

The Professional Papers of Urban Gas Application

城镇燃气应用 专业论文选编

中国土木工程学会燃气分会应用专业委员会、燃气供热专业委员会

中国市政工程华北设计研究总院有限公司

国家燃气用具质量监督检验中心

中国建筑工业出版社

城镇燃气应用专业论文选编

中国土木工程学会燃气分会应用专业委员会、燃气供热专业委员会
中国市政工程华北设计研究总院有限公司
国家燃气用具质量监督检验中心

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

城镇燃气应用专业论文选编/中国土木工程学会燃气分会应用专业委员会、燃气供热专业委员会, 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 国家燃气用具质量监督检验中心. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016. 7

ISBN 978-7-112-19383-7

I. ①城… II. ①中…②中…③国… III. ①城市燃气-文集
IV. ①TU996-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 087036 号

本书收集了 72 篇城镇燃气应用专业论文, 分 5 部分: 燃气燃烧及燃气具理论研究; 燃气具开发研究; 燃气具零部件研究; 标准与检测; 其他。

城镇燃气是我国城镇的重要能源, 其应用涉及民用与商用灶具、生活热水供应、直燃式吸收制冷、热泵式制冷与制热、锅炉与壁挂炉供热、工业炉、发电 (蒸汽发电、燃气轮机发电、联合循环发电、燃料电池发电) 等方面。城镇燃气应用水平的高低对于满足不同用户需求、降低污染物排放、节约能源具有重要的意义。

本书可供从事燃气分户供热应用技术工程的设计、施工、管理、维护人员使用。也可供相关专业人员参考使用。

* * *

责任编辑: 胡明安

责任校对: 陈晶晶 李欣慰

城镇燃气应用专业论文选编

中国土木工程学会燃气分会应用专业委员会、燃气供热专业委员会

中国市政工程华北设计研究总院有限公司

国家燃气用具质量监督检验中心

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 32 字数: 776 千字

2016 年 8 月第一版 2016 年 8 月第一次印刷

定价: 88.00 元

ISBN 978-7-112-19383-7

(28611)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

城镇燃气是我国城镇的重要能源，其应用涉及民用与商用灶具、生活热水供应、直燃式吸收制冷、热泵式制冷与制热、锅炉与壁挂炉供热、工业炉、发电（蒸汽发电、燃气轮机发电、联合循环发电、燃料电池发电）等方面。城镇燃气应用水平的高低对于满足不同用户需求、降低污染物排放、节约能源具有重要的意义。

从 20 世纪末以来，随着天然气事业的大发展，我国城镇燃气应用技术发展迅速，城镇燃气行业广大科技人员进行了广泛和深入的理论研究和技术开发等工作。在中国城市燃气学会应用专业委员会的主导下，研究成果陆续发布在每年举行一次的学术交流会上，自 2004 年至 2015 年间，学术交流论文已达数百篇，对于本专业学术水平的提高和技术的发展起到了重要的作用。其中许多论文尚未正式公开发表，为了提高城镇燃气应用专业学术论文的完整性和系统性，扩大论文的读者范围和影响力，更好地发挥其作用，在广大作者的大力支持下，中国土木工程学会燃气分会应用专业委员会、中国土木工程学会燃气分会燃气供热专业委员会组织有关人员学术交流会上发表的论文进行了系统整理，将筛选出的 70 余篇优秀论文，进行分类编辑，汇集成“城镇燃气应用专业论文选编”，现由学会与中国建筑工业出版社合作出版。

由于论文涉及内容较广，难免有不当之处，恳请读者不吝指正。

中国土木工程学会燃气分会应用专业委员会、燃气供热专业委员会

中国市政工程华北设计研究总院有限公司

王启

国家燃气用具质量监督检验中心

目 录

燃气燃烧及燃气具理论研究

金属纤维燃烧器的燃烧特性研究	要大荣, 傅忠诚, 潘树源, 艾效逸	3
燃气热水器换热片上温度分布数值计算	叶远璋, 夏昭知, 钟益明	7
浓淡燃烧组合火焰 NO_x 生成因素正交模拟分析	孙 晖, 周庆芳, 全惠君, 杨庆泉	17
二甲醚热值测定方法的研究	严荣松, 王 启, 张金环, 渠艳红	23
多孔介质中甲烷预混燃烧特性二元温度法求解	侯根富, 吴 婧	28
燃气预混空气燃烧过程 NO_x 及 CO 生成条件分析	范慧芳, 刘 立, 金志刚	35
海拔高度对燃气用具热负荷影响的对策研究	王 启, 高 勇, 赵力军	43
浅析逼近匹配法在燃气燃烧组织中的应用	伍劲涛, 喻 焰, 付继炜, 伍国福	48
燃气具燃烧特性区间的实验确定与探讨	高文学, 王 启	53
上海天然气互换性的实验研究	秦朝葵, 戴万能	63
燃气具气质适应域的实验确定	高文学, 王 启, 唐 戎	71
沼气火焰稳定性极限的实验研究	秦朝葵, 戴万能	87
基于 CDF 的管翅式热交换器结构数值分析	邓海燕, 刘 兵, 潘桂荣, 向 熹, 仇明贵	95
浓淡比与一次空气系数对 NO_x 排放的研究	代先锋	102
城镇燃气分类和基本特性的研究	王 启, 高文学, 高 勇	111
完全预混燃气具气质适应性的研究	高文学, 梁 普, 王 启	124
文丘里型燃气燃烧器内部流场的数值模拟研究	窦礼亮, 姚 娜	132
家用燃气灶热效率的数值模拟与优化研究	徐德明, 陈迪龙, 潘 登, 高乃平, 蔡国汉	137
组合式燃烧器的数值模拟研究	李 萍, 刘艳春, 曾令可, 邓毅坚	144
火焰冷却体对降低氮氧化物排放的实验研究	黎彦民, 张 宁	152
低压引射器的数值模拟及参数化研究	倪娟娟, 季铨钊	157
天然气灶具对气质波动适应性影响的实验研究	高文学, 张杨竣, 王 启	164

燃气具开发研究

燃气热水器的数值模拟研究	周庆芳, 杨庆泉	175
燃气冷凝式两用炉研究	王 丽, 魏敦崧, 姜桂云, 张 亮	185

冷凝式热水器换热器低温段温度场的数值计算

..... 叶远璋, 赵恒谊, 夏昭知, 伍国福	192
冷凝式燃气热水器的开发研究	徐德明, 魏敦崧, 丁晓敏 198
室外型燃气热水器结构设计分析	仇明贵, 陈林山, 胡定刚, 刘昌文 202
上进风灶与台式灶引射性能的实验研究	李伟奇, 秦朝葵 209
燃气热水器废气中 CO 与 NO _x 的催化转化研究	刘艳春, 侯来广, 曾令可, 段碧林, 李得家, 邓志伟 213
冷凝式燃气热水器若干问题的探讨	叶远璋, 赵恒谊, 钟家淞, 夏昭知 221
冷凝式燃气热水器超低负荷运行模式试验研究	史永征, 肖 松, 郭 全 229
冷凝式燃气热水器采用大气燃烧方式的探讨	钟家淞, 赵恒谊, 夏昭知 234
燃气供暖热水炉热水性能试验分析	何贵龙, 杨丽杰 239
低噪声燃气热水器的研究	邱 步, 毕大岩, 刘永生, 周素娟 243
套管与板换壁挂炉测试对比分析	胡 旭, 王克军 247
高海拔地区燃气供暖热水炉影响消除的研究	陈永钊, 李志伟, 辛伟锋 257
水冷燃烧器在二级换热冷凝壁挂炉的应用研究	张 宁, 黎彦民, 徐麦建 263
燃气供暖热水炉噪声降低技术的研究	朱立夫, 朱高涛 270
水冷平板式全预混燃烧器在整机中的实验研究	刘凤国, 陈 涛, 杨昌军, 张振合 278

燃气具零部件研究

金属纤维燃烧器的应用研究	要大荣, 傅忠诚, 潘树源, 艾效逸 285
天然气强旋燃烧器的应用研究	伍国福, 朱 江 291
全预混燃气燃烧污染物排放因素与减排研究	徐 鹏, 傅忠诚 296
功能性蜂窝式多孔红外陶瓷燃烧板研究 ...	刘艳春, 曾令可, 任雪潭, 王 慧 305
催化无焰燃烧技术及其应用	陈水辉, 刘艳春, 张全胜 311
大负荷高效节能环保鼓风燃气红外线灶芯研究	阳正东, 郑文颖 318
天然气浸没燃烧器在玻璃熔窑的应用	伍劲涛, 喻 焰, 刘清秀, 叶 巍, 伍国福 324
低空气系数浓淡燃烧器的试验研究	徐德明, 朱桂平, 丁晓敏 329
高比表面积 Pd 纤维催化剂制备及甲烷催化燃烧性能	陈水辉, 曾令可, 刘艳春 335
平板式全预混燃烧器的开发研究	徐德明, 魏敦崧, 卢志龙, 周高云 340
全预混燃烧的燃烧振荡问题探讨	张仲凌 346
驱动电源对动铁芯式燃气比例阀调节特性的影响 ...	姚占朋, 朱宁东, 庞智勇 350
波纹管冷凝式热交换器的研发	徐德明, 周高云, 吴 妍, 魏敦崧 358
新型多联小管径铜制热交换器的研发	徐德明, 高乃平, 钱志宏 364
平板式预混燃烧器污染物排放特性的实验研究	刘凤国, 尤学一, 王 启, 刘文博 371

燃气热水器换热肋片扰流孔的实验研究	陈 斌	377
冷凝式燃气热水器副热换热器优化设计与研究	陶健清, 徐蔚春	381
新型高效家用燃气灶燃烧器热效率的研究	徐德明, 刘晓刚, 钟 芬, 高乃平	386

标准与检测

家用燃气灶具检测自动控制系统的研究	杨丽杰, 王 启, 刘 彤, 王 毅	397
高海拔地区燃气热水器测试方法探讨	王保友	405
对 GB 16410—2007 中灶具热效率检测的分析	龙 飞, 杨丽杰, 刘 彤, 胡 宇	409
北美用户外用燃气具认证及测试概要	张建海, 周庆芳, 李文硕	413
冷凝式燃气热水器冷凝器可靠性的试验研究	李盛朝	417
基于 GB 25034 的 NO_x 不确定度计算	张 华, 刘文博, 辛立刚, 牛 犇, 于洪根	423

其 他

燃气调压器自动调压装置的设计与实现	陈 晓, 王 启, 翟 军, 杨振坤	433
燃气快速热水器能效测试分析与节能潜力研究	刘 彤, 何贵龙	437
燃气热泵运行过程焓分析与热经济学优化研究	项友谦, 刘凤国, 王 启	446
千瓦级天然气热电联产系统的流程模拟与分析	彭 昂, 解东来	458
燃料电池微型天然气热电联产能量与焓分析	解东来, 王子良	468
燃气工业炉燃烧过程空气系数的比例阀控制	严荣松, 赵自军, 郝冉冉, 张振刚	479
壁挂炉和地暖供暖系统的匹配性研究	黄志飞, 胡旭, 王克军, 史玉军	484
一种可提高壁挂炉洗浴效率的新型水路	黄志飞, 王克军	493
太阳能-燃气供暖热水炉互补供热技术研究	王 启, 张 欢, 陈志炜, 高文学	497

燃气燃烧及燃气具理论研究

金属纤维燃烧器的燃烧特性研究^{*}

要大荣, 傅忠诚, 潘树源, 艾效逸

(北京建筑大学)

摘 要: 本文介绍了一种新型的燃烧器—金属纤维燃烧器。它不同于普通的燃烧器, 具有升温快、冷却快, 燃烧效率高、污染物排放量低等特点。本文分析了金属纤维燃烧器在不同工况下的燃烧特性和排放性能, 为金属纤维燃烧器的应用提供了基础数据。

关键词: 金属纤维燃烧器; 低 NO_x 燃烧; 火焰稳定性; 燃烧特性

1 引言

金属纤维燃烧器头部是由极细金属纤维制成。金属纤维既可烧结在一起, 形成刚性而多孔的板材, 也可通过纺织过程制成柔软的织物。两种结构均能提供透气性强的均匀介质, 既可在热辐射模式下燃烧又可在蓝焰模式下燃烧, 并且能在两种模式下实现燃烧平移转换。

金属纤维燃烧器具有良好的抗腐蚀性和抗氧化性, 使得燃烧器的使用寿命长。当燃烧器在封闭的环境中, 表面温度和辐射效率将会提高。金属纤维燃烧器的长期工作高温为 1100°C ^[1]。

金属纤维燃烧器由于是金属材质, 能耐热冲击。水泼在燃烧器的表面上被蒸发后, 不会在燃烧器表面留下任何损坏的痕迹。此外, 金属纤维燃烧器还具有良好的抗机械冲击性能、熄火安全性能和快速冷却性能。

金属纤维燃烧器有柔性, 燃烧器的头部可以做成扁平形、圆筒形、圆锥形、凹形、球形等形状。

金属纤维燃烧器红外辐射的特性和低污染排放的特点, 可用于家用烤箱、工业炉、食品、纺织、汽车、玻璃、钢铁铸造等行业。

2 金属纤维燃烧器工作原理

金属纤维燃烧器属于预混气体表面燃烧。预先混合均匀的燃气空气混合物流向燃烧器头部, 在透气性均匀的金属纤维织物表面层进行燃烧。燃烧方式有红外热辐射方式和蓝焰方式两种^[2]。红外热辐射方式是可燃混合物在织物内部燃烧, 金属纤维织物被加热至白炽状态, 一部分热量以辐射方式释放。蓝焰方式是可燃混合物在织物上方燃烧, 火焰呈蓝色

^{*} 选自中国土木工程学会燃气分会应用专业委员会 2004 年会议论文集 p13-p18

浮在表面上，热量以对流方式释放。

由于金属纤维织物的均匀透气性和燃气与空气的均匀预混，燃烧十分稳定和温度分布均匀，不会存在局部高温，因此抑制了NO_x的生成。预混又有足够的空气供给，故CO的排放也低。

3 金属纤维燃烧器的燃烧实验

3.1 金属纤维燃烧器在敞开空间的燃烧实验

金属纤维燃烧器在敞开的大气环境中燃烧，研究在不同空气系数下，NO_x、CO排放量随火孔热强度的变化规律。实验数据见表1、表2。

3.2 金属纤维燃烧器在燃烧室内的燃烧实验

把燃烧器头部面积为1950mm²、型号为KZ/30/1.7/6（纤维直径为30μm，单位重量为1.7kg/m，厚度为6mm）的长方形金属纤维织物燃烧器在封闭的环境下进行燃烧稳定性实验。实验在两种状态下进行，首先进行下烧（燃烧器头部朝下），烟气从下部排出，然后进行对比实验——上烧（燃烧器头部朝上），烟气从上部排出，实验结果见表3。

不同火孔热强度、不同一次空气系数的CO排放量 表 1

一次空气系数 α=1.1											
火孔热强度 (W/mm ²)	0.604	0.691	0.753	0.878	0.998	1.128	1.367	1.427	1.508	1.581	1.719
CO _(α=1) (ppm)	30.5	30.9	32.1	32.0	37.0	36.7	37.2	35.6	40.2	41.7	42.1
一次空气系数 α=1.2											
火孔热强度 (W/mm ²)	0.604	0.691	0.753	0.878	0.998	1.128	1.367	1.427	1.508	1.581	1.719
CO _(α=1) (ppm)	21.3	21.8	22.0	25.0	26.0	26.7	27.8	29.2	25.6	26.9	30.1
一次空气系数 α=1.3											
火孔热强度 (W/mm ²)	0.604	0.691	0.753	0.878	0.998	1.128	1.367	1.427	1.508	1.581	1.719
CO _(α=1) (ppm)	13.8	15.6	15.9	16.0	20.0	20.1	21.5	19.8	20.1	20.5	17.6

不同火孔热强度、不同一次空气系数的NO_x排放量 表 2

一次空气系数 α=1.1											
火孔热强度 (W/mm ²)	0.604	0.691	0.753	0.878	0.998	1.128	1.367	1.427	1.508	1.581	1.719
NO _{x(α=1)} (ppm)	68.1	92.5	92.9	96.0	112.0	121.0	125.0	128.0	132.0	136.0	142.0
一次空气系数 α=1.2											
火孔热强度 (W/mm ²)	0.604	0.691	0.753	0.878	0.998	1.128	1.367	1.427	1.508	1.581	1.719
NO _{x(α=1)} (ppm)	57.2	59.0	59.3	61.0	63.0	63.9	65.1	67.3	72.1	80.1	89.5
一次空气系数 α=1.3											
火孔热强度 (W/mm ²)	0.604	0.691	0.753	0.878	0.998	1.128	1.367	1.427	1.508	1.581	1.719
NO _{x(α=1)} (ppm)	36.3	40.1	41.2	45.0	49.0	50.7	51.5	47.2	36.2	39.2	42.7

金属纤维燃烧器（上烧式）脱火数据											
火孔热强度 (W/mm^2)	4.085	3.851	3.335	2.921	2.624	2.298	2.128	1.670	1.480	1.013	4.085
一次空气系数 α	1.408	1.428	1.439	1.457	1.526	1.527	1.533	1.544	1.57	1.604	1.408
金属纤维燃烧器（下烧式）脱火数据											
火孔热强度 (W/mm^2)	4.148	3.822	3.588	3.242	2.814	2.507	2.118	1.723	1.456	1.124	4.148
一次空气系数 α	1.486	1.516	1.519	1.52	1.529	1.534	1.54	1.547	1.556	1.593	1.486

为便于比较，将金属纤维燃烧器的上烧式和下烧式脱火曲线比较数据绘制于图 1 中。

4 结论

(1) 上烧式和下烧式金属纤维燃烧器在 $q=1.0\sim4.0W/mm^2$ 及 $\alpha=1.4\sim1.6$ ，均未发生回火现象。

(2) 在同一火孔热强度下，下烧式燃烧脱火的一次空气系数较上烧式略大，这说明下烧式更不容易脱火，燃烧比较稳定。

(3) 由于金属纤维燃烧器具有燃烧稳定性好，负荷调节范围大，热效率高，燃烧污染物 (NO_x 、CO) 排放低等优点，它可广泛应用于气体燃料的燃烧。

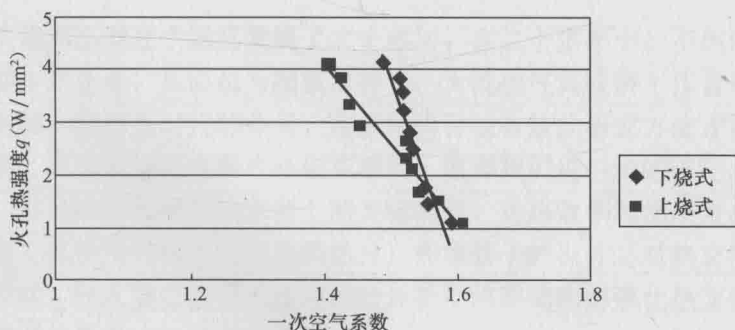


图 1 金属纤维燃烧器上烧式和下烧式脱火曲线比较

参考文献

- [1] COTECH Advanced combustion technology Metal Fibre Burner
- [2] COTECH Advanced combustion technology Metal Fibre Burner Applications
- [3] 傅忠诚等. 燃气燃烧新装置 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984
- [4] 日本煤气协会. 煤气应用手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989
- [5] Fenimore, C. P., Thirteenth Symposium on Combustion, The Combustion Institute, 1972, p373
- [6] 同济大学等. 燃气燃烧与应用 (第二版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988
- [7] BoWman, C. T., Kinetics of Pollutant Formation and Destruction in Combustion, Prog. Energy Combust. Sci., 1975, 1, p33~p45
- [8] 金志刚. 燃气测试技术手册 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1994
- [9] 周承禧. 煤气红外线辐射器 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982
- [10] 金志刚等. 开发金属纤维燃烧器—提高天然气的应用技术 [J]. 城市管理与公用科技, 2002

- [11] Infrared technology and applications XXVI [J]. 30 July-3 August 2000, San Diego, USA
- [12] Infrared detector/by A. Rogalski. _ Amsterdam: Gordon and Breach Science Pub, 2000
- [13] 傅忠诚等. 燃气热水器氮氧化物排放标准的探讨 [J]. 煤气与热力, 2003. 4
- [14] 傅忠诚等. 制定燃气具氮氧化物排放标准的必要性 [J]. 煤气与热力, 2003. 2
- [15] 徐鹏等. 条缝式火孔预混燃烧稳定性的实验研究 [J]. 工业加热, 2002. 6

燃气热水器换热片上温度分布数值计算^{*}

叶远璋, 夏昭知, 钟益明

(广东万和新电气股份有限公司节能环保燃气具研发中心)

摘要: 随着计算流体力学的发展, 数值计算已经在多个领域得到了广泛的使用。本文运用 CFD 软件对 5L/min 家用燃气热水器换热器的工作过程进行数值计算, 得出了换热片间烟气的温度分布和速度分布特征, 计算得到的排烟温度、换热片吸热量同实验或设计基本一致, 数值计算的研究方法可为燃气热水器换热器的设计提供一定的理论指导。

关键词: 燃气热水器; 换热器; 数值计算

1 引言

家用燃气快速热水器在中国已发展了二十多年, 在二十多年中, 不但涌现了一大批优秀的燃气热水器生产企业, 从而也为国家培养了一大批燃气具科研工作者和优秀的企业产品开发人才。然而, 在信息时代的今天, 应采用何种较有效的研究方法才能更利于家用燃气热水器的发展, 更有效地提高新产品研发速度, 值得我们进一步的研究。

众所周知, 热交换器是燃气热水器上的关键部件, 对热效率和使用寿命都起着关键作用。而热交换器上所使用的肋片(俗称换热片)和水管子的设计又对热交换器结构和性能起关键作用, 因此, 研究热交换器上使用的肋片管换热器结构对强化热交换, 提高换热效率, 缩小换热器的外形尺寸起了重要作用。

生产厂家在换热器设计时十分希望能知道换热片上的温度分布(由此可计算出换热器的吸热量), 以便寻找出合理的换热片形状、厚度间距、水管外径、布置形式……等因素对热交换器吸热量的影响, 实现用较少的材料而能吸收热水器所需的热量, 这个任务依靠常规的实物实验方法来完成是十分困难的, 且将花费大量的人力与物力, 占用大量的时间。所以, 至今还没见到任何一家国内外生产厂家或科研单位公布有关的测试数据或科研成果。

功能强大的计算机的出现为解决这类难题提供了新的思路, 从 20 世纪 70 年代起, 著名学者 D. B. Spalding 与 S. V. Patankar 为代表创建并发展了传热与流动过程的数值计算方法, 实现了把经典的传热与流动微分方程用于解决实际工程问题的最终目的, 对层流、紊流边界层内的热传导与流动过程, 借助功能强大的计算机, 用数值计算方法可以得到与实际工程问题相似的数值解。这种方法现已成为研究、解决重大工程问题的有效

^{*} 选自中国土木工程学会燃气分会应用专业委员会 2004 年论文集 p109-119

手段。在航天、能源、化工等领域得到广泛使用并获得一致认可。现在，对流动、换热过程进行计算时普遍使用的商用计算软件已较成熟也较多，计算软件已从科研成果进入商业使用，由此说明此种科学方法已经成熟、可靠、具有实用价值。但由于多种原因，在家用燃具（灶、热水器、加热炉等）的研发上还很少有人采用此种方法，留下一个空白。

下面介绍万和公司与某大学合作使用计算流体力学（Computational Fluid Dynamics，简称 CFD:）的方法，运用商业 CFD 软件对 5L/min 家用燃气热水器的换热器进行温度场计算的一些结果，并与实际运行进行了比较。从而肯定了数值计算在民用燃具研发上的实用价值与指导意义。

2 数值计算模拟对象的建立

图 1 为热水器对流换热器的布置图，此种结构是目前国内最常见的燃气快速热水器换热器结构形式。观察对流换热器内高温烟气对换热片的加热以及肋片管对水的加热过程，其中进入对流换热器的烟温为 t_1 ，烟气流速为 u_0 ，换热器出口烟温（排烟温度）为 t_y 。

图 2 为换热片（5L/min 热水器）示意图，吸热水管内水温分别为 t_2, t_3, t_4 ，热交换片为紫铜（T2），厚度 0.3mm，换热片间烟气流动道厚度为 3mm。

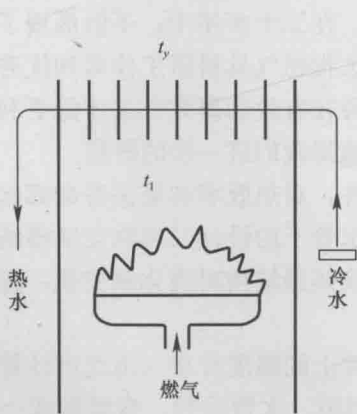


图 1 热水器对流换热器

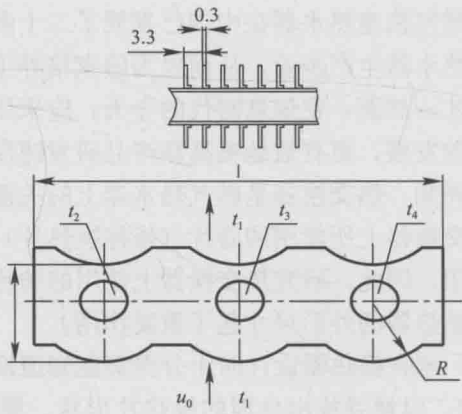


图 2 热水器换热片

根据对流换热器的结构原理以及换热器上换热片结构，可设计出数值模拟计算时研究对象的物理模型，并给出了换热器数值模拟的计算区域示意图 3。

图 3 中虚线框内的区域表示数值模拟计算域。紫铜的导热性能非常好，其导热系数达到 $350\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，沿图示的 Z 向的温度梯度很小，为此，将铜肋片的一半纳入计算域。数值模拟技术要求对换热器的入口与出口进行扩展，图 3 所示的“入口段扩展烟气区”和“出口段扩展烟气区”，就是为了提高数值模拟计算准确度而增加的扩展区域，其中出口段扩展烟气区的高度根据如下因素确定：计算域出口端面不存在回流。

图 4 为铜管内水流动与传热的模拟对象示意图，直管段长 200mm，直径 14mm，弯头半径 15mm，为所研究的换热器铜管内水流动与传热的简化模型，取内壁面为热流边界条件。假设管内有足够大的压力，在此压力下水不会出现沸腾现象。

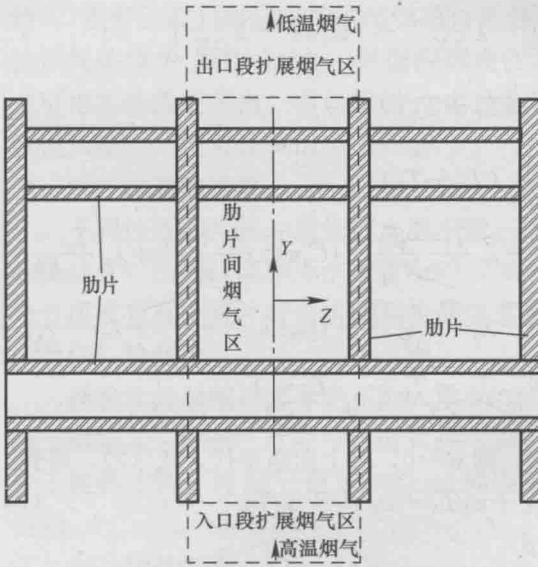


图3. 数值模拟计算区域示意图

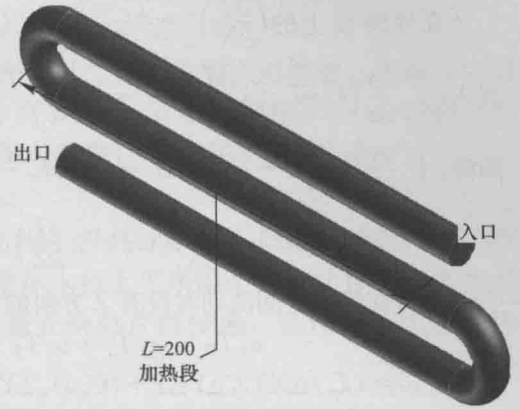


图4 铜管内水流动与传热模拟对象

3 离散化方程的建立

根据以上所建立的物理模型，我们可以建立离散化数学方程，图5是计算采用的控制容积 ($\Delta X = \Delta Y = \Delta Z = 0.3\text{mm}$)，计算区域的网格结点是1, 2, 3, 4, 5, 6及中心结点P……任一网格结点假定是P，它四周的6个相邻结点是1, 2, 3, 4, 5, 6。

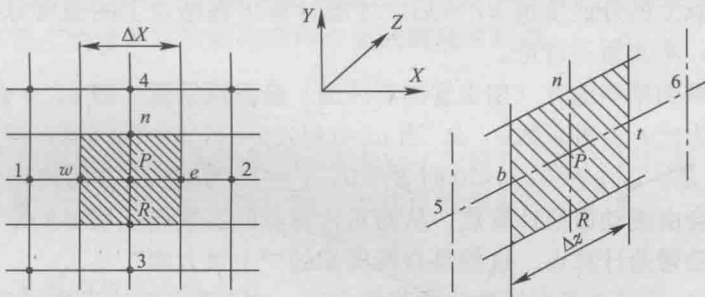


图5 控制容积

下面说明采用控制容积方法如何从热传导微分方程推导出我们需要的离散化方程。三维、稳态、无内热源、有流动的传导微分方程为：

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(C_p u T - \lambda \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(C_p v T - \lambda \frac{\partial T}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(C_p w T - \lambda \frac{\partial T}{\partial Z} \right) = 0 \quad (1)$$

对图5所示控制容积内，对方程(1)进行积分：

$$\int_w^e \frac{\partial}{\partial X} \left(C_p u T - \lambda \frac{\partial T}{\partial X} \right) dX + \int_r^n \frac{\partial}{\partial Y} \left(C_p v T - \lambda \frac{\partial T}{\partial Y} \right) dY + \int_b^t \frac{\partial}{\partial Z} \left(C_p w T - \lambda \frac{\partial T}{\partial Z} \right) dz = 0 \quad (2)$$

C_p 定压比热， u, v, w 为烟气在 X, Y, Z 方向的流动分速度， λ 为导热系数。对上式每项逐一进行计算：

$$\int_w^e \frac{\partial}{\partial x} (C_p u T - \lambda \frac{\partial T}{\partial X}) dX = [C_p u T - \lambda \frac{\partial T}{\partial X}]_e - [C_p u T - \lambda \frac{\partial T}{\partial X}]_w$$

$$\text{在界面 } e \text{ 上的 } (\frac{\partial T}{\partial X})_e = \frac{T_2 - T_P}{\Delta X}, (T)_e = \frac{1}{2} (T_P + T_2)$$

$$\text{在界面 } w \text{ 上的 } (\frac{\partial T}{\partial X})_w = \frac{T_P - T_1}{\Delta X}, (T)_w = \frac{1}{2} (T_P + T_1)$$

$$\text{代入: } \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} (C_p u T - \lambda \frac{\partial T}{\partial X}) dX = (C_p u)_e \frac{T_P + T_2}{2} - \lambda_e \frac{T_2 - T_P}{\Delta X} - (C_p u)_w \frac{T_P + T_1}{2} + \lambda_w \frac{T_P - T_1}{\Delta X}$$

$$\text{同样: } \int_r^i \frac{\partial}{\partial Y} (C_p v T - \lambda \frac{\partial T}{\partial Y}) dY = (C_p v)_n \frac{T_P + T_4}{2} - \lambda_n \frac{T_4 - T_P}{\Delta Y} - (C_p v)_r \frac{T_P + T_3}{2} + \lambda_r \frac{T_P - T_3}{\Delta Y}$$

$$\int_b^i \frac{\partial}{\partial Z} (C_p w T - \lambda \frac{\partial T}{\partial Z}) dZ = -\lambda_t \frac{T_6 - T_P}{\Delta Z} + \lambda_b \frac{T_P - T_5}{\Delta Z}$$

烟气在换热片间流动时没有 Z 方向的分速度, 即 $w=0$, 将上面结果代入式 (2), 得到:

$$a_p T_P = a_1 T_1 + a_2 T_2 + a_3 T_3 + a_4 T_4 + a_5 T_5 + a_6 T_6 \quad (3)$$

$$\text{式中 } a_1 = (\lambda_w / \Delta X) \times \Delta Y \Delta Z + (C_p u)_w \Delta Y \Delta Z \cdot \beta$$

$$a_2 = (\lambda_e / \Delta X) \times \Delta Y \Delta Z + (C_p u)_e \Delta Y \Delta Z \cdot \alpha$$

$$a_3 = (\lambda_r / \Delta Y) \times \Delta X \Delta Z + (C_p v)_r \Delta x \Delta Z \cdot \beta'$$

$$a_4 = (\lambda_n / \Delta Y) \times \Delta X \Delta Z + (C_p v)_n \Delta x \Delta Z \cdot \alpha'$$

$$a_5 = (\lambda_b / \Delta Z) \times \Delta X \Delta Y$$

$$a_6 = (\lambda_t / \Delta Z) \times \Delta X \Delta Y$$

$$a_p = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6$$

式 (3) 便是计算所需要的离散化方程。必须说明几点:

(1) 烟气在换热片间流动时, 其速度分布 u, v 需要由相关的运动方程来求解, 只有计算出各网格结点上的分速度值 u, v 后, 才能计算出各结点上的温度分布。速度场的求解涉及很多内容, 本文暂不讨论。

(2) 在计算域的某些地方 (如水管的背风面) 会出现回流 (即 u, v 会呈现负值), 使计算无法收敛。为此, 引进系数 α, β 。当 $u > 0$ 时, $\beta=1, \alpha=0$; $u < 0$ 时 $\beta=0, \alpha=1$ 。同样, 当 $v > 0$ 时, $\beta'=1, \alpha'=0$; $v < 0$ 时 $\beta'=0, \alpha'=1$ 。引进 α, β 的物理含义是认为来自上游的温度信息会由流动带给计算点, 从而对计算点的温度产生明显的影响。下游的温度信息则不会由流动带给计算点。这便是众所周知的“上风方案”。

(3) 方程 (3) 是一个可以线性化的代数方程, 它表明了任意网格结点上的温度与它 6 个相邻结点温度之间的关系。只要知道相应的边界条件, 起始条件之后便可根据式 (3), 用迭代方法求解出所有网格结点上的温度。

(4) 对 5L/min 热水器, 我们划分的网格结点约有 30 万个 (计算网格的划分可自行决定, 一般说来网格越细, 解的准确度越高)。对每个结点均可写出方程式 (3), 将这 30 万个线性代数方程联立起来并求解, 便可得到计算区域内温度在结点上的离散分布。

4 主要参数的选取

(1) 换热器入口烟温 t_1 与烟速 u_0

假定燃气与空气带入燃烧室的热焓为 I_0 (包括燃气燃烧释放的热量与空气的物理热