

子弹正面射击防弹头盔的非贯穿变形分析*

钱俊宏, 羊毅, 朱平平

(西华大学 机械工程学院, 四川 成都 610039)

【摘要】子弹对头盔非贯穿性射击的变形会使头盔内表面与人体头部接触,而这种接触将会对人体头部造成伤害。为了研究这种非贯穿性损伤,将防弹头盔材料模型视为理想塑性的Johnson Cook材料模型,头盔表面曲线按照国家标准GA293-2012《警用防弹头盔及面罩》精确绘制。将子弹设置为刚性,子弹采用54式手枪7.62mm手枪弹,以450m/s的速度射击防弹头盔。仿真基于ABAQUS/Explicit分析模块进行,采用ABAQUS显示非线性动态分析,对头盔和子弹应用Abaqus自适应网格技术。结果显示,射击点离头盔顶部越远,头盔变形越大,对人体头部可能造成的伤害越大。

【关键词】防弹头盔;表面曲线;防弹性能

【中图分类号】TJ9;E939 **【文献标志码】**A **【文章编号】**1673-1891(2015)02-0045-03

DOI:10.16104/j.cnki.xccxb.2015.02.016

防弹头盔是单兵防护装备的重要组成部分。

统计表明,装备防弹头盔能有效的降低士兵的伤亡率^[1]。子弹射击头盔后,会出现头盔被子弹射穿和头盔未被子弹射穿两种情况。子弹射穿头盔后,将会对人体造成直接的致命伤害。头盔未被子弹射穿,并不意味着人不会受伤,高速入射的子弹具有很强的能量,这些能量冲击头盔将会对头盔造成很大的变形。头盔的应变会对人体头部造成不同程度的损伤,严重时则会危及生命。

子弹在未穿透防弹头盔的情况下,子弹的冲击会经头盔的位移、变形等方式传递到人体头部或颈部,对人体重要组织和器官造成伤害的现象称为非贯穿性损伤效应,又称装甲防护后效应(Behind Armor Ballistic Trauma, BABT)。非贯穿性损伤效应问题是近几年来欧美各军事装备管理部门、研究机构、测试单位和生产商的研究热点和关注焦点。他们主要着力研究BABT对人体的致伤机理、BABT对人体的致伤形式和BABT与防弹装备结构与性能的关系。国外相关研究部门也针对如何评价及测试防弹装备对弹道侵彻所致非贯穿性损伤的防护效果等进行课题研究^[2]。对于子弹射击防弹头盔后防弹头盔在非贯穿状态下受力传递状态测试和人员头颈部损伤的评估方面,目前国际上还没有明确的方法和标准,而国内这方面的研究工作也未见有相关报道^[3]。

1 建立模型

1.1 三维模型的建立

目前,我国军队装备的头盔主要有GK80型钢盔和QGF02型非金属(凯夫拉)头盔。上世纪七十年代,已成功研制出第一代GK80型防弹头盔,上世

纪八十年代初,正式将GK80型钢盔装备于部队使用。1994年成功研制出QGF型非金属(凯夫拉)头盔,该头盔的抗弹能力比GK80钢盔提高了38.4%,有效防护面积达1266 mm²,比GK80钢盔提高16%。本研究以QGF02型凯夫拉(Kevlar)头盔为研究对象。

QGF02型凯夫拉(Kevlar)头盔由外壳、衬里和悬挂件三部分组成。头盔模型的建立在三维数字化设计软件Creo中进行,头盔表面曲线参照国家标准GA293-2012《警用防弹头盔及面罩》绘制,表面曲线见图1。本论文研究重点在于子弹对头盔射击的有限元分析,为了简化分析模型,提高分析速度,对于头盔的外盔进行了简化处理,不考虑内衬和系带对分析结果的影响^[4],防弹头盔模型见图2。子弹采用54式手枪7.62 mm手枪弹,以450 m/s的速度射击防弹头盔,子弹简化模型见图3^[5]。子弹射击头盔仿真如图4所示。

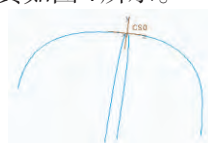


图1 头盔表面曲线

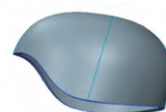


图2 QGF02头盔模型



图3 子弹模型



图4 abaqus中子弹射击头盔

1.2 材料参数的确定

本文所研究的防弹头盔材料为凯夫拉(kevlar)材料,本文研究重点在于防弹头盔表面曲线对防弹

收稿日期:2015-03-25

*基金项目:西华大学研究生创新基金(项目编号:ycj2014051)。

作者简介:钱俊宏(1987-),男,硕士研究生,助理工程师,研究方向:仿真分析,机械传动。

性能的影响。为简化分析,防弹头盔和子弹材料视为理想塑性的 Johnson Cook 材料模型,其主要物理属性见表 1^[6]。

表 1 Johnson Cook 材料模型

材料	弹性模量 E(Mpa)	泊松比 ν	密度 ρ (g/cm ³)
凯夫拉	96600	0.3	1.44
子弹	210000	0.3	7.81

2 有限单元法理论分析

2.1 ABAQUS 显示非线性动态分析

ABAQUS/Explicit 分析模块采用直接解法来求解动态问题,非线性动态问题的求解主要是利用数学的迭代法来计算,采用显示直接积分算法。在子弹的运动过程中,运动方程的时间积分应用中心差分方法求解,其主要的求解过程为:应用子弹运动的上一个增量步的动力学条件计算下一个增量步的动力学条件。显式动力学有限元基本方程为^[7]:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = F(t) \dots \dots \dots (1)$$

其中, M 表示系统质量矩阵, $\ddot{u}(t)$ 表示节点加速度向量, C 表示系统阻尼矩阵, $\dot{u}(t)$ 表示节点速度向量, K 表示系统刚度矩阵, u(t) 表示节点位移向量, F(t) 表示节点载荷向量。

在子弹开始射击头盔到子弹离开头盔这段时间内,运用中心差分法,子弹的速度和加速度的表达方式如下:

$$u(t) = \frac{1}{2\Delta t} [u(t + \Delta t) - u(t - \Delta t)] \dots \dots \dots (2)$$

$$\ddot{u}(t) = \frac{1}{\Delta t^2} [u(t - \Delta t) - 2u(t) + u(t + \Delta t)] \dots \dots \dots (3)$$

其中 Δt 为时间步长,通过联立(1)-(3)式,可得递推公式如下:

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} M + \frac{1}{2\Delta t} C\right) * u(t + \Delta t) + \left(K - \frac{2}{\Delta t^2} M\right) * u(t) + \left(\frac{1}{\Delta t^2} M - \frac{1}{2\Delta t} C\right) * u(t - \Delta t) = F(t) \dots \dots \dots (4)$$

将含有 u(t) 的项移到等式右侧,则(4)式转化为:

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} M + \frac{1}{2\Delta t} C\right) * u(t + \Delta t) + \left(\frac{2}{\Delta t^2} M - \frac{1}{2\Delta t} C\right) * u(t - \Delta t) = F(t) - \left(K - \frac{2}{\Delta t^2} M\right) * u(t) \dots \dots \dots (5)$$

计算时间步长的确定:

显示算法中,常常是利用中心差分法计算时间步长,中心差分法需要稳定的条件才能准确地求解。在求解时,所计算的时间步长必须小于求解方程所决定的某个临界值 Δt_{min} , 否则中心差分法将无法进行稳定的运算。临界时间步长通过 Courant - Friedrichs - Levy 准则进行计算^[8]:

$$\Delta t_{min} = \frac{2}{W_{max}} = \frac{L}{C} \dots \dots \dots (6)$$

其中, Wmax 表示系统的最大固有频率, L 表示单元特征长度, C 表示子弹的声速,子弹的声速 C 与子弹材料的性质有关,对于三维单元,材料中的声

速为:

$$C = \sqrt{\frac{(1 - \nu)E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)\rho}} \dots \dots \dots (7)$$

其中, L 表示泊松比, E 表示杨氏模量, ρ 表示材料密度。

2.2 网格划分

由于材料是不可压缩的,在弹塑性分析中如果使用二次完全积分单元(C3D20)很容易产生体积自锁。在网格划分时,如果将头盔材料定义为二次减缩积分单元(C3D20R),当材料应变大于 20% ~ 40% 时,则需要将防弹头盔划分足够细的网格才不会产生体积自锁。因此,头盔的网格划分选择线性减缩积分单元(C3D8R)。对于三维区域,头盔模型中存在接触和大的扭曲变形,采用结构化网格划分技术,得到六面体 HEX 单元网格,减小计算代价,同时也能提高计算精度。由于模型中存在大变形问题,头盔表面的几何形状会发生很大的变化,所划分的网格也会产生严重的扭曲变形。这会导致计算精度下降,稳定步长缩短,甚至无法达到收敛,无法求解出头盔的应力和应变结果。因此,使用自适应网格方法 ALE (Arbitrary Lagrange-Euler) 对头盔进行网格划分。Abaqus 的自适应网格不会改变头盔网格的拓扑结构,自适应网格方法 ALE 结合纯拉格朗日分析(网格跟随材料移动)和欧拉分析(网格位置固定,材料在网格中流动),被称为“任意拉格朗日-欧拉(ALE)分析”。自适应网格方法 ALE 比纯拉格朗日分析方法和单用欧拉分析方法分析更高效、更精确和更稳定。因此本研究中对头盔和子弹应用 Abaqus 的自适应网格。

3 结果及讨论

研究子弹射击与头盔厚度一致的 kevlar 平板和子弹正面射击凯夫拉防弹头盔,射击点分别落在距头盔顶 10 mm、20 mm、30 mm、40 mm 和 50 mm 处。被射击点的时间-位移曲线分别见图 5、图 6、图 7、图 8、图 9 和图 10。

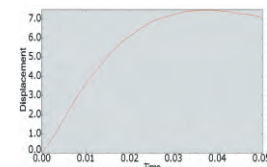


图 5 子弹射击 kevlar 平板

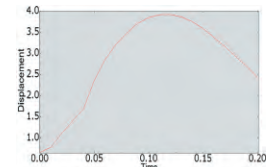


图 6 子弹射击点距头盔顶 10 mm 处

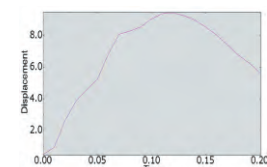


图 7 子弹射击点距头盔顶 20 mm 处

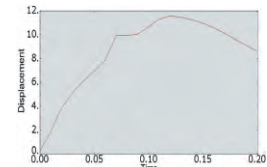


图 8 子弹射击点距头盔顶 30 mm 处

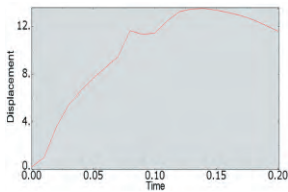


图9 子弹射击点距头盔顶40mm处

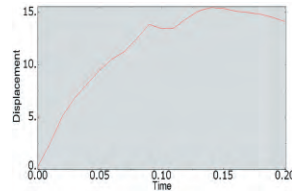


图10 子弹射击点距头盔顶50mm处

从图中可得出子弹射击QGF02头盔不同点的最大位移,见表2。

表2 不同射击点最大位移 (mm)

子弹射击 平板	距头盔顶 10 mm处	距头盔顶 20 mm处	距头盔顶 30 mm处	距头盔顶 40 mm处	距头盔顶 50 mm处
7.4	2.4	9.4	11.5	13.4	15.4

注释及参考文献:

- [1]孙幸福. 防弹头盔研制技术及发展前景[J]. 中国个体防护装备, 2009, 16(1): 14-16.
- [2]高晓清,黄献聪,周宏,等.防弹头盔防非贯穿性损伤性能测试技术研究[J].警察技术, 2013, 20(4): 66-69.
- [3]李焱,黄献聪.防弹头盔非贯穿性损伤评价研究进展[J].中国个体防护装备, 2008, 5(1): 17-19.
- [4]Magnus Aare, Svein Kleiven. Evaluation of head response to ballistic helmet impacts using the finite element method [J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 47(34): 596-608.
- [5]T.Børvik, S.Deya, A.H.Clausen. Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(7): 948-964.
- [6]S.G. Kulkarni, X.-L. Gao, S.E. Horner, J.Q. Zheng, N.V. David .H. Ballistic helmets - Their design, materials, and performance against traumatic brain injury [J]. Composite Structures, 2013, 101(02638223): 313-331.
- [7]M.A.G. Silva, C. Cisma-siu, C.G. Chiorean. Numerical simulation of ballistic impact on composite laminates [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31(3): 289-306.
- [8]Chian-Fong Yen. A ballistic material model for continuous-fiber reinforced composites [J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 46(5): 11-22.

Non-penetrating Deformation Analysis of the Bullet Shooting the Front of the Bulletproof Helmet

QIAN Jun-hong, YANG Yi, ZHU Ping-ping

(School of Mechanical Engineering, Xihua University, Chengdu, Sichuan 610039)

Abstract: The deformation of the bullet non-penetrating the bulletproof helmet can cause a contact between the inside of the helmet and the head. This contact can cause injury to head. In order to study the non-penetrating phenomenon, the material of the bulletproof helmet is regarded as Johnson-Cook material model of ideal plasticity. The helmet surface curve is accurately drew by reference the national standard GA293-2012 "bulletproof police helmet and mask". The bullet is set to a rigid, bullet use 54 type pistol 7.62 mm bullet, with the speed of 450 m/s shooting bulletproof helmet. The simulation analysis is based on ABAQUS/Explicit, using ABAQUS display nonlinear dynamic analysis, helmets and bullet on the application of Abaqus adaptive grid technique. The results show that shooting point further away from the top of a helmet, the more damage to head may be cause..

Key words: bulletproof helmet; surface curve; ballistic performance

(1)本研究按照国家标准绘制头盔曲线,并生成三维模型图。将头盔和子弹模型简化,并将材料视为理想塑性的Johnson-Cook材料模型。结果表明该假设能较好地分析头盔曲线对防弹性能的影响。

(2)从子弹射击头盔曲线上不同点的最大变形来看,离头盔顶越远,射击点的最大变形越大。这说明子弹对头盔的射击点离头盔顶部越远,对人体头部可能造成的伤害就越大。

(3)本研究防弹头盔表面曲线对防弹性能的影响分析,能在提高头盔防弹性能上提供一定的参考意义。