

节 能 与 环 境 保 护 丛 书

蒸汽凝结水的 回收及利用

程代京 刘银河 编著



化学工业出版社

节能与环境保护丛书

蒸汽凝结水的回收及利用

程代京 刘银河 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书首先分析了当前我国能源与水源的利用现状,论述了凝结水和二次蒸汽的品质,阐述了凝结水回收的意义和原则;论述了凝结水回收与利用的方法、原则和基本概念;侧重于分析凝结水回收与利用系统热经济性;介绍了凝结水回收与利用系统的关键设备,包括疏水器、二次蒸发器、填料喷淋冷却器、喷射压缩器等;讨论并比较了各种凝结水回收与利用系统的特点,提出凝结水回收系统的选择原则,给出凝结水管道的水力计算;阐述了凝结水回收与利用系统的控制及运行。

本书不仅适合从事动力工程的技术人员、管理人员及研究人员阅读,还可作为能源与动力工程、工程热物理、热能工程等专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

蒸汽凝结水的回收及利用/程代京,刘银河编著.

北京:化学工业出版社,2006.10

(节能与环境保护丛书)

ISBN 978-7-5025-9360-5

I. 蒸… II. ①程…②刘… III. 蒸汽-凝结水-回收
IV. TK264.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 122782 号

节能与环境保护丛书 蒸汽凝结水的回收及利用

程代京 刘银河 编著

责任编辑:戴燕红

文字编辑:咎景岩

责任校对:宋 玮

封面设计:关 飞

*

化学工业出版社出版发行

(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

购书咨询:(010)64518888

购书传真:(010)64519686

售后服务:(010)64518899

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷有限责任公司印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 9 $\frac{3}{4}$ 字数 235 千字

2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-5025-9360-5

定 价:30.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

节能与环境保护丛书

主 编 林宗虎 院士

副主编 俞炳丰 教授

张 旭 教授

车得福 教授

序

为了全面建设小康社会、不断开创中国特色社会主义事业的新局面，必须大力推进科技进步和创新，进一步发挥科学技术对经济社会全面发展的关键性作用。要大力发展高新技术和先进适用技术。要大力加强能源领域的科技进步和创新，提高我国资源特别是能源和水资源的使用率，减少资源浪费。要大力加强生态、环境领域的科技进步和创新，降低污染物的排放，加强对废弃物的再次利用，发展循环经济。这些都是中央当前对我国广大科技人员提出的殷切希望和要求。

我国虽然资源不少，但人口众多，人均能源资源十分有限。人均化石燃料仅为世界均值的 56%，石油天然气人均可采储量仅为世界均值的 8%。水力资源可开发量虽达 3.79 亿千瓦，但人均不到 0.3 千瓦。且一次能源消耗中主要为煤炭，约占总能源消耗的 70%，即使到 2050 年，煤炭耗量预计也将占一次能源总耗量的 50%，因此环境污染严重。我国三分之一以上国土受到酸雨危害，如不采取措施，二氧化碳排放量预计将从 2000 年占全球总量的 12.7% 增加到 2020 年的 16.7%。此外，空气中的粉尘、二氧化硫和氮氧化物的污染也很严重。因此，加强节能、提高能源利用率和改善能量利用中的环境保护已成为我国经济持续发展中的一个重要课题。

随着我国国民经济发展和人民生活水平的提高，家用电器的大量使用和建筑业的迅速发展不仅使能耗进一步增大，并且引起新的环境保护问题。

为了促进和推动节能工作，改善能量利用中的环境保护，特编辑出版了这一套丛书。这套丛书共 10 本，书名分别为：《强化传热技术》，《烟气热能的梯级利用》，《蒸汽凝结水的回收及利用》，《建筑环境与建筑节能》，《热泵技术》，《城市垃圾的处理与利用技术》，《冷热电联产技术》，《热管技术》，《洁净燃烧技术》和《空调蓄冷技术与设计》。每本著作均由知名专家根据国内外近期科研成果和工程实践执笔编著，可供大专院校师生、科研院所和工矿企业相关科技人员应用和参考。希望这套丛书能对我国的节能和环保事业的发展有所裨益。

中国工程院院士

林宗虎

前 言

蒸汽作为一种热能载体,广泛应用于发电供热、石油化工、轻纺印染、造纸、酿造和橡胶等工业领域中。蒸汽在各种用汽设备中放出汽化潜热后,变为近乎同温同压下的饱和凝结水,由于蒸汽的使用压力高于大气压力,所以凝结水所具有的热量可达蒸汽全部热量的20%~30%,而且压力和温度越高,凝结水具有的热量就越多,占蒸汽总热量的比例也就越大。凝结水的回收对蒸汽系统高效而合理的利用有实际意义。100%回收凝结水的热量和工质,并加以有效利用,具有很大的节能潜力。

闭式凝结水回收系统的回收效果较好,但需要考虑系统的整体平衡,有待于进一步的完善。同时要根据凝结水回收的具体情况,采用适当的方法,充分合理地利用凝结水及二次蒸汽,在保证设备正常运行前提下降低其能耗水平。在选择疏水和凝结水回收系统时,应考虑锅炉房、室外供热管网和室内热用户等情况,全面综合地进行技术经济分析后确定。对于新建工程和改建工程,在可行性论证和初步设计阶段把该系统列为正式内容或在节能章节中加以论述,进行方案设计,供主管部门评审。

“节约能源,保护环境,确保国民经济的可持续发展”,这是新世纪永恒的课题。为了有效地利用凝结水的余热,回收水资源,改善人类生存环境,我们编写了《蒸汽凝结水的回收及利用》这本书,期望推进该领域新技术的研究和进步,不断开发完善和有效利用凝结水的回收设备,有效提高系统的热经济性。

本书共分7章。第1章分析了当前我国能源与水资源的利用现状,阐述了蒸汽管网中介质的循环过程和能量传递,分析了我国蒸汽管网的节能潜力。第2章论述了凝结水和二次蒸汽的性质。第3章主要介绍凝结水回收与利用的方法、原则和基本概念;在凝结水回收与利用系统中主要阐述了开式与闭式凝结水回收系统,讨论了两系统的比较和选择;在凝结水及二次蒸汽热能的利用中,阐述了凝结水显热和潜热的利用,介绍了蒸汽管网中产生二次蒸汽量的估算方法,最后介绍了发电厂热系统、热管和热泵的工作原理以及应用前景,即采用低沸点介质回收凝结水的余热。第4章主要介绍疏水器、二次蒸发器、填料喷淋冷却器、喷射压缩器等的基本概念和工作原理,然后介绍了典型的凝结水调控节能产品。第5章介绍了凝结水回收和利用系统的设计要点及其选择,并给出凝结水管网水力计算的方法。第6章主要阐述了该系统中的非凝结性气体、汽阻和水击、疏水阀的安装及管道的连接,介绍了凝结水加压站的设计等。第7章阐述了凝结水回收与利用系统的检测和控制、凝结水品质检测与改善措施,介绍了疏水器的维修管理方法和凝结水回收与利用系统的自动控制方案。

本书第1~2章、第5~6章由刘银河编写,第3~4章和第7章由程代京编写。作者互相修改了书稿,最后由程代京统稿。杜占波博士围绕着本书的编写做了大量工作,在此对他的辛勤劳动表示真诚的感谢。另外衷心感谢这套节能丛书的主编林宗虎院士、副主编车得福教授对本书出版的关心和支持。

由于编者水平所限,本书的缺点和疏漏难免,欢迎读者批评指正。

编者
2006年8月

目 录

第 1 章 绪论	1	的确定	36
1.1 概述	1	3.6.3 二次蒸汽潜热的利用	39
1.2 蒸汽管网中介质的循环过程和能量传递	1	3.6.4 热泵和热管——采用低沸点介质回收余热	40
1.3 蒸汽管网中各环节潜力分析	3	参考文献	42
1.3.1 锅炉房内的热损失	3	第 4 章 凝结水回收与利用系统的关键设备	43
1.3.2 管网中供汽管道的损失	3	4.1 疏水器	43
1.3.3 蒸汽用户的热损失	4	4.1.1 疏水器的作用及分类	43
1.3.4 凝结水回收管网中的热损失	4	4.1.2 疏水器的选用	48
1.4 我国蒸汽管网的节能潜力	4	4.1.3 疏水器的安装、运行	51
1.4.1 提高管网的热效率	4	4.2 二次蒸发器	53
1.4.2 凝结水回收的效果	5	4.2.1 二次蒸发器	53
1.4.3 凝结水回收的技术经济效益	5	4.2.2 二次蒸发器的选用	54
参考文献	6	4.2.3 计算示例	54
第 2 章 凝结水和水蒸气的性质	7	4.3 填料喷淋冷却器	56
2.1 基本理论——水和蒸汽的集态性质	7	4.3.1 构造与工作过程	56
2.2 水的性质	7	4.3.2 填料层	56
2.3 水蒸气的性质	8	4.3.3 计算示例	57
2.3.1 汽化与汽化潜热	8	4.3.4 喷淋装置	58
2.3.2 饱和蒸汽	9	4.3.5 花板	60
2.3.3 过热蒸汽	9	4.4 凝结水箱	60
2.3.4 凝结与凝结潜热	9	4.5 安全水封及安全阀	61
2.3.5 二次蒸汽	10	4.5.1 安全水封	61
2.3.6 蒸汽作为载热质的主要优缺点	11	4.5.2 水封式溢流管	64
参考文献	12	4.5.3 安全阀	64
第 3 章 凝结水回收与利用系统	13	4.6 喷射压缩机	64
3.1 概述	13	4.6.1 简述	64
3.2 凝结水回收与利用的方式和原则	13	4.6.2 能量平衡定律	66
3.2.1 凝结水回收与利用的方式	13	4.6.3 喷射压缩器的原理及其工作过程	67
3.2.2 凝结水回收与利用的基本原则	14	4.6.4 喷射压缩器的设计	73
3.3 凝结水回收与利用的基本概念	14	4.6.5 喷射压缩器的计算实例	74
3.4 凝结水回收与利用系统	17	4.7 典型的凝结水调控节能产品简介	77
3.4.1 开式凝结水回收与利用系统	17	4.7.1 汽液两相流自调节水位控制器	77
3.4.2 闭式凝结水回收与利用系统	20	4.7.2 锅炉排污测控系统	77
3.4.3 开式与闭式凝结水回收系统的比较及选择	30	参考文献	79
3.5 发电厂热系统简介	31	第 5 章 凝结水回收和利用系统的设计及计算	80
3.6 凝结水及二次蒸汽热能的利用	35	5.1 凝结水回收和利用系统的选择	80
3.6.1 凝结水显热的利用	36	5.1.1 凝结水回收和利用系统的设计	
3.6.2 管网中凝结水的汽化和二次蒸汽量			

要点	80	7.1 概述	124
5.1.2 凝结水回收与利用系统的选择	87	7.1.1 凝结水回收与利用系统检测和控制 的主要任务	124
5.2 凝结水管网的水力计算	90	7.1.2 凝结水回收与利用系统的检测和 监督	125
5.2.1 凝结水回水系统的水压分布	90	7.2 凝结水品质检测与改善措施	125
5.2.2 水力计算基本公式	96	7.2.1 凝结水的品质	125
5.2.3 蒸汽管道的水力计算	101	7.2.2 凝结水品质监测仪表	127
5.2.4 凝结水管道的水力计算	102	7.2.3 凝结水水质的改善措施	127
参考文献	109	7.2.4 凝结水品质的控制要点	128
第6章 凝结水回收和利用技术的实施	110	7.3 含油凝结水的净化	128
6.1 凝结水回收系统中的非凝结性气体	110	7.3.1 传统凝结水除油技术	129
6.1.1 空气及二氧化碳的来源及状态	110	7.3.2 复合双层膜凝结水精处理系统	129
6.1.2 凝结水回收系统中空气及二氧 化碳气体的危害	111	7.3.3 净化设备的选择	130
6.1.3 凝结水系统中非凝结气体的 排除	113	7.3.4 净化设备的清洗	133
6.2 凝结水回收系统中的汽阻和水击	114	7.4 蒸汽疏水器的维护管理	133
6.2.1 凝结水回收系统中的汽阻	114	7.4.1 疏水器管理现状	133
6.2.2 凝结水回收系统中的水击现象	115	7.4.2 疏水器原管理办法	134
6.3 凝结水回收系统中疏水阀的安装及 管道的连接	116	7.4.3 时效管理法	135
6.3.1 凝结水回收系统中疏水阀的 安装	116	7.4.4 疏水器的维护	138
6.3.2 凝结水回收系统支管与总管的 连接	118	7.4.5 蒸汽疏水器的故障诊断	138
6.4 凝结水加压站	119	7.5 凝结水回收与利用系统的自动控制	141
6.4.1 凝结水泵房的设计及布置	119	7.5.1 传统的凝结水回收与利用系统的 控制	141
6.4.2 凝结水泵的选择	121	7.5.2 PLC 系统	141
参考文献	122	7.5.3 DCS 系统	141
第7章 凝结水回收与利用系统的检测 和控制	124	7.5.4 现场总线控制系统 (FCS)	144
		7.5.5 凝结水回收与利用系统的集散 控制	144
		参考文献	146

第 1 章 绪 论

1.1 概述

能源是人类生存和发展的重要物质基础，能源的人均占有量、能源的构成、能源的使用率往往作为衡量一个国家现代化发展程度的标准。随着社会的发展和工业的进步，能源危机已成为全世界亟待解决、关系人类生死存亡的大问题。据专家估计，如果不改变目前的能源消耗结构和速度，不开发新能源，在距今 200~300 年后，世界上的全部能源将消耗殆尽。因此，开发新能源和有效节能已成为全球性能源问题研究的核心。

蒸汽管网系统广泛应用于石油、化工、制药、化学、冶金、食品、轻工、造纸、纺织、印染、电力、建材、建筑等国民经济行业。目前我国蒸汽供热系统的主体是工业锅炉系统，根据 1995 年的统计结果，我国在用蒸汽锅炉约为 35 万台，蒸汽出力约为 85 万吨/小时。目前我国除热电厂外的蒸汽供热系统的年耗煤约为 3.1 亿吨标准煤，约占全国年煤炭消耗总量的 1/3，系统热能利用效率平均只有 30% 左右，与国际先进水平相比存在较大的差距，具有极大的节能改造潜力。初步估算表明，我国蒸汽供热系统的节能潜力约为 8000 万吨标准煤。

在我国，凝结水回收技术的发展较晚，尤其是闭式回收系统，在 20 世纪 80 年代后期，能源问题紧迫之后才开始。近年来，随着节能工作的深入开展，各地对蒸汽凝结水的回收有所重视，但与供热系统中的锅炉及水处理相比，仍是较为薄弱的环节。而且由于我国使用蒸汽的企业众多，涉及行业范围极广，各单位的管理水平、技术能力、经济效益和生产规模相差很大，许多企业的蒸汽利用效率仍然较低。

目前，大多数企业在凝结水回收系统中面临的主要问题是不能充分地、合理地利用高温凝结水，无法克服严重的汽蚀问题，以及不能正确地使用疏水阀等。据初步统计，全国约有 4 万多家企业具备成熟的凝结水回收条件，但到目前为止仅有 0.5% 的企业采用了完善的凝结水回收技术，因此凝结水回收的市场潜力巨大。

1.2 蒸汽管网中介质的循环过程和能量传递

蒸汽和水是蒸汽管网中热能传递的介质。图 1-1 是水和水蒸气在整个热力系统中的循环过程。锅炉给水经给水泵加压后进入锅炉汽包，此时水温低于该压力对应的饱和温度，是过冷水，在锅炉中水被加热，压力不变，温度升高，水发生相变，变为水蒸气，即为饱和蒸汽状态，如果对这部分饱和蒸汽继续加热，蒸汽的温度和压力都要升高，变成过热蒸汽。蒸汽进入管道，沿程会产生压力损失和热损失，与锅炉出口蒸汽状态相比，温度和压力都有所下降。蒸汽到达用汽设备，放出凝结潜热，变成饱和水（凝结水），如果继续放热，饱和水就变成了低于饱和温度的凝结水。凝结水可以是饱和水，也可以是温度略低于饱和状态的过冷凝结水。

水（水蒸气）在完成一个循环后，既要满足热量平衡，又要满足质量平衡。水进入锅炉

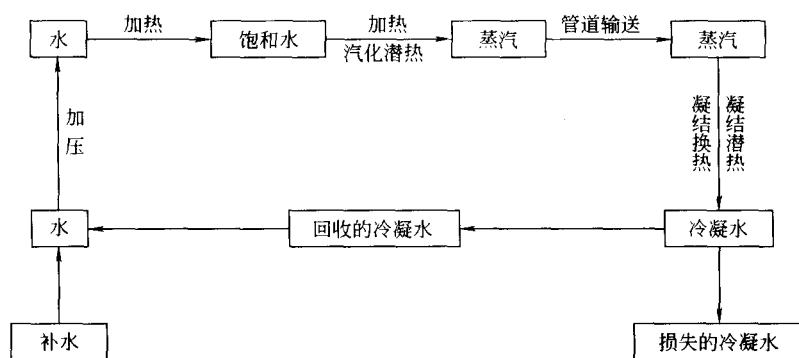


图 1-1 水和水蒸气在蒸汽管网中的循环过程

转变成蒸汽，在用汽设备处放热或做功后凝结成水，这些水原则上应进入下一轮热力循环，如果沿程有水（水蒸气）的损失，必须向锅炉给水系统中加入补给水，以维持循环中的水量，这样才能保证蒸汽热力系统运行的连续性。

在实际的蒸汽管网中，由于生产工艺落后，有的采取放弃凝结水的生产方式，这就要求连续不断地向锅炉中补充与蒸汽产量等量的新水，而锅炉给水是经过软化处理过的水，这种方式造成很大的浪费。一般来说，人们总是设法采取回收凝结水的方式，但是由于受工艺条件和回收技术的限制，往往不能全部回收或者说回收率很低，造成热能损失和水处理费用的增加。

蒸汽热力系统按照工艺配置可以分为三个基本环节：

- 蒸汽生产
- 用汽设备
- 蒸汽输送和凝结水回收管道

最典型的蒸汽生产设备是锅炉，可能是燃煤锅炉或燃油、燃气锅炉。燃煤锅炉的热效率一般为 60%~70%。燃油燃气锅炉可以达到 80% 以上，如果锅炉本身的效率低于同类产品的平均水平，为了提高整个蒸汽系统的效率，可以首先考虑对锅炉进行改造，锅炉往往被当作蒸汽热力系统中的一个独立设备，相应地锅炉房也可以被当作一个与蒸汽系统中其余部分可以分开的相对独立的系统。

锅炉生产的蒸汽要输送到不同地点、不同要求的蒸汽用户，需要经过复杂的蒸汽管网。蒸汽在用汽点放热凝结后的凝结水原则上都应该回收，这些凝结水也需要经过凝结水管网回收到锅炉房。一般来说，凝结水管网和蒸汽管网是整合在一起的，习惯上说的蒸汽管网也包括凝结水管网。

相应地，整个蒸汽系统的热效率由三部分组成：

锅炉（热源）热效率， η_{GL} ；

蒸汽管网热效率， η_{GW} ；

蒸汽使用侧的热效率， η_Y 。

蒸汽热力系统的整体效率 η_t 是上述三个效率的乘积：

$$\eta_t = \eta_{GL} \eta_{GW} \eta_Y \quad (1-1)$$

长期以来，人们比较注重锅炉热效率，偏重于购置高效率的锅炉或者实施提高锅炉效率

的技术改造，对蒸汽的使用效率和蒸汽管网中的热能回收利用重视不够。事实上，蒸汽管网高效利用的出发点是把整个蒸汽热力系统作为一个整体对待，单独的某一个设备或者某一个环节的最高效率并不代表整个系统就能获得最高的利用效率。

1.3 蒸汽管网中各环节潜力分析

整个蒸汽热力系统的热量损失如图 1-2 所示。

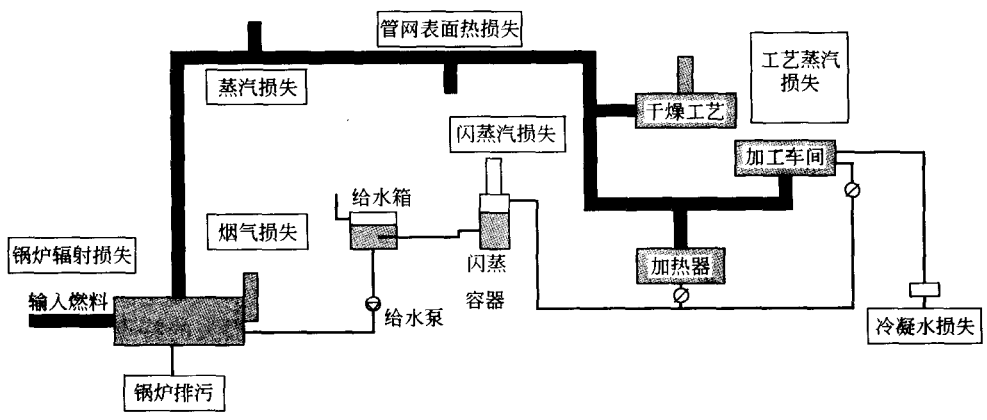


图 1-2 蒸汽热力系统的热量损失分析

1.3.1 锅炉房内的热损失

① 锅炉排烟损失。排烟热损失是锅炉总热损失中最重要的一项，通过省煤器和空气预热器可以回收部分烟气热能。通过合理的配风，保持合理的空气过剩系数也是减少锅炉排烟热损失的一项重要措施。对燃气锅炉还可以采取在尾部安装凝结器的方法回收烟气中水蒸气的热量，让烟气中的水蒸气凝结，放出凝结潜热，进一步提高锅炉的效率，这方面的凝结水回收利用可参见专门的著作。

② 锅炉排污损失。该项损失不仅损失热量，也损失了系统中的软化水，如果操作不当，可能使该项损失超过合理的范围。排污不当所造成的经济损失不容易发现，因为它们隐含在锅炉房的运行费用、水和水处理费用及其燃料费中。

③ 锅炉本体和锅炉房内管道及附属设备的表面散热损失。

1.3.2 管网中供蒸汽管道的损失

(1) 沿程阻力损失 蒸汽和水在管道中流动时由于摩擦阻力产生的压力损失，或者导致焓值下降，或者增加了泵的能耗，产生能量损失。影响因素包括管径大小、管材、弯头、阀门等节流件的布置等。在一个蒸汽管网完成设计、施工并开始运行以后，一般不再做大的改动。

(2) 蒸汽泄漏损失 由于管道联结处法兰接口密封不严，或者阀门等附件密封不好造成蒸汽泄漏，将造成大量的热损失。通过经常性的检查，发现问题及时修复或更换有缺陷的部件，这项损失很容易防止。这部分热损失同时包括质量损失和热损失，或者说由于质量损失导致的热损失，也就是俗话说的“跑、冒、滴、漏”。这种损失主要是由于施工和运行管理不当造成的，是见效最快的节能对象。但是如果对此不予重视，造成的损失也是惊人的。举例来说，压力为 0.8MPa（绝对压力）的蒸汽管道上有一个 0.8mm 的小孔，一年的蒸汽泄

漏量相当于耗费 2.5t 煤，如果每吨煤按 400 元计算，一年损失 1000 元，如果一个管网到处漏汽，可能一年的损失就达上万元。然而，只要采取很简单的检修措施就可以避免这样的损失，所以管网中的蒸汽泄漏是绝对不允许的。

(3) 管道散热损失 由于管内流体（水或蒸汽）温度高于环境温度，必然向外界散发热量，这部分热损失可以通过采取有效的管道保温措施来减少。这需要按照管道保温设计规范，选取适当的保温材料、保温结构和保温层厚度，并严格按照有关规范施工加以保证。这部分在技术上没有什么困难。但是在阀门处和法兰接口处往往容易忽视，局部不保温或保温不合理会造成很大的损失。举例来说，一根直径 150mm 的钢管有 3m 长的一段没有保温，管内为 0.8MPa 的饱和蒸汽，一年的散热损失可折算为 5t 标准煤，相当于 2500 元白白浪费了。一般管道不保温的情况还比较少，最常见的是阀门和联结法兰不保温。根据测算，对于 5 个公称直径 150mm 的法兰接头，如果不保温，在与上例相同的条件下，一年的散热损失相当于 5t 标准煤，如果一个蒸汽管网有上百个不保温的法兰，一年就有好几万元在不知不觉当中丢掉了。

1.3.3 蒸汽用户的热损失

用汽设备是蒸汽管网中蒸汽的最终用户，它的能量利用率的高低对整个热力系统效率的高低起着至关重要的作用。但用汽设备因工艺不同而多种多样，热损失的特点也不相同。例如，在干燥车间，如果用过热蒸汽直接加热，有的场合把使用后的蒸汽直接排空，造成大量热量损失和水损失。有些生产工艺蒸汽放热后的凝结水不回收或回收率低，造成凝结水排放热损失和水损失。

1.3.4 凝结水回收管网中的热损失

(1) 蒸汽排空损失 由于缺乏性能先进、可靠的凝结水回收设备，蒸汽设备使用后的蒸汽直接排空，或者凝结水回收方法不合理，凝结水回收系统中的闪蒸汽直接排空，不仅造成能量损失，而且还造成很大的经济损失。

(2) 凝结水损失 有些生产工艺因条件限制或对凝结水的认识不够，把凝结水直接排放。

凝结水中包含的显热占蒸汽总热能的 20%，假设锅炉补充水的温度为 20℃，回收 6t 凝结水相当于把 1t 水从 20℃加热到 100℃的饱和蒸汽的热量，也就是说回收 6t 凝结水其热能相当于 1t 的蒸汽。如果 1 台 10t/h 的锅炉，年运行 3000h，产蒸汽 3 万吨，凝结水回收率按 80% 计算，一年回收 2.4 万吨的凝结水，相当于节约了 4000t 的蒸汽，假设每吨蒸汽的成本为 120 元，与不回收凝结水相比节约了 48 万元，再加上节约的水费、电费和水处理费用，经济效益非常显著。

1.4 我国蒸汽管网的节能潜力

1.4.1 提高管网的热效率

我国工业企业的蒸汽管网的能源利用状况差别很大，仅仅蒸汽管道的输送效率就因为保温措施不同等，导致热效率有很大差别。以卷烟行业为例，玉溪卷烟厂蒸汽管网的输送热效率为 99.7%，完全达到国家蒸汽管网能源利用率的标准。而一些中小型卷烟厂的蒸汽管网输送热效率仅为 88.3%，远远低于热力管道保温国家标准规定蒸汽管网应达到的指标。又以化工行业为例，大连石油化学工业公司的蒸汽管网输送热效率为 97.3%，一些小化工厂

只能达到 78%。以上仅比较了保温水平高低导致的蒸汽管网输送热效率的差别。就保温不当进行评估,我国输送热率低于 92% 的蒸汽管网约占全部蒸汽管网的 30% 以上。把热能损失折算成标煤,达 1400 万吨/年。许多企业的蒸汽管网管理不善,泄漏严重,造成的热损失更大。

为了提高我国蒸汽管网的能源利用水平,必须从设计、施工、运行管理各个环节严格执行有关国家标准和技术规范。对于新建管网,一开始就要从设计上考虑周全,使管网有最佳的能源利用效率。对于旧管网,要从以下 3 个方面考察并提高管网的热效率。

① 保证保温性能不退化。首先从保温环节减少管网的热损失。

② 杜绝水、汽泄漏。“跑、冒、滴、漏”造成大量的能量损失和经济损失。如果存在这种情况,必须及时采取措施,坚决制止。

③ 用汽设备的余热利用和凝结水回收。由于设计不当或工艺条件限制,没能有效利用余热,凝结水回收技术水平低,回水率低,都可能造成很大的能量损失和经济损失。

1.4.2 凝结水回收的效果

(1) 节约锅炉燃料 凝结水所具有的热量约占蒸汽总热量的 20%~30%,有效利用部分热量,将会节约大量燃料。相对于一个不回收冷凝水的系统来讲,凝结水回收改造的节能潜力大于热力系统中的其他环节。

(2) 节约工业用水 凝结水一般可以直接作为锅炉给水用,可以大幅度节约工业用水,即使凝结水被污染,也有相应的水处理方法,经处理后的水仍然可以有效地利用。

(3) 节约锅炉给水处理费用 由于凝结水可直接用于锅炉给水,减少软化水处理量,因此可节约这部分水的软化处理费用。

(4) 燃料消耗量的减少可减轻大气污染 热量的回收可减少锅炉的燃料消耗量,也就减少了烟尘、 NO_x 、 CO_2 和 SO_2 的排放量,因此可减轻大气污染。

(5) 减轻蒸汽疏水阀的动作噪声 若蒸汽疏水阀出口向大气排放,因排放凝结水而会发出很大的动作噪声。回收凝结水时,疏水阀的出口连接在回收管上,排放声音不易逸出到外部,可减轻噪声污染。

(6) 消除了因排放凝结水而产生的热气 在凝结水向大气排放的场合,由于凝结水的再蒸发现象,工厂内热气弥漫。因此,工作环境恶劣,给工厂设备的维修管理带来不良影响。实行凝结水回收后,生产的现场环境大大改善。

(7) 提高了表观锅炉效率 凝结水余热的回收,用于热力除氧,减少热力除氧器的新热汽使用量,减少了高品位蒸汽的消耗量;凝结水回收到锅炉给水箱或直接输入到锅炉汽包,可以增加单位时间锅炉的产汽量(提高锅炉效率)。一般来说,给水每上升 6°C ,就可以节省燃料 1%。凝结水回收有利于排污量减少,降低排污热损失,提高表观锅炉热效率,充分发挥了锅炉的潜力。

1.4.3 凝结水回收的技术经济效益

(1) 项目投资 凝结水回收技术新建项目投资由回收管网、回收泵站、自动控制、土建安装费用几部分组成。凝结水回收技术改造项目投资由用汽设备疏水阀选型、回收管网改造、回收泵站改造、自控系统和部分土建改造费用组成。

项目投资一般根据企业厂区半径、用汽设备数量、回收管网管径及数量、凝结水压力、流量、凝结水利用方式及控制方式决定投资总额。以某公司的回收技术为例,新建项目投资一般为回收每吨凝结水投资 1.2 万~1.5 万元,改造项目投资一般为回收每吨凝结水投资

0.7 万~1.1 万元。

(2) 投资回收期 凝结水的价值直接体现为热能价值、凝结水纯净品质价值和减少排污价值三部分。项目投资对新建项目和改造项目有所不同,由于采用动力设备和蒸汽成本的差异,凝结水价值也不一样。

凝结水回收与利用系统的项目投资回收期可参考以下:

- ① 新建项目 连续运行 0.12~0.15 年
 间断运行 0.24~0.3 年
- ② 改造项目 连续运行 0.07~0.11 年
 间断运行 0.14~0.22 年

(3) 运行费用 凝结水回收方案因具体情况差别很大,但凝结水回收所需的动力消耗与其回收的热能和软化水的价值相比,所增加的额外运行费用并不多。

对凝结水直接作锅炉汽包给水的回收系统,回收装置运行电费与锅炉原给水泵的运行电费抵消,运行费用不增加。

对凝结水作除氧器给水的回收系统,运行费用为回收装置的水泵电费。

对凝结水作采暖或其它利用方式时,根据具体应用作具体热能分析。

参 考 文 献

- 1 侯辉编. 凝结水回收和利用. 北京: 机械工业出版社, 1986
- 2 张家荣, 吴树成编著. 凝结水回收及疏水阀. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989. 11
- 3 张昌煜编. 工业蒸汽的有效利用. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- 4 Goodall, P M. The efficient use of steam. Borough Green, Sevenoaks, Eng: IPC Science & Technology Pr, 1980
- 5 [日] 高田敏则, 平正登著. 凝结水回收与利用. 李坤英译. 北京: 机械工业出版社, 1992
- 6 国家经贸委节能信息传播中心. 蒸汽管网冷凝水回收技术指南
- 7 车得福著. 冷凝式锅炉及其系统. 北京: 机械工业出版社, 2002

第 2 章 凝结水和水蒸汽的性质

水是一种无色、无臭、无味、透明的液体。它的分布很广，易于获得，价格便宜，水蒸气又有较好的热力性质。因而它是热力过程中应用得最早和最广泛的工质。

2.1 基本理论——水和蒸汽的集态性质

与所有物质一样，水和蒸汽也是由大量称为分子的微粒子所组成的。1kg 冰、水或蒸汽约含有 3×10^{25} 个分子，每个分子的直径约为 2×10^{-10} m。分子是鉴别物质一切化学性能的最小粒子，在物体内彼此分开一定的距离，并且始终处于运动中。根据分子运动自由度的不同，任何物质都可能呈现三种物理状态（或称相态）——固态、液态和气态。

在固态（固相）下，各分子的运动只是围绕其结构体的平均位置进行振动。分子彼此很靠近，集聚于晶体结构内，相邻分子的距离小于分子直径。若对固相进行加热，分子振动得更加强烈。当振动的能级在某阶段内足以使分子突破其结构体时，固相便熔成液相。这就是说，这种相变需要吸收热量，以破除晶格约束。此外，在熔解过程中，物体温度不会升高（定温过程）。单位质量的物质自开始熔解到完全熔解所需的热量称为熔解潜热，各种物质的熔解潜热各不相同，它取决于各自晶格的约束（结合）强度。熔解的逆过程称为凝固，这时，需把相同数量的潜热释放给外界。

在液态下，分子将在液体所占的容积内自由运动。液体容积的形状取决于贮存容器的形状。这时，液体分子聚集甚密，彼此相距不超过一个分子直径。分子碰撞的概率增大，次数频繁。若对液体加热，分子将运动得更快，碰撞得更加频繁有力。碰撞结果将使某些分子具有超平均速率（短暂时间周期内），而另一些分子则低于平均速率。在液体表面处具有较高速率的那些分子可以克服其周围液体分子的吸引力而逸出液面，转入蒸汽状态。继续加热到分子的平均速率等于外逸速率时，就出现沸腾。如同在熔解过程中一样，沸腾也需吸收热量，以便突破邻近分子的吸引力。沸腾（蒸发）中的液体温度不再上升。使单位质量的物质在其沸腾温度下完全蒸发所需的热量称为蒸发潜热（或称汽化潜热）。蒸发的逆过程称为凝结，这时，将把相同数量的潜热释放给外界。

在蒸汽状态下的分子彼此间没有多大的吸引力，它们却以高达每秒数千公里的速度漫无方向地运动着。在大气压力下，蒸汽态分子彼此之间的距离约为分子直径的 10 倍。分子占据了它们所能扩及的整个空间，仅以容器壁面为限。如果容器壁面是可移动的话（例如活塞），分子也能推动此壁面，扩充到所增大的空间内。蒸汽在温度较低时，可以通过压缩把它回复到液体的状态，但当加热到高于某一温度时，则不能单纯用压缩体积的方法使它液化，这个温度叫做临界温度，高于临界温度时的蒸汽就称为气体。

2.2 水的性质

纯水是无色、无味、透明的液体。它是由两个氢原子和一个氧原子化合而成的。氢与氧

的质量比为 1 : 8，其分子式为 H_2O 。水是良好的溶剂，它能溶解许多种物质。水在自然界中有三种形态：固态——冰和雪；液态——水；气态——蒸汽。

高于 4°C 时，水和一般物质相同，随着温度的升高，其密度逐渐减小，体积逐渐增大；在 4°C 时，水的密度最大，体积最小；低于 4°C 时，其密度随着温度的降低逐渐减小，体积逐渐增大。因此，冰总是浮在水面上。这是水的一个非常突出的特点。所以在冬季，不运行的锅炉、疏水阀、用热设备要注意防冻，避免炉水结成冰后体积增大，将设备撑坏。

水的另一个特点是比热容较大，使单位质量的水和其它物质的温度同样都升高 1°C 时，水所需要的热量比其它物质都多，由于水具有这一特性，而又容易获得，所以常被用来作为吸热和放热的介质。

水具有液体的各种特性。当几个容器用连通器连通，且连通器的各部分水面上的压力相等时，这些水面就都保持在同一高度。根据这一原理，可以用水位表测出锅炉内及有关用热设备的水位高低。

水在密闭容器中，当水的一部分受到外界压力作用时，它便以大小相等的力向水的各个方向传递，以致凡接触到水的任意一点都受到相等的压力。锅炉及有关受压的用热设备的水压试验就是利用这一原理来检查受压部件的强度和严密性的。

水被加热以后温度就逐渐升高，当水加热到一定温度时，便开始沸腾，水沸腾时的温度叫做沸点，也叫饱和温度。沸点状态下的水称为饱和水，它所含的热量称为饱和水的含热量，也称做显热。水的沸点随着压力的升高或降低而相应地升高或降低。在压力为 0.1MPa 下，水的沸点为 99.64°C ，而在压力为 1.0MPa 下，水的沸点为 179.88°C ，所以水在低压下比在高压下沸腾得快，不过水中所含的热量较少。在高原地区，因为当地气压较低，所以水总是不到 100°C 就沸腾了。与饱和温度相应的压力是一个定值，这个对应的压力称为饱和压力。水在加热到沸点前，其比容因受热虽有增加，但增加量很微小，几乎显不出来。

2.3 水蒸气的性质

2.3.1 汽化与汽化潜热

当水被加热到沸腾时，在水的表面和内部便产生大量的气泡，气泡升至水面时就破裂开来放出蒸汽，水就这样逐渐地变成了水蒸气。水由液态变为气态的过程叫做汽化。水沸腾后，虽然对它继续加热，但水的温度却不再升高，始终保持在沸点温度，如果停止加热，水

也就立即停止沸腾。可见水沸腾后所吸收的热量不是用来升高水的温度，而是用来使水汽化成蒸汽的。沸水汽化所生成的蒸汽温度与沸水温度相同，蒸汽的温度始终等于蒸汽的压力所对应的饱和温度，这种蒸汽叫做饱和蒸汽，这种水叫做饱和水。

水和水蒸气的热力学性质可用图 2-1 简单说明，图中的压力是表压。饱和蒸汽的总热量等于对应的饱和水的显热和汽化潜热之和。水加热后温度升高，在一个标准大气压 (101.325kPa) 下，水被加热到 100°C 时汽

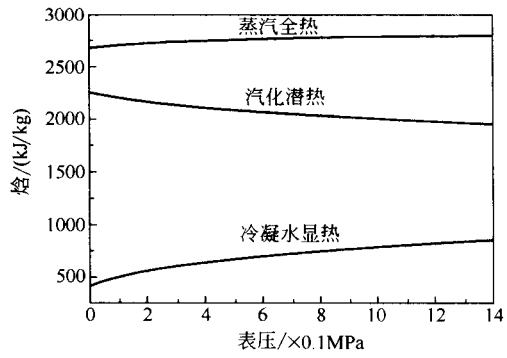


图 2-1 饱和蒸汽的热力学性质

化,继续加热,水温不再变化,此时加入的热量全部转移到蒸汽当中。在热力学中把这两种能量分别称为显热和汽化潜热。一个标准大气压下,1kg水每升高1℃,需要加入的热量大约是4.2kJ,这部分热量叫显热。水从常温20℃加热到100℃,吸收的热量大约是340kJ。水在100℃时沸腾,此时获得的热量将使饱和水转变为蒸汽,1kg水转化为蒸汽需要输入的热量是2257kJ,这部分热量称为汽化潜热(或相变潜热)。可见一个标准大气压条件下,汽化潜热是水的显热的6倍。从图2-1上的蒸汽总热曲线和凝结水显热的曲线可以发现,蒸汽所携带的总热量远大于同温度下饱和水所携带的热量,多出的部分就是对应压力下的汽化潜热。

在不同的压力下,饱和水汽化为饱和蒸汽所需的汽化潜热也不相同,汽化潜热的数值是随压力的升高而降低的。例如:在绝对压力为0.1MPa时, $r=2258\text{kJ/kg}$,当绝对压力为0.2MPa时, $r=2202\text{kJ/kg}$ 。

2.3.2 饱和蒸汽

饱和水汽化为饱和蒸汽时,比容将大大地增加。如绝对压力为1MPa时,饱和水的比容 $v'=0.0011273\text{m}^3/\text{kg}$,而饱和蒸汽的比容 $v''=0.1946\text{m}^3/\text{kg}$,较饱和水的比容增大了将近172.6倍。

饱和蒸汽有干饱和蒸汽和湿饱和蒸汽两种状态。

(1) 干饱和蒸汽 不含水分的饱和蒸汽叫干饱和蒸汽。它是指饱和水全部被汽化,而蒸汽温度仍等于该压力下的饱和温度。

(2) 湿饱和蒸汽 含有水分的饱和蒸汽叫湿饱和蒸汽。它是指饱和水汽化过程中带有饱和水,处于汽、水共存的状态。

1kg湿饱和蒸汽中,含有干饱和蒸汽的质量分数称为干度,以符号 x 表示。它说明湿饱和蒸汽的干燥程度, x 值越大则蒸汽越干燥。对于干饱和蒸汽来说, $x=1$ 。若干度 $x=0.9$,则表示1kg湿饱和蒸汽中含90%的干饱和蒸汽,含10%的饱和水。

饱和蒸汽的温度与压力有关,绝对压力为0.5MPa时,饱和蒸汽的温度约为151.85℃,通过控制蒸汽的压力就可以得到所需要温度的蒸汽。生产饱和蒸汽的锅炉相对简单,因此在使用蒸汽加热、干燥等工艺中一般使用饱和蒸汽。从蒸汽表可知,高压蒸汽的潜热比低压蒸汽的小。所以低压蒸汽凝结时放出热量多,使用低压蒸汽更为经济。但它也有不利之处,因为低压蒸汽的压力低、温度低、比容大。它要求管径、加热器和所有的加热面都要大。因此低压蒸汽系统的最初投资要比高压蒸汽系统高得多。

2.3.3 过热蒸汽

若在等压下继续加热干饱和蒸汽,蒸汽温度便会逐渐升高,比容也将逐渐增大,蒸汽的温度将高于蒸汽的压力对应的饱和温度,称之为过热蒸汽。饱和蒸汽变成过热蒸汽的过程叫做过热阶段,这一阶段吸收的热量称为过热量。过热蒸汽超过饱和温度的程度称为过热度。过热蒸汽的总热量包括蒸汽的显热、汽化潜热和饱和水的显热。

过热蒸汽的焓值较高,热导率较低,不像饱和蒸汽那样易于凝结,它比饱和蒸汽具有更强的做功能力,因此,在使用蒸汽发电或者驱动其它动力机械时常常使用过热蒸汽,生产过热蒸汽的锅炉比较复杂。

2.3.4 凝结与凝结潜热

蒸汽在用户端放热时,蒸汽凝结,凝结过程释放出与同温度下汽化潜热等量的热量,称为凝结潜热。由于凝结潜热和汽化潜热完全相等,所以这两个术语可以互为通用。蒸汽凝结