

文章编号: 1001-1455(2009)02-0137-06

用 HJC 本构模型模拟混凝土 SHPB 实验*

巫绪涛, 孙善飞, 李和平

(合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 运用 Holmquist-Johnson-Cook (HJC) 本构模型对混凝土的 SHPB 实验进行了数值模拟。解决了罚函数算法中罚因子合理数值的选取问题。利用模拟结果按 SHPB 两波法重构了试样的应力应变曲线。分析了混凝土材料的 SHPB 实验得到应力应变曲线的有效段范围和各段的力学规律。通过比较实际混凝土材料 SHPB 实验和数值模拟得到的应力应变曲线, 发现两者体现的力学行为很相似, 即 HJC 模型是描述该类材料的一种合理本构模型。模拟了试样不同平行度公差下的 SHPB 实验, 发现在一定应变率范围内其影响程度远大于试样应力(应变)不均匀性。

关键词: 固体力学; 应力应变曲线; HJC 模型; 混凝土; SHPB 实验

中图分类号: O347.4

国标学科代码: 130 · 1540

文献标志码: A

1 引 言

霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, 简称 SHPB)是研究材料高应变率下力学行为的一种最有效的实验装置^[1]。目前, 用该装置进行混凝土、岩石类脆性材料的研究成为该领域的热点之一^[2-3]。对于混凝土类的 SHPB 实验存在的问题主要有: (1) 关于实验有效性的争论, 由于采用大尺寸试样满足材料均质性要求以及混凝土类材料本身具有的小破坏应变的力学特性, 导致实验过程中相当长的时间内, 试样的应力(应变)存在一定程度的非均匀性^[4-5]; (2) 实验得到的一维应力应变关系用何种本构模型来描述, 并最终应用到数值模拟中^[6]。T. J. Holmquist 等^[7]在 Ottosen 模型中引入了应变率的影响, 提出了一种率相关损伤型本构模型, 用来计算混凝土高应变率下的大变形问题, 称为 Holmquist-Johnson-Cook 模型(简称 HJC 模型)。由于该模型在描述混凝土压缩损伤方面较成功, 已被 Ls-dyna 程序引入, 且适合拉格朗日和欧拉算法, 使用方便, 因此得到众多学者的关注。本文中通过使用该模型对混凝土材料的 SHPB 实验进行模拟, 探讨 HJC 模型描述一维应力状态下混凝土率相关本构的可行性, 验证混凝土 SHPB 实验的有效性。

2 HJC 模型简介

HJC 模型采用多孔材料的 3 段式状态方程来描述混凝土压力 p 与体积应变 μ 的关系(如图 1 所示): (1) 线弹性阶段; (2) 塑性变形阶段(孔洞逐渐排除); (3) 密实材料 Hugoniot 曲线。

(1) 线弹性阶段, $p < p_c$ 。加载或卸载段

$$p = K_e \mu \quad K_e = p_c / \mu_c \quad (1)$$

式中: K_e 为体积模量, p_c 和 μ_c 分别为单轴压缩实验的压碎体压力和压碎体积应变。

(2) 塑性变形阶段, $p_c \leq p \leq p_1$ 。加载段

$$p = p_1 + (p_1 - p_c)(\mu - \mu_1) / (\mu_1 - \mu_c)$$

式中: p_1 为压实压力, μ_1 为压实体积应变。卸载段

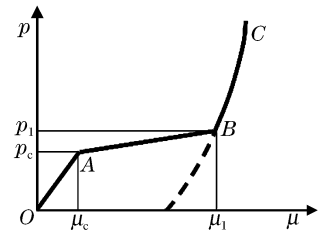


图 1 混凝土压力-体积应变曲线

Fig. 1 Pressure-volumetric strain curve of concrete

* 收稿日期: 2007-11-13; 修回日期: 2008-04-17

作者简介: 巫绪涛(1971—), 男, 博士研究生。

$$p - p_{\max} = [(1 - F)K_e + FK_1](\mu - \mu_{\max}) \quad F = \frac{\mu_{\max} - \mu_c}{\mu_1 - \mu_c}$$

式中: K_1 是塑性体积模量, p_{\max} 和 μ_{\max} 是卸载前达到的最大体积压力和体积应变。

(3) 完全密实阶段, $p > p_1$ 。加载段

$$p = k_1\bar{\mu} + k_2\bar{\mu}^2 + k_3\bar{\mu}^3 \quad \bar{\mu} = \frac{\mu - \mu_1}{1 + \mu_1}$$

式中: k_1, k_2 和 k_3 为常数; 卸载段, $p - p_{\max} = K_1(\bar{\mu} - \bar{\mu}_{\max})$ 。

等效强度和损伤累积破坏准则类似 Johnson-Cook 模型

$$\frac{\sigma_b}{f_c} = \left[A(1 - D) + B\left(\frac{p}{f_c}\right)^n \right] \left[1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right]$$

式中: σ_b 为真实等效强度, f_c 为准静态单轴抗压强度, $\dot{\epsilon}$ 为真实应变率, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率, A, B, C, n 为材料常数。 D 为损伤度, 定义为损伤体积所占的份额, 与 Johnson-Cook 模型不同在于同时考虑了等效塑性应变和塑性体积应变引起的损伤, 表达式为

$$D = \sum \frac{\Delta\epsilon_p + \Delta\mu_p}{\epsilon_p^f + \mu_p^f}$$

式中: $\Delta\epsilon_p, \Delta\mu_p$ 为一个计算循环内的等效塑性应变和塑性体积应变; ϵ_p^f, μ_p^f 为常压下破碎的等效塑性应变和塑性体积应变。

3 数值模拟

数值模拟使用 Ansys/Ls-dyna 3D 有限元程序, 典型的 SHPB 有限元模型如图 2 所示, 为减小计算量, 仅包括入射杆、试样和透射杆 3 部分, 均采用 Solid164 实体单元。入射杆和透射杆采用了钢材料的线弹性模型。试样采用 HJC 模型, 利用文献[7]中给出的相关参数。试样和压杆中的接触类型选择侵蚀面接触, 为减少沙漏效应, 接触算法采用罚函数接触算法。

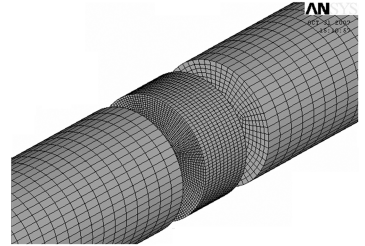


图 2 SHPB 有限元模型

Fig. 2 A three-dimensional SHPB finite element model

3.1 接触刚度罚因子

罚函数接触算法中有一个重要的参数——罚因子 K 。该因子越大, 则接触面的接触刚度越大, 穿透量越小, 但可能导致计算过程不稳定。程序的默认值仅为 0.1, 按该值计算对于大多数动态接触问题的精确模拟都会产生较大的误差。由于 K 与材料、单元大小和接触算法相关, 目前尚无可靠的研究得到其合理数值, 本文中按如下方法对该问题进行了研究。构造 2 材料完全一致的长杆接触有限元模型, 根据应力波理论, 此时弹性波通过两杆界面时将不产生反射, 因此可以利用反射波大小考察 K 的合理性。分别研究了上述 2 种材料的自接触问题, 对于混凝土材料仅考虑式(1)所列的线弹性阶段。用反射波与入射波面积比定义误差 f 。模拟得到 f 随 K 的变化规律如图 3 所示。在所有算例中, 需注意观察接触面应力对称性和均匀性, 透射波无畸变(毛刺现象), 以确保计算的稳定性。

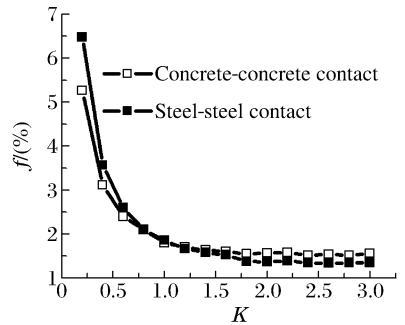


图 3 不同接触刚度罚因子产生的模拟误差
Fig. 3 Simulation errors with different contact stiffness scale factor

由图 3 可以发现, 2 种材料下误差 f 随 K 均呈幂指数形式衰减。当 $K=0.2$ 时, 反射波面积分别是入射波的 5.3% (混凝土) 和 6.5% (钢)。SHPB 实验中反射波决定应变的大小, 因此这种数值模拟产生的误差在重构试样应力应变曲线时会产生应变虚夸, 对于混凝土类小变形材料或模拟其他材料的弹性

变形阶段时影响显著。当 $K=2.0$ 时,误差分别降低到 1.6% 和 1.4%,且不同材料的影响几乎相同。而当 $K>2$ 时,误差降低不明显,因此在后面的数值模拟中 K 均取为 2.0。为进一步考察所选取的 K 对材料的依赖性,构造 2 种不同材料杆的接触问题:2 材料模量差 7 倍,但满足声阻抗相同,此时入射波仍然应该完全通过界面。计算发现,当 $K=0.2$ 时, $f=5.7%$;当 $K=2.0$ 时, $f=1.5%$ 。

3.2 SHPB 过程的数值模拟及数据处理方法

模拟 SHPB 过程时在入射杆端面直接作用速度载荷的方式,为减小二维效应导致波形传播的弥散,采用弥散较小的三角入射波。模拟得到的典型入射波 $\epsilon_i(t)$ 、反射波 $\epsilon_r(t)$ 和透射波 $\epsilon_t(t)$ 如图 4 所示。按 SHPB 两波法数据处理方法重构试样的应力应变曲线

$$\epsilon(t) = -\frac{2c_0}{L_s} \int_0^t \epsilon_r(t) dt \quad \sigma(t) = \frac{A_0}{A_s} E_0 \epsilon_t(t) \quad (2)$$

式中: E_0 、 c_0 、 A_0 分别为压杆的弹性模量、弹性波速和横截面面积; A_s 、 L_s 分别为试样的初始横截面面积和长度。计算中,试样和压杆直径均取为 74 mm,试样长度取为 36 mm。

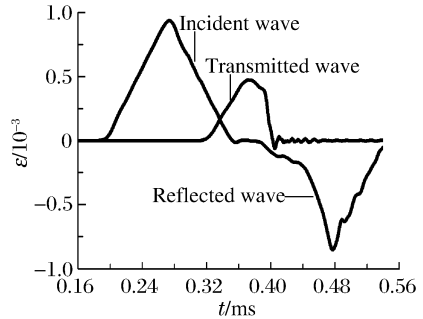


图 4 模拟得到的人射波、反射波和透射波
Fig. 4 Incident, reflected and transmitted waves by the finite element simulation

4 结果及讨论

4.1 试样应力应变曲线与重构曲线的比较

模拟结束后,从试样前、中、后端点上各取 2 点的应力时间历程及应变时间历程消去时间轴得到各点的实际应力应变曲线,如图 5 中细线所示。按式(2)重构得到的应力应变曲线,如图 5 中粗线所示。两者应变率均为 52 s^{-1} ,但图 5(a)为峰值应变小于破坏应变的情况。

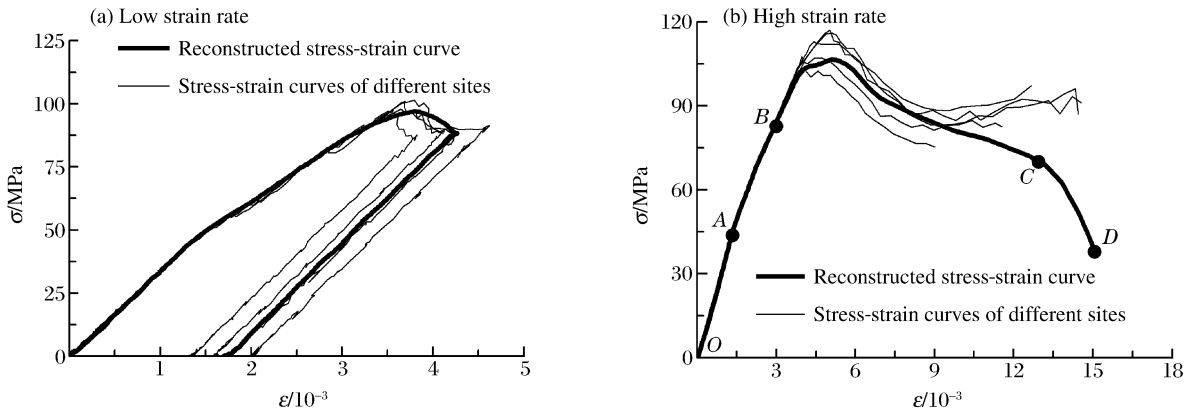


图 5 不同应变率下混凝土的应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of ceramic at different strain rates

由图 5(a)可以发现,当峰值应变小于破坏应变时,由于损伤演化不充分,应力应变曲线的卸载段表现为粘弹性机制的回滞。在线弹性阶段和损伤初始阶段,试样各点的应力应变曲线与重构结果非常吻合。损伤演化到一定程度,试样各点的应力应变曲线虽然出现了一定程度的离散,但整体趋势与重构结果也吻合,反映了各点损伤程度的差异不大;试样各点应力应变曲线平均得到的应力应变曲线与重构结果相当吻合,如图 6 所示。

由图 5(b)可以看出,当破坏应变大于峰值应变时,重构应力应变曲线可以分成线弹性上升段(OA)、初步损伤段(AB)、损伤剧烈演化段(BC)、结构破坏段(CD)。首先,在线弹性阶段和初始损伤段重构的应力应变曲线与试样各点应力应变关系吻合很好,反映在该阶段试样处于显著的一维应力状态。

试样左、右端面应力(应变)的不均匀性只影响应力应变曲线上上升段非常小的范围。这是因为 SHPB 实验反映了试样的平均效应,而这种平均效应能够减弱应力(应变)不均匀性的影响,因此对于混凝土材料的应力(应变)不均匀性的判断标准可以适当放宽到一个合理的数值。其次,在损伤剧烈演化段,试样各点应力应变曲线出现离散,反映各部位损伤演化出现差异,在数值模拟中体现出这种差异的本质是由于横向泊松效应导致的非一维应力状态的加剧。但各部位曲线的平均值与重构结果依然吻合较好,见图 6。说明 SHPB 实验正好反映了试样整体损伤演化的均匀效果。综上所述,在消除大尺寸压杆的波形弥散效应、试样与压杆的尺寸缺陷以及合理范围应力(应变)不均匀性的前提下,SHPB 实验得到混凝土材料的应力应变曲线的有效范围可以达到损伤剧烈演化段。最后,在 CD 段,试样进入了压溃破坏阶段,这时裂纹已贯穿试样,试样出现大范围破损和大变形,因此 SHPB 重构结果反映的不完全是试样材料的力学行为,也包括与试样尺寸相关的结构破坏特点,该部分应力应变曲线对于尺寸相同的试样可以参考。

4.2 不同应变率下重构的应力应变曲线

模拟得到了不同应变率下的应力应变曲线,除曲线 1 为峰值应变小于破坏应变的情况,其余 3 条曲线的峰值应变均大于破坏应变,应变率分别为 52 、 77 和 154 s^{-1} ,见图 6,其中所有细线均按前述选取试样不变的 6 个不同位置的实际应力应变曲线进行平均得到。各曲线力学行为均与上述分析吻合。同时给出了某混凝土在 $\varnothing 74 \text{ mm}$ 直锥变截面 SHPB 装置上得到的 4 个应变率下的应力应变曲线,如图 7 所示,应变率分别为 20.5 (试样无显著破坏)、 45.3 、 60.0 和 109.1 s^{-1} 。可以发现,虽然模拟参数与实际 SHPB 实验得到的混凝土参数不同,两者在具体数值上有差别,但体现的力学行为本质却非常相近。包括随应变率增加抗压强度增加的应变率强化效应,当试样未出现宏观裂纹时的粘弹性回滞。另外,随应变率增加,损伤剧烈演化段的圆弧曲率减小,反映了高应变率下损伤演化的充分性。甚至对于结构破坏段两者也具备相似性。因此,可以推断 HJC 模型适合用于描述混凝土 SHPB 实验得到的应力应变关系。

4.3 几何缺陷影响

由于混凝土的加工难度,导致在 SHPB 实验中试样不可能绝对平行,考虑 3 种分别为试样直径的 0.1% 、 0.2% 和 0.5% 的平行度公差对应力应变曲线的影响,重构结果如图 8 所示。可以发现,试样平行度公差越大,对应力应变曲线弹性段的影响越显著, 0.1% 平行度公差的影响已远大于试样应力(应变)不均匀性的影响。随平行度公差的增加,处理得到的弹性模量降低。这也是按传统 SHPB 实验得到混凝土模量偏低的一个主要原因。当平行度公差小于 0.1% 时,只影响初始弹性段,此时可由后续弹性段拉直处理得到较理想的结果,因此该公差应是混凝土试样的理想加工精度。当平行度公差处于

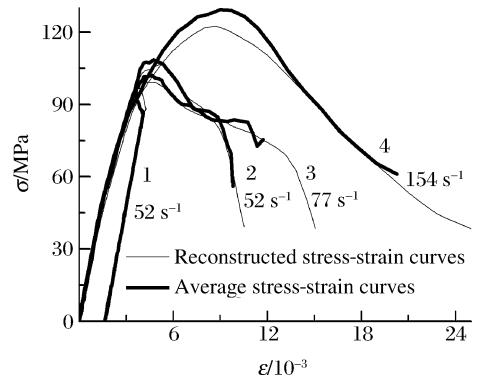


图 6 不同应变率下的重构应力应变曲线
Fig. 6 Reconstructed stress-strain curve at different strain rates

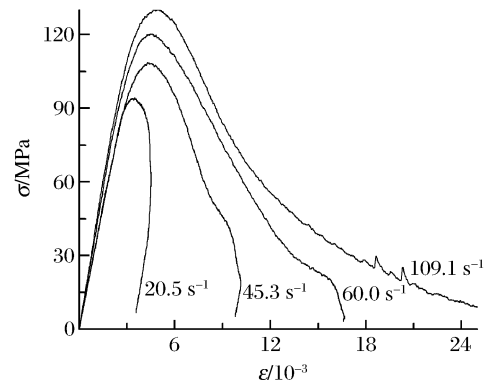


图 7 某混凝土 SHPB 实验应力应变曲线
Fig. 7 Stress-strain curves of certain ceramic obtained in the SHPB experiment

0.1%~0.2%之间时,可以发现对应力应变曲线初步损伤段和损伤演化剧烈段影响较小,此时可采用试样贴应变计测量弹性段的应变直测法弥补得到较可靠的结果^[3-5],如果平行度公差超过0.5%,影响区域将达到整个应力应变曲线的有效段,试样受力将完全丧失均匀性,连最重要的力学参数——破坏应力也难以获得准确数值。

4 结束语

采用的HJC本构模型对混凝土试样的SHPB实验过程进行了数值模拟,得到如下结论。

(1)动态接触罚函数算法中程序默认值偏小,采用该值得不到较好的模拟结果,采用本文的方法可以得到较合理的数值,但应注意,该值与单元尺寸、接触形式相关,具体计算应按文中原则选取。

(2)对混凝土冲击压缩应力应变曲线进行了分段讨论,发现用SHPB装置进行混凝土冲击压缩实验,获得的应力应变曲线的有效段可以达到损伤剧烈演化段。

(3)冲击压缩下HJC本构模型表现的力学行为与混凝土实际SHPB实验结果非常相似,HJC本构模型是该类材料的一种较理想的本构模型。

(4)在一定应变率范围内影响混凝土类材料SHPB实验最关键的因素不是试样应力(应变)不均匀性,而是试样的加工精度。

参考文献:

- [1] 胡时胜. 霍普金森压杆技术[J]. 兵器材料科学与工程, 1991(11):40-47.
HU Shi-sheng. SHPB technique[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1991(11):40-47.
- [2] 巫绪涛,胡时胜,陈德兴,等. 钢纤维高强混凝土冲击压缩的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2005,25(2):125-131.
WU Xu-tao, HU Shi-sheng, CHEN De-xing, et al. Impact compression experiment of steel fiber reinforced high strength concrete[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(2):125-131.
- [3] 巫绪涛,胡时胜,孟益平. 混凝土动态力学量的应变计直接测量法[J]. 实验力学, 2004,19(3):319-323.
WU Xu-tao, HU Shi-sheng, MENG Yi-ping. Strain gauge measurement method of dynamic behavior for concrete[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2004,19(3):319-322.
- [4] 朱珏,胡时胜,王礼立. 率相关混凝土材料SHPB试验的若干问题[J]. 工程力学, 2007,24(1):78-87.
ZHU Jue, HU Shi-sheng, WANG Li-li. Problems of SHPB technique used for rate-dependent concrete-sort materials[J]. Engineering Mechanics, 2007,24(1):78-87.
- [5] 巫绪涛,杨伯源,李和平,等. 大直径SHPB装置的数值模拟及实验误差分析[J]. 应用力学学报, 2006,23(3):431-434.
WU Xu-tao, YANG Bo-yuan, LI He-ping, et al. Numerical simulation and error analysis of large diameter SHPB[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2006,23(3):431-434.
- [6] Li Q B, Zhang C H, Wang G L. Dynamic damage constitutive model of concrete in uniaxial tension[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1996,53(3):449-455.
- [7] Holmquist T J, Johnson G R, Cook W H. A computational constitutive model for concrete subjective to large strains, high strain rates, and high pressures[C]// Jackson N, Dickert S. Proceedings of the 14th International Symposium on Ballistics. USA: American Defense Preparedness Association, 1993:591-600.

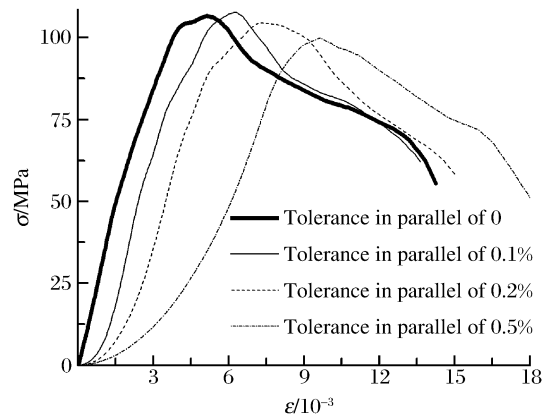


图8 试样平行度公差对重构应力应变曲线的影响
Fig. 8 Influence of tolerance in parallel of specimens on the reconstructed stress-strain curves

Numerical simulation of SHPB tests for concrete by using HJC model

WU Xu-tao* , SUN Shan-fei, LI He-ping

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology,
Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract: The split Hopkinson pressure bar (SHPB) tests for concrete were numerically simulated by using the Holmquist-Johnson-Cook (HJC) constitutive model. The contact stiffness in the penalty function algorithm was reasonably determined. The stress-strain curves of the concrete specimens were reconstructed from the simulated results by applying the two-wave method used in the data processing of the SHPB tests. The effective ranges of the stress-strain curves obtained in the SHPB tests and their mechanical regularity were analyzed. By comparing the stress-strain curve obtained from the SHPB test with the reconstructed curve from the numerical simulation, it can be found that the mechanical behaviors of the two curves are similar. It is verified that the HJC model is a reasonable constitutive model for describing the concrete materials. Numerical simulations were carried out for the SHPB tests of the concrete specimens with different tolerances in parallel. The simulated results show that the tolerances in parallel of specimens affect the SHPB tests much more remarkably than the stress(strain) nonuniformity in a certain strain-rate range.

Key words: mechanics of explosion; stress-strain curve; HJC model; concrete; SHPB test

* Corresponding author; WU Xu-tao

E-mail address: wuxvtao@sina.com

(责任编辑 张凌云)

第九届全国冲击动力学学术会议征文通知

为了交流和讨论全国冲击动力学领域的最新进展,中国力学学会爆炸力学专业委员会冲击动力学专业组拟定于2009年8月20日~23日在河南焦作举办第九届全国冲击动力学学术会议,并召开冲击动力学专业组工作会议。欢迎全国相关学科的专家、学者、科技工作者和工程技术人员踊跃投稿并参加会议。

一 会议主题

1. 应力波的传播理论与实验技术;
2. 动态本构关系的实验和理论研究;
3. 材料的冲击损伤、断裂与破坏;
4. 结构的冲击响应与失效分析;
5. 冲击相变;
6. 冲击起爆与冲击波化学;
7. 能量吸收原理与方法;
8. 抗冲击理论与应用;
9. 冲击动力学计算与实验技术;
10. 其他冲击动力学问题。

二 论文要求

1. 论文按《兵工学报》格式进行编排,录用论文将刊登在该刊增刊(EI收录);
2. 论文不得涉密,请作者所在单位负责保密审查;
3. 论文电子文档(Word格式)用E-mail或光盘发至会议筹备组,须注明通信地址和联系电话(手机和办公电话)。

三 联系方式

联系人: 黄风雷,张庆明,刘彦,陈利

E-mail: Liuyan@bit.edu.cn, lichenme@bit.edu.cn

电话: 010-68915607

传真: 010-68461702

通讯地址: 100081 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室

中国力学学会爆炸力学专业委员会冲击动力学专业组

2009年3月9日