



许为全 编著

热质交换过程 与设备

清华大学出版社
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书系统地介绍了热质交换过程的基本原理,为空调设备的设计计算、性能分析和研究开发提供理论依据和计算方法。

全书共分 6 章,即分子扩散传质、对流传质、同时进行传热传质过程、空气与水表面之间的热质交换过程与设备、具有相变的热质交换过程与设备、吸收和吸附。

本书是建筑环境与设备工程专业(原空气调节专业)提高课程和研究生课程教材,也可作为研究和设计人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

热质交换过程与设备/许为全编著. —北京:清华大学出版社,
1999

ISBN 7-302-03654-3

I. 热… II. 许… III. ① 传热传质学 ② 热力工程-换热器
IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 32491 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者:清华大学印刷厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:850×1168 1/32 印张:5.625 字数:144 千字

版 次:1999 年 9 月第 1 版 1999 年 9 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-03654-3/TK·25

印 数:0001~3000

定 价:6.60 元

前 言

大部分空气调节设备,如喷雾室、冷却塔、蒸发器和冷凝器等都是属于热质交换设备,即在进行热量交换过程中,同时伴随有质量交换。因此,热质交换理论是空气调节的重要理论基础。

随着空调行业的迅速发展和空调设备应用范围的不断扩大,对于空调设备的数量、质量和性能方面都提出了新的和更高的要求,为了适应这种形势的需要,作者编著了“热质交换过程与设备”一书。该书将为设备的设计计算、性能分析以及新设备的研究开发提供理论依据和计算方法。

本书是一本适用于高等工科院校建筑环境与设备工程专业(原空气调节专业)提高课程和研究生课程的教材。它将以往分散在多门专业课程中的热质交换过程与设备问题集中起来,使之在理论上系统化,然后再将理论应用于具体设备。

本书内容包含以下三个层次:第一,质量传递过程;第二,同时进行热质交换过程;第三,典型的热质交换设备。

这里需要说明的是,关于设备部分,书中主要阐述典型设备的热质交换过程及其物理模型和数学模型的建立,而不去全面介绍具体的设备。

在本书编写过程中,赵荣义教授给予了大力支持和帮助,并承担了全书的审核工作。在此表示诚挚的谢意。

鉴于编著者的水平所限,书中错误或不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

许为全

1999. 1

目 录

绪论	1
第 1 章 分子扩散传质	3
1.1 流体内迁移与“三传”现象	3
1.2 斐克定律	5
1.3 扩散系数	9
1.4 分子扩散传质微分方程式	16
1.5 双组分一维稳定(无内物质源)情况下的 分子扩散传质	17
第 2 章 对流传质	26
2.1 边界层概念	26
2.2 对流传质中的一些主要参数	28
2.3 对流传质系数	30
2.4 对流传质的因次分析	31
2.5 层流传质	33
2.6 层流边界层传质方程近似解	43
2.7 紊流传质	46
第 3 章 同时进行传热传质过程	59
3.1 同时进行传热传质过程	59
3.2 传递模型	60
3.3 传质速率对速度、温度和浓度分布的影响	62

3.4	同一表面上传质速率对传热过程的影响·····	64
3.5	路易斯关系式·····	68
3.6	路易斯关系式的应用·····	70
第4章 空气与水表面之间的热质交换过程与设备 ·····		73
4.1	空气与水表面之间的热质交换基本方程式·····	73
4.2	影响空气与水表面之间热质交换的主要因素·····	78
4.3	空气与水表面之间的热质交换系数·····	85
4.4	空气与水表面之间的热质交换设备计算·····	96
4.5	冷却塔的热工计算·····	98
4.6	喷雾室的热工计算 ·····	106
4.7	表冷器的热工计算 ·····	112
第5章 具有相变的热质交换过程与设备 ·····		118
5.1	蒸汽凝结换热系数 ·····	118
5.2	液体的沸腾换热系数 ·····	123
5.3	冷却剂(水)在管内强迫流动时的换热系数 ·····	127
5.4	冷却剂(空气)在管外强迫对流换热系数 ·····	128
5.5	冷凝器和蒸发器的传热热阻 ·····	129
5.6	冷凝器和蒸发器的计算 ·····	130
第6章 吸收和吸附 ·····		132
6.1	吸收的基础理论 ·····	132
6.2	氯化锂溶液特性及其在空调中的应用 ·····	141
6.3	溴化锂溶液特性及其在制冷中的应用 ·····	144
6.4	有害气体的吸收净化 ·····	149
6.5	吸附的基础理论 ·····	150
6.6	吸附曲线与吸附方程 ·····	161
6.7	吸附在空调中的应用 ·····	168
参考文献 ·····		172

绪 论

在空调系统中,经常会遇到喷雾室、表冷器、冷却塔、蒸发器、冷凝器以及吸收器和吸附器等,它们都属于热质交换设备^[1],即在热交换过程中同时还伴随有质交换。

传递现象是自然界的基本物理现象之一。在一种物体内部,或在两种彼此接触(包括直接接触或间接接触)的物体之间,当存在势差时就会产生传递现象,例如,当存在温差时会传递热量;存在浓度差或分压力差时会传递质量。由此可见,“势差”是产生传递现象的前提条件,通常以推动力来表示势差的大小。两种物体只有在彼此接触时才能发生传递现象,所以彼此“接触”,是产生传递现象的必要条件,通常以传递面积来表示彼此接触的程度。这样,在给定条件下,单位时间的传递量就可以用传递现象方程式来表示:

$$\text{传递量} = \text{传递系数} \times \text{传递面积} \times \text{推动力}$$

这就表明,传递量与传递面积和推动力的乘积成正比。方程中的比例系数称为传递系数,它反映传递过程进行的程度。实际上传递系数是各种影响因素的综合,它包括流动状态、流体物性、边界条件以及初始条件等;因此,确定传递量的关键在于确定传递系数。

众所周知,传递系数的确定有赖于传递机理。在传递过程中主要包括分子扩散和对流传递两种机理。有关分子扩散的理论研究比较成熟,并已成为研究对流传递的基础。有关紊流状态对流传递的研究,现在还处于不断发展和完善之中。对于同时进行的热质传递过程,现在基本上还是采用“膜理论”。因此,对于传递系数的确定,只有在比较简单的情况下才能应用纯数学方法求解;而对于

大多数情况,只能通过实验方法来取得经验公式。不过幸运的是,质量传递和热量传递与动量传递之间具有类似性,因此,可以借助于流体测量的结果,推导出传热和传质问题的解,从而使热质传递问题的求解大为简化。

传递面积与接触表面的边界情况有关,可能是自由边界,也可能是固定边界。因此,为了增加传递面积,常常采用液体雾化或者增加填料层等扩大接触表面的措施。

推动力即势差。在热质交换设备中,温度差和水蒸气分压力差(浓度差)是基本的推动力。

对于热质传递设备,常会遇到两类课题:第一,新型设备的开发和研究;第二,已有设备的选择或校核。无论哪种课题,都需要求解传递现象方程式和确定传递量。因此,本书将利用热质传递基本理论,通过对传递过程的机理分析,运用数学和实验方法,确定不同条件下的传递系数和传递速率。

本书以传质学、流体力学和物理化学等内容为基础,并与传热学互为补充,从而形成完整的三传基本理论。同时以空调专业的热质交换设备为对象,为设计研究和性能分析提供理论依据和计算方法。

第 1 章 分子扩散传质

1.1 流体内迁移与“三传”现象

1.1.1 流体内迁移现象

流体分子都具有一定的能量和速度,处于不停的运动状态,在运动中相互碰撞,在碰撞中交换能量和动量,形成流体分子的无规则运动,并且各方向的运动概率基本相等。如果混合物的浓度场均匀,那么一定数量 A 组分的分子沿着某一方向运动,必然会有相同数量的 A 组分分子沿着相反方向运动,总体结果是没有发生宏观的分子流动。如果流场中存在浓度梯度,高浓度区分子要向低浓度区扩散,于是有了净的 A 组分分子流动,从而产生质量传递,直到流体混合物达到均匀状态为止,这就是流体内迁移现象。因此,从微观上讲,流体内迁移现象,是指在静止流体中或垂直于浓度梯度方向作层流运动的流体中,由于浓度梯度而产生的传质过程。

1.1.2 “三传”现象

微观上的内迁移现象引起宏观上的“三传”现象,即动量传递、热量传递和质量传递。

当流体中各层的流速不一样,即存在速度梯度时,引起宏观的动量传递现象,即在相邻两流层之间的接触面上,形成一对阻碍两层相对运动的摩擦力。摩擦力 τ_0 的大小可由流体力学中的牛顿公式表述:

$$\tau_0 = -\mu \frac{\partial v_x}{\partial y} = -\nu \frac{\partial \rho v_x}{\partial y} \quad (1-1)$$

式中： v ——速度；

μ ——动力粘性系数；

ν ——运动粘性系数；

ρ ——流体密度。

当流体中各部分温度不同，即存在温度梯度时，会引起宏观的传热现象，使热量从高温处传向低温处。根据传热学中的傅里叶导热公式，可求出单位面积和单位时间的传热量 q ：

$$\begin{aligned} q &= -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = -\frac{\lambda \partial c_p \rho T}{c_p \rho \partial y} \\ &= -\alpha \frac{\partial c_p \rho T}{\partial y} \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中： T ——温度；

λ ——导热系数；

c_p ——定压比热；

α ——导温系数。

当流体中各部分浓度不同，即存在浓度梯度时，结果引起宏观的扩散传质现象。扩散速率 N 可由斐克定律表述：

$$N = -D \frac{\partial C}{\partial y} \quad (1-3)$$

式中： C ——浓度；

D ——扩散系数。

以上可以看出，当流体内存在速度、温度和浓度的梯度时，在微观上就会产生流体的内迁移现象，在宏观上则表现为动量、热量和质量的传递。三种传递的机理都相同，它们依从的规律也类似，都可以用共同形式表示：

$$\text{传递速率} = \text{扩散率} \times \text{传递推动力}$$

通过以上分析，清楚地表明了三传之间的联系，这不仅有助于对扩散传质的理解，而且也为研究传质的方法提供了思路。

表 1.1 动量、热量、质量传递过程中的对应量

传递途径	传递速率	扩散率	传递特征量	传递推动力	观察定律
动量传递	τ_0	ν	ρv	$\frac{\partial (\rho v)}{\partial y}$	牛顿第二定律
热量传递	q	α	$c_p \rho T$	$\frac{\partial c_p \rho T}{\partial y}$	能量守恒
质量传递	N	D	C	$\frac{\partial C}{\partial y}$	质量守恒

1.2 斐克定律

斐克定律描述分子扩散过程中的传递速率与浓度梯度之间的相关关系。

一般说来,质量传递要比动量传递和热量传递更为复杂,因为传质过程往往是在多元混合物中进行,而每一种组分又可能具有不同的浓度和速度,因此必须考虑每一种组分所产生的影响。下面分别介绍双组分混合物的浓度,速度和传递速率,然后再介绍斐克定律。

1.2.1 浓度

浓度有四种表示方法:质量浓度,质量分数,摩尔浓度和分子分数。

(1) 质量浓度 指单位体积混合物中所含有某种组分的质量,用 ρ_i 表示。单位体积混合物的总质量称为混合物的总质量浓度(即密度),用 ρ 表示。则有

$$\rho = \sum_{i=1}^n \rho_i \quad [\text{kg/m}^3] \tag{1-4}$$

式中 n 为混合物所含有组分的数目。

(2) 质量分数：组分 A 的质量浓度除以混合物的总质量浓度，用 ω_A 表示。

$$\omega_A = \frac{\rho_A}{\rho} \quad (1-5)$$

(3) 摩尔浓度(分子浓度)：指单位体积混合物中所含有组分 A 的分子数，用 C_A 表示。

$$C_A = \frac{\rho_A}{M_A} \quad (\text{mol/m}^3) \quad (1-6)$$

式中： M_A 为组分 A 的分子量。对于气相来说，假定符合理想气体条件，则有 $p_A V = n_A RT$ ；所以

$$C_A = \frac{n_A}{V} = \frac{p_A}{RT} \quad (\text{mol/m}^3) \quad (1-7)$$

式中： n_A ——组分 A 的摩尔数；

p_A ——气体 A 的分压力，Pa；

T ——热力学温度，K；

V ——气体容积， m^3 ；

R ——通用气体常数。

于是，混合物总分子浓度 C 为：

$$\begin{aligned} C &= \sum_{i=1}^n C_i = \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{RT} \\ &= \frac{p_z}{RT} \quad (\text{mol/m}^3) \end{aligned} \quad (1-8)$$

式中： p_z ——气体总压力。

(4) 分子分数：组分 A 的分子浓度除以混合物的总分子浓度。用 y_A 表示。

$$y_A = \frac{C_A}{C} = \frac{p_A}{p_z} \quad (1-9)$$

例 1.1 干空气主要由氧气和氮气组成，它们的分子分数分别为 $y_{\text{O}_2} = 0.21$, $y_{\text{N}_2} = 0.79$ ，试求在 1atm 下 (1atm = 101325Pa)，

25℃干空气中氧和氮的质量分数以及干空气的平均分子量。

解 以 1mol 的干空气作为计算基础。

$$\text{由 } y_A = C_A/C$$

$$\text{则 } C_{O_2} = C \times y_{O_2} = 1 \text{ mol/m}^3 \times 0.21 = 0.21 \text{ mol/m}^3$$

$$C_{N_2} = C \times y_{N_2} = 1 \text{ mol} \times 0.79 = 0.79 \text{ mol/m}^3$$

已知氧和氮的分子量分别是： $M_{O_2} = 0.032 \text{ kg/mol}$, $M_{N_2} = 0.028 \text{ kg/mol}$,

所以

$$\rho_A = C_A M_A$$

$$\text{即 } \rho_{O_2} = 0.21 \text{ mol/m}^3 \times 0.032 \text{ kg/mol} = 0.00672 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{N_2} = 0.0221 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho = 0.00672 + 0.0221 = 0.0288 \text{ kg/m}^3$$

因为 1 mol 干空气的质量为 0.0288 kg, 故它的平均分子量亦即为 0.0288 kg/mol。容易求得各自质量分数为:

$$\omega_{O_2} = \frac{\rho_{O_2}}{\rho} = \frac{0.00672}{0.0288} = 0.23$$

$$\omega_{N_2} = \frac{\rho_{N_2}}{\rho} = \frac{0.0221}{0.0288} = 0.77$$

1.2.2 速度

在流体混合物中, 由于各组分的浓度梯度不同, 扩散物质种类不同, 所以各组分以不同速度(这里是指微小体积内分子的平均速度而不是每个分子的速度)运动。又由于流体运动速度与选择的参考基准有关, 通常具有相对速度的概念, 所以常用各组分速度的平均值来定义流体的平均速度。

如果组分 A 相对于静止坐标的统计平均速度为 U_A , 组分 A 通过垂直于静止平面的传质速率为 $\rho_A U_A$, 那么双组分混合物(组分 A 和 B)的质量平均速度 U 即可定义为:

$$U = \frac{\rho_A U_A + \rho_B U_B}{\rho} \quad (1-10)$$

同样,双组分分子平均速度 U_M 亦可定义为:

$$U_M = \frac{C_A U_A + C_B U_B}{C} \quad (1-11)$$

因此,流动系统内组分 A 的速度可用三种参考基准来表示:

U_A ——相对于静止坐标的速度;

$(U_A - U)$ ——相对于质量平均速度的相对速度,即组分 A 相对于 U 的扩散速度;

$(U_A - U_M)$ ——组分 A 相对于分子平均速度的相对速度,即组分 A 相对于 U_M 的扩散速度。

需要指出,根据分子扩散原理,只有当某一组分存在浓度梯度时,才存在扩散速度。

1.2.3 扩散速率

扩散速率是指单位时间垂直通过单位面积的某一组分的量。在稳定状态下,扩散速率是一矢量,可以根据静坐标系或随着流体平均速度一起运动的动坐标系来定义。

速度	质量传递速率	摩尔传递速率
相对于静坐标的速度 U_A	$n_A = \rho_A U_A$	$N_A = C_A U_A$
相对于静坐标的速度 U	$j_A = \rho_A (U_A - U)$	
相对于静坐标的速度 U_M		$J_A = C_A (U_A - U_M)$

1.2.4 斐克定律

1855 年,斐克根据实验结果提出如下经验公式:

$$J_{Az} = - D_{AB} \frac{dC_A}{dz} \quad (1-12)$$

式中： J_{Az} ——组分 A 在 z 轴方向上的扩散速率，

D_{AB} ——A 组分在 B 组分中的扩散系数。

上式称为斐克定律，可表述为：在一个等温等压系统中，组分 A 在 Z 轴方向上，相对于整体流动的分子平均速度 U_M 的扩散速率 J_{Az} 与扩散系数成正比，与组分 A 在 Z 轴方向上的浓度梯度成正比。负号表示传递速率与浓度梯度的方向相反。

现在考察一个在 z 轴方向上（一维）具有恒定分子平均速度的二元系统，在 z 轴方向上，组分 A 相对于整体流动的分子平均速度 U_M 的扩散速率为 J_{Az} ：

$$J_{Az} = C_A(U_{Az} - U_M) = -D_{AB} \frac{dC_A}{dz} \quad (1-13)$$

由式(1-11)和(1-12)，可将式(1-13)写成

$$\begin{aligned} N_{Az} &= -D_{AB} \frac{dC_A}{dz} + y_A(N_{Az} + N_{Bz}) \\ &= -CD_{AB} \frac{dy_A}{dz} + y_A(N_{Az} + N_{Bz}) \end{aligned} \quad (1-14)$$

式中： $N_{Az} = C_A U_{Az}$

$N_{Bz} = C_B U_{Bz}$

式(1-14)称为一维二元系统分子扩散的一般微分方程式。式中包含了两个矢量之和：

$-D_{AB} \frac{dC_A}{dz}$ ——是由组分 A 的浓度梯度产生的扩散速率，

$y_A(N_{Az} + N_{Bz})$ ——是由扩散过程引起的整体流动所产生的扩散速率。

1.3 扩散系数

按照斐克定律，扩散系数被定义为：沿扩散方向在单位时间内物质浓度降低一个单位时，通过单位面积的传递量，由式(1-12)可

以导出扩散系数为：

$$D_{AB} = - \frac{J_{Az}}{dC_A/dz} \left(\frac{m^2}{s} \right) \quad (1-15)$$

可以看出，质量扩散系数 D 和动量扩散系数 ν 及热量扩散系数 a 具有相同的单位 (m^2/s) 或 (cm^2/s)，扩散系数主要取决于扩散物质和扩散介质的种类及其温度和压力。

1.3.1 气体扩散系数

气体扩散分为自扩散和互扩散。气体在自身中的扩散叫做自扩散，两种气体相互扩散称为互扩散。

(1) 自扩散系数 D_{AA}

假定单位体积内有 C 个分子，并且所有分子都以相同的平均速度 $\bar{v}$ 运动。则其中的 $C/3$ 个分子具有沿 y 方向的速度，这些分子中的一半（即单位体积中的 $C/6$ 个分子）具有沿 $+y$ 方向的速度 $\bar{v}$ ，而另外一半具有沿 $-y$ 方向的速度 $\bar{v}$ ，现在考察用 y_0 标记的平面，如图 1-1 所示。

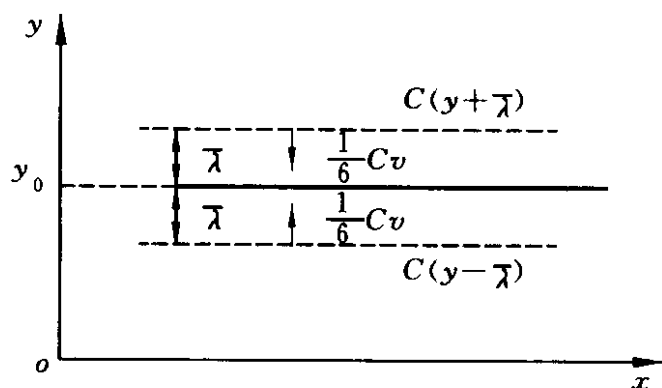


图 1-1 自扩散系数分析图

单位时间单位面积上有 $\frac{1}{6}C\bar{v}$ 个分子从下方穿越 y_0 平面，类似地有 $\frac{1}{6}C\bar{v}$ 个分子从上方穿越 y_0 平面。由于浓度 C 是位置 y 的

函数,即 $C=C(y)$,因此需要找出穿越 y_0 平面之前分子所处的位置。从气体分子平均自由程 $\bar{\lambda}$ 的定义可知,从下方穿越 y_0 平面的分子,平均地说在平面下方距离 $\bar{\lambda}$ 处经受过一次碰撞,所以在 $(y-\bar{\lambda})$ 处的分子,平均具有浓度 $C(y-\bar{\lambda})$,因此,单位时间单位面积上传递的速率为 $\frac{1}{6}\bar{v}C(y-\bar{\lambda})$ 。类似地,考虑来自 y_0 平面上方的分子,它们在 $(y+\bar{\lambda})$ 处经受过前一次碰撞,于是得出单位时间单位面积向下传递的速率为 $\frac{1}{6}\bar{v}C(y+\bar{\lambda})$ 。二式相减,就可得到穿越 y_0 平面的净传递速率为:

$$\begin{aligned} J_{Ay} &= \frac{1}{6}\bar{v}C(y-\bar{\lambda}) - \frac{1}{6}\bar{v}C(y+\bar{\lambda}) \\ &= \frac{1}{6}\bar{v}[C(y-\bar{\lambda}) - C(y+\bar{\lambda})] \\ &= \frac{1}{6}\bar{v}\left[C(y) - \frac{\partial C(y)}{\partial y}\bar{\lambda} - C(y) - \frac{\partial C(y)}{\partial y}\bar{\lambda}\right] \quad (1-16) \end{aligned}$$

作为一次近似,可以写出:

$$J_{Ay} = \frac{1}{6}\bar{v}\left[-2\frac{\partial C(y)}{\partial y}\bar{\lambda}\right] \quad (1-17)$$

由于 $J_{Ay} = -D_{AA}\frac{dC(y)}{dy}$

所以 $D_{AA} = \frac{1}{3}\bar{v}\bar{\lambda} \quad (1-18)$

式中: $\bar{v}$ ——气体分子算术平均速度, $\bar{v} = \sqrt{\frac{8KT}{\pi M}}$;

$\bar{\lambda}$ ——气体分子平均自由程, $\bar{\lambda} = \frac{KT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}$;

M ——相对分子质量。

因此,自扩散系数为

$$D_{AA} = \frac{2}{3\pi^{2/3}d^2 p}\left[\frac{K^3 T^3}{M}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-19)$$

式中： d 是分子直径， K 是波尔茨曼常数。

从上式看出，扩散系数完全是气体的属性，它与 $T^{3/2}$ 成正比，与 P 成反比。同时还可以看出，在相同温度下，对于两种不同的气体分子来说，它们的平均速度 $\bar{v}$ 与它们的相对分子质量的平方根成反比，即

$$\frac{\bar{v}_A}{\bar{v}_B} = \sqrt{\frac{M_B}{M_A}} \quad (1-20)$$

所以相对分子质量小的气体扩散得快，相对分子质量大的气体扩散得慢。

(2) 互扩散系数 D_{AB}

对于二元混合物系统，各组分分子的平均自由程和分子速度是不相同的，同时，还必须考虑分子之间的相互作用。因为由分子论可知，当分子相距极近时，它们之间不是吸力而是斥力，间距愈小斥力愈大，以至于相互靠近的分子又改变运动方向而离开，这一相互作用过程通常称为分子碰撞，但它不同于刚性碰撞，只是分子之间相互作用的结果。对于非极性分子对，可以用 L-J (Lennard-Jones) 势参数来表示分子之间相互作用的关系。于是由海斯菲耳德 (Hirschfelder) 等人提出按下式计算互扩散系数

$$D_{AB} = \frac{18.58 \times 10^{-6} T^{3/2} \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{1/2}}{p \sigma_{AB}^2 \Omega_D} \quad (1-21)$$

式中： D_{AB} ——气体 A 在气体 B 中扩散系数， cm^2/s ；

T ——热力学温度，K；

M_A, M_B ——分别为组分 A 和 B 的相对分子质量；

p ——绝对压力，atm；

σ_{AB} ——碰撞直径，nm；(L-J 势参数)；

Ω_D ——碰撞积分， $\Omega_D = f(KT/\epsilon_{AB})$ ，(L-J 势参数)，是分子间相互作用的非刚性修正；