

第一章 流體性質

Update: 2012/3/2

本章主要說明流體的特性，流體的性質，並介紹幾種基本的流場。
流體力學是探討流體如何運動的科學。

(1.1). 流體力學的應用

流體力學的應用非常廣泛，在工程上及科學上的應用非都十分普遍。

機械工程：航空，船舶，車輛，流體機械，燃燒機具。

土木工程：橋樑，河流，渠道，大樓。

化學工程：反應槽，管路輸送。

環境工程：大氣擴散，室內空氣品質，海洋污染。

醫學工程：血液循環，呼吸。

仿生工程：魚類游泳，鳥類飛翔。

海洋工程：海流，潮汐，港灣。

大氣物理：氣流，季節風，颱風。

地球物理：岩漿，地涵運動。

(1.2). 流體的特性

流體包括氣體與液體。

流體沒有固定形狀，可以隨意變形。

當外加壓力時，流體便會發生運動。

流體運動的方式受以下因素的影響：

- 流體的性質
- 流道的形狀
- 外加壓力的大小

(1.3). 流體的分類

因流體的性質不同，所造成不同的流動現象。

(1.3.1). 可壓縮流與不可壓縮流：因密度不同

可壓縮流：流體的密度受壓力影響。

例如：氣體，以空氣為代表。

25°C，1 atm，密度為 1.184 kg/m³

25°C，10 atm，密度為 0.1184 kg/m³

不可壓縮流：流體的密度不受壓力影響。

例如：液體，以水為代表。

25°C，1 atm，密度為 997.1 kg/m³

25°C，10 atm，密度為 997.5 kg/m³

(1.3.2). 黏性流與非黏性流：因黏度不同

黏性流：流體具有黏性，流體與壁面之間有摩擦力。

所有的流體都具有黏性，例如機油。

非黏性流：流體不具有黏性，理想的流體。

流體與壁面之間沒有摩擦力。

液態氦具超流體現象。

遠離壁面影響的區域，可假設非黏性流，例如高空大氣。

(1.3.3). 牛頓流與非牛頓流：因黏度不同

牛頓流：流體的應力與應變率成正比，例如水。

非牛頓流：流體的應力與應變率不成正比，例如油漆。

(1.3.4). 磁性流與非磁性流：因電荷不同

磁性流：流體中具有帶電粒子，可受磁場影響。

非磁性流：流體不帶電，不受磁場影響。

(1.3.5). 單相流與多相流：因成分不同

單相流：流體中只有單相，例如水或空氣。

多相流：流體包括兩種以上的相，例如水與水蒸氣(液氣二相)或空氣與微粒(氣固二相)或水與微粒(液固二相)。

(1.4). 流場的分類

相同的流體在不同環境中，所造成不同的流動現象。

(1.4.1). 內部流與外部流

內部流：流體流過物件內部。

例如：管流，流體在管內流動。

外部流：流體流過物件外部。

例如：平板流，流體在平板外流動。

(1.4.2). 強制流與自然流

強制流：以人為方式提供壓力或相對速度，所造成的流動。

例如：管流，風扇，船舶，飛機。

自然流：因重力或其他自然驅動力所造成的流動。

例如：風，火焰，自然冷卻。

(1.4.3). 一維流與多維流

一維流：流體速度變化主要在單一方向。

例如：內管流，平板流。

多維流：流體具有兩個方向以上的速度變化。

例如：凹槽流，外管流。

(1.4.4). 穩態流與非穩態流

穩態流：流體的速度不隨時間而改變。

例如：風扇。

非穩態流：流體的速度隨時間而改變。

例如：陣風。

(1.4.5). 層流與紊流

層流：流體的流動層次分明有序，黏滯力為主。

紊流：流體的流動混亂無序，慣性力為主。

雷諾數為層流與紊流的指標。

紊流的摩擦力較大，壓力降較高。

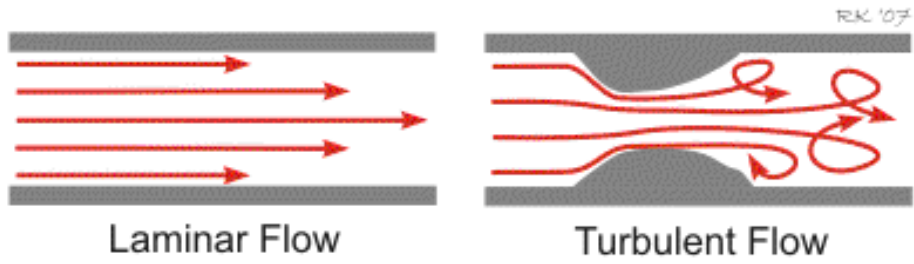


圖 1.4.1：層流與紊流

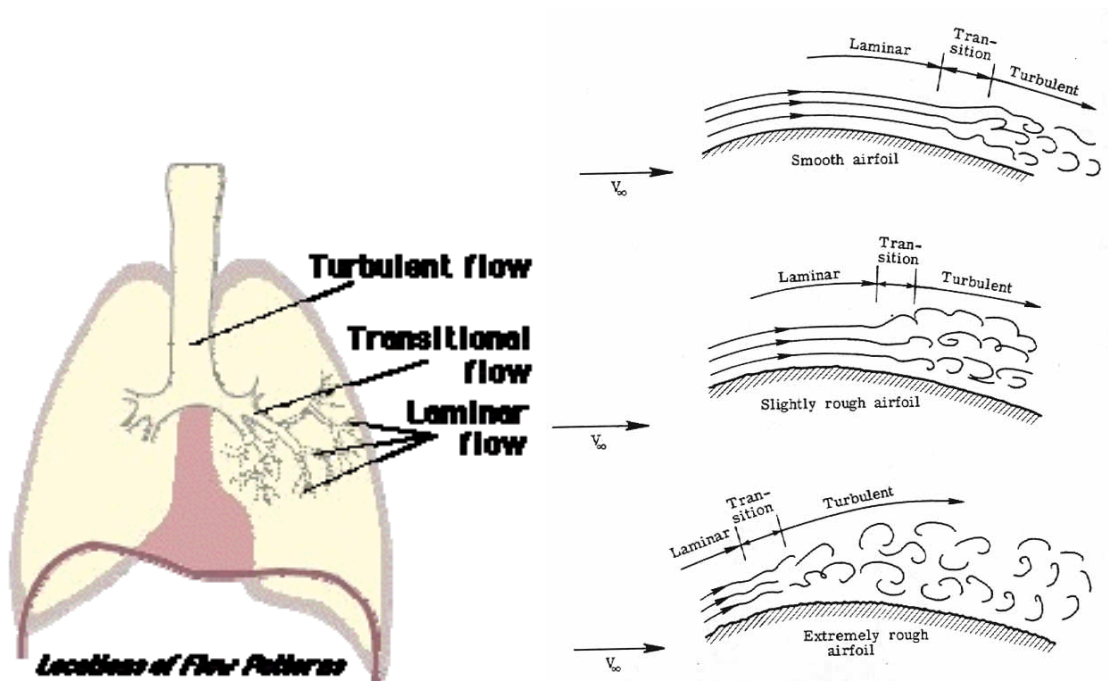


圖 1.4.2：肺部與氣管內的層流與紊流

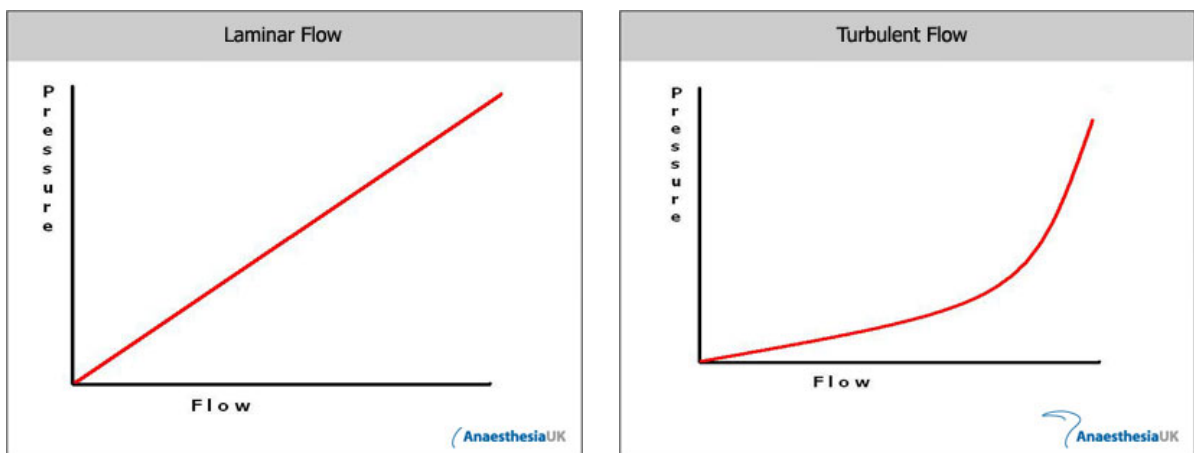


圖 1.4.3：紊流的摩擦力較大，壓力降較高。

(1.5). 流體的性質

(1.5.1). 黏度

黏度是流體流動性的指標，黏度越小，流體越容易流動。

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \text{ N/m}^2, \nu = \frac{\mu}{\rho}$$

黏度的單位：kg/m-s，centipoise

Kinematic Viscosity

1 centi Stoke (cSt) = 1 mm²/s.

Dynamic Viscosity

1 centi Poise (cP) = 10⁻³ Pascal second (Pa.s)

(1.5.1.1). 各種流體的黏度

黏度受溫度影響

水的黏度：0.86 cP@27°C； 0.43 cP@65°C，溫度上升，黏度減小。

$$\mu = a \times 10^{\frac{b}{T-c}}, \quad a = 2.414 \times 10^{-5} \text{ N/s-m}^2, \quad b = 247.8 \text{ K}, \quad c = 140 \text{ K}$$

空氣的黏度：0.0185 cP@27°C； 0.0267 cP@500 K，溫度上升，黏度增加。

$$\mu = \frac{aT^{0.5}}{1 + \frac{b}{T}}, \quad a = 1.458 \times 10^{-6} \text{ kg/m-s-K}^{0.5}, \quad b = 110.4 \text{ K}$$

表 1.5.1：各種流體的黏度

MATERIAL	VISCOSITY (cP)
Water	1 to 5
Blood	10
Ethylene Glycol	15
Motor Oil SAE10	50 to 100
Motor Oil SAE30	150 to 200
Motor Oil SAE40	250 to 500
Motor Oil SAE60	1,000 to 2,000
Honey	2,000 to 3,000
Molasses	5,000 to 10,000
Chocolate Syrup	10,000 to 25,000
Ketchup	50,000 to 70,000
Peanut Butter	150,000 to 250,000



$\mu = 1 \sim 5 \text{ cP}$



$\mu = 2000 \sim 3000 \text{ cP}$



$\mu = 150000 \sim 250000 \text{ cP}$

圖 1.5.2：各種流體的黏度

作業 1.1，請計算 10°C 水的黏度及 300°C 空氣的黏度。

SAE 機油黏度等級

SAE J 300 Effective June, 2001

SAE Viscosity Grade	Low Temperature Cold Cranking Viscosity ^A cPs, max. at °C	Low Temperature Pumping Viscosity ^B cPs, max. at °C	Kinematic Viscosity ^C cSt @ 100°C		High Temperature High Shear ^D Viscosity cPs @ 150°C, max.
			min.	max	
0 W	6,200 at -35	60,000 at -40	3.8	-	-
5 W	6,600 at -30	60,000 at -35	3.8	-	-
10 W	7,000 at -25	60,000 at -30	4.1	-	-
15 W	7,000 at -20	60,000 at -25	5.6	-	-
20 W	9,500 at -15	60,000 at -20	5.6	-	-
25 W	13,000 at -10	60,000 at -15	9.3	-	-
20	-	-	5.6	<9.3	2.6
30	-	-	9.3	<12.5	2.9
40	-	-	12.5	<16.3	2.9 ^E
40	-	-	12.5	<16.3	3.7 ^F
50	-	-	16.3	<21.9	3.7
60	-	-	21.9	<26.1	3.7

例如 10W60 的機油表示-25°C 時，機油黏度不可高於 7,000 cPs，而 100°C 時，機油黏度不可高於 26.1 cPs，不可低於 21.9 cPs，

(1.5.1.2). 牛頓流體與非牛頓流體

牛頓流體的黏度為固定值，應力與應變率成正比，一般的流體都是牛頓流體。非牛頓流體的應力與應變率的關係不是線性，其中膨脹性材料的黏性會隨著應變率增加而提高，擬塑性材料的黏性會隨著應變率增加而降低。

膨脹性材料(dilatant)的黏性會隨著應變率增加而提高，也就是流體的速度增加後，流體剪力提高更多，稱為剪力稠化(shear thickening)。玉米澱粉的水溶液即是一種膨脹性材料。

膨脹性流體可以應用在四輪傳動車的扭力耦合器上(torque converter)，當前輪與後輪的轉速相近時，流體的應變率低，黏性小，傳遞的扭力小。當路況不佳，車輪需要大扭力時，前輪與後輪的轉速相差大，流體的應變率大，黏性增加，傳遞的扭力變大。

另一種膨脹性流體的應用式防彈衣。當子彈或刀尖侵入時，由於變形集中，造成極高的應變率，使流體黏性增加，形成阻力，擋住子彈。但穿著在身上時，一般運動的應變率低，流體黏性小，不會造成行動阻礙。

擬塑性材料(pseudoplastic)的黏性會隨著應變率增加而降低，也就是流體的速度增加後，流體的剪力並不會成比例提高，稱為剪力薄化(shear thinning)。番茄醬即是一種擬塑性材料，使用前搖一搖可以使番茄醬的黏性降低，容易倒出來。此外，血液，油漆，指甲油也都是擬塑性材料。

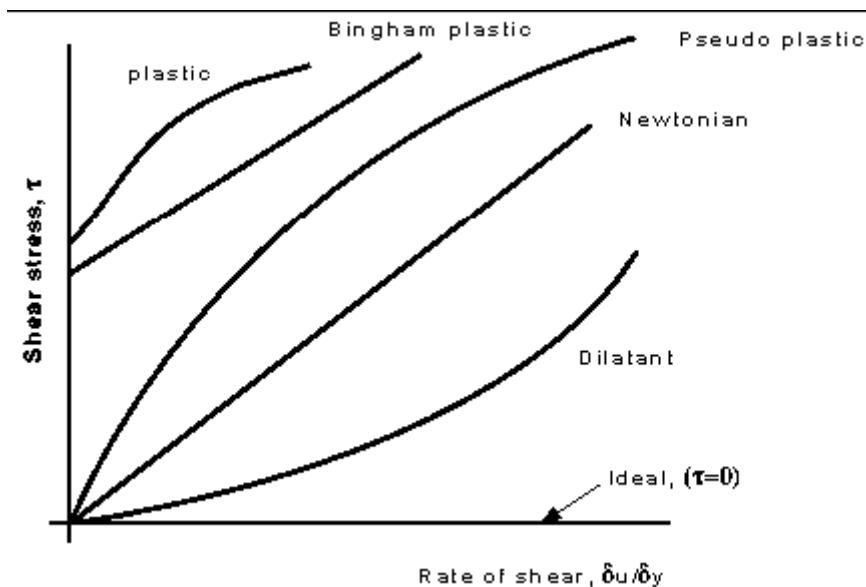


圖 1.5.2：牛頓流與非牛頓流

血液是擬塑性流體，應變率主要是影響紅血球的聚集與變形，而血液黏度與紅血球聚集和變形密切相關。在低應變率時，紅血球易於發生聚集，血黏度增高。而在高應變率時，紅血球聚集被沖開，又處於分散狀態，血黏度降低。

指數定律流體(Power-law fluid)：

$$\tau = K \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n$$

$$\mu = K \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^{n-1}$$

膨脹性流體， $n > 1$

牛頓流體， $n = 1$

擬塑性流體， $n < 1$

血液的組成

血液為不透明紅色液體，內含紅血球、白血球，及血小板三種成分，紅血球比例最高，約佔 45% 體積，濃度約為每 cm^3 血液中有 $4 \sim 6 \times 10^6$ 個。白血球與血小板合計約佔 1% 體積，其中白血球濃度約為每 cm^3 血液中有 $4 \sim 6 \times 10^3$ 個。這些不同成分的血球可經由離心方法分開，其中上層為血漿約佔總血量的一半。紅血球沉澱在底部。

血液是非牛頓液體，黏度隨應變率而變化，應變率主要是影響紅血球的聚集與變形。在低應變率時，血液接近於不流動時，則紅血球聚集體容易出現，造成液體內摩擦阻力增加，黏度則增高。在高應變率時，流速增加，紅血球聚集被沖開，又處於分散狀態，使流動的內摩擦阻力降低，故黏度低。

(1.5.2). 密度

$$\rho = \frac{m}{V}, \text{ 密度(kg/m}^3\text{)}; \nu = \frac{V}{m}, \text{ 比容(m}^3\text{/kg)}。$$

(1.5.2.1). 氣體密度

$$\rho = \frac{P}{RT}, \text{ 與壓力及溫度有關。}$$

空氣密度 $\rho = 101.3/0.287/298 = 1.184 \text{ kg/m}^3 @ 101.3\text{kPa}, 298\text{K}$

氫氣密度 $\rho = 101.3/4.157/298 = 0.0818 \text{ kg/m}^3 @ 101.3 \text{ kPa}, 298\text{K}$

LPG 密度 $\rho = 101.3/0.189/298 = 1.799 \text{ kg/m}^3 @ 101.3 \text{ kPa}, 298\text{K}$

氫氣洩漏會往上升，積聚在屋頂。LPG 洩漏會往下沉，積聚在地板。

(1.5.2.1). 液体密度

水的密度： $1000 \text{ kg/m}^3, @ 4^\circ\text{C}, 958 \text{ kg/m}^3, @ 100^\circ\text{C}$

液體的密度與壓力及溫度有關。

$$\text{密度與溫度的關係： } \rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta(T - T_0)}$$

$\beta = \text{volumetric temperature expansion coefficient (m}^3\text{/m}^3\text{ }^\circ\text{C)}$

- water : $0.88 \times 10^{-4} \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{ }^\circ\text{C)}$
- ethyl alcohol : $110 \times 10^{-5} \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{ }^\circ\text{C)}$
- oil : $63.3 \times 10^{-5} \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{ }^\circ\text{C)}$

溫度越高，密度越小。

$$\text{密度與壓力的關係： } \rho = \frac{\rho_0}{1 - (P - P_0)/\kappa}$$

κ : 壓縮模數 Bulk Modulus，流體可壓縮性的指標。

$$\kappa_T = -\frac{1}{\nu} \left(\frac{\partial \nu}{\partial P} \right)_T, \text{ 等溫壓縮。}$$

$$\kappa_s = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_s, \text{ 絕熱壓縮。}$$

壓力越高，密度越大。

表 1.5.1 各種流體的壓縮模數

Bulk Modulus - κ	SI Units (Pa, N/m ²) x 10 ⁹
Carbon Tetrachloride	1.32
Ethyl Alcohol	1.06
Gasoline	1.3
Glycerin	4.52
Mercury	2.85
SAE 30 Oil	1.5
Seawater	2.34
Water	2.15

液體的密度與壓力及溫度的關係：
$$\rho = \frac{\rho_0}{[1 + \beta(T - T_0)][1 - (P - P_0)/\kappa]}$$

水的密度：

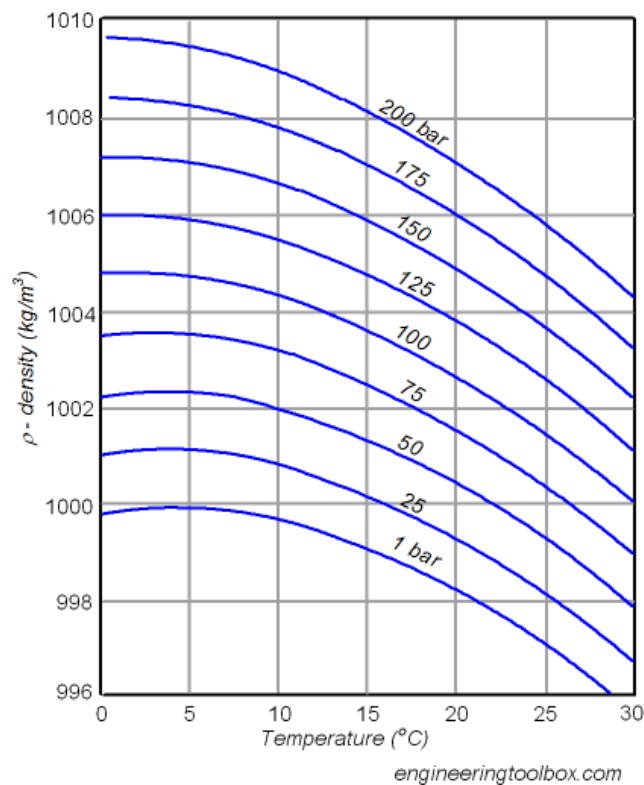


圖 1.5.3：水的密度

(1.5.3). 熱學性質

(1.5.3.1). 熱傳導係數

$$\dot{q}'' = -k \frac{\partial T}{\partial x}$$

熱傳導係數是流體傳熱性的指標，熱傳導係數越大，流體越容易傳熱。

熱傳導係數的單位：W/m-K

水與空氣的熱傳導係數都不大，算是絕緣體。

熱傳導係數受溫度影響。

水的熱傳導係數：0.614 W/m-K @27°C

0.659 W/m-K @65°C

空氣的熱傳導係數：0.02624 W/m-K @27°C

0.04038 W/m-K @500 K

空氣的熱傳導係數與溫度有關： $k = k_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{0.85}$

(1.5.4.2). 比熱

$$\dot{Q} = mc \frac{dT}{dt}$$

比熱是流體吸熱能力的指標，比熱越大，流體可吸收的熱量越多。

比熱的單位：kJ/kg-K

氣體的比熱可分為等壓比熱(c_p)及等容比熱(c_v)兩種。

空氣的等壓比熱：1.006 kJ/kg-K；等容比熱：0.7475 kJ/kg-K

比熱比：等壓比熱與等容比熱的比值

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1.4$$

液體的只有一種，沒有區分等壓比熱及等容比熱。

水的比熱：4.179 kJ/kg-K

比熱受溫度影響

水的比熱：4.179 kJ/kg-K @27°C； 4.183 kJ/kg-K @65°C

空氣的比熱：1.006 kJ/kg-K @27°C； 1.030 kJ/kg-K @500 K

Gases		Cp	Cv	k
Acetylene	C_2H_2	1.69	1.37	1.232
Air		1.01	0.718	1.40
Alcohol	C_2H_5OH	1.88	1.67	1.13
Alcohol	CH_3OH	1.93	1.53	1.26
Ammonia	NH_3	2.19	1.66	1.31
Argon	Ar	0.520	0.312	1.667
Benzene	C_6H_6	1.09	0.99	1.12
Blast furnace gas		1.03	0.73	1.41
Bromine		0.25	0.2	1.28
Butadiene				1.12
Butane	C_4H_{10}	1.67	1.53	1.094
Carbon dioxide	CO_2	0.844	0.655	1.289
Carbon monoxide	CO	1.02	0.72	1.40
Chlorine	Cl_2	0.48	0.36	1.34
Chloroform		0.63	0.55	1.15
Ethane	C_2H_6	1.75	1.48	1.187
Ether		2.01	1.95	1.03
Ethylene	C_2H_4	1.53	1.23	1.240
Freon 22				1.18
Helium	He	5.19	3.12	1.667
Hexane				1.06
Hydrogen	H_2	14.32	10.16	1.405
Hydrogen Chloride	HCl	0.8	0.57	1.41
Hydrogen Sulfide	H_2S			1.32
Hydroxyl	OH	1.76	1.27	1.384
Methane	CH_4	2.22	1.70	1.304
Methyl Chloride	CH_3Cl			1.20
Natural Gas		2.34	1.85	1.27
Neon		1.03	0.618	1.667
Nitric Oxide	NO	0.995	0.718	1.386
Nitrogen	N_2	1.04	0.743	1.400
Nitrogen tetroxide		4.69	4.6	1.02
Nitrous oxide	N_2O	0.88	0.69	1.27
Oxygen	O_2	0.919	0.659	1.395
Pentane				1.07
Propane	C_3H_8	1.67	1.48	1.127
Propene (propylene)	C_3H_6	1.5	1.31	1.15
Water Vapor Steam 1 psia. 120 – 600 °F		1.93	1.46	1.32
Sulfur dioxide	SO_2	0.64	0.51	1.29

(1.5.3.3). 熱擴散係數

$$\alpha = \frac{k}{\rho c}$$

熱擴散係數是吸熱能力，傳熱能力的綜合指標。

熱擴散係數的單位：m²/sec

水的熱擴散係數：1.47×10⁻⁷ m²/sec @27°C

空氣的熱擴散係數： 2.2×10⁻⁵ m²/sec@ 27°C

(1.5.4). 無因次化參數

多相流體性質的組合，無因次化，沒有單位，用來表示流體或流場的特性

(1.5.5.1). Prandtl number

$$\text{Prandtl number: } Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\text{momentum_diffusion}}{\text{energy_diffusion}}$$

水的 Prandtl number：5.85 @27°C； 2.73 @65°C

空氣的 Prandtl number：0.708 @27°C；0.680 @500 K

(1.5.5.2). 雷諾數

$$Re = \frac{\rho l u}{\mu} = \frac{\rho u^2}{\mu \frac{u}{l}} = \frac{\text{inertia_force}}{\text{viscous_force}}$$

雷諾數低為層流，雷諾數高為紊流。

內管流，Re<2000 為層流， Re>2300 為紊流。

例，有一圓管，直徑為 1 cm，其內有水流動，流速為 1 m/sec，請計算雷諾數，並計算層流的流速。

(1.5.4.3). Nusselt number

$$Nu = \frac{hd}{k}$$

用來計算熱傳係數。

$$h = Nu \frac{k}{d}$$