

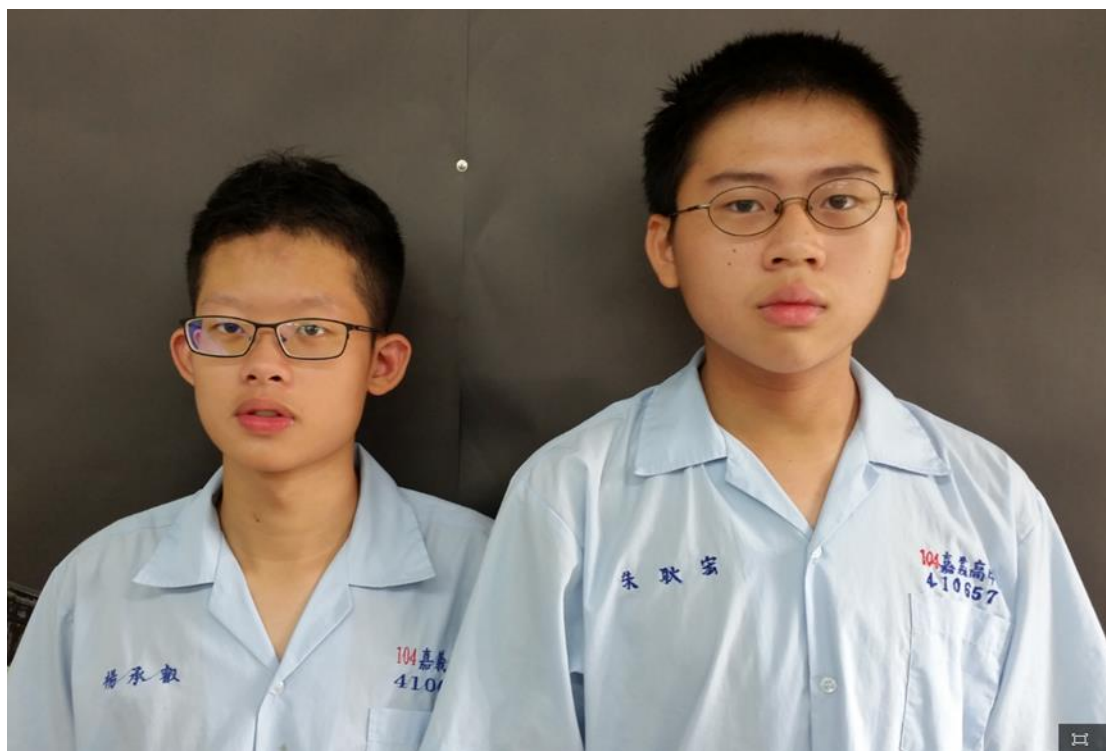
2017 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 160005
參展科別 物理與天文學
作品名稱 實驗探討奈米氣泡水溶液的物理性質
得獎獎項 大會獎：三等獎

就讀學校 國立嘉義高級中學
指導教師 李文堂、侯富議
作者姓名 楊承叡、朱耿宏

關鍵字 奈米氣泡、界面電位、表面張力

作者簡介



我們是楊承勳和朱耿宏，就讀嘉義高中二年級科學班。就讀科學班後，有幸在李文堂老師和侯富議老師的指導下，讓我們更進一步體會到物理世界的精深與奧妙，更激起我們對物理研究的熱忱。感謝國立中正大學提供雷射奈米粒徑界面電位儀讓我們做實驗。在實驗的過程中，我們不但克服了重重的困難，而且還要兼顧繁重的課業，這段歷程讓我們學習很多也成長了不少。

摘要

將氮、氧、二氧化碳等三種氣體，分別注入水中成為飽和水溶液，將氣體水溶液分裝入塑膠試管中，用超音波洗淨儀以 42kHz 的頻率振動，可形成奈米氣泡水溶液。利用奈米粒徑及界面電位量測儀測量氣泡的尺寸以及界面電位後，作實驗探討不同尺寸的奈米氣泡對水溶液的磁性、表面張力、折射率、黏滯係數、以及擴散係數等物理性質的影響。

實驗得知:(1)氮和二氧化碳的奈米氣泡的尺寸愈小，水溶液受到的磁力愈大，氧氣則相反。(2)三種氣體水溶液的表面張力都是奈米氣泡尺寸愈小，表面張力愈小。(3)三種氣體水溶液的折射率都是奈米氣泡尺寸愈小，折射率愈大。(4)三種氣體水溶液的黏滯係數都是奈米氣泡尺寸愈小，黏滯係數愈小，110nm 的二氧化碳奈米氣泡使水的黏滯係數降低 38.8%。(5)三種氣體水溶液都會阻止甘油在水中的擴散，使其擴散係數變小。

Abstract

Nanobubbles(NBs) present characteristics that make them unique compared to ordinary bubbles because they have negatively charged surfaces, large surface area per volume, and longer suspension time in liquids. The physical properties of NB aqueous solutions are different from ordinary gas aqueous solutions.

In this experiment, nitrogen, oxygen, and carbon dioxide were separately purged into distilled water until it becomes saturated. Second, the gas aqueous solutions were sonicated with a common ultrasonic sonicator found in high school laboratories through different time intervals to get different sizes of NBs in the aqueous solution. With the sonicator, we can obtain a dimension of 100nm in NBs. Lastly, zeta-potentials and the size of NBs were measured by using a nanoparticle potentiometer (Malvern Nano-ZS90).

There are five important physical properties of NBs in aqueous solution studied in this experiment: magnetism, surface tension, index of refraction, viscosity, and diffusion coefficient. Concerning magnetism, results found that the repulsive magnetic force in aqueous solutions is stronger when N₂ and CO₂ NBs are smaller, while the opposite is true with O₂ – the smaller the NBs, the weaker the magnetic force in the aqueous solution. This shows the phenomenon of size effect. Regarding surface tension, the surface tension decreases as the size of NB become smaller due to the effects of negatively charged surfaces. The index of refraction of the three types of NBs aqueous solution increases when the NBs become smaller because of the increase of electric susceptibility. In a controlled environment, CO₂, O₂, and N₂ have increased viscosity when NBs become smaller, with CO₂ increasing the most among these three types of gases. Last but not least, the diffusion coefficient between glycerol and the three experimental solutions with NBs decreases as the NBs shrink.

This method not only produces high yield and high stability NBs, but also performs a method in making nanometer-scale bubbles with low-cost equipment. Understanding the physical properties of NBs can greatly enhance innovations in medicine and the field of biochemistry.

一、前言

參觀 2016 年臺灣國際科學展覽，物理與天文科一等獎的作品：『高產率奈米泡泡製備及其尺寸效應之探討』〔1〕，引起我們對奈米氣泡水溶液的物理性質的研究興趣。奈米氣泡的大表面積比、表面帶負電、可以在溶液中停滯很長時間等等特性〔2, 3〕，使得奈米氣泡水溶液的物理性質異於一般氣泡水溶液。將氮、氧、二氧化碳等三種氣體，分別注入水中成為飽和水溶液，再用超音波震盪器高頻率振動，可形成奈米氣泡水溶液。實驗探討不同尺寸的奈米氣泡對水溶液的磁性、表面張力、折射率、黏滯係數、以及擴散係數等物理性質的影響。

二、研究方法或過程

(一)、奈米氣泡水溶液的製作

1.將蒸餾水置入燒杯中加熱脫氣(degassing)處理後，注入氮氣至飽和狀態。將飽和氣體水溶液分裝到 50 毫升的塑膠試管中，將試管口密封後，放入超音波洗淨儀內，以 42 kHz 的頻率振動 5 分後取出第一支試管，接著振動 10 分鐘後取出第二支試管，依此要領製作 6 管不振動時間的氮氣水溶液。

2.同樣的方法製作 6 管的氧氣水溶液，6 管的二氧化碳水溶液。

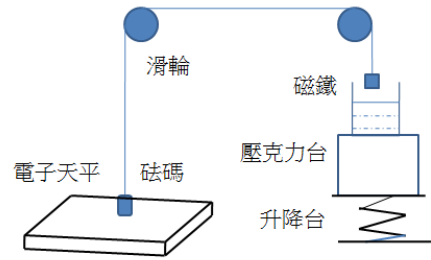
3.將氣泡水溶液用奈米粒徑及界面電位量測儀(Malvern, Nano-ZS90)測量氣泡的尺寸以及界面電位(Zeta potential)。



圖一:裝氣體水溶液的試管放置在超音波洗淨儀內振動，製成奈米氣泡水溶液。

(二)、測量奈米氣泡水溶液的磁性

- 1.圖二所示:將砝碼和磁鐵以細線相連，細線跨過滑輪，砝碼放在電子天平上，電子天平的讀數 m_1 。
將裝待測液的燒杯放在壓克力台上方，壓克力台放在升降台上方(壓克力台用來隔絕磁鐵和升降台間的磁力)，調整升降台的高度，到待測液面快要接到磁鐵時，電子天平的讀數 m_2 。

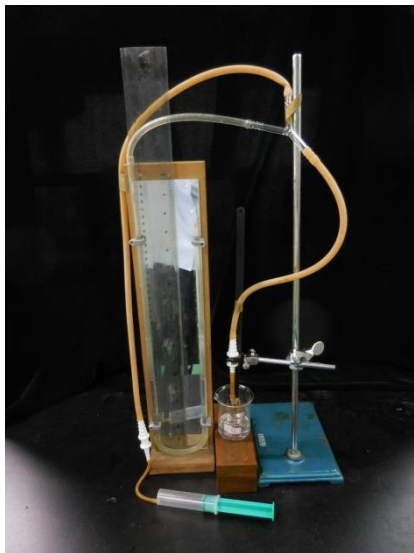


圖二:測量磁力的裝置。

2. 待測液受到磁鐵的磁力為: $F_m = (m_2 - m_1)g$

(三)、測量奈米氣泡水溶液的表面張力

- 1.圖三為測量液體表面張力的裝置:內半徑 $R=0.42\text{mm}$ 的毛細管和開管壓力計以及加壓用的注射筒以橡皮管相連，形成最大泡壓法測量表面張力的裝置〔4〕。
- 2.毛細管沒入待測液中深度 h ，由注射筒加壓到開管壓力計的兩側水面高度差 Δx 時，達到最大泡壓，由 $\Delta x = h + \frac{2\gamma}{R}$... (1)，可得到液體的表面張力 γ 。



圖三:測量表面張力的裝置。



圖四:測量折射率的裝置。

(四)、測量奈米氣泡水溶液的折射率

1.圖四所示為測量液體折射率的折射儀。

2.KEM Refractometer (RA-620/600)型，測量水的折射率=1.3325 五位有效數字。

(五)、測量奈米氣泡水溶液的黏滯係數

1.半徑 R 的圓筒(面積 A_1)，插入半徑 r 的毛細管(面積 A_2)，

泊斯利 (Poise) 定律， $\rho g y = \frac{8L\eta Q}{\pi r^4}$ ， L :毛細管長，

ρ :液體密度， $Q = \frac{dV}{dt}$ = 流量速率。

兩邊乘以 πR^2 ，加上微積分處理:

$$\pi R^2 \rho g h = -\frac{8L\eta R^2}{r^4} \frac{dV}{dt} \quad , \quad \text{令 } \lambda = \frac{\rho g r^4}{8L\eta R^2}$$

$$\int_0^t -\lambda dt = \int_{V_0}^V \frac{dV}{V} \quad , \quad V = V_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow \ln V = \ln V_0 - \lambda t \dots (2)$$

2.圓筒注入待測液體積 V_0 ，毛細管開始流出液體時，開始計時，記下十個液面高度 y 所需的時間 t ，作 $\ln V - t$ 圖，由圖形的斜率可求得液體的黏滯係數。

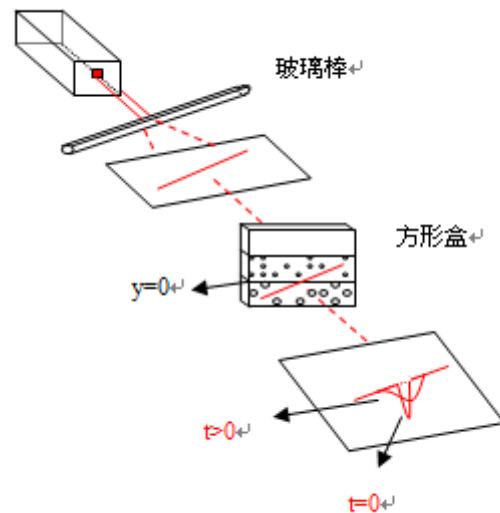


圖五:測量黏滯係數的裝置。

(六)、測量甘油水溶液的擴散係數

1.圖六所示:雷射光經玻璃棒折射後，成一條和鉛直線夾角 45° 的斜直線，經過待測液時，因待測液的折射率隨高度改變在屏上呈現鐘形曲線〔5〕。

2.寬度 a 的方形盒下層盛 60% 的甘油水溶液(折射率 n_1)，上層緩緩加入奈米氣泡水溶液(折射率 n_2)，經過時間 t 後，在距離容器 r 的屏上呈現的鐘形曲線，曲線最低點距離



圖六:測量擴散係數裝置

y 軸的高度 Z。

$$3. \frac{1}{Z^2} = \frac{4\pi D}{[(n_1 - n_2)ar]^2} t \dots (3) \quad \text{作 } \frac{1}{Z^2} - t \text{ 圖，由斜率可求出擴散係數 } D。$$

三、研究結果與討論

(一)、奈米氣泡水溶液的尺寸和界面電位

1. 奈米粒徑及界面電位儀的工作原理

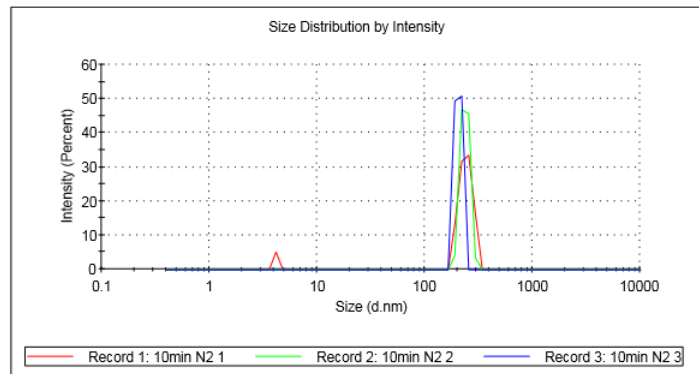
為:利用雷射光射入含有粒子的溶液中，當雷射光撞擊到粒子後會產生散射光，量測散射光隨時間的變化而計算出粒子之粒徑分佈。主要是由於粒子處於非絕對零度溶液中，本身具有動能而產生布朗運動

(Brownian motion)，此運動與粒子

的大小具有相關性。界面電位則是利用粒子因帶電性於外加電場中之泳動行為所造成光散射現象轉換成粒子之界面電位。

2.圖七為:飽和氮氣水溶液，經過超音波洗淨儀，以 42 kHz 的頻率振動 10 分鐘後，使用奈米粒徑及界面電位儀測量氮氣泡的尺寸，測量三次的平均值為 228nm。

3.表一至表三分別列出氮、氧、二氧化碳等三種飽和氣體水溶液經過超音波洗淨儀，以 42 kHz 的頻率振動 5 分、10 分、15 分…，使用奈米粒徑及界面電位儀測量氣泡的尺寸(d)，以及界面電位(V)的結果。另外，由參考資料查得飽和氣體水溶液的溶解度，可算出溶液中單位體積的氣泡數(N)。



圖七: 奈米粒徑及界面電位儀測量氮氣泡的尺寸，三次測量結果，平均值為 228nm。

表一:氣泡的尺寸(d)、界面電位(V)、淨電荷(Q)、氣泡密度(N)、

和洗淨儀振動時間(t)的關係(27°C，飽和氣體水溶液的溶解度:

每公斤的水含氮 0.00172 公克，氧 0.00385 公克，二氧化碳 0.1366 公克)

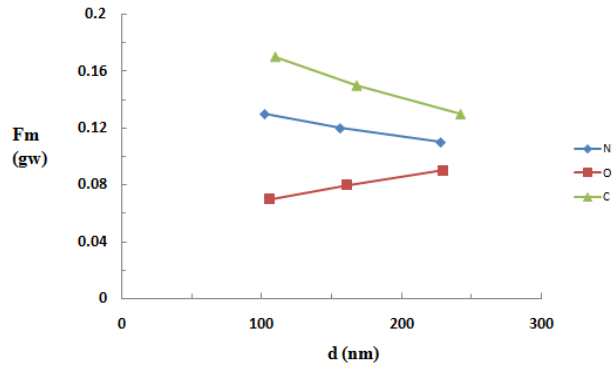
| | t (min) | 0 | 10 | 20 | 30 |
|-----------------|-----------------------------|------|-------|-------|-------|
| N ₂ | d (nm) | 1496 | 228 | 156 | 102 |
| | V (mV) | | -31.1 | -31.2 | -31.1 |
| | Q (ec) | | 4.9 | 3.4 | 2.2 |
| | N ($\times 10^{10} / ml$) | | 1.94 | 4.13 | 9.67 |
| O ₂ | d (nm) | 1623 | 230 | 161 | 106 |
| | V (mV) | | -34.1 | -34.1 | -34.2 |
| | Q (ec) | | 5.5 | 3.8 | 2.5 |
| | N ($\times 10^{10} / ml$) | | 3.68 | 7.51 | 17.3 |
| CO ₂ | d (nm) | 1728 | 242 | 168 | 110 |
| | V (mV) | | -24.7 | -26.4 | -27.0 |
| | Q (ec) | | 4.2 | 3.1 | 2.1 |
| | N ($\times 10^{10} / ml$) | | 95.0 | 197 | 460 |

4. 本實驗用的超音波洗淨儀，振動頻率 42 kHz，氣體受振動時間愈久，奈米氣泡的尺寸愈小。但是，依據 Young-Laplace equation 氣泡的內外部壓力差 $\Delta p = 2\gamma / R \dots (3)$ ， γ 及 R 分別為表面張力和氣泡半徑，半徑 102nm 的氮氣泡 Δp 高達 $2.76 \times 10^6 N / m^2$ 。要將這樣的氣泡振碎成更小的氣泡需要更高能量的超音波，本實驗用的超音波洗淨儀，只能製得最小尺寸 102 nm 的奈米氮氣泡。
5. 奈米氮氣泡和奈米氧氣氣泡的界面電位不隨氣泡尺寸大小改變。二氧化碳水溶液 pH 值小於 7，二氧化碳奈米氣泡的界面電位量值較大，氣泡尺寸愈小，溶液 pH 值愈低，奈米氣泡的界面電位量值愈大。
6. 由半徑 102nm 的氮氣泡 $\Delta p = 2.76 \times 10^6 N / m^2$ ，由理想氣體物態方程式 $pV = nRT$ ，以及氣體飽和水溶液的溶解度可以估算出溶液中單位體積的氣泡數(N)。例如:102nm 的奈米氮氣泡，

體積 $V = 5.56 \times 10^{-22} m^3$ ， $27^\circ C$ 下氣泡內的氮氣分子數 $6.35 \times 10^{-19} mol$ ，每公斤的水含氮氣 0.00172 公克，每毫升的氮氣水溶液含有奈米氮氣泡 9.67×10^{10} 個。

(二)、奈米氣泡水溶液所受的磁力

1. 圖八所示為氮、氧、二氧化碳三種氣體水溶液在 5000 高斯的銻鐵硼磁鐵作用下，水溶液受磁力隨著奈米氣泡尺寸的變化。



圖八:氮(N)氧(O)二氧化碳(C)水溶液受磁力(Fm)隨著奈米氣泡尺寸(d)的變化。

2. 物質至於外加磁場 H 中，物質磁化強度 M 會發生變化： $M = \chi_m H \dots (4)$

χ_m 為物質的磁化率。

表二:物質的磁化率

3. 氮、氧、二氧化碳三種氣體以及水的磁化率如表四所示，氮、二氧化碳以及水為反磁性，氧為順磁性。圖八中氮和二氧化碳的奈米氣泡

| | N ₂ | O ₂ | CO ₂ | H ₂ O |
|---------------------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|
| $\chi_m (\times 10^{-8})$ | -0.506 | 37.3 | -0.59 | -903.5 |

尺寸愈小，水溶液所受的磁鐵的磁力(斥力)愈大。氮和二氧化碳的磁化率相差不大，但是溶液中單位體積的奈米氣泡數二氧化碳約為氮的 47.6 倍(由表一和表三可看出)，所以二氧化碳水溶液所受的磁力比氧的水溶液大。

4. 氧為順磁性，奈米氧氣泡尺寸愈小，順磁性愈強，水溶液所受的磁鐵的磁力愈小。

(三)、奈米氣泡水溶液的表面張力

1. 圖九所示為氮、氧、二氧化碳三種氣體水溶液的表面張力(γ)隨著奈米氣泡尺寸(d)的變化。

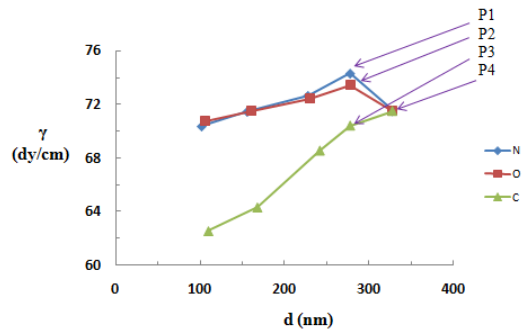
2. 水在 27°C 時水分子間的分子力(吸引力)形成的表面張力 $\gamma = 71.52 \text{ dy/cm}$ (圖九中的 P4 點)，

注入氮氣後表面張力增加為 73.42 dy/cm (圖九中的 P1 點)，但氣泡形成奈米氣泡後，氣泡間的排斥力使溶液的表面張力變小，奈米氣泡的尺寸

愈小粒子愈多，溶液中分子的排斥力愈大，溶液的表面張力愈小。

3. 氧氣水溶液的表面張力隨著奈米氣泡尺寸的變化和氮氣類似。

4. 水中注入二氧化碳後表面張力減為 70.42 dy/cm (圖九中的 P3 點)，奈米氣泡的尺寸愈小，溶液中分子的排斥力愈大，溶液的表面張力愈小，因單位體積的奈米氣泡數目多，溶液的表面張力減少許多。110 nm 的二氧化碳奈米氣泡水溶液， $\gamma = 62.55 \text{ dy/cm}$ ，比水少了 12.5%。



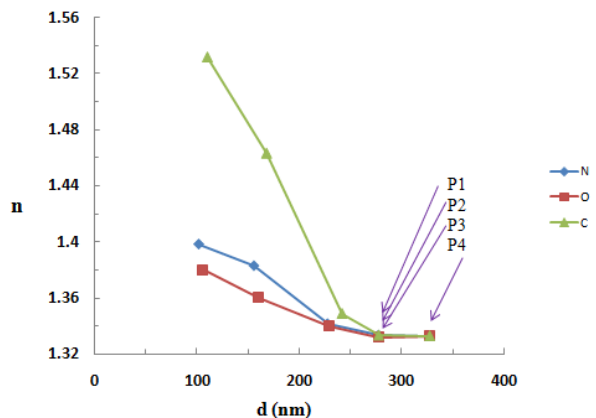
圖九: 氮(N)氧(O)二氧化碳(C)水溶液的表面張力(γ)隨著奈米氣泡尺寸(d)的變化。(P4 為水, P1、P2、P3 分別為水注入氮、氧、二氧化碳)

(四)、奈米氣泡水溶液的折射率

1. 圖十所示為氮、氧、二氧化碳三種氣體水溶液的折射率(n)隨著奈米氣泡尺寸(d)的變化。

$$2. n = \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{\epsilon_0\mu_0}} \dots (5) \mu_0, \epsilon_0 \text{ 分別為真空中的磁導率和電容率, } \mu, \epsilon \text{ 分別為介質的磁導率和電容率。}$$

反磁性的水中加入反磁性的氮及二氧化碳後溶液的磁導率 μ 值略增，形成奈米氣泡後，增加更多。加上奈米氣泡的電容率 ϵ 的加大，使得



圖十: 氮(N)氧(O)二氧化碳(C)水溶液的折射率(n)隨著奈米氣泡尺寸(d)的變化。(P4 為水, P1、P2、P3 分別為水注入氮、氧、二氧化碳)

溶液的折射率變大，奈米氣泡的尺寸愈小，溶液折射率愈大。110 nm 的二氧化碳奈米氣泡水溶液， $n=1.5324$ ，比水大了 15%。

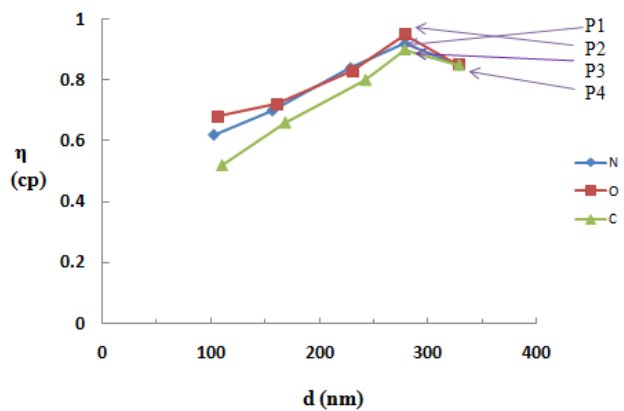
3.反磁性的水加入順磁性的氧氣後水溶液的 μ 值略減，奈米氧氣泡尺寸愈小 ϵ 值愈大，使得氧氣水溶液的折率先增減少再增大。

(五)、奈米氣泡水溶液的黏滯係數

1.圖十一所示為氮、氧、二氧化碳三種氣體水溶液的黏滯係數(η)隨著奈米氣泡尺寸(d)的變化。

2.水(27°C)的黏滯係數 0.85 cp，(圖十一中的 P4 點)注入氮氣後黏滯係數增為 0.92 cp(圖十一中的 P₁ 點)，奈米氣泡的尺寸愈小，溶液黏滯係數愈小。

3.氧氣以及二氧化碳水溶液的黏滯係數隨著奈米

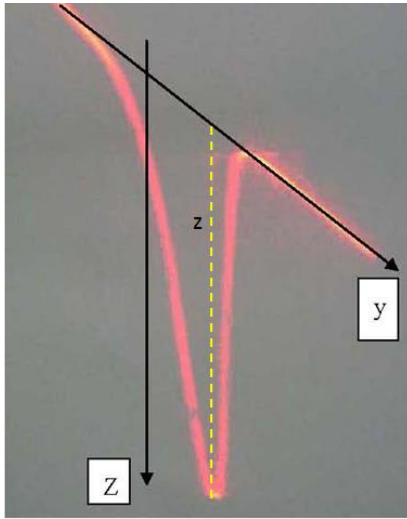


圖十一: 氮(N)氧(O)二氧化碳(C)水溶液的黏滯係數(η)隨著奈米氣泡尺寸(d)的變化。(P₄ 為水，P₁、P₂、P₃ 分別為水注入氮、氧、二氧化碳)

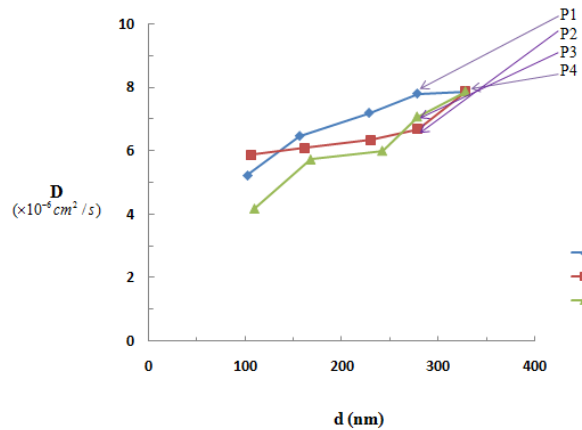
氣泡的尺寸變化和氮氣相似。110nm 的二氧化碳奈米氣泡水溶液的 $\eta = 0.52\text{cp}$ ，黏滯係數比水的 0.85 cp 減少了 38.8%。106 nm 的氧氣奈米氣泡水溶液 $\eta = 0.68\text{cp}$ ，黏滯係數比水的 0.85 cp 減少了 20%。

4.液體在管種流動時，液體分子和管壁分子的附著力，以及液體分子和液體分子間的內聚力這些相吸的分子力形成流動液體的黏滯力。液體中加入表面帶負電的奈米氣泡後，氣泡間的排斥力使得液體的黏滯力減少。

(六)、甘油水溶液的擴散係數



圖十二:甘油水溶液擴散後，鐘形曲線向右下方偏。



圖十三: 甘油水溶液擴散係數(D)隨著奈米氣泡尺寸(d)的變化。(P4 為水, P1、P2、P3 分別為水注入氮、氧、二氧化碳)

1. 60%的甘油水溶液放在容器(圖五的方形盒)的下層, 上層緩緩注入水後, 鐘形曲線的底端在 Z 軸上。如圖十二所示擴散 $t=600$ 秒後, 鐘形曲線向右下方偏, 曲線最低點到 y 軸的距離 $z=37.5$ 公分。量出不同的時間 t 所對應的 z ,

$$\text{由 } \frac{1}{Z^2} = \frac{4\pi D}{[(n_1 - n_2)ar]^2} t \dots (3) \quad \text{作 } \frac{1}{Z^2} - t \text{ 圖斜率求出 60\% 的甘油水溶液在水中的擴散係數}$$

$$D = 7.87 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 / \text{s} \text{。}$$

2. 圖十三為: 60%的甘油水溶液在奈米氣泡水溶液中擴散時的甘油擴散係數。奈米氣泡水溶液隨著奈米氣泡的尺寸變小, 勢障(potential barrier)變大, 阻礙甘油分子向上擴散。
3. 110nm 二氧化碳奈米氣泡的水溶液使甘油的擴散係數減少了 46.6%。

四、結論

本研究利用實驗室的既有設備--超音波洗淨儀製備出不同尺寸的奈米氣泡水溶液, 提供測量研究奈米尺寸的大小對水溶液的磁性、表面張力、折射率、黏滯係數、以及擴散係數等物理性質的影響。小尺寸的奈米氣泡會降低溶液的表面張力及黏滯係數, 阻止甘油在水中的擴散, 這些特性可應用到醫學及生化科學的領域上。

五、參考資料

1. 林柏翰:「高產率奈米泡泡製備及其尺寸效應之探討」, 2016 年臺灣國際科學展覽會歷屆參展作品物理與天文科。 www.ntsec.gov.tw
2. Emil Roduner, 2006 Size matters: why nanomaterials are different. *Chem. Soc. Rev.* **35**, 583-592
3. Kazunari Ohgaki, Nguyen Quoc Khanh, 2010 Physiochemical approach to nanobubble solutions, *Chemical Engineering Science*, **65**, 1296-1300
4. 吳岳霖、何宗諭、張育瑞 吳杰鴻:「毛細管測量液體表面張力的研究」, 第 35 屆中華民國中小學科學展覽會歷屆優勝作品高中物理科。 www.ntsec.gov.tw
5. 黃宇晟:「簡易方法測量擴散係數」2010 年臺灣國際科學展覽會歷屆參展作品物理與太空科學科。 www.ntsec.gov.tw

【評語】 160005

實驗延伸前去年 2、3 件作品，釐清實驗現象的物理機制，對實驗條件的推測也能有較佳精進，奈米氣泡的應用相當廣泛，或許可以再與奈米氣泡的應用之間作較多較深層探討。