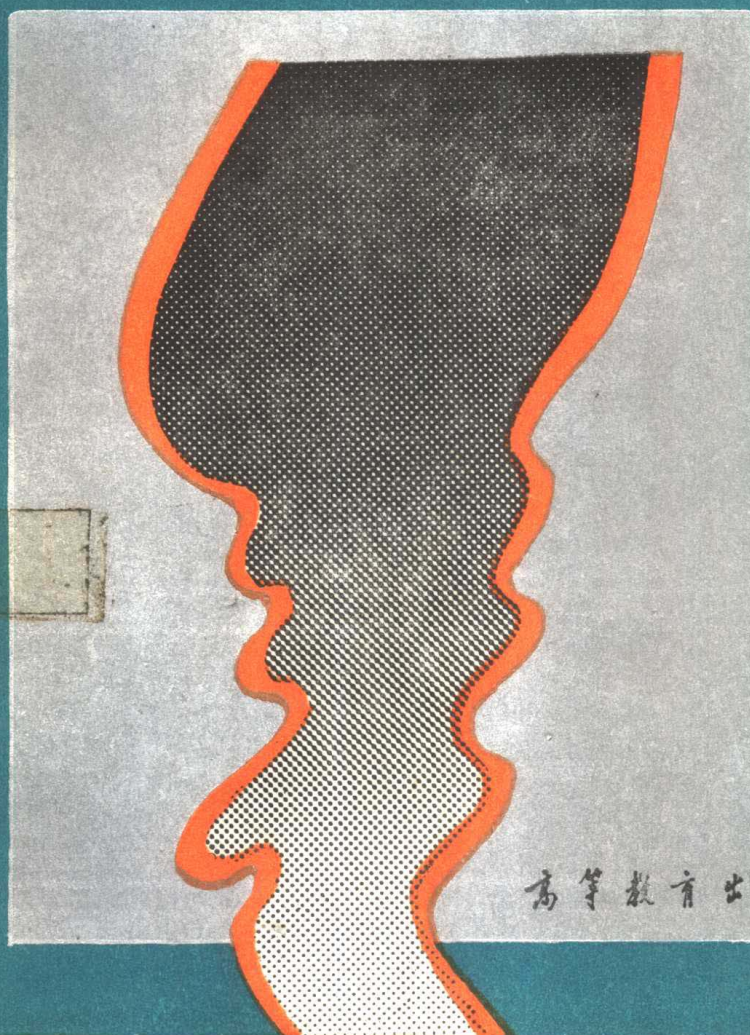


高等学校教材

# 大气污染控制工程 例题与习题

林肇信 编



高等教育出版社

# 大气污染控制工程 例题与习题

高等教育出版社

(京) 112号

## 内 容 提 要

本书是《大气污染控制工程》教材的辅助教材。各章均有内容提要，重点介绍该教材必须掌握的基本理论和基本概念。书中的例题与习题选题广泛，具有代表性，有利于更好地引导学生深入理解教材内容中的重点、难点，提高学生分析问题和解决问题的能力。并在运算技巧上得到很好训练。书中各章还编有大量思考题，目的是增强学生的思维能力。

本书可作为高等工业学校环境工程专业的教材，也可作为化工、冶金、建材、电子、机械以及采暖通风等部门从事大气环境保护工作方面的工程技术人员以及大专院校环境工程专业学生和教师的参考书。

高等学校教材

## 大气污染控制工程 例题与习题

林肇信 编

高等教育出版社出版

新华书店总店科技发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

\*

开本 850×1168 1/32 印张 9.875 字数 250 000

1994 年 5 月第 1 版 1994 年 5 月第 1 次印刷

印数 0001—3 255

ISBN7-04-004653-9/X·4

定价 4.70 元

# 前 言

本书是与《大气污染控制工程》一书相配套的辅助教材。

全书共分9章。各章包括四部分。第一部分是内容提要，简要介绍该章的主要内容和必须掌握的基本理论和基本概念以及有关的重要计算公式。第二部分为例题，配合各章的基本要求，编写了一定数量的例题。题目具有代表性，解题思路清晰，不仅有益于对概念和理论的理解，而且还能学到严谨的解题方法和步骤。第三部分是思考题。这部分内容和教材中的基本概念结合的较为紧密。目的是培养学生独立思考的能力和解决问题的能力，以及使之自我检查对所学知识掌握的情况。第四部分是习题。通过作习题使学生加深对各章基本知识的掌握和巩固，提高解决问题的技能。

此外，本书中提到的公式序号、图、表序号及附录序号均与《大气污染控制工程》（林肇信主编）教材中所对应，故简称为“教材中式××”等。

本书在编写过程中参考了大量的国内外有关文献和书籍，并结合作者的教学经验，期望能为该专业的教学做出更大贡献。本书不仅可作为高等学校环境工程专业的辅助教材，也可作为化工、冶金、建材、电子、机械以及采暖通风等部门从事大气环境保护工作者和技术人员以及大专院校环境工程专业的学生和教师的参考书。

参加本书编写工作的有金毓荃、刘凤志副教授，此外我的研究生张晓蕾、袁升华及赵志龙等人为本书的习题进行了试作。在编写过程中，国家教委环境工程专业教学指导委员会委员叶昌仁教授主持了该书审稿会，参加审稿会的还有郝吉明、朱联锡、张溱芳教授、钱枫、傅立新讲师等。高等教育出版社张月娥编

审、陈文等同志对本书的审查和加工作了很多工作，在此一并感谢！

由于编者水平所限，缺点错误在所难免，欢迎批评指正。

编 者

1993年9月

# 目 录

<b>第一章 概论</b> .....	( 1 )
1.1 本章内容提要.....	( 1 )
1.2 例题.....	( 7 )
1.3 思考题.....	( 11 )
1.4 习题.....	( 12 )
<b>第二章 燃料、燃料燃烧及燃烧器</b> .....	( 14 )
2.1 本章内容提要.....	( 14 )
2.2 例题.....	( 25 )
2.3 思考题.....	( 35 )
2.4 习题.....	( 36 )
<b>第三章 大气污染气象与污染物的大气扩散</b> .....	( 38 )
3.1 本章内容提要.....	( 38 )
3.2 例题.....	( 54 )
3.3 思考题.....	( 64 )
3.4 习题.....	( 68 )
<b>第四章 除尘技术的流体力学基础</b> .....	( 72 )
4.1 本章内容提要.....	( 72 )
4.2 例题.....	( 88 )
4.3 思考题.....	( 103 )
4.4 习题.....	( 105 )
<b>第五章 气溶胶力学基础</b> .....	( 107 )
5.1 本章内容提要.....	( 107 )
5.2 例题.....	( 125 )
5.3 思考题.....	( 143 )
5.4 习题.....	( 146 )
<b>第六章 除尘装置</b> .....	( 150 )
6.1 本章内容提要.....	( 150 )

6.2	例题	( 185 )
6.3	思考题	( 210 )
6.4	习题	( 214 )
<b>第七章</b>	<b>吸收法净化气态污染物</b>	( 220 )
7.1	本章内容提要	( 220 )
7.2	例题	( 241 )
7.3	思考题	( 257 )
7.4	习题	( 259 )
<b>第八章</b>	<b>吸附法净化气态污染物</b>	( 261 )
8.1	本章内容提要	( 261 )
8.2	例题	( 270 )
8.3	思考题	( 287 )
8.4	习题	( 288 )
<b>第九章</b>	<b>催化法净化气态污染物</b>	( 293 )
9.1	本章内容提要	( 293 )
9.2	例题	( 299 )
9.3	思考题	( 304 )
9.4	习题	( 306 )

# 第一章 概 论

## 1.1 本章内容提要

本章表述了大气圈层及其结构、大气污染的含义、大气污染源及主要污染物的发生机制。国内外大气污染及控制概况、大气污染质量标准以及大气污染综合防治等基本知识。

### 1.1.1 大气圈层及其结构

#### 1. 大气圈层

受地心引力作用随地球旋转的大气层称作大气圈层。大气圈层上界定为1200~1400公里，超过1400公里，就是宇宙空间。

大气圈层中的大气密度，随高度上升而变小。海平面上的大气密度最大。

大气圈层中的温度亦随高度而有所变化，如图1-1所示。

在正常的气象条件下，对流层的气温随距地面高度升高而降低，通常，高度每升高100米，气温平均下降 $0.65^{\circ}\text{C}$ 。在气象学上称气温随高度的变化率为气温垂直递减率，以 $\gamma = -\frac{\partial T}{\partial Z}$ 表示。实际上，对流层的 $\gamma$ 由于受当时当地的气象条件的影响，有可能 $\gamma > 0$ 、 $\gamma = 0$ 或 $\gamma < 0$ 。



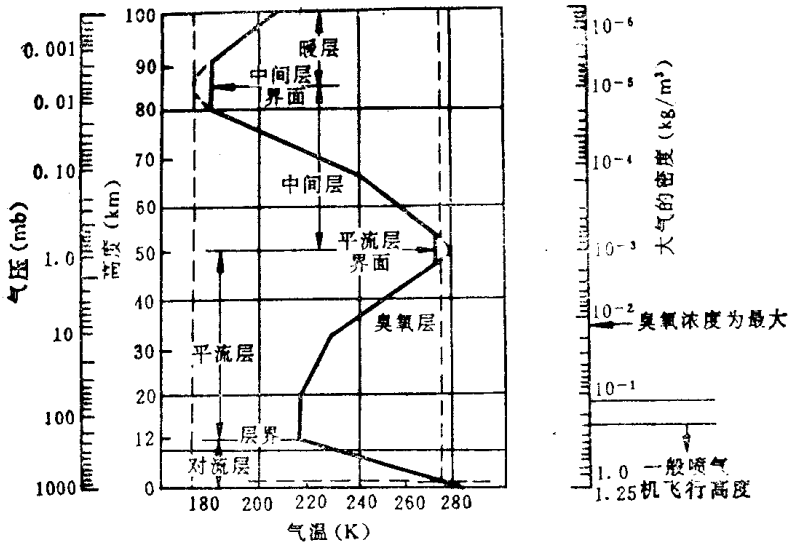


图1-1 大气圈层结构及温度分布

## 2. 大气圈层结构

大气圈层结构分均质层及非均质层。

均质层中包括对流层、平流层和中间层。非均质层中有暖层和散逸层。

对流层是大气圈最下面的气层。对流层的厚度在极地处约6~10公里、中纬度处约10~12公里、赤道处约为16~18公里。人类活动排放的污染物绝大多数聚集于对流层。

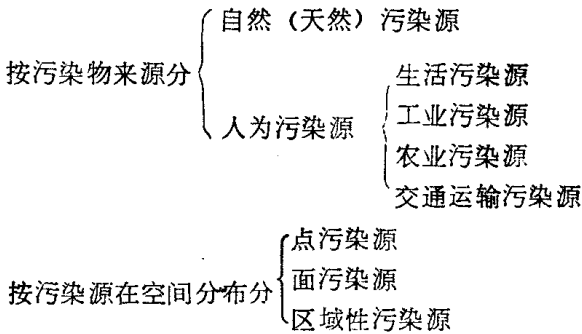
平流层位于对流层之上。平流层的下部有一个等温层，上部有一个臭氧层。由于喷气式飞机和卫星发射而进入平流层的氮氧化物、碳氢化合物、氯化氢及氟利昂有机制冷剂等可与臭氧发生光化学反应，有可能导致严重的大气污染。

### 1.1.2 大气污染的含义

当自然界中局部的质能转换和人类生活、生产活动，向大气

排放的各种污染物超过环境所能允许的极限时，大气质量就发生恶化，使人类的生活、工作、健康、精神状态，设备财产以及生态环境遭受到恶劣影响和破坏，此类现象即为大气污染

### 1.1.3 大气污染源



### 1.1.4 主要大气污染物的发生机制

在我国对环境质量影响较大的污染物有二氧化硫、氮氧化物、总悬浮微粒、飘尘、一氧化碳和光化学氧化剂。这七种污染物主要来源于燃料燃烧及工业排放的尾气。

**硫氧化物 ( $SO_x$ ):** 硫氧化物主要是指 $SO_2$ 和 $SO_3$ 。大气中 $SO_2$ 有一半是人们污染源发生的，主要是由燃烧含硫煤和石油等燃料产生的。 $SO_2$ 在洁净干燥的大气中氧化成 $SO_3$ 较为缓慢，在相对湿度比较大；有颗粒物存在时，可发生催化氧化反应，在紫外光照射下，可发生光化学反应，生成 $SO_3$ 和硫酸雾。

**氮氧化物 ( $NO_x$ ):** 大气中 $NO_x$ 种类很多，主要是指NO和 $NO_2$ 。大气中 $NO_x$ 有一半以上是由人为污染源发生的，主要来源

于化石燃料燃烧及某些应用硝酸的工业部门。燃烧化石燃料时NO<sub>x</sub>的排放率，如表1-1所示。

表1-1 燃烧化石燃料NO<sub>x</sub>的排放率(kg/kJ)

燃料的种类及发热值	一般工业	火力发电厂
煤, 276.33×10 <sup>3</sup> kJ/kg	3.63	3.63
燃料油, 418.68×10 <sup>3</sup> kJ/kg	2.05	2.91
天然气, 576.81×10 <sup>3</sup> kJ/m <sup>3</sup> N	0.884	1.60

烟尘：烟尘是燃料和其他可燃物质燃烧的产物。燃烧的完全，烟尘产生量少，燃烧的不完全，产生黑烟。

粉尘：粉尘是指固体物料运输、筛分、碾磨、加卸料等机械

表1-2 伦敦型烟雾与洛杉矶型烟雾的比较

项 目		伦 敦 型	洛 杉 矶 型
概 况		发生年代较早，曾多次发生，煤烟与早雾相伴而生，多发生在夜晚和早晨	发生年代较晚，属于氮氧化物及碳氢化合物在强大阳光作用发生的，多发生在中午
污 染 物		悬浮颗粒物、SO <sub>2</sub> 、硫酸雾、硫酸盐	碳氢化合物、NO <sub>x</sub> 、O <sub>3</sub> 、PAN、醛、酮等
燃 料		煤、燃料油	汽油、煤气、石油
气 象 条 件	季节	冬	夏、秋
	气温	低(4°C以下)	高(24°C以上)
	湿度	高	低
	日光	暗	明亮
	臭氧浓度	低	高
出现时间		白天夜间连续	白天
视 野		非常近	稍近(半英里)
毒 性		对呼吸道有刺激作用，严重时可致死亡	对眼和呼吸道有刺激作用。O <sub>3</sub> 等氧化剂氧化性很强，严重者可导致死亡

过程散发的尘和由地面被风扬起的二次扬尘。

一氧化碳 (CO)：大气中的一氧化碳来源于人为污染源和自然污染源。人为污染源向大气排放的 CO 量占有一半以上，其主要发生在燃料燃烧装置和汽车等移动污染源。汽车排放的 CO 量约占人为污染源排放量的一半。

光化学烟雾和氧化剂：历史上较为严重的两次大气污染事件是英国伦敦型硫酸烟雾事件和美国洛杉矶型汽车排气光化学烟雾事件。这两种不同类型的烟雾事件发生的条件及特点，如表1-2所示。

### 1.1.5 我国大气污染的特征

我国大气污染主要特征是煤烟型污染。危害严重的主要污染物是燃煤排放的尘和二氧化硫。尘污染是全国性和全年性的。二氧化硫污染多发生在燃烧高硫煤地区和北方城市的冬季采暖期。我国西南燃烧高硫煤地区，曾大面积降下酸雨。

### 1.1.6 大气质量控制标准的种类及作用

大气质量控制标准有如下四类：

1. 大气环境质量标准：可作为大气污染评价、制定污染防治规划及污染物排放标准的依据；
2. 大气污染排放标准：其作用是控制污染源排放污染物的浓度或排放量；
3. 大气污染物控制技术标准：是污染物排放标准的辅助规定。目的是便于污染源的检查，也作为技术设计的标准；
4. 大气污染警报标准：按大气中污染物浓度的高低分为警报、紧急和危险三级标准。在防止污染事故和减少公众受害方面起到一定作用。

### 1.1.7 $K$ 值排放标准

SO<sub>2</sub>污染物容许排放量计算式为:

$$q = K \times 10^{-3} H^2 \quad \text{m}_N^3/\text{h}$$

### 1.1.8 $P$ 值排放标准

$P$ 值污染物排放标准是我国环境保护工作者,在总结国内外制定污染物排放标准经验的基础上,建立的排放标准。不同污染物的 $P$ 值排放标准计算方法不同。

#### 1. SO<sub>2</sub>污染物排放标准

(1) 甲类排放标准:该标准适用于平原农村地区或城市远郊区的排放筒。在平原城市城区内离地面高于40米,排放量大于0.04吨每小时的排放筒条件下,SO<sub>2</sub>容许排放量计算式为:

$$Q = P \times 10^{-6} H, \quad \text{t/h}$$

$P$ 值取自GB3840-83国家标准。

(2) 乙类排放标准:该标准适用于平原城区,排放筒高度不大于40米或排放量小于0.04吨/每小时的排放源。SO<sub>2</sub>总容许排放量计算式为:

$$\tilde{q}_0 = P_s \times 10^{-6} \times S \quad \text{t/h}$$

式中 $P_s$ 值计算见GB3840-83国家标准。

#### 2. 颗粒状物质排放标准

发电厂烟尘容许排放量计算式为:

$$Q_s = P \times 10^{-6} H^2 \quad \text{t/h}$$

#### 3. 其他有害气体排放标准

当排放筒高度大于15米时,有害气体容许排放量计算式为

$$Q = 12.8 P_s KCU_{1.0} \times 10^{-3} H^2 \quad \text{t/h}$$

## 1.2 例 题

### 1.2.1 简述大气圈层结构及垂直气温变化特点。

〔参考答案〕 大气圈层结构分为均质层及非均质层。在均质层中有对流层、平流层和中间层。非均质层中有暖层和散逸层。

对流层的垂直气温变化特点是 $\gamma > 0$ ，对流层的下部（近地面）气温高，上部气温低。亦即该层气温随距地面升高而降低。在正常的气象条件下，从地球表面每升高100米，气温平均大约要降 $0.65^{\circ}\text{C}$ 。该层同一高度上的气温日变化率也很明显，昼夜相差十几度到几十度。对流层顶的气温比地面温度低 $60\sim 70^{\circ}\text{C}$ 。

平流层位于对流层之上，平流层的下部气层有一近乎等温层，等温层的气温几乎不随高度而变化，等温层的上界高度大约距地面为 $15\sim 40$ 公里。除此以外，平流层气温随高度上升而增高。距地面 $50\sim 55$ 公里的平流层顶处气温可升至 $0\sim -3^{\circ}\text{C}$ ，比对流层顶气温高出 $60\sim 70^{\circ}\text{C}$ 。这是因为在平流层顶处臭氧层吸收太阳紫外线辐射增温所致。

中间层位于平流层之上，中间层层顶大约为 $80\sim 85$ 公里。该层气温随高度升高而下降。中间层顶气温可降至 $-83^{\circ}\text{C}$ 以下。

暖层位于中间层层顶之上，暖层层顶距地球表面大约有800公里，该气层的气温随高度上升而迅速增加。

散逸层又称外层。外层位于暖层之上，该层受到强烈太阳光辐射，温度相当高。

1.2.2 成人每次吸入空气量平均 $450\text{cm}^3$ ，假设每分钟吸入16次。空气中颗粒物的浓度为 $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，试计算每小时沉积于肺泡内的颗粒物质量为多少。已知该颗粒物在肺泡中的沉积系数为0.12。

解 成年人每次吸入空气量 $450\text{cm}^3/\text{次} = 0.00045\text{m}^3/\text{次}$

每分钟吸入空气量  $0.00045 \times 16 = 0.0072 \text{m}^3_{\text{N}}/\text{min}$

每分钟吸入颗粒物量  $0.0072 \times 200 = 1.44 \text{ }\mu\text{g}/\text{min}$

沉积在肺泡内颗粒物量  $1.44 \times 0.12 = 0.173 \text{ }\mu\text{g}/\text{min}$

每小时沉积于肺泡内的颗粒物量为:

$0.173 \times 60 = 10.37 \text{ }\mu\text{g}/\text{h}$

### 1.2.3 试述我国大气污染的特点

〔参考答案〕 我国是大气污染比较严重的国家之一。主要是煤烟型大气污染。由于燃料燃烧向大气排放污染物占的比重较大,尘、二氧化硫( $\text{SO}_2$ )、氮氧化物( $\text{NO}_x$ )和一氧化碳( $\text{CO}$ )四种污染物大约占污染物排放量的70%,而燃煤排放的污染物占整个燃料燃烧排放量的96%。当前我国大气污染状况和特点是多数城市大气污染仍然严重。危害严重的污染物有燃煤排放的尘和二氧化硫。尘污染是全国性和全年性的,二氧化硫污染主要发生在燃烧高硫煤地区和北方城市的冬季采暖期。因 $\text{SO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ 污染所形成的酸雨,主要分布在长江以南,特别是燃烧高硫煤的西南地区。近几年尘和二氧化硫造成的大气污染仍有加重的趋势。

1.2.4 我国制定的大气环境质量标准有哪几种?各种标准在保护大气环境质量中各起到何种作用。

〔参考答案〕 我国已制定的大气环境质量标准有:中华人民共和国大气环境质量标准;大气污染物排放标准;大气污染物控制技术标准和大气污染警报标准。

大气环境质量标准是以保障人体健康和正常生活条件为主要目标,规定出大气环境中某些主要污染物的最高容许浓度。大气环境质量标准也可作为大气污染评价、制定大气污染防治规划及污染物排放标准的依据。

大气污染物排放标准是以实现大气环境质量标准为目标,对污染源排放的污染物作出限制。其作用是直接控制污染源排出的污染物浓度或排放量,以防止大气污染。

大气污染控制技术标准是大气污染物排放标准的一种辅助规

定。制定这种辅助标准的目的不仅是为了便于实施环境保护措施和检查造成大气污染的原因，同时也可以作为技术设计标准。因此，这种标准在实际设计工作中很有用。

大气污染警报标准是大气环境污染恶化到必须向公众发出一定警报的标准。这类标准在防止污染事故和减少公众受害方面起到一定的作用。

1.2.5 试根据我国《大气环境质量标准》分别求出  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{CO}$  三种污染物日平均浓度限制是多少 ppm。

解 在我国1982年颁布的《大气环境质量标准》(GB3095-82)中已规定出  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  和  $\text{CO}$  三种污染物的二级标准(日平均浓度限值)为：

$$\begin{aligned} [\text{SO}_2] & 0.15\text{mg}/\text{m}^3; & [\text{NO}_x] & = [\text{NO}_2] 0.10\text{mg}/\text{m}^3 \\ [\text{CO}] & 4.0\text{mg}/\text{m}^3 \end{aligned}$$

将标准中的质量浓度换算为 ppm 单位浓度，则为：

$$[\text{SO}_2] = \frac{[\text{SO}_2]}{M_{\text{SO}_2}} \times 22.4 = \frac{0.15}{64} \times 22.4 = 0.053 \text{ ppm}$$

$$[\text{NO}_2] = \frac{[\text{NO}_2]}{M_{\text{NO}_2}} \times 22.4 = \frac{0.10}{46} \times 22.4 = 0.049 \text{ ppm}$$

$$[\text{CO}] = \frac{[\text{CO}]}{M_{\text{CO}}} \times 22.4 = \frac{4.0}{28} \times 22.4 = 3.20 \text{ ppm}$$

1.2.6 某国政府环境保护机构根据该国的大气污染防治法规定出Z区域的K值为11.5，试根据K值排放标准算出在下述五种排烟条件下，哪一个排烟装置需要采取控制措施，降低其排放量。

(1)  $H_s = 213\text{m}$ ,  $Q = 400\text{m}^3/\text{h}$ ;

(2)  $H_s = 149\text{m}$ ,  $Q = 110\text{m}^3/\text{h}$ ;

(3)  $H_s = 102\text{m}$ ,  $Q = 35\text{m}^3/\text{h}$ ;



$$(4) H_e = 50\text{m}, Q = 15\text{m}_N^3/\text{h};$$

$$(5) H_e = 40\text{m}, Q = 210\text{m}_N^3/\text{h}。$$

(注:  $H_e$ 为烟囱有效源高度;  $Q$ 为实际烟囱排放 $\text{SO}_2$ 的量)

解  $K$ 值排放标准 $\text{SO}_2$ 容许排放量计算式为:

$$q = K \times 10^{-3} H_e^2,$$

依次计算上述五种有效源高条件下的 $\text{SO}_2$ 容许排放量为:

$$q_1 = K \times 10^{-3} H_e^2 = 11.5 \times 10^{-3} \times 213^2 = 521.74 \text{ (m}_N^3/\text{h)}$$

$$q_2 = 11.5 \times 10^{-3} \times 149^2 = 255.31 \text{ (m}_N^3/\text{h)}$$

$$q_3 = 11.5 \times 10^{-3} \times 102^2 = 119.65 \text{ (m}_N^3/\text{h)}$$

$$q_4 = 11.5 \times 10^{-3} \times 50^2 = 28.75 \text{ (m}_N^3/\text{h)}$$

$$q_5 = 11.5 \times 10^{-3} \times 40^2 = 18.40 \text{ (m}_N^3/\text{h)}$$

由计算结果可知,在(1)~(4)条件下,排烟装置排放的 $\text{SO}_2$ 量均没有超过规定 $K$ 值为11.5所计算出的 $\text{SO}_2$ 容许排放量。只有第(5)种排放装置, $\text{SO}_2$ 实际排放量超过容许排放量,应对这个排烟装置采取控制措施,降低其 $\text{SO}_2$ 排放量。

1.2.7 在某市远郊农村平原开阔地上已建成一火力发电厂。该电厂的烟囱为120米,考虑到当时当地气象条件所造成的烟流抬升高度,烟囱的有效高度 $H_e = 307$ 米。又根据我国1983年颁布的《制定地方大气污染排放标准的技术原则和方法》(GB 8340-83)所规定的该发电厂地区的 $\text{SO}_2$ 污染物容许排放指标 $P = 21\text{t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。试问从该电厂烟囱排放 $\text{SO}_2$ 的最大容许量为多少?

解 由于该电厂处于平原农村地区,排气筒(烟囱)的高度 $H > 40\text{m}$ ,故本电厂的 $\text{SO}_2$ 容许排放量应按甲类排放标准计算式计算,即

$$Q = P \times 10^{-6} \times H_e^2$$

依题意,式中  $P = 21 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;  $H_e = 307\text{m}$

故,  $\text{SO}_2$ 最大容许排放量为:

$$Q = 21 \times 10^{-6} \times (307)^2 = 1.98 \text{ (t/h)}$$