文章编号：1001-1455(2014)04-0427-06 **DOI**：10.11883/1001-1455(2014)04-0427-06

MgH_2对乳化炸药的压力减敏影响实验*

程扬帆，马宏昊，沈兆武
（中国科学技术大学近代力学系，安徽 合肥 230027）

摘要：将储氢材料 MgH_2作为敏化剂和含能材料引入到乳化炸药的配方中，通过冲击波动压发生装置和水下爆炸实验研究 MgH_2对乳化炸药抗冲击波性能的影响，并与玻璃微球敏化的乳化炸药进行对比。研究结果表明，MgH_2能够显著减弱压力减敏作用对乳化炸药爆轰性能的影响，且同等受压程度下爆炸威力远大于玻璃微球敏化的乳化炸药。最后，通过扫描电镜研究受压乳化炸药微观结构，得出乳化基质破乳和有效“热点”减少是乳化炸药受冲击波作用后爆轰压力降低的主要影响因素。

关键词：爆炸力学；压力减敏；储氢材料；乳化炸药；敏化剂
中图分类号：O389；TJ55 **国标学科代码**：1303599 **文献标志码**：A

在工程爆破中延期起爆技术是常用的手段，具有爆破质量好、地震效应小、爆破规模大的优点，但延期爆破会造成先起爆炸药产生的冲击波或应力波对尚未起爆炸药的动态荷载问题，导致后起爆的炸药爆炸性能下降，甚至出现半爆、拒爆等现象[1]，这个现象就是“压力减敏”。乳化炸药压力减敏作用不仅影响爆破效果和施工进度，而且容易造成盲炮，处理过程易发生事故，影响施工的安全性。乳化炸药是我国目前用量最大的炸药品种，在工程爆破中发挥着越来越重要的作用。如 2011 年我国工业炸药年产量已达到 386 万吨，其中乳化炸药占 53%。

压力减敏会降低乳化炸药爆轰稳定性，这引起了普遍重视[2-7]。乳化炸药敏化方式分为物理敏化和化学敏化，其中玻璃微球是最常用的物理敏化剂，颜事龙等[8]、王尹军等[9]和陈东梁等[10]对玻璃微球敏化的乳化炸药做了大量的实验研究。马宏昊等[11]首次将储氢材料 MgH_2作为敏化剂和含能材料，加入乳化基质中制成储氢型复合乳化炸药，前期的研究表明，储氢型复合乳化炸药具有优异的爆轰性能，但储氢型复合乳化炸药的抗冲击性能和压力减敏还是新的内容。

本文中，过冲击波动压发生装置和水下爆炸实验，研究储氢材料 MgH_2和玻璃微球敏化两种乳化炸药在受到不同强度冲击波压力作用下爆炸威力的变化，并通过扫描电镜实验观察两种乳化炸药冲击波动压作用过后微观结构的变化，探讨储氢型复合乳化炸药（MgH_2敏化）的抗压力减敏作用机理。

1 乳化炸药制备

由以前的实验可知，当乳化炸药中玻璃微球和 MgH_2的质量分数分别为 4%和 1%时，制得的两种乳化炸药爆炸性能最好，因此研究该配方下乳化炸药的压力减敏现象。为了排除乳化基质含量的影响，样品中所含乳化基质的质量都为 30 g，玻璃微球型按乳化基质与玻璃微球质量比 100∶4、储氢型按乳化基质与 MgH_2质量比 100∶1 制成乳化炸药。

2 动态压力减敏实验

2.1 乳化炸药冲击波动压实验

将压装 RDX 固定在矩形钢架的中央，然后用铁丝将乳化炸药样品距离压装 RDX 不同距离地绑在框架上（如图 1 所示），将该装置放入水下爆炸塔，并置于水面以下。通过引爆压装 RDX 在水中产生冲

* **收稿日期**：2012-11-29；**修回日期**：2013-03-04
基金项目：国家自然科学基金重点项目（51134012）；国家自然科学基金面上项目（51374189，51174183）
作者简介：程扬帆（1987— ），男，博士研究生。

击波，使不同距离的乳化炸药受到不同程度的冲击波动压作用。

压装 RDX 质量为 10 g，密度为 1.65 g/cm^3，由 RDX 和石蜡按质量比 100∶5 压装而成。实验用压装 RDX 和乳化炸药样品使用聚乙烯塑料套包裹，再用防水胶布缠紧，封口处涂上凡士林以防水。

利用冲击波动压发生装置得到 MgH_2 和玻璃微球敏化等乳化炸药受冲击波动压作用后的样品，作为对比研究，实验还得到了乳化基质受动压作用后的样品，实验结果如图 2 所示。玻璃微球敏化的乳化炸药呈白色，因此从外观上看不出有炸药破乳现象，但是玻璃微球敏化的乳化炸药受压后变硬且变成粉状，说明有大量硝酸铵晶体析出，因此乳化炸药发生了严重破乳；乳化基质和储氢型复合乳化炸药受压后，能够看到炸药的周围出现很多白色斑点，说明也发生了破乳，而且从宏观上观察，储氢型复合乳化炸药破乳程度小于乳化基质，这个现象将在后面讨论。

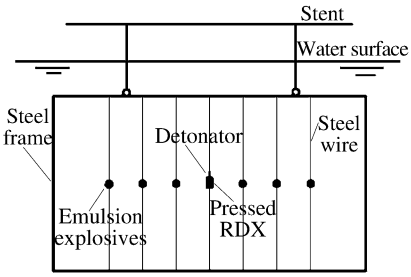

图 1 冲击波动压发生装置图

Fig. 1 Assembly experimental system producing shockwaves



图 2 样品在距离压装 RDX 为 50 cm 时受压后对比照

Fig. 2 Photos of emulsion explosives that compressed at 50 cm by shockwaves

2.2 受压乳化炸药水下爆炸实验

2.2.1 水下爆炸实验装置

水下爆炸塔直径为 5 m，水深 H 为 5 m。实验装置如图 3 所示，实验所用装药为冲击波动压作用实验得到的 30 g 球形受压乳化炸药药柱，装药位于水下 h 为 2.5 m 处，离传感器的距离 R 为 0.70 m。在水下爆炸能量输出结构实验中，应设法避免或减弱边界条件对水下爆炸过程的影响，当装药量小于 350 g 时，将装药置于水下 2 m 处就可以满足冲击波和气泡脉动的测试要求[12]。由 ICP138A25 型压力传感器、482A22 型恒流源、Agilent 5000A 数字存储示波器测量，并记录受压乳化炸药水下爆炸数据。每种炸药做 3 次实验，实验结果取平均值。

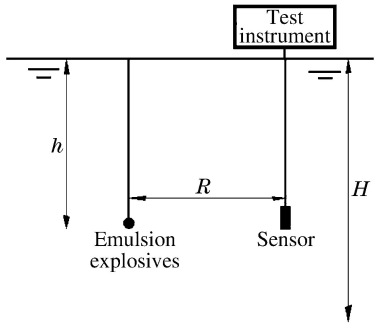

图 3 水下爆炸实验示意图

Fig. 3 Assembly experimental system of underwater explosion

2.2.2 水下爆炸实验结果

图 4 是玻璃微球型和储氢型复合乳化炸药，在不同距离处受冲击波压缩后，水下爆炸冲击波压力曲线，图中只列出了典型受压距离的压力曲线。从图 4 可以看到：两种乳化炸药受冲击波压缩后，水下爆炸冲击波峰值压力下降，并且降低程度与受压距离成反比；同时随着受压距离减小，两种乳化炸药水下爆炸冲击波波宽亦减小。表 1 为玻璃微球型乳化炸药和储氢型复合乳化炸药在不同距离受压后，水下爆炸冲击波的峰值压力。

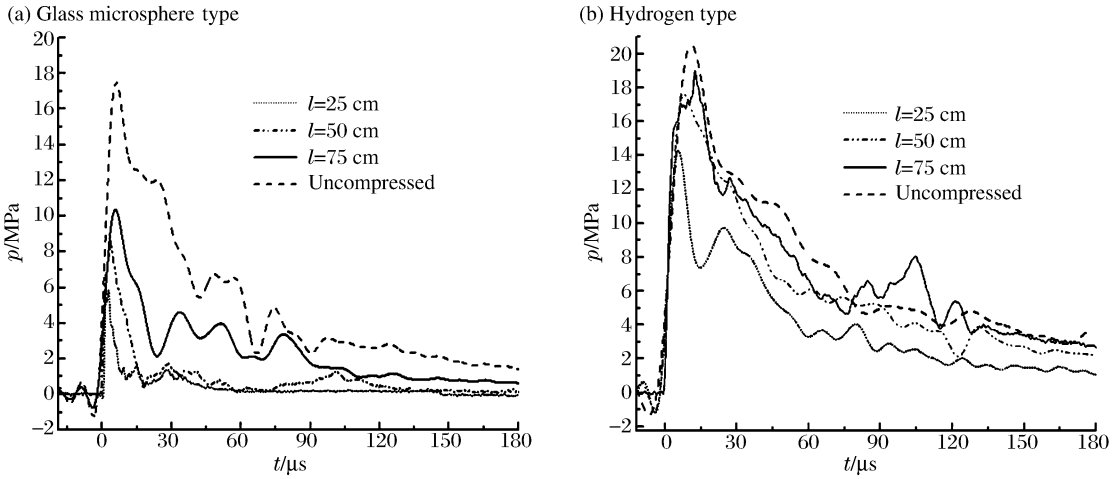

图 4　受压乳化炸药压力曲线

Fig. 4　Pressure curves of compressed emulsion explosives

表 1　乳化炸药不同距离受压后爆炸冲击波测试结果

Table 1　The shockwave peak pressures of emulsion explosives at different compression distances

l/cm	玻璃微球型				储氢型			
	p_1/MPa	p_2/MPa	$\bar{p}$/MPa	D/%	p_1/MPa	p_2/MPa	$\bar{p}$/MPa	D/%
25	5.25	6.36	5.81	100.00	14.27	15.27	14.77	38.97
40	7.84	7.42	7.63	86.41	17.47	17.85	17.66	18.89
50	8.25	8.58	8.42	79.82	17.60	19.65	18.63	12.11
60	8.95	9.37	9.16	73.67	18.40	19.34	18.87	10.45
75	10.38	10.34	10.36	63.64	18.99	18.36	18.68	11.76
未受压	17.60	18.38	17.99	0	20.15	20.59	20.37	0

2.3　减敏率

减敏率表示乳化炸药受到外界压力作用后爆炸性能降低的程度，乳化炸药减敏率越小，乳化炸药抗压性能越强。由文献[13]可知，从适用角度看，可以将冲击波峰值压力计算的压力减敏程度作为主要的表征依据。因此，本文中通过储氢型复合乳化炸药和玻璃微球型乳化炸药受压前后压力峰值的变化计算乳化炸药的减敏程度。

乳化炸药减敏率为：

$$D=(p_0-p_1)/(p_0-p_d)$$

式中：D 为乳化炸药的压力减敏程度；p_0 为乳化炸药未受压时爆炸冲击波峰压；p_1 为乳化炸药受压后爆炸冲击波峰压；p_d 为相同实验条件下雷管的爆炸冲击波峰压。

通过水下爆炸实验，测得 2 次雷管爆炸冲击波压力峰值分别为 5.92 和 6.08 MPa，平均 6.0 MPa，可计算玻璃微球型和储氢型复合乳化炸药减敏率，结果见表 1。

3　水下爆炸实验结果与分析

减敏率介于 0～100%之间时，表明乳化炸药发生不同程度的减敏，其值越小则减敏程度越小，乳化炸药的爆轰性能受压力减敏影响越弱。当减敏率 $D=0$ 时，说明乳化炸药完全爆轰，炸药未受压力减敏作用的影响；当 $D=100\%$时，说明炸药拒爆，乳化炸药被压死。

由图 5(a)可知，当玻璃微球型乳化炸药受压距离为 25 cm 时，炸药减敏率为 100%，说明此时玻璃微球型乳化炸药拒爆，炸药被压死，而此时储氢型复合乳化炸药减敏率仅为 38.97%，其爆炸性能受冲击波动压影响明显小于玻璃微球型乳化炸药。当受压距离大于 50 cm 时，储氢型复合乳化炸药的减敏

率已接近 10%且趋于平衡，而玻璃微球型乳化炸药却高达 79.82%，受压距离为 75cm 时减敏率依然大于 60%。

由此可见，MgH_2能够显著提高乳化炸药的抗冲击波性能。与玻璃微球型乳化炸药相比，当受到相同程度的冲击波压缩后，储氢型复合乳化炸药不仅减敏率低，爆炸性能受压力减敏作用的影响小，而且爆炸威力远大于同等条件下玻璃微球型乳化炸药(如图 5(b)所示)。

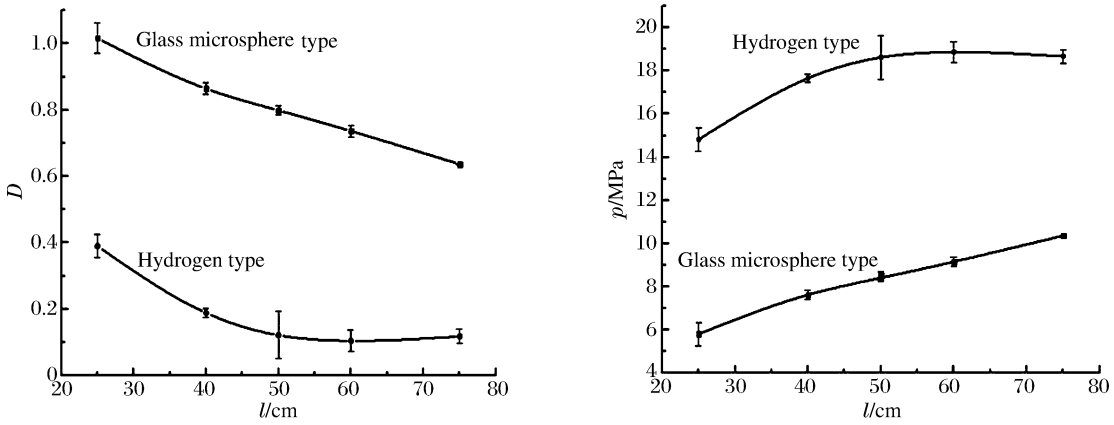

图 5 乳化炸药水下减敏率和冲击波压力与受压距离关系

Fig. 5 Desensitization ratios and shockwave peak pressures versus compressed distances

4 动压作用下乳化炸药微观结构变化特性

图 6 为受压距离为 50 cm 时 3 种试样受压前后微观结构图。从图 6 可以看到：当受到冲击波压力作用后，乳化基质样品会发生局部破乳；玻璃微球型乳化炸药样品的破乳现象明显，且部分玻璃微球被压碎；储氢型复合乳化炸药样品破乳程度最轻，且敏化气泡受压过后变形最小。根据工业炸药起爆的“热点”理论，如果微小空心颗粒或气泡产生较大位移、变形或破坏，则形成有效“热点”的尺寸、温度和数量将会受到影响[14]，这种情况对乳化炸药爆轰反应的激发和传播是不利的。

乳化炸药的破乳由两部分组成：乳化基质粒子间相互作用形成的破乳，乳化基质与敏化剂微界面间的破乳。从图 6 可知，当乳化基质受到冲击波作用时，乳化基质粒子间相互挤压，导致乳化基质局部破乳；敏化剂均匀分布于乳化炸药内部后，会形成无数个敏化剂颗粒或气泡与乳化基质的微界面，当冲击波对乳化炸药作用时，在微界面产生的效应会使附近的乳胶基质局部破乳。

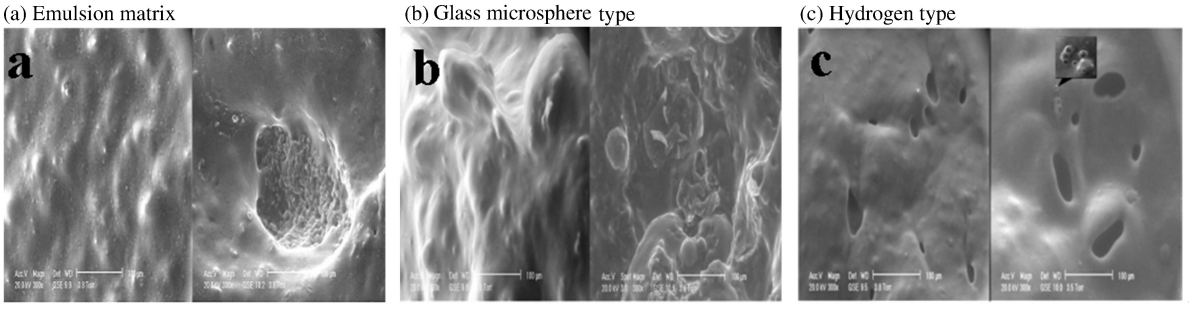

图 6 乳化炸药试样受压前后的微观图

Fig. 6 Micrograms of emulsion matrix before and after compression

5 储氢型复合乳化炸药抗压力减敏机理探讨

水下爆炸实验结果表明，当受到相同强度冲击波作用时，储氢型复合乳化炸药减敏率远小于玻璃微球型乳化炸药。分析其原因，是由于玻璃微球具有一定的强度，在一定压力范围内玻璃微球不会被压碎，此时乳化炸药与玻璃微球微界面处的乳化基质因受压会发生局部破乳；当外界冲击波压力达到一定

强度时，部分玻璃微球会被冲击波的压力压碎，且玻璃微球破坏的程度随着压力的增加而增大，导致乳化炸药中能形成“热点”的结构变少。储氢型复合乳化炸药采用 MgH_2 敏化，MgH_2 在乳化基质中水解产生均匀分布的氢气泡，起到敏化作用。MgH_2 粉末完全反应，这是因为乳化基质 W/O 型结构含有的游离水分子少，且随着反应的进行生成的 $Mg(OH)_2$ 会抑制水解反应。然而，这些未反应的 MgH_2 粉末在增强储氢型复合乳化炸药抗压力减敏性能上起到重要作用。储氢型复合乳化炸药体系中存在大量微气泡，使整个乳化炸药体系具有弹性和柔性，当体系受到动态压力作用时，大量的微气泡会吸收冲击波能量，起到气泡帷幕的作用，同时未反应的 MgH_2 粉末在外界压力达到一定程度时会释放出氢气，抵消部分因冲击波作用而导致气泡收缩的影响，以及形成新的氢气泡，从而使有效“热点”的减小程度降到最低，起到动态敏化的作用；而且乳化基质中的氢气泡形状规则（见图 6(c)），且在炸药体内形成的界面是自由面，与冲击波作用过程相对简单，因而其周围的乳胶粒子破坏程度小。由于氢气泡的缓冲作用，储氢型复合乳化炸药的破乳程度甚至小于乳化基质（见图 6(a)、图 6(c)），图 2 也说明了这个现象。

通过上面分析可知，乳化炸药的破乳和有效“热点”的减少，是乳化炸药受冲击波作用后爆轰性能降低的主要影响因素。相对于玻璃微球敏化型乳化炸药，储氢型复合乳化炸药具有独特的敏化方式，当受到冲击波作用后，其破乳程度低且损失的有效“热点”少，因而具有更强的抗压力减敏能力。

6　结　论

（1）MgH_2 能够显著改善乳化炸药抗压力减敏性能。在受到相同冲击波压力作用后，储氢型复合乳化炸药减敏率远小于玻璃微球型乳化炸药，且爆炸威力大。

（2）MgH_2 独特的敏化方式，使储氢型复合乳化炸药具有柔性和弹性，因而在受到外界压力作用时破乳量小。

（3）MgH_2 产生的氢气泡和受到外界压力时的动态敏化作用，使储氢型复合乳化炸药破乳量和有效“热点”减少量降低最低，从而具有优异的抗压力减敏能力。

参考文献：

[1] 王尹军，吕庆山，汪旭光. 冲击波对含水炸药减敏作用的实验研究[J]. 爆炸与冲击，2004，24(6)：558-562.
Wang Yin-jun，Lü Qing-shan，Wang Xu-guang. Experimental study on the desensitization of water-bearing explosives subjected to shock wave[J]. Explosion and Shock Waves，2004，24(6)：558-562.

[2] 张少波，高铭，滕威，等. 煤矿爆破异常现象发生机理研究[J]. 煤炭学报，2005，30(2)：191-195.
Zhang Shao-bo，Gao Ming，Teng Wei，et al. Study on the mechanism about blasting malfunction in coal mine[J]. Journal of China Coal Society，2005，30(2)：191-195.

[3] 颜事龙，陈东梁，王尹军. 动态压力对乳化炸药分散相粒径变化和减敏效应的影响[J]. 煤炭学报，2004，29(6)：676-679.
Yan Shi-long，Chen Dong-liang，Wang Yin-jun. The effect of dynamic pressure on the desensitization and particle diameters change of the dispersive phase of emulsion explosives[J]. Journal of China Coal Society，2004，29(6)：676-679.

[4] Wietand M S. Comparative sensitivity of permitted explosives against dynamic pressure desensitization[J]. Explosive Materials，1987，16(2)：33-36.

[5] Nie S. Pressure desensitization of a gassed emulsion explosive in comparison with micro-balloon sensitized emulsion explosives[C]// Proceedings of Thirteenth Annual Symposium on explosives and Blasting Research. Las Vegas，Nevada，USA，1997：2-5.

[6] Matsuzawa T，Murakami M. Detonability of emulsion explosives under dynamic pressure[J]. Journal of the Industrial Explosives Society，1982，43(5)：317-322.

[7] Sumiya F，Hirosaki Y，Kato Y，et al. Detonation velocity of precompressed emulsion explosives[C]// Proceedings of the 28th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique. Cleveland：International Society of Explosives Engineers，2002：253-263.

[8] 颜事龙,陈东梁.不同敏化气泡载体敏化的乳化炸药减敏压力研究[J].兵工学报,2006,27(5):887-890.
Yan Shi-long, Chen Dong-liang. Research on the desensitization pressure of emulsion explosives sensitized by different sensitization bubble carriers[J]. Acta Armamentarii, 2006,27(5):887-890.

[9] 王尹军,汪旭光.乳胶基质抗冲击波性能研究[J].兵工学报,2005,26(5):697-701.
Wang Yin-jun, Wang Xu-guang. A study on the anti-shockwave performance of emulsion matrix[J]. Acta Armamentarii, 2005,26(5):697-701.

[10] 陈东梁,孙金华,颜事龙,等.动压下组分结构变化与乳化炸药减敏关系研究[J].含能材料,2006,14(4):302-305.
Chen Dong-liang, Sun Jin-hua, Yan Shi-long, et al. Relationship between structure changes and desensitization of emulsion explosives under dynamic pressure[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2006,14(4):302-305.

[11] 马宏昊,程扬帆,沈兆武,等.氢化镁型储氢乳化炸药:中国,CN102432407A[P].2013-07-10.

[12] 周俊祥,于国辉,李澎,等.RDX/Al 含铝炸药水下爆炸实验研究[J].爆破,2005,22(2):4-7.
Zhou Jun-xiang, Yu Guo-hui, Li Peng, et al. Experimental study of the aluminized explosive RDX/Al explosion under water[J]. Blasting, 2005,22(2):4-7.

[13] 颜事龙,王尹军.冲击波作用下乳化炸药压力减敏度的表征方法[J].爆炸与冲击,2006,26(5):441-447.
Yan Shi-long, Wang Yin-jun. Characterization of pressure desensitization of emulsion explosive subjected to shock wave[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(5):441-447.

[14] 王尹军,李进军,方宏.乳化炸药密度对其压力减敏的影响[J].爆炸与冲击,2009,29(5):529-534.
Wang Yin-jun, Li Jin-jun, Fang Hong. Influences of emulsion explosive density on its pressure desensitization[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(5):529-534.

Experimental research on pressure desensitization of emulsion explosive sensitized by MgH_2 *

Cheng Yang-fan, Ma Hong-hao, Shen Zhao-wu

(*Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *Anhui, China*)

Abstract: For the first time, MgH_2 powders both as sensitizers and energetic materials in the emulsion explosive was studied on the effects of shock-wave resistance with shock-wave generator and experiments of underwater explosion. Compared with emulsion explosive sensitized by glass microspheres, emulsion explosive sensitized by MgH_2 presents much smaller ratio of pressure desensitization and stronger explosive effect; the microstructure of emulsion explosive was studied with the scanning electron microscope. And the result show that demulsification of emulsion explosive and decrease of effective "hot spot" are key reasons of decrease in detonation pressure of emulsion explosive.

Key words: mechanics of explosion; pressure desensitization; hydrogen storage material; emulsion explosive; sensitizer

---

* Received 29 November 2012; Revised 4 March 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (51134012,51374189,51174183)
Corresponding author: Ma Hong-hao, cyf518@mail.ustc.edu.cn

(责任编辑 丁 峰)