

镁合金靶板抗弹性能数值模拟

姬鹏远^{1,2}, 王海福¹, 余庆波¹

1. 北京理工大学; 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081

2. 中国人民解放军 63963 部队, 北京 100072

摘要 质量是影响兵器装备实现战场快速反应能力的主要因素之一, 因此现代高技术战争对兵器装备的质量指标提出了极为苛刻的要求。发达国家均投入巨资研究轻质结构材料以及与之配套的先进制造技术, 以期减轻兵器装备质量, 提高兵器装备的机动性, 增加携弹量和野战辅助系统用量, 提高士兵战场生存和作战能力。镁合金由于自身优点, 成为兵器轻量化的理想材料。本文采用数值模拟方法, 对 AZ31B 镁合金靶板的抗弹性能进行数值模拟研究, 建立了 3 种不同类型侵彻体侵彻靶板模型, 并给出了镁合金靶板被侵彻贯穿的一般过程。在铝合金和钢靶板面密度相同情况下, 比较分析镁合金靶板的抗弹性能。结果表明, 镁合金的抗弹性能较好, 同时其抗弹性能与射弹参数、靶板厚度密切相关。

关键词 镁合金; 抗弹性能; 数值模拟

中图分类号 TJ410.33

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)05-0055-05

Numerical Analysis of Anti-penetration Property of Magnesium Alloy

Ji Pengyuan^{1,2}, Wang Haifu¹, Yu Qingbo¹

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

2. No. 63963 Troop of PLA, Beijing 100072, China

Abstract The weight of weapons is a very important factor in the quick response capability in battlefield, it has paid much attention and strict requirements are posed in modern high technology warfare. The developed countries have invested huge amount of money in studies on lightweight structural materials as well as the advanced manufacturing technology to reduce the weight of weapons and equipment, improve their mobility, increase the number of bombs carrying and the amount of the field aid system and even improve the survival and combat capability of soldiers and weapons in battlefield. Magnesium alloy is an ideal material to be used in reducing the weight of weapons. In accordance with the ballistic performance of AZ31B magnesium alloy, three types of projectile penetration target plate models are established by numerical simulation. The general process of magnesium alloy being perforated is studied. The ballistic performance of magnesium alloy is analyzed comparing with aluminum alloy and steel made target plates under the same area density. It is shown that the ballistic performance is closely connected with the penetrator parameter and the target thickness.

Keywords magnesium alloy; ballistic performance; numerical simulation

0 引言

随着反装甲威胁日益严重, 防护装甲的重量也在不断增加。近十年来, 装甲车辆的重量提高了 15%~20%, 如美军 M1 坦克已由初始的 54t 升至 64t。过重的防护装甲已成为影响装甲车辆机动性能和有效运载的不利因素。不断提升合金程度以减轻重量, 成为当今车辆装甲设计的发展趋势。镁合金是目前最轻的金属结构材料, 具有低密度、高比强度、高比模

量、良好的阻尼减震特性以及优异的高应变率吸能特性等一系列优点。同时, 中国镁资源丰富, 已探明的镁储量约 36 亿 t, 占全球镁储量的 1/3。在当前能源紧张、武器系统减重迫切的背景下, 镁合金及其复合材料可有望代替铝合金等, 成为新型高性能装甲材料。当前, 美国陆军研究实验室和美国北美镁铝合金有限公司正合作制定 AZ31B 镁合金的抗弹性能标准, 探索镁合金的弹道破坏机制, 同时北美镁铝合金有限公司正

收稿日期: 2009-11-19

作者简介: 姬鹏远, 博士研究生, 研究方向为新概念战斗部技术, 电子信箱: jpy_2009@sohu.com; 王海福 (通信作者), 教授, 研究方向为高效毁伤技术、新概念战斗部技术、空间攻防技术, 电子信箱: wanghf@bit.edu.cn

在对超高强度镁合金 Elektron 675 的抗弹性能进行研究^[1-4]。本文利用 AUTODYN-2D 软件平台,就镁合金在高应变率载荷条件下的破坏形式进行数值模拟,并结合 5083 铝合金和 4340 钢,比较分析镁合金的抗弹性能。

1 数值方法及模型

AZ31B 镁合金化学成分见表 1。

表 1 AZ31B 镁合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of AZ31B magnesium alloy

元素	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Fe	Mg
质量百分含量/%	2.5~3.5	0.7~1.3	0.2	0.3	0.05	0.005	0.005	余量

采用 AUTODYN-2D 软件无网格光滑粒子动力学 (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) 方法进行数值模拟。目前在计算力学中,有限单元法占据相当重要的地位,几乎应用到所有领域,但在计算大变形问题时,如动态断裂、冲压成型、高速碰撞等,有限元方法遇到了困难,原因是发生大变形时,网格畸变过大,使得计算中断。有限元方法通常采用单元侵蚀方法和重分网格技术来克服这种困难,但单元侵蚀方法本身缺乏物理机制,纯粹是为了使计算进行下去的一种数值手段;而重分网格技术在节点重新分配物理量时,很难保证系统动量、能量守恒,因而导致计算的精度下降。SPH 方法是一种无网格 Lagrange 计算方法,不需要将节点连成单元,所以不存在计算大变形时遇到的困难,且粒子本身是

Lagrange 质点,可以跟踪物质运动,记录材料的变形历史和界面运动,因此 SPH 方法适用于高速碰撞问题。

弹靶材料均采用 Shock 状态方程,AZ31B 镁合金采用 Von Mises 强度模型,其余材料采用 Johnson-Cook 强度模型。材料状态方程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 ρ 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

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

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

$$P_H=\frac{\rho_0c_0^2\mu(1+\mu)}{[1-(s-1)\mu]^2}, e_H=\frac{1}{2}\frac{\rho_H}{\rho_0}\left(\frac{\mu}{1+\mu}\right)$$

式中, ρ_0 、 c_0 分别为固体材料初始密度及声速; μ 为固体材料的压缩比; P_H 、 e_H 分别为固体材料冲击 Hugoniot 态的压力与比内能; Γ 为 Gruneisen 系数。Von Mises 强度模型简单方便,只需知道弹轴压缩或拉伸下的屈服应力,就能确定复杂载荷条件下发生塑性变形材料的应力水平。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,不考虑外部压力环境作用的情况。Johnson-Cook 屈服应力表述如下

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

式中, σ_y 为材料屈服应力; ε 为材料应变, $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; T 为温度; ε_p 为等效塑性应变;参考应变率 $\varepsilon_p^*=1s^{-1}$; A 、 B 、 n 、 C 和 m 为材料常数, A 为材料在准静态下的屈服强度, B 和 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 $T_H=(T-T_{room})/(T_{melt}-T_{room})$, T_{room} 为室温, T_{melt} 为熔点^[5-6]。材料参数列于表 2。

表 2 AUTODYN-2D 数值模拟输入参数

Table 2 Input data for AUTODYN-2D simulation

材料	密度 $\rho/(g\cdot cm^{-3})$	剪切模量 E_s/GPa	A/MPa	B/MPa	n	C	m	T_{melt}/K
靶板材料	AZ31B 镁合金	1.78	16.5	220	—	—	—	—
	5083 铝合金	2.7	27	167	596	0.551	0.001	893
	4340 钢	7.83	77	792	510	0.26	0.014	1793
射弹材料	钨合金	17	160	1506	177	0.12	0.016	1723
	30CrMnSi 钢	7.85	80	1600	275	0.36	0.022	1811

采用 3 种类型侵彻体对 AZ31B 镁合金、5083 铝合金和 4340 钢靶板进行侵彻计算,SPH 计算模型如图 1 所示。

2 仿真结果及分析

2.1 7.62mm 钨合金穿甲弹侵彻靶板

侵彻体规格为直径 7.62mm 钨合金穿甲弹,弹长 22.24mm,着速 500~900m/s,AZ31B 镁合金靶板厚度 15mm,面密度相同情况下,铝合金靶板和钢靶板厚度分别为 9.49 和 3.41mm。在 500m/s 速度下侵彻镁合金靶板不同时刻状态如

图 2 所示。可以看出,随着侵彻的深入,弹体头部靶板形成冲塞,同时,靶板发生层裂而有部分靶体脱落,在靶板背面形成碗形缺口。

穿甲弹贯穿铝合金和钢靶板状态如图 3 所示,由于钢靶板较薄,靶板塑性变形范围较大,形成盘形凹陷。穿甲弹在不同速度下贯穿 3 种靶板的剩余速度列于表 3,通过比较射弹击穿不同靶板的剩余速度来比较靶板的抗弹性能,可以看出,在不同着速下,相对于铝合金及钢靶板,穿甲弹贯穿镁合金靶板的剩余速度略低。

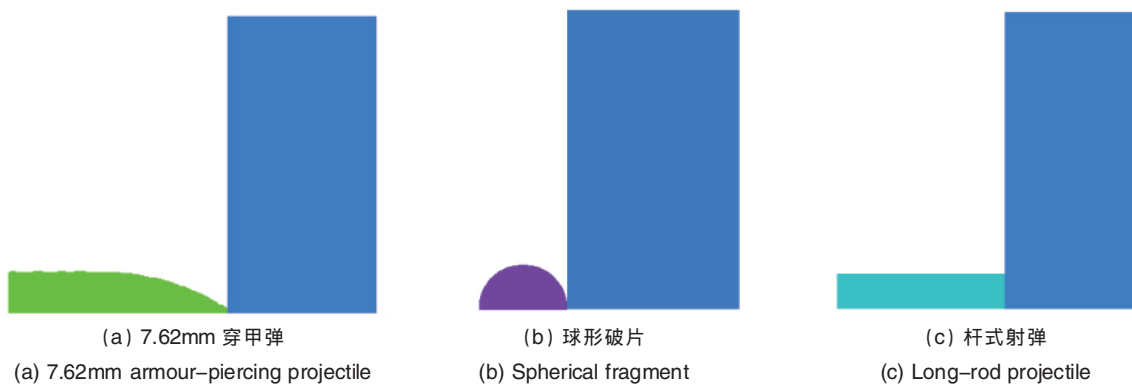


图 1 SPH 计算模型区域定义
Fig. 1 Computational model of SPH

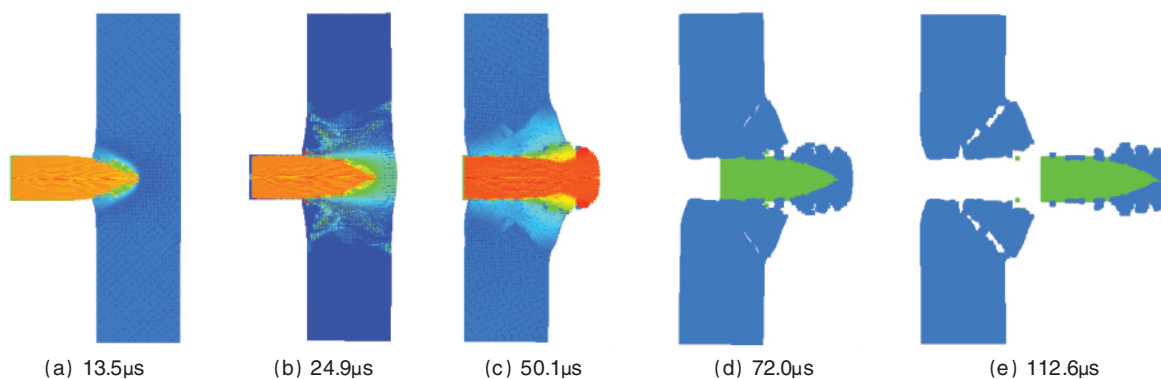


图 2 穿甲弹侵彻镁合金靶板不同时刻模拟结果
Fig. 2 Simulation results of armour piercer penetrating a magnesium alloy target at different moments

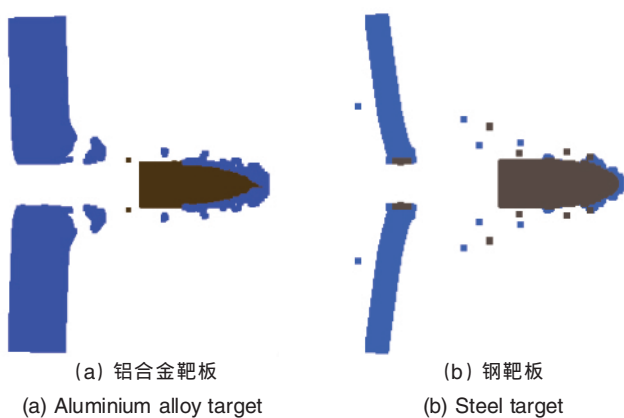


图 3 穿甲弹贯穿靶板模拟结果
Fig. 3 Simulation results of armour piercer perforating target plates

2.2 球形破片侵彻靶板

侵彻体规格为直径 10mm 的 30CrMnSi 钢球,侵彻速度为 700~1100m/s, AZ31B 镁合金靶板厚度 20mm, 面密度相同情况下, 铝合金靶板和钢靶板厚度分别为 13.19mm 和 4.55mm。球形破片在 1000m/s 速度下侵彻镁合金靶板的不同时刻状态如图 4 所示。可以看出,破片头部形成冲塞,镁合金靶板前侧

表 3 穿甲弹贯穿不同材料靶板剩余速度 (单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
Table 3 Residual velocities of armour piercer perforating targets of different materials (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

靶板材料	着速 500m/s	着速 600m/s	着速 700m/s	着速 800m/s	着速 900m/s
AZ31B 镁合金	352	482	596	717	819
5083 铝合金	382	488	601	715	825
4340 钢	392	504	611	720	829

发生径向延展,背面由于拉伸波作用而使部分靶体脱落。球形破片贯穿铝合金和钢靶板状态如图 5 所示, 比较而言,侵彻钢靶板的球形破片塑性变形较大。球形破片在不同速度下贯穿 3 种靶板的剩余速度列于表 4,可以看出,当球形破片以 700m/s 速度侵彻靶板时, 镁合金和铝合金抗弹性能相差不大,均优于钢靶板。随着破片速度提高,钢靶板的抗弹性能优于镁合金和铝合金靶板。

2.3 钝头射弹侵彻靶板

侵彻体规格为长 50mm, 直径 20mm 的 30CrMnSi 钝头柱形射弹, 侵彻速度 800~1600m/s AZ31B 镁合金靶板厚度 40mm,面密度相同情况下, 铝合金靶板和钢靶板厚度分别为

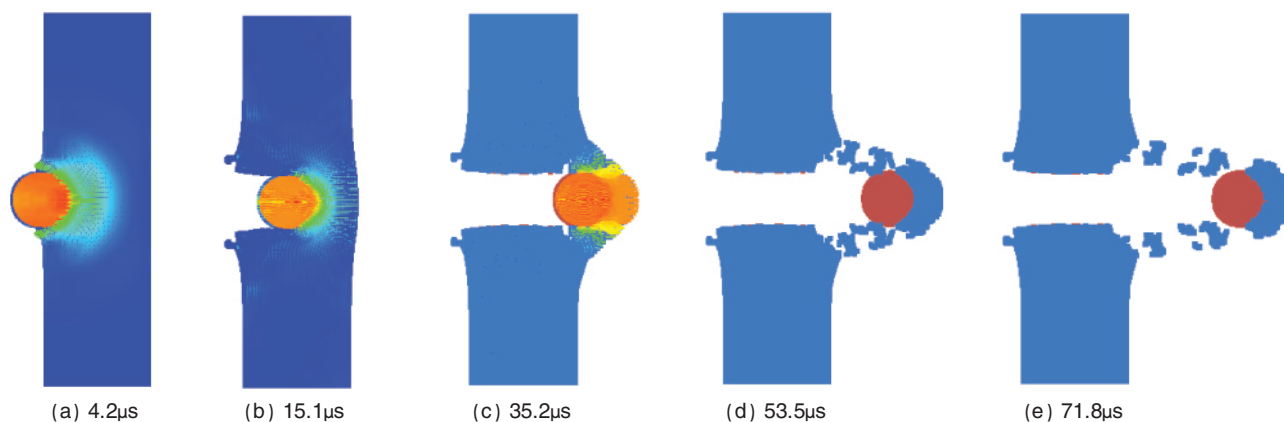


图 4 球形破片贯穿镁合金靶板不同时刻模拟结果

Fig. 4 Simulation results of spherical fragment penetrating magnesium alloy target at different moments

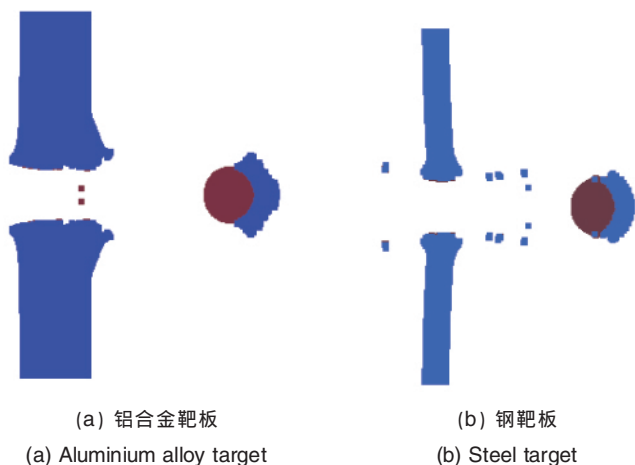


图 5 球形破片贯穿靶板模拟

Fig. 5 Simulation results of spherical fragment perforating

26.37mm 和 9.09mm。在 1400m/s 着速下侵彻镁合金靶板的不同时刻状态如图 6 所示,可以看出,弹体头部受到侵蚀,脱落的靶块在弹体前方形成冲塞,靶板有层裂现象发生并有部分

表 4 球形破片侵彻不同靶板剩余速度 (单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Table 4 Residual velocities of spherical fragment perforating targets of different materials (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

靶板材料	着速 700m/s	着速 800m/s	着速 900m/s	着速 1000m/s	着速 1100m/s
AZ31B 镁合金	209	363	473	560	687
5083 铝合金	208	332	455	581	666
4340 钢	236	341	429	487	549

靶体脱落。钝头射弹贯穿铝合金和钢靶板状态如图 7 所示,比较而言,侵彻钢靶板的钝头射弹受侵蚀较严重。球形破片在不同速度下贯穿 3 种靶板的剩余速度列于表 5,可以看出,在 800m/s 侵彻速度下,钢靶板的抗弹性能较好,随着侵彻速度提高,在 1600m/s 侵彻速度下,铝合金靶板和钢靶的抗弹性能相当,而镁合金靶板的抗弹性能稍差一些。

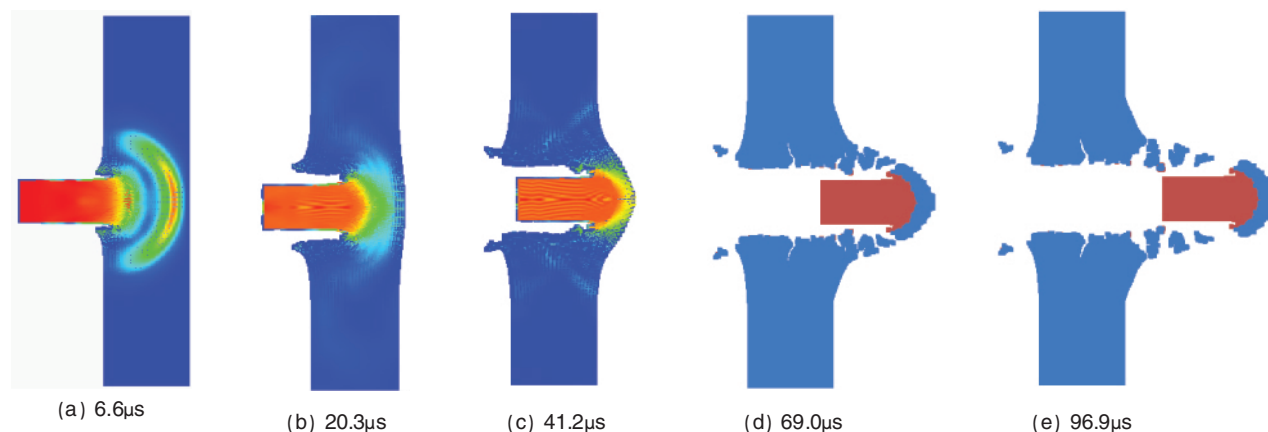


图 6 钝头射弹侵彻镁合金靶板不同时刻模拟结果

Fig. 6 Simulation results of blunt projectile penetrating magnesium alloy target at different moments

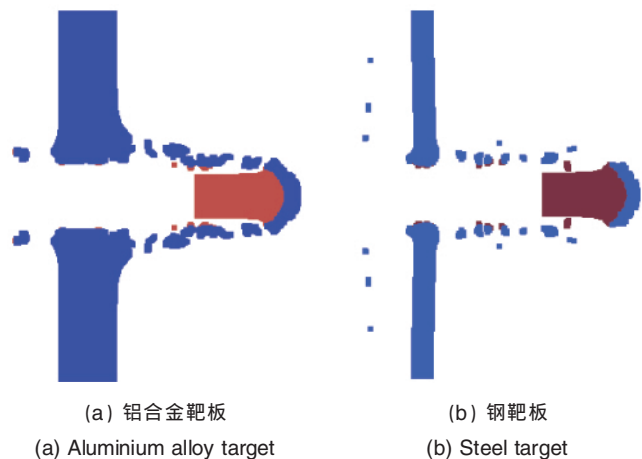


图 7 钝头射弹贯穿靶板模拟
Fig. 7 Simulation results of blunt projectile perforating targets

表 5 钝头射弹侵彻不同靶板剩余速度 (单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
Table 5 Residual velocities of blunt projectile perforating different targets of material (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

靶板材料	着速 800m/s	着速 1000m/s	着速 1200m/s	着速 1400m/s	着速 1600m/s
AZ31B 镁合金	598	763	962	1131	1313
5083 铝合金	573	734	915	1094	1270
4340 钢	548	720	897	1082	1272

3 结论

由数值模拟结果可以看出,在不同类型侵彻体、不同侵

彻速度以及不同靶板厚度情况下, 镁合金抗弹性能不尽相同。总体来说,在面密度相同情况下,镁合金的抗弹性能与 4340 钢和 5083 铝合金比较相差不大。需要强调的是,以上数值计算结果是针对中等强度的商用镁合金得出的,而不是经过优化的抗弹镁合金,因此,经过处理以提高镁合金强度以及抗弹试验研究是十分必要的。

参考文献 (References)

- [1] 才鸿年, 谭成文, 王富耻, 等. 装甲用镁合金抗弹性能表征体系探讨[J]. 中国工程科学, 2006, 8(2): 30-33.
Cai Hongnian, Tan Chengwen, Wang Fuchi, et al. *Engineering Science*, 2006, 8(2): 30-33.
- [2] 纪伟, 范亚夫. 镁合金靶板在球形弹丸侵彻过程中的破坏分析 [J]. 兵器材料科学与工程, 2009, 32(2): 89-92.
Ji Wei, Fan Yafu. *Ordnnance Material Science and Engineering*, 2009, 32 (2): 89-92.
- [3] 张星, 张治民, 李保成. AZ31 镁合金动态力学行为实验研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(4): 226-227.
Zhang Xing, Zhang Zhimin, Li Baocheng. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2007, 27(4): 226-227.
- [4] El-Magd E, Abouridouane M. Characterization, modelling and simulation of deformation and fracture behaviour of the lightweight wrought alloys under high strain rate loading[J]. *Int J Impact Eng*, 2006, 32: 741-758.
- [5] Dey S, Borvik 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.
- [6] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [C]. Proc 7th International Symposium on Ballistics. 1983: 541-547.

(责任编辑 代丽)

·学术动态·



“2010 年全国软件与应用 学术会议”征文

由中国计算机学会系统软件专业委员会和软件工程专业委员会联合主办, 苏州大学和中创软件工程股份有限公司承办的“2010 年全国软件与应用学术会议(NASAC2010)”将于 2010 年 11 月 4—6 日在苏州举行。

现面向相关科技工作者征文,会议议题如下:需求工程;构件技术与软件复用;面向对象与软件 Agent;软件体系结构与模式;软件开发方法及自动化;软件过程管理与改进;软件质量、测试与验证;软件再工程;软件工具与环境;软件理论与形式化方法;操作系统;软件中间件与应用集成;分布式系统及应用;软件语言与编译;软件标准与规范;软件技术教育;计算机应用软件。

论文征稿截止日期:2010 年 7 月 1 日。

联系方式:苏州大学计算机科学与技术学院(215006),章晓芳,陈冬火;电话:13814866951。