

运动环境下FEM-SPH耦合方法钢弹-钢板 冲击响应研究

冯江

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要:目的 研究钢弹冲击钢板的动力学响应。方法 采用ABAQUS/Explicit显式有限元分析软件,基于SPH-FEM耦合方法和常规FEM方法对钢弹冲击钢板进行数值模拟,对比两种方法得到的结果。结果 用这两种方法模拟得到的钢板Mises应力分布、钢弹速度随时间变化规律及剩余速度基本一致。结论 SPH-FEM耦合方法用于模拟钢板冲击失效过程是可行的。

关键词: 冲击; SPH; 动力学

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.06.014

中图分类号: TJ410 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)06-0080-04

Impact Response of Solid Steel Projectile-Plate under Move Environment

FENG Jiang

(Southwest Research Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: Objective To research the impact interaction between a high-velocity projectile and a solid steel plate.

Methods Coupled SPH-FEM and common FEM based on ABAQUS/Explicit software were used to numerically simulate the dynamic response and the results by the two methods were compared. **Results** The numerical results showed the changing patterns of Mises stress of plate and projectile velocity over time and the residual velocity by the two methods were basically identical. **Conclusion** The coupling method is feasible in simulating the failure process of steel plate impact.

KEY WORDS: impact; SPH; dynamics

由于钢材在生活中应用十分广泛,人们对钢材进行了大量研究。曹公望、王振尧等^[1]研究了45#碳钢在西双版纳热带雨林地区大气环境下的初期腐蚀行为。张兴华、骆晨等^[2]研究了AF1410高强度钢在北京地区大气环境中的腐蚀特点和腐蚀规律。李星、周人歌等^[3]研究了温度、湿度条件对45#钢腐蚀速度的影

响。丁国清、张波^[4]则对钢在自然环境中的大气腐蚀研究进行综述。以上都是对钢材的腐蚀性进行的研究,对钢板的冲击破坏研究更加常见。其中,大多采用常规的有限元方法。Sidney等^[5]早在2001年就进行了子弹冲击靶板边缘试验,并采用AUTODYN软件进行了数值模拟。孙计军、张洵安^[6]采用ABAQUS/

收稿日期: 2015-07-20; 修订日期: 2015-08-11

Received: 2015-07-20; Revised: 2015-08-11

作者简介: 冯江(1987—),男,重庆开县人,助理工程师,主要研究方向为机械电子工程。

Biography: FENG Jiang(1987—), Male, from Kaixian, Chongqing, Assistant engineer, Research focus: machinery and electronics engineering.

Explicit 显式有限元分析软件对固支钢板受大质量刚体亚临界速横向冲击进行了数值模拟。甘云丹等^[7]采用 LS-DYNA 有限元软件进行了弹性体涂覆钢板抗冲击性能的数值模拟。李成等^[8]采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对子弹侵彻防弹钢板进行数值模拟。

SPH 方法于 1977 年由 Lucy^[9]提出,当时主要用于研究天体物理学和宇宙理论^[10]。1991 年,SPH 方法首次被用来处理固体结构的动态响应问题^[11]。经过长时间的理论完善^[12-13],现在在处理大变形问题上有很大的优势。这是因为它是在 Lagrangian 描述下,用一系列点来插值模型空间,无需划分网格,所以不存在单元扭曲问题。模型中用 SPH 粒子模拟的部分可以通过定义接触与其他用 FEM 划分网格的部分联系在一起,这就是 SPH-FEM 耦合方法^[14-15]。徐金中等^[16]用 SPH-FEM 耦合方法模拟高速冲击问题,就初始光滑长度和粒子间距对计算结果的影响进行了深入研究。张志春等^[17]用 SPH-FEM 转换算法模拟了 7.62 mm 步枪弹冲击 30CrMnSiA 钢板过程。

文中采用 SPH-FEM 耦合方法模拟不同工况下钢弹冲击钢板过程,并与采用常规 FEM 模拟得到的结果进行对比,发现两种方法得到的结果基本一致。

1 冲击动力学模型

该模型模拟高速钢弹冲击钢板过程。钢板 SPH-FEM 耦合模型如图 1 所示,钢板的尺寸为 400 mm × 400 mm × 12 mm,考虑到钢板发生大变形的区域为弹着点附近,将板中心部分 60 mm × 60 mm × 12 mm 区域采用 SPH 粒子离散,粒子间距为 0.5 mm,粒子总数为 366 025。钢板外围部分采用三维六面体八节点减缩积分单元,单元尺寸为 5 mm,总数为 12 512。尺寸与材料参数都相同的钢板 FEM 模型如图 2 所示,全

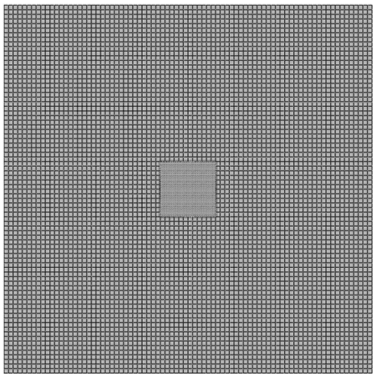


图1 钢板SPH-FEM模型
Fig.1 SPH-FEM model of steel plate

部采用三维六面体八节点减缩积分单元。为减少计算耗时,中间部分网格适当细化。圆柱球头钢弹尺寸如图 3 所示,质量为 0.1 kg,计算中作为刚体处理。分别在四种初速度 1500,1250,1000,750 m/s 情况下垂直钢板中心冲击,弹头与钢板的初始距离为 0。

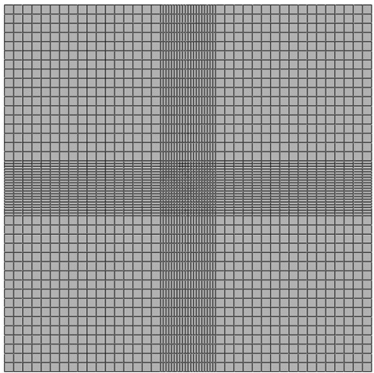


图2 钢板FEM模型
Fig.2 FEM model of steel plate

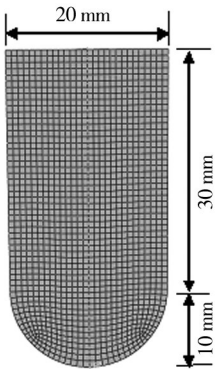


图3 钢弹FEM模型
Fig.3 FEM model of steel projectile

钢板为与应变率相关的弹塑性材料,采用基于位移准则的韧性破坏和剪切破坏模式。钢板的弹性模量为 210 GPa,密度为 7800 kg/m³,钢弹和钢板接触的摩擦系数为 0.3,钢板在不同应变率下的屈服应力见表 1。

表 1 钢板材料参数
Table 1 Parameters of steel plate material

应变率	屈服应力/MPa	应变率	屈服应力/MPa
0	776	1	808
0.001	791	10	810
0.01	799	100	812
0.1	805	1000	815

2 结果及分析

2.1 钢弹速度

四种初速度情况下,钢弹在冲击钢板过程中速度随时间的变化情况如图4所示。四种初速度情况下,采用SPH-FEM耦合、常规FEM两种方法模拟钢弹冲击钢板过程得到的钢弹剩余速度见表2。从图4和表2中可以看出,对于模拟钢弹冲击钢板过程,SPH-FEM耦合和常规FEM两种方法得到钢弹速度随时间变化的变化趋势及剩余速度基本一致。由此证明了SPH-FEM耦合方法模拟冲击问题的可行性。

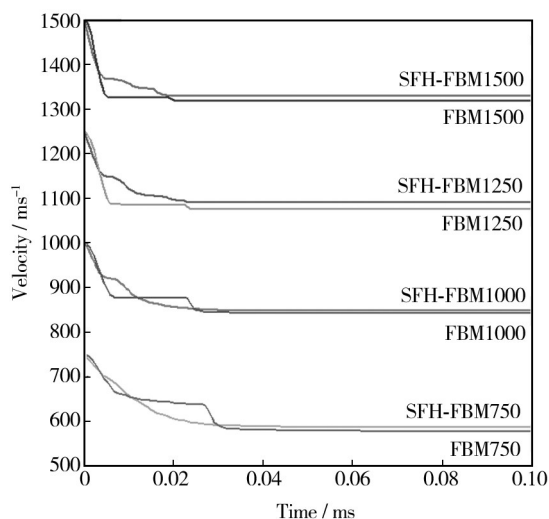
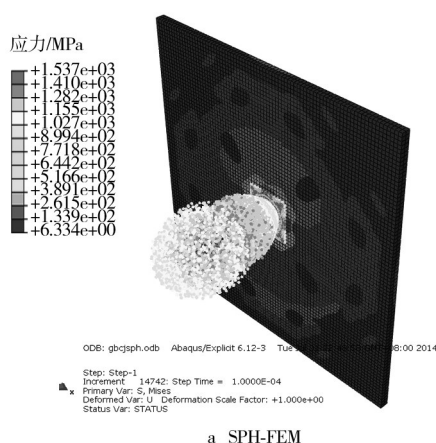
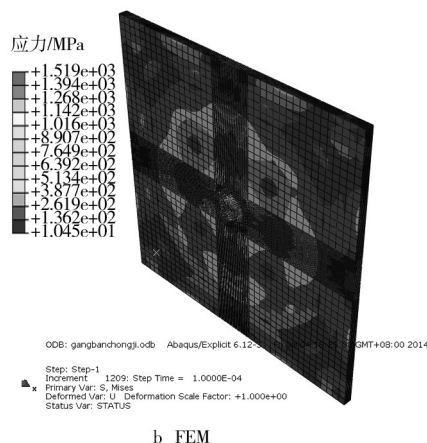


图4 钢弹速度随时间变化曲线

Fig.4 Velocity-time curve of steel projectile



a SPH-FEM



b FEM

图5 初速度为1500 m/s时的Mises应力

Fig.5 Mises stress at initial velocity of 1500 m/s

表2 剩余速度随初速度变化情况

Table 2 The relation of residual velocity and initial velocity

钢弹初速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	剩余速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	
	SPH	SPH-FEM
1500	1328	1319
1250	1092	1076
1000	848	843
750	587	576

2.2 Mises应力云图

初速度为1500,1250 m/s时采用SPH-FEM耦合方法和常规FEM方法模拟得到的Mises应力如图5和图6所示。可以看出,采用两种方法模拟得到的钢板应力大小及分布一致,进一步说明了SPH-FEM耦合方法用于冲击问题的可行性。

2.3 网格依赖性

在连续介质力学范畴,本构模型通常指材料的应力-应变关系。当材料发生大变形乃至破坏时会出现应变软化现象,初始的应力-应变关系已经不能准确代表材料的力学性能,这将导致计算结果对网格尺寸具有很大的依赖性。初速度为1500 m/s时,在不同网格尺寸下用FEM和SPH-FEM计算得到的钢弹速度随时间变化情况如图7所示。可以看出,采用SPH-FEM耦合方法和常规FEM方法都存在较大的网格尺寸依赖性。

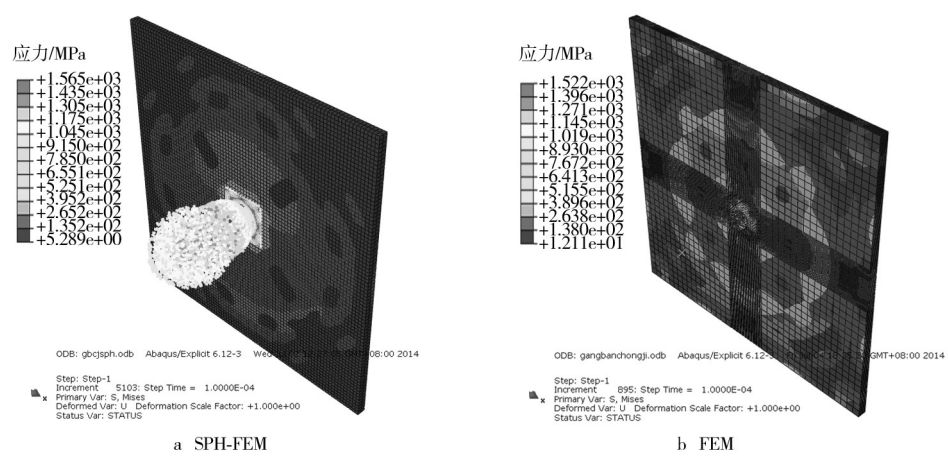


图6 初速度为1250 m/s时的Mises应力
Fig.6 Mises stress at initial velocity of 1250 m/s

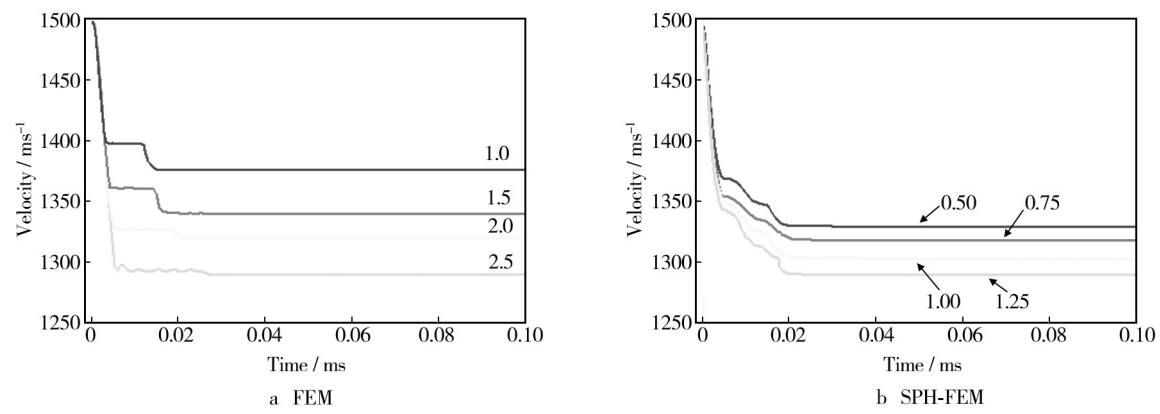


图7 不同网格尺寸下的速度时间曲线
Fig.7 Velocity-time curve at several Mesh sizes

3 结论

采用SPH-FEM耦合方法和常规FEM模拟了多种工况下钢弹冲击钢板的过程。在模拟过程中以及对模拟结果的分析得到以下结论。

- 1) 使用SPH-FEM耦合方法模拟冲击等大变形问题是可行的。
- 2) SPH-FEM耦合方法和常规FEM模拟冲击问题都呈现出较大的网格依赖性。

参考文献:

[1] 曹公望,王振尧,汪川,等. 45#钢在西双版纳大气环境下的腐蚀研究[J].装备环境工程,2014,11(2):1—6.
CAO Gong-wang, WANG Zhen-yao, WANG Chuan, et al. Research on Atmospheric Corrosion of 45# Carbon Steel in Xi-shuangbanna Area[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(2): 1—6.

2014, 11(2): 1—6.
[2] 张兴华, 骆晨, 刘明, 等. AF1410高强度钢大气腐蚀试验研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(6): 19—22.
ZHANG Xing-hua, LUO Chen, LIU Ming, et al. Atmospheric Exposure Test of AF1410 High-strength Steel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6): 19—22.
[3] 李星, 周人歌, 陈津虎, 等. 钢和硬铝的加速腐蚀试验研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(6): 5—8.
LI Xing, ZHOU Ren-ge, CHEN Jin-hu, et al. Study on Accelerated Corrosion Testing of Steel and Duralumin[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6): 5—8.
[4] 丁国清, 张波. 钢在自然环境中的大气腐蚀研究进展[J]. 装备环境工程, 2010, 6(3): 46—52.
DING Guo-qing, ZHANG Bo. Research Progress of Atmospheric Corrosion of Steels in Natural Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 6(3): 46—52.
[5] SIDNEY C, CHARLES E, ANDERSON J, et al. Impact of the (下转第99页)

Vehicle and Fitting, 2006 (38): 26—27.

- [29] 谈越明. 发电车空调机组运用试验总结与分析[J]. 铁道车辆, 1997, 35(11): 39—42.
- TAN Yue-ming. Summarize and Analysis on Using Test of Air conditioner sets in generator car[J]. Railway Vehicle, 1997, 35 (11): 39—42.
- [30] 洪东跑, 赵宇, 马小兵. 利用变环境试验数据的可靠性综合评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(9): 1153—1155.
- HONG Dong-pao, ZHAO Yu, MA Xiao-bing. Integrated Reliability Assessment Using Varied Environment Test Data[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(9): 1153—1155.
-
- (上接第83页)
- 7.62-mm APM2 Projectile against the Edge of a Metallic Target[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25: 423—437.
- [6] 孙计军, 张洵安. 大质量刚体亚临界速横冲钢板带数值模拟[J]. 郑州大学学报(工学版), 2007, 28(02): 105—109.
- SUN Ji-jun, ZHANG Xun-an. Numerical Simulation of Encastred Steel Belt Impacted Transversely by a Rigid Mass with Hypo-critical Velocity[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2007, 28(02): 105—109.
- [7] 甘云丹, 宋力, 杨黎明. 弹性体涂覆钢板抗冲击性能的数值模拟[J]. 兵工学报, 2009, 30(S2): 15—18.
- GAN Yun-dan, SONG Li, YANG Li-ming. Numerical Simulation for Anti-blast Performances of Steel Plate Coated with Elastomer[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(S2): 15—18.
- [8] 李成, 马志垒, 王永涛. 冲击荷载下防弹钢板三维损伤分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2010, 31(04): 85—88.
- LI Cheng, MA Zhi-lei, WANG Yong-tao. Three-dimensional Damage Analysis of Bullet-proof Steel Plate under Impact Loading[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2010, 31(04): 85—88.
- [9] LUCY L B. A Numerical Approach to the Testing of the Fission Hypothesis[J]. Astron. 1977, 82: 1013.
- [10] GINGOLD R A, MONAGHAN J J. Smoothed Particle Hydrodynamics: Theory and Application to Non-spherical Stars[J]. Mon Not R Astr Soc, 1977, 181: 375—389.
- [11] LIBERSKY L D, PETSCHKE A G, CARNEY T C, et al. High Strain Lagrangian Hydrodynamics[J]. Comput Phys, 1991, 109: 67—75.
- [12] SWEGLE J W, HICKS D L, ATTAWAY S W. Smoothed Particle Hydrodynamics Stability Analysis[J]. Journal of Computational Physics, 1995, 116: 123—134.
- [13] RANGLES P W, LIBERSKY L D. Smoothed Particle Hydrodynamics: Some Recent Improvements and Applications[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1996, 139: 375—408.
- [14] 牛宝良, 程家军. 某冲击响应谱试验超差现象及其原因分析[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 26—28.
- NIU Bao-liang, CHENG Jia-jun. Out of Tolerance Phenomena and Cause Analysis of a SRS Shock Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1): 26—28.
- [15] 刘亚超, 宣兆龙, 程泽. 弹药集装单元动力学试验研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 49—52.
- LIU Ya-chao, XUAN Zhao-long, CHENG Ze. Research on Dynamic Test of Ammunition Packaging Unit[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1): 49—52.
- [16] 饶进军, 黄锦辉, 冯俊兴. 可空投系留平台空投跌落冲击响应研究[J]. 包装工程, 2014, 35(21): 20—24.
- RAO Jin-jun, HUANG Jin-hui, FENG Jun-xing. Airdropped Impact Effect of Airdropped Tethered Balloon Platform[J]. packaging engineering, 2014, 35(21): 20—24.
- [17] 徐金中, 汤文辉. 高速碰撞SPH方法模拟中的初始光滑长度和粒子间距[J]. 计算物理, 2009, 26(4): 548—552.
- XU Jin-zhong, TANG Wen-hui. Initial Smoothing Length and Space between Particles in SPH Method for Numerical Simulation of High-speed Impacts[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2009, 26(4): 548—552.
- [18] 张志春, 强洪夫, 傅学金, 等. 基于SPH-FEM转换算法的7.62 mm步枪弹冲击30CrMnSiA钢板的数值计算[J]. 计算物理, 2012, 29(01): 73—81.
- ZHANG Zhi-chun, QIANG Hong-fu, FU Xue-jin, et al. A 7.62 mm Rifle Bullet Impacting on a 30CrMnSiA Steel Target Plate: SPH-FEM Conversion Algorithm[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2012, 29(01): 73—81.