

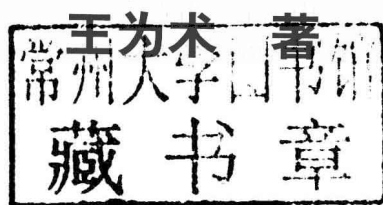
超(超)临界锅炉 内螺纹水冷壁管流动传热 与水动力特性

王为术 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

超(超)临界锅炉 内螺纹水冷壁管流动传热 与水动力特性



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内容摘要

本书系统阐述了作者及其研究集体在超（超）临界锅炉传热与水动力方面的研究成果。全书共分九章，主要内容包括绪论、水和水蒸气的热物理性质、两相流传热试验系统设计和数据处理方法、内螺纹水冷壁管的传热特性、内螺纹水冷壁管摩擦压降特性、垂直上升并联内螺纹水冷壁管自补偿特性、超临界锅炉垂直上升并联水冷壁管热敏感性、超（超）临界锅炉水冷壁水动力特性，以及超（超）临界锅炉膜式水冷壁温度特性。本书可供从事锅炉传热与水动力研究工作的工程技术人员、科学研究人员和高校相关专业的师生参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

超（超）临界锅炉内螺纹水冷壁管流动传热与水动力特性 / 王为术著. —北京：中国电力出版社，2012. 8

ISBN 978 - 7 - 5123 - 3409 - 0

I. ①超… II. ①王… III. ①超临界压力锅炉 - 管道 - 研究②超临界压力锅炉 - 锅炉水动力 - 研究 IV. ①TK229. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 194923 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 8 月第一版 2012 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13 印张 293 千字

印数 0001—2000 册 定价 40.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

超临界流体 (supercritical fluid) 是良好的热载体, 溶解、氧化和水解能力强。它被广泛应用于电力、化工等工业的能量转载和生产技术中, 包括超临界流体发电、超临界流体萃取、超临界流体反应、超临界流体结晶和超临界流体冶金等实际工程, 已发展成为绿色、可持续发展技术, 形成了一种共性技术——超临界流体技术, 并已渗透到材料、生物技术和环境污染控制等高新技术领域。

煤电是电力供应的最大单元, IEA 预测 2030 年全球煤电比例将持续升到 44%, 而在中国, 这一比例将持续高居 70% 以上。众所周知, 煤是非再生资源, 煤燃烧发电存在粉尘、氮/硫污染物和碳排放等诸多问题。因此, 提高煤电效率并降低排放, 一直是国内外学者所关注的课题。20 世纪 50 年代以来, 国内外学者通过超临界流体发电技术途径来提高煤电转化效率。常规超临界机组效率可比亚临界机组高 2%, 而超超临界机组的效率比常规超临界机组还要高 4%。在提高效率的同时, 内螺纹管水冷壁技术和低质量流速技术的采用则保证了超(超)临界火电机组的传热与水动力安全性。在控制污染物排放方面, 多通过火电机组污染控制技术来达到火电机组微排放。国内外开发的多种洁净煤发电技术有循环流化床 (CFBC)、增压流化床联合循环 (PFBC2CC)、整体煤气化联合循环 (IGCC) 及超临界 (SC) 与超超临界技术 (USC)。由此可见, 集超临界流体、内螺纹传热强化和污染物排放控制于一体的火电机组超(超)临界化是火力发电技术的主流和发展方向。

超(超)临界锅炉水冷壁工作在亚临界、近临界和超临界等广泛的压力范围, 其流动传热与水动力特性极其复杂。迄今为止, 超临界水的传热机理、内螺纹管水冷壁的流动传热及水冷壁并联管组的自补偿等特性仍然需要进行深入研究。作者近 10 年来一直致力于超(超)临界锅炉内螺纹水冷壁管内流动传热与水动力特性的研究, 通过理论分析、试验验证及数值模拟等方法, 取得了一定的研究成果, 本书即是这些研究成果的总结。

本书共分九章。第一章主要是超(超)临界发电技术、超临界水冷壁技术、内螺纹水冷壁管流动传热、超临界传热和锅炉水动力研究概况; 第二章论述了水和水蒸气的热物理性质; 第三章论述了内螺纹管流动传热特性试验设计和数据处理方法; 第四章是关于内螺纹管在亚临界、临界区和超临界区传热特性的试验研究和内螺纹管超临界传热数值模拟研究; 第五章是关于内螺纹水冷壁管摩擦压降特性的研究; 第六章和第七章分别是关于超临界锅炉垂直上升并联内螺纹水冷壁管自补偿特性和热敏感性的研究; 第八章是关于内螺纹水冷壁水动力特性的研究; 第九章是超(超)临界锅炉膜式水冷壁温度特性数值模拟的研究。

本书的编写得益于西安交通大学博士生导师陈听宽教授和毕勤成教授的启发、指导和帮助。作者怀着深深的敬意, 感谢引导自己走上多相流流动与传热研究道路的博士生导师

陈听宽教授、罗毓珊研究员和作者的博士后导师毕勤成教授。在书稿的准备过程中,得到了西安交通大学顾红芳教授、李会雄教授、杨冬教授,日本早稻田大学朱晓静博士后,华北电力科学研究院朱宪然博士,西安科技大学王建国博士,西安航天动力研究院张魏静工程师的许多帮助,朱宪然撰写了第二章,朱晓静撰写了第六章。在本书的撰写过程中,吕彦力教授、高峰教授级高工给予了热情的支持、鼓励和指导;在读研究生刘军、张红生、赵鹏飞、梁诚胜、闫广、李帅帅等,也对书稿的顺利完成作出过努力。特别得到了作者所在单位——华北水利水电学院的大力支持和帮助。在此一并向他们表示衷心的感谢!

本书的研究工作得到了国家 863 计划(2002AA526012)、中国博士后基金(20110491656)、河南省高校创新人才计划(2012HASTIT018)、河南省教育厅自然科学基金(2009A470005)项目和河南省热能与动力工程省级特色专业建设项目的资助,特此向支持和关心作者研究工作的单位和个人表示真诚的感谢!

当前,国内外对超临界发电技术中涉及的传热与水动力学基本理论,特别是对超临界流体强化传热机理和强化传热技术缺乏深入、系统的研究。本书在超(超)临界内螺旋管水冷壁传热与水动力特性方面做了一些工作,但限于作者水平,书中难免会存在不足之处,敬请读者批评指正。

作 者

2012 年 6 月 28 日 于郑州

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 超(超)临界发电技术	2
第二节 超(超)临界锅炉运行与水冷壁技术	5
第三节 内螺纹管传热及阻力特性研究概况	7
第二章 水和水蒸气的热物理性质	14
第一节 水的相图和临界点	14
第二节 水的定压蒸发和汽化潜热	15
第三节 亚临界水的热物理性质	17
第四节 超临界及超超临界压力区水的热物理性质	19
第三章 两相流传热试验系统设计和数据处理方法	23
第一节 试验系统设计	23
第二节 试验研究方法	25
第三节 试验数据处理方法	27
第四章 内螺纹水冷壁管的传热特性	35
第一节 亚临界压力区内螺纹管传热特性	36
第二节 临界压力区内螺纹管传热特性	49
第三节 超临界及超超临界压力区内螺纹管传热特性	57
第四节 不同倾角上升内螺纹管传热特性的比较	63
第五节 不同质量流速区内螺纹管传热特性的比较	68
第六节 不同结构内螺纹管传热特性的比较	69
第七节 内螺纹管超临界水传热数值模拟	71
第五章 内螺纹水冷壁管摩擦压降特性	83
第一节 内螺纹管单相摩擦压降特性	85
第二节 内螺纹管汽水两相流动的摩擦阻力	89
第三节 内螺纹管汽水两相摩擦阻力比较	96

第六章 垂直上升并联内螺纹水冷壁管自补偿特性	100
第一节 垂直上升管自补偿特性定性分析	100
第二节 垂直并联双管自补偿特性的数学模型	101
第三节 内螺纹垂直并联管中自补偿特性的试验研究	104
第四节 超（超）临界锅炉垂直管屏自补偿特性的限度	115
第七章 超临界锅炉垂直上升并联水冷壁管热敏感性	116
第一节 水冷壁热敏感性	117
第二节 水冷壁热敏感性系数数学模型	119
第三节 超（超）临界锅炉水冷壁热敏感性	124
第四节 水冷壁安全性分析	128
第五节 热敏感特性数值分析软件实现	132
第八章 超（超）临界锅炉水冷壁水动力特性	137
第一节 水动力计算方法与模型	139
第二节 锅炉受热面系统中间集箱静压分布计算模型	143
第三节 超（超）临界锅炉垂直水冷壁水动力多项式拟合法模型 与程序设计	147
第四节 超（超）临界锅炉螺旋水冷壁水动力非线性方程迭代法 模型与程序设计	157
第五节 超（超）临界锅炉水冷壁水动力计算与分析	165
第九章 超（超）临界锅炉膜式水冷壁温度特性	176
第一节 数学物理问题的分析	176
第二节 膜式水冷壁温度场数理模型及算法	177
第三节 膜式水冷壁边界条件的确定	180
第四节 膜式水冷壁温度场二维计算模型的程序开发	185
第五节 超（超）临界锅炉膜式水冷壁温度场数值计算算例	187
参考文献	193

绪 论

能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础，能源发展利用极大地推进了世界经济和人类社会的发展；但从哥本哈根到坎昆全球气候大会，都昭示着人类将为此付出沉重代价，全球必须联手应对气候问题。我国是全球第二大能源生产和消费国，能源持续增长为经济社会发展提供了重要支持。我国能源需求巨大，主要以煤为主，事实上我国原煤早已突破国际警戒线（50%），2015 年将突破 40 亿 t，原煤的过度生产与巨大消费导致一次能源的过度开发和沉重的环境污染压力。我国总体能源利用率低，能耗指标是全世界平均水平的 5 倍，是日本的 15.5 倍，甚至是印度的 2 倍，能源浪费导致掠夺性能源资源的过量消耗，其结果是对我国环境和生态的永久性冲击。因此，解决我国能源短缺、能源结构和节能减排问题，是影响国家可持续发展和国家安全的战略性问题。

电力是安全、高效、清洁的高品质二次能源，全世界电力总装机正保持 2.5% 的高增长率，国际能源署（IEA）预测 2030 年全世界发电装机容量将达到 4800GW，煤电比例仍将上升到 44% 以上。我国发电装机容量 2011 年底已达到 1050GW，煤电达 760GW，占 72.38%。煤是非再生能源，煤炭燃烧时产生的烟气中含有大量粉尘、有害气体（主要为 SO_x 、 NO_x 等）和温室气体 CO_2 等，因此，火电技术发展必须大幅提高燃煤机组效率并控制污染物排放。国内外正在开发的多种洁净发电技术有循环流化床（CFBC）、增压流化床联合循环（PFBC2CC）、整体煤气化联合循环（IGCC）及超临界（SC）与超超临界技术（USC）。集超临界流体、内螺纹传热强化和污染物排控于一体的火电机组超（超）临界化是火力发电技术的主流和发展方向。朗肯循环（rankine cycle）蒸汽动力机组的效率随蒸汽参数的提高而不断上升，如表 1-1 所示，常规超临界机组效率可比亚临界机组效率高 2%，而超超临界机组的效率比常规超临界机组还要高 4%，如丹麦超超临界机组热效率可达 49%，我国华能玉环电厂 1000MW 超超临界机组的热效率超过 45%，供电煤耗为 288.5g/(kW·h)。

表 1-1 亚临界、超临界以及超超临界机组的净效率和供电煤耗

机组类型	蒸汽参数	机组净效率 (%)	供电煤耗 [g/(kW·h)]
亚临界	17MPa/538℃/538℃	37 ~ 38	330 ~ 340
超临界	24MPa/538℃/538℃	40 ~ 41	310 ~ 320
超超临界	30MPa/566℃/566℃/566℃	44 ~ 45	290 ~ 300

第一节 超(超)临界发电技术

超临界流体的严格定义是指温度和压力处于临界温度和临界压力以上的流体。事实上,将压力超过临界压力的流体归为超临界流体,如超(超)临界锅炉、超临界反应堆的工作流体,可称为超临界工质。超临界工质是良好的热载体,溶解、氧化和水解能力强,因其优秀而奇特的性质,超临界流体技术在电力、化工等工业中得到广泛应用。1950年左右,在锅炉中采用超临界水为工质,开创了超临界火电技术;20世纪50年代初,美国、苏联提出超临界水冷反应堆(supercritical water-cooled reactor, SCWR)概念;20世纪70年代,换热器传热强化技术异军突起,无疑为全球节能减排、应对全球气候变化提供了技术保障和理论支撑。

超临界是一个热力学概念。水在临界状态点的参数是:压力为22.064MPa,温度为373.99℃。理论上认为,当水的状态参数达到临界点时,水的完全汽化在瞬间完成,在饱和水和饱和蒸汽之间不再有汽水两相共存。与较低参数的状态不同,水的传热和流动特性等有较明显的变化。超临界机组是指蒸汽压力达到超临界状态的发电机组。关于超超临界参数的划分,目前国际上在发电行业尚无统一规范,通常把主蒸汽压力在28MPa以上或主蒸汽、再热蒸汽温度在580℃以上的机组定义为超超临界(USC)机组。在我国电力行业,蒸汽参数达到27MPa/580℃/600℃的高效超临界机组,属于超超临界机组。

超(超)临界发电技术最重要的是蒸汽生产设备(锅炉或反应堆)。炉膛水冷壁是超(超)临界锅炉最重要的部件,为确保超(超)临界电站锅炉的安全可靠,炉膛水冷壁的设计是关键。炉膛水冷壁的安全、可靠性首先取决于管壁金属的温度工况,因此,能导致管壁金属超温或壁温长期波动的水冷壁管内工质在流动时的水动力和管内流动传热是两个关键问题。

一、超(超)临界煤粉锅炉技术发展

世界首台试验性的超临界锅炉是西门子公司根据捷克人马克·本生1919年的专利方案制造的。1949年苏联安装了第一台超超临界试验机组,直流锅炉出口参数为29.14MPa/600℃(12t/h),苏联是发展超临界机组最坚定的国家。1956年,联邦德国投运1台参数为34MPa/610℃/570℃/570℃、容量为88MW的机组。美国在20世纪50年代末投运了2台具有代表性的超超临界机组,纵观德国、美国、苏联/俄罗斯、丹麦和日本等国家的超(超)临界发电技术的发展过程,可以发现:超临界机组的典型参数为24.1MPa/538℃/538℃或24.1MPa/538℃/566℃。超超临界机组的主蒸汽压力为25~31MPa及以上,主蒸汽和再热蒸汽温度为580~600℃及以上,再热次数趋向于一次再热。

我国在20世纪60年代曾设计制造了2台超临界锅炉,但由于历史原因中断了试验研究,致使发电技术落后。2004年华能沁北600MW超临界火电机组投运标志我国超临界燃煤发电技术已国产化。2002年超超临界锅炉研发列为国家863重大项目攻关计划,2003年国家经贸委和科技部都把超超临界锅炉列入国家重大技术装备研制计划,2006年华能

玉环 1000MW 机组建成投产，成为我国首座单机百万千瓦容量机组，是我国百年电力史上具有划时代意义的里程碑，它引领我国电力工业跨入了百万千瓦超超临界发电的新时代。2007 年，华能营口二期 600MW 超超临界机组投运标志着我国超超临界燃煤发电技术已国产化。

欧、美、日等国已相继开展将燃煤机组效率提高到 50% 以上的项目研发，欧盟于 1998 年启动 AD 700 (advanced supercritical PF power plant operating at 700℃) 计划，美国启动了 760℃ 超超临界蒸汽计划 (ultra-supercritical steam project)。近十几年，我国通过技术引进和大量的研究工作，已完全掌握了超（超）临界成套机组的制造技术，具备了批量生产超（超）临界成套机组的能力。目前，为解决劣质煤高效洁净发电技术问题，正在大力研发超（超）临界低质量流速垂直管水冷壁技术，包括超临界循环流化床、超临界 W 火焰锅炉。为进一步提高火电机组效率，国家启动研究采用蒸汽参数高达 700℃ 的新一代高参数超超临界机组（超 700），超 700 将是未来燃煤发电技术发展方向之一。

二、超临界循环流化床锅炉技术进展

循环流化床（CFB）燃烧技术应用于发电始于 20 世纪 70 年，其独特而显著的环保性能赢得了各国青睐，特别是我国，拥有循环流化床数量世界最多。CFB 燃烧方式独特，占炉内固体物料 98% 的高温惰性物料可保证任何燃料（占 2%）在 850 ~ 900℃ 稳定高效燃烧，其燃料适应性强，可燃烧煤矸石、垃圾等一切可燃物；宽调节比，锅炉可在 25% BMCR 稳定燃烧；炉内低温、分段燃烧 NO_x 排放少，可实现炉内燃烧中低成本高效脱硫。

CFB 炉内温度和热流密度分布均匀，如图 1-1 所示，煤粉炉膛燃烧器区域热流密度峰值显著高于 CFB，二者的分布规律截然不同，在炉膛水平和垂直方向，CFB 炉内温度更均匀。CFB 燃烧特点特别适合与超（超）临界蒸汽循环结合，超临界 CFB 技术可兼备 CFB 燃烧技术和 SC/USC 蒸汽循环的优点。法国的 Alstom 和美国的 FW 公司率先研发超临界 CFB。2009 年，FW 公司研制的世界首台 460MW 超临界 CFB 机组于波兰 Lagisza 电厂运行。

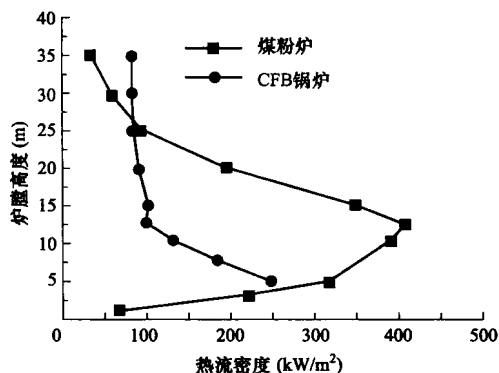


图 1-1 炉膛内热流密度

清华大学、浙江大学、西安热工研究院、哈尔滨锅炉厂有限公司、东方锅炉（集团）股份有限公司、上海锅炉厂有限公司、中国科学院等制造厂家和科研机构都对大容量超（超）临界 CFB 锅炉基础问题进行了研究，取得了丰硕的成果；特别是清华大学，独立建构了世界上新的循环流化床燃烧基本理论体系，独立建构了流化床设计理论、设计导则和计算软件。同时，基于 300MW 等级 CFB 锅炉设计制造和运行基础，“十一五”国家启动自主研发 600MW 超临界 CFB 锅炉的 863 计划，并确定在四川白马电厂建设 600MW 超临界循环流化床示范电站工程。由于磨损问题的存在，超（超）临界 CFB 锅炉必须采用垂

直管屏的炉膛水冷壁结构, 为避免专利纠纷, 则需自主开发内螺纹管技术或采用光管。

三、超临界 W 火焰锅炉技术进展

我国无烟煤储量丰富, 劣质无烟煤占全国煤炭资源总量的 13%, 经济的快速发展导致电煤供应日益紧张, 劣质无烟煤将被大量用于发电, 但劣质无烟煤品质低, 燃烧性和环保性差, 因此劣质无烟煤的高效低污染洁净燃烧发电技术备受关注。W 火焰锅炉采用长火焰、分级配风、敷设卫燃带等关键技术, 使煤粉在距一次风喷口数米处火焰作 180° 转弯向上流动, 整个燃烧室内火焰呈 “W” 状, 可提高燃烧区温度, 增加煤粉在燃烧室的停留时间, 有效解决燃用低挥发分劣质煤遇到的着火温度高、难着火、难燃尽等难题。超临界 W 火焰锅炉通过提高炉膛热流密度、延长火焰行程、煤粉浓淡分离等技术手段, 可使锅炉热效率大为提高。运行表明超临界机组效率高达 47%, 与亚临界机组相比效率提高了 4%, 并能有效降低锅炉烟气中污染物的含量, 是有效解决劣质无烟煤高效低污染发电的最佳途径。

W 火焰锅炉技术于 20 世纪 40 年代由美国 FW 公司首创。90 年代, 东方锅炉股份有限公司独家引进了 FW 公司大型 W 型火焰锅炉的设计制造技术。哈尔滨锅炉厂有限公司则引进了英国三井巴布科克公司 W 型火焰锅炉技术。随着超(超)临界锅炉技术国产化, 我国已具备自主研发超(超)临界 W 型火焰锅炉的能力, 2005 年, 哈尔滨锅炉厂有限公司基于英国三井巴布科克技术和 600MW 超临界锅炉技术, 完成 600MW 超临界 W 型火焰无烟煤锅炉技术开发, 2007 年中标世界首台 600MW 超临界 W 型火焰锅炉项目。东方锅炉(集团)股份有限公司在 600MW 超临界 W 型火焰锅炉中采用低质量流速优化内螺纹管垂直水冷壁技术。

四、超临界水冷反应堆 SCWR

为应对世界能源和全球气候的严峻形势, 必须调整能源结构、发展核能, 俄、美等都坚定后福岛时代仍将大力发展核电, 我国则更为坚定。2008 年冰雪灾害和 “5·12” 汶川大地震凸显我国高煤电比的电力结构致使环保严峻和电力供应重大安全隐患, 因此, 为应对全球环境问题和实现 2020 年 GDP 碳减排承诺, 必须扩大清洁能源供应、减少对煤的依赖, 我国核电政策从适度发展变成积极推进。超临界水冷堆(SCWR)是六种第四代新型反应堆之一, SCWR 是直流型高温高压水冷堆, 热效率可高达 45%, 系统更简化、结构更紧凑安全。SCWR 的高热效率大大提高了核电经济性和竞争力, 相关研究得到世界主要核技术大国的大力支持, 美国、日本、欧盟和中国等多个研究机构正在开展设计和安全分析工作。基于我国现有的核反应堆和超临界火电的研究基础, SCWR 应是我国重点研发的新一代核电技术之一。核电发展史上三里岛、切尔诺贝利和福岛三次核事故表明反应堆的安全影响巨大, 各国加大对反应堆安全传热和堆事故机理开展研究。超临界水热物理特异性决定材料科学和传热流动科学问题是超临界水冷堆的两大难题和焦点, 在超临界水冷反应堆中, 堆芯棒束通道的流动传热与热工水力特性对整个系统的安全和经济运行起着至关重要的作用。超临界水在拟临界区的奇异变化产生了完全不同于常规单相流也有别于两相流

的流动传热特征。超临界压力下水的热传输特性与 PWR 显著不同, SCWR 流道独特(狭小、非圆)而复杂, 承受兆瓦级高热流密度和强烈核热反馈, 且冷却剂系统启停瞬态、运行和事故工况覆盖亚临界单相与两相、跨临界和超临界多个区域, 其热物性和理化性跨度极大, 对诸如此类基本过程的规律性和机理性认识是发展 SCWR 技术必须深入研究和亟待解决的问题。

第二节 超(超)临界锅炉运行与水冷壁技术

一、超(超)临界锅炉运行特点

超(超)临界锅炉的运行方式主要有定压运行和变压运行两种基本形式。定压运行依靠改变汽轮机调节汽门的开度来改变功率, 而汽轮机前的主蒸汽压力和温度保持不变; 变压运行则是汽轮机的调节汽门基本保持全开, 机组变功率依靠改变汽轮机前的主蒸汽压力(初压)来实现, 但过热蒸汽温度、再热蒸汽温度仍维持在额定值。如图 1-2 所示, 变压运行机组锅炉水冷壁工质压力必须在亚临界到超(超)临界压力区变化, 在不同的压力下, 工质在流动时的传热与水动力特性有较大的差别, 这使得管内流体的传热与流动特性十分复杂, 加之在临界压力区和超临界压力下的拟临界区, 工质物性变化剧烈, 使管内工质的传热和流动规律更为复杂, 出现传热恶化、水动力不稳定问题的可能性加大。由于超(超)临界锅炉水冷壁管内工质传热和流动规律的复杂性, 有许多问题尚不明确。

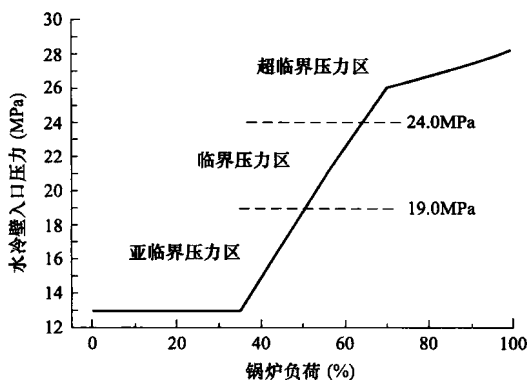


图 1-2 水冷壁入口压力与超(超)临界锅炉负荷

变压运行时, 锅炉出口及汽轮机各级的蒸汽温度几乎不变。这样, 汽轮机金属的热应力、热变形小, 有利于快速启动和变负荷, 极大地提高了机组运行的机动性。现代电网峰谷差日益加大, 而且核电站和水电站一般适于在基本负荷下运行, 这就要求火电机组要具有更大的灵活性, 不仅能带基本负荷, 也要能适应频繁的负荷变化, 在经常快速启停的条件下, 具有较高的使用寿命, 具有带低负荷的能力; 而且在低负荷下, 能有较高的热效率。因此, 在超超临界参数机组中, 变压运行超超临界锅炉得到了广泛的关注。然而, 对于变压运行锅炉来说, 其运行方式使工作条件变得更为复杂, 特别是锅炉水冷壁, 从额定负荷变化到部分负荷时, 其压力变化范围较大, 致使水冷壁内的工质相态变化特别复杂, 以致水冷壁水动力特性及传热特性都变得比较复杂。

变压运行超超临界直流锅炉设计中采用汽水分离器设备完成低负荷和启动运行时的汽水分离。在启动过程中, 锅炉以再循环模式作湿态运行时, 汽水混合物在汽水分离器内分

离后,蒸汽自分离器上部引出,而分离出的水经由启动循环泵送往省煤器和水冷壁系统进行再循环运行,而在锅炉结束启动阶段达到最低直流负荷后,由于启动泵已切除,启动系统进入干态运行模式,此时汽水分离器内全部为蒸汽,在超临界压力下,汽水分离器只起到蒸汽汇合集箱的作用。变压运行超超临界锅炉在低负荷下,通常有采用再循环泵和不采用再循环泵两种运行方式。采用再循环泵方式运行的超超临界锅炉,随着负荷的增加,要历经低负荷控制循环、亚临界直流、超临界和超超临界直流四个运行阶段;而不采用再循环泵运行的超超临界锅炉,随负荷增加,只经历亚临界直流、超临界直流和超超临界直流三个阶段。控制循环运行时,循环压头除依靠下降管系统本身的有效压头外,还由再循环泵提供循环压头,水冷壁入口是单相的水,水冷壁出口为汽水混合物,此时,水冷壁蒸发管内工质比体积显著增大,增加水冷壁出现流量偏差及热力偏差的可能性,从而导致水冷壁水动力不稳定,引起管内工质停止、倒流及多值性问题。亚临界直流运行时,循环压头全部由给水泵提供,水冷壁出口为过热蒸汽。当水冷壁系统处于超临界和超超临界直流运行时,工质循环由给水泵提供压头,水冷壁中不再存在蒸发管段。

二、超(超)临界锅炉水冷壁

(一) 超(超)临界锅炉水冷壁与内螺纹管

6 超(超)临界锅炉有螺旋管圈和垂直管圈两种水冷壁形式。与亚临界压力锅炉相比,超(超)临界锅炉的最大特点体现在水冷壁的设计方面。超(超)临界锅炉水冷壁设计必须体现超(超)临界、直流锅炉与变压运行的三大要素。为防止水冷壁超温爆管,传统的超(超)临界锅炉的水冷壁是按高质量流速进行设计的。螺旋管圈水冷壁的最大特点是在达到足够的质量流速的同时,其管径和管数可不受炉膛周界尺寸的限制,解决了周界尺寸与质量流速之间的矛盾,只要增减螺旋上升角度,就可以改变管数,在管径选用上有一定的灵活性,可以采用较大管径的光管水冷壁。由于工作在下辐射区的水冷壁同步经过受热最强和最弱的区域,螺旋管圈可有效地补偿沿炉膛四周的热偏差,不需要根据热流密度分布进行并联管组中复杂的流量分配,在低负荷下仍能保持并联管组流动的稳定性,且因吸热偏差小而在水冷壁进口可不设置分配流量的节流圈。螺旋管圈水冷壁的主要缺点是水冷壁系统结构复杂,以致对设计、制造和安装的要求较高,水冷壁流动阻力较大。20世纪70年代,传热强化技术风靡于世,内螺纹管传热性能优越,80年代中期苏尔寿(Sulzer)公司开发了内螺纹管垂直水冷壁,日本三菱重工与Sulzer和Alstom-CE公司合作开发了内螺纹管垂直水冷壁超临界锅炉,采用 $1500 \sim 2000 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的质量流速完全可确保水冷壁的可靠运行。设计采用内螺纹管防止超临界和超超临界锅炉变压运行至亚临界区域时,水冷壁系统中发生膜态沸腾;在各水冷壁管入口处设置节流圈,使其管内流量与其吸热量相适应,以消除各管圈的热偏差。1989年以来,全世界已有多台采用垂直管圈内螺纹水冷壁结构的500~1000MW超(超)临界锅炉成功投入商业运行。

(二) 低质量流速垂直管水冷壁技术

超(超)临界锅炉发展初期,光管水冷壁多次发生超温爆管和水动力不稳定,传热恶化严重。内螺纹管具有良好的传热特性,内螺纹管内表面的槽可破坏蒸汽膜的形成,因

此直到较高的含汽率也难以形成膜态沸腾,而能维持核态沸腾,从而抑制金属温度的升高。事实上,超(超)临界锅炉(包括垂直管圈、螺旋管圈)在下炉膛均采用内螺纹管抑制膜态沸腾传热恶化,降低壁温。

内螺纹管垂直水冷壁的质量流速只有螺旋管圈水冷壁的 $1/2$ 左右,而且水冷壁管总长度只有螺旋管圈展开长度的 $2/3$ 左右,垂直水冷壁的摩擦阻力在系统总阻力中所占的比例相对较小,因此具有保持正向流动的特性,即个别管子吸热量增加时,管内流量也会自动增加,具有部分自补偿的能力,不仅能保持水动力的稳定性,而且也增加了水冷壁管的运行可靠性。西门子公司对低质量流速下多种内螺纹管的传热和阻力特性进行了系统的研究,并在此基础上开发了低质量流速本生垂直管(benson vertical tube)直流技术。其主要特点是利用低质量流速下流量分配的自动补偿特性(或称自然循环特性,即受热最强的管子具有最大的质量流速)和优化内螺纹管所具有的良好传热性能,实际运用中多采用满负荷低质量流速。该方案可应用于容量为 $350 \sim 1000\text{MW}$ 的锅炉,最低直流运行负荷降到 $20\% \text{ BMCR}$,低质量流速垂直管水冷壁技术具有巨大的优势。当超(超)临界锅炉采用本生垂直管设计时,可采用 $600\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 及以下的质量流速,而在传统的超(超)临界锅炉水冷壁设计中,工质质量流速却需超过 $1100\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。由于低质量流速垂直管水冷壁技术具有自补偿特性,上升管中工质质量流速随吸热量的增加而增大,因此降低了管屏对热偏差的敏感程度,减小了管屏出口工质的温度偏差,保证了锅炉的安全运行。低质量流速垂直管水冷壁技术既适用于煤粉锅炉,也适用于循环流化床锅炉。

第三节 内螺纹管传热及阻力特性研究概况

锅炉水冷壁管传热与水动力特性的研究方法主要是试验、数值计算。随着锅炉技术的发展,水冷壁的研究不断在亚临界、近临界和超临界压力区开展。通过研究,逐步揭示了水冷壁亚临界区沸腾传热、传热恶化,超临界传热机理,确定了水冷壁传热规律、传热安全预测。通过理论和数值计算研究,建立了水动力模型、水冷壁热敏感性和自补偿特性模型。通过研究,不断研发出了内螺纹水冷壁技术、低质量流速垂直水冷壁技术满足超(超)临界发电技术需要,随着计算流体技术的发展,CFD 技术也逐步用于锅炉水冷壁传热研究。多种研究方法相得益彰,进一步加强了水冷壁传热与水动力的研究力度和深度。

一、内螺纹管内亚临界压力沸腾传热特性研究

在亚临界压力下,存在汽液两相共存沸腾传热区,核态沸腾的传热很好,但随着含汽率的增加会出现膜态沸腾,受热壁面被传热能力很弱的汽膜覆盖,不能得到主流体的及时冷却;当含汽率更高时,受热壁面的液膜被蒸干,壁温飞升,出现传热恶化,因此,亚临界压力下的传热恶化规律被许多研究者所重视。近 50 年来,由于核反应堆和大型电站锅炉蒸发受热面的设计需要,对于亚临界压力下水在管内沸腾的传热恶化问题进行了大量研究,沸腾传热恶化机理已较清楚,亚临界压力区发生的传热恶化现象可分为两类:偏离核态沸腾 DNB(或称为膜态沸腾)为第一类传热恶化,在动力工程设备中出现的恶化多为

第一类传热恶化, 后果往往非常严重; 第二类传热恶化, 即烧干 (dry out)。第一类传热恶化通常用临界热流密度 (CHF) 来表示, 第二类传热恶化则用临界干度 (χ_{cr}) 表示。

诸多学者对管内汽水两相流沸腾传热的临界干度和临界热流密度进行了大量研究。在这些试验中, 绝大多数是研究均匀加热垂直上升光管这种最简单、最普遍的管型, 而关于锅炉工业中采用的内螺纹管和更高压力范围的研究却极少。自 1858 年, 已经建立了 WAPD、AECL、PU - BTPFL 三个临界热流密度骨架表。

内螺纹管是一种强化流动的管件, 其内壁的螺纹结构具有两种作用: 其一, 可以有效破坏层流底层, 并使近壁面难以形成稳定的汽膜; 其二, 可以使主流体以螺旋方式前进, 产生的较大离心力能将密度较大的液相流体甩向壁面。因此, 即使在干度较高的情况下, 管壁也可以得到有效冷却。相同条件下, 光管在质量含汽率很低, 甚至工质过冷时, 就发生传热恶化, 壁温飞升值可以达到或超过 500°C ; 而内螺纹管在含汽率大于 0.5 之后, 壁温才开始升高, 且壁温升高值也远低于光管。内螺纹管中流体的旋流作用可以很大程度地提高 CHF 发生的临界值, 蒸汽干度可以提高到 85% 以上。螺纹结构无疑对管内流动及换热有着极大的影响。光管和单头的内螺纹管在发生传热恶化时的壁温飞升值较高, 而相同条件下 B&W 内螺纹管及来复线型内螺纹管的传热则在较高干度的区域仍然保持核态沸腾, 传热系数比光管要高 3~5 倍。表 1-2 给出了内螺纹管亚临界压力汽水两相传热与壁温特性相关的研究。相关文献中, 压力、质量流速等系统参数, 内螺纹管的结构参数及管子布置方式等管内传热的影响因素均得到了系统而深入的研究, 感兴趣的读者不妨择而读之。

表 1-2 内螺纹管中亚临界压力汽水两相流动传热特性研究一览表

年份	作 者	工质	内 容
1962	H. S. Swenson	水	传热, 与光管做对比研究
1972	Nishikawa (西川)	水	不同结构内螺纹管的传热、阻力, 与光管对比研究
1974	Watson	水	不同角度内螺纹管 CHF 和临界质量流速, 与光管对比研究
1974	Nishikawa	水	不同结构内螺纹管的传热
1982	M. Iwabuchi	水	传热恶化, 与光管做对比研究
1986	W. Köhler	水	传热恶化, 与光管做对比研究
1986	J. B. KITTO	水	不同结构内螺纹管的传热, 与光管做对比研究

在内螺纹管汽液两相流传热研究方面, Swenson 等对光管和 B&W 内螺纹管, 在压力为 20.59MPa 、热流密度为 $279.1 \sim 561.7\text{kW/m}^2$ 、质量流速为 $949 \sim 1356\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 条件下进行了传热试验。Nishikawa 等人除了对上述 B&W 内螺纹管、正反方向开有螺旋形槽的来复线型内螺纹管及螺旋角较大的内螺纹管等三种试验管进行了较低流量下的传热研究外, 还研究对比了交叉形来复线型管、单来复线型管及 Babcock 形单头内螺纹管的传热特性。Watson 等在参数为压力 19MPa 、质量流速为 $200 \sim 1800\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和热流密度为 $200 \sim 1200\text{kW/m}^2$ 的范围内, 对倾斜和垂直布置的光管及内螺纹管的临界热流密度

三、超临界流体的传热特性及摩擦阻力特性研究进展

自 1950 年，以大型锅炉和 SCWR 传热为背景，超临界流体传热得到了广泛关注。研究超临界流体传热的工质有水、CO₂、氢、氦、氮和烃类等。在 20 世纪 50 ~ 80 年代，有关超临界压力下流体的传热研究工作主要是在苏联和美国进行的。这些研究工作基本上是以大型电站锅炉中的传热为背景的。因此，在以水为工质的研究中，主要针对光管、内螺纹管等锅炉用管。

诸多的研究成果中，不同研究者提出的经验关联式和理论分析的结果之间存在很大的差别，即使相同学者在相似条件下得到的试验数据也不一致，造成这一现象的可能原因之一是流体物性的不确定性。关于超临界流体传热研究综述性内容如表 1-4 所示。

表 1-4 超临界流体传热研究综述类内容一览表

年份	作者	工质	内 容
1967	Hall	H ₂ O、CO ₂	传热试验、数值分析
1970	Petuhkov	H ₂ O	传热及阻力试验、关联式
1971、 1978	Hall	H ₂ O、CO ₂	传热试验、关联式、数值分析
1979	Jackson	H ₂ O、CO ₂	传热试验、关联式、数值分析、力学研究
1991	Polyakov	H ₂ O	传热及阻力试验、关联式、数值分析、力学研究
2000	Kirillov	H ₂ O	传热、传质、腐蚀、关联式
2001	X. Cheng	H ₂ O	传热试验、关联式、数值分析

超临界水的传热试验研究始于 20 世纪 50 年代，各国学者对超临界压力下水在光管内的流动与传热试验研究报道在表 1-5 中给出。

表 1-5 光管中超临界水传热试验研究一览表

年 份	作者	工质	内 容
1957	Miropolski	水	传热
1958	Dickinson	水	传热
1961	Goldman	水	传热、传热恶化
1959、1962、1963、 1966、1967、1968	Shitsman	水	传热、传热恶化、动态特性、自然对流传热、浮力作用
1962、1964、1965	Bishop	水	传热、传热恶化
1963	Domin	水	传热、动态特性
1963	Fritsch	水	自然对流传热
1965	Swenson	水	传热、传热恶化
1967	Vikrev	水	传热、动态特性、传热恶化
1970	Ackermann	水	传热、拟沸腾现象
1971	Belyakov	水	传热、传热恶化