

# 胶体晶体剪切模量的影响因素

秦艳铭<sup>1, 2</sup>, 周宏伟<sup>2</sup>, 徐升华<sup>2</sup>, 孙祉伟<sup>2</sup>

(1. 山东师范大学化学化工与材料科学学院, 济南 250014;  
2. 中国科学院力学研究所微重力重点实验室, 北京 100190)

**摘要** 利用自行搭建的扭转共振谱仪, 研究了不同粒子体系胶体晶体在不同体积分数下的剪切模量, 利用反射光谱测量了相应的晶体结构及内部孔洞等参数. 结果表明, 同一粒子体系的剪切模量均随体积分数的增加而增大; 而对于同样的粒子数密度, 不同粒子体系的剪切模量随体系内部孔洞所占比例增加呈增大趋势. 对实验结果的分析及与理论分析的对比表明, 决定胶体晶体剪切模量大小的主要因素是胶体晶体中粒子的最近邻间距, 从而统一解释了体积分数和内部孔洞对胶体晶体剪切模量的影响.

**关键词** 反射光谱; 扭转共振谱; 剪切模量; 最近邻间距; 孔洞

中图分类号 O648 文献标志码 A

剪切模量 (Shear modulus) 又称切变模量, 是表征材料抵抗切应变能力, 反映材料刚性的重要力学参数. 长久以来, 人们对于各种材料体系剪切模量的研究颇为关注, 如方解石悬浮液<sup>[1]</sup>、橡胶<sup>[2]</sup>、固体聚合物<sup>[3]</sup>及驱油聚合物<sup>[4]</sup>等. 另一方面, 受制备工艺和晶体生长过程中多种因素的影响, 在材料内部不可避免地存在种种缺陷, 如位错、点缺陷和线缺陷等, 这些缺陷对材料的性质有显著影响<sup>[5-9]</sup>.

不同类型的软物质体系<sup>[10-12]</sup>的研究受到广泛关注, 胶体晶体也是一种典型的软物质体系, 其在晶体结构(亚微米的胶体粒子自组装形成的三维有序结构)和相行为(液固相转变)方面与原子晶体非常相似, 所以被视为研究原子体系结构和相变规律的模型体系<sup>[13, 14]</sup>. 近年来的实验和计算机模拟研究表明, 胶体晶体内部往往存在孔洞<sup>[15-20]</sup>(类似于固体材料中的缺陷), 在孔洞中没有胶体粒子存在. 但孔洞引起的胶体晶体的缺陷对其性质影响的研究还很缺乏, 特别是关于国际上很受重视的胶体晶体的剪切模量的问题, 目前的研究主要是针对同样的胶体粒子来研究体积分数对剪切模量的影响<sup>[21-25]</sup>, 关于研究胶体晶体内部缺陷和胶体晶体剪切模量之间关系的报道还非常少.

之前的研究<sup>[26]</sup>发现, 仅仅改变粒子的体积分数, 并不能改变晶体内部孔洞部分所占的比例. 因此要研究孔洞对剪切模量的影响, 必须针对不同的粒子体系进行研究. 此外, 由于胶体晶体特殊的形成条件(低盐)、存在形式(溶液中)和比较低的粒子密度(胶体晶体的粒子密度约为  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , 原子固体的粒子密度约为  $10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ), 导致其剪切模量很小, 不容易准确测量. 国际上常采用扭转共振谱仪<sup>[27, 28]</sup>进行研究, 但这种仪器并没有商用化, 必须要自行搭建.

本文采用自行搭建的扭转共振谱仪测量胶体晶体的剪切模量, 结合反射光谱同步测量了胶体晶体的结构, 研究了体积分数和内部孔洞等因素对胶体晶体剪切模量的影响, 并解释了其影响机制.

## 1 实验部分

### 1.1 材料与仪器

实验中所用聚苯乙烯 (PS) 粒子由乳液聚合法合成, 通过改变合成过程中对苯乙烯磺酸钠、苯乙烯和过硫酸钾的比例, 得到不同性质的粒子. 粒子的平均有效粒径 (Eff. Dia.,  $D$ ) 分布和粒子多分散指数 (Polydispersity index, PDI) 均由动态光散射仪 (Brookhaven, BI-200SM, USA) 测得. 其中, 平均有效

收稿日期: 2014-10-29. 网络出版日期: 2015-01-09.

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 11302226, 11172302, 11032011) 资助.

联系人简介: 徐升华, 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事胶体晶体的结晶及胶体粒子聚集过程研究.

E-mail: xush@imech.ac.cn

粒径是指体系中粒子直径的平均值,反映了粒子的平均尺寸; PDI 是粒径的标准偏差与平均粒径的比值,反映了粒子大小的均匀程度. 测量结果表明,不同胶体粒子的粒径分布类似,基本上都是在平均有效粒径附近呈正态分布, PDI 均小于 0.08. 以编号 PS-6 的粒子为例,其动态光散射的测量结果见图 1. 由图 1 可以得到 PS-6 粒子的平均有效粒径为 90.2 nm, PDI 为 0.021,说明所用粒子大小均匀,具有良好的单分散性. 此外,不同胶体粒子的迁移有效电荷数( $Z_e$ )是由电导率-粒子数密度法<sup>[29]</sup>进行测量. 实验测得的不同粒子的平均有效粒径、多分散指数和迁移有效电荷数均列于表 1.

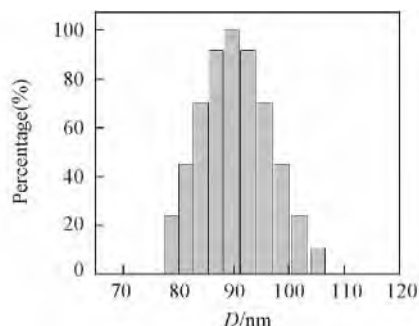


Fig.1 Proportion of diameter for PS-6

**Table 1 Parameters of the colloidal particles**

Particle	D/nm	$Z_e$	PDI	Particle	D/nm	$Z_e$	PDI
PS-1	105	796	0.08	PS-4	84	575	0.08
PS-2	104	770	0.05	PS-5	92	600	0.06
PS-3	100	980	0.05	PS-6	90	726	0.02

## 1.2 实验装置

实验装置由样品单元和测量单元两部分组成(图 2). 在样品单元中,用软管将样品管、储液池、离子交换树脂管 [G501-X8(D), Bio-Rad Laboratories, USA]和蠕动泵(L/S, Easy-load Masterflex Cole-Parmer)连接起来,形成一个去离子循环装置. 蠕动泵驱动样品溶液在管路中循环去离子,达到结晶条件后将溶液注入样品管开始结晶. 通过在储液池中加入水或者 PS 粒子溶液以调节胶体晶体的体积分数. 测量单元包含扭转共振谱仪和反射光谱仪(Avaspec-2048, Avantes, Netherlands). 在扭转共振谱仪工作时,将激光入射到样品管中的胶体晶体上,在满足布拉格衍射条件的位置形成光斑,当样品管转动时带动光斑发生周期性的振动,位置传感器(Position sensitive detector, PSD)则将光斑运动时产生的信号传入锁相放大器(Metek Signal Recovery-SR7230 DSP Lock-in Amplifier)中,经由计算机分析得到扭转共振谱图. 在反射光谱仪工作时,卤钨灯光源发出的白光经过一个 Y 型光纤传导后垂直照射到样品管上,由样品反射回来的光被检测器接收,经由计算机得到反射光谱图.

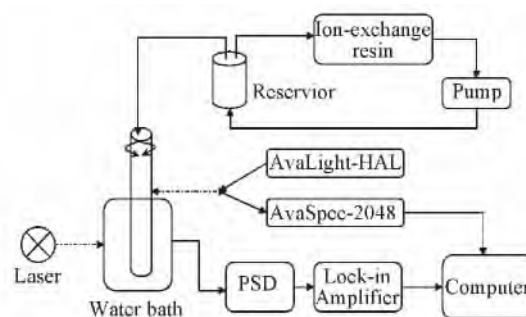


Fig.2 Sketch of the experimental setup

## 1.3 实验过程

在图 2 所示的储液池中加入一定量的去离子水和 PS 悬浮液,然后开启蠕动泵去离子,约 5 ~ 10 min 后将样品溶液导入样品管中,开启反射光谱仪和扭转共振谱仪. 通过测量反射光谱中反射峰的位置,根据文献[30 31]中反射光谱测量胶体晶体结构的原理和方法,得到晶体结构. 通过测量样品的共振频率,根据共振频率和剪切模量之间的关系<sup>[27 28]</sup>,求得胶体晶体的剪切模量. 对于每一个样品,剪切模量重复测量 3 次,取平均值.

## 2 结果与讨论

### 2.1 胶体晶体的结构

通过反射光谱可以直接得到波长和反射峰强度之间的关系,以 PS-5 样品为例,在体积分数为 0.6% 时测得反射光谱,通过  $q = (4\pi n/\lambda) \sin(\theta/2)$  将波长  $\lambda$  转化为波矢量  $q$ ,转化后的光谱图如图 3 所示. 这里的  $n$  为溶液的折射率,  $\theta$  为入射光与反射光之间的夹角( $180^\circ$ ). 图 3 中 4 个波峰对应的波矢

量分别为 18.54, 26.18, 31.94 和 36.72  $\mu\text{m}^{-1}$ , 它们之间的比值为  $\sqrt{2}:\sqrt{4}:\sqrt{6}:\sqrt{8}$ , 因此其晶体结构为体心立方结构(BCC), 4 个峰对应的衍射面分别为(110), (200), (211), (220). 对于表 1 中的胶体粒子, 在实验所测体积分数范围内, 胶体晶体均为 BCC 结构.

由反射光谱可以分析体系中是否存在孔洞. 首先, 胶体晶体中粒子的最近邻间距  $2D_{\text{exp}}$  可由反射光谱测量得到, 而通过理论可以计算均匀分布时的最近邻粒子间距  $2D_{\text{uni}}$ , 计算它们的比值  $2D_{\text{exp}}/2D_{\text{uni}}$  就可以判断胶体晶体内部是否存在孔洞以及孔洞所占的比例<sup>[26]</sup>. 当  $2D_{\text{exp}}/2D_{\text{uni}} \approx 1$  时, 胶体晶体是均匀的, 内部不存在孔洞; 当  $2D_{\text{exp}}/2D_{\text{uni}} < 1$  时, 胶体晶体内部是不均匀的, 存在粒子均匀分布的晶体区和无粒子存在的孔洞区,  $2D_{\text{exp}}/2D_{\text{uni}}$  越小, 说明晶体内部孔洞部分所占比例越大. 对于 BCC 结构的胶体晶体,  $2D_{\text{exp}}$  和  $2D_{\text{uni}}$  的计算方法如下:

$$2D_{\text{exp}} = 0.6124\lambda/n \quad (1)$$

$$2D_{\text{uni}} = 0.879D\phi^{-1/3} = 1091N^{-1/3} \quad (2)$$

式中,  $D$  为胶体粒子的直径;  $\phi$  为溶液中胶体粒子的体积分数;  $N$  为溶液中胶体粒子的数密度. 如, PS-3 样品在体积分数为 1.16% 时, 理论最近邻粒子间距  $2D_{\text{uni}} = 389$  nm, 用反射光谱测得的实际最近邻粒子间距  $2D_{\text{exp}} = 338$  nm,  $2D_{\text{exp}}/2D_{\text{uni}} = 0.87$ . 对于不同的体积分数, 测量了  $2D_{\text{exp}}/2D_{\text{uni}}$  的值, 结果表明, 该值只与粒子本身有关, 而不随体积分数变化而变化, 这与文献[26]中的结果一致. 因此, 对于本文的 6 种粒子, 每种粒子在不同的体积分数下只对应 1 个  $2D_{\text{exp}}/2D_{\text{uni}}$  的值, 测量结果如表 2 所示.

Table 2  $2D_{\text{exp}}/2D_{\text{uni}}$  value of colloidal crystals formed by differernt kinds of particles

Particle	PS-1	PS-2	PS-3	PS-4	PS-5	PS-6
$2D_{\text{exp}}/2D_{\text{uni}}$	0.84	0.87	0.87	0.94	0.94	1

## 2.2 胶体晶体的剪切模量

扭转共振谱仪可以测量胶体晶体的一级共振频率  $\omega$ , 它与剪切模量  $G$  之间有如下关系<sup>[27, 28]</sup>:

$$G = \frac{R^2 \rho \omega^2}{\mu_j^2 + (i + 1/2)^2 \pi^2 \alpha^2} \quad (3)$$

式中,  $R$  为样品管内半径;  $\alpha = R/H$  为样品管内半径与样品填充高度  $H$  的比值;  $\rho$  为样品的密度;  $\mu_j$  为第  $j$  阶贝塞尔函数的零点. 根据文献[27],  $j = 1, i = 0$ .

分别测量了 6 种胶体粒子在不同体积分数下的共振谱图, 结果如图 4 所示. 图中每条谱线左侧第 1 个峰为一级共振峰, 可以看出, 一级共振频率的值均随体积分数的增加而增大, 根据式(3), 其对应的剪切模量也随之增大.

## 2.3 胶体晶体剪切模量的变化规律

胶体晶体在不同体积分数下的剪切模量的测量结果如图 5 所示. 结果显示, 对于每一种粒子形成的胶体晶体体系, 其剪切模量均随体积分数的增大而增大, 与文献[21-23]的结果一致, 也证明了所搭建的扭转共振谱仪测量结果的可靠性. 但对于不同粒子(对应不同的  $2D_{\text{exp}}/2D_{\text{uni}}$  值)所对应曲线的分布没有明显的规律性, 而胶体晶体内部孔洞的大小是随着  $2D_{\text{exp}}/2D_{\text{uni}}$  的值单调变化的, 因此图 5 的结果显示, 不同粒子的胶体晶体内部孔洞与剪切模量之间没有明显的对应关系.

由于式(2)中的  $2D_{\text{uni}}$  直接与粒子大小相关, 我们认为这一现象是由不同样品粒子的尺寸差异造成的. 文献[21-25]是针对同一种粒子进行的研究, 此时体积分数与粒子数密度成正比, 因此无论采用体积分数还是粒子数密度进行分析, 结果应该是一致的. 而本文所采用的 PS 粒子的大小不同(见表 1), 因而采用粒子数密度和体积分数来分析结果可能存在差异. 基于这一考虑, 将图 5 的横坐标改

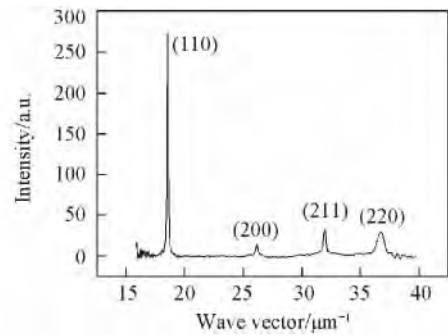


Fig. 3 Reflection spectrum of PS-5 with  $\phi = 0.6\%$

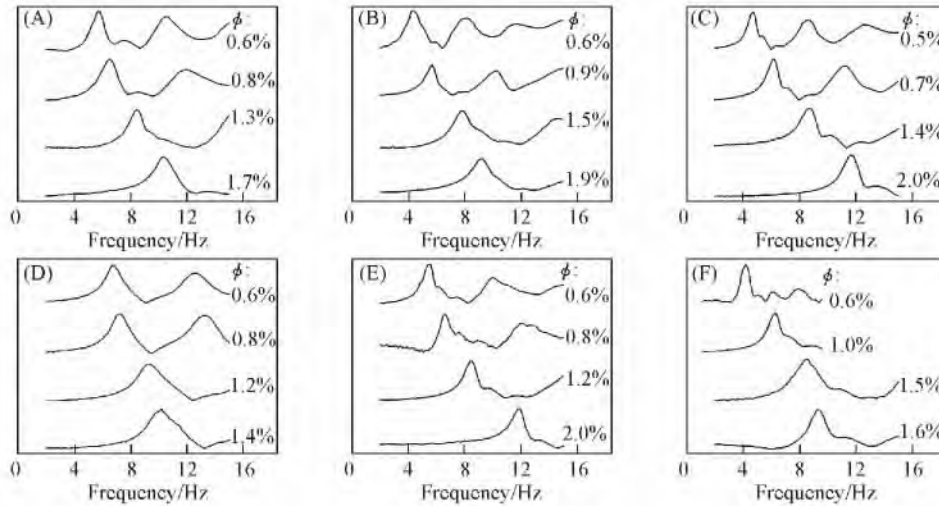


Fig. 4 Resonance spectra of different colloidal crystals at different volume fractions

(A) PS-1; (B) PS-2; (C) PS-3; (D) PS-4; (E) PS-5; (F) PS-6.

为粒子数密度,得到的结果如图6所示.可以看出,对于相同的粒子数密度,随着不同PS样品对应的 $2D_{exp}/2D_{uni}$ 变小,其剪切模量有变大的趋势. $2D_{exp}/2D_{uni}$ 越小,体系内部没有粒子存在的孔洞就越大,形成晶体部分的粒子数密度也越高,因此对应的剪切模量会相应更大.

考虑到晶体部分的数密度与粒子的最近邻间距 $2D_{exp}$ 直接相关,基于上述分析,将图6的横坐标改为 $2D_{exp}$ ,得到图7结果.从图7中可以看出,对于一定的粒子最近邻间距,6种不同PS样品对应的剪切模量值差别很小,特别是当粒子最近邻间距较大时,不同PS样品的剪切模量结果更为接近.表明决定胶体晶体剪切模量大小的关键因素是胶体晶体中的粒子最近邻间距,而孔洞的大小对剪切模量没有影响.

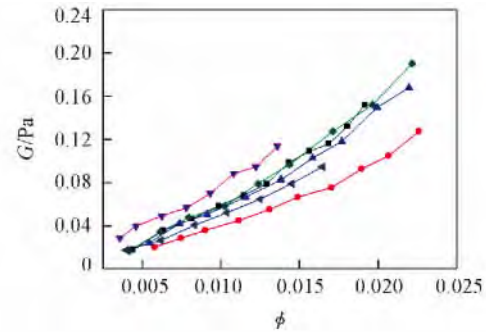


Fig. 5 Relationship between shear modulus ( $G$ ) and volume fraction ( $\phi$ ) for systems with different  $2D_{exp}/2D_{uni}$

■ PS-1; ● PS-2; ▲ PS-3; PS-4; ◆ PS-5; ◄ PS-6.

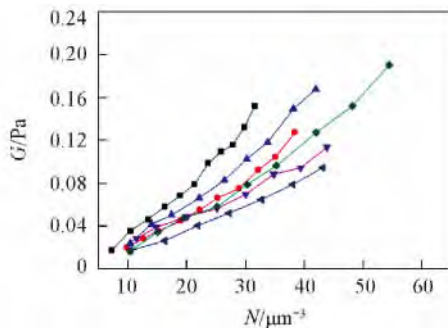


Fig. 6 Relationship between shear modulus ( $G$ ) and number density ( $N$ ) for systems with different  $2D_{exp}/2D_{uni}$

■ PS-1; ● PS-2; ▲ PS-3; PS-4; ◆ PS-5; ◄ PS-6.

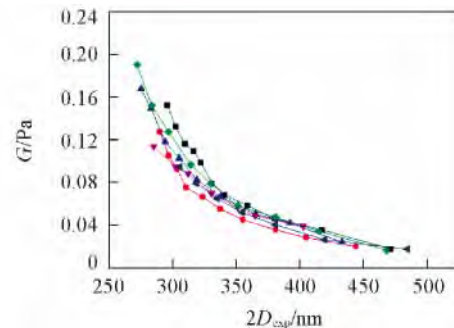


Fig. 7 Relationship between shear modulus ( $G$ ) and nearest neighbor distance ( $2D_{exp}$ ) for systems with different  $2D_{exp}/2D_{uni}$

■ PS-1; ● PS-2; ▲ PS-3; PS-4; ◆ PS-5; ◄ PS-6.

从剪切模量的物理意义分析 $G$ 与 $2D_{exp}$ 之间的关系.由于剪切模量是切应力与切应变的比值,那么从胶体粒子相互作用的角度来看,剪切模量应与 $\Delta F/\Delta r$ 成正相关,这里 $\Delta r$ 为粒子离开平衡位置的位移, $\Delta F$ 为此处粒子的受力情况.由于实验过程形成胶体晶体时,胶体粒子在晶格位置附近的受力情况

比较复杂,为便于分析比较,将粒子受力情况与位移偏差简化为2个最近邻的胶体粒子间的情形,这样可以用  $dF/dr|_{r=2D_{\text{exp}}}$  近似地分析剪切模量,此处  $F$  为2个粒子之间的作用力, $r$ 为最近邻粒子间距.

对于6种PS样品体系,其作用势可由Sogami与Ise<sup>[26,32]</sup>提出的针对带电胶体粒子的有效双体作用势  $U_s(r)$  表示:

$$U_s(r) = \frac{Z_e^2 e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left[ \frac{\sinh(\kappa a)}{\kappa a} \right]^2 \left( \frac{A}{r} - \frac{\kappa}{2} \right) \exp(\kappa r) \quad (4)$$

式中, $\epsilon_0$ 为真空绝对介电常数; $\epsilon_r$ 为相对介电常数; $Z_e$ 为实验测得的迁移有效电荷数; $e$ 为1个电子所带的电量; $a$ 为粒子半径; $A = 1 + \kappa a \coth(\kappa a)$ ; $r$ 为最近邻粒子间距; $\kappa$ 为德拜屏蔽因子,由下式<sup>[26,33,34]</sup>求得:

$$\kappa = \frac{e^2}{\epsilon_0\epsilon_r k_B T} (NZ_e + 2000N_A c_{\text{salt}}) \quad (5)$$

式中, $k_B$ 为玻尔兹曼常数; $N_A$ 为阿伏伽德罗常数; $c_{\text{salt}}$ 为胶体溶液中外加盐物质的量浓度.根据表1中的各粒子参数,可以由式(4)和(5)确定其所对应的  $U_s(r)$ ,从而求得  $dF/dr$  随距离的变化,结果如图8所示.

可以看出,图8的结果和图7的结果较一致,每条曲线均随着  $2D_{\text{exp}}$  的增大而单调减小.在粒子最近邻间距相当时,6种不同  $2D_{\text{exp}}/2D_{\text{uni}}$  的胶体晶体体系的  $dF/dr|_{r=2D_{\text{exp}}}$  差别不大,且粒子最近邻间距越大,不同PS样品的  $dF/dr|_{r=2D_{\text{exp}}}$  越接近,这也与图7所示的剪切模量的实验测量结果一致.实验结果与分析结果的对比也证实了孔洞的大小对胶体晶体的剪切模量没有影响,其剪切模量的大小只由其中的晶体部分决定.

综上所述,采用反射光谱和扭转共振谱仪系统,研究了6种不同的聚苯乙烯带电粒子在不同体积分数下形成的胶体晶体体系的剪切模量,结果表明,同一种粒子形成的胶体晶体,其剪切模量均随着体积分数的增大而增大.而对于不同的体系,即使平均有效粒径、孔洞大小及粒子表面迁移有效电荷数等参数都不尽相同,只要粒子间距大小相当,其剪切模量基本相同,说明影响胶体晶体剪切模量大小的关键因素是粒子的最近邻间距,而孔洞所占比例的大小对剪切模量没有影响.这一结果可以统一地分析胶体粒子大小、体积分数和体系内部孔洞等因素对剪切模量的影响,对于深入认识宏观剪切模量的微观机理具有重要意义.

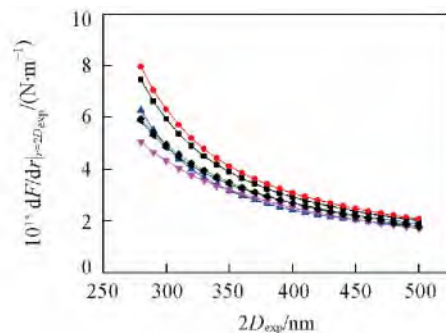


Fig. 8 Calculated relationship between  $dF/dr|_{r=2D_{\text{exp}}}$  and  $2D_{\text{exp}}$  for different colloidal crystals systems

■ PS-1; ● PS-2; ▲ PS-3; ◆ PS-4; ▼ PS-5; \* PS-6.

## 参 考 文 献

- [1] Eriksson R., Pajari H., Rosenholm J. B., *J. Colloid Interface Sci.*, **2009**, 332(1), 104—112
- [2] Fletcher W. P., Gent A. N., *Journal of Scientific Instruments*, **1952**, 29(6), 186—188
- [3] Cox W. P., Nielsen L. E., Keeney R., *Journal of Polymer Science*, **1957**, 26(114), 365—374
- [4] Li J., Yang Y., Cao X. L., Zhang J. C., Zhang L., Zhang L., Zhao S., *Chem. J. Chinese Universities*, **2014**, 35(4), 791—797(李静, 杨勇, 曹绪龙, 张继超, 张磊, 张路, 赵滩. 高等学校化学学报, **2014**, 35(4), 791—797)
- [5] Dagotto E., *Science*, **2005**, 309(5732), 257—262
- [6] Albuquerque J. M., Vaz M. F., Fortes M. A., *Scripta Mater.*, **1999**, 41(2), 167—174
- [7] Zhu H. X., Hobdell J. R., Windle A. H., *J. Mech. Phys. Solids*, **2001**, 49(4), 857—870
- [8] Lee K. Y., Lee C. H., Tsai C. H., Jiang M. H., Shueh J. F., Lai J. H., Jeng Y. L., Chao Y. S., *Opt. Quantum Electron*, **2009**, 41(2), 91—98
- [9] Meyers M. A., Mishra A., Benson D. J., *Prog. Mater. Sci.*, **2006**, 51(4), 427—556
- [10] Lu C. G., Xu K., Li W. B., Li P. C., Tan Y., Wang P. X., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2013**, 29(6), 1203—1207
- [11] Guan H. Y., Lian F., Wen Y., Pan X. R., Sun J. L., *Chem. J. Chinese Universities*, **2014**, 35(1), 80—84(关红艳, 连芳, 文焱,

- 潘笑容, 孙加林. 高等学校化学学报, **2014**, 35(1), 80—84)
- [12] Zhao L. N., Wang J. K., Wang Z. C., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2013**, 29(5), 969—973
- [13] Gu L. Y., Xu S. H., Sun Z. W., *Acta Phys. Sin.*, **2011**, 60(12), 1264021( 顾凌云, 徐升华, 孙祉伟. 物理学报, **2011**, 60(12), 1264021)
- [14] Yethiraj A., van Blaaderen A., *Nature*, **2003**, 421(6922), 513—517
- [15] Liao L. C. K., Lin C. Y., *Colloid Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, **2011**, 388(1—3), 70—76
- [16] van Teeffelen S., Achim C. V., Lowen H., *Physical Review E*, **2013**, 87(2), 022306
- [17] Kesavamoorthy R., Rao C. B., *Bull. Mat. Sci.*, **1997**, 20(4), 565—572
- [18] Yoshida H., Yamanaka J., Koga T., Koga T., Ise N., Hashimoto T., *Langmuir*, **1999**, 15(8), 2684—2702
- [19] Dosho S., Ise N., Ito K., Iwai S., Kitano H., Matsuoka H., Nakamura H., Okumura H., Ono T., Sogami I. S., Ueno Y., Yoshida H., Yoshiyama T., *Langmuir*, **1993**, 9(2), 394—411
- [20] Ito K., Yoshida H., Ise N., *Science*, **1994**, 263(5143), 66—68
- [21] Schöpe H. J., Palberg T., *J. Colloid Interface Sci.*, **2001**, 234(1), 149—161
- [22] Wette P., Schöpe H. J., *Prog. Colloid Polym. Sci.*, **2006**, 133, 88—94
- [23] Wette P., Schöpe H. J., Palberg T., *J. Chem. Phys.*, **2002**, 116(24), 10981—10988
- [24] Shapran L., Schöpe H. J., Palberg T., *J. Chem. Phys.*, **2006**, 125(19), 194714
- [25] Shapran L., Medebach M., Wette P., Palberg T., Schöpe H. J., Horbach J., Kreer T., Chatterji A., *Colloid Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.*, **2005**, 270, 220—225
- [26] Zhou H., Xu S., Ouyang W., Sun Z., Liu L., *J. Chem. Phys.*, **2013**, 139(6), 064904
- [27] Palberg T., Kottal J., Loga T., Hecht H., Simmacher E., Falcoz F., Leiderer P., *J. Phys. III*, **1994**, 4(3), 457—471
- [28] Dubois-Violette E., Pieranski P., Rothen F., Strzelecki L., *Journal de Physique*, **1980**, 41(4), 369—376
- [29] Zhou H. W., Mi L., Liu L. X., Xu S. H., Sun Z. W., *Acta Phys. Chim. Sin.*, **2013**, 29(6), 1260—1265( 周宏伟, 米利, 刘丽霞, 徐升华, 孙祉伟. 物理化学学报, **2013**, 29(6), 1260—1265)
- [30] Xu S. H., Zhou H. W., Sun Z. W., Xie J. C., *Physical Review E*, **2010**, 82(1), 010401
- [31] Zhou H., Xu S., Sun Z., Du X., Liu L., *Langmuir*, **2011**, 27(12), 7439—7445
- [32] Sogami I., Ise N., *J. Chem. Phys.*, **1984**, 81(12), 6320—6332
- [33] Wette P., Klassen I., Holland-Moritz D., Herlach D. M., Schöpe H. J., Lorenz N., Reiber H., Palberg T., Roth S. V., *J. Chem. Phys.*, **2010**, 132(13), 131102
- [34] Engelbrecht A., Meneses R., Schöpe H. J., *Soft Matter*, **2011**, 7(12), 5685—5690

## Factors Influencing the Shear Modulus of Colloidal Crystals<sup>†</sup>

QIN Yanming<sup>1,2</sup>, ZHOU Hongwei<sup>2</sup>, XU Shenghua<sup>2\*</sup>, SUN Zhiwei<sup>2</sup>

(1. College of Chemistry, Chemical Engineering and Material Science, Shandong Normal University, Jinan 250014, China;

2. Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** Home-made torsional resonance spectroscopy was used to study the shear modulus of colloidal crystals formed by different particles at different volume fractions, while reflection spectrum was used to measure the corresponding crystal structure and internal voids etc. at the same time. The results indicate that shear modulus increases with volume fractions for colloidal crystals formed by same particles. And for colloidal crystals formed by different particles, the shear modulus has a tendency to increase with the increase of the fraction of internal voids for the same particle number density. Further analysis of the experimental results and the comparison with the theoretical analysis shows that the main factor influencing the shear modulus is the nearest interparticle distance, which explains the experimental findings.

**Keywords** Reflection spectrum; Torsional resonance spectroscopy; Shear modulus; Nearest interparticle distance; Void

(Ed. V, Z)

<sup>†</sup> Supported by the National Natural Science Foundation of China( Nos. 11302226, 11172302, 11032011).