

# 前处理温度与氯化钠浓度对 ZSM-5 沸石能量耗散特性的影响

孙岳霆<sup>1</sup>, 许骏<sup>2</sup>, 李一兵<sup>1</sup>, 徐晓庆<sup>1</sup>, 刘成<sup>3</sup>

(1. 清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084; 2. 哥伦比亚大学 地球与环境工程系, 美国纽约 10027; 3. 装甲兵工程学院, 北京 100072)

**摘要:** 高能量耗散密度材料的研发是防护工程领域的研究热点。纳米多孔材料具有超大的比表面积, 其与液体的相互作用能够耗散大量外界能量, 因此在车辆碰撞安全等领域具有出色的应用前景。本研究选取 ZSM-5 沸石/NaCl 溶液系统, 通过准静态实验研究该系统的能量耗散行为, 并阐明其机理, 同时参数化地研究了沸石的前处理温度 (600~1100℃) 及溶液的 NaCl 浓度 (0~2 mol/kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub>) 对系统能量耗散性能的影响。结果表明: 该系统在准静态加载条件下具有较高的能量耗散密度, 达到 12 J/g, 且可重复使用; 该系统的工作性能可在较大范围内调节, 其能量耗散密度与沸石前处理温度正相关, 与 NaCl 浓度负相关; 其工作压强与沸石前处理温度及 NaCl 浓度均正相关。本研究为开发智能、可控和高效的能量耗散系统提供了必要的基础理论与实验依据。

**关键词:** 纳米多孔材料; 能量耗散; 前处理温度; 离子浓度; 安全防护

中图分类号: O647 文献标识码: A

## Effect of Pretreatment Temperature and Sodium Chloride Concentration on Energy Dissipation Characteristics of ZSM-5/Water System

SUN Yue-Ting<sup>1</sup>, XU Jun<sup>2</sup>, LI Yi-Bing<sup>1</sup>, XU Xiao-Qing<sup>1</sup>, LIU Cheng<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Department of Earth and Environmental Engineering, Columbia University, New York NY 10027, USA; 3. Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

**Abstract:** Research and development of new materials with high energy dissipation density is of intriguing interest in protective engineering fields. With ultra-large specific surface area, nanoporous material enables a high-efficiency energy dissipation system by interaction with liquids, which has a promising application in vehicle crash safety and anti-explosion for armored vehicles. In this paper, ZSM-5 zeolite / NaCl solution system, a mixture with ZSM zeolite immersed in sodium chloride solution was experimentally investigated. Its energy dissipation characteristics and working mechanism were explored by quasi-static compression experiments. Effect of pretreatment temperature of ZSM-5 zeolite (600–1100℃) and NaCl concentration of the solution (0–2 mol/kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub>) were examined parametrically. Results show that the energy dissipation density of ZSM-5 zeolite / NaCl solution system can reach 12 J/g, as a reusable system under quasi-static loading. Its performance characteristics can be finely tuned by pretreatment of ZSM-5 and adding different concentrations of NaCl. The energy dissipation density increases with pretreatment temperature and decreases with NaCl concentration, while its working pressure increases with both of them. This work is of significance for the development of intelligent, controllable and efficient energy dissipation devices.

收稿日期: 2013-09-02; 收到修改稿日期: 2013-11-13

基金项目: 清华大学自主科研计划国际合作基础研究专项(20121080050); 汽车安全与节能国家重点实验室(ZZ2011-112) International Joint Research Project Sponsored by Tsinghua University (20121080050); Individual-research Founding State Key Laboratory of Automotive Safety & Energy, Tsinghua University (ZZ2011-112)

作者简介: 孙岳霆(1988-), 男, 博士研究生. E-mail: syt06@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者: 李一兵, 教授. E-mail: liyb@tsinghua.edu.cn

**Key words:** nanoporous material; energy dissipation; pretreatment temperature; ion concentration; safety protection

新型吸能与缓冲材料的研发一直是载运工具防护安全领域研究的热点<sup>[1-3]</sup>。公安部交通管理局公布的统计年鉴显示, 2012 年全国共发生涉及人员伤亡的交通事故 204196 起, 死亡 59997 人<sup>[4]</sup>, 也即全国每小时约有 7 人死于交通事故。可见, 交通事故已成为一个严峻的社会问题, 因此针对汽车碰撞中能量耗散问题的研究显得尤为重要<sup>[5]</sup>。

传统材料的能量耗散形式包括大变形、屈曲、层裂、断裂和摩擦等<sup>[6-11]</sup>, 然而这些形式的能量耗散密度较低, 一般在 1~10 J/g 或以下<sup>[2]</sup>。随着纳米多孔材料的研究发展, 有关学者提出了一种高能量密度的纳米多孔材料能量耗散系统, 并受到广泛关注<sup>[12-15]</sup>。该系统主要由憎水的纳米多孔介质和非浸润液体混合封装而成, 在外界冲击载荷驱动下, 液体将突破毛细阻力进入纳米孔隙中, 从而实现机械能向固液界面能的转化。由于纳米多孔材料具有巨大的比表面积<sup>[16]</sup>, 因而形成额外大量的表面能, 从而可以充分地消耗冲击能量。该系统的能量耗散密度比传统材料高出一到两个数量级<sup>[15]</sup>。

Gusev<sup>[13]</sup>和 Eroshenko<sup>[14]</sup>等自上世纪九十年代开展液体与纳米多孔材料作用机理的研究。随后, 研究内容逐渐拓展到多种介孔和微孔材料, 其中硅胶与各结构类型的沸石是主要的研究对象。Qiao 等<sup>[7,17-18]</sup>对 MCM-41 和硅胶等材料进行了大量的实验研究, 发现纳米多孔材料系统具有较高的能量耗散密度, 其能量耗散行为与孔径、流体分子种类和环境温度等因素有关。Chen 等<sup>[19]</sup>利用分子动力学模拟对水分子与碳纳米管的微观作用机理进行了研究, 证实纳米尺度受限下的流体受管道尺寸和流速的影响。但目前的文献研究集中在小体量的准静态实验研究及分子模拟研究, 且针对孔径较大( $D > 2$  nm)材料的研究居多。考虑到 ZSM-5 沸石制备技术成熟, 价格低廉, 工程应用广泛<sup>[20-21]</sup>, 其较小的孔径( $D < 1$  nm)能充分地发挥能量转换效应, 但针对其应用于能量耗散领域的研究尚不多见, 沸石前处理温度与氯化

钠浓度综合影响的相关报道更少。本工作选取 ZSM-5 沸石与 NaCl 溶液构成纳米多孔材料能量耗散系统, 通过准静态实验研究该系统的能量耗散行为及其工作机理, 并通过参数化实验考察了 ZSM-5 的前处理温度及 NaCl 浓度对系统能量耗散特性的影响, 为智能可控的能量耗散系统的开发提供基础。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

ZSM-5 沸石( $[\text{Na}^+_n(\text{H}_2\text{O})_{16}] [\text{Al}_n\text{Si}_{96-n}\text{O}_{192}]$ ,  $n < 27$ )<sup>[22]</sup>, 白色粉末, 硅铝比为 300, 上海卓悦化工科技有限公司生产。ZSM-5 属于 MFI (Zeolite Socony Mobil - five) 结构类型, 具有二维十元环孔道。ZSM-5 的孔径与水分子尺寸在一个量级, 因此其与水分子的作用可较为充分地实现机械能向固液界面能的转化。NaCl 为市售分析纯, 实验用水为去离子水。

使用中国科学院上海光机所生产的 SGL-1200 管式炉对 ZSM-5 进行加热前处理, 加热温度为 600~1100 °C。ZSM-5 的粒度尺寸用激光粒度分析仪 MasterSizer 200 进行测定, 同时使用比表面和孔隙度分析仪 Autosorb 测定比表面、孔容和孔径。表 1 列出了 ZSM 经不同温度前处理后的粒度、比表面、孔容和孔径数据。在长春试验机研究所 CSS-2220 型电子万能试验机上进行准静态压缩实验, 加载速率范围为 0.05~500 mm/min, 最高载荷为 200 kN, 本实验取加载速率为 5 mm/min。所使用的高压腔体装置的基本形状如图 1 所示, 腔体材料为不锈钢 316。活塞杆径为 40.0 mm, 腔体内径为 42.0 mm, 深度为 80.0 mm。为了避免气泡, 腔体底部与活塞杆底部均进行了倒角处理。经保压测试, 该装置可承受的最大压强约为 145 MPa, 此压强能够确保液体分子被压入 ZSM-5 的孔道, 且在实验期间的保压性能可以很好地满足实验要求<sup>[12]</sup>。活塞杆与腔体的摩擦力约为 5 kN, 可忽略不计。

表 1 ZSM-5 沸石经不同温度前处理后的粒度、比表面积、孔容和孔径

Table 1 Particle size, specific surface area (BET), pore volume and pore diameter of ZSM-5 zeolites pretreated at different temperatures

$T / ^\circ\text{C}$	Particle diameter / $\mu\text{m}$	BET / ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	Pore volume / ( $\text{m}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	Pore diameter / nm
600	5.450	399.0	0.1823	0.4523
800	6.012	395.1	0.1768	0.4523
1000	6.069	364.6	0.1600	0.4523
1100	6.634	334.6	0.1559	0.4523

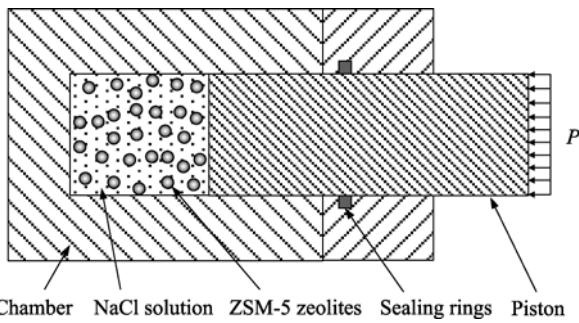


图1 ZSM-5/NaCl 溶液系统的实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup for ZSM-5/NaCl solution system

## 1.2 实验方法

首先使用管式炉对 ZSM-5 沸石进行加热前处理, 升温降温速率均为  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , 并在设定温度下保温 3 h。将 36 g 前处理后的 ZSM-5 沸石与 60 g 去离子水混合, 添加不同量的 NaCl, 封装于上述高压腔体内。正式加载前进行预压(设定压强为 10 MPa)以去除装置内部以及 ZSM-5 颗粒间可能存在的间隙。加载开始后, 试验机压盘以  $5\text{ mm}/\text{min}$  的速率推动活塞对混合液进行匀速压缩。当压强达到 125 MPa 时, 活塞以同样的速率返回, 进行卸载, 从而得到完整的加卸载曲线。文中实验曲线均已扣除纯水压缩的  $P$ - $V$  曲线, 以消除系统影响, 真实地反映混合液的作用。本研究将针对 ZSM-5 沸石的前处理温度  $T$  ( $600\sim 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 和 NaCl 浓度  $C_{\text{NaCl}}$  ( $0\sim 2\text{ mol}/\text{kg H}_2\text{O}$ ) 进行参数化实验研究。

## 2 结果与讨论

### 2.1 ZSM-5 沸石/NaCl 溶液系统的能量耗散机理

图 2(a) 为 ZSM-5 沸石/水系统典型的压强-比体积曲线( $P$ - $\Delta V$ , 比体积  $\Delta V$  为系统变形除以沸石质量), ZSM-5 沸石经  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  前处理且未添加 NaCl。压强较低时(A-B),  $P$ - $\Delta V$  曲线近似为直线, 此时水分子尚未进入沸石孔道, 直线段斜率为混合液的体积模量  $K$ ,  $K=2.22\text{ GPa}$ , 与文献报导的纯水体积模量相当<sup>[23]</sup>。当外界压强上升到临界值(渗入压强  $P_{\text{in}}$ )时, 水分子克服毛细阻力开始进入沸石孔道, 固液界面不断增加, 形成平台段(B-C)。当水分子逐渐将孔道可容纳的空间充满时, 压强再次以较大的斜率上升(C-D), 表现出液体的弹性模量。从曲线 D 点开始卸载, 当压强足够低时(渗出压强  $P_{\text{out}}$ ), 水分子开始渗出孔道, 再次形成一个平台段(E-F); 水分子渗出完毕之后, 剩下一个直线段(F-G), 为混合液恢复弹性变形的过程。文中 B、C、E、F 点统一取斜率等于

平台段斜率 1.5 倍处的点。卸载完毕后可以发现, A 与 G 几乎重合, 说明该系统仅经历弹性变形, 进入沸石孔道的水分子全部渗出孔道。图 2(a) 记录了该系统在 5 次循环载荷下的加卸载曲线, 可见每次循环的曲线基本重合。因此, 该系统类似一个液体弹簧, 可重复使用, 例如用于周期性载荷的工况。下文只考察单次加卸载曲线。

从能量耗散的角度, 可以用  $P$ - $\Delta V$  曲线下方的面积描述比能量(J/g), 图 2(a) 曲线对应的能量耗散密度约为  $12\text{ J}/\text{g}$ , 高于蜂窝铝等传统的能量耗散材料。这一较高的能量耗散密度来自于该系统独特的能量转化形式。该系统在工作过程中将外界机械能转化为以下形式的能量: (1) 水分子与钠离子、氯离子结构重排及氢键的压缩能  $E_m$ ; (2) 水分子渗入纳米孔道需要克服的界面能  $E_s$ ; (3) 水分子进入孔道需要克服的摩擦能  $E_f$ ; (4) ZSM-5 沸石骨架的变形能  $E_d$ 。其中, ZSM-5 的骨架变形在实验载荷下可以忽略<sup>[24-25]</sup>, 因此, 系统能量密度  $E=E_m+E_s+E_f$ , 其中,  $E_s=P_{\text{in}}\cdot\Delta V_{\text{pla}}$ , 如图 2(b) 所示。

对于图 2(a) 对应的  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 不添加 NaCl 的系统而言, 各部分的能量密度为:  $E_m=5.91\text{ J}/\text{g}$ ;  $E_s=5.72\text{ J}/\text{g}$ ;  $E_f=0.43\text{ J}/\text{g}$ 。可见,  $E_m$  与  $E_s$  为该系统工作过程中能量的主要转换形式,  $E_f$  所占的比重仅占 3.6%, 而这正是该系统在循环工况下的主要损耗形式, 因此说明该系统工作的重复性较好。本文着重对  $E_m$  及  $E_s$  进行考察。 $E_m$  主要取决于系统的整体刚度, 受 NaCl 浓度的影响。根据吉布斯公式,  $E_s=\sigma|\cos\theta|\Delta\Omega$ , 其中,  $\sigma$  为液体的表面张力,  $\theta$  为固液界面的接触角,  $\Delta\Omega$  为界面面积。由于 ZSM-5 沸石具有纳米级别的孔道, 使得水分子渗入纳米孔道的过程极大地增加了液体的表面积, 体现为  $\Delta\Omega$  值迅速升高, 从而实现高密度的机械能向界面能的转化。此外, 从图 2 可以观察到, 加载段与卸载段之间具有少量的迟滞效应, 这主要由接触角迟滞效应导致<sup>[26-27]</sup>。经计算, 图 2(a) 对应的迟滞能约为  $0.66\text{ J}/\text{g}$ , 相对于其整体的能量耗散密度而言, 可以忽略不计。

### 2.2 参数化实验

针对 ZSM-5 沸石在四种前处理温度  $T$  ( $600$ 、 $800$ 、 $1000$ 、 $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 和五种 NaCl 浓度  $C_{\text{NaCl}}$  ( $0$ 、 $0.5$ 、 $1$ 、 $1.5$ 、 $2\text{ mol}/\text{kg H}_2\text{O}$ ) 进行总计 20 组的参数化实验研究, 每组进行 3 次重复试验。选取  $2\text{ mol}/\text{kg H}_2\text{O}$  下不同  $T$  的加载曲线, 用于反映前处理温度的影响; 选取  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  前处理的 ZSM-5 沸石在不同  $C_{\text{NaCl}}$  下得到的加载曲线, 用于反映 NaCl 浓度的影响, 结果如图 3 所示。

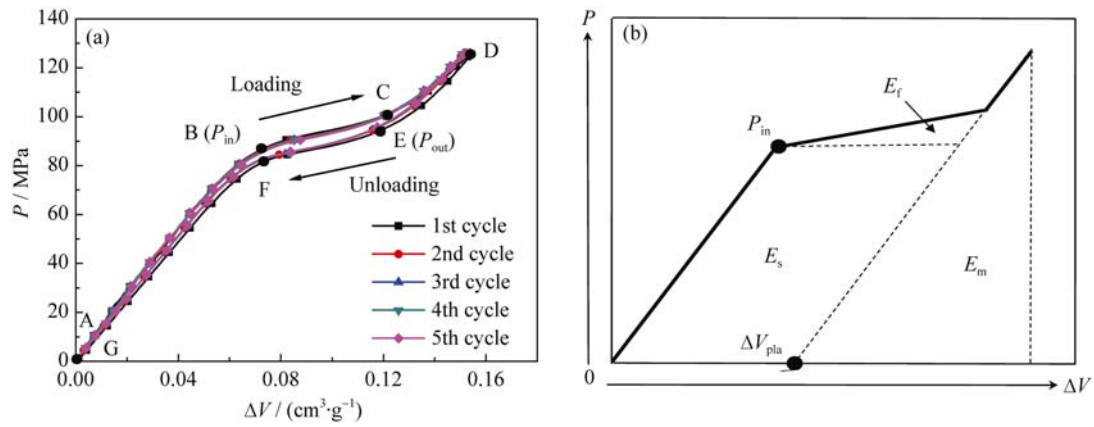


图 2 ZSM-5/NaCl 溶液系统在准静态循环载荷下的典型  $P-\Delta V$  曲线, 沸石前处理温度为  $1100^{\circ}\text{C}$ , 未添加 NaCl (a);  $P-\Delta V$  加载曲线示意图(b)

Fig. 2 Typical quasi-static  $P-\Delta V$  curves of ZSM-5 / NaCl solution system under cyclic loading, with zeolites pretreated at  $1100^{\circ}\text{C}$  and without adding NaCl (a); An ideal isotherm of  $P-\Delta V$  loading curve (b)

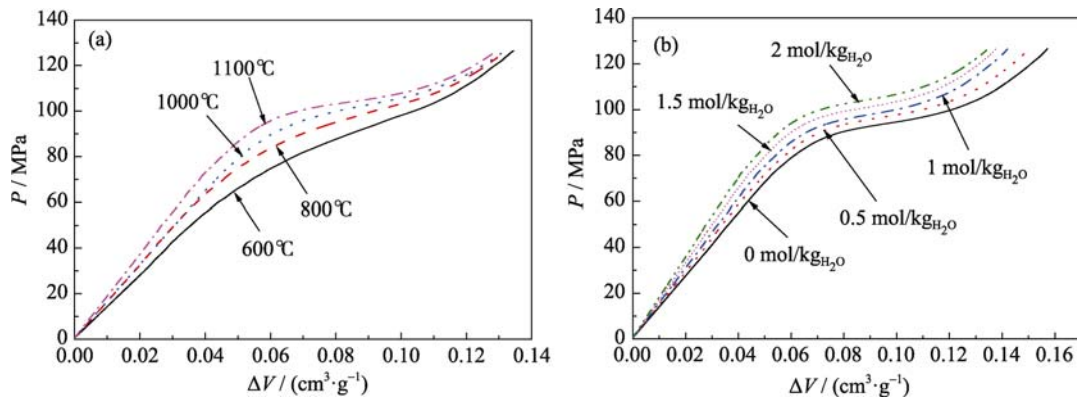


图 3 ZSM-5/NaCl 溶液系统在不同沸石前处理温度下的  $P-\Delta V$  曲线, NaCl 浓度为  $2 \text{ mol/kg H}_2\text{O}$  (a); ZSM-5/NaCl 溶液系统在不同 NaCl 浓度下的  $P-\Delta V$  曲线, 沸石前处理温度为  $1100^{\circ}\text{C}$  (b)

Fig. 3  $P-\Delta V$  curves of ZSM-5 / NaCl solution system with NaCl concentration of  $2 \text{ mol/kg H}_2\text{O}$  and zeolites pretreated at different temperatures (a);  $P-\Delta V$  curves of ZSM-5 / NaCl solution system with zeolites pretreated at  $1100^{\circ}\text{C}$  and adding different amounts of NaCl (b)

ZSM-5 经高温处理后结构稳定<sup>[28]</sup>, 由表 1 可知, 仅有轻微的孔道破坏导致孔容及比表面积减小的现象, 此外也有一定的颗粒团聚效应。由图 3(a)可知,  $T$  对  $P-\Delta V$  曲线的影响主要在于渗入压强  $P_{in}$ :  $P_{in}$  随  $T$  的增加而升高。该现象源于 ZSM-5 沸石骨架在高温下的脱铝现象<sup>[12,29]</sup>。高温脱铝导致骨架的憎水性增强, 因此水分子需要在更高的外界压强作用下方可进入 ZSM-5 的纳米级孔道, 体现为  $P-\Delta V$  曲线的斜率在渗入点之前(AB 段)斜率较高, 而渗入阶段(BC 段)斜率较低, 如图 3(a)中  $1100^{\circ}\text{C}$  的曲线。而  $T$  较低时, 水分子在外界压强较低时即可逐渐渗入孔道, 体现为曲线在渗入点 B 前后的斜率变化不大, 如图 3(a)中  $600^{\circ}\text{C}$  的曲线。从能量耗散的角度而言, 由于  $P_{in}$  的提高, 该系统的  $E$  随  $T$  的升高而提高。经计算得到的不同  $T$  与  $C_{\text{NaCl}}$  下的系统  $E$  如图 4(a)所示, 当温度由  $600^{\circ}\text{C}$  上升到  $1100^{\circ}\text{C}$  时,  $E$  增加  $1.3\sim 1.6 \text{ J/g}$ 。

由图 3(b)可知,  $C_{\text{NaCl}}$  的影响不同于  $T$ 。 $C_{\text{NaCl}}$  对  $E$  的影响取决于两个方面的综合作用。一方面  $C_{\text{NaCl}}$  的升高提高了系统的整体刚度, 当  $C_{\text{NaCl}}$  由 0 上升到  $2 \text{ mol/kg H}_2\text{O}$  时, 系统的体积模量上升 27%, 与文献 [30] 中的结果接近。 $C_{\text{NaCl}}$  越高, 系统在相同外界压强下的可变形量越小。另一方面,  $C_{\text{NaCl}}$  的升高也提高了渗入压强  $P_{in}$ , 也即水分子更不容易进入 ZSM-5 沸石的孔道, 这主要是由于 NaCl 溶液的表面张力与  $C_{\text{NaCl}}$  正相关<sup>[31-34]</sup>。由图 4(a)可见,  $E$  与  $C_{\text{NaCl}}$  负相关, 当  $C_{\text{NaCl}}$  由 0 上升到  $2 \text{ mol/kg H}_2\text{O}$  时,  $E$  下降  $0.7\sim 1.0 \text{ J/g}$ 。可见,  $C_{\text{NaCl}}$  对系统整体刚度的提升比对  $E$  的影响更为显著。

从  $E$  的构成角度对其变化规律及影响因素进行分析, 计算各  $T$  及  $C_{\text{NaCl}}$  下的  $E_m$  与  $E_s$ , 如图 4(b) 所示。显然, 由于系统整体刚度的提升,  $E_m$  与  $C_{\text{NaCl}}$  负相关, 而与  $T$  无关, 因此图 4(b) 中只计  $1100^{\circ}\text{C}$  下的  $E_m$  曲

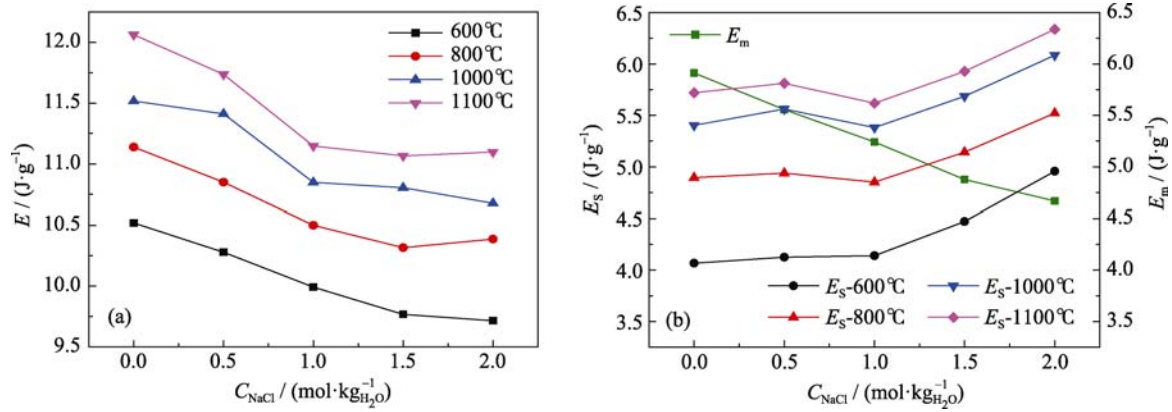


图4 ZSM-5/NaCl 溶液系统在不同沸石前处理温度及 NaCl 浓度下的能量密度

Fig. 4 Energy density of ZSM-5 / NaCl solution system with zeolites pretreated at different temperatures and different concentrations of NaCl

(a) Energy dissipation density,  $E$ ; (b) Interfacial energy density,  $E_s$  and compressive energy density,  $E_m$

线。 $E_s$  则主要由于  $P_{in}$  的上升而与  $T$  及  $C_{NaCl}$  都保持正相关关系。 $E_s = P_{in} \cdot \Delta V_{pla}$ , 其中,  $\Delta V_{pla}$  与  $T$  及  $C_{NaCl}$  均有一定程度的负相关, 前者主要是由于高温处理后的 ZSM-5 孔道会有轻微破坏, 由表 1 孔容及比表面数据可以得到证实; 而后者主要是由于钠离子及氯离子在一定程度上占用了 ZSM-5 孔道空间。然而上述  $\Delta V_{pla}$  的影响均比较有限,  $E_s$  与  $C_{NaCl}$  总体上正相关。

综上, 由于  $E_m$  与  $T$  无关,  $E_s$  与  $T$  正相关, 因此  $E$  与  $T$  正相关; 由于  $E_m$  与  $C_{NaCl}$  负相关,  $E_s$  与  $C_{NaCl}$  正相关, 且前者的影响更为显著, 因此  $E$  与  $C_{NaCl}$  负相关。

### 3 结论

基于高压腔体实验平台, 对 ZSM-5/NaCl 溶液系统的能量耗散特性进行了准静态实验研究, 并从系统固液组分的角度对沸石前处理温度(600~1100°C)及 NaCl 浓度(0~2 mol/kg H<sub>2</sub>O)进行了参数化研究。该系统在准静态压缩下的能量耗散密度可达 12 J/g, 高于传统材料。考虑到应变率和惯性效应, 在冲击载荷下其耗散密度将更大。此外, 该系统的工作性能可以通过对 ZSM-5 沸石加热及在系统中添加 NaCl 进行较大范围上的调节, 可适用于各类工况的使用要求。研究表明, 提高沸石前处理温度将提高系统的工作压强与能量耗散密度, 添加 NaCl 将提升系统的工作压强但降低系统的能量耗散密度。本研究为开发工程实用的智能、可控及高效的能量耗散材料与结构提供了必要的理论基础与实验依据。

### 参考文献:

[1] XU JUN, LI YI-BING. Study of damage in windshield glazing subject to impact by a pedestrian's head. *Proceedings of the*

*Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering*, 2009, **223**: 77-84.

- [2] XU JUN, XU BAO-XING, SUN YUE-TING, *et al.* Mechanical energy absorption characteristics of hollow and water-filled carbon nanotubes upon low-speed crushing. *Journal of Nanomechanics and Micromechanics*, 2012, **2(4)**: 65-70.
- [3] XU JUN, SUN YUE-TING, LIU BO-HAN, *et al.* Experimental and macroscopic investigation of dynamic crack patterns in PVB laminated glass sheets subject to light-weight impact. *Engineering Failure Analysis*, 2011, **18(6)**: 1605-1612.
- [4] Traffic Management Bureau, China Road Traffic Safety Statistical Yearbook (2012), Jiangsu, 2013: 139.
- [5] TIMMEL M, KOLLING S, OSTERRIEDER P, *et al.* A finite element model for impact simulation with laminated glass. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, **34(8)**: 1465-1478.
- [6] QI W G, JIN X L, ZHANG X Y. Improvement of energy-absorbing structures of a commercial vehicle for crashworthiness using finite element method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, **30(11/12)**: 1001-1009.
- [7] QIAO YU, LIU LING, CHEN XI. Pressurized liquid in nanopores: a modified laplace-Young equation. *Nano Letters*, 2009, **9(3)**: 984-988.
- [8] LIU LING, CHEN XI, LU WEI-YI, *et al.* Infiltration of electrolytes in molecular-sized nanopores. *Physical Review Letters*, 2009, **102(18)**: 184501-1-4.
- [9] KOO KYUNG-HOAE, CHO HOYEOL, KAPUR PAWAN, *et al.* Performance comparisons between carbon nanotubes, optical, and Cu for future high-performance on-chip interconnect applications. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2007, **54(12)**: 3206-3215.
- [10] LEE DEUK-YONG, LEE MYUNG-HYUN, KIM KWANG J, *et al.* Effect of multiwalled carbon nanotube (M-CNT) loading on

- M-CNT distribution behavior and the related electromechanical properties of the M-CNT dispersed ionomeric nanocomposites. *Surface & Coatings Technology*, 2005, **200(5/6)**: 1920–1925.
- [11] LEE DEUK-YONG, PARK II-SEOK, LEE MYUNG-HYUN, *et al.* Ionic polymer-metal composite bending actuator loaded with multi-walled carbon nanotubes. *Sensors and Actuators A-physical*, 2007, **133(1)**: 117–127.
- [12] SUN YUE-TING, XU JUN, LI YI-BING, *et al.* Experimental study on energy dissipation characteristics of ZSM-5 zeolite/water system. *Advanced Engineering Materials*, 2013, **15(8)**: 740–746.
- [13] GUSEV VLADIMIR YU. On thermodynamics of permanent hysteresis in capillary lyophobic systems and interface characterization. *Langmuir*, 1994, **10(1)**: 235–240.
- [14] EROSHENKO V A, FADEEV A Y. Intrusion and extrusion of water in hydrophobized porous silica. *Colloid Journal*, 1995, **57(4)**: 446–449.
- [15] XU BAO-XING, QIAO YU, PARK TAEHYO, *et al.* A conceptual thermal actuation system driven by interface tension of nanofluids. *Energy & Environmental Science*, 2011, **4(9)**: 3632–3639.
- [16] ROTH WIESLAW J, NACHTIGALL PETR, MORRIS RUSSELL E, *et al.* A family of zeolites with controlled pore size prepared using a top-down method. *Nature Chemistry*, 2013, **5(5)**: 628–633.
- [17] HAN AI-JIE, QIAO YU. Pressure-induced infiltration of aqueous solutions of multiple promoters in a nanoporous silica. *Journal of The American Chemical Society*, 2006, **128(32)**: 10348–10349.
- [18] QIAO YU, PUNYAMURTULA VENKATA K, HAN AI-JIE, *et al.* Temperature dependence of working pressure of a nanoporous liquid spring. *Applied Physics Letters*, 2006, **89(25)**: 251905–1–3.
- [19] CHEN XI, CAO GUO-XIN, HAN AI-JIE, *et al.* Nanoscale fluid transport: size and rate effects. *Nano Letters*, 2008, **8(9)**: 2988–2992.
- [20] MU XU-HONG, WANG DIAN-ZHONG, WANG YONG-RUI, *et al.* Nanosized molecular sieves as petroleum refining and petrochemical catalysts. *Chinese Journal of Catalysis*, 2013, **34(1)**: 69–79.
- [21] YUE MING-BO, YANG NA, WANG YI-MENG. Synthesis of shaped ZSM-5 zeolites by dry-gel conversion with seed gel as directing agent. *Acta Physico-chimica Sinica*, 2012, **28(9)**: 2115–2121.
- [22] Structure Commission of the International Zeolite Association. Database of zeolite structure[EB/OL] [http://izasc.ethz.ch/fmi/xsl/IZA-SC/ftc\\_tm.xml?-db=Atlas\\_main&-lay=tm&STC=MFI&-find](http://izasc.ethz.ch/fmi/xsl/IZA-SC/ftc_tm.xml?-db=Atlas_main&-lay=tm&STC=MFI&-find), 2013–06–30.
- [23] MAVKO GARY, MUKERJY TAPAN, DVORKIN JACK. Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media, 2nd ed.; Cambridge: Cambridge University Press, 2009: 176.
- [24] QUARTIERI SIMONA, MONTAGNA GABRIELE, ARLETTI ROSSELLA, *et al.* Elastic behavior of MFI-type zeolites: compressibility of H-ZSM-5 in penetrating and non-penetrating media. *Journal of Solid State Chemistry*, 2011, **184(6)**: 1505–1516.
- [25] ARLETTI ROSSELLA, VEZZALINI GIOVANNA, MORSLI AMINE, *et al.* Elastic behavior of MFI-type zeolites: 1-Compressibility of Na-ZSM-5 in penetrating and non-penetrating media. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2011, **142(2/3)**: 696–707.
- [26] IEVTUSHENKO OLEKSII V, EROSHENKO VALENTIN A, GROSU YAROSLAV G, *et al.* Evolution of the energetic characteristics of {silicalite-1 plus water} repulsive clathrates in a wide temperature range. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2013, **15(12)**: 4451–4457.
- [27] COIFFARD LOÏC, EROSHENKO VALENTIN. Temperature effect on water intrusion/expulsion in grafted silica gels. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, **300(1)**: 304–309.
- [28] MAO DONG-SEN, GUO QIANG-SHENG, MENG TAO, *et al.* Effect of hydrothermal treatment on the acidity and catalytic performance of nanosized HZSM-5 zeolites for the conversion of methanol to propene. *Acta Physico-chimica Sinica*, 2010, **26(2)**: 338–344.
- [29] LI YAN-FENG, ZHU JI-QIN, LIU HUI, *et al.* Increase in the hydrothermal stability of the La-modified ZSM-5 zeolite. *Acta Physico-chimica Sinica*, 2011, **27(1)**: 52–58.
- [30] LANE CHRISTOPHER D, HATHCOCK DAVID J, LEAVITT ANDREW J, *et al.* Measurement of the bulk modulus of a liquid using a pump-probe laser technique. *The Chemical Educator*, 2001, **6(4)**: 235–237.
- [31] JARVIS N L, SCHEIMAN M A. Surface potentials of aqueous electrolyte solutions. *Journal of Physical Chemistry*, 1968, **72(1)**: 74–78.
- [32] WEISSENBORN PETER K., PUGH ROBERT J. Surface tension of aqueous solutions of electrolytes: relationship with ion hydration, oxygen solubility, and bubble coalescence. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1996, **184(2)**: 550–563.
- [33] KONG XIN-GUO, SURANI FALGUN B, QIAO YU. Energy absorption of nanoporous silica particles in aqueous solutions of sodium chloride. *Physica Scripta*, 2006, **74(5)**: 531–534.
- [34] KONG XIN-GUO, QIAO YU. Improvement of recoverability of a nanoporous energy absorption system by using chemical admixture. *Applied Physics Letters*, 2005, **86(15)**: 151919–1–3.