高压物理学报

预应力对陶瓷抗侵彻性能影响规律的数值模拟

吴　雪，张先锋，丁　力，谈梦婷，包　阔，陈贝贝

引用本文：

吴雪，张先锋，丁力，等. 预应力对陶瓷抗侵彻性能影响规律的数值模拟 [J]. 高压物理学报，2018，32(4)：044101.

WU Xue，ZHANG Xianfeng，DING Li，et al. Numerical Simulation of the Effect of Pre-stress on the Ballistic Performance of Ceramics [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics，2018，32(4)：044101.

当期更多内容≫

您可能感兴趣的其他文章：

一种长杆弹超高速贯穿陶瓷/金属复合靶板的简化模型

翟阳修，吴昊，方秦

DOI：10.11858/gywlxb.2017.06.009

基于 FEM/SPH 算法弹丸侵彻多孔陶瓷板的数值模拟

王志远，王凤英，刘天生，岳继伟，柴艳军

DOI：10.11858/gywlxb.2017.01.006

大着速范围长杆弹侵彻深度变化及其影响因素的数值模拟

徐晨阳，张先锋，刘闯，邓佳杰，郑应民

DOI：10.11858/gywlxb.20170592

不同硬度 30CrMnSiNi2A 钢的动态本构与损伤参数

李磊，张先锋，吴雪，高飞，刘闯

DOI：10.11858/gywlxb.2017.03.005

岩石材料冲击开坑行为研究

伍杨，张先锋，徐晨阳，王舒，覃彬

DOI：10.11858/gywlxb.2017.05.014

DOI: 10.11858/gywlxb.20170610

预应力对陶瓷抗侵彻性能影响规律的数值模拟*

吴 雪,张先锋,丁 力,谈梦婷,包 阔,陈贝贝

(南京理工大学机械工程学院,江苏 南京 210094)

摘要:为研究预应力陶瓷的抗侵彻性能,利用 AUTODYN 仿真软件模拟了对 SiC 陶瓷施加预应力的过程,并开展了长杆弹以不同速度侵彻预应力陶瓷的数值仿真研究,确定了预应力陶瓷的抗侵彻性能。通过对比分析,得到了不同载荷下陶瓷内部的应力分布状态,以及陶瓷抗侵彻性能与预应力的关系。结果表明:对陶瓷施加预应力可以有效提高其抗侵彻能力;但随着加载预应力的进一步提高,即当陶瓷中心部位预应力大于 112 MPa 时,陶瓷的抗侵彻能力反而下降,陶瓷加载的预应力与其抗侵彻性能之间存在最佳匹配关系。

关键词:陶瓷装甲;预应力陶瓷;抗侵彻性能

中图分类号: O385 **文献标识码**: A

陶瓷是一种高硬度、低密度、高抗压性的脆性材料,被越来越多地应用在武装直升机、坦克装甲车辆的防护等领域[1]。利用陶瓷的高硬度、高强度特性,迫使来袭的穿甲弹体破碎消耗能量,大大降低其穿甲能力[2],因此陶瓷装甲具有较高的抗侵彻能力[3]。与高强度特性相对,陶瓷材料的致命弱点是其较低的抗拉特性,因此在作为装甲材料使用时通常采用复合装甲结构。为进一步提高陶瓷的韧性和抗侵彻能力,国内外学者开展了大量的研究工作,其中施加预应力是提高陶瓷韧性、改善其抗侵彻能力的技术途径之一。预应力陶瓷是指利用物理方式(热膨胀等)使陶瓷内部产生预应力的一种陶瓷。国内外相关研究工作表明:在受压情况下,破碎的陶瓷材料仍具有明显的强度,且随着压力的增加而提高。通过施加约束而使陶瓷内部存有预应力,可以有效改善陶瓷材料低韧性的致命弱点[4]。提高陶瓷的韧性有利于提高其抗侵彻性能。研究结果表明,通过施加约束而使陶瓷内部存有预应力可显著提高其抗弹性能[5]。

国内外学者对预应力陶瓷开展了大量的研究工作。Meyer 等[6]研究了在钛合金钢环(预应力钢环)约束下,陶瓷在被侵彻过程中裂纹的形成以及扩展过程。李平等[7]采用侵彻深度试验研究了三维约束条件下氧化铝陶瓷复合靶板抗长杆弹侵彻的性能。井玉安等[8]对六边形 Al_2O_3 约束陶瓷的抗弹性能进行了系统研究。Chi 等[9]研究了在不同方向(径向、轴向等)施加预应力后陶瓷的抗侵彻性能。综上可知,国内外学者针对预应力陶瓷的研究工作主要集中于对重约束厚陶瓷施加预应力,研究预应力施加方式对陶瓷界面击溃效应的影响规律,而缺乏对具有应用背景的预应力陶瓷抗侵彻剩余穿深(Depth of Penetration, DOP)的研究。

本工作针对现有研究的不足,以有限厚陶瓷加载预应力对其抗侵彻规律的影响为目标,主要从陶瓷加载应力程度、不同撞击速度下侵彻剩余穿深与陶瓷内部应力关系等方面开展研究,从而得到预应力对陶瓷抗侵彻性能的影响规律。在现有关于预应力陶瓷可有效提高抗侵彻能力的研究结论的基础上,利用 AUTODYN 有限元软件建立有限厚陶瓷预应力加载及抗侵彻性能仿真模型,开展预应力施加以及长杆弹侵彻预应力陶瓷的数值仿真研究;并在验证仿真方法可靠性的基础上,分析预应力陶瓷的抗侵彻性能变化规律。

* **收稿日期**: 2017-07-06; **修回日期**: 2017-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(11772159);中组部青年拔尖人才支持计划(2014);中央高校基本科研业务专项基金(30917011104,30916011305)

作者简介: 吴 雪(1991—),女,硕士研究生,主要从事冲击动力学研究. E-mail: wuxue0911@163.com

通信作者: 张先锋(1978—),男,博士,教授,主要从事高效毁伤与防护研究. E-mail: lynx@njust.edu.cn

1　数值仿真模型

1.1　几何模型及数值仿真模型

根据仿真模型的对称性，利用 AUTODYN 软件建立陶瓷加载的二维模型。侵彻弹体为钨合金长杆弹，全弹长为 115 mm，弹体直径 8 mm。陶瓷为碳化硅(SiC)，直径 100 mm，厚度为 20 mm。陶瓷外侧为钢环。图 1 为陶瓷施加预应力的数值模拟模型，图 2 为长杆弹侵彻预应力陶瓷模型。

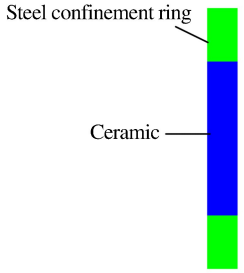


图 1　陶瓷预应力加载模型

Fig. 1　Applying pre-stress on ceramic

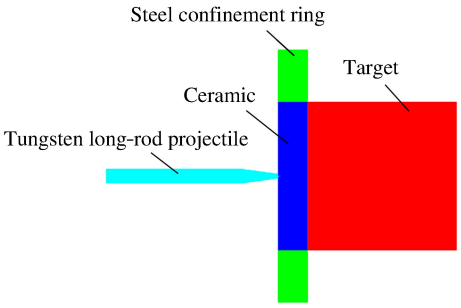


图 2　长杆弹侵彻预应力陶瓷模型

Fig. 2　Long-rod projectile penetrating ceramic

1.2　材料模型与参数

陶瓷是典型脆性材料，冲击破坏过程十分复杂，目前仅有少数模型可用于描述陶瓷材料的冲击破坏行为。本研究选用 Johnson-Holmquist(JH)模型，其中：JH-1 模型中材料完全损伤后即失效；JH-2 模型在 JH-1 模型基础上考虑了材料损伤逐渐积累的过程[10-11]，适用于描述陶瓷材料的冲击破坏过程。碳化硅陶瓷的 JH-2 参数来源于参考文献[10,12-14]。弹体材料为钨合金，约束钢环及后效靶材料为 4340 钢，均采用 Johnson-Cook(JC)本构和损伤模型[15]，参数取自文献[11,16-18]。

2　不同加载条件下陶瓷应力分布数值模拟

与冲击载荷下动态破坏的瞬态特性不同，陶瓷预应力的加载过程是一种准静态作用过程。对陶瓷施加预应力过程进行仿真模拟需要综合考虑软件、控制参数及模拟加载过程的真实性。参考 Chi 等[9]的陶瓷预应力加载方法开展陶瓷预应力加载过程模拟。

2.1　陶瓷预应力加载过程

与传统的直接对陶瓷施加位移产生预应力的作用方式[19]不同，本研究采用对陶瓷的钢约束环外侧施加位移的方式，使钢环产生变形从而间接迫使陶瓷产生预应力。为定量描述预应力幅值，利用钢环外侧的位移量(压缩比 δ)定义预应力加载程度。压缩比 δ 定义为钢约束环外侧位移量(Δd)与钢环外径(D)的比值。图 3 为预应力加载过程，具体如下[9]：

(1) 建立陶瓷和钢约束环的 AUTODYN 仿真模型，陶瓷与钢约束环之间无相互作用，通过不同的压缩比 δ 控制陶瓷内部产生不同的预应力值；

(2) 给定钢约束环一个径向速度边界条件，钢约束环由此产生径向位移，内部产生应力，当陶瓷与钢约束环接触的地方开始产生位移时，陶瓷内部开始产生预应力；

(3) 当钢约束环的位移达到预先定义的位移量

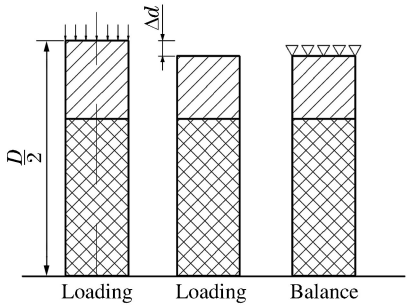


图 3　陶瓷预应力加载过程

Fig. 3　Pre-stress loading process of ceramic

时，陶瓷内部产生相应应力，此时去除钢约束环的边界条件，并固定钢约束外径形成位移约束；

(4) 陶瓷内部应力状态经过一个平衡过程后最终达到稳定，从而得到稳定平衡状态的预应力陶瓷。

2.2　加载过程陶瓷内部应力变化过程

利用 AUTODYN 仿真软件建模，采用 1.2 节文献中的材料参数，可以得到不同压缩比下陶瓷内部的应力(σ)分布。鉴于 AUTODYN 模型的对称性，取 1/2 模型的应力云图。图 4 所示为两个典型压缩比 0.0020、0.0032 下，加压及压力平衡过程中陶瓷内部的应力云图。

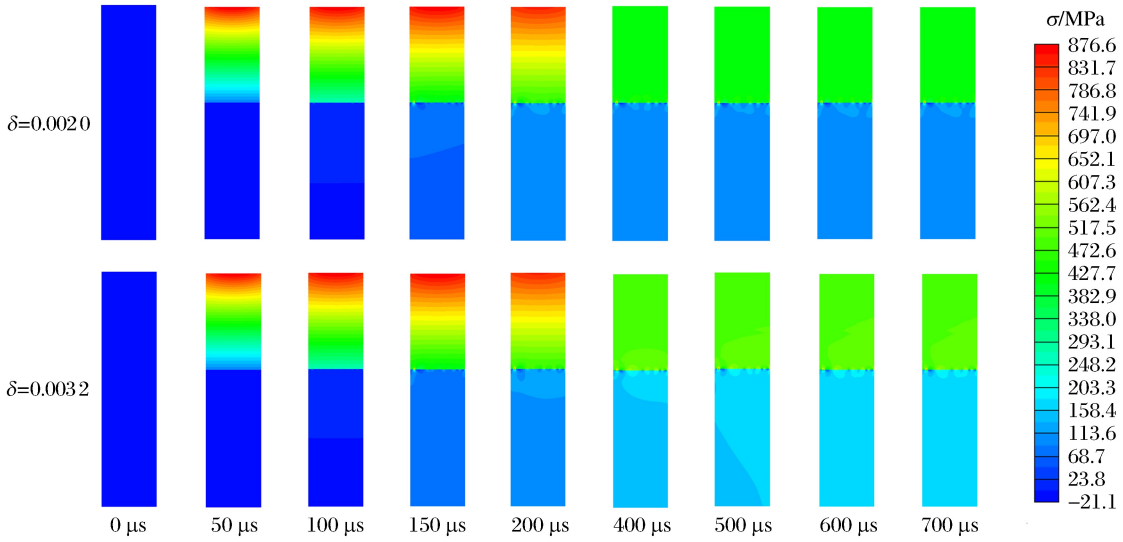


图 4　预应力加载过程中陶瓷内部应力云图

Fig. 4　Stress in ceramic during pre-stress process

从图 4 可以看出，随着压缩比的增加，平衡时间随之变长。开始加压时，钢约束环外径处的应力最大；随着时间的推移，陶瓷内部开始产生应力，直至内部压力达到平衡。图 5 为陶瓷中心点处的应力随时间 t 的变化曲线。

由图 5 可以看出：在对钢约束环施加边界条件初期，陶瓷并未产生位移，因此应力只在钢约束环内产生；当陶瓷产生位移后，陶瓷内部应力迅速上升；当达到定义的压缩比、对钢约束环施加位移约束后，陶瓷随之不再产生位移，因此陶瓷内部应力有一个短暂的平衡期；随着时间的推移，陶瓷自然膨胀，其内部应力再一次上升，直至达到最后的稳定状态。陶瓷内部产生的径向应力随着压缩比的不同而变化。由此可以确定，这种加载方式可以使陶瓷内部保持一个稳定的预应力，同时可以根据定义不同的压缩比而施加不同的预应力。综上所述，本研究使用的加载预应力方法可以得到不同数值的预应力陶瓷。

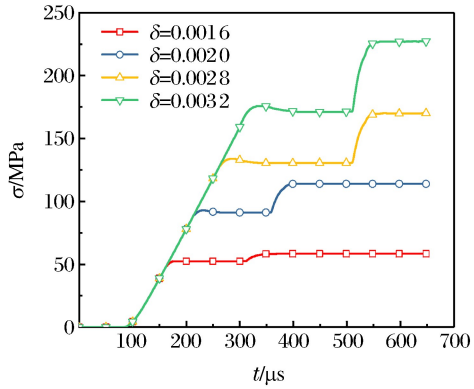


图 5　陶瓷中心点应力-时间曲线

Fig. 5　Stress-time curves of ceramic at the center point

2.3　不同加载条件下陶瓷靶应力分布

由于是通过施加径向位移而使陶瓷内部产生径向预应力，故陶瓷内部各个位置点的应力值并不完全相同。为研究不同位置的应力状态，取 7 个高斯点 1# ～7#，如图 6 所示。依据 AUTODYN 模型的对称性，取 1/2 模型显示。

图 7 为钢约束环位移达到定义的压缩比并对其进行位移约束后，陶瓷内部预应力平衡过程中 7 个高斯点处的应力分布曲线。

由图 7 可以看出，对于压缩比 $\delta \geqslant 0.0020$，陶瓷已经产生位移，其内部任何位置处均已有一个初始预应力值。对钢约束环施加约束条件后，陶瓷不再有位移，其内部预应力有一个短暂的平衡过程。之后，陶瓷经历一段自然膨胀过程，内部应力再次上升，最终达到稳定平衡状态。从图 7 中可以看出，陶瓷内部不同位置处的应力有一定的差别。由于位移边界条件施加在钢约束环外，所以陶瓷表面(7#)应力上升最快，但最终各处的平衡应力值相差较小。在压缩比 $\delta=0.0016$ 时，陶瓷表面应力小幅度增加后回落，之后逐渐趋于稳定，内部其他位置的应力以较小的幅度增加，然后达到稳定值。综合各个位置的应力趋势，最终陶瓷内部应力达到平衡。

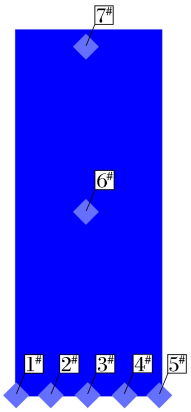
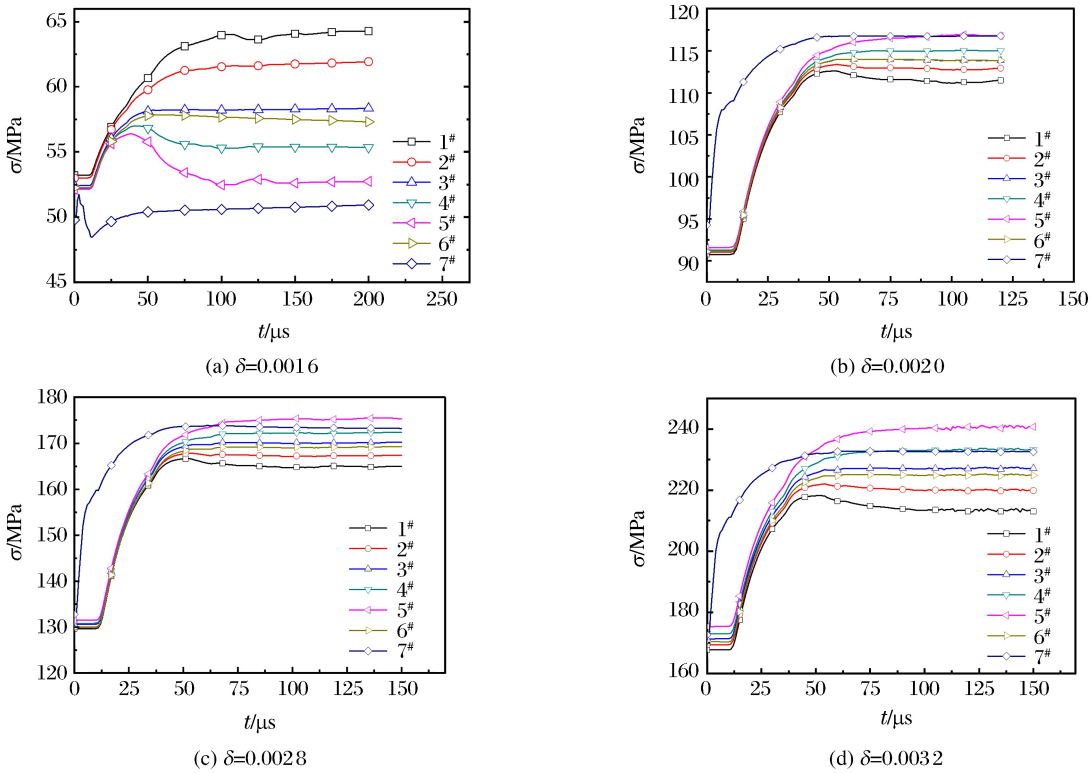


图 6　高斯点分布

Fig. 6　Positions of Gaussian points



(a) δ=0.0016　(b) δ=0.0020　(c) δ=0.0028　(d) δ=0.0032

图 7　陶瓷内部不同高斯点处应力分布

Fig. 7　Stress curves at different Gaussian points inside the ceramic

3　预应力陶瓷抗侵彻性能的数值模拟

在前述陶瓷内部产生稳定平衡的预应力后，建立长杆弹侵彻模型。赋予长杆弹不同速度 v，对内部有不同预应力的陶瓷进行侵彻，得到剩余穿深(DOP)、侵彻速度与预应力之间的关系。

3.1　数值模拟方法验证

参考文献[20]的实验数据，进行长杆弹侵彻带有前置 SiC 陶瓷的 4340 钢靶数值模拟，对比实验和模拟的侵彻穿深。图 8 所示为数值模拟与实验数据的对比。

从图 8 可以看出，在无预应力条件下，不同速度的长杆弹对陶瓷及后效靶进行侵彻时，DOP 随着速度的增加而增加。根据拟合曲线可知，仿真计算所得 DOP 与实验数据的误差在合理范围内，表明所采用的仿真模型及方法是可靠的。

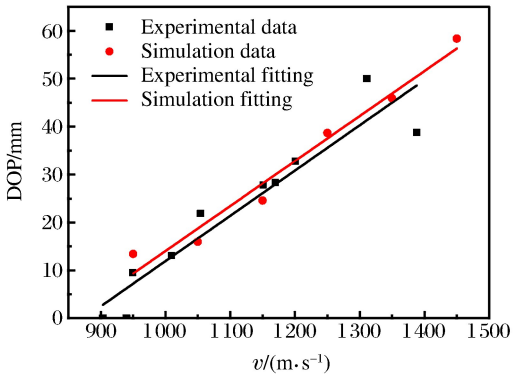


图 8　数值模拟与实验[20]所得 DOP 对比

Fig. 8　Comparison of DOP between simulation and experimental results[20]

3.2　预应力陶瓷抗侵彻作用过程分析

在长杆弹侵彻过程中，陶瓷内部应力会逐渐变化。图 9 为 v=1 350 m/s，典型压缩比为 0、0.002 0、0.003 2 时，侵彻过程中陶瓷内部各时间点的应力分布云图。根据 AUTODYN 仿真模型的对称性，取 1/2 模型显示。

由图 9 可以得出：(1) 在侵彻过程中，长杆弹与陶瓷接触的位置存在应力集中；(2) 当陶瓷内部有预应力时，侵彻过程中陶瓷内部各个位置的应力差会变小，此时陶瓷更不易破碎，即提高了陶瓷的抗侵彻性能；(3) 在压缩比为 0.002 0 时，陶瓷内部的应力差最小，即陶瓷具有最佳抗侵彻性能；当压缩比增大时，陶瓷内部压力差也增大，抗侵彻性能反而降低。

通过应力对比分析可以得出，陶瓷抗侵彻性能并非随其内部预应力的增加而线性提高。陶瓷的抗侵彻性能和预应力之间有最佳对应关系。

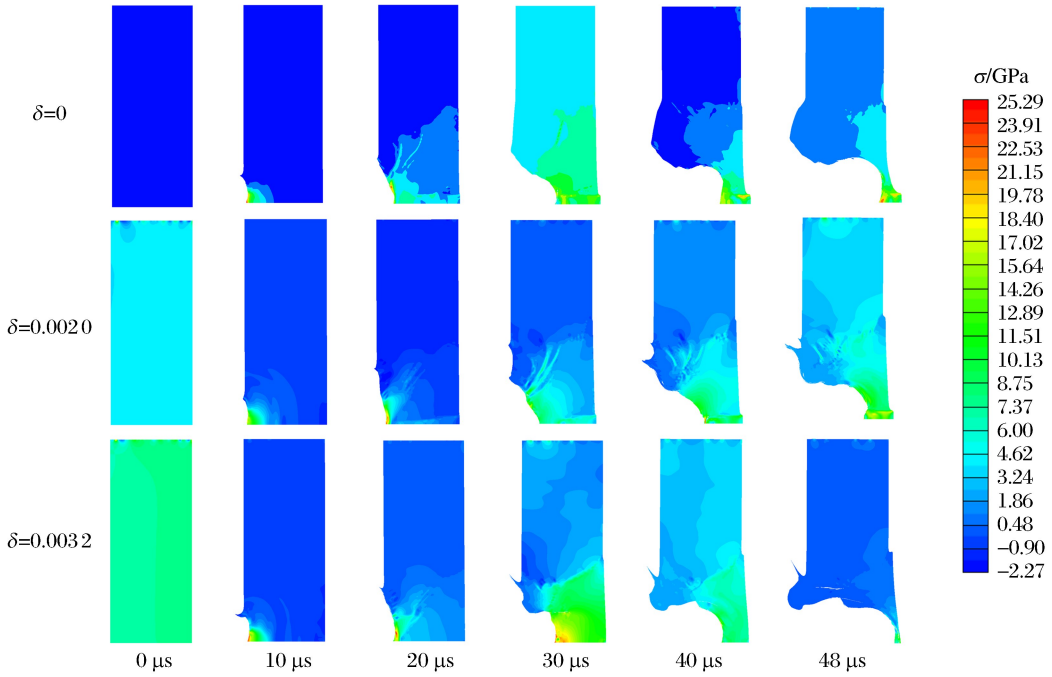


图 9　侵彻过程中陶瓷内部应力分布云图

Fig. 9　Stress cloud in ceramic during penetration process

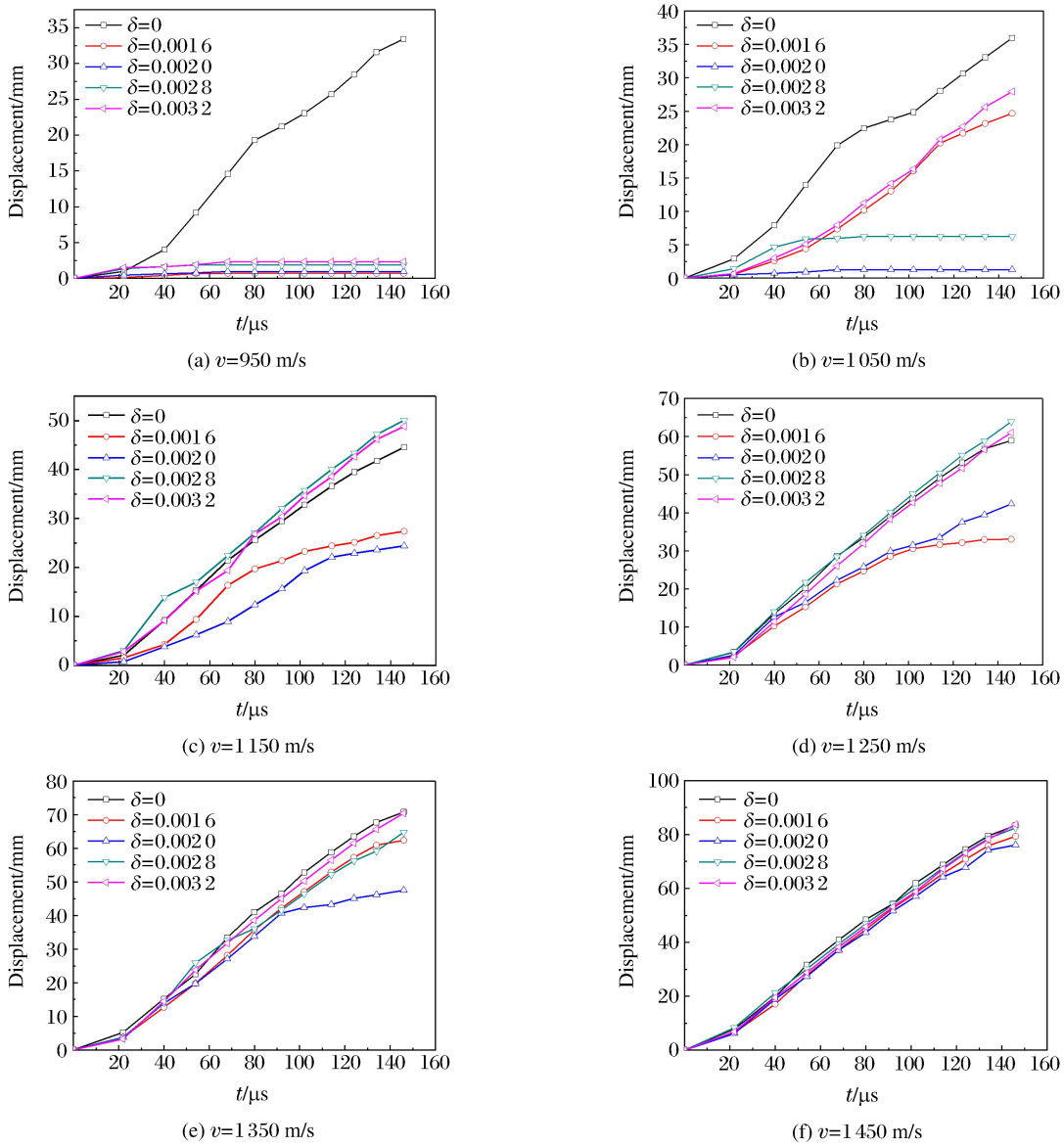
3.3　长杆弹侵彻预应力陶瓷过程参数分析

取长杆弹与陶瓷刚接触的表面为坐标原点，图 10 为不同侵彻速度下长杆弹头部位置随时间变化的侵彻深度-时间曲线图。

由图 10 中可以看出：(1) 当压缩比 $\delta \leqslant 0.002\,0$ 时，陶瓷内部形成预应力后，长杆弹在 v=950 m/s 情况下均不能穿透，v>950 m/s 情况下侵彻深度均小于无预应力陶瓷，表明陶瓷的抗侵彻能力有很大

幅度的提高;(2) 当压缩比 $\delta>0.0020$,即陶瓷内部预应力继续增大时,陶瓷的抗侵彻能力反而下降;长杆弹的速度增大,侵彻深度增大;(3) 随着长杆弹速度的增加,当 $v\geqslant1\,350$ m/s 时,侵彻深度并不随着压缩比的变化而发生明显变化,即在高速侵彻情况下,陶瓷内部的预应力对抗侵彻性能影响变小。

综上可以得出:对陶瓷施加预应力可以有效提高其抗侵彻能力;但当压缩比 $\delta=0.0020$,即陶瓷中心部位的预应力达到 112 MPa(见图 7)时,预应力再增加,陶瓷的抗侵彻能力反而下降,因此陶瓷预应力与抗侵彻性能之间存在最佳匹配关系。



(a) v=950 m/s　(b) v=1 050 m/s　(c) v=1 150 m/s　(d) v=1 250 m/s　(e) v=1 350 m/s　(f) v=1 450 m/s

图 10　长杆弹头位移随时间变化曲线

Fig. 10　Displacement variations of log-rod projectile over time

3.4　不同预应力加载值对陶瓷靶抗侵彻性能的影响规律

压缩比分别为 0、0.0016、0.0020、0.0028、0.0032 时,陶瓷内部产生不同大小的预应力。通过模拟长杆弹在不同速度下撞击陶瓷及其后的钢靶,可以得到钢靶剩余穿深(DOP),进而可分析得到预应力对陶瓷抗侵彻性能的影响。图 11 为不同速度、不同压缩比时的 DOP 变化图。

从图 11 可以看出:压缩比 $\delta\leqslant0.0020$ 时,DOP 随着预应力的增加而减小;而压缩比 $\delta>0.0020$ 时,DOP 反而增加。即:当陶瓷中心部位预应力小于 112 MPa 时,DOP 随着预应力的增加而增加,表明在

该范围内，预应力的增加可以提高陶瓷的抗侵彻性能；但当预应力超过该数值之后，陶瓷的抗侵彻性能反而降低。

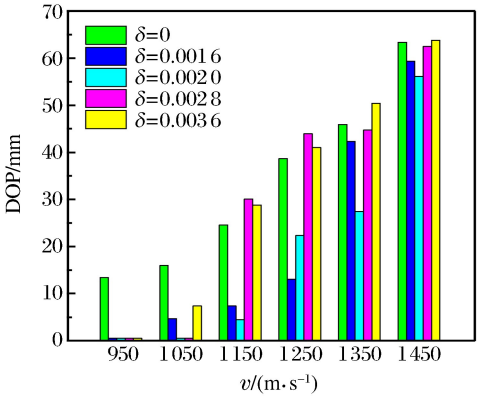


图 11　DOP 随速度、压缩比的变化

Fig. 11　DOP vs. impact velocity and compression ratio

4　结　论

利用 AUTODYN 数值模拟软件对预应力陶瓷的抗侵彻性能进行了仿真模拟研究，得出以下结论。

（1）通过对约束钢环施加径向位移，设定不同的压缩比，可以对陶瓷施加不同的预应力。在陶瓷产生位移从而内部产生预应力时，其内部应力先大幅度增加，在对约束钢环进行约束后，陶瓷内部应力经历平衡过程达到稳定状态。

（2）陶瓷预应力可以改变陶瓷内部应力状态，提高陶瓷的抗侵彻性能。

（3）最佳抗侵彻性能与陶瓷内部预应力之间有最佳匹配关系。在陶瓷中心部位预应力小于 112 MPa，即压缩比 $\delta \leqslant 0.0020$ 时，陶瓷的抗侵彻性能随着预应力的增加而提高；当超过该预应力值时，陶瓷的抗侵彻性能随着预应力的提高反而降低。

（4）当侵彻速度 $v > 1\,350$ m/s 时，预应力对陶瓷的抗侵彻性能影响降低，即高速侵彻时，预应力陶瓷的抗侵彻性能不再有显著提高。

参考文献：

[1]　刘桂武，倪长也，金峰，等. 陶瓷/金属复合装甲抗弹约束效应述评 [J]. 西安交通大学学报，2011，45(3)：7-15，24.
LIU G W，NI C Y，JIN F，et al. Review of anti-ballistic confinement effecs of ceramic-metal composite armor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University，2011，45(3)：7-15，24.

[2]　高举贤，吴玉炎，白蓉裳，等. 陶瓷防弹性能的研究 [J]. 弹箭与制导学报，1986(2)：7-17.

[3]　王为民，傅正义，张金咏，等. 陶瓷材料抗超高速弹丸的侵彻过程研究 [C]//中国空间科学学会空间材料专业委员会 2012 学术交流会议论文(摘要)集，2012.

[4]　LASALVIA J C，MCCAULEY J W. Inelastic deformation mechanisms and damage in structural ceramics subjected to high-velocity impact [J]. International Journal of Applied Ceramic Technology，2010，7(5)：595-605.

[5]　SHERMAN D. Impact failure mechanisms in alumina tiles on finite thickness support and the effect of confinement [J]. International Journal of Impact Engineering，2000，24(3)：313-328.

[6]　MEYER H W，KLEPONIS D S. Modeling the high strain rate behavior of titanium undergoing ballistic impact and penetration [J]. International Journal of Impact Engineering，2001，26(1)：509-521.

[7]　李平，李大红，宁建国，等. Al_2O_3 陶瓷复合靶抗长杆弹侵彻性能和机理实验研究 [J]. 爆炸与冲击，2003，23(4)：289-294.
LI P，LI D H，NING J G，et al. Experimental study on the ballistic performance and mechanism of confined ceramic targets against long rod penetrators [J]. Explosion and Shock Waves，2003，23(4)：289-294.

[8]　井玉安，果世驹，韩静涛. 钢/Al_2O_3 陶瓷/钢轻型复合装甲板抗弹性能 [J]. 北京科技大学学报，2007，29(4)：402-407.
JING Y A，GUO S J，HAN J T. Ballistic property of steel/ceramic/steel composite armor [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing，2007，29(4)：402-407.

[9]　CHI R，SERJOUEI A，SRIDHAR I，et al. Pre-stress effect on confined ceramic armor ballistic performance [J]. International Journal of Impact Engineering，2015，84：159-170.

[10]　HOLMQUIST T J，JOHNSON G R. Response of silicon carbide to high velocity impact [J]. Journal of Applied

Physics,2002,91(9):5858-5866.

[11] 谈梦婷,张先锋,何勇,等.长杆弹撞击装甲陶瓷的界面击溃效应数值模拟[J].兵工学报,2016,37(4):627-634.
TAN M T,ZHANG X F,HE Y,et al. Numerical simulation on interface defeat of ceramic armor impacted by long-rod projectile [J]. Acta Armamentarii,2016,37(4):627-634.

[12] ZHU D,YAN S,LI B. Single-grit modeling and simulation of crack initiation and propagation in SiC grinding using maximum undeformed chip thickness [J]. Computational Materials Science,2014,92:13-21.

[13] HOLMQUIST T J,JOHNSON G R. Characterization and evaluation of silicon carbide for high-velocity impact [J]. Journal of Applied Physics,2005,97(9):093502.

[14] CRONIN D S,BUI K,KAUFMANN C,et al. Implementation and validation of the Johnson-Holmquist ceramic material model in LS-DYNA [C]//Proceedings of 4th European LS-DYNA Users Conference. Ontario,Canada: University of Waterloo,2003,1:47-60.

[15] JOHNSON G R,COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains,high strain rates and high temperatures [C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics,1983,21:541-547.

[16] LUNDBERG P,RENSTRÖM R,LUNDBERG B. Impact of conical tungsten projectiles on flat silicon carbide targets:transition from interface defeat to penetration [J]. International Journal of Impact Engineering,2006,32(11):1842-1856.

[17] LEE J K. Analysis of multi-layered materials under high velocity impact using CTH [D]. Air Force Institute of Technology Wright-Patterson AFB OH,Graduate School of Engineering and Management,2008.

[18] JOHNSON G R,COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains,strain rates,temperatures and pressures [J]. Engineering Fracture Mechanics,1985,21(1):31-48.

[19] HOLMQUIST T J,JOHNSON G R. Modeling prestressed ceramic and its effect on ballistic performance [J]. International Journal of Impact Engineering,2005,31(2):113-127.

[20] SERJOUEI A,GOUR G,ZHANG X,et al. On improving ballistic limit of bi-layer ceramic/metal armor [J]. International Journal of Impact Engineering,2017,105:54-67.

Numerical Simulation of the Effect of Pre-stress on the Ballistic Performance of Ceramics

WU Xue,ZHANG Xianfeng,DING Li,TAN Mengting,BAO Kuo,CHEN Beibei

(*School of Mechanical Engineering,Nanjing University of Science & Technology, Nanjing* 210094,*China*)

Abstract:In this work we studied the processes of applying pre-stress on SiC ceramics by using the finite element software AUTODYN. We established a model of long-rod projectile of different velocities penetrating ceramics with different pre-stress values to investigate the ballistic performance of the pre-stress ceramic,and obtained the stress distributions in the ceramic under different loading conditions through the comparison and analysis of the results,as well as the relation of different pre-stress and ballistic performance of the ceramic. The simulated results show that the appropriate pre-stress can improve the ballistic performance of ceramic,but the ballistic performance of ceramic is reduced when the pre-stress value is greater than 112 MPa,and that there exists a best matching relationship between the pre-stress value and the ballistic performance of the ceramics.

Keywords:ceramic armor;pre-stress ceramic;ballistic performance