

# 动能弹低速侵彻装甲靶板过载数值模拟

余庆波, 王海福, 俞为民

北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081

**摘要** 数值模拟和实验研究动能弹侵彻装甲靶板作用行为, 初步获得了着速、着角对过载的影响规律。AUTODYN-3D 数值模拟结果表明, 着速、着角对侵彻过载影响明显, 侵彻过载峰值随着速的增加而增大, 随着着角增大而减小, 但变化趋势有所缓和。针对不同速度正侵彻问题进行了实验验证, 数值模拟结果与实验结果较为吻合, 结果均表明, 随着速度的增加, 过载呈现出明显增大的趋势, 且最大过载出现时间为 0.05—0.2ms 范围内。

**关键词** 着速; 着角; 过载

**中图分类号** TJ410.33

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.15.004

## Acceleration Numerical Simulation of Projectile Penetrating 603-typed Armor with Low Speed

YU Qingbo, WANG Haifu, YU Weiming

State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** The behavior studies on projectile penetrating 603-typed armor are carried out both in simulation and experiment. Initial discoveries involving the affect of impact velocity and impact angle on penetration acceleration are obtained. Simulations of AUTODYN-3D hydrocode show that impact velocity and impact angle affect the penetration acceleration significantly. Penetration acceleration increases as impact velocity increases; however it appears a contrary trend as impact angle increases. The witness experiments of 56mm diameter projectile with different impact velocities penetrating 603-typed armor show a quite good agreement with the simulations, and penetration acceleration increases as impact velocity increases, and the maximum acceleration appears in the time range of 0.05—0.2ms.

**Keywords** impact velocity; impact angle; acceleration

### 0 引言

在反装甲目标武器研制中, 防止引信在侵彻时被损坏一直是国内外研究的重点。研究表明, 侵彻过程中产生的极高过载是导致引信失效的关键因素。为此, 国内外各机构致力于探索影响侵彻过载的因素, 并提出了一些涉及着速、着角、动能弹结构形状以及目标介质特性等参数的侵彻过载表达式<sup>[1-7]</sup>。本文针对特定形状动能弹, 在弹靶材料已知的条件下, 采用数值模拟与实验相结合的方法分析着速、着角对动能弹侵彻过载的影响规律, 并获得了一些有应用价值的结论。

### 1 数值计算方法

#### 1.1 材料模型及状态方程

弹靶材料均采用 Shock 状态方程、Johnson-Cook 强度模型和 Johnson-Cook 失效模型描述其动态响应过程。

材料状态方程是用于描述流体静压力、局部密度(或比容)及局部比能(或温度)之间关系的方程, 即压力  $P$  与密度  $\rho$  及比内能  $e$  之间的关系, 一般形式为:  $P=f(\rho, e)$ 。对于低速侵彻问题一般采用 Shock 状态方程。Shock 状态方程表达式为

$$P=P_H+\Gamma\rho(e-e_H)$$

其中,  $P_H$  和  $e_H$  分别为材料冲击 Hugoniot 态的压力和比动能,  $\Gamma$  为 Gruneisen 系数。

这里假设  $\Gamma\rho=\Gamma_0\rho_0$  为常数, 且

$$P_H=\frac{\rho_0 c_0^2 \mu (1+\mu)}{[1-(s-1)\mu]^2} \quad e_H=\frac{1}{2} \frac{\rho_H}{\rho_0} \left( \frac{\mu}{1+\mu} \right)$$

其中,  $\rho_0$  和  $c_0$  分别为固体材料初始密度和声速,  $\mu$  为固体材料的压缩比,  $s$  为冲击 Hugoniot 参数。

Johnson-Cook 强度模型适用于应变率变化范围较大, 主要考虑温度和应变率对材料屈服应力作用, 不考虑外部压力

收稿日期: 2012-02-12; 修回日期: 2012-05-10

作者简介: 余庆波, 讲师, 研究方向为新概念弹药与高效毁伤技术, 电子信箱: yuqb@bit.edu.cn; 王海福(通信作者), 教授, 研究方向为新概念弹药与高效毁伤技术、空间攻防技术, 电子信箱: wanghf@bit.edu.cn

环境作用的情况。Johnson-Cook 屈服应力为

$$\sigma_y=[A+B\varepsilon_p^n][1+C\lg\varepsilon_p^*][1-T_H^m]$$

其中,  $\sigma_y$  为材料屈服强度, Pa;  $\varepsilon$  为材料应变;  $\dot{\varepsilon}$  为应变率,  $s^{-1}$ ;  $T$  为温度, K;  $\varepsilon_p$  为等效塑性应变; 参考应变率  $\varepsilon_0^*=1s^{-1}$ ;  $A$ 、 $B$ 、 $n$ 、 $C$ 、 $m$  为材料常数,  $A$  为材料在准静态下的屈服强度,  $B$ 、 $n$  为应变硬化的影响,  $C$  为应变率敏感指数,  $m$  为温度软化系数; 相应温度  $T_H=(T-T_{room})/(T_{melt}-T_{room})$ , 其中  $T_{room}$  为室温,  $T_{melt}$  为熔点。

Johnson 和 Cook 还开发了与三轴性、应变率及温度效应有关的一种损伤失效准则, 该准则是目前应用较为广泛的专用失效准则。Johnson-Cook 模型定义的单元损伤为

$$D=\sum\frac{\Delta\varepsilon_p}{\varepsilon_f}$$

其中,  $D$  为损伤参数,  $D$  取值范围为 0—1, 初始时  $D=0$ , 当  $D=1$  时材料失效;  $\Delta\varepsilon_p$  为一个时间步的塑性应变增量;  $\varepsilon_f$  为当前时间步的应力状态、应变率和温度下的破坏应变。破坏应变  $\varepsilon_f$  的表达式为

$$\varepsilon_f=[D_1+D_2\exp(D_3\sigma^*)](1+D_4\ln\dot{\varepsilon}^*)(1+D_5T_H^n)$$

其中,  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$  和  $D_5$  为材料参数;  $\sigma^*=p/\sigma_{eff}=-\sigma_{kk}/\sigma_{eff}=-R_{\sigma}$ ,  $P$  为压力,  $\sigma_{eff}$  为等效应力, 为应力三轴度;  $\dot{\varepsilon}^*=\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$  为无量纲塑性应变率,  $\dot{\varepsilon}_0$  为参考塑性应变率。

1.2 计算模型

采用 AUTODYN-3D 程序 Lagrange 算法对动能弹侵彻装甲靶板作用行为进行数值模拟, 计算模型如图 1 所示, 参考点设置如图 2 所示。根据模型的对称性, 建立 1/2 模型, 通过施加对称边界条件保证计算的准确性。综合考虑计算的准确性与经济性, 将弹靶作用区域网格划分较细, 其他区域根据远近而逐渐稀疏, 整个模型共计网格 232928 个。模拟动能弹分为两个部分: 以 30CrMnSiNi2A 为材质的弹芯部分和以

Al7039 为材质的弹托部分。弹芯部分主要用于侵彻, 弹托部分主要考虑配合 120mm 迫炮发射平台而进行设计。全弹重 6kg, 长 217.5mm, 弹芯直径 56mm, 弹托直径 120mm。靶板采用国产调质 603 装甲钢, 厚度为 50mm。计算采用的弹靶材料主要参数列于表 1。按某动能侵彻弹设计要求, 着速范围为 230—280m/s, 着角范围为 0—20°。

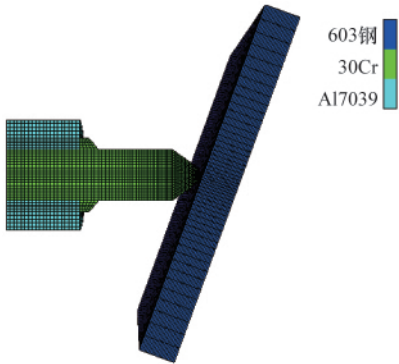


图 1 网格模型

Fig. 1 Finite elements model

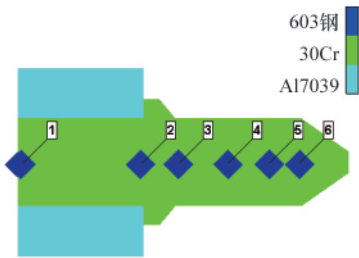


图 2 参考点设置

Fig. 2 Gauss point setting

表 1 材料模型

Table 1 Materials model

| 弹靶参数 | 强度模型         | 失效模型         | 状态方程  | $\rho/(kg\cdot m^{-3})$ | 剪切模量/GPa | 屈服强度/GPa |
|------|--------------|--------------|-------|-------------------------|----------|----------|
| 装甲靶板 | Johnson-Cook | Johnson-Cook | Shock | 7.85                    | 76       | 0.95     |
| 弹芯   | Johnson-Cook | Johnson-Cook | Shock | 7.85                    | 80       | 1.6      |
| 弹托   | Johnson-Cook | Johnson-Cook | Shock | 2.77                    | 27.6     | 0.3      |

2 数值模拟结果

2.1 230m/s 时数值模拟结果

以着角为 15°时的动能弹侵彻装甲靶板为例说明数值模拟结果。230m/s 着速下动能弹侵彻装甲靶板应力变化如图 3 所示。考虑到引信一般安放在弹体后部, 这里只给出 1# 参考点与 2# 参考点速度随时间变化曲线以及过载(加速度)随时间变化曲线, 分别如图 4、图 5 所示。

从图 3 可以看出, 随着动能侵彻深度的逐渐增加, 动能弹受到的侵彻阻力也逐渐增加, 此图显示的阻力还未达到最

大, 最大阻力出现在弹头全部进入靶板时刻, 对于弹头无法全部进入靶板的动能弹, 最大阻力为侵深最大时的阻力。从速度-时间曲线可以看出, 在 0.3ms 内动能弹速度从 230m/s 降到 25m/s, 而从 25m/s 降到 0 约用时 0.35ms。由此可推断, 动能弹最大过载出现在侵彻过程的前 0.3ms。从过载-时间曲线可以看出, 在 230m/s 速度下, 动能弹受到的最大过载约为 9.2 万  $g$ , 最大过载出现时间在 0.05—0.2ms 之间。在 0.4ms 以后, 过载曲线存在轻微波动, 这主要是由于侵彻着角不为 0, 动能弹在侵彻过程的后半段与靶板摩擦所致。

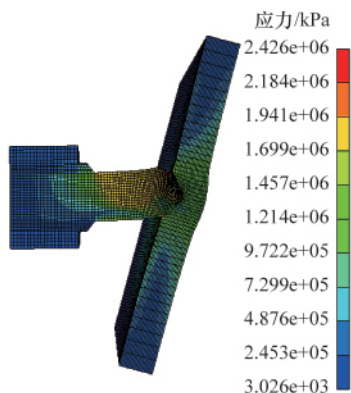


图3 230m/s 着速、15°着角的数值模拟结果  
Fig. 3 Simulation results with velocity of 230m/s and impact angle of 15°

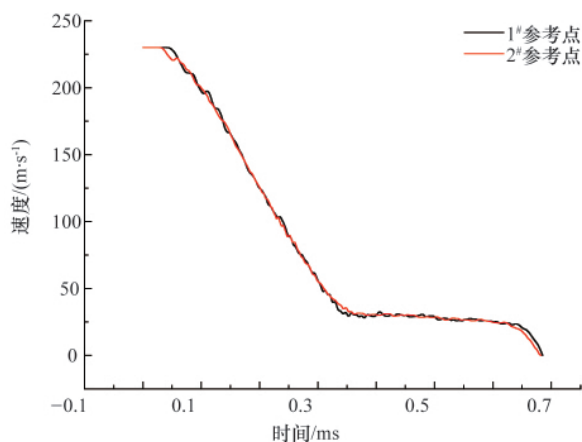


图4 230m/s 着速 15°着角下弹体速度随时间变化曲线  
Fig. 4 Curve of velocity vs time with velocity of 230m/s and impact angle of 15°

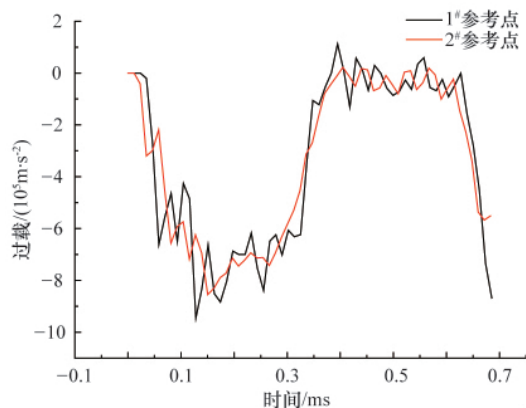


图5 230m/s 着速 15°着角下过载随时间变化曲线  
Fig. 5 Curve of acceleration vs time with velocity of 230m/s and impact angle of 15°

## 2.2 250m/s 时数值模拟结果

250m/s 着速下,弹体速度随时间变化曲线以及过载随时间变化曲线分别如图6、图7所示。从速度-时间曲线可以看出,在0.3ms内动能弹速度从250m/s降到28m/s,0.3ms后,动能弹速度从28m/s缓慢降到0,由此可推断,动能弹最大过载

出现在侵彻过程的前0.3ms。从过载-时间曲线可以看出,在250m/s速度下,动能弹受到的最大过载约为10.2万g,最大过载出现时间在0.05—0.2ms之间。

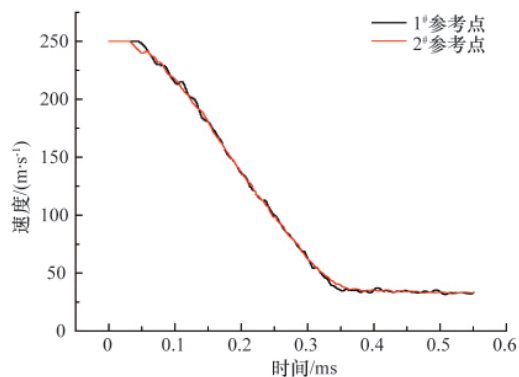


图6 250m/s 着速 15°着角下弹体速度随时间变化曲线  
Fig. 6 Curve of velocity vs time with velocity of 250m/s and impact angle of 15°

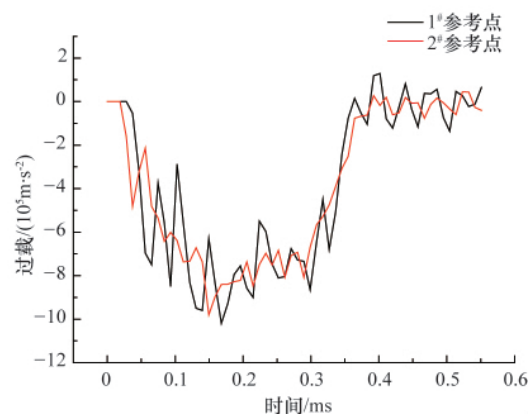


图7 250m/s 着速 15°着角下过载随时间变化曲线  
Fig. 7 Curve of acceleration vs time with velocity of 250m/s and impact angle of 15°

## 2.3 280m/s 时数值模拟结果

280m/s 着速下,弹体速度随时间变化曲线以及过载随时间变化曲线分别如图8、图9所示。从速度-时间曲线可以看

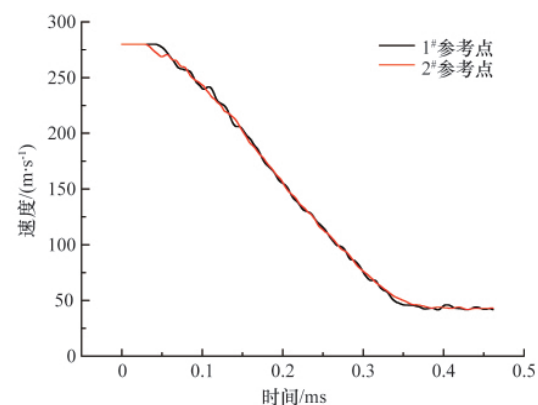


图8 280m/s 着速 15°着角下弹体速度随时间变化曲线  
Fig. 8 Curve of velocity vs time with velocity of 280m/s and impact angle of 15°

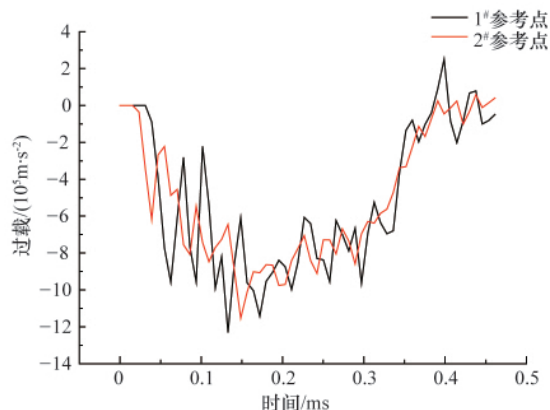


图9 280m/s 着速 15°着角下过载随时间变化曲线  
Fig. 9 Curve of acceleration vs time with velocity of 280m/s and impact angle of 15°

出,在 0.35ms 内动能弹速度从 280m/s 降到 40m/s,0.35ms 后,动能弹速度从 40m/s 缓慢降到 0,由此可推断动能弹最大过载出现在侵彻过程的前 0.35ms。从过载-时间曲线可以看出,在 280m/s 着速下,动能弹受到的最大过载约为  $12 \times 10^5 g$ ,最大过载出现时间在 0.05—0.2ms 之间。

从以上数值模拟结果可知,不同着速下最大过载出现的时间范围基本一致,且弹体速度降到一定大小时会出现一个短暂的恒定速度,此时是动能弹侵深最大,即将反弹的时刻。在恒定时刻过后,动能弹将获得一个反向速度,使得动能弹弹离靶板。

### 3 数值模拟结果分析

在 230—280m/s 着速范围和 0—20°着角范围内,对动能弹侵彻装甲靶板作用行为进行数值模拟,获得不同着速下,过载随着角变化曲线,如图 10 所示。从图 10 可以看出,过载随着速的减小,呈明显下降趋势;随着角的增加,过载也呈明显下降趋势。另外,随着角的增加,不同着速下过载变化趋势有所缓和。

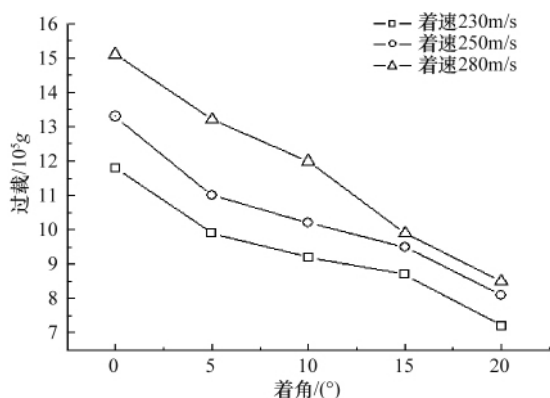


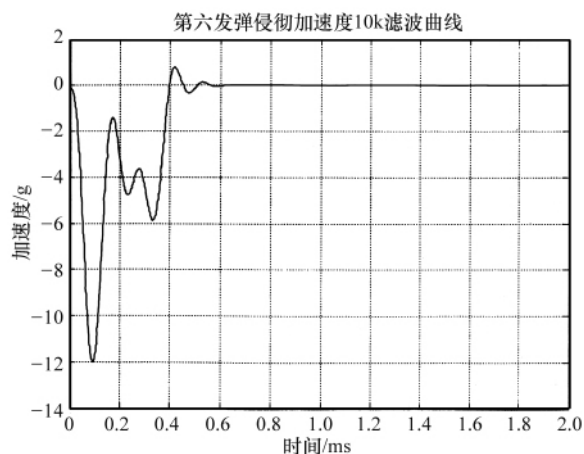
图 10 过载随着角变化曲线  
Fig. 10 Curve of acceleration vs impact angle

### 4 验证实验

基于以上数值模拟结果,进行了动能弹设计和加工,并在 230,250 和 280m/s 着速下动能弹垂直侵彻装甲靶板作用行为进行了验证实验,典型实验结果及所测到的过载曲线如图 11 所示,实验值与数值模拟结果比较列于表 2。从表 2 可以看出,数值模拟结果与实验结果较为吻合,均显示最大过载出现在 0.05—0.2ms 之间,且峰值为  $12 \times 10^5 g$  左右。



(a) 实验弹  
(a) Experimental projectile



(b) 典型过载测试曲线  
(b) Typical acceleration curve

图 11 典型实验结果

表 2 实验结果与数值模拟结果比较

Table 2 Experimental results comparing with numerical results

| 序号 | 着速/(m·s <sup>-1</sup> ) | 最大过载/10 <sup>5</sup> g |      |
|----|-------------------------|------------------------|------|
|    |                         | 实验值                    | 模拟值  |
| 1# | 230                     | 12.0                   | 11.8 |
| 2# | 250                     | 13.5                   | 13.3 |
| 3# | 280                     | 15.5                   | 15.1 |

### 5 结论

采用 AUTODYN-3D 程序对动能弹低速侵彻装甲靶板作

用行为进行了数值模拟,获得了着速、着角对过载的影响规律,并进行了不同着速条件下过载验证实验,主要结论如下。

(1) 着速对侵彻过载具有显著影响,随着着速的增加,过载出现明显的上升趋势。在侵彻过程中,将出现一个恒定速度,此时动能弹侵深最大,在维持一定时间后,速度迅速反弹,动能弹脱离靶板。

(2) 着角对侵彻过载具有重要影响,随着着角的增加,过载逐渐减小,且过载随着速的变化也有所缓和。

(3) 数值模拟与实验结果较为吻合,均表明,不同速度下最大过载出现时间约为 0.05—0.2ms。

#### 参考文献 (References)

- [1] Dey S, Børvik T, Hopperstad O S, *et al.* The effect of target strength on the perforation of steel plates using three different projectile nose shapes [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, 30(8-9): 1005-1038.
- [2] Dey S, Børvik T, Hopperstad O S, *et al.* On the influence of constitutive

relation in projectile impact of steel plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(3): 464-486.

- [3] Børvik T, Hopperstad O S, Langseth M, *et al.* Effect of target thickness in blunt projectile penetration of Weldox 460 E steel plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28(4): 413-464.
- [4] Rusinek A, Rodríguez-Martínez J A, Arias A, *et al.* Influence of conical projectile diameter on perpendicular impact of thin steel plate [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75(10): 2946-2967.
- [5] Arias A, Rodríguez-Martínez J A, Rusinek A. Numerical simulations of impact behaviour of thin steel plates subjected to cylindrical, conical and hemispherical non-deformable projectiles [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75(6): 1635-1656.
- [6] Børvik T, Langseth M, Hopperstad O S, *et al.* Ballistic penetration of steel plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1999, 22(9-10): 855-886.
- [7] 程兴旺, 王富耻, 李树奎, 等. 不同头部形状长杆弹侵彻过程的数值模拟[J]. 兵工学报, 2007, 28(8): 930-933.
- Cheng Xingwang, Wang Fuchi, Li Shukui, *et al.* *Acta Armamentarii*, 2007, 28(8): 930-933.

(责任编辑 代丽)

· 学术动态 ·



## “中国地球物理学会第二十八届学术年会”征文

中国地球物理学会举办“中国地球物理学会第二十八届学术年会”拟定于 2012 年 10 月 17—20 日在北京市召开。

征文范围如下。(1) 综合专题: *Advances in the Geophysics of Asia*、中国大陆深部地球物理探测与 SinoProbe 进展;(2) 地球物理场理论及应用: 古地磁学与全球变化、电磁方法研究与应用、流体地球科学、地震预测、矿产资源形成和分布;(3) 地球动力学: 地球内部结构及其动力学、岩石圈结构及大陆动力学;(4) 地震学: 地震学与地震构造学、特大地震发震构造研究、区域尺度重复震源探测、计算地震学研究进展、地球介质各向异性;(5) 自然灾害: 中国巨灾、灾害链综合预测与减灾对策;(6) 地球物理实验、观测与信息技术: 信息技术与地球物理、地球物理仪器与观测技术;(7) 勘探地球物理学: 油气田与煤田地球物理勘探、储层地球物理、地质调查与矿产勘查地球物理、地震波传播与成像探查;(8) 工程与环境地球物理学、工程、环境及公共安全地球物理;(9) 大地测量学: 空间大地测量、地壳运动与天文地球动力学、地球重力场变化与在地学中的应用、InSAR 技术、卫星热红外与地壳运动;(10) 空间物理学: 地磁与高空物理、空间天气与人类活动;(11) 海洋地球物理学: 海洋地球物理, 等。

论文截稿日期: 2012 年 6 月 20 日。

联系电话: 010-68729347。

通信地址: 北京市海淀区民族学院南路 5 号 中国地球物理学会 (100081)。

会议网站: <http://www.cgs.org.cn/>。