

注蒸汽燃气轮机循环工质热力性质研究

周伏秋 王克光

(哈尔滨工业大学)

〔摘要〕 本文对注蒸汽燃气轮机循环中的工质,首先建立了燃气—蒸汽混合物(以下简称湿燃气)的理想模型;据此确立了湿燃气热力性质计算的二次线性插值方法。采用该方法,编制了供工程实用的湿燃气热力性质表及与之配合使用的理想水蒸汽表。

关键词 注蒸汽燃气轮机循环 湿燃气 热力性质 计算方法

近年来,注蒸汽燃气轮机循环(或称燃气—蒸汽混合循环)已成为燃气轮机复合循环研究领域的热点之一。但到目前为止,对混合循环工质的热力性质尚缺少专门而深入的探讨,分析时对其物性的处理比较粗糙。鉴于此,本文对湿燃气进行了研究,建立了湿燃气的理想模型,确立了计算湿燃气热力性质的二次线性插值方法。编制了供工程实用的湿燃气热力性质表及与之配合使用的理想水蒸汽表;这两个表与文献[1]配合使用,可以方便地计算出任意燃料系数,任意氢碳原子比以及任意注蒸汽比下湿燃气的各项热力性质。

1 湿燃气模型的建立

对于注蒸汽燃气轮机循环,其工质为燃气与水蒸汽的混合物。由于水蒸汽的分压力较低,在目前燃气轮机工作的热力参数范围内(压比小于40,透平入口温度高于900℃),可将整个湿燃气视为理想气体。燃气本身也是混合物,可认为由C的纯燃气、CH₂纯燃气以及纯空气组成^[1];而这三者也都是混合物,均可视为理想气体。因此,湿燃气的各种热力性质应满足理想气体状态方程:

$$p\nu = RT \quad (1)$$

其任一种热力性质由各种组分相对含量的多少而定。



图1 湿燃气模型

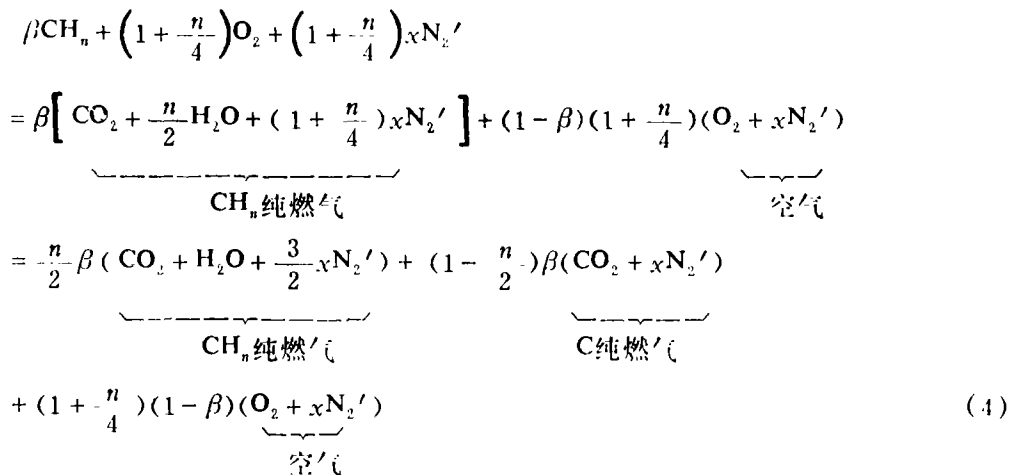
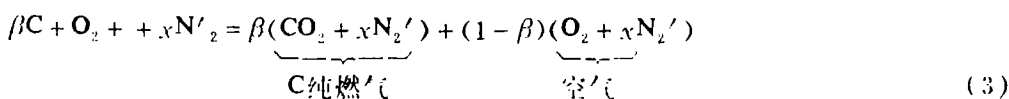
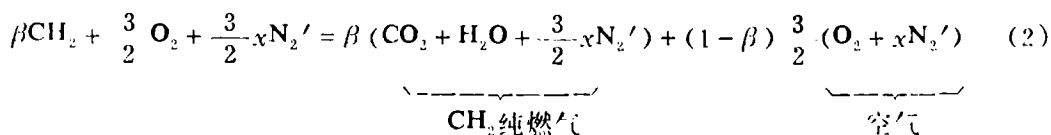
2 湿燃气热力性质计算方法^[2]

使用上面提出的湿燃气理想模型, 首先分别确定燃气和理想水蒸汽的热力性质, 在此基础上确定湿燃气的热力性质。

2.1 燃气热力性质计算

设给定的烃类燃料氢碳原子数之比为 n , 燃料系数为 β 。CH_n 燃料生成的燃气可看作为 CH₂ 的纯燃气、C 的纯燃气与纯空气的理想混合物, 其热力性质可由这三种气体的相应热力性质通过线性插值得到。

燃料系数为 β 时, 在完全燃烧假定下, CH₂、C、CH_n 三种燃料在空气中的燃烧反应方程式分别为:



以上各式中, x 均表示空气中大气氮 N₂' (空气中氮气、二氧化碳与氩气的总称) 与氧气的摩尔成份之比, $x = 3.77382$

由式(4)可知: 燃料系数为 β 的 CH_n 燃气中, CH₂ 纯燃气、C 纯燃气和空气所占的摩尔分数分别为

$$\begin{aligned} r_i &= \frac{\frac{n}{2} \beta \left(2 + \frac{3}{2} x\right)}{\frac{n}{2} \beta \left(2 + \frac{3}{2} x\right) + \left(1 - \frac{n}{2}\right) \beta (1+x) + \left(1 + \frac{n}{4}\right) (1-\beta) (1+x)} \\ &= \frac{15.32146n\beta}{4.77382(4+n) + n\beta} \end{aligned} \quad (5)$$

$$r_j = \frac{\left(1 - \frac{n}{2}\right)\beta(1+x)}{\frac{n}{2}\beta\left(2 + \frac{3}{2}x\right) + \left(1 - \frac{n}{2}\right)\beta(1+x) + \left(1 + \frac{n}{4}\right)(1-\beta)(1+x)}$$

$$= \frac{4.773\ 82(4-2n)\beta}{4.773\ 82(4+n) + n\beta} \tag{6}$$

$$r_o = \frac{\left(1 + \frac{n}{4}\right)(1-\beta)(1+x)}{\frac{n}{2}\beta\left(2 + \frac{3}{2}x\right) + \left(1 - \frac{n}{2}\right)(1+x) + \left(1 + \frac{n}{4}\right)(1-\beta)(1+x)}$$

$$= \frac{4.773\ 82(4+n)(1-\beta)}{4.773\ 82(4+n) + n\beta} \tag{7}$$

且有

$$r_i + r_j + r_o = 1 \tag{8}$$

设 $X_{n,\beta}$ 为 CH_n 燃气的任一摩尔热力性质, 则有

$$X_{n,\beta} = r_i X_i + r_j X_j + r_o X_o \tag{9}$$

其中 X_i , X_j , X_o 分别表示 CH_2 纯燃气、C 燃气及纯空气的相应摩尔热力性质 (它们均可在文献[1]中查得)。

2.2 湿燃气热力性质计算

设给定注蒸汽比 (注蒸汽量与压气机进口空气质量之比) 为 g_s 。湿燃气为 CH_n 燃气与水蒸汽的混合物, 其任意一种热力性质应为后两者相应热力性质的线性组合。

设: 相应于压气机 $\left(1 + \frac{n}{4}\right)(1+x)$ kmol 的进气量, 对应的注蒸汽量为 y kmol, 则有

$$g_s = \frac{m_s \cdot y}{m_o \cdot \left(1 + \frac{n}{4}\right)(1+x)}$$

$$y = \frac{m_o}{m_s} \cdot g_s \cdot \left(1 + \frac{n}{4}\right)(1+x) \tag{10}$$

设湿燃气中 CH_n 燃气与水蒸汽的摩尔分数分别为 $r_{n,\beta}$ 和 r_s , 则有

$$r_{n,\beta} = \frac{\left(1 + \frac{n}{4}\right)(1+x) + n \cdot \beta/4}{\left(1 + \frac{n}{4}\right)(1+x) + \frac{n}{4}\beta + y}$$

$$r_s = \frac{y}{\left(1 + \frac{n}{4}\right)(1+x) + \frac{n}{4}\beta + y}$$

代入式 (10), 得

$$r_{n,\beta} = \frac{(4+n)(1+x) + n\beta}{(1+n)(1+x)\left(1 + \frac{m_a}{m_s} \cdot g_s\right) + n\beta}$$

$$r_s = \frac{(4+n)(1+x) \frac{m_a}{m_s} g_s}{(4+n)(1+x)\left(1 + \frac{m_a}{m_s} \cdot g_s\right) + n\beta}$$

其中 m_a 、 m_s 分别表示空气和水蒸汽的摩尔质量。

$$m_a = 28.965 \quad m_s = 18.015 \quad 2$$

代入 $x = 3.773 \ 82$ 及 m_a 、 m_s ，最后得

$$r_{n,\beta} = \frac{4.773 \ 82(4+n) + n\beta}{4.773 \ 82(4+n)(1 + 1.607 \ 81g_s) + n\beta} \quad (11)$$

$$r_s = \frac{7.67542(4+n)g_s}{4.773 \ 82(4+n)(1 + 1.607 \ 81g_s) + n\beta} \quad (12)$$

且有

$$r_{n,\beta} + r_s = 1 \quad (13)$$

设 $X_{n,\beta,s}$ 、 $X_{n,\beta}$ 、 X_s 分别表示湿燃气， CH_n 燃气和水蒸汽的任意同名摩尔热力性质，则有

$$X_{n,\beta,s} = r_{n,\beta} X_{n,\beta} + r_s X_s \quad (14)$$

3 理想水蒸汽表和湿燃气性质表的编制

如前所述，湿燃气中的水蒸汽可看作理想气体。为确定湿燃气的热力性质，必须有一个与燃气表相配合的理想水蒸汽表。这里采用文献[3]中关于水蒸汽的定压摩尔热容、焓和标准熵的数据，将定压摩尔热容数据分成两段，用最小二乘法回归成如下的多项式

$$C_p = \sum_{i=1}^8 a_i T^{(i-1)} \quad \text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K}) \quad (15)$$

焓则为

$$\begin{aligned} H &= \int C_p dT + a_0 \\ &= \sum_{i=1}^8 \frac{a_i T^{(i-1)}}{i} + a_0 \quad \text{kJ}/\text{kmol} \end{aligned} \quad (16)$$

对数相对压力

$$\begin{aligned} \ln \pi &= \left(\int \frac{C_p}{T} dT + a_{10} \right) / R_M - C_0 \\ &= \frac{1}{8.314 \ 41} \left(a_1 \ln T + \sum_{i=2}^8 \frac{a_i T^{(i-1)}}{i-1} + a_{10} \right) - 21.5 \end{aligned} \quad (17)$$

这里为了和文献[1]配合，对数相对压力也减去一个常数 C_0 ：

$$C_0 = 21.5$$

系数 a_i ($i = 1, 10$) 的值如表1所示。

表 1 水蒸汽的 a_i 值

| a_i | T, K | 200~1000 | >1000 |
|----------------------|--------|----------------|---------------|
| a_1 | | 36.850 317 09 | 26.849 736 88 |
| $a_2 \times 10^3$ | | -28.474 331 10 | 15.908 909 66 |
| $a_3 \times 10^6$ | | 75.069 347 06 | 0.000 000 02 |
| $a_4 \times 10^9$ | | -58.679 446 23 | -1.644 059 04 |
| $a_5 \times 10^{12}$ | | 16.778 178 42 | 0.480 857 01 |
| $a_6 \times 10^{15}$ | | 0 | -0.051 393 95 |
| $a_7 \times 10^{18}$ | | 0 | 0 |
| $a_8 \times 10^{21}$ | | 0 | 0.000 286 22 |
| a_9 | | -351.041 353 0 | 1 490.1815 27 |
| a_{10} | | -15.551 044 04 | 31.754 722 01 |

根据式 (15)、(16)、(17) 编制程序, 可以算出各个温度下理想水蒸汽的各项热力性质。将数据整理成表, 即为理想水蒸汽表。

表2为理想水蒸汽表的一部分, 表中列出了按温度排列的理想水蒸汽的焓, 对数相对压力以及定压摩尔热容值。

一旦给定 n, β, g , 便可计算出燃气的摩尔组成、平均分子量和气体常数。将这些数据整理成表, 即为湿燃气热力性质表, 如表3所示。

将湿燃气热力性质表, 理想水蒸汽表和文献[1]配合使用, 通过二次线性插值, 可以方便

理想水蒸汽热力性质表

| T, K | $C_p, kJ/(kmol \cdot K)$ | $H, kJ/kmol$ | $\ln \pi$ |
|--------|--------------------------|--------------|-----------|
| 260 | 33.567 0 | 8 644.37 | 0.650 850 |
| 300 | 33.615 8 | 9 987.66 | 1.228 834 |
| 400 | 34.145 7 | 13 371.43 | 2.399 194 |
| 500 | 35.094 2 | 16 830.71 | 3.327 128 |
| 600 | 36.290 4 | 20 398.48 | 4.109 085 |
| 700 | 37.603 7 | 24 092.65 | 4.793 674 |
| 800 | 38.943 7 | 27 920.36 | 5.408 129 |
| 900 | 40.260 4 | 31 880.56 | 5.968 997 |
| 1 200 | 41.544 1 | 35 971.00 | 6.487 194 |
| 1 100 | 42.783 1 | 40 187.80 | 6.970 462 |
| 1 200 | 43.969 7 | 44 525.88 | 7.424 362 |
| 1 300 | 45.103 7 | 48 934.89 | 7.848 910 |
| 1 400 | 46.184 8 | 53 544.86 | 8.259 898 |
| 1 500 | 47.213 4 | 58 215.20 | 8.647 395 |
| 1 600 | 48.190 0 | 62 985.80 | 9.017 658 |
| 1 700 | 49.115.8 | 67 851.51 | 9.372 410 |
| 1 800 | 49.991 9 | 72 807.30 | 9.713 075 |

表 3 燃气的摩尔组成, 平均相对分子量和气体常数 $r_i, r_j, r_a, r_s, M, \text{kg/kmol}$,
 $R, \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

| $g_s = 0.09$ | | | | | | |
|---------------|----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|
| $n = 4$ | r_i | r_j | r_a | r_s | M | R |
| $\beta = 0.0$ | 0.000 00 | 0.000 00 | 0.873 59 | 0.126 41 | 27.580 91 | 0.301 45 |
| 0.1 | 0.138 92 | -0.043 28 | 0.779 10 | 0.125 27 | 27.476 32 | 0.302 60 |
| 0.2 | 0.275 34 | -0.085 79 | 0.686 31 | 0.124 14 | 27.373 58 | 0.303 74 |
| 0.3 | 0.409 33 | -0.127 54 | 0.595 17 | 0.123 03 | 27.272 68 | 0.304 86 |
| 0.4 | 0.540 95 | -0.168 55 | 0.505 65 | 0.121 95 | 27.173 55 | 0.305 97 |
| 0.5 | 0.670 28 | -0.208 84 | 0.417 69 | 0.120 88 | 27.076 16 | 0.307 07 |
| 0.6 | 0.797 35 | -0.248 44 | 0.331 25 | 0.119 83 | 26.980 46 | 0.308 16 |
| 0.7 | 0.922 25 | -0.287 35 | 0.246 30 | 0.118 80 | 26.886 41 | 0.309 24 |
| 0.8 | 1.045 01 | -0.325 60 | 0.162 80 | 0.117 79 | 26.793 96 | 0.310 31 |
| 0.9 | 1.165 70 | -0.363 21 | 0.080 71 | 0.116 79 | 26.703 07 | 0.311 37 |
| 1.0 | 1.284 36 | -0.400 18 | 0.000 00 | 0.115 81 | 26.613 70 | 0.312 41 |

便地计算出任意燃料系数, 任意氢碳原子比、任意注蒸汽比下湿燃气的各项热力性质。

参 考 文 献

- 1 严家驊, 尚德敏. 湿空气和烃燃气热力性质图表. 高教出版社, 1989
- 2 严家驊, 杨玉顺, 刘明. 任意氢碳比烃燃料燃气热力性质的插值计算与压力修正方法. 工程热物理学报, 1985, 6 (3): 203—210
- 3 Гурдич Л И и Др.. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Наука, 1978—1980
- 4 吴仲华. 燃气的热力性质表. 科学出版社, 1959

Study of Steam Injected Gas Turbine Cycle Working Medium Thermodynamic Properties

Zhou Fuqiu, Wang Keguang

(Harbin Institute of Technology)

Abstract

With respect to the working medium used in a steam injected gas turbine cycle the authors have established an ideal model of gas-steam mixture (referred to as wet gas for short), and on this basis come up with a secondary linear interpolation method for calculating wet gas thermodynamic properties. With the help of the said method a table of wet gas thermodynamic properties and also an ideal steam table to be used in conjunction with the former have been prepared, which are suitable for practical engineering applications.

Key words: steam injected gas turbine cycle, wet gas, thermodynamic properties, calculation method