

170542

4416

火电厂给水加热器的运行、 维护和检修

董卫国 徐则民 编著

中国电力出版社

内 容 提 要

本书从简要说明给水加热器的重要性、回热系统、加热器的分类和结构等入手,介绍了大机组高压加热器故障原因和对策,提出了运行操作、水位调节、放空气、维护检修等工作上的具体措施,并摘要介绍了加热器解体分析的一些情况。

本书可供从事火力发电厂给水加热器工作的工程技术人员、管理人员和运行、检修人员参考,也可供制造、设计、教学、科研等单位的有关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

火电厂给水加热器的运行、维护和检修/董卫国,徐则民编著. -北京:中国电力出版社,1997

ISBN 7-80125-268-3

I. 火… I. ①董… ②徐… III. 火电厂-锅炉-给水预热器-基本知识 IV. TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 25210 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

铁道部十八局一处印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1997 年 6 月第一版 1997 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 32 开本 8.25 印张 181 千字

印数 0001—3570 册 定价 9.10 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

序 言

随着我国的改革开放，电力工业得到了快速发展，1994年全国装机容量已达到1.99亿kW，其中火电总装机容量达1.48亿kW，100MW及以上大型火电机组占火电总装机容量的61%。为了满足国民经济发展的需要，加快电力发展的步伐，电力建设要以300MW及以上机组为主，今后大型火电机组所占比例将继续增大，因此保证大型机组安全经济运行，对电力工业的发展具有重要意义。

我国火力发电厂煤耗与先进国家相比还有较大的差距，我国电力工业的发展要遵循“坚持开发与节约并重，把节约放在突出的位置”的方针。在积极进行发电机组建设的同时，要努力挖掘现役机组的节能潜力，加强机组运行、检修管理，提高设备健康水平及运行的可靠性、经济性。长期以来，大型机组的给水加热器运行不可靠，不仅降低机组运行的经济性，而且往往还因停用加热器而降低机组出力，加剧了缺电矛盾，甚至还发生过因加热器爆破而造成人员伤亡的事故。为改变这种局面，提高大机组的运行可靠性和经济性，多年来各科研院所和生产单位做了许多工作，积累了大量的实践经验，亟需加以总结提高。《火电厂给水加热器的运行、维护和检修》一书就是一个很好的总结。我们相信该书的出版和发行一定能对提高加热器运行的可靠性起到促进作用。

电力工业部安全监察生产协调司

1995年7月

前 言

给水加热器是火力发电厂给水回热系统的重要设备，其性能和运行可靠性直接影响机组整体运行的经济性和安全性，尤其是高压给水加热器。随着我国电力工业的迅速发展，高参数、大容量机组数量不断增加，部分大机组由原来带基本负荷转变为调峰。参数提高、容量增大，使加热器的尺寸越来越大，增加了设计制造上的难度；频繁的起停和急剧的负荷变化，使加热器的运行条件越来越恶劣。自 70 年代末我国大量投用 125MW、200MW 超高压机组开始，高压加热器投运率低的问题就成了影响机组等效可用率的重要原因之一。高压加热器的故障停用使机组的经济性和出力受到影响，经济损失十分可观。

多年来，我们按照电力部的指示和下达的任务，对高压加热器的运行状况、存在问题、改进途径等方面进行了广泛的调查、研究和分析工作，并在国内首次对多台损坏的高压加热器进行了全面的解体观察，分析损坏原因。通过这些工作，我们深刻认识到：造成高压加热器投运率低和高压加热器损坏的原因是多方面的，包括从设计、制造质量、热力系统、附属设备选型到安装工艺、运行操作、维护检修、管理制度等各种因素。从电力生产的角度来看，合理的运行维护是提高高压加热器运行可靠性很重要的一环。近几年来，多数发电厂的高压加热器投运率已有很大提高，但尚有很多机组投运率未能达到 95% 以上的要求，尚有不少机组给水温度

未达到设计值，尚有一些机组运行时间不长，因高压加热器损坏而耗用大量投资换用新的高压加热器。所以在这方面节能降耗的潜力还很大，发电厂在改善高压加热器的运行维护方面还有很多工作需要做。为此，我们将以往工作中积累的各种经验、素材、资料等汇集起来，在几次高压加热器运行维护技术培训班讲课材料的基础上，编成此书，供从事加热器工作的有关技术人员、管理人员和运行检修人员参考。希望此书能对进一步改善加热器的运行状况尽一点力。

本书稿曾经黄其励、李伯云、葛凤坡、李群祥等高级工程师审阅并提出宝贵的修改意见。杜鲜明高级工程师全面仔细地审阅了书稿，提出许多具体的修改意见。在此，谨向上述同志表示感谢。

由于编著者水平有限，书中错误在所难免，恳切希望大家批评指正，以便再版时修改。

编著者

1995年12月

目 录

序言

前言

第一章 给水加热器与发电厂的稳发、满发和经济运行	1
第一节 给水加热器与发电厂的安全经济运行	1
第二节 高加投运率的统计计算	3
第三节 高加停运对机组煤耗影响的计算	6
第四节 给水温度与热耗的关系曲线	13
第五节 蒸汽冷却器、疏水冷却器停运对机组煤耗影响的计算	15
第二章 给水加热系统及其保护装置	18
第一节 给水回热加热的级数和加热器的配置	18
第二节 最佳给水温度	21
第三节 加热器疏水系统的连接方式	23
第四节 加热器危急疏水	27
第五节 对疏水管路的要求	28
第六节 加热器给水旁路系统	30
第七节 疏水冷却器或内置式疏水冷却段	35
第八节 蒸汽冷却器或内置式蒸汽冷却段	37
第九节 回热加热系统举例	39
第十节 保护装置	50
第三章 给水加热器的分类和设计计算	56
第一节 给水加热器的分类	56

第二节	加热器的热力计算	69
第三节	阻力计算	78
第四节	给水加热器的结构计算	80
第四章	大机组高加故障原因分析和对策	86
第一节	高加故障停运原因的分类统计	86
第二节	高加内部管系漏泄的分布情况	92
第三节	管子端口（管子与管板连接处）漏泄原因	94
第四节	管子本身漏泄原因之一——冲刷侵蚀	97
第五节	管子本身漏泄原因之二——管子给水 入口端的侵蚀	101
第六节	管子本身漏泄原因之三——管子振动	107
第七节	管子本身漏泄原因之四——腐蚀	111
第八节	管子本身漏泄原因之五——超压爆管	114
第九节	管子本身漏泄原因之六——材质、工艺不良	115
第十节	正确选用阀门	116
第五章	高加的起停操作和运行监督	120
第一节	给水温度变化率	120
第二节	主机起停时高加随主机滑起滑停	125
第三节	主机运行中高加的起停	130
第四节	主机故障停机时高加的停运	134
第五节	高加运行中的参数监督	134
第六节	加热器的性能试验	138
第六章	加热器壳侧水位调节	144
第一节	防止疏水闪蒸	144
第二节	异常水位的危害和水位极限	146
第三节	水位计的错误指示	151
第四节	不同结构加热器的水位控制特点	156
第五节	正常水位的试验确定方法	162
第六节	疏水水位自动调节装置	164

第七节 提高水位调节和保护的可⾏性	168
第七章 放空气系统	182
第一节 不凝结⽓体对加热器性能的影响	182
第二节 不凝结⽓体对加热器运⾏寿命的影响	183
第三节 放空气系统的设计安装	184
第四节 放空气系统的运⾏	188
第八章 加热器的维护与检修	189
第一节 加热器的运⾏状况和检修的必要性	189
第二节 加热器给⽔侧短路的检测和修理	190
第三节 管束漏泄的检测和判断	196
第四节 加热器管束漏泄的检修	204
第五节 加热器的停⽤防腐和清洗	208
第九章 若⼲加热器的解体分析情况介绍	211
第一节 朝阳发电⼚ 1 号机 5 号高加损坏原因分析	211
第二节 朝阳发电⼚ 1 号机 6 号高加损坏原因分析	231
第三节 新华发电⼚ 5 号机 6 号高加损坏原因分析	235
第四节 大港发电⼚ 1、2 号机高加严重漏泄原因分析	241
第五节 美国 Brayton Point 电站 3 号机两台高加漏泄 原因分析	247
参考文献	252

第一章 给水加热器与发电厂的稳发、满发和经济运行

第一节 给水加热器与发电厂的安全经济运行

在火力发电厂中，工质从燃料获得的热能，有很大一部分是在凝汽器中被循环水带走的，这部分热损失通常称为冷源损失。如果将在汽轮机内已做过一部分功的蒸汽抽出来加热锅炉给水，而不进入凝汽器，那么这部分蒸汽在汽轮机中做了功但没有冷源损失，这就提高了发电厂的热效率。另外，从给水加热的过程来看，由于采用了抽汽对给水进行加热的方式，传热温差要比用锅炉烟气加热给水时小得多，因而减少了给水加热过程的不可逆性，也就提高了循环效率。给水加热器就是利用汽轮机抽汽对给水进行加热的设备。

热力学已证明，无论参数如何选择，给水回热加热总是能提高汽轮机装置的热效率的。所以，现代的火力发电厂都设置有给水加热器。不论是凝汽式发电厂或热电厂，采用给水回热加热一般可降低燃料消耗 $10\% \sim 15\%$ 。由于回热循环效率的提高程度在很大范围内决定于回热抽汽的压力和与之相应的给水加热的温度，因此，给水回热加热过程主要参数的选择对发电厂的经济性有很大影响。但提高经济性常常要以增加设备投资为代价，所以要通过综合技术经济比较来确定。

为提高循环效率而设置的给水加热器，作为发电厂的一

种主要辅助设备，其运行状况不仅影响到机组的经济性，还影响到机组的稳发、满发和安全运行。

对于发电厂的锅炉来说，给水温度是其设计的重要参数之一。进入锅炉的给水温度的变化会影响锅炉水冷壁、过热器、再热器等各部位的吸热量分配，同时也影响锅炉内各部位的温度分布，影响锅炉的燃烧情况。如果给水加热器的一部分不投入运行（如高压加热器停运），就会影响锅炉正常运行，甚至导致锅炉故障。

很多发电厂的汽轮机，其隔板、喷嘴、叶片等，是按有抽汽供给给水加热器的情况设计的。在汽轮机一定负荷下，如果给水加热器的一部分停运，减少了抽汽，就可能造成汽轮机部分隔板、叶片等部件所受的应力超过设计允许值。所以有些汽轮机对停用加热器时的机组发电出力有所限制，如国产 125MW 和 200MW 机组在高压加热器停用时要限制负荷 10%。但也有一些机组，加热器停用时机组发电出力不受限制，甚至有的机组还允许在停用加热器时超出力运行。

给水加热器不能正常运行，还常常威胁主机或其他设备的安全运行，甚至引起严重的设备损坏事故。给水加热器管系漏泄或其他原因引起汽侧满水，使水经过抽汽管道进入汽轮机，就会造成汽轮机汽缸变形，胀差变化，机组振动，动静碰磨，大轴弯曲，甚至叶片断裂等事故。这类由于加热器故障而引起汽轮机进水事故在国内外发生过多起。在我国，也发生过因加热器故障，给水联动装置失灵，引起锅炉断水停炉的事故；发生过高压加热器的蒸汽冷却器内部钢管漏泄，引起高压加热器汽侧满水，而危急疏水门、电动进汽门、给水旁路联成阀均失灵，汽侧安全阀设置不合理，以致高压加热器汽侧壳体爆破的事故；发生过给水加热器疏水管路冲刷

漏泄，水喷向发电机，以致发电机出口电压互感器短路事故；发生过高压加热器疏水系统运行不当，疏水管道剧烈振动，被迫停机的事故；发生过疏水管道弯头磨薄、爆破，喷出热水烫死人的事故；还发生过高压加热器因故障停运，工人进入高压加热器水室检修，由于安全措施不当，工人触电死亡事故。

列举以上数例，说明给水加热器的正确运行是影响发电厂稳发、满发、安全运行的一个重要因素。

第二节 高加投运率的统计计算

在给水加热器中，高压加热器（以下简称高加）的汽侧、水侧工作压力和温度比较高，因而故障较多，对发电厂稳发、满发和安全运行的影响较大，同时对发电厂经济运行的影响也较大。所以一般都比较重视高加的投运情况，为此提出了一个考核高加投运情况的指标，叫高加投运率，以促进高加的正常运行。

高加投运率的定义是在机组运行时间内，高加参与机组运行时间的百分比。其计算公式为：

$$\text{高加投运率} = \frac{\text{高加运行小时数}}{\text{机组运行小时数}} \times 100\% \quad (1-1)$$

但是，某些发电厂对高加投运率各有各的理解，他们的计算公式也各不相同。例如：有的理解为计算高加不在故障状态的指标，所以他们的计算公式是：

$$\begin{aligned} \text{高加投运率} &= \frac{\text{高加运行小时数}}{\text{高加运行小时数} + \text{高加故障小时数}} \times 100\% \\ \text{或} \\ \text{高加投运率} &= \frac{\text{机组运行小时数} - \text{高加故障小时数}}{\text{机组运行小时数}} \times 100\% \end{aligned}$$

或者还有其他计算公式。后两公式中，高加故障小时数的含义不明确，它不包括机组运行时间内，高加故障停运后等待检修、检修后等待投运、高加备用、高加因机组低负荷而停运等高加未投运的时间，而只计高加故障检修时间，所以计算出来的高加投运率比用式(1-1)计算出来的高。但是这种计算方法不能真实反映高加投运的实际效果，并且在促进检修，抓紧投运，机组低负荷时也投运等方面，不及式(1-1)好。

式(1-1)中的机组运行小时数，是从机组并入电网到机组从电网中解列所经历的小时数；高加运行小时数是从高加蒸汽侧阀门全部打开到开始关闭蒸汽侧阀门所经历的小时数。

对于只有整组高加给水大旁路而没有各个高加给水小旁路的高加系统，一个高加故障，机组的整组高加必须停运，机组只有一个高加投运率。对设有给水小旁路的高加系统，一个高加故障，可以只停这个高加，其他各个高加可以继续运行，各个高加各有其投运率。这时，机组的高加投运率就要按各高加投运率平均计算。例如：某机组某年运行 6500h，其 1 号高加投运 2000h，其 2 号、3 号高加分别运行 6000、5000h，则

$$\text{机组高加投运率} = \frac{2000 + 6000 + 5000}{6500 \times 3} \times 100\%$$

在实际统计工作中，不仅要计算单台机组的高加投运率，有时还需要计算若干台机组的，或一个发电厂的，或某一类机组的，或一个省局的，或一个网局的，或全国的高加投运率。这时采取算术平均值的方法来计算与采取加权平均值的方法来计算，会得到很不相同的结果。

例如：某发电厂有两台机组。某年，甲机组运行 7000h，高加投运 6500h，高加投运率为 $\frac{6500}{7000} \times 100\% = 92.86\%$ ；乙机

组运行 2000h, 高加投运 200h, 高加投运率为 $\frac{200}{2000} \times 100\% = 10\%$ 。

如果采用算术平均值, 则该发电厂的年高加综合投运率为 $(0.9286 + 0.10) \div 2 = 0.5143$, 即 51.43%; 如果采用加权平均值, 则该发电厂的年高加综合投运率为 $(6500 + 200) \div (7000 + 2000) = 0.7444$, 即 74.44%。显然, 采用加权平均计算是比较合理的。

为了统一高加投运率的计算方法, 1990 年 4 月, 前能源部可靠性管理中心曾组织部分网局、省局和试验研究所人员讨论, 并于 1990 年 7 月 4 日以能电可 [1990] 019 号文件发出《关于统一使用高压加热器投运率计算方法的通知》, 其主要内容如下:

1. 高压加热器投运率计算公式

高压加热器投入运行小时数与其相应的汽轮发电机组 (主机) 运行小时数之比的百分数称为高压加热器投运率, 其计算公式为:

$$GJSR = \frac{\sum_1^Z GJSH}{SH \cdot Z} \times 100\% \quad (1-2)$$

对于若干台机组:

$$\sum_1^m GJSR = \frac{\sum_1^m \sum_1^Z GJSH}{\sum_1^m SH \cdot Z} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中 GJSH——每台高压加热器 (GJ 表示高压加热器) 的运行小时数;

SH——主机的运行小时数;

Z ——该台机组的高压加热器个数(暂不包括外置式蒸汽冷却器和外置式疏水冷却器);

m ——发电厂或省局或网局所统计的主机台数。

2. 几点说明

(1) 每个高压加热器运行小时数的规定: 当高压加热器不随主机滑起滑停时, 按每台高压加热器的进汽门开启至关闭的小时数计算; 当高压加热器随主机滑起滑停时, 按主机与电网并列、解列的时间作为进汽门开启、关闭的时间。

(2) 主机的运行小时数按主机与电网并列至解列的小时数计算。

(3) 统计计算高压加热器投运率, 同时应测定记录给水温度。

某些机组, 尤其是除氧器定压运行的机组, 在负荷低时, 高加的疏水排不出去, 高加不能投入运行, 按上述统计方法, 将影响投运率不能达到 100%。因此应加以改进, 使其疏水能排出去。本书第五章第二节中有所论述。

第三节 高加停运对机组 煤耗影响的计算

如本章第一节所述, 火力发电厂设置给水加热器的目的是降低热耗, 提高热效率, 降低煤耗率。除了在电厂设计时要做详细的计算外, 发电厂在运行中也要计算各给水加热器对机组经济运行的影响, 尤其是要计算高加停运对机组热耗和煤耗的影响。通过计算和考核, 明确在高加上进行工作或投资, 能得到多少经济效益, 以促进工作。

一个时期来, 各地试验报告数据及各个发电厂、省局、网

局对停运高加影响机组煤耗率增加的计算数值很不一致，而且相差很大，以倍数计。例如：对国产 N200-130/535/535 机组停运高加，影响煤耗率增加的数字，从 8 g/(kW·h) 到 27 g/(kW·h)，影响热耗率提高的数字，从 2.6% 到 6.6%。

同时，各种期刊、书本对高加停运时汽轮机热耗值增加的计算方法及结果也不一致。

一、几种计算结果

(1) 北京电力试验研究所 1977 年 10 月在《北京电力技术》上提出的计算结果与湖南省电力学校主编的中等专业学校教材《热力发电厂》中的结果相同。其计算如下。

高加对机组经济性的影响从以下两方面进行分析：

1) 耗汽量变化。当机组输出功率不变时，投高加后，由于抽汽只做了一部分功即被抽出加热给水，因此耗汽量将增加。

$$q_0 - q_0' = \frac{\sum_{i=x+n+1}^m q_i (h_i - h_k + \Delta h) + \sum_{i=x+1}^{x+n} q_i (h_i - h_k)}{h_0 - h_k + \Delta h}$$

其中 $\Delta h = h_{RH} - h_{HP}$ (1-4)

式中 q_0, q_0' ——投与不投高加时进入汽轮机的新蒸汽量，kg/h；

q_i ——抽汽量，kg/h；

h_0, h_i, h_k ——新蒸汽、抽汽及低压缸排汽热焓，kJ/kg；

h_{RH} ——热再热蒸汽热焓，kJ/kg；

h_{HP} ——冷再热蒸汽热焓，kJ/kg；

m ——总抽汽级数；

x ——低压加热器抽汽级数；

n ——再热器后高加抽汽级数。

当 $n=0$ ，即再热器后无高加时，则 $\sum_{i=x+1}^{x+n} q_i (h_i - h_k) = 0$ 。

当无中间再热时, $\Delta h = 0$ 。

2) 单位蒸汽在锅炉内的吸热量由于投高加后给水温度升高而降低。因此投高加后汽轮机的热耗量的减少为:

$$\Phi_0' - \Phi_0 = q_0'(h_0 - h_{fw}') + q_{RH}'(h_{RH} - h_{HP}) - q_0(h_0 - h_{fw}) - q_{RH}(h_{RH} - h_{HP}) \quad (1-5)$$

式中 Φ_0, Φ_0' ——投与不投高加时汽轮机的耗热量, kJ/h;

h_{fw}, h_{fw}' ——投与不投高加时进入锅炉的给水热焓, kJ/kg;

q_{RH}, q_{RH}' ——投与不投高加时再热蒸汽流量, kg/h。

机组的热耗变化

$$\Delta q = \frac{\Phi_0' - \Phi_0}{\Phi_0} \quad (1-6)$$

根据式(1-6)计算一些机组因不投高加而增加的热耗值, 结果如表 1-1 所示。

表 1-1 一些机组不投高加时的热耗、煤耗增加值

机组型号	给水温度 (℃)	热耗增加 (%)	标准煤耗增加 [g/(kW·h)]	每年多耗标 准煤(t)	发电标准煤耗 [g/(kW·h)]
N6-35-1	164.5	1	4.8	200	480
N12-35-1	164.6	1.9	8.5	715	450
N25-35	164.2	3.5	15	2630	430
51-50-3	169.5	2.33	8.4	2940	360
N100-90/535	222	1.9	7.0	4900	360
N125-135 /550/550	239	2.30	7.4	6500	320
N200-130 /535/535	240	2.57	8.3	11600	320
N300-165 /550/550	263.1	4.6	11	29400	310

这一计算中，假定在输出功率不变的条件下投运高加和不投高加。计算中需要两个工况下的各种参数，而制造厂提供的，一般只是额定功率时，高加投运条件下的参数。

(2) 汽轮机热耗率的计算式为：

$$HR = \frac{\Phi_0}{P} = d_0 \left[(h_0 - h_{fw}) + \frac{q_{RH}}{q_0} \Delta h_{RH} \right] \quad (1-7)$$

式中 HR ——热耗率， $\text{kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ；

P ——电功率， kW ；

Φ_0 ——热耗， kJ/h ；

d_0 ——汽耗率， $\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ；

q_0 ——汽耗， kg/h ；

q_{RH} ——再热汽量， kg/h ；

Δh_{RH} ——再热前后蒸汽焓之差， kJ/kg ；

h_{fw} ——进入锅炉的给水焓， kJ/kg ；

h_0 ——主蒸汽焓， kJ/kg 。

设高加运行时， HR 如上式；高加停运时

$$HR' = d'_0 \left[(h_0 - h_{fw}') + \frac{q_{RH}'}{q'_0} \Delta h_{RH}' \right]$$

根据这两式及国产 N200-130/535/535 汽轮机参数计算得抽汽不做功系数 C_0 为 1.1，并假设高加停运时的 $\frac{q_{RH}'}{q'_0} \Delta h_{RH}'$ 与高加运行时的 $\frac{q_{RH}}{q_0} \Delta h_{RH}$ 相等（此假设会引起一些误差），则高加停运时比高加运行时的热耗值增加 5.13%。发电煤耗率增加 18.8 $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，如厂用电率为 10%，则供电煤耗率上升 6.4%，约 21 $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

(3) 计算 N200-130/535/535 汽轮机在高加停运后，热效率下降 3.301%。