

第零章 绪言

0.1 热学研究的对象

1. **系统**：分割出来集中注意力加以研究的对象；
2. **介质**：周围能对系统状态产生影响的事物；
3. **热孤立系 (绝热系)**：为绝热壁所包围，不可能与周围介质发生热交换的系统；
封闭系：不可能与周围介质发生物质交换的系统；
孤立系：与周围介质完全隔离，既不发生机械的相互作用，也不发生热的相互作用的系统；
4. **单元系**：由一种化学成分的物质组成的系统；
多元系：由多种化学成分的物质组成的系统；
5. **均匀系 (单相系)**：各个部分的性质完全一致的系统；
非均匀系 (复相系)：各部分性质之间有差别，由若干个被界面隔开的均匀部分组成的系统；
6. **相**：复相系中的每个均匀部分，如气相、液相、固相等；

0.2 热学研究的方法

7. **宏观的状态参量 (宏观量)**：用来描述和确定系统所处的状态、能直接感受和可观测的物理量，如体积、压强、温度和浓度等；
微观的状态参量 (微观量)：微观坐标和动量以及与之相联系的力学量，如分子的动量、动能、角动量等；

0.3 热学研究的特点

8. 描述系统的宏观参量是系统相应微观量的**统计平均值**，如气体压强是气体分子碰撞容器器壁时单位时间里作用于器壁单位面积的冲量的统计平均值；
9. **统计规律性**：系统的个别微观运动状态的偶然性和它在宏观上表现出来的确定规律性(是大量分子组成的物质的热运动形式区别于其他物质运动形式的一个基本特点)；

第一章 平衡态和状态方程

1.1 平衡态 状态参量

10. **平衡态**：在没有外界影响的条件下，热力学系统的各个部分的宏观性质在长时间内不发生任何变化的状态；系统与周围介质之间没有相互作用，既无物质交换，又无能量传递(做功和传热)，即系统是个孤立系；
11. 由于组成系统的分子不停顿地热运动，微观量随时间做迅速的变化，保持不变只是相应微观量的统计平均值；热力学平衡态是一种动态平衡，称为**热动平衡**；实际上状态参量仍会发生对平衡态数值的微小偏离，这种现象叫做**涨落**；
12. **弛豫时间**：一个系统由非平衡态回复到平衡态所需要的时间；既依赖于系统本身的性质，还与被讨论的物理量有关；
13. 当影响系统状态发生改变的外界因素变化的特征时间远大于弛豫时间时，系统每一瞬间可近似看成处于平衡态，否则处于非平衡态；平衡态必须是在长时间内不发生任何变化的状态；
14. 热力学系统的平衡态是一种热动平衡，包含**力学平衡**、**热平衡**和**化学平衡**；
15. **力学平衡**：系统内部没有不被平衡掉的力；
热平衡：系统各个部分的冷热程度(温度)相等；
化学平衡：系统中各部分不再自发地趋向于内部结构的变化(如化学成分和浓度的

变化), 包括相平衡和化学反应平衡;

1.2 温度和温标

16. **温度**: 物体冷热程度的数值表示, 微观上是衡量分子平均动能的度量;
17. 一个壁称为**绝热的**, 若将它置于各自处于平衡态的两物体 A 和 B 之间, 则 A 的状态并不因为 B 的温度改变而受到丝毫影响, B 的状态也不因 A 的温度改变而受到任何影响; 一个壁称为**导热的**, 若将它置于 A 和 B 之间, A (或 B) 温度的改变, 将引起 B (或 A) 的状态改变;
18. 温度是系统自身热运动性质的宏观表现, 与系统与什么介质相接触和经过什么路径达到这个平衡状态是无关的;
19. **热力学第零定律**: 若 A 和 B 两个物体分别于第三个处于确定状态的物体 C 达到热平衡, 则物体 A 和 B 彼此也处于热平衡;
20. **温标**: 温度的标定方法, 可分为**经验温标**、**理想气体温标**和**热力学温标**;
21. **温标三要素**: **测温物质**、**测温属性**、**固定标准点**;
22. **水的三相点**: 冰、水和水蒸气三相共存达到平衡时的温度; **273.16K/611.2Pa**;
23. **经验温标**的定义式 (P_8), **定容和定压气体温度计温标**的实现 (P_9);
24. 经验温标的缺点: 使用不同的温度计测定同一温度的数值不相同;
25. **热力学温标**: 建立在热力学第二定律基础上的一种理论性温标, 与测温物质的性质无关; 在理想气体温标能标定的温度范围内, 热力学温标与理想气体温标一致; 用理想气体温标实现热力学温标, 以此标定的温度称为**热力学温度**;
26. **理想气体温标** (P_{10}): 以气体为测温物质, 利用理想气体状态方程中体积 (压强) 不变时压强 (体积) 与温度成正比关系所确定的温标;
27. **摄氏温标**: 摄氏温度 $t = T - 273.15$; 华氏温标 $t_F = 32 + (9/5)T$;

1.3 状态方程

28. **查理定律** ($p = p_0(1 + \alpha_p t)$)、**盖吕萨克定律** ($V = V_0(1 + \alpha_V t)$)、**玻意耳定律** (P_{19});
29. 一切可描述和确定系统状态的物理量, 只要它是独立状态参量的单值函数, 就可称为系统的**状态函数**或**态函数**;
30. **气态**和**蒸气态** (**汽态**) 都是气体, 后者能通过**等温压缩**液化, 前者不能;
31. **等温压缩试验** (P_{14}); 通过 p - V 图 (P_{14} - P_{15}): **饱和蒸气压**、**沸点** (**凝结点**)、**临界温度**、**临界等温线**、**临界点**、**液相饱和线**、**相变潜热的概念**;
一级相变: 具有**体积发生跃变**、**伴随有相变潜热特点**的相变;
32. **玻意耳定律**: 对于各种不同的气体, 只要保持气体的温度不变, 一定量气体的体积 V 与其压强 p 的乘积是个常数, 此常数只与温度 T 有关, 与气体性质无关, 即:
 $pV = C(T)$; 常数 $C(T)$ 与理想气体温度 T 成正比;
33. **理想气体状态方程** ($pV_0 = RT$; $pV = \gamma RT$) 的推导 (P_{19} - P_{20}); $V_0 = 22.4 \text{ L/mol}$;
 $R = 8.31 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$;
34. 玻意耳定律和理想气体温标是构成理想气体状态方程的两个互相独立的前提, 查理定律、盖吕萨克定律只是理想气体状态方程的推论;

1.4 膨胀系数和压缩系数

35. 在**恒压**下改变单位温度时物体体积的变化率为该物体的**体膨胀系数** α ;
在**恒体积**下改变单位温度时物体压强的变化率为物体的**压强系数** β ;
在**恒温**下改变单位压强时物体体积的变化率为该物体的**等温压缩系数** χ ;
通过测定物体的体膨胀系数 α 和等温压缩系数 χ 可以确定该物体的状态方程 (P_{25} - P_{26});
36. 对于理想气体, $\alpha = \beta = 1/T$; $\chi = 1/p$;

第二章 气体分子动理论的基本概念

2.1 物质分子动理论的基本图像

37. 物质的分子动理论的基本内容：物质结构的分子、原子学说；分子处于不停顿无规则的热运动之中；分子之间存在着相互作用力——分子力；
38. **布朗运动**是分子处于不停顿无规则热运动之中的宏观表现；
39. **朗之万方程** ($P_{34}-P_{35}$) ——描述布朗粒子运动的方程；**爱因斯坦扩散方程** (P_{35})；

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} = F_s - 6\pi\eta a \frac{ds}{dt}, s = x, y, z \quad ; \quad \overline{s^2} = 2D\Delta t, D = kT/(6\pi\eta a)$$

40. **分子力**由吸引力和排斥力两部分组成；按其发生的原因可以分为由于带电粒子之间静电力引起的作用力和微观粒子运动的量子力学效应引起的作用力；对于无极性分子，前者表现为远程的吸引力，后者在一定条件下将导致由电子云层重叠引起的近程的共价键或者强排斥力；
41. 无极性分子分子间作用力的近似公式 ($f = \frac{\lambda}{r^s} - \frac{\mu}{r^t}$)；引力和斥力互相抵消的位置称为**平衡位置** r_0 、分子力近似认为等于零的距离称为**有效作用半径** r_e ；

$$\text{势能 } (\varphi(r) = -\int_{\infty}^r f dr = \frac{\lambda'}{r^{s-1}} - \frac{\mu'}{r^{t-1}}) \text{ 曲线 } (P_{35}) ;$$

势能为零的距离称为**分子的有效直径** d ；

42. **物质三态的原理**、**热膨胀的原理** (P_{38})；**晶体的结合能** ($P_{38}-P_{39}$)；

2.2 理想气体的压强公式

43. **理想气体的微观模型**：①理想气体分子有质量，无体积，是质点；②理想气体分子之间的相互作用力为零，每个分子在气体中的运动都是独立的，绝对自由的；在碰到容器器壁之前，做匀速直线运动；③理想气体分子只与容器器壁发生碰撞；碰撞过程中，气体分子在单位时间内施加于器壁单位面积的冲量的统计平均值在宏观上表现为气体的**压强**；
44. **细致平衡原理**：在宏观可观测的时间间隔里，气体中任何局域的任何方向上有相同数目的气体分子在运动；任意方向上，有多少个某种速率的气体分子离开体元，必有相同多的该速率气体分子进入此体元（在宏观可观测的时间间隔里，任意一个分子的运动速度没有优先的方向）；**平衡态是由细致平衡加以保证和维持的**；
45. 由 N 个分子组成的、达到平衡态的气体中，必将建立一个**不随时间改变的、稳定的**粒子数按速度 v_1, \dots, v_i, \dots 的分布 $N(v_1), \dots, N(v_i), \dots$ ，而且与此分布相应的分子速度在速度空间里的分布必定是**各向同性的**；
46. **理想气体的压强公式** ($p = \frac{1}{3} mn\overline{v^2} = \frac{2}{3} n\overline{E}$) 的推导 ($P_{41}-P_{43}$)；

2.3 温度的统计解释

47. **温度**是组成系统的大量分子热运动的集体行为的宏观表现，反映分子运动的剧烈程度，只有统计的意义，对于单个分子谈论温度没有意义；在理想气体的微观模型中，与温度相应的微观量是气体分子的**动能**；
48. **理想气体的温度公式** ($E=(3/2)kT$)； $k=R/N_A=1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ；
49. **理想气体的压强公式** ($p=nkT$)；

2.4 道尔顿分压定律和混合气体的状态方程

50. **道尔顿分压定律**： $p=p_1+p_2+\dots+p_i+\dots+p_s$ ；

2.5 范德瓦耳斯状态方程

51. 实际气体不同于理想气体的主要特征：①实际气体分子不是质点，占有一定体积，故两个气体分子不可能无限地靠近；在近距离上气体分子之间有强排斥作用；②实际气体分子在远距离上也是有相互作用的；
52. 范德瓦耳斯状态方程 $((p + \frac{a}{v_0^2})(V_0 - b) = RT)$ 的推导 (P₄₇-P₅₁)；其中 a/v_0^2 称为气体内压强， b 是 1mol 气体分子能占有的最小体积； $a=4v_0\epsilon N_A^2$ ； $b=4N_A v_0$ ；

第三章 气体分子热运动速度及其能量的统计分布率

3.1 概率的基础知识

53. 概率：一定的条件下，在一系列可能发生的事件集合中，发生某一事件的机会或可能性；概率是表征统计规律性的量，它只在研究一定条件下可能发生的大量偶然事件时，才是有意义的；概率的归一化条件： $\sum P(A_i)=1$ ；
54. 随机变量：某一偶然事件的发生与否，可以以一个描述系统状态的力学量 x 取确定的数值 x_i 表征，这样的变量称为随机变量；若 x 只能取分立的数值，称为离散的或分立的随机变量；若 x 可取的数值连续可变，称为连续的随机变量；
55. 离散随机变量的统计平均值： $\bar{x}=\sum P_i x_i$ ； $\sum P_i=1$ ； $\overline{v^2}=\sum P(v_i)v_i^2$ ；
56. 连续的随机变量和概率分布函数 (P₅₉-P₆₁)；

$$f(v) = \frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{dv} = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{1}{N} \cdot \frac{\Delta N(v)}{\Delta v} ; \int_0^{\infty} f(v) dv = 1$$

$$\frac{dN}{N} = f(v) dv ; dN(v) = N f(v) dv ; N(\Delta v = v_2 - v_1) = \int_{v_1}^{v_2} dN(v) = N \int_{v_1}^{v_2} f(v) dv$$

$$\overline{u(v)} = \int_0^{\infty} u(v) f(v) dv$$

$$\frac{dN(v_x, v_y, v_z)}{N} = f(v_x, v_y, v_z) dv_x dv_y dv_z$$

3.2 麦克斯韦速度分布律和速率分布律

57. 平衡态气体分子的速度分布函数只与气体的温度 T 和分子质量 m 有关；
58. 基于细致平衡原理，在速度空间里速度矢量端点的分布各向同性，端点的数密度分布只与气体分子的速率有关；

$$59. \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-x^2} dx = \sqrt{\pi} ; \int_0^{+\infty} v^2 e^{-av^2} dv = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{a^3}}$$

60. 麦克斯韦速度分布函数及其分布律

$$f(v_x, v_y, v_z) = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{m}{2kT}(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}$$

$$\frac{dN(v_x, v_y, v_z)}{N} = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{m}{2kT}(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)} dv_x dv_y dv_z$$

$$f(v_x) = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{mv_x^2}{2kT}}$$

$$f(v) = \frac{1}{N} \frac{dN(v)}{dv} = 4\pi v^2 \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$

$$61. \text{最概然速率 } v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}} ; \text{平均速率 } \bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} ; \text{方均根速率 } \sqrt{v^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} ;$$

62. 统计规律性：在一定的条件下偶然事件以一定的概率发生；
63. 涨落：实际分布或多或少地偏离最概然分布导致宏观量的涨落；宏观量是相应微观量的统计平均值，平衡态系统的宏观状态参量是对最概然分布做统计平均的结果，对在最概然分布附近有涨落的分布求统计平均，结果必然会在宏观量附近起伏；

3.3 麦克斯韦速率和速度分布律应用举例

64. 无量纲麦克斯韦速率分布律：令 $u = \frac{v}{v_p}$ ，其中 $v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$
- $$\frac{dN(u)}{N} = f(u)du \quad ; \quad f(u) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} u^2 e^{-u^2} \quad ; \quad \int_0^{\infty} \frac{dN(u)}{N} = \int_0^{\infty} f(u)du = 1$$
65. 气体分子的碰壁数： $\Gamma = n \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{1}{2}} \int_0^{\infty} v_x e^{-\frac{mv_x^2}{2kT}} dv_x = \frac{1}{4} n \bar{v}$ ；泻流 (P₇₃-P₇₄)

3.4 重力场中微粒按高度的分布 玻尔兹曼分布律

66. 大气压强和分子数密度随高度的分布：

$$p(z) = p_0 e^{-\frac{mgz}{kT}} \quad ; \quad n(z) = n_0 e^{-\frac{mgz}{kT}}$$

空气柱中空气分子按高度的分布律：

$$\frac{dN(x, y, z)}{N} = \frac{mg}{kT} e^{-\frac{mgz}{kT}} dz \frac{dxdy}{A}$$

67. 重力场中微粒按高度分布的玻尔兹曼分布律：

$$\frac{dN(x, y, z, v_x, v_y, v_z)}{N} = \frac{n_0}{N} \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{1}{kT} [\frac{m}{2}(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) + mgz]} dxdydzdv_x dv_y dv_z$$

离心力场中微粒按径向的分布律：

$$\frac{dN(r)}{N} = \frac{n_0}{N} e^{-\frac{mr^2\omega^2}{2kT}} 2\pi r dr$$

3.5 能量按自由度均分定理 理想气体的内能和定体热容

68. 由 n 个质点组成的刚体共有 **6 个自由度**：3 个平动自由度 (x, y, z)，3 个转动自由度 (θ, ϕ, ψ)；刚性的双原子分子可以看成由两个质点组成的刚体，有 5 个自由度，其中只有 2 个转动自由度 (θ, ϕ)；非刚性的双原子分子还有 1 个振动自由度；
69. 平衡态气体分子沿三个正交方向的平均平动能量都相等，等于 $kT/2$ ；平衡态的气体分子的各种不同运动形式的能量充分交换，总能量机会均等地平均分配于每一种运动形式或每一种自由度，因此上述能量按平动自由度均分的结果也适用于转动自由度和振动自由度；一个分子的平均总能量： $\bar{\epsilon} = \frac{1}{2}(t + r + 2s)kT$

70. 质量为 M 的理想气体的内能： $U = \frac{M}{\mu} N_A \cdot \frac{1}{2}(t + r + 2s)kT = \frac{1}{2} \nu(t + r + 2s)RT$

$$\text{理想气体的摩尔内能} : U_{\mu} = \frac{1}{2}(t + r + 2s)RT$$

71. 热容 C ： $C = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{Q}{\Delta T}$

比热容 c (比热 c)：单位质量某种物体的热容， $C = Mc$

摩尔热容 C_{μ} ：单位摩尔质量某种物体的热容 $C_{\mu} = \mu c$

$$\text{定体热容 } C_V : C_V = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{Q_V}{\Delta T} = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta T} = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V$$

定体比热 c_V ，定体摩尔热容 $C_{\mu V}$ ： $c_V = C_V/M$ ； $C_{\mu V} = \mu c_V$

$$72. C_V = \frac{1}{2} \frac{M}{\mu} (t + r + 2s)R ; C_{\mu V} = \frac{1}{2} (t + r + 2s)R$$

73. 气体的麦克斯韦能量分布律 :

$$\frac{dN(\varepsilon)}{N} = f(\varepsilon)d\varepsilon ; f(\varepsilon) = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \left(\frac{1}{kT} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\varepsilon} e^{-\frac{\varepsilon}{kT}}$$

第四章 气体内的输运现象

4.1 气体分子碰撞和平均自由程

74. 有效碰撞截面 : $\sigma = \pi d^2 = 4\pi(d/2)^2$

75. 实际分子的有效碰撞截面与表示分子之间相互作用性质的势能参数有关, 与两分子相对的初始速率(或初始动能)有关, 与气体的温度有关(依赖关系较微弱);

76. 自由程 λ : 一个分子在连续两次与其他分子碰撞之间飞越过的路程;

平均自由程 $\bar{\lambda}$: 一个分子的自由程的统计平均值;

平均碰撞频率 \bar{Z} : 一个分子在单位时间里与其他分子碰撞的平均次数;

$$\bar{v} = \bar{\lambda} \cdot \bar{Z} \text{ 或 } \bar{\lambda} = \bar{v} / \bar{Z}$$

77. 相对速率的统计平均值 \bar{u} : $\bar{u} = \sqrt{2}\bar{v}$

$$\text{平均碰撞频率 } \bar{Z} : \bar{Z} = \pi d^2 \bar{u} n = \sqrt{2} \pi d^2 \bar{v} n = \sqrt{2} \sigma \bar{v} n$$

$$\text{平均自由程 } \bar{\lambda} : \bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n} = \frac{1}{\sqrt{2} \sigma n} = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 p}$$

78. 由 A 分子组成的气体中单位时间单位体积里发生的碰撞数目:

$$Z_{AA} = \frac{1}{2} n \bar{Z} = \frac{\sqrt{2}}{2} \pi d^2 \bar{v} n^2 = \pi d^2 \sqrt{\frac{4kT}{\pi m}} n^2$$

由 A、B 分子组成的气体中单位时间单位体积里发生的碰撞数目:

$$Z_{AB} = \frac{1}{4} \pi (d_A + d_B)^2 \sqrt{\frac{8kT}{\pi \mu}} n_A n_B, \mu = \frac{m_A m_B}{m_A + m_B}$$

79. 当气体分子平均自由程可以与容器线度相比较甚至大于容器线度时, 气体分子可以从容器的一壁出发, 无碰撞地飞到容器的另一壁, 这种气体所处的状态称为真空; 真空容器内所包含的气体是高度稀薄的气体, 通常称之为克努森气体; 这种气体流动称为分子流;

80. 有效碰撞截面 σ 是温度的函数, 随温度的升高而减小, 从而使平均自由程 $\bar{\lambda}$ 增加;

81. 气体分子按自由程分布 :

$$f(\lambda) = \frac{1}{N} \cdot \frac{dN(\lambda)}{d\lambda} = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{\lambda}{\bar{\lambda}}} ; \frac{dN(\lambda)}{N} = f(\lambda) d\lambda = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{\lambda}{\bar{\lambda}}} d\lambda ;$$

$$\text{气体分子自由程介于 } 0 \sim \lambda \text{ 的概率} : P(\lambda) = 1 - e^{-\frac{\lambda}{\bar{\lambda}}};$$

4.2 输运过程的宏观规律

82. **非平衡态系统的基本特征**：在没有外界影响条件下，系统的各部分宏观性质会自发地发生变化，直到在系统中建立平衡态为止；
83. **热传导**：由于温度分布不均匀引起的能量由高温端向低温端传递的现象；
84. **粘滞现象(内摩擦现象)**：由于流体各部分宏观流动速度分布的不均匀引起流体相邻各部分之间在平行速度方向的交界面上互相施以力，力的作用使流动较慢的部分加速，使流动较快的部分减速的现象；
85. **扩散现象**：由于多元系统内任一组元的浓度分布的不均匀引起系统内该种组元的物质由浓度较大的部分向浓度较小的部分迁移的现象；
86. **热传导、粘滞现象和扩散现象统称输运现象**；
87. 描述系统状态的宏观量在空间的分布不随时间改变的输运过程称为**稳定的输运过程**，相应系统所处的状态称为**稳定态**；
88. **牛顿粘滞定律**： $\tau_{xy} = -\eta \left(\frac{dv}{dz} \right)$ ， η 称为**动力学粘滞系数**；

$$\text{动量传递} : dK = \tau_{xy} dS dt = -\eta \left(\frac{dv}{dz} \right) dS dt$$

89. 管道内流体**抛物线性速度分布**： $v(r) = \frac{p_1 - p_2}{4\eta L} (R^2 - r^2)$

$$\text{泊肃叶公式} : Q = \int_0^R v 2\pi r dr = \frac{\pi(p_1 - p_2)}{8\eta L} R^4$$

90. **傅里叶热传导定律**： $q = -\chi \left(\frac{dT}{dz} \right)$ ， χ 称为**导热系数或热导率**；

$$\text{热量传递} : dQ = q dS dt = -\chi \left(\frac{dT}{dz} \right) dS dt$$

91. **菲克扩散定律**： $J_\alpha = -D_{\alpha\beta} \left(\frac{dn_\alpha}{dz} \right)$ ， $D_{\alpha\beta}$ 称为**扩散系数**；

$$\text{扩散} : dN_\alpha = J_\alpha dS dt = -D_{\alpha\beta} \left(\frac{dn_\alpha}{dz} \right) dS dt$$

4.3 气体中输运现象的微观解释

92. 对气体中输运现象做微观解释的两个基本的出发点：

(1) 气体必须足够稀薄，满足条件 $(\Delta V)^{1/3} \gg \bar{\lambda} \gg d$ ；

(2) 局域平衡假设：宏观量梯度在平均自由程距离上产生的改变量较之宏观量本

身很小，即 $\bar{\lambda} \left| \frac{dT}{dz} \right| \ll T$ ， $\bar{\lambda} \left| \frac{dv_0}{dz} \right| \ll v_0$ ， $\bar{\lambda} \left| \frac{dn_\alpha}{dz} \right| \ll n_\alpha$ ；

93. **流的微观解释**： $dJ = -\frac{\alpha}{3} \left[\frac{d}{dz} (nq) \right] \bar{v} \bar{\lambda} dS dt$

94. **粘滞系数**： $\eta = \frac{\alpha}{3} mn \bar{v} \bar{\lambda} = \frac{\alpha}{3} \rho \bar{v} \bar{\lambda} = \frac{2\alpha}{3\sigma} \sqrt{\frac{mkT}{\pi}}$

95. **导热系数**： $\chi = \frac{\alpha}{3} mnc_v \bar{v} \bar{\lambda} = \frac{\alpha}{3} \rho c_v \bar{v} \bar{\lambda} = \frac{2\alpha c_v}{3\sigma} \sqrt{\frac{mkT}{\pi}}$

96. **扩散系数**： $D = \frac{\alpha}{3} \bar{v} \bar{\lambda} = \frac{2\alpha}{3p\sigma} \sqrt{\frac{(kT)^3}{\pi m}}$