性六面体网格划分,在结构复杂、流场变化大的烟道部分(如烟道拐角处和喷射格栅区域)则采用非结构化的六面体网格或混合网格划分。考虑到计算精度和计算机的运算能力,在设置导流板的烟道拐角处和喷射格栅所在的喷氨烟道部分,特别是喷射格栅喷嘴部分,喷嘴的尺寸相对较小,只能采用小尺寸进行网格划分,其余部分的网格密度要小些,网格总数在 140 万左右,节点数约为 50 万。喷射格栅部分的网格划分如图 4-2 所示。

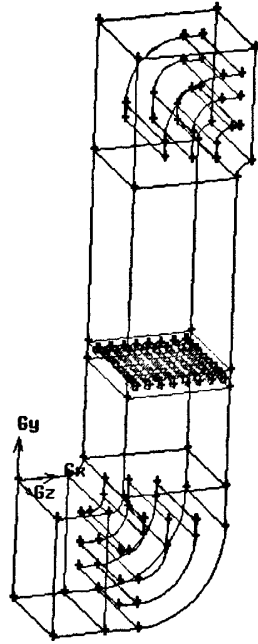


图 4-1 SCR 反应器入口烟道

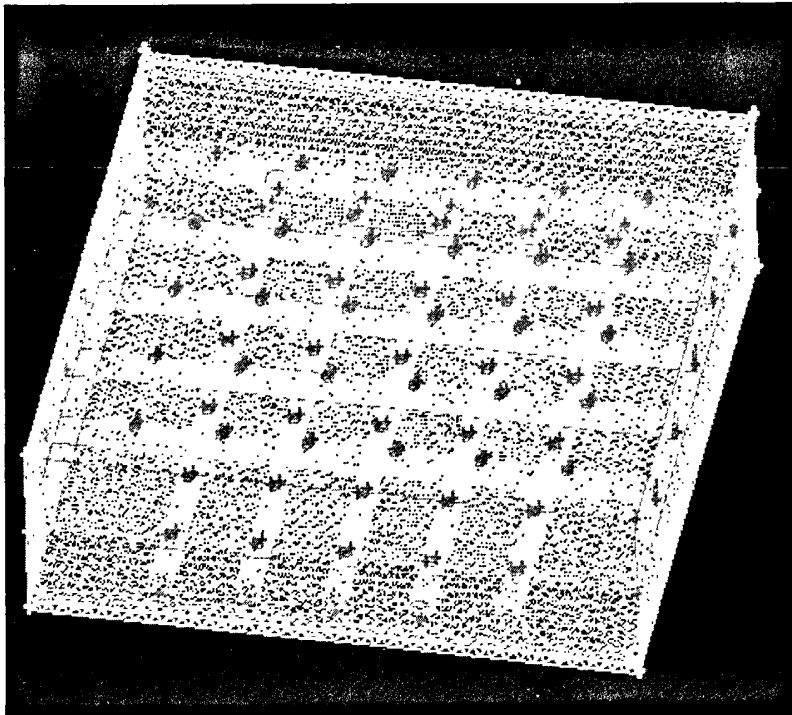


图 4-2 喷射格栅处网格划分

2) 边界条件设置

烟气与氨气混合的数值模拟有两个速度入口边界，一个是烟气入口，另一

个是喷射的还原剂入口，出口仅有一个，边界条件设置为：

(1) 入口：采用速度入口条件

烟气入口(BMCR 工况下) inlet1: $u=14.83$ m/s, $v=0$, $w=0$; $T=647$ K; 水力直径为 $D=3.72$ m, 湍流强度 $I=0.02696$ 。

喷氨入口(BMCR 工况下) inlet2: $u=0$, $v=13.18$ m/s, $w=0$ (根据各方案具体情况进行设置); $T=293$ K; 水力直径 $D=0.06$ m, 湍流强度 $I=0.04196$ 。

(2) 出口：采用压力出口条件

$P_{out}=0$ Pa; $T=645$ K; 出口水力直径为 $D=3.7$ m, 湍流强度 $I=0.02632$ 。

固体壁面边界为无滑移、无热传导的壁面条件。

4.3 模拟结果分析

(1) 方案 1 单层喷管且各喷嘴速度一致

本方案采用单层喷管的喷射格栅，共 8 根喷管，每根喷管设置喷嘴 8 个。各个喷嘴的喷氨速度一样，经计算得 $v=14.53$ m/s。经计算得，出口截面处氨气的摩尔浓度分布见图 4-3。从图中看出，出口处氨气的摩尔分布并不均匀，截面中间位置处氨气浓度较高，四周壁面处浓度较低，而截面下壁面处氨气浓度更低。氨气分布不均匀必将导致烟气与还原剂混合不均匀，最终影响到 SCR 脱硝系统的脱硝效率。因此，必须对喷射格栅进行调节，改善氨气的分布，使出口截面上氨气分布较均匀。

(2) 方案 2 单层喷管且喷嘴速度不同

由方案 1 知，当各喷嘴喷氨速度相同时，氨浓度分布不均匀，因此对喷嘴进行简单分区，并给分区设置不同的喷氨速度。如图 4-4 所示，将所有喷嘴划分为两大区域，靠近壁面的喷嘴为 I 区，中间的喷嘴为 II 区。根据方案 1 的结果，壁面处氨气浓度较低而烟道中间氨气浓度较高，因此提高 I 区的喷氨速度，降低 II 区的喷氨速度。经过几次模拟求解并对喷氨速度进行调整后，最后设置 I 区的喷氨速度为 15.8 m/s，II 区的喷氨速度为 13.5 m/s。

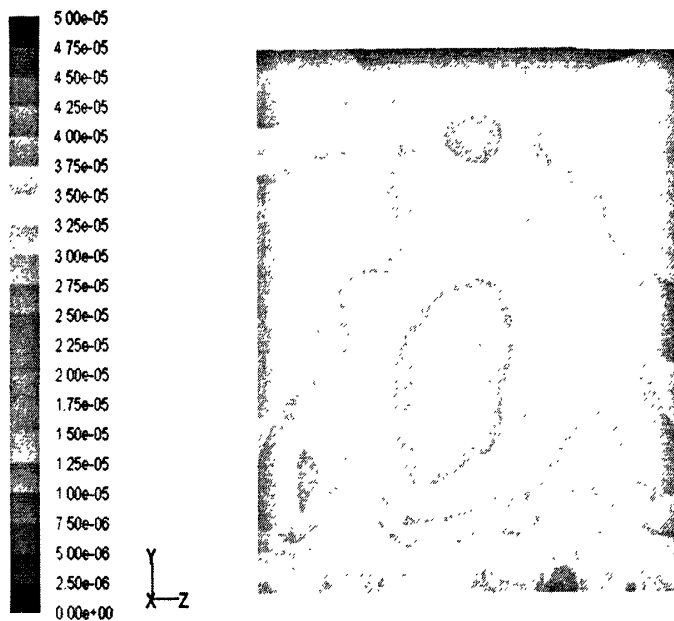


图 4-3 氨气摩尔浓度分布图

调整后，计算得氨气的摩尔浓度分布见图 4-5。从图中可以看出，经过喷嘴喷氨速度分区后，出口截面的氨气分布比较均匀，氨气分布得到了很大改善，壁面周围的氨气浓度得到提高，与中间区域的浓度差减小，分布梯度差得到较大改善。个别较小区域氨浓度稍大一些，但这些区域占截面面积的比例很小。

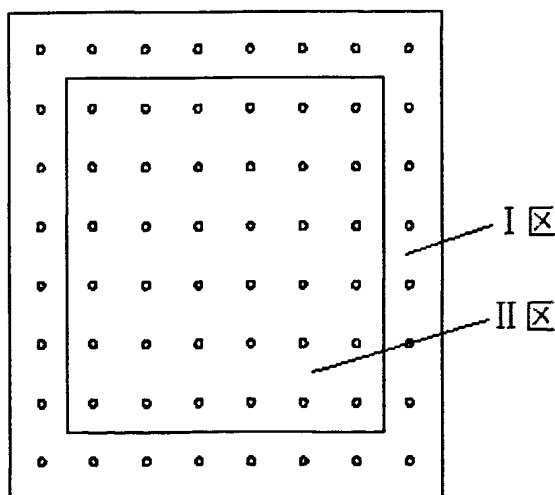


图 4-4 喷嘴分区示意图

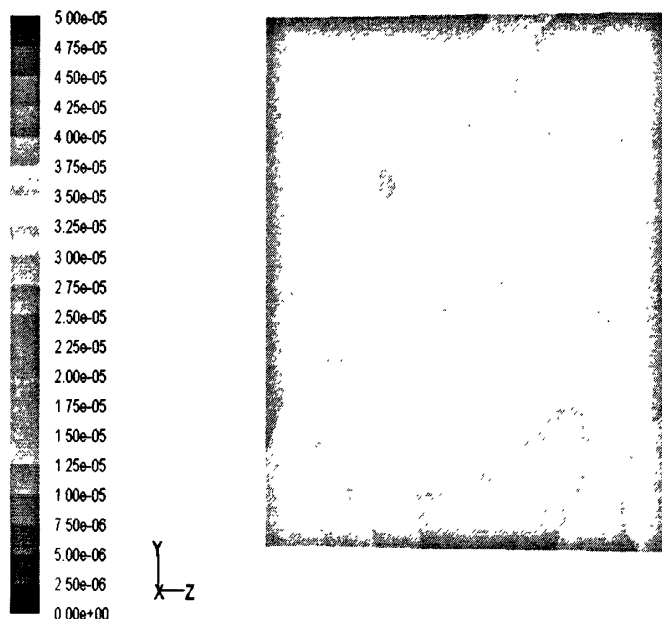


图 4-5 氨气摩尔浓度分布图

(3) 方案 3 双层喷管且喷嘴速度不同

以上两方案均为单层喷射管道，现将喷射管道调整为两层，一层为纵管，一层为横管。其中，纵管 4 根，每根有喷嘴 8 个，横管 4 根，每根有喷嘴 8 个，喷嘴总数为 64 个，与前两个方案的喷嘴总数一致，由于是双层喷管，喷嘴的排布更复杂。与方案 2 中一致，这 64 个喷嘴被划分为两个区域，靠近壁面的喷嘴为 I 区，中间的喷嘴为 II 区，设置 I 区的喷氨速度为 15.8 m/s，II 区的喷氨速度为 13.5 m/s。

计算得氨气的摩尔浓度分布见图 4-6。从图中可以看出，喷射格栅为双层喷管时，氨气浓度分布分布较均匀，比方案 1 时有所改善，但是截面下壁面处存在死角，截面中间区域处氨气浓度较高，氨气浓度分布比方案 2 差些。这说明双层喷管的喷射格栅的喷射效果要比单层喷管的喷射格栅差，采用单层喷管的喷射格栅更有利于烟气与还原剂的混合。

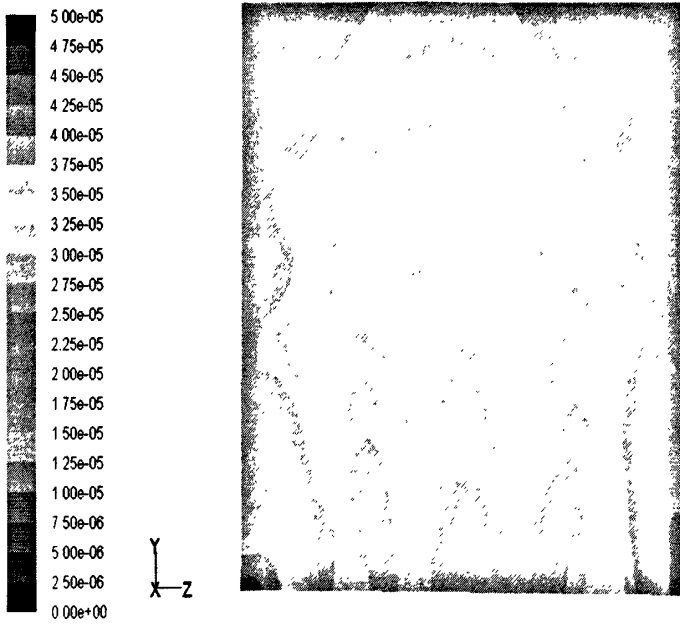


图 4-6 氨气摩尔浓度分布图

4.4 本章小结

本章对 SCR 脱硝系统入口烟道内烟气与还原剂的混合进行了数值模拟，比较了单层喷管和双层喷管的喷射格栅的喷射效果，根据模拟结果总结如下：

1) 当喷射格栅中各喷嘴的喷氨速度一致时，氨气的分布极不均匀，这对烟气与氨气的混合极为不利，会严重影响脱硝效率，这样的设置是不合理的。通过对喷嘴进行分区划分，并调节各分区内喷嘴的喷氨速度，结果氨气的分布较均匀，说明通过分区调节喷氨速度的方法可改善还原剂的分布，有利于烟气与还原剂的混合。

2) 双层喷管的喷射格栅中喷管分布相对较稀疏，容易产生喷射死角，使得出口截面的氨气分布不均匀，个别区域氨气浓度偏低。与单层喷管的喷射格栅相比，双层喷管的喷射格栅的喷射效果稍差点，这个可以从出口截面处氨气的浓度分布看出。因此，单层喷管的喷射格栅更有利于烟气和还原剂的混合。

•

•

•

总结与展望

总结

本文以国内外火电厂中广泛应用的 SCR 烟气脱硝反应器为研究对象，主要研究了 SCR 反应器入口烟道流场分布及烟道内烟气与还原剂氨气的混合情况，通过对计算结果的分析，总结如下：

1) 通过对 SCR 反应器入口烟道流场的数值模拟，主要分析了导流板的数量和喷射格栅中喷管对入口烟道流场的影响，结果表明：导流板对烟道流场起着很好的优化作用，喷氨格栅中喷管对流场也有一定的改善作用，其中导流板对流场起着主要的导流作用，而喷管可以辅助导流板优化烟道流场。随着烟道内导流板数量的增加，烟道流场更加均匀，而系统压降随着导流板的增多不断增大。当导流板分布到一定程度后，再增加导流板对烟道流场的改善作用变得微弱，但压降却一直随着导流板数量的增加而增大。要使得烟道流场均匀且系统压降较小，必须合理的布置导流装置，通过数值模拟的方法可方便快捷的确定导流装置的排布。

2) 通过对 SCR 反应器烟道内烟气与还原剂混合的数值模拟，主要分析单层和双层喷管的喷射格栅对烟气与还原剂混合效果的优劣，结果表明：当喷射格栅中各喷嘴喷氨速度一致时，由于烟道内流场较复杂，出口处氨气的分布很不均匀，如果将喷嘴分区划分，并调节不同分区的喷氨速度，则出口处氨气分布比较均匀，说明喷嘴分区划分的方法有利于氨气在烟道中分布。通过单层喷管与双层喷管喷射格栅喷射效果的模拟对比，说明双层喷管的喷射效果要比单层喷管差，单层喷管的喷射格栅更有利于烟气与氨气的混合。

展望

本文虽然在 SCR 脱硝系统的数值模拟研究方面取得了一些有益结果，但仍存在许多不足之处，还有一些环节需要在今后的研究中补充完善。

1) 本文内容仅针对 SCR 脱硝反应器的入口烟道系统，不包括反应器催化剂部分。在今后的研究中可重点研究反应器催化剂层对反应器流场、烟气与还原剂混合等的影响等等。

2) 本文内容不包括脱硝反应部分。脱硝反应是一个复杂的催化还原过程，

涉及到的化学反应较多，同时锅炉烟气中还含有二氧化硫、水、飞灰等多种杂质，使得脱硝过程更加复杂。在今后的研究中可数值模拟研究脱硝反应过程，并对烟气中杂质成分对反应的影响进行分析。

3) 由于 SCR 脱硝系统庞大、结构比较复杂，同时受计算机运算速度等条件的限制，本文在数值模拟建模过程中对部分结构进行了简化，还有一些其他影响因素没有考虑到。随着计算流体力学的发展、计算机运算能力的增强以及 SCR 脱硝技术相关研究的发展，数值模拟中模型将更逼近实际工况，数值模拟结果将会更加精确。

4) 由于条件的限制，本文未进行相关实验研究，数值模拟的计算结果没有得到实验数据的验证。

参考文献

- [1] 朱法华, 刘大钧, 王圣. 火电厂 NO_x 排放及控制对策审视[J]. 环境保护, 2009(21): 40~41.
- [2] 刘孜, 易斌, 高晓晶, 等. 我国火电行业氮氧化物排放现状及减排建议[J]. 环境保护, 2008, 8(B): 7~10.
- [3] 中国环境保护产业协会锅炉炉窑脱硝除尘委员会. 我国火电厂脱硫脱硝行业 2008 年发展综述[J]. 中国环保产业, 2009(7): 8~13.
- [4] 卢芳. 大气中氮氧化物对环境的影响[J]. 青海师范大学学报, 2006(3): 87~89.
- [5] 熊蔚立, 黄伟, 张国斌. 火电厂氮氧化物(NO_x)的危害和防治[J]. 湖南电力, 2002, 22(1): 61~63.
- [6] 黄伟. 燃煤电厂 NO_x 污染及其控制技术[J]. 电力环境保护, 2004, 20(3): 22~23.
- [7] 井鹏, 岳涛, 李晓岩, 等. 火电厂氮氧化物排放标准、政策分析及研究[J]. 中国环保产业, 2009(4): 19~23.
- [8] Srivastava Ravi K, Hall Robert E, Khan Sikander, et al. Nitrogen Oxides Emission Control Options for Coal-Fired Electric Utility Boilers[J]. Air & Waste Management Association, 2005, 55: 1367~1388.
- [9] Muzio L J, Quartucy G C. Implementing NO_x Control: Research to Application [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1997(23): 233~266.
- [10] 胡倩, 张世秋, 吴丹. 美国和欧洲氮氧化物控制政策对中国的借鉴意义[J]. 环境保护, 2007, 5(A): 74~78.
- [11] 王志轩. 论我国火电厂氮氧化物控制[J]. 中国电力企业管理, 2009(8): 16~19.
- [12] 郭斌, 廖宏楷. 我国 NO_x 控制策略探讨[J]. 广东电力, 2009, 22(8): 1~4.
- [13] 王钟, 王颖. 火电厂烟气脱硝技术探讨[J]. 吉林电力, 2005(6): 1~5.
- [14] 陈玲霞. SCR 脱硝反应器的流动特性及硫酸根对催化剂性能影响的研究[D]. 东南大学硕士学位论文, 2007: 1~39.
- [15] Forzatti Pio. Present Status and Perspectives in De- NO_x SCR Catalysis [J]. Applied Catalysis A: General, 2001(222): 221~236.
- [16] Muzio L J, Quartucy G C, Cichanowicz J E, et al. Overview and Status of Post-Combustion

- NO_x Control: SNCR, SCR and Hybrid Technologies[J]. *International Journal of Environment and Pollution*, 2002, 17(2): 24~30.
- [17] 杨冬, 徐鸿. SCR 脱硝技术及其在燃煤电厂的应用[J]. *电力环境保护*, 2007, 23(1): 49~51.
- [18] 俞逾. 选择性催化还原系统的建模与仿真[D]. 重庆大学硕士学位论文, 2007: 1~34.
- [19] Tonn D P, Uysal T A. 2200 MW SCR Installation on New Coal-Fired Project[C]. *ICAC Forum '98, Durham, North Carolina, USA*, 1998: 1~5.
- [20] Busca Guido, Lietti Luca, Ramis Gianguido, et al. Chemical and Mechanistic Aspects of the Selective Catalytic Reduction of by Ammonia over Oxide Catalysts: A Review[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 1998(18): 1~36.
- [21] Maxwell J D. Demonstration of SCR Technology to Control Nitrogen Oxide Emissions from High-Sulfur, Coal-Fired Utility Boilers[C]. *Fifth Annual Clean Coal Technology Conference, Tampa, Florida*, 1997: 64~67.
- [22] 钟秦. 燃煤烟气脱硫脱硝技术及工程实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [23] 赵桂锋, 杨文波. SCR 脱硝技术概述[J]. *锅炉制造*, 2007(2): 41~42.
- [24] 廖能斌, 蒋妮娜. 烟气脱硝的 SCR 技术及其应用[J]. *中国科技财富*, 2009(5): 34~35.
- [25] 廖欲元. 阐述 SCR 法烟气脱硝技术在火电厂的应用[J]. *广东科技*, 2009(6): 129~131.
- [26] 马忠云, 陈慧雁, 刘振强, 等. 烟气 SCR 法脱硝工艺流程的设计与应用[J]. *电力建设*, 2008, 29(6): 53~56.
- [27] 李岷. SCR 脱 NO_x 效率的主要影响因素浅析[J]. *黑龙江科技信息*, 2008(15): 63.
- [28] 陈海林, 宋新南, 江海斌, 等. SCR 脱硝性能影响因素及维护[J]. *山东建筑大学学报*, 2008, 23(2): 145~149.
- [29] 李宏伟, 钟祚群, 于德亨. 锅炉脱硝效率影响因素的试验研究[J]. *电站系统工程*, 2008, 24(5): 68.
- [30] 曾令大, 周怀春, 傅培舫, 等. 后石电厂选择性催化还原(SCR)脱硝装置的应用[J]. *洁净煤技术*, 2007, 13(1): 66~69.
- [31] 赵华, 丁经纬, 毛继亮. 选择性催化还原法烟气脱氮技术现状[J]. *中国电力*, 2004, 37(12): 74~76.

- [32] 王树荣, 王琦, 王建华, 等. 选择性催化还原脱硝技术在燃煤电厂的应用及发展[J]. 电站系统工程, 2005, 21(4): 11~13.
- [33] Mi Jia, Dan A, Haskew Tim. CFD Applicatons on Selective Catalytic NO_x Reduction(SCR) Systems[C]. 4th ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conference, New York, USA, 2003: 2139~2146.
- [34] 蔡小峰, 李晓芸. SCR 反应塔入口段烟气速度场的数值模拟[J]. 电力环境保护, 2006, 22(5): 18~19.
- [35] 沈丹, 仲兆平, 过小玲. 600MW 电厂 SCR 烟气脱硝反应器内不同导流板的流场数值模拟[J]. 电力环境保护, 2007, 23(1): 42~45.
- [36] 杜云贵, 余宇, 吴其荣, 等. 烟气脱硝系统流场模拟与实验研究[J]. 环境工程, 2009, 27: 255~257.
- [37] 袁景淇, 宋善奎, 金强, 等. 面向脱除率优化的烟气脱硝 CFD 仿真研究[J]. 控制工程, 2009, 16(6): 735~737.
- [38] Morita Isato, Ogasahara Toru, Franklin Howard N. Recent Experience with Hitachi Plate Type SCR Catalyst[C]. The Institute of Clean Air Companies Forum'02, Tarrytown, New York, 2002: 1~20.
- [39] 俞逾, 杨晨, 范莉. 电厂 SCR 烟气脱硝系统流场的数值模拟[J]. 计算机仿真, 2007, 24(3): 58~62.
- [40] 周丽丽, 刘辉, 雷志刚. 选择性催化还原反应器气体预分布器内速度场和浓度场模拟[J]. 化工进展, 2009, 28: 194~198.
- [41] 随莉莉, 袁景淇. 火电 SCR 烟气脱硝系统混合与均流 CFD 仿真[J]. 控制工程, 2008, 15(5): 523~525.
- [42] 徐芙蓉, 平恒, 姜柏卿, 等. 三河电厂二期工程 SCR 脱硝装置流场的模型试验和数值分析[J]. 热力发电, 2007(11): 28~32.
- [43] 吕同波, 李林, 王淑荣, 等. 选择性催化还原法脱硝装置流动及阻力特性的研究[J]. 华电技术, 2009, 31(12): 8~14.
- [44] Cremer Marc, Adams Bradley, Valentine James. Use of CFD Modeling for Design of NO_x Reduction Systems in Utility Boilers[C]. Proceedings of Nineteenth Annual International Pittsburgh Coal Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2002: 695~702.
- [45] 贾双燕. 火电厂烟气脱硝的数值模拟[D]. 华北电力大学(北京)硕士学位论文, 2004:

- 1~57.
- [46] Naqvi Mughis, Meyer Chris. Gas-Gas Mixing as Applied to SCR's[C]. NETL Conference 2003, Pittsburgh, Pennsylvania, 2003: 1~30.
- [47] Choi Hang Seok, Kim Seock Joon, Kim Kwan Tae. Enhancement of Turbulent Scalar Mixing and Its Application by a Multihole Nozzle in Selective Catalytic Reduction of NO_x[R]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2008(10): 1~6.
- [48] Chae Ho Jeong, Choo Soo Tae, Choe Hoon, et al. Direct Use of Kinetic Parameters for Modeling and Simulation of a Selective Catalytic Reduction Process[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2000, 39(5): 1159~1170.
- [49] Khodayari Raziye, Ingemar Odenbrand C U. Selective Catalytic Reduction of NO_x: A Mathematical Model for Pison Accumulation and Conversion Performance[J]. Chemical Engineering Science, 1999, 54(12): 1775~1785.
- [50] Roduit B, Wokaun A, Baiker A. Global Kinetic Modeling of Reaction Occurring during Selective Catalytic Reduction of NO_x by NH₃ over Vanadia/Titania-Based Catalysts[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1998, 37: 4577~4590.
- [51] Enrico Tronconi. The Role of Inter- and Intra-phase Mass Transfer in the SCR-DeNO_x Reaction over Catalysts of Different Shapes[J]. Catalysis Today, 1999, 52: 249~258.
- [52] Wilhite David C. The Use of Computational Fluid Dynamics in Selective Catalytic Reduction System Ductwork Design[C]. Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division, New York, 1998: 247~248.
- [53] 张彦军, 高翔, 骆仲浚, 等. SCR 脱硝系统入口烟道设计模拟研究[J]. 热力发电, 2007(1): 15~17.
- [54] 王瑞金, 张凯, 王刚. Fluent 技术基础与应用实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 50~91.
- [55] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 7~254.
- [56] 韩占忠, 王敬, 兰小平. 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004: 14~98.
- [57] 江帆, 黄鹏. Fluent 高级应用与实例分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 112~182.

- [58] 安晓玲. SCR 法烟气脱硝技术的数值模拟[D]. 华北电力大学(保定)硕士学位论文, 2008: 27~44.



致谢

本文是在导师周慎杰教授的悉心指导和帮助下完成的。周老师渊博的学识、敏锐的观察力、严谨的治学态度、宽容博大的胸怀、谦逊正直的为人给我留下了非常深刻的印象，也是我不断学习和努力的方向。研究生期间，周老师不仅在学业上给我以细心指导，同时还在思想和生活上给我以无微不至的关怀，在此向敬爱的周老师表示崇高的敬意和最衷心的感谢！

衷心感谢博士陈莲芳在论文研究中所给予的帮助和指导，使我能够顺利完成论文研究。同时，师兄王凯、赵俊峰、孔胜利、聂志峰、杨锋苓、王炳雷，师姐张丽丽、张翠勋，同门刘冠一及师弟楚树坡等在平时的学习和生活中给我许多关心、支持和帮助，在此对他们表示诚挚的谢意！实验室严谨活泼的求学氛围是我一辈子的精神财富！

深深感谢我的父母多年来对我的鼓励和无私关怀，感谢所有的亲朋好友在求学期间对我学习和生活上的关心、支持和帮助，使我能够不断的克服困难并顺利完成学业。

2010年4月

学位论文评阅及答辩情况表

论文评阅人		姓名	专业技术 职 务	是否博导 (硕导)	所在 单 位	总体评价 ※	
		匿名					A
		匿名					B
答辩委员会成员		姓名	专业技术 职 务	是否博导 (硕导)	所在 单 位		
		主席 张昭良	教授	是	济南大学		
		委 员	陈领英	教授	是	山东大学	
			刘燕	副教授	是	山东大学	
答辩委员会对论文的 总体评价※		A	答辩秘书	宋静	答辩日期	2010.5.17	
备注							

※优秀为“A”；良好为“B”；合格为“C”；不合格为“D”。

