



第1章

气体性质

黏度等流体特性是形成流体润滑的物质前提,由于气体的可压缩性以及密度、温度和压力存在强耦合关系,润滑气体表现出不同于液体的黏压、黏温关系。此外,气体的含水特性容易出现高压气体密封润滑中的冷凝相变问题,也使得气体润滑表现出不同于液体润滑的规律特征,但本质上取决于气体的物理性质。

本章主要介绍与润滑计算有关的气体基础知识,包括气体状态方程、黏度与压力和温度的关系、湿度与压力和温度的关系等。

1.1 气体方程

在气体润滑中,气体的流动过程也是气体状态不断发生变化的过程。一般地,气体润滑雷诺(Reynolds)方程描述了在速度剪切、挤压等外力作用下气体的宏观运动,能量方程则描述了气体与外界热量交换以及宏观机械能与气体内能的转换关系。但是,气体微观热运动状态的描述由压力 p 、密度 ρ 和温度 T 这 3 个参数描述,对于理想气体,压力、密度和温度之间的关系满足如下气体状态方程:

$$\frac{p}{\rho} = R_u T \quad (1-1)$$

式中:理想气体常数 $R_u = 8.314472 \text{ m}^3 \cdot \text{Pa}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

由于理想气体状态方程中存在 3 个变量,对于一般的热力过程,即压力、密度和温度同时发生变化时,单一利用式(1-1)不能给出气体的压力、密封和温度变化数值。因此,需要建立另外一个气体方程。

布朗运动是气体或液体中的微观粒子不停进行无规则曲线运动的一种状态,于 1827 年

由英国植物学家布朗发现。1907年,爱因斯坦提出了能量均分定理。这一统计力学的基本理论认为,一个微观粒子的动能只取决于其温度,而与其大小和质量无关。但是,由于布朗运动中粒子间的高速碰撞会导致其运动方向和速度不断发生变化,使得布朗运动中单个粒子的瞬时速度测定困难,因此一直无法直接证明能量均分定理适用于布朗粒子。

2010年,得克萨斯大学的 Li 等人^[1]找到了一种在空气中测定布朗粒子瞬时速度的方法,直接证实了布朗粒子服从能量均分定理。

我们从能量均分原理出发,讨论和分析了气体的压力和温度表征,对于理想气体建立了独立的压力和温度方程^[2],实现了一般热力过程的气体润滑膜温度场分布求解计算。下面对基于能量均分原理的气体方程进行简要介绍。

1.1.1 理想气体方程

一般情况下,可把理想气体分子看做刚球分子。如图 1-1 所示,刚球分子具有 x 、 y 、 z 三个方向上的平动自由度和转动自由度。假设大量分子组成的气体系统达到平衡状态,分子每个自由度对应的能量 $\bar{E}_e$ 相同,则单个气体分子的能量 E_{sum} 表达式为

$$E_{\text{sum}} = i_d \bar{E}_e \quad (1-2)$$

式中: i_d 是气体分子运动自由度。

假设气体温度仅是气体分子转动能量水平的宏观表征量,则有

$$T = c_T i_d \bar{E}_e \quad (1-3)$$

式中: T 为热力学温度; c_T 是温度常量系数, c_T^{-1} 表示单位温升内能的增量,即定容比热容倒数,即

$$c_T = \frac{1}{c_v} \quad (1-4)$$

根据以上假设,可进一步假设气体压力与气体的分子动能和密度有关,即

$$p = c_p \rho i_d \bar{E}_e \quad (1-5)$$

式中: c_p 是压力常量系数。

由式(1-3)和式(1-5),可得到理想气体状态方程

$$\frac{p}{T\rho} = \frac{c_p}{c_T} \quad (1-6)$$

对比状态方程(1-1),得到

$$c_p = c_T R_u \quad (1-7)$$

即

$$c_p = \frac{R_u}{c_v} \quad (1-8)$$

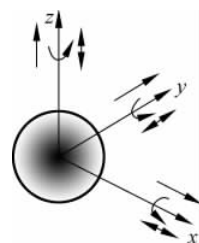


图 1-1 气体分子热运动自由度示意图

式(1-3)和式(1-5)是两个独立的气体方程,分别表征了气体压力和温度与气体动能之间的关系。相对于理想气体状态方程(1-1)而言,增加了一个气体方程,实现了多变量气体润滑方程组的封闭,从而可直接定量分析一般热力过程中气体的压力、温度和密度变化规律。

1.1.2 指数方程

指数方程常用于对气体热力过程的表征和描述,下面从能量均分的原理出发对其进行推导,以检验所提出的气体温度方程和压力方程的正确性。

如图 1-2 所示的绝热压缩过程,取初始状态为 T_0 、 p_0 、 ρ_0 的 1mol 气体,其中截面积为 1。外力对气体做功为

$$\Delta W = -p dx = -p d\left(\frac{1}{\rho}\right) \quad (1-9)$$

根据式(1-2),气体内能增量为

$$\Delta W' = i_d d\bar{E}_e \quad (1-10)$$

将式(1-5)代入式(1-10),得

$$\Delta W' = \frac{1}{c_p} d\left(\frac{p}{\rho}\right) \quad (1-11)$$

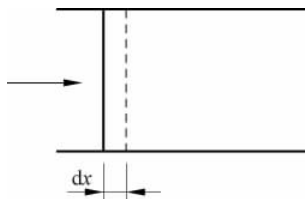


图 1-2 气体绝热压缩过程示意图

对于绝热压缩过程,有

$$\Delta W = \Delta W' \quad (1-12)$$

所以,有

$$-p d\left(\frac{1}{\rho}\right) = \frac{1}{c_p} d\left(\frac{p}{\rho}\right) \quad (1-13)$$

对式(1-13)积分,得

$$-(\ln \rho^{-1} - \ln \rho_0^{-1}) = \frac{1}{c_p} (\ln(p \rho^{-1}) - \ln(p_0 \rho_0^{-1})) \quad (1-14)$$

可得

$$p \rho^{-\gamma} = p_0 \rho_0^{-\gamma} \quad (1-15)$$

其中, $\gamma = 1 + c_p = 1 + \frac{R}{c_v}$ 。

从式(1-15)可以看出,绝热压缩过程中气体状态呈现指数变化,与现有的理论相一致,对于空气,定容比热容 $c_v = 2.5R_u$, 所以有 $\gamma = 1.4$ 。对于一般的气体热力过程,其压力、密度和温度变化满足式(1-3)和式(1-5)。已知气体的初始状态(T_0 、 p_0 、 ρ_0)和最终状态(T_1 、 p_1 、 ρ_1),可以求得指数 γ 为

$$\gamma = \frac{\ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right)}{\ln\left(\frac{\rho_1}{\rho_0}\right)} \quad (1-16)$$

需要指出的是,对于一般的热力过程中的过程指数 γ 主要通过实验测量获得,因而指数方程不适合于未知规律的气体热润滑分析。

1.1.3 实际气体方程

对于实际气体,压力、密度和温度之间的关系满足如下实际气体状态方程:

$$\frac{p}{\rho} = \epsilon R_u T \quad (1-17)$$

式中: ϵ 是气体压缩系数。由于气体压缩系数主要表征了气体的可压缩性对状态参数的影响,因而,需对气体压力方程进行修正,即

$$p = \epsilon c_p \rho i_d \bar{E}_e \quad (1-18)$$

表 1-1 给出了氮气在不同温度、压力下的气体压缩系数。可以看出,在 10MPa 压力以下的标准室温环境下,气体压力系数变化范围小于 1%,因而在一般的气体润滑计算中理想气体假设是合理的。

表 1-1 不同温度、压力下氮气的气体压缩系数

压力/MPa	温度/K								
	126.9	143.2	173.2	203.2	223.2	248.2	273.2	293.2	323.2
0.101	—	0.9939	0.9968	0.9985	0.9991	0.9991	1.0000	0.9999	1.0001
1.013	—	0.9298	0.9637	0.9805	0.9866	0.9918	0.9962	0.9975	1.0005
2.027	0.7620	0.8520	0.9266	0.9587	0.9732	0.9841	0.9925	0.9961	1.0010
3.040	0.5749	0.7642	0.8892	0.9425	0.9610	0.9781	0.9894	0.9948	1.0017
4.053	—	0.6654	0.8525	0.9210	0.9495	0.9720	0.9870	0.9940	1.0030
5.066	—	0.5616	0.8172	0.9030	0.9391	0.9676	0.9848	0.9941	1.0045
6.080	—	0.4738	0.7840	0.8901	0.9298	0.9647	0.9840	0.9942	1.0065
8.106	—	0.5698	0.7307	0.8648	0.9151	0.9576	0.9835	0.9958	1.0064
10.133	—	—	0.7053	0.8554	0.9087	0.9550	0.9848	1.0016	1.0182
20.265	—	—	—	0.9174	0.9614	1.0073	1.0355	1.0537	1.0770
30.398	—	—	—	1.0828	1.0999	1.1204	1.1335	1.1454	1.1590

1.1.4 气体分子自由度

对于常温下的气体分子,可以看成是刚体,不考虑振动自由度。对于非刚性分子,如同加一个类似弹簧的振动,故而自由度需加 1。

单原子分子,如氢、氦、氩等,只有一个原子,可以看成是自由质点,所以为 3 个平动自由度。

刚性双原子分子,如氢、氧、一氧化碳分子等,两个原子之间连线距离保持不变,确定质心的位置,需要 3 个独立坐标;确定质点连线的位置,需要 2 个独立坐标;两质点绕连线的

转动是没有意义的。故而,刚性双原子分子有 3 个平动自由度和 2 个转动自由度,共 5 个自由度。

刚性三原子或多原子分子,如水、二氧化碳、氨等,只要各原子不是直线排列的,就可以看成是自由刚体,共有 6 个自由度。

气体分子自由度见表 1-2。

表 1-2 分子自由度

自由度 分子种类		平动 i_t	转动 i_r	振动 i_s	$i_d = i_t + i_r + i_s$
单原子分子		3	0	0	3
双原子分子	刚性	3	2	0	5
	非刚性	3	2	1	6
多原子分子	刚性	3	3	0	6
	非刚性	3	3	$3n-6$	$3n$

1.1.5 比热容

1mol 气体,当体积保持不变,在没有化学反应和相变的条件下,温度改变 1K 所吸收或放出的热量,叫做气体的定容比热容。

表 1-3 给出了标准干空气的组成及其定容比热容。

表 1-3 标准干空气的组成及其定容比热容

成分	相对分子质量	摩尔分数	自由度	定容比热容/[J/(g·K)]
O ₂	32.000	0.2095	5	0.649
N ₂	28.016	0.7809	5	0.741
Ar	39.944	0.0093	3	—
CO ₂	44.010	0.0003	6	—
H ₂	—	—	—	9.934
H ₂ O	—	—	—	1.381

1.2 气体黏度

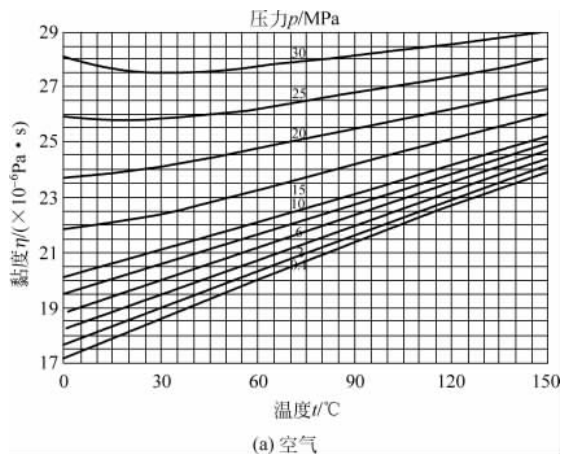
在流体润滑理论中,采用流体的动力黏度表征润滑流动过程中流体所受的运动阻力特性,对于流体动力润滑膜的承压能力起决定性作用。由于气体的可压缩性,使得气体黏度与液体相比表现出不同的变化表征,受温度和压力的影响明显。

表 1-4 给出了 1 个标准大气压(1.01325×10^5 Pa)下,室温波动范围内的空气动力黏度取值表。从表中可以看出,温度使空气的动力黏度增加。1 个大气压力下,当温度升高 30℃ 时,动力黏度增加约 9%。

表 1-4 不同温度下空气的动力黏度

温度 $T/^{\circ}\text{C}$	空气动力黏度 $\eta/(\times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{s})$	温度 $T/^{\circ}\text{C}$	空气动力黏度 $\eta/(\times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{s})$	温度 $T/^{\circ}\text{C}$	空气动力黏度 $\eta/(\times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{s})$
5	17.340	15	17.840	25	18.340
5.5	17.365	15.5	17.865	25.5	18.365
6	17.390	16	17.890	26	18.390
6.5	17.415	16.5	17.915	26.5	18.420
7	17.440	17	17.940	27	18.450
7.5	17.465	17.5	17.965	27.5	18.470
8	17.490	18	17.990	28	18.490
8.5	17.515	18.5	18.015	28.5	18.515
9	17.540	19	18.040	29	18.540
9.5	17.565	19.5	18.065	29.5	18.565
10	17.590	20	18.090	30	18.590
10.5	17.615	20.5	18.115	30.5	18.615
11	17.640	21	18.140	31	18.640
11.5	17.665	21.5	18.165	31.5	18.665
12	17.690	22	18.190	32	18.690
12.5	17.715	22.5	18.215	32.5	18.715
13	17.740	23	18.240	33	18.740
13.5	17.765	23.5	18.265	33.5	18.765
14	17.790	24	18.290	34	18.790
14.5	17.815	24.5	18.318	34.5	18.815

气体的黏度不仅受温度影响,同时也受到压力的影响。图 1-3 给出了空气、氮气和水蒸气的动力黏度与温度和压力的关系曲线^[3]。从图中可以看出,温度和压力均显著影响气体的动力黏度。对于空气而言,温度升高 150°C ,动力黏度的增加量可达到 40%;在 30°C 时,压力从 0.1MPa 增加到 30MPa,动力黏度的增量可达到 55%。水蒸气的动力黏度,随着温度的增加表现出与空气相反的变化规律,即随着温度的升高,动力黏度迅速下降。

图 1-3 气体黏度与压力和温度的关系曲线^[3]

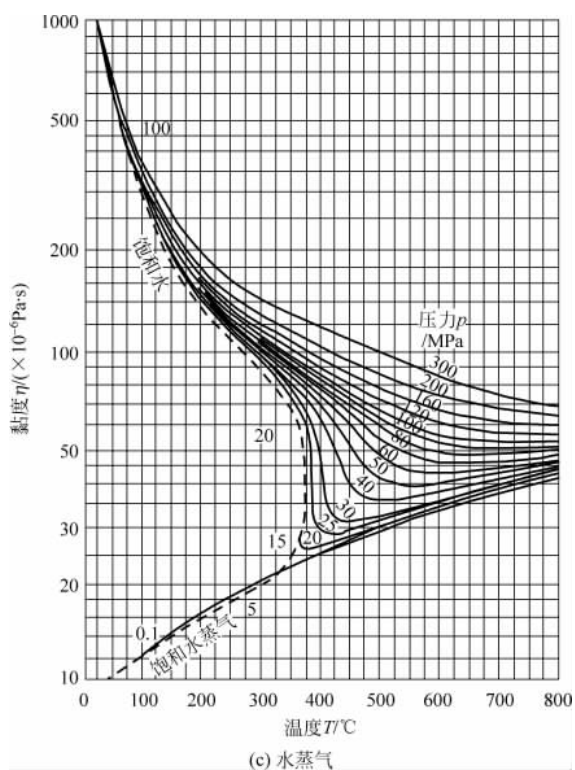
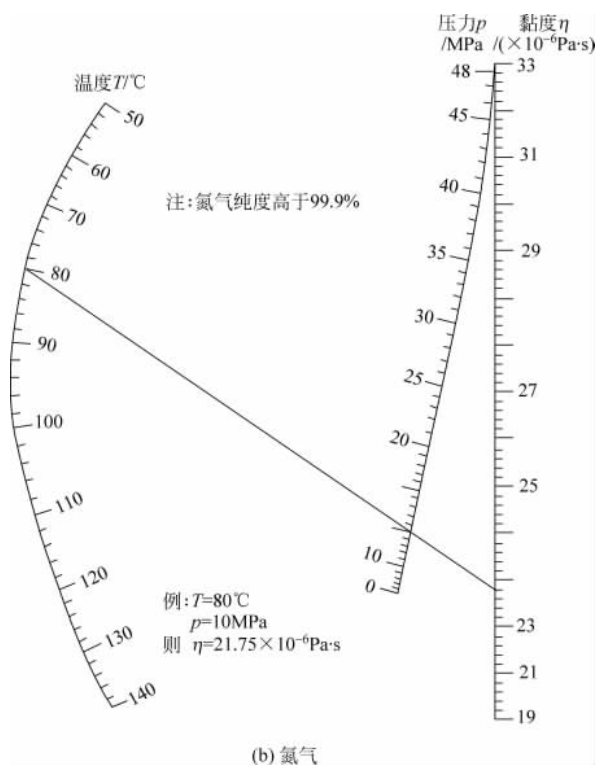


图 1-3(续)

虽然查阅图表的方法,可以较准确地得到气体的动力黏度取值,但在流体润滑分析时,为计算方便,需要建立气体动力黏度的数学表达式。下面对于气体动力黏度的主要计算公式进行讨论。

1. 萨特兰公式

温度低于 2000K 时,有

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{\left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} (T_0 + B)}{T + B} \quad (1-19)$$

式中: B 为与气体有关的常数,空气的 $B=110.4\text{K}$; η_0 是温度为 T_0 时的空气黏度。

2. 幂次公式

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^n \quad (1-20)$$

式中: 指数 n 随气体种类和温度而变,在 $90\text{K} < T < 300\text{K}$ 时,可取 $n=8/\rho$ 。

3. Champman-Enskog 公式

由 Champman-Enskog 方程^[4],可得到气体的黏度与温度的关系式如下:

$$\eta = \frac{5}{16} \frac{\sqrt{\pi m_{\text{gas}} k_B T}}{\pi d_{\text{gas}}^2} \quad (1-21)$$

式中: k_B 为玻耳兹曼常数; m_{gas} 为平均摩尔质量; d_{gas} 为气体分子直径。

4. Lucas 公式

通常地,基于对比态原理,采用临界温度、临界压力来衡量空气的温度和压力,以代替其绝对值。定义空气的对比温度和对比压力如下:

$$\text{对比温度} \quad T_r = T/T_c \quad (1-22)$$

$$\text{对比压力} \quad p_r = p/p_c \quad (1-23)$$

1980 年, Lucas^[5] 提出的气体黏度计算方法,进行气体黏度的计算,有:

$$\eta_{\text{sc}} \xi = 0.807 T_r^{0.618} - 0.357 \exp(-0.449 T_r) + 0.340 \exp(-4.058 T_r) + 0.018 \quad (1-24)$$

$$\xi = 37916 \left(\frac{T_c}{M^3 p_c^4} \right)^{1/6} \quad (1-25)$$

式中: η_{sc} 为标准状况 (15°C , $1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$) 下干空气的黏度,单位为 $10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$; ξ 为黏度的相关系数,单位为 $(10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s})$ 。

若 $1 < T_r < 40$, $0 < p_r \leq 100$, 则有:

$$\eta/\eta_{\text{sc}} = 1 + \frac{A_1 p_r^{1.3088}}{A_2 p_r^{A_3} + (1 + A_3 p_r^{A_4})^{-1}} \quad (1-26)$$

式中:

$$A_1 = \frac{(1.245 \times 10^{-3}) \exp(5.1726 T_r^{-0.3286})}{T_r} \quad (1-27a)$$

$$A_2 = A_1 (1.6553 T_r - 1.2723) \quad (1-27b)$$

$$A_3 = \frac{0.4489 \exp(3.0578 T_r^{-37.7332})}{T_r} \quad (1-27c)$$

$$A_4 = \frac{1.7368 \exp(2.2310 T_r^{-7.6351})}{T_r} \quad (1-27d)$$

$$A_5 = 0.9425 \exp(-0.1853 T_r^{0.4489}) \quad (1-27e)$$

式中: η 为求解工况下干空气的黏度, 单位为 $10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

若 $T_r \leq 1.0$, $p_r < (p_{vp}/p_c)$, 则有:

$$\eta \xi = 0.600 + 0.760 p_r^{B_1} + (6.990 p_r^{B_2} - 0.6)(1 - T_r) \quad (1-28)$$

式中:

$$B_1 = 3.262 + 14.98 p_r^{5.508} \quad (1-29a)$$

$$B_2 = 1.390 + 5.746 p_r \quad (1-29b)$$

Thomas 等人^[6]对气体密封中的气体的黏度问题进行了分析, 结果表明理想气体计算得到的黏度与实际气体存在较大偏差。如图 1-4 所示, 在较大的压力和温度变化范围内, Lucas 公式与实测得到的气体黏度取值一致性较好。

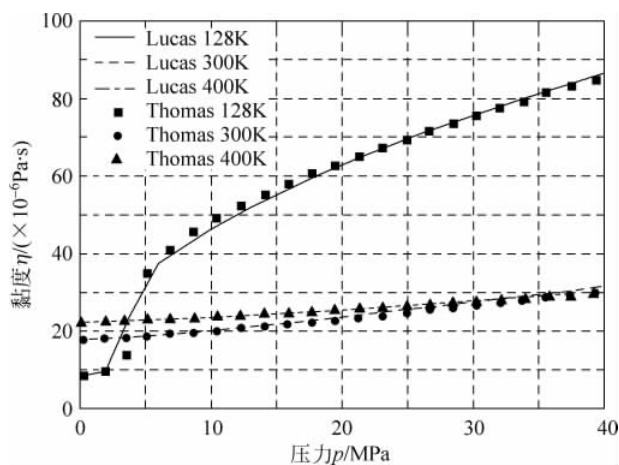


图 1-4 不同温度下气体黏度随压力变化曲线

应该指出的是, 萨特兰公式、幂次公式和 Chapman-Enskog 公式中没有考虑压力对气体动力黏度的影响, 对于普通的气体轴承润滑设计不会产生明显设计分析偏差。但是, 对于高压气体密封而言, 气体压力可达到 50MPa 以上, 气体的黏压效应不可忽略, 因此润滑分析时必须考虑压力对黏度的影响。

若所选润滑介质为气相混合物, 则混合物的临界物性参数的计算式如下^[5]:

$$T_c = \sum_{i=1}^N y_i T_{ci} \quad (1-30)$$

$$M = \sum_{i=1}^N y_i M_i \quad (1-31)$$

$$p_c = R_u T_c \frac{\sum_{i=1}^N y_i Z_{ci}}{\sum_{i=1}^N y_i v_{ci}} \quad (1-32)$$

式中: y_i 为混合物中成分的摩尔百分比; T_c 为混合物的临界温度; T_{ci} 为混合物中成分的临界温度; M 为混合物的摩尔质量; M_i 为混合物中成分的摩尔质量; v_{ci} 为混合物中成分的临界体积; p_c 为混合物的临界压力; Z_{ci} 为混合物中成分的临界压缩因子。

1.3 含湿气体性质

气体轴承和气体密封中的润滑气体主要是由空气经过压缩、分离和过滤获得,气体中不可避免地含有水分。当气体温度急剧降低时,润滑气膜中的水分容易析出凝结,对轴承和密封的性能产生不利影响,因而气体的含湿特性也是高参数气体润滑的必要内容。本节仅限于讨论空气中水蒸气的物理性质。

湿空气为干空气与水蒸气的混合物。为便于计算,干空气的组成按照美国国家标准和技术局(NIST)的标准空气模型^[7]选取为: N_2 (78.12%), O_2 (21.96%), Ar (0.92%); 空气中各组分的物性参数参照 Lemmon^[8] 等人的文献进行选取。

1.3.1 压力

根据理想气体分压力定律(道尔顿分压定律),湿空气的总压力 p 等于干空气分压力 p_a 和水蒸气分压力 p_v 之和。

饱和水蒸气的分压力可由下式计算^[9]:

$$p_s = \left[\frac{2B_3}{-B_2 + (B_2^2 - 4B_1B_3)^{0.5}} \right]^4 \quad (1-33)$$

式中:

$$B_1 = C^2 + a_3C + a_4 \quad (1-34a)$$

$$B_2 = a_5C^2 + a_6C + a_7 \quad (1-34b)$$

$$B_3 = a_8C^2 + a_9C + a_{10} \quad (1-34c)$$

$$C = T - \frac{a_1}{T - a_2} \quad (1-34d)$$

式(1-34)中涉及的参数列于表 1-5。

表 1-5 式(1-34)的参数

j	a_j	j	a_j
1	$0.11670521452767 \times 10^4$	6	$0.14915108613530 \times 10^2$
2	$-0.72421316703206 \times 10^6$	7	$-0.48232657361591 \times 10^4$
3	$-0.17073846940092 \times 10^2$	8	$0.40511340542057 \times 10^6$
4	$0.12020824702470 \times 10^5$	9	-0.23855557567849
5	$-0.32325550322333 \times 10^7$	10	$0.65017534844798 \times 10^3$