

Assembly
of Waste Heat
Power Generation
Technology
for Cement Kiln

水泥窑纯低温余热
发电技术大全

中国水泥网 编
www.Ccement.com

水泥窑纯低温余热 发电技术大全

中国水泥网 编

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

水泥窑纯低温余热发电技术大全/中国水泥网编. —北京:
中国建材工业出版社, 2009. 3
ISBN 978-7-80227-536-2

I. 水… II. 中… III. 水泥—化学工业—余热发电—指南 IV. TM617-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 023584 号

内 容 简 介

本书以节能减排、节能降耗为主旨, 主要介绍了水泥工业余热发电理论知识、余热发电相关设备、设备操作规程及国内从事余热发电单位介绍、相关领域项目融资介绍及国内相关法律法规介绍。

本书是一本推动水泥工业余热发电事业的专业图书, 书中所附图例及实践项目具有借鉴价值, 可供业内人士参考使用。

水泥窑纯低温余热发电技术大全

中国水泥网 编

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市西城区车公庄大街6号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京中科印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 18

字 数: 459 千字

版 次: 2009年3月第1版

印 次: 2009年3月第1次

书 号: ISBN 978-7-80227-536-2

定 价: 50.00 元

本社网址: www.jcbs.com.cn

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。联系电话: (010) 88386906

编委会名单

(按姓氏笔画排序)

主 任 徐永模

名誉主任 任沁新 张 奇 余 彪

副 主 任 王坚军 王继生 宋纪元 何启贤 陈作涛
何承发 张英斌 邵 俊 何高达 张高佐
何新平 陈锡明 宣炎明 俞章法 隋元春
颜飞龙

编 委 王 坤 王 俊 叶国华 安大峰 毕少斌
华 华 江 勋 刘 勇 匡 鸿 李大明
狄东仁 张建新 陈 圆 李 艳 李海涛
张 敏 张 富 郝景周 姚 源 袁 克
唐金泉 葛立武 董兰起 彭 岩 詹艳慧
蔡志明

前 言

我国是世界上最大的水泥生产和消费国，也是能源紧缺国家，充分利用水泥窑余热发电技术已经成为水泥工业发展的一个主流方向。所谓纯低温余热发电，就是利用新型干法水泥窑窑头和窑尾废气余热进行发电的一项新技术，也是水泥企业降低电耗的有效途径。纯低温余热发电的建设不仅有较好的经济投资回报，更能够带来良好的社会效益。在国际上，水泥余热发电已不是新技术，但是对于中国的水泥工业来说，刚起步不久的余热发电技术仍然处于不断发展的阶段。

中国水泥网在组织过多次纯低温余热发电峰会的基础上，在许多研发单位和水泥企业开展纯低温余热发电实践的基础上，组织编写了《水泥窑纯低温余热发电技术大全》这本书，试图全面、系统地总结我国水泥窑纯低温余热发电的技术进步历程，总结余热发电企业在技术改造、设备运行和维护等方面的经验，介绍各技术研发单位的技术与装备，为水泥企业和技术人员提供及时、全面的技术支持。

本书全面介绍了水泥窑纯低温余热发电技术的发展过程、技术特点、技术装备、技术标准、操作规程、故障处理、政策法规等内容，旨在帮助水泥企业解决设计、安装、维护、管理、升级改造等诸多方面的疑难问题，力争成为新型干法水泥企业必备的工具书。

本书第一章由大连易世达能源工程有限公司总工程师唐金泉编写，第二章由洛阳理工学院材料系李海涛副教授编写，第六章由中国节能（香港）有限公司编写，第七章由上海川吉投资管理有限公司编写。其余各章得到了安徽海螺川崎工程有限公司、中材节能发展有限公司、中信重型机械公司、成都建筑材料工业设计研究院、华效资源有限公司、南京凯盛水泥工业设计研究院、杭州锅炉集团、杭州中能汽轮动力公司、北京通达耐火技术股份有限公司、郑州诚鑫耐火材料有限公司等多家单位的大力支持和配合。在此向所有供稿者表示感谢。

编者
2009年3月

目 录

第一章 概 述	1
第一节 水泥工业发展余热发电技术的意义和目的.....	1
第二节 水泥工业余热发电技术的发展历程.....	4
第三节 我国水泥窑纯低温余热发电技术构成及发展目标	10
第四节 水泥窑中低温余热发电技术评价方法的讨论	43
第二章 余热发电理论知识	49
第一节 热力学基本知识	49
第二节 传热学基本知识	56
第三节 余热发电技术理论基础	59
第四节 烟气热能的利用	71
第三章 主要承建余热发电单位技术介绍	84
第一节 海螺川崎水泥窑纯低温余热发电技术简介	84
第二节 中材节能水泥窑纯低温余热发电技术简介	91
第三节 中信重机水泥窑纯低温余热发电技术简介	97
第四节 成都院水泥窑纯低温余热发电技术简介.....	115
第五节 华效资源有限公司水泥窑余热发电的技术与装备.....	122
第六节 大连易世达公司水泥窑余热发电技术简介.....	129
第七节 天壕节能科技有限公司水泥窑余热发电技术简介.....	143
第八节 南京凯盛水泥窑余热发电技术简介.....	147
第四章 余热发电操作注意事项与日常维护	150
第一节 概 述.....	150
第二节 余热锅炉常见事故的处理方法.....	150
第三节 汽轮机事故处理.....	152
第四节 辅助设备运行维护和事故处理.....	160
第五节 其他余热发电常见问题解答.....	169
第五章 余热发电相关设备	175
第一节 水泥窑纯低温余热锅炉.....	175
第二节 水泥窑纯低温余热汽轮机.....	182

第三节	水泥窑余热发电自控系统	190
第四节	DEH 系统	192
第五节	水泥窑余热发电所用耐火材料	197
第六节	超强耐磨陶瓷涂料	201
第六章	余热发电项目融资	204
第一节	总 论	204
第二节	项目融资概述	204
第三节	BOT 项目融资模式	205
第七章	清洁发展机制与水泥行业节能减排	209
第一节	清洁发展机制概述	209
第二节	CDM 项目开发及实施流程	210
第三节	清洁发展机制项目开发进展	213
第四节	水泥行业 CDM 项目开发机遇	216
第五节	水泥行业 CDM 项目开发进展	221
第六节	案例分析	223
附 录		225
	国务院办公厅关于转发发展改革委等部门节能发电调度办法（试行）的通知	225
	国务院批转节能减排统计监测及考核实施方案和办法的通知	228
	国务院关于加强节能工作的决定	246
	国家发展改革委关于印发节能中长期专项规划的通知	251
	关于印发《国家鼓励的资源综合利用认定管理办法》的通知	264
	“十一五”十大重点节能工程实施意见（节选）	269

第一章 概述

第一节 水泥工业发展余热发电技术的意义和目的

能源、原材料、水、土地等自然资源是人类赖以生存和发展的基础，是经济社会可持续发展的物质保证。而随着人类社会的进步，经济的发展，资源消耗速度的加快，资源消耗量也越来越大。以地球有限的资源支撑人类社会的无限发展，将使地球资源供应越来越不堪重负，供求矛盾也越来越大。近年来的“煤电油运”日趋紧张，油价、煤价的大幅上涨就是这种矛盾的具体体现。

在社会经济的众多行业中，钢铁、冶金、水泥、玻璃是社会及经济发展的重要基础物资，这些行业一方面消耗大量的能源，另一方面也造成大量的能源浪费和环境污染。

以我国为例，简述如下：

2007年全国水泥行业有近6000家水泥生产厂，年总生产能力约为16亿t（2007年实际产量约为13亿t）；钢铁行业有近500家生产企业，年总生产能力约为5亿t（2007年实际产量约为4.7亿t），加上冶金、玻璃行业的产能，全国每年这几个行业需要消耗一次能源（折标准煤）约4.48亿t，同时消耗电力3750亿度。上述四个行业所消耗的一、二次能源的总量中，有近30%以上是以400℃以下废气余热的方式被排入大气浪费掉的，每年相当于浪费1.3亿t标准煤、增加二氧化碳排放量3亿t以上。

再以我国水泥行业为例，简述如下：

至2007年年底，我国境内建成并已投入生产运行的新型干法水泥生产线约为796条。为了完成水泥工业结构调整任务，国家发改委制定的“十一五”发展目标是：2010年水泥预期产量在12.5亿t（2007年的产量已经超出预期，达到13.4亿t，2008年水泥产量将达到14亿t以上），其中新型干法水泥比重提高到70%，水泥散装率达到60%；累计淘汰落后生产能力2.5亿t；企业平均生产规模由2005年的20万t提高到40万t左右，企业户数减少到3500家左右；新型干法水泥吨熟料热耗由130kg下降到110kg标准煤，采用余热发电生产线达40%，水泥单位产品综合能耗下降25%。预计到2015年，新型干法水泥生产线的数量将达到1200条左右。如果按照“十一五”预期产量测算，全国水泥行业仍将年消耗1.375亿t标准煤，同时消耗1250亿度电。如果不采取相应的资源综合利用措施，仅水泥行业每年浪费的能源就可达4000万t标准煤，年增加二氧化碳排放量1亿t以上。

自1985年起，水泥工业开始开展水泥窑余热发电技术的研究、开发、推广、应用工作：从20世纪80年代初为水泥干法中空窑配套高温余热发电技术起，到20世纪90年代为初期的新型干法窑配套带补燃锅炉的中低温余热发电技术，再到21世纪为成熟的新型干法窑配套纯低温余热发电技术。也就是说，水泥窑余热发电技术是随着水泥工艺技术的发展而不断发展的，同时也为我国水泥工业的发展、节能技术的进步、推动资源综合利用工作的开展作

出了重要贡献，为其他行业树立了典范。

以水泥窑纯低温余热发电技术的应用为例，简述如下：

截至 2008 年 6 月，全国水泥行业在新型干法水泥生产线上已经配套建设各种类型的纯低温余热电站约 186 座（包括已经投产运行和正在建设的余热电站），形成年余热发电量 98 亿度的能力，相当于年节约 380 万 t 标准煤、二氧化碳减排 980 万 t。按照到 2015 年国内 1200 条新型干法水泥生产线中有 70% 配套建设纯低温余热电站的目标，2009 ~ 2015 年的 6 年内，水泥行业共需配套建设纯低温余热电站的新型干法水泥生产线条数为 600 余条，即平均每年 100 余条，每年形成余热发电量 56 亿度，相当于年节约 210 万 t 标准煤、二氧化碳减排 540 万 t 的能力。

水泥窑余热发电技术的研究、开发、推广、应用为其他行业开展资源节约及资源综合利用工作提供了成功的范例。为了推进我国节能、资源综合利用工作的开展，温家宝总理在十届人大三次会议上的《政府工作报告》对能源资源节约和合理利用提出了明确要求：“注重能源资源节约和合理利用。缓解我国能源资源与经济社会发展的矛盾，必须立足国内，显著提高能源资源利用效率。一要坚决实行开发和节约并举，把节约放在首位的方针。鼓励开发和应用节能降耗的新技术，对高能耗、高物耗设备和产品实行强制淘汰制度。二要抓紧制定专项规划，明确各行业节能降耗的标准、目标和政策措施。抓好重点行业的节能、节水、节材工作。鼓励发展节能环保型汽车、节能省地型住宅和公共建筑。三要大力发展循环经济。从资源开采、生产消耗、废弃物利用和社会消费等环节，加快推进资源综合利用和循环利用。积极开发新能源和可再生能源。四要加强矿产资源开发管理工作。整顿和规范矿产资源开发秩序。完善资源开发利用补偿机制和生态环境恢复补偿机制。五要大力倡导节约能源资源的生产方式和消费方式，在全社会形成节约意识和风气，加快建设节约型社会。”

根据这个总体要求，国家从中央到地方的各级政府将开展节能、资源综合利用工作提到了前所未有的高度，不但在行政法规上对节能、资源综合利用工作提出了更高的要求，而且在政策及资金上对这项工作也给予了强有力的支持。

国家发改委与科技部为贯彻落实中央的要求，以国家《节能中长期专项规划》为依据，以进一步推进节能工作、引导节能技术进步为目的，共同组织起草颁发了《我国节能技术政策大纲》，该大纲进一步明确支持水泥、钢铁、冶金等行业节能技术的研究、开发及应用。

开展资源节约及综合利用已是摆在世人面前、涉及人类生存和发展的重大课题，我国水泥行业发展水泥窑余热发电技术的目的和意义也就在于此。

一、降低能耗、保护环境

水泥熟料煅烧过程中，由窑尾预热器、窑头熟料冷却机等排掉的 400℃ 以下低温废气余热，其热量约占水泥熟料烧成总耗热量的 35% 以上，造成的能源浪费非常严重。水泥生产，一方面消耗大量的热能（每吨水泥熟料消耗燃料折标准煤为 100 ~ 115kg），另一方面还同时消耗大量的电能（每吨水泥约消耗 90 ~ 115kW · h）。如果将排掉的 400℃ 以下低温废气余热转换为电能并回用于水泥生产，可使水泥熟料生产综合电耗降低 60% 或水泥生产综合电耗降低 30% 以上，对于水泥生产企业：可以大幅减少向社会发电厂的购电量或大幅减少水泥生产企业燃烧燃料的自备电厂的发电量，以大大降低水泥生产能耗；可避免水泥窑废气余热

直接排入大气造成的热岛现象，同时由于减少了社会发电厂或水泥生产企业燃烧燃料的自备电厂的燃料消耗，可减少 CO₂ 的排放而有利于环境保护。

二、为“建设节约型社会、推进资源综合利用”政策的推行提供技术支持

节能是我国经济和社会发展的一项长远战略方针，也是当前一项极为紧迫的任务。要促进社会的可持续发展，实现全面建设小康社会的宏伟目标，必须推动全社会进行节能降耗，提高能源利用效率，缓解能源约束矛盾和环境压力。同时，节能必须依靠技术进步，从总体上看，我国在技术研发上投入不足，创新能力弱，先进适用的节能技术，特别是一些有重大带动作用的关键技术开发不够。如果没有相应的技术支持，那么节能减排将成为一句空话。在发改委颁布的《节能中长期专项规划》中，明确要求水泥行业节能重点是发展新型干法窑外分解技术，提高新型干法水泥熟料比重，积极推广节能粉磨设备和水泥窑余热发电技术，对现有大中型回转窑、磨机、烘干机进行节能改造，逐步淘汰机立窑、湿法窑、干法中空窑及其他落后的水泥生产工艺。因此，纯低温余热发电是一项有效降低能耗的先进技术，并已经在行业内实现成熟应用，值得普遍推广。

三、推进清洁发展机制（CDM）项目

清洁发展机制是《京都议定书》第十二条确定的一个基于市场的灵活机制，其核心内容是允许附件一缔约方（即发达国家）与非附件一国家（即发展中国家）合作，在发展中国家实施温室气体减排项目。

清洁发展机制的设立具有双重目的：促进发展中国家的可持续发展和为实现公约的最终目标作出贡献；协助发达国家缔约方实现其在《京都议定书》第三条之下量化的温室气体减（限）排承诺。通过参与清洁发展机制项目，发达国家的政府可以获得项目产生的全部或者部分经核准的减排量，并用于履行其在《京都议定书》下的温室气体减（限）排义务。对于发达国家的企业而言，获得的 CERs^① 可以用于履行其在国内的温室气体减限排义务，也可以在相关的市场上出售获得的经济收益。由于获得 CERs 的成本远低于其在国内采取减排措施的成本，发达国家政府和企业通过参加清洁发展机制项目可以大幅度降低其实现减排义务的经济成本。

对于发展中国家而言，通过参加清洁发展机制项目合作可以获得额外的资金和（或）先进的环境保护技术，从而可以促进本国的可持续发展。因此，清洁发展机制是一种“双赢”的机制。清洁发展机制合作也可以降低全球实现温室气体减排的总体经济成本。

四、为水泥生产企业降低生产成本、提高经济效益提供技术手段

水泥生产企业建设余热电站，投资小，见效快，可以大幅降低水泥生产能耗（即成本），相应地可以大幅提高企业经济效益。

五、为钢铁、冶金等高耗能企业开展降低生产成本、提高经济效益、加快开展资源综合利用工作提供可以借鉴的经验

^① CERs 是指经核证的温室气体减排量。

第二节 水泥工业余热发电技术的发展历程

一、水泥工业余热发电工艺及装备技术的起源

我国水泥窑余热发电技术源于20世纪30年代日本人在我国东北及华北地区建设的若干条中空窑高温余热发电站,其水泥窑废气温度为 $800\sim 900^{\circ}\text{C}$ 、熟料热耗为 $6700\sim 8400\text{kJ/kg}$,所配套的高温余热发电系统的发电能力为每吨熟料 $90\sim 130\text{kW}\cdot\text{h}$ 。自20世纪80年代起至90年代末,为了适应国民经济的高速发展,考虑到水泥生产技术的限制,国内陆续建成了大量的干法中空窑。这种新建的干法中空窑,其废气温度仍为 $800\sim 900^{\circ}\text{C}$,熟料热耗 $6700\sim 8400\text{kJ/kg}$ 。为了降低水泥生产能耗,同时也为了解决电力供应不足的矛盾,自1985年起,国内开始开展水泥窑高温余热发电技术的研究、开发、推广、应用工作。至20世纪90年代末,利用水泥窑高温余热发电技术,为国内水泥行业约280条干法中空窑配套建设了高温余热电站,随着高温余热发电技术的不断完善和进步,高温余热发电系统的发电能力由每吨熟料 $90\sim 130\text{kW}\cdot\text{h}$ 逐步提高到 $150\sim 175\text{kW}\cdot\text{h}$ 和 $175\sim 195\text{kW}\cdot\text{h}$ 。这项技术的研究、开发、推广、应用为我国水泥工业的发展作出了重要贡献,也为我国开展中低温余热发电技术的研究、开发奠定了基础和积累了经验。

二、水泥工业中低温余热发电技术研究课题的提出及研究开发过程

1. 水泥工业中低温余热发电技术研究课题的提出

20世纪80年代末,水泥生产技术的发展使新型干法水泥熟料煅烧技术得以应用,此时,水泥生产过程中的废气余热温度已降至 450°C 以下的中低温条件,出于水泥工业节能降耗、提高企业经济效益的需要,也为了解决供电不足的矛盾,国家在“八五”期间安排了国家重大科技攻关项目——《水泥厂中低温余热发电工艺及装备的研究开发》工作。针对这一项目,根据当时国内火力发电主要设备(锅炉、汽轮机、发电机)中的汽轮机设计、制造、材料技术的限制,原国家建材局确定项目的开发工作走两条技术线路,其一利用国产标准系列的汽轮机开发研制带补燃锅炉的中低温余热发电工艺及装备,即原国家建材局委托天津水泥工业设计研究院承担的“八五”国家重大科技攻关项目课题——《带补燃锅炉的中低温余热发电工艺及装备的研究开发》;其二开发研制适用于水泥厂纯中低温余热发电的特种汽轮机,即原国家建材局委托中国建筑材料科学研究院承担的“八五”国家重大科技攻关项目课题——《双流中低温余热发电系统及螺杆膨胀机的研究开发》。

2. 中低温余热发电技术的研究开发过程

针对上述两个课题,天津水泥工业设计研究院、中国建筑材料科学研究院分别开展了各自项目具体的研究工作。

(1) 天津水泥工业设计研究院的研究工作

根据其所承担的“八五”攻关课题任务,经过对热能动力循环理论及在此之前该院已经设计投产的多个中空窑高温余热电站热力循环系统及装备在生产运行过程中所存在问题的细致分析和总结,结合新型干法水泥生产线的工艺特点、废气余热品位、废气余热分布、水泥生产系统与余热发电系统结合起来后的复杂性,确定了课题开发工作重点集中在如下几个

方面：①余热电站的热力循环系统配置研究及系统、设备配置计算方法的研究；②余热电站内各余热锅炉及补燃锅炉的研制；③水泥生产系统与余热电站系统间管理、操作及安全保护关系的研究；④余热电站汽水管道配置及锅炉给水除氧系统的研究；⑤余热电站控制思想及计算机控制系统的研究；⑥带补燃的中低温余热电站与纯中低温余热电站节能效果及投资效益的比较分析研究。

在确定上述研究开发工作重点的同时，确定了课题研究开发成果的应用方向：①利用课题开发成果为具有 150 ~ 450℃ 废气余热的水泥生产企业建设带补燃锅炉的中低温余热电站；②一旦适合于水泥窑 150 ~ 450℃ 废气余热的纯中低温余热电站特种汽轮机开发研制成功，课题开发成果将取消补燃锅炉，直接采用特种汽轮机以实现纯中低温余热发电的目的。

天津水泥工业设计研究院经过十年的艰苦努力全面完成了课题开发工作任务，同时在原国家建材局科技司的支持下至 2000 年进一步完成了适合于水泥窑 150 ~ 450℃ 废气余热的纯中低温余热电站所需特种汽轮机混压进汽（补汽式）汽轮机的开发研制任务。

①为了确定经济、合理、高效的热力循环系统、循环参数及电站汽水管路配置和除氧系统；为了解决余热锅炉所存在的磨损、漏风、集灰、炉内换热过程不清、换热效果不明以致余热锅炉热效率低下影响余热发电量的问题；为了解决补燃锅炉受热面不匹配、与余热锅炉的关系及补燃锅炉主蒸汽调温措施等问题，1991 年在天津水泥工业设计研究院内建设运行了一套 2000t/d 预分解窑 6000kW 补燃电站 1:20 的模型实验线。

②为了解决卧式余热锅炉换热效果不好、不易控制漏风，从而使蒸汽产量达不到设计要求的问题，摸清适合于水泥窑生产运行的立式余热锅炉具体结构形式及热力换热特性，同时摸清立式余热锅炉对于废气温度、废气粉尘的适应性，结合模型实验线内的实验用立式余热锅炉的运行情况从而验证了实验所获得的数据，于 1993 年为苏州南新水泥有限公司 700t/d 中空窑 6000kW、800 ~ 900℃ 废气温度的高温余热电站实验研制了国内首台水泥窑高温立式余热锅炉。在实际生产运行过程中经过对该台余热锅炉的三次局部改进，自 1996 年实现了年平均吨熟料余热发电量为 6562kJ/kg-173kW·h/t 的国内最高指标（比其他同规模、同类型水泥窑的卧式余热锅炉余热电站在熟料热耗相同的条件下，余热发电量提高 20% 以上），达到了预期目的，为中低温余热电站高效余热锅炉的设计、制造奠定了理论及实用技术基础。

③利用课题开发成果建成投产了两条工业实验用以煤粉为燃料的带补燃锅炉的中低温余热电站，其一为鲁南水泥厂两条 2000t/d 带有四级预热器预分解窑的一台 12000kW 凝汽式汽轮发电机的补燃余热电站；其二为北京琉璃河水泥厂一条 2000t/d 带有五级预热器预分解窑的一台 12000kW 抽气供热式汽轮发电机组的补燃余热电站。两个余热电站先后于 1996 年下半年投入生产运行。通过这两个电站的投入运行，验证了试验结果，并为热力循环系统及参数配置、汽水管路配置、除氧系统配置、余热锅炉与补燃锅炉参数配置及设计制造、计算机控制系统配置及电站与水泥生产系统间的安全保护及生产管理关系提供了实际经验。

④通过对上述各项工作的理论总结及上述几个工程在实际生产运行过程中所存在问题的分析，考虑到国家资源综合利用政策及水泥厂具有将补燃电站运行过程中补燃锅炉产生的炉渣、粉煤灰作为水泥生产用原料的特点，在上述几个余热电站工程已经正常投入生产运行的基础上，为了将补燃锅炉技术升级为流化床补燃锅炉而使电站可燃用煤矸石等劣质燃料，1998 ~ 1999 年，在湖北葛洲坝水泥厂一条 700t/d 带有五级预热器的预分解窑及一条 2000t/d 带有五级预热器的预分解窑上，配套建设了一台 12000kW 凝汽式汽轮发电机组的煤矸石补燃中

低温余热电站。

在湖北葛洲坝水泥厂中低温余热电站启动调试过程中，通过对流化床补燃锅炉所存在具体技术问题进一步分析研究，并通过整体改造，使整套电站于1999年10月投入正常生产运行。此举标志着天津水泥工业设计研究所承担的“八五”国家重大科技攻关课题——《带补燃锅炉的中低温余热发电工艺及装备的研究开发》任务及对课题开发成果进行技术升级的任务已全面完成。在解决了课题所确定的六个重点问题的基础上形成了完整的课题开发成果——《带补燃锅炉的中低温余热发电工艺及装备》，同时形成了完整的中低温余热电站工程设计思想及各项具体技术措施（包括装备），为余热发电系统技术及装备技术的进一步发展，实现纯中低温余热发电及装备技术在水泥工业的推广应用奠定了理论及实际生产运行的技术基础。至2005年，天津水泥工业设计研究院及大连易世达能源工程有限公司利用此项技术成果，在国内水泥行业的28家水泥厂、34条700t/d至2000t/d带有五级预热器的新型干法窑上配套建设了28台、总发电装机约348000kW、单机容量在4500~15000kW的以煤矸石等劣质燃料为燃料的带补燃锅炉的中低温余热电站。

⑤天津水泥工业设计研究院在进行上述带补燃锅炉的课题研究开发工作的同时，为了切实了解并掌握国外先进工业国家纯中低温余热发电装备的技术情况，1995年，承担了由日本新能源产业技术综合开发机构（NEDO）赠送全套纯中低温余热发电设备的安徽宁国水泥厂4000t/d带有四级预热器预分解窑的6480kW纯中低温余热发电工程的可行性研究报告、施工图设计、施工驻厂调试任务，并参与了日方赠送设备的具体谈判工作。该电站于1997年投入正常生产运行，并且仅利用窑头熟料冷却机废气余热（ $165300\text{Nm}^3/\text{h}-360^\circ\text{C}\downarrow 91^\circ\text{C}$ ）及窑尾预热器废气余热（ $258550\text{Nm}^3/\text{h}-350^\circ\text{C}\downarrow 250^\circ\text{C}$ ）实现了发电6480kW的目的。在这套纯余热发电技术装备中，采用的汽轮机为适合于水泥窑废气余热品位及余热分布的特种汽轮机，即二级低参数混压进汽式（补汽式）汽轮机，其原理及参数见图1-1。

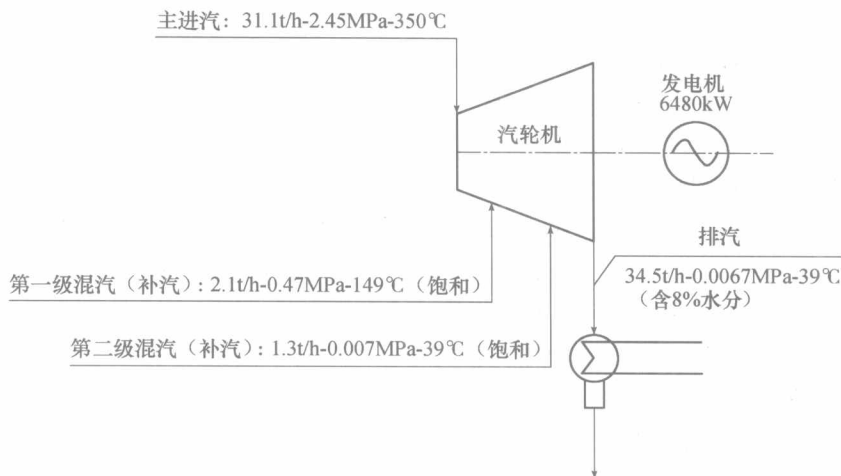


图1-1 二级低参数混压进汽式汽轮机原理及参数分布（日本NEDO赠送）

这台汽轮机无论其结构形式还是参数配置，在国内都是没有先例的。1999年之前，在中小型汽轮机设计制造方面，适用于余热发电的汽轮机，国内只生产一个进汽口——即仅为进汽口的汽轮机，其进汽参数为 $0.98\text{MPa}-310^\circ\text{C}$ 、 $1.27\text{MPa}-340^\circ\text{C}$ 、 $1.57\text{MPa}-360^\circ\text{C}$ 、

2. 4MPa-385℃、3. 43MPa-435℃等。上述这台汽轮机整机内效率为 77. 5%，连同发电机在内的总效率为 75. 5%。

⑥为了实现国产化装备的纯中低温余热发电技术的应用，天津水泥工业设计研究院充分消化吸收了日本赠送给安徽宁国水泥厂纯中低温余热发电全套设备中的混压进汽式（补汽式）汽轮机的设计、制造技术。由于中国建筑材料科学研究院承担的“八五”国家重点科技攻关课题《双流中低温余热发电系统及螺杆膨胀机的研究开发》工作遇到了困难，1997年，天津水泥工业设计研究院与杭州汽轮机厂、杭州钱潮建材股份公司合作，承担了原国家建材局研究开发项目，即中国建筑材料科学研究院“八五”国家重大科技攻关课题的延续项目——《水泥厂中低温余热发电专用设备——混压进汽式（补汽式）汽轮机的研究开发》项目。经过近两年的研究、实验，首台 4500kW 混压进汽式（补汽式）汽轮机样机诞生，并应用于杭州钱潮建材股份有限公司 1000t/d 带五级预热器的预分解窑上配套的 4500kW 中低温余热电站上。该电站以流化床锅炉为补燃锅炉，之所以仍采用补燃发电，主要考虑：一旦混压进汽即补汽不成功，将补汽系统自发电热力系统切除后，电站仍能正常运行发电，使其除了因余热不能全部回收而影响电站经济效益外，不会使电站不能运行而给水泥厂造成更大的损失。该电站（包括混压进汽系统）于 2000 年 7 月 1 日并网发电成功，到 9 月 6 日，全套电站通过生产运行考核，吨熟料余热发电能力比标准单级进汽汽轮机机组提高 7. 2kW·h 以上。该台汽轮机原理及参数见图 1-2：

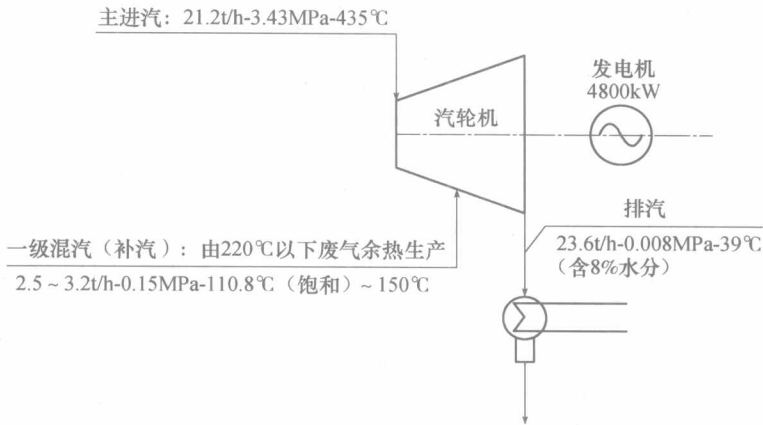


图 1-2 混压进汽式汽轮机原理及参数分布（国内研究制造）

这台汽轮机的整机内效率达到了 74. 4%，连同发电机在内的总效率达到了 71. 5%。这台机组在研制过程中，在工程设计方面，由于未能在余热锅炉设备、热力系统、热力系统参数配置方面很好地解决稳定补汽参数的措施，从而使补汽很困难（补汽参数波动太大，使其不能长期平稳地补入汽轮机）。但尽管如此，这台机组的试制及试运行，为在国内水泥工业推广应用纯中低温余热发电技术摸索了工艺设计、装备设计及制造技术经验，最终实现了两个目标：一是将该台机组的补汽技术应用到国产进汽参数为 0. 98 ~ 1. 57MPa-310 ~ 340℃的一个进汽口的标准汽轮机后，设计制造出适用于水泥窑纯中低温余热发电所需的特种汽轮机——低参数混压进汽式或称补汽式汽轮机；二是再进一步将此种汽轮机与带补燃锅炉的中低温余热发电工艺及装备技术相结合，取消补燃锅炉后，形成完全国产化的完整的水泥窑纯中低温余热发电技术及装备，并实现了安全、稳定、经济、高效地投入生产运行。这两个目标的

实现,为国内水泥工业研究、开发并形成国产化纯中低温余热发电技术奠定了坚实的基础。

(2) 中国建筑材料科学研究院的研究工作

根据其承担的课题任务,中国建筑材料科学研究院会同天津大学等有关单位对双流中低温余热发电系统及螺杆式膨胀机进行了大量的实验研究工作,先后在实验室内研究开发成功了6kW及150kW的两相流螺杆式膨胀机,并开发制造出了600kW样机,其整机内效率达到了60%左右。由于当时国内设计、制造、材料技术水平的限制,螺杆膨胀机的大型化问题遇到了暂时难以克服的困难。由于单台机组发电能力的限制,使其难以在实际工程中推广应用,因此这项技术的研究开发工作处于停顿状态。

(3) 南京水泥工业设计研究院的研究工作

“八五”期间,南京水泥工业设计研究院没有承担国家的余热发电技术攻关任务,但在水泥窑纯中低温余热发电技术及装备的研究、开发方面,同样做了积极的、有意义的探索,在江西万年水泥厂2000t/d带有四级预热器的预分解窑上,利用窑尾约 $180000\text{Nm}^3/\text{h}$ - 410°C 及窑头熟料冷却机约 $140000\text{Nm}^3/\text{h}$ - 250°C 的废气余热,设计投产了一套3000kW纯中低温余热电站(汽轮机为一个进汽口的国产标准汽轮机,其进汽参数为 1.0MPa - 305°C)。由于当时国产汽轮机的限制,以及其他设备、该院热力循环系统及参数配置技术的限制,使该条水泥窑设计的3600kW余热发电能力在实际生产运行中仅能达到1700~2100kW,但为纯中低温余热电站国产化装备在水泥企业的设计、生产运行提供了借鉴的经验,也为实现纯中低温余热电站系统配置技术及装备设计、制造国产化贡献了力量。

三、纯低温余热发电技术的提出及研究开发过程

1. 纯低温余热发电技术的提出

20世纪90年代末,一方面,随着水泥生产技术的发展,新型干法水泥熟料煅烧技术不断成熟,单窑生产规模越来越大,相应的水泥生产过程中的废气余热温度已降至 350°C 以下的纯低温;另一方面,能源供应紧张的矛盾不断加剧,“煤电油运”日趋紧张,油价、煤价大幅上涨;第三,水泥工业的迅猛发展结束了水泥卖方市场的局面,行业进入了产业结构调整时期,水泥销售的成本竞争日趋激烈。这三方面的原因使水泥窑余热发电技术的发展集中在:以水泥工业节能降耗、提高企业经济效益为中心,以水泥综合能耗下降25%以上为目标。具有水泥窑余热发电技术研究、开发能力的企业和单位,围绕着上述中心和目标,各自开展了水泥窑纯低温余热发电技术的研究、开发、推广、应用工作。

2. 纯低温余热发电技术的研究开发过程

(1) 天津水泥工业设计研究院

①根据研究、开发、推广《带补燃锅炉的水泥窑中低温余热发电技术》的经验,结合安徽宁国水泥厂4000t/d预分解窑的6480kW纯中低温余热发电工程建设及《水泥厂中低温余热发电专用设备——混压进汽式(补汽式)汽轮机的研究开发》工作和杭州钱潮建材股份有限公司1000t/d带五级预热器的预分解窑补汽式4500kW补燃电站的建设经验,1999年至2002年,天津水泥工业设计研究院在一条1500t/d水泥生产线(上海万安水泥厂)上利用国产的设备和技术建成投产了装机容量为2500kW的纯中低温余热电站,尽管在工程设计方面,仍然未能在余热锅炉设备、热力系统、热力系统参数配置方面很好地解决稳定补汽参数的措施,补汽仍然很困难,但该工程的建设标志着我国第一代水泥窑纯低温余热发电技术

的形成, 综合技术指标达到了吨熟料余热发电量 $3140\text{kJ/kg-28} \sim 35\text{kW} \cdot \text{h/t}$ 的水平。

②2001 年至目前, 天津水泥工业设计研究院在不断完善第一代水泥窑纯中低温余热发电技术的情况下, 为我国水泥行业数十条 1200t/d 级、 2500t/d 级、 5000t/d 级新型干法窑配套建设了多套装机容量分别为 2.0MW 、 3.0MW 、 6.0MW 、 7.5MW 、 9.0MW 的纯中低温余热电站, 折合综合技术指标均在 (吨熟料余热发电量) $3140\text{kJ/kg-28} \sim 35\text{kW} \cdot \text{h/t}$ 的水平。

(2) 大连易世达能源工程有限公司

①大连易世达能源工程有限公司通过若干条新型干法窑带补燃锅炉的中低温余热电站的设计、建设而进行了相关的实验研究; 综合研究、开发、推广带补燃锅炉的水泥窑中低温余热发电技术, 吸收了宁国水泥厂 4000t/d 预分解窑的 6480kW 纯中低温余热发电工程建设及“水泥厂中低温余热发电专用设备——混压进汽式 (补汽式) 汽轮机的研究开发”工作和杭州钱潮建材股份有限公司 1000t/d 带五级预热器的预分解窑补汽式 4500kW 补燃电站的建设经验; 总结利用第一代水泥窑纯低温余热发电技术建成投产的纯低温余热电站存在的问题, 结合水泥窑低温废气余热的形成机理, 2005 年研究开发出了我国第二代水泥窑纯低温余热发电技术, 综合技术指标达到了吨熟料余热发电量 $3140\text{kJ/kg-38} \sim 45\text{kW} \cdot \text{h/t}$ 的水平。

②2005 年 10 月至目前, 大连易世达能源工程有限公司在不断完善和发展第二代水泥窑纯中低温余热发电技术的情况下, 利用第二代水泥窑纯中低温余热发电技术为我国水泥行业数十条 1200t/d 级、 2500t/d 级、 5000t/d 级新型干法窑配套建设了多套装机容量分别为 3.0MW 、 4.5MW 、 5.0MW 、 6.0MW 、 7.5MW 、 9.0MW 、 11.5MW 、 15MW 、 18MW 、 23MW 的纯中低温余热电站, 折合综合技术指标均在 (吨熟料余热发电量) $3140\text{kJ/kg-38} \sim 45\text{kW} \cdot \text{h/t}$ 。

(3) 其他企业和单位

除了上述两个单位外, 国内还有海螺水泥、中信公司、凯盛公司、南京水泥设计研究院等多家企业开展水泥窑纯低温余热发电技术的研究、开发、推广应用工作, 其中, 海螺水泥与日本 KHI 公司合作, 研究、开发、推广应用复合闪蒸补汽式纯低温余热发电技术; 中信公司、凯盛公司、南京水泥设计研究院也在以不同的方式研究、开发、推广应用双压补汽式、复合闪蒸补汽式、单压不补汽式纯低温余热发电技术; 也有其他企业研究不以水及水蒸气为介质的纯低温余热发电技术。

四、水泥窑余热发电技术目前已实现的目标

经过余热发电技术开发人员及国内水泥生产企业、余热发电各类装备制造企业二十余年的共同努力, 至 2008 年, 我国水泥工业能够安全、可靠、经济、高效地采用如下三种类型的余热发电技术及装备: ①利用水泥窑 $150 \sim 900^\circ\text{C}$ 的高、中、低温废气余热进行发电, 在每公斤水泥熟料热耗为 6562kJ 的条件下, 每吨水泥熟料发电能力大于 $195\text{kW} \cdot \text{h}$; ②利用流化床补燃锅炉技术, 将水泥窑 $150 \sim 450^\circ\text{C}$ 的中低温废气余热全部回收并用以发电, 根据废气余热温度的不同, 余热发电能力可以达到每吨水泥熟料 $32 \sim 50\text{kW} \cdot \text{h}$; ③利用第一代、第二代纯低温余热发电技术, 将水泥窑 $150 \sim 350^\circ\text{C}$ 的废气余热全部转换为电能, 根据废气余热温度的不同, 在熟料热耗不变的条件下, 每吨水泥熟料余热发电能力折合为 $3140\text{kJ/kg-28} \sim 45\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

上述技术的开发和应用, 使我国水泥工业无论是高温, 还是中温、低温废气余热可全部回收转换为电能并实现了工艺及装备技术的国产化目标, 为我国水泥工业中低温余热发电技

术及装备在水泥、钢铁、冶金等行业的推广应用奠定了坚实的工程设计技术、装备设计及制造技术、生产运行管理技术、自动控制技术基础，为我国水泥及其他行业余热发电技术的进一步发展创造了条件。

第三节 我国水泥窑纯低温余热发电技术构成及发展目标

一、水泥窑第一代、第二代纯低温余热发电技术的定义及特征

(一) 水泥窑第一代纯低温余热发电技术

水泥窑第一代纯低温余热发电技术是指在不影响水泥熟料产量、质量，不降低水泥窑运转率，不改变水泥生产工艺流程、设备，不增加熟料电耗和热耗的前提下，采用 0.69 ~ 1.27MPa-280 ~ 340℃ 蒸汽将新型干法水泥窑窑尾预热器排出的废气余热、窑头熟料冷却机排出的废气余热转化为电能的技术。

第一代纯低温余热发电技术除上述定义外，还同时具有如下两个或两个以上的特征：

- (1) 冷却机仅设一个用于发电的抽废气口；
- (2) 汽轮机主蒸汽温度不可调整，随水泥窑废气温度的变化而变化；
- (3) 窑头余热锅炉、窑尾余热锅炉给水系统为串联系统；
- (4) 采用额外消耗化学药品或电能的锅炉给水除氧系统。

(二) 水泥窑第二代纯低温余热发电技术

水泥窑第二代纯低温余热发电技术是指在不影响水泥熟料产量、质量，不降低水泥窑运转率，不改变水泥生产工艺流程、设备，不增加熟料电耗和热耗的前提下，采用 1.27 ~ 3.43MPa-340 ~ 435℃ 蒸汽将水泥窑窑尾预热器排出的废气余热、窑头熟料冷却机排出的废气余热转化为电能的技术。

第二代纯低温余热发电技术除上述定义外，还同时具有如下两个或两个以上的特征：

- (1) 冷却机设置两个或两个以上用于发电的抽废气口；
- (2) 窑头设置独立的蒸汽过热器，汽轮机主蒸汽温度可调整，不随水泥窑废气温度的变化而变化；
- (3) 在窑尾最后一级预热器内设置独立的蒸汽过热器，以提高电站运转率并稳定电站运行；
- (4) 窑头余热锅炉、窑尾余热锅炉给水系统为各自独立、互不影响的并联系统；
- (5) 锅炉给水除氧系统采用 145℃ 以下低温废气余热，不再额外消耗化学药品或电能；
- (6) 窑尾余热锅炉设置锅炉出口废气温度可调装置可满足不同季节、不同湿度的物料烘干要求；
- (7) 窑头冷却机风为循环风。

二、水泥窑第一代、第二代纯低温余热发电技术的构成

(一) 水泥窑第一代纯低温余热发电技术的构成

1. 技术要点

利用水泥窑窑尾预热器排出的废气设置一台窑尾预热器余热锅炉（简称 SP 锅炉），将