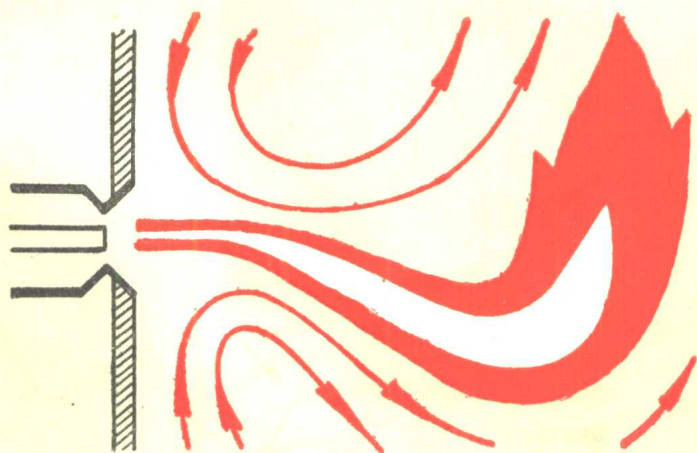


# 燃 烧 学

提 要      例 题      习 题

王 方 编 译



北京科学技术出版社

# 燃 烧 学

提要 例题 习题

北京科学技术出版社

## 内 容 简 介

本书阐述在燃烧设备设计、研究和调整时碰到的最常见的实际问题，对其典型问题给出独立求解的条件和详细题解。特别注重燃烧过程的平衡、炉内过程的空气动力学、燃烧反应动力学和火焰传播。

本书是苏联高等学校热能专业《燃烧学》教材，可供我国热能、工程热物理、航空、冶金、化工等领域高等学校有关专业师生作为教学参考书，也可供上述领域从事与燃烧技术有关的工矿企事业单位的科技人员参考。

## 燃 烧 学

提要 例题 习题

王 方 编译

☆

北京科学技术出版社出版

(北京西直门外南路 19 号)

新华书店首都发行所发行 各地新华书店经售

清华大学印刷厂印刷

☆

787×1092 毫米 32 开本 7 印张 160000 字

1988 年 7 月第一版 1988 年 7 月第一次印刷

印数 1-1200 册

ISBN 7-5304-0206-4/T·34 定价：1.80 元

## 编译说明

《燃烧学（提要、例题、习题）》是根据原书《Сборник задач по теории горения》（1983）编译的，原书由苏联著名教授波麦兰采夫（В.В.Померанцев）主编，经苏联高等和中等专业教育部审定为高等学校热能专业学生用教材。

苏联热能专业学生学习《燃烧学》课程所用的教科书是《实用燃烧学基础》（其增订本正在翻译中），由相同作者写成。

这两本书，前者是后者的辅助教材，可看作是后者的延续和补充。《燃烧学》中，每章开头概括介绍本章主要内容（图表和公式），然后分析求解燃烧工程计算中最典型的问题，还列出大量习题供熟悉解题技巧和思路，做到真正领会贯通之用。习题答案和难题提示放在书末备查。

本书提供大量实际燃烧工程计算的范例，这是作者多年来在燃烧设备设计、研究和调试中以及“燃烧学”课题教学实践中积累起来的。提供这些范例是力图把燃烧理论知识与实用经验相结合，相互促进，克服学习“燃烧学”课程的理论脱离实际的错觉，使燃烧理论对实际燃烧工程中某些问题的解决起推动作用。

目前，燃烧技术和科学方向的文献虽非常丰富，但尚没有一本燃烧学方面的习题集，因此，可以把本书看作是首次填补这个空白的一种尝试。

我国高等学校热能等专业燃烧理论教学中所用的教材有：

《燃烧学》（西安交大许晋源、徐通模合编）；《燃烧理论及设备》（清华大学徐旭常等编，待正式出版）等。在燃烧理论教学中，本书可作为这两本教材的辅助读物或教学参考书。同样，由于本书每章前都有内容提要，而且内容基本完整，自成体系，所以也可供从事与燃烧技术有关的工矿企事业的科技人员直接单独阅读本书。

本书在编译中为便于读者阅读，已将原书中所用符号的角标都改用汉语拼音字母表示，并改正了已发现的原书失误之处。在本书编译出版过程中，曾得到西安交大许晋源教授、清华大学徐旭常教授和化工部工业炉设计技术中心站姚国俊高级工程师的支持和鼓励，借此深致谢意。

由于编译者水平所限，书中会有不少失误之处，恳请读者批评指正。

一九八七年九月

编译者于清华园

# 基本符号说明

## 一、主体符号

- $W^y$ 、 $A^y$ ——应用基水分和灰分, kg/kg;
- $V'$ 、 $V^y$ ——可燃基和应用基的挥发物产率, kg/kg;
- $C_{f,i}^y$ ——应用基焦炭量, kg/kg;
- $Q_p$ ——反应热效应, kJ/kg;
- $V_i^0$ ——1kg 燃料燃烧理论上所必需的空气容积,  $m^3/kg$ ;
- $V_y^0$ 、 $V_y$ ——在理论空气消耗量 ( $\alpha = 1$ )、实际空气消耗量 ( $\alpha > 1$ ) 下燃烧产物的相应容积,  $m^3/kg$ ;
- $V_{gy}$ ——在实际空气消耗量 ( $\alpha > 1$ ) 下干燃烧产物容积,  $m^3/kg$ ;
- $G_i$ ——反应热的数量,  $mol/(m^2 \cdot s)$ ——对表面反应;  
 $mol/(m^3 \cdot s)$ ——对多相反应;
- $G$ ——1kg 燃料所得机械未完全燃烧热损失, kg/kg;
- $G_c$ ——碳燃尽速度,  $kmol/(m^2 \cdot s)$ ;
- $V$ ——容器、燃烧室等的容积,  $m^3$ ;
- $F$ ——容器、燃烧室等的表面积,  $m^2$ ;
- $\delta$ ——颗粒、碎块、球径等特征线性尺寸, m;
- $\delta_1$ 、 $\delta_{01}$ ——相应于最粗粒级颗粒的即时尺寸和起始尺寸, m;
- $\delta_i$ 、 $\delta_{0i}$ ——相应于第  $i$  粒级颗粒的即时尺寸和起始尺寸, m;
- $x = \delta_1/\delta_{01}$ ——最粗颗粒即时相对尺寸;
- $y = \delta_{0i}/\delta_{01}$ ——第  $i$  粒级颗粒起始尺寸与最粗颗粒起始尺

寸之比；

$\Delta$ ——折算边界薄膜的厚度，m；

$h$ ——层高，m；

$m$ ——颗粒、碎块、分子等的质量，kg；

$\rho_k$ ——颗粒、碎块、球体的密度，kg/m<sup>3</sup>；

$\rho_g$ ——气流密度，kg/m<sup>3</sup>；

$T$ ——热力学温度，K；

$T_{jr}$ 、 $T_m$ ——相应于过程的绝热（理论）温度和最高温度，K；

$t$ 、 $\theta$ ——温度，℃；

$\tau$ ——时间，s；

$W_{pf}$ ——飘浮速度，m/s；

$P$ ——气体体系、燃烧室中压力，Pa；

$P_i$ ——炉中压力，Pa；

$P_i$ ——第  $i$  组分的分压，Pa；

$p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ 、 $p_4$ 、 $p_5$ ——相应于氧、二氧化碳、一氧化碳、氢和水蒸汽的分压，Pa；

$M$ ——分子量，kg/kmol；

$D_{012}$ 、 $D_{12}$ ——相对于正常和理想条件下物质的互扩散系数，m<sup>2</sup>/s；

$n$ ——单位容积中的分子数，1/m<sup>3</sup>；

$n_A$ 、 $n_B$ ——相应于单位容积中  $A$  类和  $B$  类的分子数，1/m<sup>3</sup>；

$n$ ——多分散度指标（第九章）；

$C_i$ ——第  $i$  组分的摩尔浓度，kmol/m<sup>3</sup>；

$C_0$ ——起始摩尔浓度，kmol/m<sup>3</sup>；

$x_i$ ——混合物中第  $i$  组分的摩尔份额；

$q$ ——热流密度,  $\text{W}/\text{m}^2$

$\lambda$ ——导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;

$a$ ——导温系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;

$c_p$ 、 $c_v$ ——定压、定容时比热,  $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;

$\alpha$ ——散热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

$\alpha_D$ ——传质系数(扩散交换),  $\text{m}/\text{s}$ ;

$\alpha$ ——过量空气系数;

$\alpha_1''$ 、 $\alpha_c$ ——相应于炉膛出口和层内的过量空气系数;

$\nu$ ——运动粘度,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;

$K_p$ ——平衡常数;

$E$ ——活化能,  $\text{kJ}/\text{kmol}$ ;

$k_0$ ——指数前因子,  $1/\text{s}$ ——对单相一级反应;  $\text{m}/\text{s}$ ——对  
多相二级反应;

$k_i$ ——第  $i$  个反应的速度常数(因次与  $k_0$  因次相同);

$\theta = T/T_{jr}$ ——无因次即时温度;

$\theta_0 = T_0/T_{jr}$ ——无因次起始温度;

$\theta_{zhf} = T_{zhf}/T_{jr}$ ——无因次着火温度;

$\xi = k_0\tau$ ——无因次时间;

$\xi_{jr} = k_0\tau_{jr}$ ——绝热着火时的诱导期(无因次形式);

$\xi_{sr} = k_0\tau_{sr}$ ——有散热时的诱导期(无因次形式);

$\xi_r = k_0\tau_r$ ——燃烧期(无因次形式);

$\xi = h/\delta_{01}$ ——无因次层高(第十章);

$\sigma = C/C_0$ ——无因次浓度;

$\mu = \alpha F/(Vh_0c_v p_0)$ ——无因次散热准则数;

$Ki = \delta^3 \sqrt{\frac{4g(\rho_k - \rho_0)}{3\nu^2\rho_0}}$ ——基尔皮切夫准则数;

$Sch = w_{pf} \sqrt[3]{\frac{3\rho_0}{\Delta g(\rho_k - \rho_0)\nu}}$ ——希尔列尔准则数;



$$Nu = \frac{\alpha \delta}{\lambda} \text{——努谢尔特准则数（热）,}$$

$$Nu_D = \frac{\alpha_D \delta}{D} \text{——努谢尔特准则数（扩散）,}$$

$$Re_\delta = \frac{w_{pf} \delta}{\nu} \text{——雷诺准则数,}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \text{——普朗特准则数（热）,}$$

$$Pr_D = \frac{\nu}{D} \text{——普朗特准则数（扩散）*,}$$

$$Pe = \frac{w \delta}{a} \text{——贝克利准则数（热）,}$$

$$Pe_D = \frac{w \delta}{D} \text{——贝克利准则数（扩散）,}$$

$$Arr = \frac{E}{RT_{fr}} \text{——阿累尼乌斯准则数,}$$

$$Se = \sqrt{\frac{k_s \Delta^2}{D}} = \sqrt{\frac{k_s D}{a_D}} \text{——谢苗诺夫准则数,}$$

$$Ni = \frac{k_s}{a_D} \text{——扩散化学准则数,}$$

$$N_A \text{——阿佛加德罗数, } N_A = 6.023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1},$$

$$R \text{——通用气体常数, } R = 8.31 \times 10^3 \text{ J/(kmol} \cdot \text{K)}$$

$$k \text{——波尔兹曼常数, } k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K.}$$

---

\* 普朗特扩散准则数常称为施密特准则数, 并用  $Sc$  标示。

## 二、上、下角码

|                      |                        |
|----------------------|------------------------|
| <i>b</i> ——表面、器壁     | <i>l</i> ——炉、滤         |
| <i>bj</i> ——边界       | <i>ll</i> ——理论         |
| <i>bzh</i> ——标准      | <i>lj</i> ——临界         |
| <i>c</i> ——层         | <i>m</i> ——膜、最大        |
| <i>a</i> ——堆、滴、对流    | <i>n</i> ——内           |
| <i>dl</i> ——当量、动力    | <i>p</i> ——破坏          |
| <i>dw</i> ——低位       | <i>pf</i> ——飘浮         |
| <i>f</i> ——分析基、法线、沸腾 | <i>pj</i> ——平均         |
| <i>fh</i> ——飞灰       | <i>q</i> ——气体、球        |
| <i>fsh</i> ——辐射      | <i>ql</i> ——气流         |
| <i>g</i> ——干燥基、固体    | <i>r</i> ——热、燃、可燃基、熔化、 |
| <i>gd</i> ——过渡       | <i>sh</i> ——射流、水力      |
| <i>gsh</i> ——过剩      | <i>sr</i> ——散热         |
| <i>gy</i> ——干烟气      | <i>t</i> ——湍流          |
| <i>h</i> ——液体、火焰、活化  | <i>ts</i> ——碳酸盐        |
| <i>hf</i> ——挥发       | <i>w</i> ——外           |
| <i>hh</i> ——混合       | <i>wym</i> ——无烟煤       |
| <i>hl</i> ——回流       | <i>x</i> ——形状          |
| <i>hm</i> ——褐煤       | <i>xd</i> ——相对         |
| <i>hq</i> ——还原区      | <i>y</i> ——应用基、烟气、液体   |
| <i>j</i> ——介质、极限     | <i>yq</i> ——氧区         |
| <i>jr</i> ——绝热       | <i>yx</i> ——有效         |
| <i>js</i> ——计算       | <i>z</i> ——总、阻力        |
| <i>jt</i> ——焦炭       | <i>zh</i> ——蒸发、重力      |
| <i>k</i> ——空气、颗粒     | <i>zhf</i> ——着火        |
| <i>kb</i> ——孔板       | <i>zhs</i> ——折算        |

# 目 录

## 编译说明

## 基本符号说明

|                      |    |
|----------------------|----|
| 第一章 燃烧和燃烧过程的物料平衡及热平衡 | 1  |
| 例题                   | 5  |
| 习题                   | 7  |
| 第二章 燃烧过程的空气动力学       | 10 |
| § 2-1 射流扩展计算         | 10 |
| § 2-2 射流与气流中的相互作用    | 17 |
| § 2-3 气流中的颗粒运动       | 19 |
| § 2-4 层中流动过程的空气动力学   | 24 |
| § 2-5 沸腾层空气动力学       | 26 |
| 例题                   | 28 |
| 习题                   | 32 |
| 第三章 扩散和换质            | 37 |
| 例题                   | 42 |
| 习题                   | 52 |
| 第四章 化学平衡             | 54 |
| 例题                   | 59 |
| 习题                   | 64 |
| 第五章 气体混合物燃烧动力学       | 67 |
| § 5-1 化学动力学概述        | 67 |
| § 5-2 绝热热自燃          | 69 |
| § 5-3 有散热时的热着火       | 71 |
| § 5-4 链式反应           | 73 |

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| 例题                       | 76         |
| 习题                       | 82         |
| <b>第六章 气体混合物中的火焰传播</b>   | <b>87</b>  |
| 例题                       | 89         |
| 习题                       | 92         |
| <b>第七章 碳的燃烧</b>          | <b>93</b>  |
| 例题                       | 103        |
| 习题                       | 109        |
| <b>第八章 燃料颗粒的加热和热解动力学</b> | <b>112</b> |
| § 8-1 颗粒加热               | 112        |
| § 8-2 挥发分产率              | 113        |
| 例题                       | 117        |
| 习题                       | 122        |
| <b>第九章 煤粉火炬的燃烧</b>       | <b>124</b> |
| 例题                       | 134        |
| 习题                       | 145        |
| <b>第十章 固体燃料的层燃过程</b>     | <b>148</b> |
| 例题                       | 153        |
| 习题                       | 155        |
| <b>第十一章 液体燃料的燃烧</b>      | <b>158</b> |
| 例题                       | 161        |
| 习题                       | 179        |
| <b>答案</b>                | <b>187</b> |
| 第一章                      | 187        |
| 第二章                      | 187        |
| 第三章                      | 189        |
| 第四章                      | 191        |
| 第五章                      | 193        |
| 第六章                      | 195        |

|           |     |
|-----------|-----|
| 第七章.....  | 196 |
| 第八章.....  | 198 |
| 第九章.....  | 200 |
| 第十章.....  | 201 |
| 第十一章..... | 202 |
| 附录.....   | 205 |
| 参考文献..... | 209 |

# 第一章 燃料和燃烧过程的物料平衡及热平衡

固体和液体燃料的元素成分可写成其中碳 C、氢 H、氧 O、硫 S、氮 N、灰分 A 及水分 W 百分含量之和。根据计算中所用的燃料基质给每个符号标以相应的上角码：

可燃基；

$$C^r + H^r + O^r + S^r + N^r = 100\% ;$$

干燥基

$$C^g + H^g + O^g + S^g + N^g + A^g = 100\% ;$$

应用基

$$C^y + H^y + O^y + S^y + N^y + A^y + W^y = 100\%$$

燃料的元素成分由一种基族换算为另一种基可按表 1-1 中公式进行。

燃料的元素成分由一种水分（或灰分）换算为另一种可按下式进行：

$$x_j^y = x^y \frac{100 - W_j^y}{100 - W^y} ; \quad x_j^y = x^y \frac{100 - A_j^y}{100 - A^y} \quad (1-1)$$

在没有表报数据时，燃料的发热量必须用量热弹测定。固体或液体燃料的低位发热量可按门捷列夫（Д.И.Менделеев）公式进行近似计算：

$$Q_{dw}^y = 81C^y + 246H^y - 26(O^y - S^y) - 6W^y \text{ kcal/kg} \quad (1-2)$$

$$\text{或 } Q_{dw}^y = 339C^y + 1025H^y - 108.5(O^y - S^y) -$$

$$-25W^y \text{ kJ/kg}$$

(1-2)

表 1-1 燃料基的换算系数

| 给定的<br>燃料基 | 所要换算到的燃料基                       |                         |                         |
|------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|
|            | 可燃基                             | 干燥基                     | 应用基                     |
| 可燃基        | 1                               | $100 - A^g$             | $100 - (A^y + W^y)$     |
|            | $\frac{100}{100 - A^g}$         | 1                       | $\frac{100 - W^y}{100}$ |
| 干燥基        | $\frac{100}{100 - A^g}$         | 1                       | $\frac{100 - W^y}{100}$ |
|            | $\frac{100}{100 - (A^y + W^y)}$ | $\frac{100}{100 - W^y}$ | 1                       |
| 应用基        | $\frac{100}{100 - (A^y + W^y)}$ | $\frac{100}{100 - W^y}$ | 1                       |

1 kg 固体或液体燃料完全燃烧所需的最低（理论）空气量按下式求得：

$$V_k^0 = 0.0889C^y + 0.265H^y - 0.0333(O^y - S^y) \text{ m}^3/\text{kg} \quad (1-4)$$

实际空气量由过量空气系数  $\alpha$  和理论空气量的乘积确定：

$$V_k = \alpha V_k^0 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (1-5)$$

在理论所需的空气量下 1 kg 燃料燃烧时所形成的燃烧产物的容积等于

$$V_y^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (1-6)$$

式中每个组分燃烧产物的容积各为

$$V_{RO_2} = 0.01866(C^y + 0.375S^y); \quad (1-7)$$

$$V_{N_2}^0 = 0.79V_k^0 + 0.008N^y; \quad (1-8)$$

$$V_{H_2O}^0 = 0.111H^y + 0.0124W^y + 0.0161V_k^0 \quad (1-9)$$

在实际空气量下 1 kg 燃料燃烧时燃烧产物的容积按下式确定

$$V_y = V_y^0 + 1.0161(\alpha - 1)V_k^0 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (1-10)$$

燃烧产物的焓  $I_y$  由各成分燃烧产物的容积  $V_i$  与其比热  $c_i$  及温度  $\theta$  乘积之和确定

$$I_y = \sum_{i=1}^k V_i c_i \theta - \alpha_{fh} A^y c_{fh} \theta / 100$$

式中  $\alpha_{fh}$ ——烟气带灰份额;

$c_{fh}$ ——灰的比热,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

在  $\alpha_{fh} A^y / Q_{dw}^y > 1.43\%$   $\text{kg}/\text{MJ}$  时才计及灰的热焓  $I_{fh}$ 。

气体燃料的元素成分一般是按一氧化碳  $\text{CO}$ 、氢  $\text{H}_2$ 、甲烷  $\text{CH}_4$ 、乙烷  $\text{C}_2\text{H}_6$ 、氧  $\text{O}_2$ 、氮  $\text{N}_2$  等各种气体的百分含量提供的。

气体燃料的发热量以  $1 \text{ m}^3$  气体燃料中各种组分的发热量与其含量乘积之和计。

$$Q_{dw}^y = 0.126\text{CO} + 0.358\text{CH}_4 + 0.58\text{C}_2\text{H}_2 + 0.108\text{H}_2 + \dots \text{MJ}/\text{m}^3 \quad (1-11)$$

$1 \text{ m}^3$  气体燃料燃烧所需的最低(理论)空气容积按下式确定:

$$V_k^0 = 0.0476[0.5\text{CO} + 0.5\text{H}_2 + 1.5\text{H}_2\text{S} + \sum \left(m + \frac{n}{4}\right) \text{C}_m\text{H}_n - \text{O}_2] \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (1-12)$$

氮的理论容积:

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0.79V_k^0 + 0.01\text{N}_2 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (1-13)$$

三原子气体容积:

$$V_{\text{RO}_2} = 0.01(\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{S} + \sum m\text{C}_m\text{H}_n) \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (1-14)$$

水蒸汽的理论容积:

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0.01(\text{H}_2\text{S} + \text{H}_2 + \sum \frac{n}{2} \text{C}_m\text{H}_n + 0.0124d) + 0.0161V_k^0 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (1-15)$$



在  $\alpha > 1$  时燃烧产物的实际容积:

$$V_y = V_{N_2}^0 + V_{RO_2} + V_{H_2O}^0 + (\alpha - 1)V_A^0 \quad m^3/m^3 \quad (1-16)$$

在页岩燃烧时, 燃烧产物的容积应计及对碳酸盐分解量  $k$  的修正。

计及碳酸盐分解后的计算含灰量

$$A'_{i,} = A + (1 - k)(CO_2)'_{i,} \quad \% \quad (1-17)$$

二氧化碳容积

$$V_{RO_2,ts} = V_{RO_2} + 0.00509k(CO_2)'_{i,} \quad m^3/kg \quad (1-18)$$

烟气容积

$$V_{y,ts} = V_y + 0.00509k(CO_2)'_{i,} \quad m^3/kg \quad (1-19)$$

在燃料混合物燃烧时, 燃烧产物的容积和焓建议对 1 kg 固体或液体燃料和 1  $m^3$  气体燃料的每种燃料分别计算。

按照对每种燃料求得的  $V_A^0$ 、 $V_{RO_2}$ 、 $V_{N_2}^0$ 、 $V_{H_2O}^0$  值确定混合物的空气和燃烧产物的容积。对于两种同类燃料(固体、液体或气体)的混合物来说

$$V_A^0 = g'V_A^{0'} + (1 - g')V_A^{0''} \quad m^3/kg \quad (1-20)$$

式中  $g'$ ——混合物中第一种燃料的质量份额。按照相类似的公式确定混合物的  $V_{RO_2}$ 、 $V_{N_2}^0$  和  $V_{H_2O}^0$ 。

计算是按 1 kg 固体或液体燃料进行的。对于固体或液体燃料与气体燃料的混合物来说, 要预先确定对 1 kg 燃料计的气量  $x$ 。

空气的容积

$$V_A^0 = V_A^{0'} + xV_A^{0''} \quad m^3/kg \quad (1-21)$$

相类似地计算二氧化碳、氮和水蒸汽的容积。

燃烧产物的平均比热按下式确定

$$c_y = 0.01(c_{CO_2}CO_{2,\%} + c_{O_2}O_{2,\%} + \dots) \quad kJ/m^3 \cdot K \quad (1-22)$$

式中空气中燃烧产物的比热按附表 1 (见附录) 选用。