多重网络增强的层状光子晶体水凝胶及应力变色响应

向双飞 李 婷 汪 洋 东为富*

(江南大学化学与材料工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 基于 PDGI/PAAm (PDGI/SN) 层状光子晶体水凝胶, 制备了多重网络 PDGI/PAAm-PAMPS-PAAm (PDGI/TN) 水凝胶, 将水凝胶浸入 6 : 4 (V/V) 乙醇水溶液中去溶胀, 记为凝胶 PDGI/TN-0.6。结果表明, 引入多重网络之后, PDGI/TN 凝胶的溶胀率从 PDGI/SN 的 $850\% \pm 45\%$ 提高到 $1070\% \pm 50\%$, 颜色从蓝色 ($\lambda_{\max} = 450 \text{ nm}$) 变为透明, 去溶胀后 Bragg 衍射峰为 670 nm, 实现凝胶的 Bragg 衍射峰在 450–670 nm 间调控。拉伸和压缩实验说明, PDGI/TN-0.6 力学性能优异, 拉伸强度和压缩强度分别达到 0.99 和 37.0 MPa。同时, PDGI/TN-0.6 具有优异应力变色响应性, 压缩应变 (ϵ_c) 从 0 增加到 0.5, Bragg 衍射峰发生蓝移, 响应范围覆盖可见光; 当撤去应力后, 立即恢复初始状态, 可重复多次。利用扫描电镜 (SEM) 进一步研究了层状光子晶体水凝胶层微观结构。

关键词: 层状结构; 光子晶体; 水凝胶; 机械变色

中图分类号: O648

A Lamellar Photonic Hydrogel Reinforced by Triple Network with Fast and Reversible Mechanochromic Properties

XIANG Shuang-Fei LI Ting WANG Yang DONG Wei-Fu*

(School of Chemical and Material Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu Province, P. R. China)

Abstract: The multi-network material PDGI/PAAm-PAMPS-PAAm (PDGI/TN) was synthesized, starting from PDGI/PAAm (PDGI/SN). The PDGI/TN was subsequently deswelled to an equilibrium state in an ethanol/water mixture (6 : 4) (V/V) to generate a material termed PDGI/TN-0.6. The results indicate that the swelling ratio of the PDGI/TN was increased to $1070\% \pm 50\%$, compared with a value of $850\% \pm 45\%$ for the original PDGI/SN. In addition, the color of the gel changed from blue ($\lambda_{\max} = 450 \text{ nm}$) to transparent and the Bragg diffraction peak transitioned to 670 nm. The Bragg diffraction peak could also be tuned over the range from 450 to 670 nm by adjusting triple network and the ethanol/water solution. Loading-unloading cycling in conjunction with tensile and compressive testing demonstrated that the PDGI/TN-0.6 possessed outstanding mechanical properties. The tensile and compressive stresses of PDGI/TN-0.6 were significantly improved from those of the initial PDGI/SN, to 0.99 and 37.0 MPa, respectively. Loading-unloading cycling data showed that the PDGI/TN-0.6 exhibited excellent responsiveness even after repeated trials. As compressive strain (ϵ_c) was increased from 0 to 0.5, the Bragg diffraction peak underwent a blue shift under compression and eventually spanned the entire visible spectrum wavelength range at the same rate that compressive deformation was applied and released. The effect of the triple network on the inner layer distance in this material was also investigated using scanning electron microscopy (SEM).

Key Words: Lamellar structure; Photonic hydrogel; Hydrogel; Mechanochromic

Received: March 21, 2016; Revised: May 9, 2016; Published on Web: May 12, 2016.

*Corresponding author. Email: wfdong@jiangnan.edu.cn; Tel: +86-510-85917763.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51373070).

国家自然科学基金(51373070)资助项目

© Editorial office of *Acta Physico-Chimica Sinica*

1 引言

响应性光子晶体水凝胶是将光子晶体引入到水凝胶中,得到能够对可见光产生Bragg衍射的材料¹⁻³,当光子晶体水凝胶在外界化学或者物理刺激下⁴⁻¹¹,其体积的变化导致水凝胶中的晶格间距发生变化,引起颜色变化,易于观察,在感应和检测等领域具有潜在的应用前景。

在适量十二烷基硫酸钠存在的条件下,可聚合表面活性剂十二烷基衣康酸甘油酯(DGI)可以在水中层层自组装形成双分子层,对可见光产生Bragg衍射,呈现出虹彩现象¹²。Haque等¹³首先成功地将十二烷基衣康酸甘油酯(DGI)引入到聚丙烯酰胺(PAAm)水凝胶中,聚合形成一维层层结构,制备得到具有机械响应性的PDGI/PAAm一维层状光子晶体水凝胶。PDGI/PAAm对压缩/拉伸具有颜色的响应,但响应及回复周期长达5–30 min。为了缩短PDGI/PAAm的响应及回复时间,Haque等¹⁴在PDGI/PAAm的基础上,引入PAAm第二网络,制备得到PDGI/PAAm²双网络光子晶体水凝胶,响应回复速度有所提高,但力学性能下降;后来,Yue等¹⁵通过对丙烯酰胺层水解,制备得到PDGI-h-PAAm,响应及回复周期明显缩短,但力学性能下降明显。

为了制备高强度水凝胶,Kaneko等¹⁶在双网络基础上,发展了三网络技术(TN):以聚2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)电解质为第一和第三网络,聚丙烯酰胺为第二网络,制备得到PAMPS/PAAm/PAMPS三网络水凝胶,在应变70%的情况下,压缩强度达到10 MPa。Argun等¹⁷制备得PAAm/PAAm/PAAm三网络水凝胶,压缩强度达到19 MPa。三网络技术是调控凝胶性能的有效手段。

本文基于PDGI/PAAm (PDGI/SN)层状光子晶体水凝胶,在PDGI层与层之间的PAAm层,引入三网络,制备得到多重网络光子晶体水凝胶PDGI/

PAAm-PAMPS-PAAm (PDGI/TN),并在6:4(*V/V*)乙醇水溶液中溶胀平衡,凝胶层间距的调控如示意图1所示。本文主要研究该凝胶的机械强度、力学响应性、响应及回复性能。

2 实验部分

2.1 主要试剂与仪器

十二烷基衣康酸甘油酯,根据文献报道,实验室自制¹²;2-羟基-4'-(2-羟乙氧基)-2-甲基苯丙酮(Irgacure2959),98%,萨恩化学技术(上海)有限公司;2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸,98%,上海晶纯生化科技股份有限公司;丙烯酰胺(AAm),分析纯,国药集团化学试剂有限公司;*N,N'*-亚甲基双丙烯酰胺(MBAA),99%,上海晶纯生化科技股份有限公司;十二烷基硫酸钠(SDS),95%,国药集团化学试剂有限公司。

紫外灯(365 nm, 175 W),苏州锐特玻璃机械有限公司。光纤光谱仪(FLA5000),杭州晶飞科技有限公司;数码相机(DSC-HX300),日本SONY公司。

2.2 PDGI/PAAm层状光子晶体水凝胶的制备

将得到的DGI根据其双亲性的特点,与水凝胶单体制成层状光子凝胶,具体过程如下:在水溶液中分别加入DGI、AAm、交联剂*N,N'*-亚甲基双丙烯酰胺(MBAA)、光引发剂Irgacure2959,浓度分别是:DGI为0.1 mol·L⁻¹,AAm为2 mol·L⁻¹,MBAA为1 mmol·L⁻¹,Irgacure2959为2 mmol·L⁻¹,同时加入0.01 g·L⁻¹的SDS,在55 °C下超声30 min至DGI形成稳定的双分子层,出现虹彩现象,55 °C恒温备用。采用内径为0.25 mm的注射器将溶液以5 cm·s⁻¹速率注入自制水凝胶模具中,模具尺寸:50 mm×80 mm×(0.5–2 mm),密封后,在50 °C下采用175 W紫外灯进行光引发聚合3 h。

示意图1 层状结构的调控

Scheme 1 Control of lamellar structure

DGI: dodecyl glyceryl itaconate; PDGI: poly(dodecyl glyceryl itaconate); PAAm: polyacrylamide; PAMPS: poly(2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid); TN: triple network

2.3 PDGI/TN-0.6层状光子晶体凝胶的制备

将PDGI/PAAm浸入含有 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的AMPS、 $0.04 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的MBAA以及 $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的Irgacure2959水溶液中溶胀平衡7 d, 然后用吸水纸吸干表面的溶液, 放入模具密闭, 采用功率为400 W紫外灯光照1 h, 制备得到PDGI/PAAm-PAMPS层状光子晶体水凝胶。再将PDGI/PAAm-PAMPS浸泡在含有 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的AAM、 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的MBAA及 $2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的Irgacure2959水溶液中溶胀平衡7 d。采用同样的方法, 去除表面的溶液, 之后采用功率为400 W紫外灯下1 h, 制备得到PDGI/PAAm-PAMPS-PAAm (PDGI/TN), 放入水中溶胀平衡, 去除残留单体。

将制备得到的PDGI/TN层状光子晶体水凝胶, 截取所需形状和大小, 放入6:4(V/V)乙醇水溶液中, 溶胀平衡36 h, 即得到PDGI/TN-0.6层状光子晶体凝胶。

2.4 溶胀/去溶胀

溶胀/去溶胀在本文中主要用于调节凝胶的层间距。首先用直径为10 mm的裁刀将凝胶裁成圆柱型。随后将其置于干燥箱里烘干至恒重, 再在去离子水中进行溶胀, 隔一定时间将其取出, 用滤纸擦干表面水滴, 进行称量。去溶胀过程是将在水中完全溶胀之后的凝胶, 用滤纸擦干表面水滴, 在6:4(V/V)乙醇水溶液中进行, 去溶胀至恒重, 进行称量。溶胀/去溶胀的平衡溶胀率(SR)由公式 $SR = (M_s - M_d)/M_d \times 100\%$ 计算而得, 其中 M_s 为平衡溶胀/去溶胀的重量, M_d 为相应干凝胶的重量。

2.5 Bragg衍射光谱分析

采用FLA5000微型光纤光谱仪, 对材料进行反射光谱的测定。具体的方法是取所要测试的光子凝胶, 放置于黑色底板上, 将其表面的水用滤纸吸干, 将探头放置在光子凝胶表面, 与待测光子水凝胶表面呈 90° , 进行测试, 得到Bragg衍射光谱图。

2.6 拉伸性能测试

在室温条件下, 采用万能测试机对其进行拉伸性能测试(试样尺寸 $50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times (2-3) \text{ mm}$ 哑铃型, 标距长度为15 mm, 内部宽度为4 mm, 拉伸速率为 $20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。记录实验测得的试样拉伸应变(ϵ_t)及对应的拉伸应力(σ_t)。

2.7 压缩性能测试

采用万能测试机对样品进行压缩力学性能测

试(试样尺寸直径6–8 mm圆柱型), 压缩速度为 $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。记录实验测得的试样压缩应变(ϵ_c)及对应的压缩应力(σ_c)。

2.8 扫描电镜

采用场发射扫描电子显微镜(日立S-4800, 加速电压10 kV)对其微观形貌进行研究。将样品冷冻干燥后, 在液氮中脆断, 喷金, 然后通过SEM对其断裂面进行观察。

3 结果与讨论

3.1 溶胀性能

图1为PDGI/SN和PDGI/TN水凝胶的溶胀曲线图。从图1中可以看出, 随着时间的增加, 溶胀率逐渐增大, 样品均在溶胀35 h之后达到溶胀平衡。PDGI/SN的水凝胶的平衡溶胀率为 $850\% \pm 45\%$, 当引入PAMPS阴离子网络后, PDGI/TN水凝胶的平衡溶胀率明显增加, 达到 $1070\% \pm 50\%$ 。图2A为PDGI/SN的数码照片, 呈现蓝色, 测得Bragg衍射峰 $\lambda_{\max} = 450 \text{ nm}$ 。当引入三重网络后, 凝胶呈透明状, 如图2B所示。这是由于三重网络的作用使得层间距增大造成的^[1]。将凝胶PDGI/TN放入6:4(V/V)乙醇水溶液中去溶胀, 由于PDGI/TN中水的渗透压高于乙醇溶液, PDGI/TN在乙醇

图1 PDGI/SN和PDGI/TN的溶胀曲线

Fig.1 Swelling curves of PDGI/SN and PDGI/TN

图2 (A) PDGI/SN, (B) PDGI/TN和(C) PDGI/TN-0.6的照片

Fig.2 Photographs of (A) PDGI/SN, (B) PDGI/TN, and (C) PDGI/TN-0.6

图3 (A) PDGI/TN-0.6在压缩过程中的Bragg衍射光谱图; (B)压缩过程中凝胶的数码照片
Fig.3 (A) Bragg diffraction spectra of PDGI/TN-0.6 under compression and (B) photographs of hydrogel under compression
 ϵ_c : compressive strain

水溶液中失水, 当渗透压平衡后, 溶胀率为 $19.8\% \pm 1.0\%$, Bragg 衍射峰 $\lambda_{\max} = 670 \text{ nm}$, 呈现红色。在互穿网络和乙醇水溶液的共同作用下, 层状光子凝胶的 Bragg 衍射波长可控, 可覆盖可见光区域, 与文献^{18,19}报道相似。

3.2 PDGI/TN-0.6对压应力的响应

图3是PDGI/TN-0.6在压缩过程中的衍射光谱图, 可以看出PDGI/TN-0.6光子水凝胶的压缩应变(ϵ_c)在0–0.5范围变化时, 在可见光范围内对压缩应力具有颜色响应变化, 衍射波长发生明显蓝移。PDGI/TN-0.6光子晶体水凝胶在未施加压缩应

图4 PDGI/SN, PDGI/SN-0.6, PDGI/TN和PDGI/TN-0.6的拉伸应力-应变图
Fig.4 Tensile stress-strain curves of PDGI/SN, PDGI/SN-0.6, PDGI/TN and PDGI/TN-0.6

力时 $\epsilon_c = 0$, $\lambda_{\max} = 670 \text{ nm}$ (红色)。当对其施加连续的压缩应力, 压缩应变从 $\epsilon_c = 0$ 增加到 $\epsilon_c = 0.5$ 的过程中, PDGI/TN-0.6做出连续响应, 当 $\epsilon_c = 0.5$ 时, $\lambda_{\max} = 460 \text{ nm}$ (蓝色)。这是由于在压缩过程中, 凝胶的层间距缩小, Bragg 衍射峰波长减小, 可见光波长向低波长移动, 在压缩过程实现了颜色响应。该响应范围为460–670 nm, 基本覆盖了可见光区域。

3.3 拉伸性能

表1列出了PDGI/SN, PDGI/SN-0.6, PDGI/TN和PDGI/TN-0.6光子水凝胶的拉伸性能数据。图4为PDGI/SN, PDGI/SN-0.6, PDGI/TN和PDGI/TN-0.6光子水凝胶的拉伸应力-应变曲线。从表1和图4中可见, PDGI/SN光子凝胶的拉伸强度为 $(74 \pm 2) \text{ kPa}$, 断裂伸长率为1198%。而PDGI/TN-0.6光子水凝胶的拉伸强度为 $(990 \pm 11) \text{ kPa}$, 比PDGI/SN提高了12倍, 但断裂伸长率降为637%。可见, 引入第三网络及在乙醇水溶液中去溶胀可使水凝胶的力学性能明显提高。

3.4 压缩性能

表2列出了PDGI/SN和PDGI/TN-0.6光子水凝

表1 PDGI/SN和PDGI/TN-0.6的拉伸性能
Table 1 Tensile properties of PDGI/SN and PDGI/TN-0.6

Sample	σ_f/kPa	$\epsilon_f/(\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1})$
PDGI/SN	74 ± 2	11.98 ± 0.79
PDGI/SN-0.6	231 ± 24	9.66 ± 0.72
PDGI/TN	405 ± 17	7.12 ± 0.43
PDGI/TN-0.6	990 ± 11	6.37 ± 0.80

σ_f and ϵ_f indicate the tensile fracture stress and fracture strain of hydrogel.

表2 PDGI/SN和PDGI/TN-0.6的压缩性能
Table 2 Compression properties of PDGI/SN and PDGI/TN-0.6

Sample	$\sigma_{c,0.9}/\text{MPa}$	$\sigma_{\text{fracture}}/\text{MPa}$	$\epsilon_{\text{fracture}}/(\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1})$
PDGI/SN	0.69 ± 0.2	2.56 ± 0.3	0.99
PDGI/TN-0.6	24.7 ± 1.9	37.0 ± 2.3	0.99 (no fracture)

$\sigma_{c,0.9}$ indicates the compressive stress of the hydrogel at a strain of 90%.
 σ_{fracture} and $\epsilon_{\text{fracture}}$ indicate fracture compressive stress and strain, respectively.

图5 PDGI/SN和PDGI/TN-0.6的压缩应力-应变曲线
Fig.5 Compressive stress-strain curves of PDGI/SN and PDGI/TN-0.6

胶的压缩性能, 图5为PDGI/SN和PDGI/TN-0.6光子水凝胶的压缩应力-应变曲线。从表2和图5中可见, 压缩应变为0.99时, PDGI/SN光子凝胶的压缩强度为2.56 MPa, 而PDGI/TN-0.6光子凝胶的压缩强度为37.0 MPa, 提高了14倍, 并且未发生破裂, 可见三重网络光子凝胶比单网络光子凝胶的压缩性能明显提高。这是由于凝胶中引入PAMPS刚性网络作为支撑, 提高其压缩强度, 而PAAm作为柔性网络耗散能量, 提高了PDGI/TN-0.6光子水凝胶的压缩强度。

3.5 重复应力变色

单网络水凝胶虽然能够对压缩应变进行瞬时响应, 然而响应后, 无法立即恢复到初始状态, 恢复响应的的时间大于10 min^[1]。对本研究的PDGI/TN-0.6施加压缩应力, 在 $\varepsilon_c = 0-0.5$ 范围内, 它能立即做出响应, 响应范围覆盖460-670 nm, 撤去压应力, 能瞬时恢复到初始的反射波长, 且具有

图6 重复加载-卸载压应力过程中PDGI/TN-0.6在压应变 $\varepsilon_c = 0$ 和 $\varepsilon_c = 0.5$ 时的Bragg衍射峰
Fig.6 Repeat of loading-unloading cycles of PDGI/TN-0.6 and Bragg diffraction peaks of PDGI/TN-0.6 at compress strain $\varepsilon_c = 0$ and $\varepsilon_c = 0.5$

图7 PAAm (A, a)和PDGI/SN (B, b)的扫描电镜图
Fig.7 Scanning electron microscopy (SEM) images of PAAm (A, a) and PDGI/SN (B, b)

优异的可重复性, 重复5次以上, 仍然具有很好的响应性, 如图6所示。这是由于在三网络的基础上, PDGI/SN光子水凝胶中引入PAMPS网络, 由于PAMPS吸水性强, 扩大了PDGI/SN中的PAAm凝胶层, 同时填入PAAm为中性网络, 这就极大地增加了光子水凝胶的强度和韧性, 因此, 当撤去外力后, 凝胶可瞬时恢复到初始状态。

3.6 扫描电镜(SEM)

图7(A, a)为纯丙烯酸水凝胶的SEM图, 将稳定后的DGI前驱液通过注射的方式, 注入模具, 紫外光引发聚合, DGI在注射过程中, 沿着注射方向进行取向, 同时改变了聚丙烯酰胺水凝胶的微观结构, 形成层层结构光子水凝胶。图7(B, b)组图为PDGI/PAAm水凝胶的SEM图, 宏观上呈现蓝色($\lambda_{\max} = 460$ nm), 图中的层间距约为 $d = 100-200$ nm。由此说明成功地制备了PDGI/SN光子晶体水凝胶。

4 结论

采用PDGI/PAAm (蓝色, $\lambda_{\max} = 450$ nm), 通过三重网络技术, 制备得到PDGI/PAAm-PAMPS-PAAm (PDGI/TN)层状光子晶体水凝胶, 在体积比为6:4乙醇水中去溶胀后, 得到PDGI/TN-0.6 (红色, $\lambda_{\max} = 670$ nm), 通过调节水凝胶的体积实现对层状光子晶体水凝胶Bragg衍射波长的调控。

与PDGI/SN单网络水凝胶相比, PDGI/TN-0.6的力学性能大幅提高, 拉伸强度和压缩强度分别由74 kPa和2.56 MPa提高到0.99和37.0 MPa。并且PDGI/TN-0.6能够对压缩应变 $\varepsilon_c = 0-0.5$ 做出响

应, 响应范围覆盖460–670 nm, 经过重复压缩-颜色响应测试, PDGI/TN-0.6能够对压力立即做出响应, 撤去应力, 立即恢复, 具有优异的压力变色响应性。

References

- (1) Hayakawa, M.; Onda, T.; Tanaka, T. *Langmuir* **1997**, *13* (14), 3595. doi: 10.1021/la970195x
- (2) Lee, K.; Asher, S. A. *J. Am. Chem. Soc.* **2000**, *122* (39), 9534. doi: 10.1021/ja002017n
- (3) Tsuji, S.; Kawaguchi, H. *Langmuir* **2005**, *21* (18), 8439. doi: 10.1021/la050271t
- (4) Lim, H. S.; Lee, J. H.; Walish, J. J. *ACS Nano* **2012**, *6* (10), 8933. doi: 10.1021/nn302949n
- (5) Yue, Y. F.; Haque, M. A.; Kurokawa, T. *Adv. Mater.* **2013**, *25* (22), 3106. doi: 10.1002/adma.201300775
- (6) Back, Y. B. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **2014**, *600* (1), 9. doi: 10.1080/15421406.2014.936341
- (7) Xu, X. L.; Friedman, G.; Humfeld, K. D. *Chem. Mater.* **2002**, *14* (3), 1249. doi: 10.1021/cm010811h
- (8) MacConaghy, K. I.; Geary, C. I.; Kaar, J. L. *J. Am. Chem. Soc.* **2014**, *136* (19), 6896. doi: 10.1021/ja5031062
- (9) Foulger, S. H.; Ping, J.; Lattam, A. C. *Langmuir* **2001**, *17* (19), 6023. doi: 10.1021/la010264e
- (10) Chen, M.; Guan, Y.; Zhang, Y. J. *Angew. Chem. Int. Edit.* **2013**, *52* (38), 10145. doi: 10.1002/ange.201302466
- (11) Chen, M.; Guan, Y.; Zhang, Y. J. *Angew. Chem. Int. Edit.* **2015**, *54* (32), 9257. doi: 10.1002/ange.201503004
- (12) Naitoh, K.; Ishii, Y.; Tsujii, K. *J. Phys. Chem.* **1991**, *95* (20), 7915. doi: 10.1021/j100173a066
- (13) Haque, M. A.; Kamita, G.; Kurokawa, T.; Tsujii, K.; Gong, J. P. *Adv. Mater.* **2010**, *22*, 5110. doi: 10.1002/adma.201002509
- (14) Haque, M. A.; Kurokawa, T.; Kamita, G. *Chem. Mater.* **2011**, *23* (23), 5200. doi: 10.1021/cm2021142
- (15) Yue, Y. F.; Kurokawa, T.; Haque, M. A. *Nat. Commun.* **2014**, *5* (5), 4659. doi: 10.1038/ncomms5659
- (16) Kaneko, D.; Gong, J. P.; Osada, Y. *Adv. Mater.* **2005**, *17* (5), 535. doi: 10.1002/adma.200400739
- (17) Argun, A.; Can, V.; Okay, O. *Macromolecules* **2014**, *47* (18), 6430. doi: 10.1021/ma5014176
- (18) Liu, S. R.; Yang, Z. K.; Chen, M. Q. *Acta Polym. Sin.* **2015**, No. 8, 957. [刘士荣, 杨兆昆, 陈明清. 高分子学报, **2015**, No. 8, 957]
- (19) Dong, J.; Cao, Y. X.; Qian, W. P. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2006**, *22* (9), 1090. [董健, 曹跃霞, 钱卫平. 物理化学学报, **2006**, *22* (9), 1090.] doi: 10.3866/PKU.WHXB20060911