

联邦德国
锅炉性能设计计算方法

普华煤燃烧技术开发中心

1992. 12.

序

这是一份在德国拥有权威和声誉的技术资料。德国的锅炉设计制造技术一直是我们的钦佩和注意学习的。当前我国将恢复在关税贸易总协定中的地位,推行关贸总协定所规定的关税体制,面临新的考验和契机,因此学习吸收世界一切先进科学技术,以国际标准为追赶目标,已成为我们刻不容缓的任务。

锅炉热工流体动力计算包括热力计算、空气动力计算、水动力计算、壁温计算等。根据我国锅炉厂引进技术的管理体制,称为性能设计计算。因为这些计算关系到锅炉性能能否做到优良和先进。

本资料概括了德国锅炉性能设计的重要经验,其中热力计算已编制成表格,连计算程序也注解得很详细。计算中还包括有灰平衡,这是我国过去缺少经验的。对于燃用高灰分煤的锅炉,这种灰平衡尤显得必要。

根据发热量等不很完整的燃料特性在统计学的基础上做锅炉热力计算的方法,在德国已用于工业实际,在本资料中也介绍得比较详细。这个方法对煤种变化时的锅炉校核计算以及工业锅炉设计和运行分析尤为适用。

即使对锅炉热力计算中常见的炉内传热、对流换热和传热计算所用的各种系数,本资料也用材新颖。例如,强迫对流公式补充使用了一些新成果,适用范围更宽广,还说明了误差范围。

各种气体的物性参数更是数据新颖,分别用表格、曲线图和拟合公式三种形式发表,适宜于各种精确度的计算、了解变化趋势以及计算机辅助设计之用。

对于工程实际应用而言,本资料内容丰富完整而又精练扼要,连物理量单位的换算,资料中也搜罗殆尽,查用方便。

本资料经西安热工研究所、东方锅炉厂、哈尔滨工业大学和西安交通大学的科技人员阅读后一致称赞,谨向广大读者推荐。

许晋源 1992.10.1

编 印 说 明

由于编印所依据的资料仍在不断抽换和局部更新之中,所以这次编印的资料中个别部分注明了“在编制中”或“暂缺”的字样,还有个别图的复印件不完整和非常模糊,所以尽管我们作了很大努力予以修补,仍可能还存在一些不完备甚至错误之处,望读者使用中留意指正并见谅。

编印者 1992.10.18

1. 总目录

1. 总目录.....	1
2. 符号说明和单位.....	2
3. 燃烧计算.....	3
4. 物性参数.....	5
5. 热工和流体技术相似准则.....	6
6. 热交换.....	7
7. 换热.....	7
8. 壁温计算.....	8
9. 压力损失.....	8
10. 能量和物料平衡	9
附录	10
热力计算表格	10

2. 符号说明和单位	11
2.1. 符号说明	11
2.1.1. 概述	11
2.1.2. 应用	11
2.1.3. 小写拉丁字母	11
2.1.4. 大写拉丁字母	13
2.1.5. 小写希腊字母	14
2.1.6. 大写希腊字母	16
2.1.7. 下角标——小写拉丁字母	16
2.1.8. 下角标——大写拉丁字母	16
2.1.9. 其他下角标	17
2.1.10. 上角标	17
2.2. 单位	17
2.2.1. 概述	17
2.2.2. 质和量	17
2.2.3. 力	17
2.2.4. 质量流量	18
2.2.5. 体积流量	18
2.2.6. 质量流量密度	18
2.2.7. 压力、力学应力、弹性模量	18
2.2.8. 动力粘度	18
2.2.9. 运动粘度	18
2.2.10. 能、热、功	18
2.2.11. 功率、能流、热流、焓流	19
2.2.12. 比能、比焓、低位和高位发热量、汽化热	19
2.2.13. 能流密度、热流密度	19
2.2.14. 容积热负荷	19
2.2.15. 温度	19
2.2.16. 比热容、比气体常数	19
2.2.17. 换热系数、传热系数	19
2.2.18. 热导率	19
2.2.19. 化学单一物质的量	20
2.2.20. 摩尔质量	20
2.2.21. 摩尔热容、摩尔气体常数	20
2.3. 单位表	20
2.3.1. 概述	20
2.3.2. 数值表	21
2.3.2.1. 质量	21
2.3.2.2. 力	22

2.3.2.3.	压力、应力、弹性模量	23
2.3.2.4.	能、热、功	23
2.3.2.5.	功率、热流、能流	23
2.3.2.6.	能流密度、热流密度	23
2.3.2.7.	比焓、低位和高位发热量	23
2.3.2.8.	热导率(导热系数)	28
2.3.2.9.	比热容、气体常数	28
2.3.2.10.	换热系数	28
2.3.2.11.	动力粘度	28
2.3.2.12.	运动粘度	28
2.3.2.13.	温度	28
2.3.2.14.	英制和美制长度单位	30
2.3.2.15.	英制和美制面积单位	30
2.3.2.16.	英制和美制体积单位	30
2.3.2.17.	美制干物质(堆料)容积量单位	31
2.3.2.18.	英制和美制液体容积量单位	31
2.3.2.19.	英制和美制石油及其衍生物(石油、煤油、汽油等)的容积量单位	31
3.	燃烧计算	32
3.1.	概述	32
3.2.	基本燃烧计算	32
3.2.1.	基本燃烧方程	32
3.2.2.	化学计量(或理论)燃烧时的燃料特征参数	32
3.2.3.	燃烧计算方法	36
3.2.3.1.	化学计量燃烧	36
3.2.3.2.	过量空气下的燃烧	36
3.2.3.3.	燃料和烟气的特征参数	36
3.2.4.	过量空气下的烟气组成	37
3.2.4.1.	过量空气下干烟气的组成	37
3.2.4.2.	过量空气下湿烟气的组成	37
3.2.5.	普遍适用的燃烧方程	38
3.2.6.	烟气分析和过量空气系数	38
3.2.7.	多种燃料同时完全燃烧	38
3.2.7.1.	质量份额、能量份额和混合燃料的低位发热量	38
3.2.7.2.	化学计量燃烧时混合燃料的燃烧计算	39
3.2.7.3.	过量空气下混合燃料的燃烧计算	39
3.2.7.4.	燃料和烟气的特征参数	39
3.2.7.5.	湿烟气的组成	39
3.2.8.	基本燃烧计算示例	39
3.2.8.1.	已知数据	39

3.2.8.2.	混合燃料的低位发热量	40
3.2.8.3.	空气需要量	40
3.2.8.4.	二氧化碳	41
3.2.8.5.	二氧化硫	41
3.2.8.6.	氮(包括氩)	41
3.2.8.7.	烟气中的氧	41
3.2.8.8.	水蒸气	41
3.2.8.9.	干烟气	42
3.2.8.10.	湿烟气	42
3.3.	统计燃烧计算	43
3.3.1.	概述	43
3.3.2.	燃烧计算公式	43
3.3.2.1.	统计分析	43
3.3.2.2.	$n=1$ 时单位燃料量的燃烧用空气量和烟气量	43
3.3.2.3.	单位燃料量的空气量	43
3.3.2.4.	考虑空气含湿量时单位燃烧量的空气量和烟气量	44
3.3.2.5.	烟气特征参数	44
3.3.2.6.	体积份额和质量份额间的关系	44
3.3.2.7.	锅炉验收试验(DIN 1942)	44
3.3.3.	煤的统计燃烧计算	44
3.3.3.1.	统计分析	44
3.3.3.2.	$n=1$ 时单位燃料量的空气量和烟气量	44
3.3.3.3.	单位燃料量的燃烧用空气量	45
3.3.3.4.	考虑空气含湿量时单位燃料量的空气量和烟气量	45
3.3.3.5.	烟气特征参数	45
3.3.3.6.	体积份额和质量份额间的关系	45
3.3.3.7.	已知水分和灰分时的统计分析	45
3.3.4.	燃油的统计燃烧计算	47
3.3.4.1.	统计分析	47
3.3.4.2.	$n=1$ 时单位燃料量的空气量和烟气量	47
3.3.4.3.	单位燃料量的燃烧用空气量	47
3.3.4.4.	考虑空气含湿量时单位燃料量的空气量和烟气量	47
3.3.4.5.	烟气特征参数	48
3.3.4.6.	体积份额和质量份额间的关系	48
3.3.5.	天然气的统计燃烧计算	49
3.3.5.1.	统计分析	49
3.3.5.2.	$n=1$ 时单位质量燃料的空气量和烟气量	49
3.3.5.3.	单位质量燃料的燃烧用空气量	49
3.3.5.4.	考虑空气含量时单位质量燃料的空气量和烟气量	49
3.3.5.5.	烟气特征参数	50
3.3.5.6.	体积份额和质量份额间的关系	50

3.3.6.	单位体积天然气的统计燃烧计算	51
3.3.6.1.	统计分析	51
3.3.6.2.	$n=1$ 时单位体积燃料的空气量和烟气量	51
3.3.6.3.	单位体积燃料的燃烧用空气量	51
3.3.6.4.	考虑空气含湿量时单位体积燃料的空气量和烟气量	51
3.3.6.5.	烟气特征参数	52
3.3.6.6.	体积份额和质量份额间的关系	52
3.3.7.	生活垃圾的统计燃烧计算	53
3.3.7.1.	统计分析	53
3.3.7.2.	$n=1$ 时单位燃料量的空气量和烟气量	53
3.3.7.3.	单位燃料量的燃烧用空气量	53
3.3.7.4.	考虑空气含湿量时单位燃料量的空气量和烟气量	53
3.3.7.5.	烟气特征参数	53
3.3.7.6.	体积份和质量份额间的关系	54
3.3.8.	在已知硫或硫化氢含量时煤、燃料油和天然气的统计分析	54
3.3.8.1.	煤	54
3.3.8.2.	燃料油	54
3.3.8.3.	天然气(H_u 、 H_o 的单位为 MJ/kg)	54
3.3.8.4.	天然气($H_{u,n}$ 、 $H_{o,n}$ 的单位为 MJ/kg)	55
3.4.	不同燃料的燃料特征参数和烟气特征参数	56
3.5.	燃烧计算的换算公式	57
3.5.1.	概述	57
3.5.2.	气体混合物的气体分析, 气体常数、标准状态比容、标准状态密度、 摩尔质量、低位发热量和高位发热量的换算	57
3.5.3.	低位发热量和高位发热量	59
3.5.4.	原始温度	59
3.5.5.	固体燃料的低位和高位发热量	59
4.	物性参数	60
4.1	概述	60
4.2.	气体	60
4.2.1.	概述	60
4.2.2.	理想气体的摩尔质量、标准状态密度、气体常数和标准状态体积	60
4.2.3.	比热容、比焓、比自由焓和比熵	60
4.2.4.	动力粘度、热导率和普朗特数	61
4.2.5.	低位发热量	63
4.2.6.	物性参数表和图	63

4.3.	混合气体	103
4.3.1.	概述	103
4.3.2.	混合气体的摩尔质量、比气体常数和密度	103
4.3.3.	比热容和比焓	103
4.3.4.	动力粘度、热导率和普朗特数	103
4.3.5.	高位和低位发热量	103
4.4.	干、湿空气,大气氮	104
4.4.1.	概述	104
4.4.2.	摩尔质量、比气体常数和标准状态密度	105
4.4.3.	比热容和比焓	105
4.4.4.	动力粘度、热导率和普朗特数	107
4.4.5.	物性参数图和表	108
4.4.6.	施普龙公式	112
4.4.7.	空气周围介质状态的近似值	113
4.5.	烟气	113
4.5.1.	概述	113
4.5.2.	摩尔质量、比气体常数和标准状态比容	113
4.5.3.	比热容和比焓	114
4.5.4.	动力粘度、热导率和普朗特数	114
4.5.5.	烟气的 $h-x$ 图	117
4.6.	建筑材料和保温材料的物性参数	120
5.	热工技术和流体技术相似准则	122
5.1.	雷诺数	122
5.2.	傅鲁德数	122
5.3.	普朗特数	122
5.4.	努塞尔数	122
5.5.	毕奥数	122
5.6.	贝克来数	123
5.7.	格拉晓夫数	123
5.8.	马赫数	123

6. 热交换	126
6.1. 传热	126
6.1.1. 平壁	126
6.1.2. 旋转对称壁	127
6.1.3. 减弱和沾污	128
6.1.4. 壁温	128
6.2. 顺流、逆流、叉流	129
6.2.1. 概述	129
6.2.1.1. 换热热流计算	129
6.2.1.2. 换热面积计算	130
6.2.2. 顺流和逆流	130
6.2.2.1. 换热热流计算	130
6.2.2.2. 换热面积计算	132
6.2.3. 叉流	133
6.2.3.1. 概述	133
6.2.3.2. 换热面积计算	134
6.2.3.3. 换热热流计算	134
6.2.3.4. 单程叉流	135
6.2.3.5. 多程交叉逆流	135
6.2.3.6. 公式图	135
6.2.3.6.1. 换热热流计算	135
6.2.3.6.2. 换热面积计算	139
7. 换热	141
7.1. 辐射换热	141
7.1.1. 概述	141
7.1.1.1. 反射和吸收	141
7.1.1.2. 黑体	141
7.1.1.3. 兰贝特定律	141
7.1.1.4. 灰体	141
7.1.1.5. 热辐射角系数	141
7.1.1.6. 辐射层厚度	143
7.1.2. 燃烧室换热	143
7.1.2.1. 基本公式	143
7.1.2.2. 各段的热交换	143
7.1.2.3. 平均火焰温度	146
7.1.2.4. 壁面与火焰的吸收和发射	146
7.1.2.5. 火焰几何形状	147

7.1.2.6.	绝热燃烧时的焓	147
7.1.2.7.	应用	147
7.1.3.	气体辐射换热	149
7.1.3.1.	基本公式[7.8.9.10]	149
7.1.3.2.	测算换热系数 α_i 的简单方法	150
7.2.	对流换热	158
7.2.1.	概述	158
7.2.2.	单相流动的对流换热	158
7.2.2.1.	管道和其他通道内的流动	158
7.2.2.2.	横向掠过光管和光管管束的流动	159
7.2.2.3.	横向掠过肋片管束的流动	164
7.2.3.	两相流动中的对流换热	173
7.2.3.1.	泡态沸腾(在准备中)	173
7.2.3.2.	膜态沸腾	173
7.2.3.3.	凝结换热(在准备中)	176
8.	壁温计算	179
8.1.	概述(在准备中)	179
8.2.	恒定温度场	179
8.2.1.	鳍片管和管-板-管结构内的温度	179
9.	压力损失	188
9.1.	单位相流动的压力损失	188
9.1.1.	概述	188
9.1.2.	管道和其他通道内的流动	188
9.1.2.1.	摩擦阻力系数	188
9.1.2.2.	截面变化时的阻力系数	192
9.1.2.3.	改变流向时的阻力系数	193
9.1.2.4.	分叉管的阻力系数	194
9.1.2.5.	内部构件的阻力系数	194
9.1.3.	管和管束的绕流	196
9.1.3.1.	光管的纵向绕流	196
9.1.3.2.	光管和管束的横向或斜向绕流	196
9.1.3.3.	加肋管束的横向绕流	196
9.2.	(原资料缺)	202
9.3.	轴向流入的分配联箱和轴向流出的汇集联箱的压力损失和流量分配	202

9.3.1.	概述.....	202
9.3.2.	特性系数.....	203
9.3.3.	轴向流入的分配联箱和径向流出的汇集联箱.....	203
9.3.4.	径向流入的分配联箱和轴向流出的汇集联箱.....	204
9.3.5.	U形流向布置的分配联箱和汇集联箱	204
9.3.6.	Z形流向布置的分配联箱和汇集联箱	205
9.3.7.	分叉流动系统.....	207
9.4.	(原资料缺).....	210
10.	能量平衡和物料平衡	211
10.1.	概述	211
10.2.	灰平衡、渣平衡和飞灰平衡.....	211
10.2.1.	概述	211
10.2.2.	总除灰率、除尘效率.....	212
10.2.3.	单位质量燃料的炉渣和飞灰质量	212
10.3.	燃烧物料平衡	214
10.4.	锅炉尾端处的平衡	214
10.4.1.	概述	214
10.4.2.	技术数据和经验数据	215
10.4.3.	计算方法	215
10.5.	能量平衡和效率	217
10.5.1.	概述	217
10.5.2.	单位质量燃料的输入能量	217
10.5.3.	单位时间输入能量	217
10.5.4.	单位质量燃料的能量损失	217
10.5.5.	单位时间输出能量	218
10.5.6.	燃料流量	218
10.5.7.	效率和各单项损失	218
10.6.	制粉系统煤的干燥	219
10.7.	炉膛和锅炉受热面的平衡	220
10.7.1.	炉膛的质量流量平衡	220
10.7.2.	炉膛内的理论烟气焓	220
10.7.3.	锅炉受热面的平衡	220

附录..... 222

 水蒸气 $h-p$ 图 223

 水蒸气 $h-\theta$ 图(缺)

 膜态沸腾时最小换热系数的确定..... 224

 沸腾危机部位蒸汽含量的确定..... 225

 热力计算表格..... 226

2. 符号说明和单位

2.1. 符号说明

2.1.1. 概述

本手册中的部分符号采用由基本符号加注上角标和下角标的方式构成,其目的是尽可能地使这些符号运用于整个手册。同时,手册还尽量采用了标准〔3〕中、通用技术中和数学中惯用的符号,或者加注下角标加以变化。

对在公式中以辅助参数出现且对整个手册并非都适用的符号,均不列入符号表内,而是在公式前后立即加以说明。

如果在个别章节中有的符号需要同一般规定有所不同,那么在有关章节的开头均对此作出明确的注释或说明。

符号表中还收入了一些并非本手册专用的符

号,其意义在有关方面应已早已明确。

2.1.2. 应用

本手册使用小写或大写拉丁字母或希腊字母作为基本符号,这些符号附加上角标或下角标后则成为具有专门意义的符号。

下表列入了全部基本符号,并说明其意义。需要特别予以说明者,同样通过上角标或下角标带来意义变化后才收入本表。非通用性的下角标一般不收入,而是与其基本符号一起加以说明。

如果要查找某一符号的解释,必须首先查找基本符号,看是否列入。若查找不到,则其意义一定会从基本符号加注上、下角标后的符号说明中得出。

2.1.3. 小写拉丁字母

符 号	意 义	单 位	备 注
a	加速度	m/s^2	
b	多项式系数	—	
c	比热容	$(J/kg \cdot K)$	
c_p	定压比热容	$(J/kg \cdot K)$	
$\bar{c}_p$	积分平均定压比热容	$(J/kg \cdot K)$	
d	内径	m	
d_a	外径	m	
d_{hyd}	水力直径	m	
e	相对节距	—	
e_s	相对横向节距	—	
e_l	相对纵向节距	—	
f	系数(一般的)	—	
	函数(为后随括弧内变量的函数)	—	

续表

符 号	意 义	单 位	备 注
f_{co_2}	CO ₂ 辐射压力修正系数	—	
f_e	结构布置系数	—	
f_{ed}	膨胀压力修正系数	—	
f_{ex}	压力损失指数系数	—	
f_{ge}	干扰入口压力损失修正系数	—	
f_G	材料值修正系数	—	
$f_{\text{H}_2\text{O}}$	水汽辐射压力修正系数	—	
f_{mi}	压力损失降低系数	—	
f_{na}	不构成流动的修正系数	—	
f_{qua}	长方形体层厚系数	—	
f_{sa}	倾斜入流压力损失系数	—	
f_{sw}	螺旋绕流压力损失系数	—	
f_t	管束层厚系数	—	
f_u	投影受热面到圆周受热面的换算系数	—	
f_z	管列数<10的压力损失系数	—	
f_{zyl}	圆柱体层厚系数	—	
f_d	对流换热入流系数	—	
g	重力加速度	m/s ²	
h	比焓	J/kg	
k	传热系数	W/(m ² ·K)	
l	损失	—	
m	质量	kg	
m_A	喷嘴和板的横截面比	—	
$\dot{m}$	质量流量	kg/s	
$\dot{m}_D$	蒸汽流量	kg/s	
$\dot{m}_{DZ}$	再热蒸汽流量	kg/s	
$\dot{m}_E$	喷水流量	kg/s	
$\dot{m}_{EZ}$	再热器喷水流量	kg/s	
$\dot{m}_i$	给水流量	kg/s	
n	过量空气系数	—	
p	压力	bar	热力学和流体力学的附加量
p_1	允许工作表压	bar	
p_2	允许总表压	bar	如在热水锅炉中
p_3	大气压计压力	bar	大气压力
p_4	计算压力	N/mm ²	用于强度计算,参阅 TRD
p_5	(当时的)工作表压	bar	
p_6	静压力	bar	
p_7	动压力、全压头	bar	
p_{CO_2}	CO ₂ 的分压力	bar	其他气体时加相应的下角标

续表

符 号	意 义	单 位	备 注
p_{H_2O}	水蒸气的分压力	bar	
$\dot{q}$	热流密度	W/m^2	
r	比汽化热	J/kg	$r = r'' - r'$
r	纵向坐标	m	
s	壁厚	m	一般的
s_r	圆筒壳体制造壁厚	m	参阅 TRD
s_{th}	热边界层	m	
t	节距	m	
u	能量份额	J/J	
v	比容	m^3/kg	
w	速度	m/s	
x	质量含量(份额)	kg/kg	一般的, γ 除外
x_{CO_2}	湿烟气中 CO_2 质量含量	kg/kg	对于燃料 γ 是基本单位
$x_{CO_2,T}$	干烟气中 CO_2 质量含量	kg/kg	
x_{H_2O}	湿烟气中 H_2O 质量含量	kg/kg	
$x_{H_2O,L}$	空气中水蒸气质量含量 (其他成分含量按意义标明)	kg/kg	对于干空气而言
x_a	最小换热系数时蒸汽含量	kg/kg	
y	体积含量(份额)	m^3/m^3	一般的
y_{CO_2}	湿烟气中 CO_2 体积含量	m^3/m^3	
$y_{CO_2,T}$	干烟气中 CO_2 体积含量	m^3/m^3	
y_{H_2O}	湿烟气中 H_2O 体积含量(其他成分按意义标明)	m^3/m^3	
z	时间	s	

2.1.4. 大写拉丁字母

符 号	意 义	单 位	备 注
A	面积	m^2	一般的
A_{rad}	折算受热面积	$\frac{m^2}{1000m^3/h}$	
A_w	投影壁面积	m^2	
Bi	毕奥数	—	
C	辐射系数	$W/(m^2 \cdot K^4)$	
C_b	黑体辐射系数	$W/(m^2 \cdot K^4)$	$C_b = 5.77W/(m^2 \cdot K^4)$
F	力	N	
Fr	傅鲁德数	—	
G	重力	N	$G = mg$
Gr	格拉晓夫数	—	
H	焓	J	
$\dot{H}$	焓流	W	
H_o	高位发热量	J/kg	

续表

符 号	意 义	单 位	备 注
H_u	低位发热量	J/kg	
K	水力粗糙度	m	
L	长度	m	
M	摩尔质量	kg/kmol	
Ma	马赫数	—	
Nu	努塞尔数	—	
P	功率	W	
Pe	贝克来数	—	
Pr	普朗特数	—	
Q	热量	J	
$\dot{Q}$	热流量	W	
R	气体常数	J/(kg · K)	
	半径	m	
R_m	摩尔气体常数	J/(mol · K)	
Re	雷诺数	—	
S	层厚	m	
T	热力学温度	K	
U	周长	m	
V	体积	m ³	
$\dot{V}$	体积流量	m ³ /s	
V_{mn}	标准(标准状态)摩尔体积	m ³ /kmol	
Z	数量	—	管列数,孔数等
Z_R	每米管的肋片数	1/m	$t_R = 1/Z_R$

2.1.5. 小写希腊字母

符 号	意 义	单 位	备 注
α	换热系数	W/(m ² · K)	一般的
α_{CO}	CO 辐射换热系数	W/(m ² · K)	
α_{CO_2}	CO ₂ 辐射换热系数	W/(m ² · K)	
α_{H_2O}	H ₂ O 辐射换热系数	W/(m ² · K)	
α_{SO_2}	SO ₂ 辐射换热系数	W/(m ² · K)	
β_1	线膨胀系数	1/K	
β_3	体胀系数	1/K	
γ	燃料中质量分数	kg/kg	
γ_A	燃料中灰分	kg/kg	
γ_B	燃料中所有可气化成分之总和	kg/kg	$\gamma_B = 1 - \gamma_A$
γ_C	燃料中碳含量	kg/kg	
γ_H, γ_{H_2}	燃料中的氢含量	kg/kg	
γ_N, γ_{N_2}	燃料的氮含量	kg/kg	
γ_O, γ_{O_2}	燃料的氧含量	kg/kg	