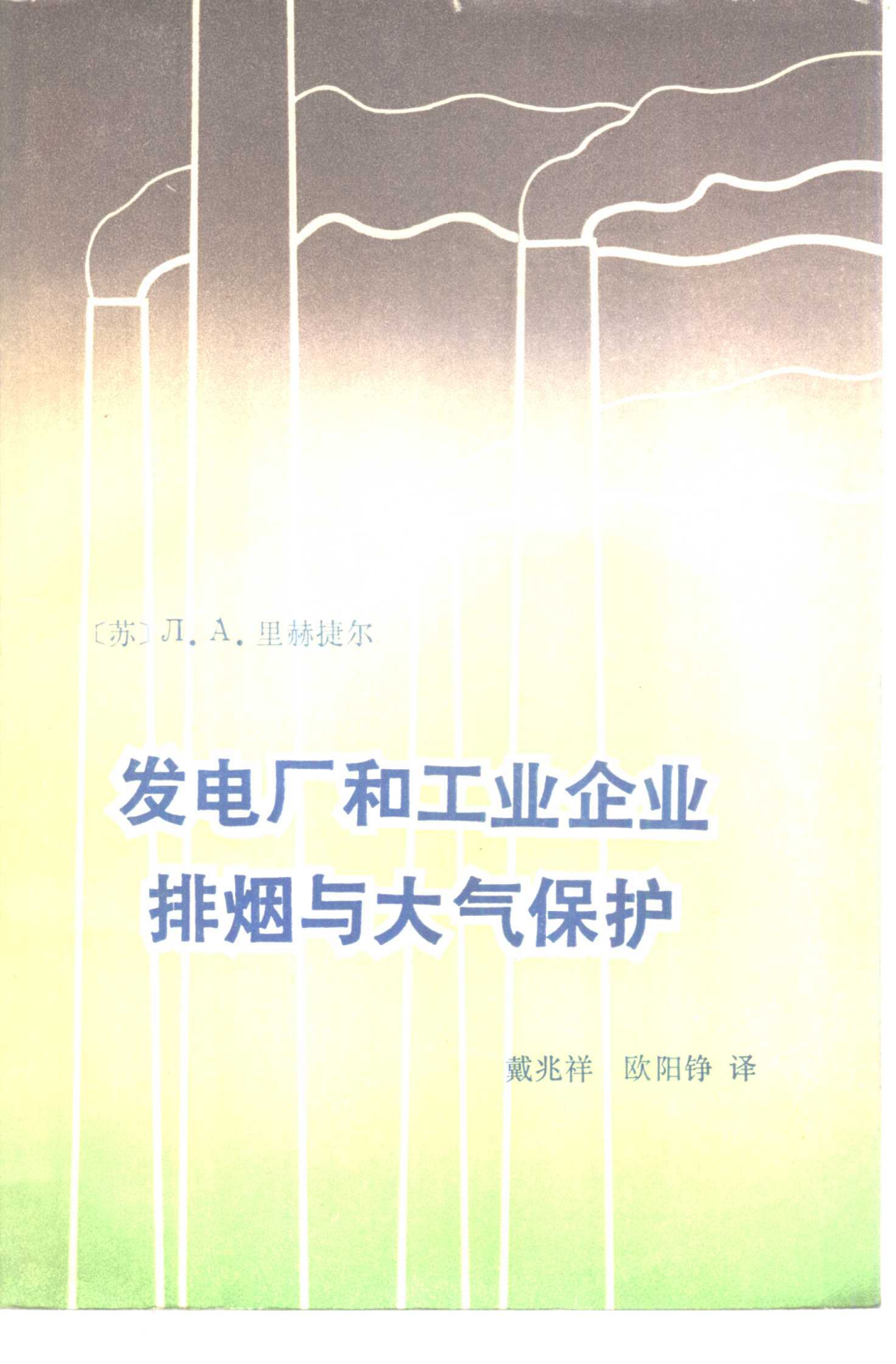




〔苏〕Л. А. 里赫捷尔

发电厂和工业企业 排烟与大气保护

戴兆祥 欧阳铮 译

发电厂和工业企业 排烟与大气保护

[苏] Л. А. 里赫捷尔

戴兆祥 欧阳铮 译

电力工业出版社

内 容 提 要

本书着重介绍保护大气不受火电厂和工业企业排烟中有害物质污染的综合措施。书中主要包括：烟气中的灰粒、 SO_2 和 NO_2 等有害物质对生物界的影响和降低其排放量的措施；大气层结构和有害物质的扩散机理；各类除尘器的工作原理和提高电气除尘器效率的方法；各种烟气脱硫和燃料脱硫的工艺过程和合理组织炉内燃烧过程等问题。此外，对单筒烟囱或多筒组合烟囱扩散烟气中有害物质的理论、计算和实践等问题，也作了论述。本书原名为《Тепловые электрические станции и защита атмосферы》，因该书内容不仅适用于火电厂，而且适用于燃用动力燃料的工业企业排烟波及区域的大气保护，故改为现在的书名。

本书可供发电厂和工业企业环境保护的工程技术人员及除尘器和烟囱的科研、设计和运行的工程技术人员和工人学习参考，对大专院校有关专业的师生也有参考价值。

Л. А. Рихтер

Тепловые электрические станции
и защита атмосферы
Москва 1975. «ЭНЕРГИЯ»

发电厂和工业企业排烟与大气保护

[苏] Л. А. 里赫捷尔
戴兆祥 欧阳铮 译

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 10.25印张 227千字

1980年7月第一版 1980年7月北京第一次印刷

印数 0001—7210册 定价 1.10元

书号 15036·4072

前 言(摘译)

目前,火力发电厂所消耗的燃料,约占世界燃料采掘量的三分之一以上。因此,无论是对火力发电厂所在地区的大气层,还是对整个生物界都要产生严重的影响。火力发电厂对外界的影响,主要是向水域放热和向大气层排放含有有害物质的烟气,从而污染了水源和大气层。本书主要叙述火力发电厂向大气排放的烟气中有害物质对周围环境的影响及其防治措施。

保护大气层不受火力发电厂排烟中二氧化硫的影响,目前解决的办法是采用高达180米、250米甚至320米的高烟囱将烟气扩散。要减少二氧化硫的排放,最根本的措施是对燃料进行脱硫。但是,到目前为止还没有研究出一种在经济上能够被接受的脱硫净化方法。

动力工业以很高的速度发展着。如果1970年全世界生产约5万亿度电的话,那么,到1980年可望生产10万亿度电,而到2000年则将生产30万亿度电。随着电能生产的增加,能源的消耗也将随之而增加,从而将会引起能源结构形式的变化。例如,到1980年商品能源的生产将从1970年的66亿吨标准燃料增加到100亿吨标准燃料,其中核燃料占4~7%;而到2000年时,世界能源生产总量将要增加到200亿吨标准燃料,这时核燃料约占20%。除了要利用当地的燃料外,还将利用世界海洋大陆架区域的石油和天然气,也要利用沥青和油页岩。因而,关于研究火力发电厂对大气状态影响的问

题，近期内还是很现实的。

固体燃料燃烧时，除了碳、氢、氧等主要可燃元素外，还会带有未完全燃烬燃料颗粒的飞灰、二氧化硫和硫酸酐、氮氧化物、微量的氟化物以及燃料的气体不完全燃烧产物排入大气。重油燃烧时，随同烟气一起排入大气的有二氧化硫、硫酸酐、气体的和固体的不完全燃烧产物、钒化物、钠盐以及清除锅炉受热面上的沉积物[文献1-3]。这些物质中的大部分是有毒的，即使其浓度很小，也会对自然界和人类产生有害的影响。

大容量凝汽式发电厂排放的有害物质最多，这类电厂通常建在人口稀少的地区。在该地区相对说来，其它污染源对大气层的污染数量是有限的。这些凝汽式发电厂的容量很大，而且多数燃用劣质燃料。因此，这些发电厂便是大量二氧化硫、氮氧化物的排放源。

因为城市中人口稠密，工业企业、运输车辆、居民采暖和发电厂都要排放大量的有害物质，因此要在工业城市中保持非常清洁的大气层是很复杂的。

在苏联优先采用向城市联合供应热能和电能的热电厂。联合生产热能和电能，能使燃料消耗大为减少，能采用最完善的燃烧方法和烟气净化措施，并能使烟气排向高层大气。这些对于多数的锅炉房和日常生活用的炉子来说，是不可能做到的；同时，由热电厂供应电力会使市区燃烧的燃料量增加，因而要与其它污染源排放的有害气体一起考虑，采取特殊措施以降低烟气中有害气体的浓度。

当然，如果不仅在热电厂，而且在其它工业企业和运输车辆上也采取适当措施后，在城市中还是能够保持非常清洁的空气中的。对于危害最大的工业企业应迁移到城外，而运输

车辆应采用排放有害物质最小的发动机（例如，用天然气代替汽油和采用电气机车运输等）。

本书研究了降低火力发电厂排烟中所含有害物质浓度的方法。通常，采用哪种方法，是同解决一系列复杂的科学技术问题联系在一起的，同时也与建设相应的设备所耗费的大量基建费用有关。对于人体长期影响的问题是非常重要的，需要确定在呼吸区所允许的有害物质浓度的标准，以及选择极限浓度的方法。

书中引用了苏联在建设大容量火力发电厂时，解决有关保护空气不受污染问题的具体资料。这些资料是在作者的指导下，由莫斯科动力学院发电厂教研组作了很多工作的基础上编写成的。

作 者

目 录

前 言

第一篇 减少火力发电厂的有害物质在大气中的排放

第一章 燃料和烟气中的有害物质及其对生物界的影响 …1

1-1 燃料和烟气中的有毒物质 ……………1

1-2 苏联的燃料-动力平衡简介 ……………8

1-3 火力发电厂的排放物对生物界的影响 ……………13

第二章 火力发电厂除尘的基本原理 ……………25

2-1 发电厂锅炉飞灰的特性 ……………25

2-2 除尘器的型式 ……………32

2-3 除尘的基本原理 ……………37

2-4 各种型式除尘器除尘效率的计算 ……………43

第三章 电气除尘器 ……………55

3-1 电气参数对电气除尘器的影响 ……………55

3-2 几何相关尺寸对电气除尘器除尘效率的影响 ……………66

3-3 新型的苏联产电气除尘器 ……………73

3-4 气流均匀性对电气除尘器除尘效率的影响 ……………77

3-5 粉尘分布对除尘效率的影响 ……………90

3-6 设备的选择及烟道的布置 ……………92

第四章 减少硫氧化物和氮氧化物的排放 ……………105

4-1 炼油厂中燃料油的脱硫 ……………105

4-2 火力发电厂含硫燃料燃烧前的加工 ……………107

4-3 燃烧产物的净化及燃料的脱硫 ……………113

4-4	火力发电厂锅炉中氮氧化物的生成条件	119
4-5	在锅炉炉膛中降低氮氧化物浓度的方法	125

第二篇 火力发电厂排放物在大气中的扩散

第五章	混杂物在大气中的扩散	131
5-1	大气结构和关于火力发电厂烟囱排放物扩散问题的提出	131
5-2	静止大气层中混杂物的扩散	139
5-3	混杂物的湍流扩散方程	144
5-4	混杂物按萨顿原理分布	150
5-5	在各向同性湍流条件下, 由连续点源排放的混杂物扩散的半经验计算方法	158
5-6	大气层层结中混杂物的扩散	173
第六章	大气中烟云的抬升和火力发电厂烟囱高度的计算	179
6-1	气流动能产生的烟云抬升	197
6-2	烟气和空气密度差产生的烟云抬升	188
6-3	烟云的总抬升高度和模型试验问题	196
6-4	危险风速	201
6-5	苏联的烟囱高度计算方法	214

第三篇 火力发电厂的烟囱

第七章	单筒烟囱	223
7-1	最简单的烟囱	223
7-2	恒定坡度筒身烟囱内的静压力	228
7-3	变坡度筒身烟囱内的静压力	235
7-4	烟囱的扩压器	238
7-5	带通风夹层烟囱	245
7-6	分段筒身烟囱	250

第八章 火力发电厂烟囱数量的选择和多筒组合烟囱·····	258
8-1 影响选择火力发电厂烟囱数量的因素·····	258
8-2 多筒组合烟囱的型式和出口部分的特征·····	265
8-3 多筒组合烟囱高度的确定·····	271
8-4 凝汽式发电厂的多筒组合烟囱·····	277
8-5 热电厂的多筒组合烟囱·····	286
8-6 烟囱的技术-经济计算·····	295
结束语·····	306
附录 苏联某些动力燃料的折算特性·····	310
参考文献·····	314

第一篇 减少火力发电厂的 有害物质在大气中的排放

第一章 燃料和烟气中的有害物质 及其对生物界的影响

1-1 燃料和烟气中的有毒物质

燃料应用基的有机成分，是由碳 C^p 、氢 H^p 、氧 O^p 、氮 N^p 、硫 S^p 、水分 W^p 以及灰分 A^p 组成。由于燃料在空气介质中的完全燃烧，在烟气中形成了二氧化碳 CO_2 、水蒸气 H_2O 、氮 N_2 、二氧化硫 SO_2 、硫酸酐 SO_3 和飞灰。上述完全燃烧产物中的二氧化硫、硫酸酐和灰分属于有害物质。某些燃料的飞灰中，除了无毒的成分以外，还含有某些杂质。例如顿涅茨（Донец）无烟煤的灰分中含有砷，埃基巴斯图兹克（Экибастуск）煤的灰分中，含有游离的二氧化硅，坎斯科-阿钦斯克（Канско-Ачинск）煤和油页岩的灰分中含有游离的氧化钙。

近年来，已经开始注意降低燃料燃烧过程中由空气中的氮而产生的氮氧化化合物的含量，因为这种氮氧化合物有极高的毒性。1966年以来，苏联开始认为这一问题具有特殊的意义。苏联卫生部已经规定，要求考虑二氧化硫和氮氧化合物总和的影响。

最后应当指出，一些燃料的烟气中有某些典型的有害成分。例如，当燃用某些固体燃料时，可能形成氟的化合物；当燃用重油时，还会有一些钒的化合物和钠盐排入大气。

二氧化碳不属于有毒物质，但它会影响靠近地球表面大气层的总状况。

如果由于燃烧过程进行得不完全，而使烟气中含有不完全燃烧产物，那么情况就变得相当复杂了。火力发电厂的锅炉炉膛中主要的不完全燃烧产物是一氧化碳 CO ，一氧化碳也是汽车运输排气的特征。此外，在不完全燃烧时，烟气中还会含有 CH_4 和 C_2H_4 等各种碳氢化合物。不完全燃烧产物是很有害的成分，而且它们会急剧地恶化火力发电厂所在区域的大气状况。但是，目前对于火力发电厂和大容量的现代锅炉房来说，燃料的完全燃烧问题，应该认为是完全可以解决的，只有小型锅炉房和住宅采暖才有防止不完全燃烧产物的问题。

计算除尘器和烟囱时，必须算出烟气的容积、灰分和硫分的排放量，以及烟气中灰分和硫的氧化物浓度等数据，后面将提出上述这些数据的相应计算方法。按照新的要求，计算时应采用国际单位制（СИ）。

考虑到目前尚缺少新的单位制的某些数据（例如燃料的发热量），所以在本书末的附录中列出了有关数据。

为了迅速地计算这些数值，本书采用了所谓燃料和烟气元素成分的折算特性。大家知道，所谓燃料的折算特性，不是相对于一公斤燃料，而是相对于1000大卡燃料发热量的数值。例如

$$S^{np} = S^p \frac{1000}{Q_p^p}, \quad A^{np} = A^p \frac{1000}{Q_p^p},$$

式中 S^{np} ——折算到 1000 大卡硫的含量，%； A^{np} ——折算到 1000 大卡灰的含量，%。

给出这些燃料折算特性的目的在于，它能使燃料性质的概念更为准确。因为锅炉的蒸发量不取决于燃料的数量，而取决于燃料所带入的热量。

按照国际单位制，在此处引用的是折算到一兆焦耳的燃料特性。因此

$$S^{np} = \frac{S^p}{Q_H^p}, \quad A^{np} = \frac{A^p}{Q_H^p}, \quad v_r^{np} = \frac{V_r^p}{Q_H^p},$$

式中 Q_H^p ——低位发热量，兆焦耳/公斤。

可以利用燃料的折算特性，来评价什么样的燃料是多硫的或是多灰的，并把折算特性直接带入公式就可计算出相应排放量。折算特性的重要性还在于，它证明了维利捷尔-别尔季也（Вельтер-Бертье）定律是相当保守的。例如，对所有的烟煤和无烟煤来说，折算的空气容积在 $V_B^{np} = 0.259 \sim 0.272$ 范围以内。可是，相对于一公斤的烟煤和无烟煤来说，空气容积却在很大的范围内变化。

附录中，给出了苏联动力燃料的折算特性和这些燃料燃烧时所需要的空气容积。

下面，我们根据折算特性的原理，列举计算烟气容积、灰分和硫分排放量的方法。

在额定负荷时，对于额定功率为 W 兆瓦的凝汽式单元机组，所消耗燃料的热量（兆瓦），可按下式计算

$$Q = \frac{W}{\eta_{sc}}, \quad (1-1)$$

式中 η_{sc} ——在额定负荷时，电厂（单元机组）的毛效率。

电厂的效率数值与发一度电的燃料消耗率 b_y （公斤）的

关系（为表示火力发电厂的热经济性，采用了国际单位制以外的单位）：

$$\eta_{\text{эс}} = \frac{0.123}{b_y}. \quad (1-2)$$

如果已知的不是单元机组的功率，而是锅炉的蒸发量和蒸汽参数，那么它的有效热量（忽略排污的热量），可按下列式确定

$$Q_{\text{п}} = D_{\text{пс}}(i_{\text{п.п}} - i_{\text{п.в}}) + D_{\text{вт}}(i''_{\text{вт}} - i'_{\text{вт}}), \text{兆瓦}, \quad (1-3)$$

式中 $i_{\text{п.п}}$ 、 $i_{\text{п.в}}$ 、 $i'_{\text{вт}}$ 、 $i''_{\text{вт}}$ ——过热蒸汽、给水以及再热器进、出口蒸汽的热焓值，兆焦耳/公斤； $D_{\text{пс}}$ 、 $D_{\text{вт}}$ ——过热蒸汽流量和再热器的蒸汽流量，公斤/秒。

产生一公斤过热蒸汽的热耗率按下式确定

$$q_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{п}}}{D_{\text{пс}}} = (i_{\text{п.п}} - i_{\text{п.в}}) + \frac{D_{\text{вт}}}{D_{\text{пс}}}(i''_{\text{вт}} - i'_{\text{вт}}), \text{兆焦耳/公斤}. \quad (1-4)$$

对于各种参数锅炉的 $q_{\text{п}}$ 值，列于表1-1中。

锅炉的热功率（兆瓦）

$$Q_{\text{п}} = q_{\text{п}} D_{\text{пс}}, \quad (1-5)$$

而所消耗的燃料热量（兆瓦）

$$Q = \frac{Q_{\text{п}}}{\eta_{\text{пг}}}. \quad (1-6)$$

烟道上任意点的烟气容积，对于一兆焦耳热量的燃料，折算到标准工况（米³/兆焦耳），可按下列式计算

$$v_{\text{г}}^0 = \left[V_{\text{г}}^{\text{пг}} + (\alpha - 1) V_{\text{в}}^{\text{пг}} \right] \frac{100 - q_4}{100}. \quad (1-7)$$

在相应的烟道温度下，烟气的容积（米³/兆焦耳）

表 1-1 产生一公斤蒸汽所消耗的热量 q_n (兆焦耳/公斤)

p_{nc} (兆帕)	t_{nc} (°C)	$p_{στ}$ (兆帕)	$t_{στ}$ (°C)	$t_{n.н}$ (°C)	$D_{στ}/D_{nc}$	q_n (兆焦耳/公斤)
3.9	450	—	—	150	—	2.70
9.8	510	—	—	215	—	2.48
9.8	540	—	—	215	—	2.56
13.7	570	—	—	230	—	2.53
13.7	570	2.3	570	235	0.875	2.98
25.0	585	3.6	570	260	0.840	2.81
25.0	565	3.8	570	265	0.800	2.70 ^①
25.0	565	4.3	570	260	0.860	2.79 ^②

① 30万千瓦单元机组。

② 50万千瓦单元机组。

$$v_r = v_r^0 \frac{T_r}{273} \quad (1-8)$$

上述公式中的 α 表示烟道相应点的过剩空气(系数)^①;
 T_r ——烟道上相应点的烟气温度, K; V_{B}^{np} ——额定工况和
 $\alpha = 1$ 时的折算空气容积, 米³/兆焦耳(见附录); V_r^{np} ——
 在额定工况和 $\alpha = 1$ 时的烟气容积, 米³/兆焦耳; $\eta_{n.r}$ ——
 锅炉的效率; q_4 ——机械不完全燃烧热损失, %。

在额定工况下, 每秒钟的烟气流量(米³/秒)

$$V_r^0 = v_r^0 Q, \quad (1-9)$$

在相应的烟道温度下, 每秒钟的烟气流量(米³/秒)

$$V_r = v_r Q. \quad (1-10)$$

因此, 如果在锅炉计算中没有给出烟道某点的烟气流量
 时, 则可以根据折算关系式和附录中的数据, 很快地把它算

① 原文为过剩空气, 漏系数。——译者

出来。进入除尘器的灰量（克/秒），可按下式计算

$$M'_3 = 10(A^{np} + 0.03q_4)\alpha_{yH}Q, \quad (1-11)$$

式中 α_{yH} ——由炉膛中带出的飞灰份额。该数值与炉膛的型式有关，可从下列数值进行初步选择：

炉膛型式	α_{yH}
固态排渣炉	0.95
开式液态排渣炉	0.7~0.85
半开式液态排渣炉	0.6~0.8
双室炉膛	0.5~0.6
立式前置炉膛	0.2~0.4
卧式旋风炉膛	0.1~0.15

排入大气的灰量（克/秒）

$$M_3 = M'_3(1 - \eta), \quad (1-12)$$

式中 η ——除尘效率。

排入大气中的 SO_2 量（克/秒，当没有烟气脱硫装置时）

$$M_{SO_2} = 20S^{np}Q. \quad (1-13)$$

公式（1-13）适用于全部硫分都排入大气的情况。该公式对于液体燃料是正确的，而对于固体燃料，则有一部分硫分随灰渣一起排掉了。这时，公式（1-13）中应引入一个减少系数。

这些公式可用来确定锅炉烟道中有害物质的浓度。例如，在额定工况下，除尘器前每一立方米烟气中灰的浓度（克/米³）

$$c'_3 = \frac{10(A^{np} + 0.03q_4)\alpha_{yH}}{v_r^0}, \quad (1-14)$$

除尘器后烟气中灰的浓度（克/米³）

$$c_s = \frac{10(A^{np} + 0.03q_4)\alpha_{yH}(1-\eta)}{v_r^0}, \text{ 克/米}^3. \quad (1-15)$$

排烟中 SO_2 的浓度 (克/米³)

$$c_{\text{SO}_2} = \frac{20S^{np}}{v_r^0}, \quad (1-16)$$

以及容积份额 (分压力)

$$p_{\text{SO}_2} = \frac{7 \times 10^{-3} S^{np}}{v_r^0}, \quad (1-17)$$

$$p_{\text{SO}_2} = 0.35 \times 10^{-3} c_{\text{SO}_2}. \quad (1-18)$$

在相应于 α_r 下, 烟道上任意一点的折算烟气容积, 可按公式 (1-8) 计算。

采用燃料的折算特性是很方便的, 因为不同燃料的数值变化都不大 (参见附录)。例如, 对烟煤和重油, 可以平均取: $V_B^{np} = 0.26 \text{ 米}^3/\text{兆焦耳}$ 和 $V_F^{np} = 0.28 \text{ 米}^3/\text{兆焦耳}$ ①。这时, 对于煤可取 $q_4 = 2.0\%$ 和 $\alpha_r = 1.4$, $\alpha_{yH} = 0.85$; 而对于重油 $\alpha_r = 1.3$ (锅炉后的 α_r), 可以得到计算浓度 (克/米³) 的近似公式如下:

$$\text{对于煤} \quad c'_s = 21(A^{np} + 0.1), \quad (1-19)$$

$$c_{\text{SO}_2} = 50S^{np}, \quad (1-20)$$

$$\text{对于重油} \quad c_{\text{SO}_2} = 54S^{np}. \quad (1-21)$$

在确定氮氧化合物的排放量时, 有个特点, 这时在某一过剩空气系数下 (通常是在额定工况下, $\alpha = 1.05$), 炉膛出口处二氧化氮 NO_2 的计算浓度 c_{NO_2} (克/米³) 已经确定。这时, 从火力发电厂排出的 NO_2 排放量 (克/秒), 可按下式计算:

① 原文此处遗漏单位。——译者

$$M_{\text{NO}_2} = B(V_{\text{r}}^0 + 0.05V^0)c_{\text{NO}_2},$$

式中 B ——火力发电厂的最大燃料耗量, 公斤/秒; V^0 、 V_{r}^0 ——在额定工况和 $\alpha = 1$ 时, 燃烧一公斤燃料所需的空气和烟气容积, 米³/公斤; c_{NO_2} ——在 $\alpha = 1.05$ 时, 炉膛出口的 NO_2 浓度。该数值是根据试验数据或根据列于表 4-2^①中的数据取其平均值。

对于现代凝汽式电厂, 利用折算特性作近似的估算, 可运用下列简化公式:

$$M_{\text{NO}_2} = 0.68Wc_{\text{NO}_2},$$

式中 W ——凝汽式电厂的容量, 兆瓦。

1-2 苏联的燃料-动力平衡简介

发展动力工业是高速发展国民经济各部门的基础。例如, 根据 1968 年在莫斯科召开的第七届国际动力全体会议和在布加勒斯特召开的第八届国际动力会议介绍的资料, 把 1920~1970 年期间世界电力生产情况的资料列于表 1-2 中[文献 1-2, 1-4]。

表 1-2 1920年~1970年世界电力生产的发展情况

年 份	1920	1938	1950	1960	1966	1970
电力生产(10亿度)	130	464	957	2295	3563	5000

从表中可以看出, 1920~1970 年电力生产增加了 25 倍。从 1950 年起, 每隔 8~9 年世界电力的生产就翻一番。

同时, 世界的燃料消耗量增加了。由于总的燃料消耗量增加, 燃烧石油、石油产品和天然气的比重增加, 改变了燃料的平衡。例如, 1970 年燃用石油和石油产品占 46%, 天然气占 20%。

① 原文误为表 4-1。——译者