

电流变液中悬浮粒子形状与其固态结构之间的关系*

郭志荣^a, 石兵^b, 吴峰^{c**}

(a. 廊坊师范学院物理系, 河北廊坊 065000; b. 中国科学技术大学热工程与能源工程系;
c. 中国科学技术大学力学和机械工程系, 合肥 230026)

摘要: 采用近邻相互作用近似方法, 计算了电流变液中悬浮粒子的形状对电流变液呈固态时基本结构的影响. 结果表明: 基本结构将随着悬浮粒子形状的变化而变化, 特别是在扁椭球情况下, 固态结构的相互作用能出现几个数量级的变化.

关键词: 电流变液; 固态结构; 近邻相互作用近似

中图分类号: O373; O648.22 **文献标识码:** A

1 引言

电流变液是由高介电常数的固体颗粒悬浮于某种低介电常数、低粘性的不导电液体中所形成的, 当施加的外电场足够大时, 电流变液转变为类似固态, 这一过程完全是可逆的, 这一液固两态相变的响应时间为毫秒量级, 这一奇特属性, 使得电流变液在工业技术中有着极大地潜在应用, Tao 应用球形悬浮颗粒并采取点偶极子模型^[1], 计算得到体心四方结构(bct)是最稳定的. 何沛等采用近邻相互作用近似方法², 计算了旋转椭球颗粒在体心四方(bct)、面心立方(fcc)、六角密堆(hcp)三种结构的库仑势能. 我们这里仍采用近邻相互作用近似方法, 研究基本结构随悬浮粒子形状的改变而出现的相变现象, 发现悬浮粒子形状的改变对电流变液呈固态结构的相互作用能有非常显著地影响, 特别是对扁椭球粒子情形, 固态结构相互作用能呈数量级的变化趋势.

2 物理模型

将电流变液置于两无限大平板间, 令其固体颗粒为椭球形状, 如图1所示, 使电场方向沿z轴方向. 由于电场的作用, 固体颗粒极化为一电偶极子, 位于 r_i^+ 和 r_i^- 处的两电偶极矩相互作用势能为:

$$U(r_{ij}^+) = \frac{\nu(1 - 3\cos^2\theta_{ij}^+)}{r_{ij}^3} = \left(2 + \rho \frac{\partial}{\partial \rho}\right) \frac{-\nu}{r_{ij}^3} \quad (1)$$

由于电场力的作用, 电偶极子形成链, 这些链分为 A

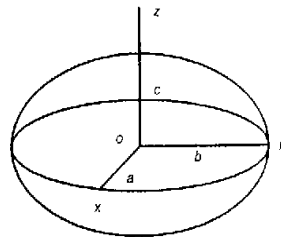


图1 悬浮的固体椭球颗粒

Fig. 1 Revolving solid ellipsoid particle

链和 B 链, 同种链互相排斥, 异种链互相吸引, 其相互作用势能为^[3]:

$$U_{AA}(\rho) = U_{BB}(\rho) = \frac{\nu}{c^3} \sum_{s=1}^{\infty} 2\pi^2 S^2 K_0 \left(\frac{s\pi\rho}{c} \right) \quad (2)$$

$$U_{AB}(\rho) = \frac{\nu}{c^3} \sum_{s=1}^{\infty} 2\pi^2 S^2 K_0 \left(\frac{s\pi\rho}{c} \right) \cos(s\pi) \quad (3)$$

很显然, 椭球粒子的形状随着 a、b、c 比率不同而变化, 改变 a、b、c 的值, 我们对三种典型结构(bct、fcc、hcp)的相互作用能进行了计算. 图2描绘了这三种结构在 xy 平面上的投影示意图.

从(1)式可得到每一粒子的相互作用能为:

$$U = U_0 + \frac{1}{2} U_i(\rho, z) \quad (4)$$

其中 U_0 为一无限长链的自能, 对所有结构 U_0 均相同, 对应不同的结构 U_i 不同. 对 bct 结构:

* 国家自然科学基金资助项目(19834020). ** 通讯联系人, E-mail: fwu@ustc.edu.cn

收稿日期: 2001-08-14; 修回日期: 2001-08-25.

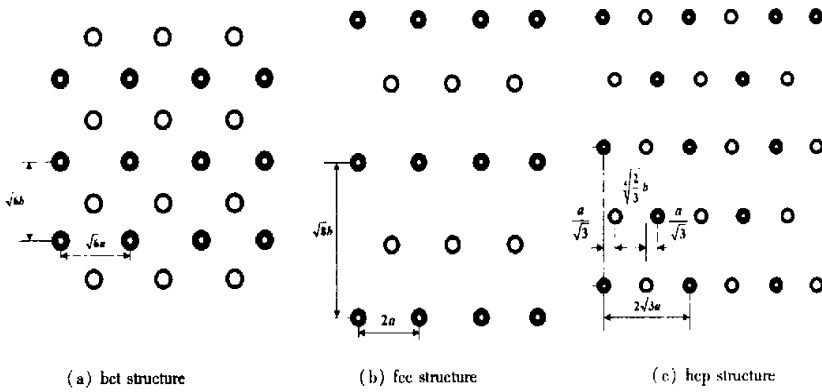


图 2 三种结构在 xy 平面上的投影 (●代表 A 链, ○代表 B 链)

Fig. 2 Structures represented by two-dimensional crystals in which ● for A chain, ○ for B chain

$$U_i = \sum_{m,n=-k}^k (U_{AA}\sqrt{(\sqrt{6}am)^2 + (\sqrt{6}bn)^2} + U_{AB}\sqrt{(\sqrt{6}am + x_{bct})^2 + (\sqrt{6}bn + y_{bct})^2}) \quad (5)$$

对 fcc 结构:

$$U_i = \sum_{m,n=-k}^k (U_{AA}\sqrt{(2am)^2 + (2\sqrt{2}bn)^2} + U_{AB}\sqrt{(2am + x_{fcc})^2 + (2\sqrt{2}bn + y_{fcc})^2}) \quad (6)$$

对 hcp 结构:

$$U_i = \sum_{m,n=-k}^k (U_{AA}\sqrt{(2\sqrt{3}am)^2 + (4\sqrt{2/3}bn)^2} + U_{AB}\sqrt{(2\sqrt{3}am + x_{hcp1})^2 + (4\sqrt{2/3}bn + y_{hcp1})^2} + U_{AB}\sqrt{(2\sqrt{3}am + x_{hcp2})^2 + (4\sqrt{2/3}bn + y_{hcp2})^2}) \quad (7)$$

其中,

$$x_{bct} = \sqrt{6}b/2, y_{bct} = \sqrt{6}a/2, x_{fcc} = a, y_{fcc} = \sqrt{2}b, x_{hcp1} = 4a/\sqrt{3}, x_{hcp2} = \sqrt{3}a, x_{hcp3} = \sqrt{1/3}a, y_{hcp1} = 2\sqrt{2/3}b, y_{hcp2} = 0, y_{hcp3} = 2\sqrt{2/3}b.$$

3 结果与分析

从理论上看(5)~(7)式都具有无限项,实际上完全没有必要,已经证实^[3],当 $k=3$ 时,计算结果已非常准确.表 1 列出了 $a/c=1.5$ 时,随着 b/c 的改变,对应三种典型结构的相互作用能的情况.

表 1 中,当 $a/c=1.5$ 时, $b/c=1.0 \sim 1.4$, fcc

结构有势能最低值; $b/c=1.5、1.6$ 时,势能最低的是 bct 结构; $b/c=1.7、1.8$ 时, hcp 结构势能值最低.因此,随着悬浮粒子形状的改变,具有最低势能值的稳定结构是不同的,电流变固态结构随着悬浮粒子形状的变化而变化,这可以说是一种依赖粒子形状的相变现象.图 3 描绘了随着悬浮粒子形状参数的改变固态结构发生相变的规律,也就是相图.

表 1 $a/c=1.5$, 改变 b/c 对应各种结构的相互作用能(单位: $p^2/(abc\epsilon_f)$)

Table 1 $a/c=1.5$, interaction energy vs b/c (unit: $p^2/(abc\epsilon_f)$)

b/c	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
U_{bct}	-0.4715	-0.5161	-0.5592	-0.6017	-0.6441	-0.6867	-0.7297	-0.7729	-0.8165
U_{fcc}	-0.4919	-0.5286	-0.5660	-0.6047	-0.6446	-0.6856	-0.7276	-0.7703	-0.8136
U_{hcp}	-0.4914	-0.5243	-0.5611	-0.6008	-0.6425	-0.6856	-0.7295	-0.7740	-0.8188

图 4 描绘了相互作用能随粒子形状的改变的变化规律.这里 $a=b$, 即悬浮粒子为旋转椭球的情况

下, bct 结构的相互作用能随粒子形状的变化规律.当 $c/a > 0.5$ 时,相互作用能变化甚微; $c/a < 0.2$, 相

互作用能变化显著,且能量最低达到了 -180,这是 目前计算中获得的最低能量值.

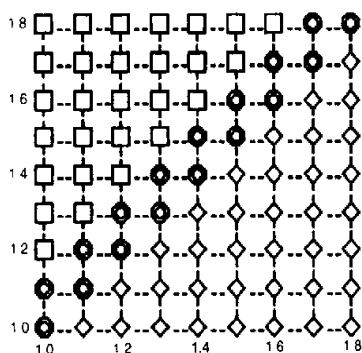


图 3 随粒子形状参量的改变固态结构相变示意图

◎ bct, ◇ fcc, □ hcp

Fig. 3 Phase transition of solid structure following change of shape of particle

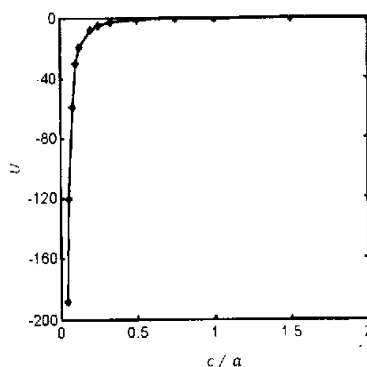


图 4 bct 结构的相互作用能随粒子形状的变化规律

Fig. 4 Interaction energy vs shape of particle

综上所述,悬浮粒子形状的改变对电流变液呈固态结构的影响非常显著,悬浮粒子形状的改变将导致电流变固态结构的变化,即产生相变现象;另外,改变悬浮粒子的形状可以使固态结构的相互作用变得很强,表明这种情形下,固态结构将具有很大的宏观剪切屈服应力.

参 考 文 献

[1] Tao R. *Int. J. Modern Phys. B*, 1992, 6: 2635
 [2] He Pei (何沛), et al. *J. Chin. Univ. Sci. Tech.* (中国科学技术大学学报), 2000, 30: 213
 [3] Wu Feng, et al. *Chin. Phys. Lett.*, 2000, 17: 379

Relationship between the Shape of Suspension Particle and Ground State Structure in Electrorheological Fluid *

Guo Zhirong^a, Shi Bing^b, Wu Feng^{c**}

(a. Department of Physics, Langfang Teachers' College, Langfang 065000;

b. Department of Thermology and Energy Engineering; c. Department of Mechanical and Mechanical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract Taking account of the interaction among limited-distance neighbord chains, the effect of the shape of suspension particle in electrorheological (ER) fluid on the ground state structure of ER solid is discussed. The results of computation show that the ground state structure will change with the shape of suspension particle. Specially for flat ellipsoid particles suspended in a liquid the variation-value of interaction energy of the structure of ER solid changes in the range of 0.1 ~ 100.

Key words ER fluids, Solid structure, Limited-distance neighbored chains

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (19834020).

** To whom correspondence should be addressed, E-mail: fwu@ustc.edu.cn