

探討溶質、溫度、濃度對於 液體表面張力之影響 國中組物理第一名

台北市新興國民中學

作者：陳英杰

指導老師：鄭謙吉 詹賢明

一、緒言 Introduction

凡作用於液體表面，使液體表面積縮小的力，稱為液體表面張力 (liquid surface tension)，因液面上部蒸氣或空氣分子不如液體內之分子密，故內部分子力 (inter molecular force) 較大，使分子有走向液體內部的趨勢，因此液體表面常生面積縮小之張力。表面張力之測量，應在受檢液體與其自身所蒸發之蒸氣達到平衡狀態時，但 Renard Ferguson 等氏之研究發現：受檢液體若為水或水溶液時，實驗誤差為 0.2 % 左右，可忽略之。

液體表面張力以 dyne/cm 、 erg/cm^2 兩單位表示，亦即顯示液體單位表面積所具有之能量，影響此值之因素以溫度，溶質為重要，但溶質涉及濃度，吾人一併列入研究範圍，由研究的結論得到溫度升高表面張力降低，又分子量大的，表面張力下降顯著，部分溶質能增加表面張力，經分析發現溶質的加入與陰、陽離子有關。

二、材料 Material

1. 化學藥品：〔實驗組〕

蔗糖 ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$) 食鹽 (NaCl) 氫氧化鈉 (NaOH) 硫酸銅 [無水物] (CuSO_4) 氯化鉀 (KCl) 乙醇 ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) 硫酸 (H_2SO_4) 碘化鉀 (KI) 尿素 (NH_2)₂ CO 氯化亞鈷 [水合物] ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 氯化銨 (NH_4Cl) 硫酸鋅 (Na_2CO_3) 氫氧化鉀 (KOH) 硝酸 (HNO_3) 酪酸 [$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COOH}$]

2. 純水 (H_2O) 〔對照組〕

三、方法 Method

1. 表面張力測定 a. 毛細管上昇法

毛細管用氫氧化鉀水溶液及水沖淨後，再以硝酸及水順序洗淨，最後用酒精沖洗並送風入管內乾燥之；復用毛細管裝入水銀，以移動顯微鏡 (Travelling microscope) [見附圖 I] 量出水銀在毛細管內長度，代入下式 I 算出毛細管半徑。

(1) 公式原理： $\because \ell = X_2 - X_1$

$$s = \pi r^2 \quad \therefore r = \sqrt{\frac{s}{\pi}}$$

$$\beta \ell s = m \quad \boxed{= \sqrt{\frac{m}{\pi \beta \ell}}} \quad \text{公式 I}$$

$$s = \frac{m}{\beta \ell}$$

註： β ：水銀密度

s ：毛細管之截面

r ：半徑

ℓ ：水銀長度

m ：水銀之質量

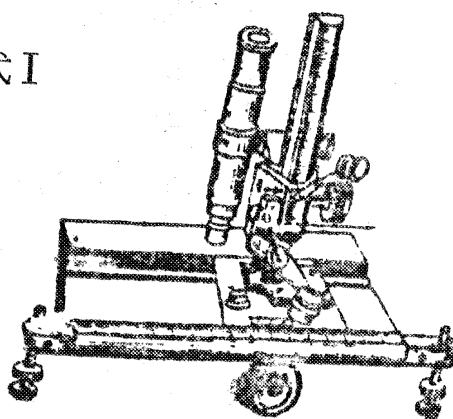


圖 I

然後以此毛細管觀察液體上升高度即可得到數據，再代下式

(2) 可得表面張力。

(2) 公式原理： $\because 2 \pi r_1 \gamma \cdot \cos \theta = \pi r_2^2 h d g$

$$\therefore \gamma = \frac{r_2^2 h d g}{2 r_1 \cos \theta}$$

當 $\theta = 0$ 即 $\cos \theta = 1$

$$\therefore \gamma = \frac{r_2^2 h d g}{2 r_1}$$

當毛細管半徑均勻視為 $r_1 = r_2 = r$

$$\therefore \gamma = \frac{r^2 h d g}{2 r_1} = \boxed{\frac{1}{2} r h d g} \quad \text{公式(2)}$$

註：h：毛細管內液體上昇高度 γ ：表面張力
d：液體密度
 θ ：管壁與液面所成之角度
g：重力加速度
r：毛細管半徑

2. 表面張力測定 b. 丢奴張力計 (Du Nouy Tensimeter) 法

先使丢奴張力計 (見附圖 II) 指針 E 歸零，然後將螺旋 F 放鬆：旋轉 (夾鋼絲之螺絲) 使 B 恰好要從 H 支台浮上之狀態，固定 F 點鋼絲，做為測定起始點，提起盛液之培養皿環 C 與液面相接觸，旋轉螺旋 D，環 C 即上昇，讀出 E 所指刻度，再利用下列公式(3)即得表面張力。

(3) 公式原理： \because 實驗中支持力 $F = 2 \cdot \left[2\pi \frac{(\gamma_1 + \gamma_2)}{2} \right] \cdot T$

$$+ dgh \cdot \pi [\gamma_2^2 - \gamma_1^2]$$

$$\text{即 } T = \frac{F}{2\pi(\gamma_1 + \gamma_2)}$$

$$- \frac{\pi(\gamma_2^2 - \gamma_1^2)dgh}{2\pi(\gamma_1 + \gamma_2)}$$

$$= \frac{F}{2\pi(\gamma_1 + \gamma_2)} - \frac{(\gamma_2 - \gamma_1)dgh}{2}$$

\because 上式第二項值甚小，若忽略則

$$T = \boxed{\frac{F}{2\pi(\gamma_1 + \gamma_2)}} \text{——公式(3)}$$

註：d：液體密度
h：膜之高度
g：重力加速度
 $\gamma_1 \gamma_2$ ：環 C 之內外半徑
T：表面張力

3. 表面張力測定 c. 直接測定法

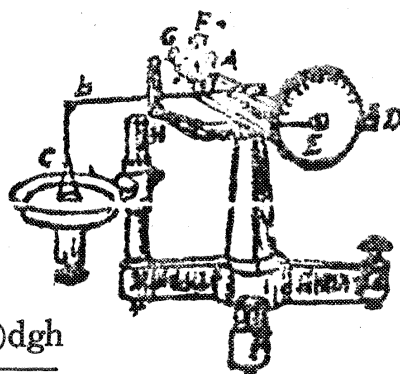


圖 II

(1) 掛一秤盤於附指示針之彈簧上，並掛於如圖Ⅱ之裝置，然後測出彈簧伸長量與質量之關係，並畫出關係圖。

(2) a. 取一金屬環，並利用游標尺 (Vernier)，測量內外半徑。

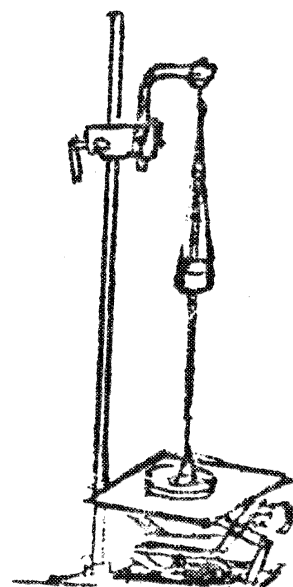
b. 用酒精洗淨金屬環，再以蒸餾水沖洗，並以濾紙拭乾。

c. 再用鑷子將此環掛於裝置之彈簧上，記錄此讀數 Y_1 。

d. 將試料液體置於平台上。先上昇平台，使金屬環與液面恰相接觸，後慢慢地下降平台至彈簧的最大伸長量，記錄此讀數 Y_2 ，並減去原長 Y_1 ，即得真正伸長量 ($\Delta Y = Y_2 - Y_1$)。

e. 由 [a] 部份所作之圖形，求作用於薄膜之力，再利用公式。

(3) 求表面張力。



圖Ⅱ

四、結果 Result

食鹽 [NaCl] 水溶液於不同溫度、濃度下之表面張力

溫度 [°C]	濃度 [$\frac{\text{mole}}{\text{l}}$]	由公式： $T = \frac{F}{2\pi(r_1+5)}$ 計算所得之 表面張力值 [$\frac{\text{dyne}}{\text{cm}}$]	溫度 [°C]	濃度 [$\frac{\text{mole}}{\text{l}}$]	由公式： $T = \frac{F}{2\pi(r_1+5)}$ 計算所得之 表面張力值 [$\frac{\text{dyne}}{\text{cm}}$]	溫度 [°C]	濃度 [$\frac{\text{mole}}{\text{l}}$]	由公式： $T = \frac{F}{2\pi(r_1+5)}$ 計算所得之 表面張力值 [$\frac{\text{dyne}}{\text{cm}}$]	溫度 [°C]	濃度 [$\frac{\text{mole}}{\text{l}}$]	由公式： $T = \frac{F}{2\pi(r_1+5)}$ 計算所得之 表面張力值 [$\frac{\text{dyne}}{\text{cm}}$]
20	0.1	81.30	40	0.1	75.28	60	0.1	71.06	80	0.1	65.64
	0.2	77.68		0.2	71.06		0.2	63.23		0.2	58.41
	0.3	77.99		0.3	71.36		0.3	63.83		0.3	61.43
	0.4	84.61		0.4	77.68		0.4	73.77		0.4	67.75
	0.5	85.21		0.5	79.19		0.5	74.37		0.5	71.36
	1.0	82.80		1.0	76.18		1.0	70.76		1.0	67.44
	1.5	79.79		1.5	71.06		1.5	61.73		1.5	55.10
	2.0	74.07		2.0	68.65		2.0	63.23		2.0	55.40

30	0.1	77.99	50	0.1	74.07	70	0.1	68.05	90	0.1	63.53
	0.2	71.36		0.2	64.44		0.2	60.82		0.2	60.22
	0.3	73.47		0.3	70.46		0.3	62.33		0.3	66.54
	0.4	79.49		0.4	75.58		0.4	72.87		0.4	67.30
	0.5	81.30		0.5	75.88		0.5	73.77		0.5	64.44
	1.0	77.38		1.0	72.26		1.0	69.10		1.0	53.90
	1.5	74.97		1.5	64.14		1.5	58.71		1.5	52.84
	2.0	71.06		2.0	66.24		2.0	60.22		2.0	

蔗糖 [$C_{12}H_{22}O_{11}$] 水溶液於不同溫度、濃度下之表面張力

溫度 [°C]	濃度 [$\frac{\text{mole}}{\text{l}}$]	由公式： $F = 2\pi(r_1+5)$ 計算所得之 表面張力值 [$\frac{\text{dyne}}{\text{cm}}$]	溫度 [°C]	濃度 [$\frac{\text{mole}}{\text{l}}$]	由公式： $F = 2\pi(r_1+5)$ 計算所得之 表面張力值 [$\frac{\text{dyne}}{\text{cm}}$]	溫度 [°C]	濃度 [$\frac{\text{mole}}{\text{l}}$]	由公式： $F = 2\pi(r_1+5)$ 計算所得之 表面張力值 [$\frac{\text{dyne}}{\text{cm}}$]	溫度 [°C]	濃度 [$\frac{\text{mole}}{\text{l}}$]	由公式： $F = 2\pi(r_1+5)$ 計算所得之 表面張力值 [$\frac{\text{dyne}}{\text{cm}}$]
20	0.1	79.49	40	0.1	71.12	60	0.1	58.41	80	0.1	53.05
	0.2	81.60		0.2	72.26		0.2	62.63		0.2	56.61
	0.3	82.80		0.3	72.86		0.3	64.44		0.3	58.41
	0.4	83.71		0.4	73.77		0.4	65.73		0.4	59.92
	0.5	83.77		0.5	74.67		0.5	64.74		0.5	60.22
	1.0	81.30		1.0	71.66		1.0	62.18		1.0	52.29
	1.5	74.07		1.5	71.65		1.5	61.36		1.5	52.99
	2.0	72.87		2.0	71.65		2.0	60.22		2.0	52.75
30	0.1	77.84	50	0.1	62.63	70	0.1	54.20	90	0.1	48.18
	0.2	77.84		0.2	64.50		0.2	58.72		0.2	56.01
	0.3	78.89		0.3	65.34		0.3	62.93		0.3	56.31
	0.4	80.39		0.4	66.24		0.4	64.14		0.4	56.55
	0.5	81.00		0.5	66.85		0.5	64.38		0.5	56.55
	1.0	79.55		1.0	64.50		1.0	56.31		1.0	51.19
	1.1	73.77		1.5	62.27		1.5	53.90		1.5	49.62
	2.0	71.66		2.0	61.67		2.0	53.05		2.0	49.23

氫氧化鈉 [NaOH] 水溶液於不同溫度、濃度下之表面張力

溫度 [°C]	濃度 [$\frac{\text{mole}}{\text{l}}$]	由公式： $T = \frac{F}{2\pi(r_1+5)}$ 計算所得之 表面張力值 [$\frac{\text{dyne}}{\text{cm}}$]	溫度 [°C]	濃度 [$\frac{\text{mole}}{\text{l}}$]	由公式： $T = \frac{F}{2\pi(r_1+5)}$ 計算所得之 表面張力值 [$\frac{\text{dyne}}{\text{cm}}$]	溫度 [°C]	濃度 [$\frac{\text{mole}}{\text{l}}$]	由公式： $T = \frac{F}{2\pi(r_1+5)}$ 計算所得之 表面張力值 [$\frac{\text{dyne}}{\text{cm}}$]	溫度 [°C]	濃度 [$\frac{\text{mole}}{\text{l}}$]	由公式： $T = \frac{F}{2\pi(r_1+5)}$ 計算所得之 表面張力值 [$\frac{\text{dyne}}{\text{cm}}$]
20	0.1	61.27	40	0.1	54.80	60	0.1	51.19	80	0.1	46.37
	0.2	74.13		0.2	66.24		0.2	61.73		0.2	58.41
	0.3	75.28		0.3	66.85		0.3	62.63		0.3	59.02
	0.4	75.88		0.4	69.25		0.4	65.34		0.4	60.22
	0.5	77.08		0.5	71.36		0.5	66.24		0.5	60.52
	1.0	77.84		1.0	72.57		1.0	67.45		1.0	64.74
	1.5	78.59		1.5	73.47		1.5	69.56		1.5	66.85
	2.0	79.49		2.0	75.94		2.0	72.26		2.0	67.75
30	0.1	60.22	50	0.1	52.99	70	0.1	49.44	90	0.1	37.95
	0.2	68.65		0.2	62.93		0.2	59.02		0.2	53.90
	0.3	69.56		0.3	65.94		0.3	61.43		0.3	54.80
	0.4	71.06		0.4	66.85		0.4	63.83		0.4	56.01
	0.5	72.57		0.5	67.45		0.5	65.10		0.5	57.21
	1.0	74.07		1.0	69.25		1.0	66.30		1.0	60.97
	1.5	75.27		1.5	71.12		1.5	67.45		1.5	64.14
	2.0	77.99		2.0	74.37		2.0	69.56		2.0	66.24

乙醇 [C₂H₅OH] 於不同濃度下之
結果室溫：20℃

張力計 濃度 [%]	次數				由公式計算 所得之表面 張力值 [$\frac{\text{dyen}}{\text{cm}}$]
	一	二	三	平均	
10	40°	40°	40°	40°	72.26
20	37°	37°	37°	37°	66.24
30	34°	34°	34°	34°	61.73
40	31°	31°	31°	31°	55.70
50	28°	28°	28°	28°	51.19
60	25°	25°	25°	25°	45.17
70	22°	22°	22°	22°	39.14
80	19°	19°	19°	19°	34.63
90	16°	16°	16°	16°	28.60

硫酸 [H₂SO₄] 於不同濃度下之
結果室溫 20℃

張力計 濃度 [$\frac{\text{mole}}{\text{l}}$]	次數				由公式計算 所得之表面 張力值 [$\frac{\text{dyen}}{\text{cm}}$]
	一	二	三	平均	
1.0	38°	38°	38°	38°	68.35
2.0	39°	39°	39°	39°	70.76
3.0	40°	40°	40°	40°	72.26
4.0	41°	41°	41°	41°	73.77
5.0	42°	42°	42°	42°	75.28
6.0	43°	43°	43°	43°	76.78
7.0	44°	44°	44°	44°	78.29
8.0	45°	45°	45°	45°	79.79
9.0	45°	45°	45°	45°	79.79
10.0	45°	45°	45°	45°	79.79

氯化鉀 [KCl] 水溶液於不同濃度
下之結果室溫：18℃

張力計 濃度 [$\frac{\text{mole}}{\text{cm}}$]	次數				由公式： $T = \frac{F}{2\pi(r_1+5)}$ 計算所得之 表面張力值 [$\frac{\text{dyne}}{\text{cm}}$]
	一	二	三	平均	
0.1	41°	41°	41°	41°	73.77
0.2	42°	42°	42°	42°	75.28
0.3	43°	43°	43°	43°	76.78
0.4	44°	44°	44°	44°	78.29
0.5	45°	45°	45°	45°	79.79
1.0	50°	50°	50°	50°	90.33
1.5	50°	50°	50°	50°	90.33
2.0	50°	50°	50°	50°	90.33

碘化鉀 [KI] 水溶液於不同濃度下
之結果室溫 18℃

張力計 濃度 [$\frac{\text{mole}}{\text{cm}}$]	次數				由公式： $T = \frac{F}{2\pi(r_1+5)}$ 計算所得之 表面張力值 [$\frac{\text{dyne}}{\text{cm}}$]
	一	二	三	平均	
0.1	49°	49°	49°	49°	88.83
0.2	50°	50°	50°	50°	90.33
0.3	51°	51°	51°	51°	91.84
0.4	52°	52°	52°	52°	93.34
0.5	53°	53°	53°	53°	94.85
1.0	58°	58°	58°	58°	103.88
1.5	63°	63°	63°	63°	112.91
2.0	63°	63°	63°	63°	112.91

硫酸銅 [CuSO_4] 水溶液於不同濃度下之結果

室溫：18 °C

張力計 濃度 [$\frac{\text{mole}}{\text{cm}}$]	次數 指 度				平均	由公式： $T = \frac{F}{2\pi(r_1 + r_2)}$ 計算所得之表面 張力值 [$\frac{\text{dyne}}{\text{cm}}$]
		一	二	三		
0.1		46°	46°	46°	46°	82.80
0.2		47°	47°	47°	47°	84.31
0.3		48°	48°	48°	48°	85.81
0.4		49°	49°	49°	49°	88.83
0.5		50°	50°	50°	50°	90.33
1.0		50°	50°	50°	50°	90.33
1.5		50°	50°	50°	50°	90.33
2.0		50°	50°	50°	50°	90.33

酪酸 [$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COOH}$]

之表面張力：室溫：20 °C

純水 [H_2O] 之表面張力

濃 度 [$\frac{\text{mole}}{\text{l}}$]	由公式： $T = \frac{F}{2\pi(r_1 + r_2)}$ 計算所得之表面 張力值 [$\frac{\text{dyne}}{\text{cm}}$]
0.1	60.72
0.2	54.78
0.3	48.30
0.4	42.87
0.5	38.27
1.0	33.52
1.5	29.62
2.0	27.43

溫 度 [°C]	由公式： $T = \frac{F}{2\pi(r_1 + r_2)}$ 計算所得之表面 張力值 [$\frac{\text{dyne}}{\text{cm}}$]
20	71.66
30	71.06
40	70.16
50	59.01
60	56.31
70	53.30
80	51.34
90	48.18

1. 溶質對於液體表面之影響

溶質的加入，對於原有溶劑的表面張力，有顯著的影響，我們以純水 20 °C 時的表面張力與其他水溶液作個比較來說明：

- (1) 20 °C 的 NaCl 水溶液及 $C_{12}H_{22}O_{11}$ 水溶液，表面張力值最小為濃度 2.0 M 時，比純水為大，因此純水中加入 NaCl 或 $C_{12}H_{22}O_{11}$ 後，表面張力將增加。
- (2) 20 °C 的 NaOH 水溶液，濃度 0.1 M 時之表面張力值比純水為小，但於濃度 0.2 M 時卻比純水為大，由此可說明：能使液體表面張力增加的溶質，也必須到達某一定的濃度，才能產生作用。
- (3) $CH_3(CH_2)_2COOH$ 水溶液於室溫 20 °C 下，表面張力值小於純水，並且相差甚多，足見純水溶入 $CH_3(CH_2)_2COOH$ ，表面張力必減少。這與 C_2H_5OH 所引起的效應相同。

以上幾點及其他實驗結果，可以告訴我們，溶質之加入，對於原有溶劑表面張力引起之效應，因溶質種類而異，在本實驗中，無機鹽類、多元醇、醣類等溶入純水時，對於純水之表面張力，有極大之影響，而且有機化合物（如醣類、酸類）溶於水中，即使水之表面張力有著明顯之抑低（如水與酒精、水與酪酸）。

2. 溫度對於液體表面張力之影響

在所有改變水溶液溫度的實驗中，有一個共同現象，那就是水溶液的表面張力隨溫度的上昇而遞減，也就是只要增加液體的溫度，即可使原有液體之表面張力減少。此外由 $C_{12}H_{22}O_{11}$ 水溶液於溫度 40 °C ~ 50 °C 的範圍內，表面張力因溫度昇高而急激地減少之現象，顯示液體在某一定的溫度範圍，如果繼續增加溫度，表面張力會迅速地減少。

3. 濃度與液體表面張力之關係

- (1) 有些水溶液的表面張力值隨著濃度的增加而加大；不過當到達某濃度時則達最大值。如本實驗中， H_2SO_4 水溶液在室

溫 20 °C，濃度 8.0 M，表面張力 79.79 dyne/cm 為最大值；KCl 水溶液於室溫 18 °C，濃度 1.0 M，表面張力 90.33 dyne/cm 為最大值；KI 水溶液於室溫 18 °C，濃度 1.5 M，表面張力 112.91 dyne/cm 為最大值；CuSO₄ 水溶液在室溫 18 °C，濃度 0.5 M，表面張力 90.33 dyne/cm 為最大值。

- (2) 有少數水溶液隨著濃度的遞增而逐漸減少表面張力，如 C₂H₅OH 水溶液與 CH₃(CH₂)₂COOH 水溶液屬於此類。
- (3) 大部分水溶液，其表面張力與濃度之間沒有一定的關係，即無一定的增加或減少之趨勢。
- (4) 極少數水溶液其表面張力不但因濃度加大而遞增；且於某濃度範圍內，有特別顯著的增加，如本實驗中，NaOH 水溶液於濃度 0.1 M ~ 0.2 M 之間，表面張力的增加有此現象。

五、討論 Discussion

1. 表面張力測定方法甚多，大至可分為靜態方法 (Static method) 及動態方法 (Dynamic method)，後者於理論上及實驗上均難，雖有許多研究，但仍不常用，因此本實驗均採靜態方法，因為此法溶質於液中以分子狀態分散存在，達到平衡時間甚短，或數秒即可，並且誤差甚小，除非溶液為親水膠質，溶膠狀態物質平衡時間長外，其餘靜態方法為最合宜實驗法。
2. 水中溶有離子所組成鹽類時，這些離子產生電力場，表面離子有被吸向液體內部的趨勢，因此增加溶液之表面張力。
3. 純水中加入酪酸之類的化合物時，由於吸附作用，純水的表面張力減少，而加入離子鹽類；表面張力增加，但是前者減少的量要比後者使表面張力增加的量。
4. 液體的表面張力隨溫度的上昇而遞減，是因為溫度上昇，分子的熱振動愈激烈，而減弱分子間相互拉引的內聚力的緣故。
5. 假若溶質有第二者存在，則表面張力值更為複雜，且與濃度成相關性的變更，即溶質多濃度大，其液體內部反應複雜，常使

表面張力值不穩定，實驗無法能夠預期達成。

6. 實驗結果發現，表面張力值因溫度普遍降低；Mar Leod 曾發現密度、溫度、表面張力有某種關係： $\gamma = C (d_e - d_v)^4$

[d_e : 液體密度， d_v : 液體平衡蒸氣密度， γ : 同溫下表面張力， C : 常數] 由 C 常數可說明：其值與溫度無關，所以張力值於臨界溫度 (critical temperature) 恒降低，但會合液體 (association liquid) 有遞增現象。

7. Ramsay—Shields 提出 $r \left(\frac{M}{d_e} \right)^{\frac{2}{3}} = k (T_c - T - \delta)$ 公式

(δ : 物質特有常數約 6， k : 液體無關常數約 2.12，

$r \left(\frac{M}{d_e} \right)^{\frac{2}{3}}$: Molecular surface energy， T : absolute temperature， T_c : critical temperature)

\therefore 對 Ramsay—Shields 式微分 $\therefore -\frac{M}{dT} \left[r \left(\frac{M}{d_e} \right)^{\frac{2}{3}} \right] = r$

發現 k 較正常值 2.12 小，因其有分子會合 (Molecular association) 的現象，亦是多分子聚成單分子增減張力之因。

六、參考文獻

1. 大學物理 (上册) 張桐生譯 臺灣中華書局
2. 中山自然科學大辭典 (第四册、第五册) 臺灣商務印書館
3. 那惠物理實驗指導 (第一册) 黃振麟譯 徐氏基金會
4. 物理大辭典 人文出版社
5. 物理實驗 陳龍英等 三民書局
6. 物理實驗大全 (上册) 方聲恒等譯 徐氏基金會
7. 國中物理 (第三册) 國立編譯館
8. 普通物理實驗 大學圖書出版社
9. Bamiels, J. Mathews and J. Willams:
Experimental Physical Chemistry. (1949)

10. Darison , Klooster and Bauer :
Laboratory Manual of Physical Chemistry. (1950)
11. Steinbach and V. King :
Physical Methods of Organic Chemistry. (1949)
12. G. L. Clark & G. G. Hawtey :
The Encyclopedia of Chemistry, 2 nd. (1966)

評語： 1. 實驗方法正確。
2. 資料的分析及圖表的製作中規中矩。
3. 具完整性。
4. 取材稍微偏深。