

EFP 侵彻带水隔舱的数值模拟

王少宏,王志军,尹建平,伊建亚,李玉品

(中北大学 机电工程学院,太原 030051)

摘要:为了对舰船带水隔舱进行有效毁伤,本文从成型装药理论入手,利用 LS-DYNA 软件模拟了爆炸成型弹丸的成型过程,以及对带水隔舱的侵彻过程,分析了药形罩壁厚对侵彻效应的影响。结果表明:当装药直径为 60 mm、装药高度为 46.86 mm 时,壁厚为 3 mm 的战斗部结构可以对带水隔舱的等效靶板进行有效毁伤,实现对目标的大穿孔威力要求。

关键词:EFP;带水隔舱;壁厚;LS-DYNA

本文引用格式:王少宏,王志军,尹建平,等. EFP 侵彻带水隔舱的数值模拟[J]. 兵器装备工程学报,2017(12):253-255,291.

Citation format: WANG Shaohong, WANG Zhijun, YIN Jianping, et al. Study on the Influence of Wall Thickness on EFP Penetrate and Water Bulkhead[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017(12):253-255,291.

中图分类号:TJ410.3

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2017)12-0253-03

Study on the Influence of Wall Thickness on EFP Penetrate and Water Bulkhead

WANG Shaohong, WANG Zhijun, YIN Jianping, YI Jianya, LI Yupin

(School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To carry out effective damage to the ship's water compartment, this article mainly starts from the molding charge theory, the forming process of explosive forming pellets was simulated with LS-DYNA software and the process of penetrating water partition, The influence of the wall thickness on penetration effect was analyzed. The results show when the charge diameter is 60mm, the charge height is 46.86mm, The warhead with the wall thickness is 3 mm can effectively destroy the equivalent target plate with water bulkhead, and achieved a large perforation power requirement for the target.

Key words: EFP; water bulkhead; wall thickness; LS-DYNA

在海战中,航空母舰和大中型水面舰艇及其编队具有较强的对空、对海防御能力;随着反导弹技术不断完善和反导系统不断加强,大大增加了各类水面舰艇的反导能力。然而在水下则部分与水上部分不同,其防御和对付水下攻击武器的能力明显是个薄弱环节。水下的攻击武器一般有鱼雷和主、被动水雷等^[1]。手段虽然不多,但是舰船只能通过声纳进行规避或拦截,反击效率低,而且水下爆炸破坏威力远大于空气介质。随着科学技术的不断发展,目标防护能力越来越强。现代舰船结构上采用多壳体加水舱,为了防止鱼雷、水雷和深水炸弹等反潜武器的攻击,装甲加厚,外壳也普遍

使用高强度的合金材料,因此具有了很强的抗暴能力。常规爆破式战斗部已很难对舰船致以重创,而采用聚能战斗部爆炸后形成射流具有很强的侵彻能力,可破坏舰船装甲和内部纵深方向的设备和结构,因而采用聚能战斗部是提高毁伤效力的有效手段也是弹药的重要发展方向。吕锦锋等人以典型的舰舷结构为对象,利用 LS-DYNA 中的 ALE 算法耦合高速侵彻体与水下爆炸波两种载荷,对舰舷结构耦合损伤过程进行数值模拟仿真研究^[2];王海福等人采用 AUTODYN-2D 软件在对杆式射流装药水下作用行为数值模拟的基础上,进行了杆式射流装药设计和水下毁伤效应验证试验,提出了一

收稿日期:2017-09-16; **修回日期:**2017-10-06

基金项目:国家自然科学基金项目(11572291);山西省研究生联合培养基地人才培养基金项目(20160033,20170028)

作者简介:王少宏(1993—),硕士研究生,主要从事兵器科学与技术研究。

种可形成一定速度的偏心半球罩杆式射流装药,适当选取装药长炸高,这种装药水下作用可产生空腔随进效应^[3];杨莉等人通过爆炸成型弹丸相关测试数据,采用变壁厚球缺罩设计的聚能装药战斗部适用于侵彻搭建个含水复合装甲防护结构,并且得到爆炸成型弹丸对含水复合装甲结构的侵彻威力主要取决于弹丸的形状和初始速度的结论^[4]。

1 计算模型

1.1 几何模型的建立

EFP 战斗部是由药形罩、炸药、壳体和起爆装置组成,其中炸药选择圆柱形装药,药形罩口径为 60 mm,使用等壁厚球缺罩,材料为紫铜,图 1 为药形罩结构示意图,其中 R_1 为罩外曲率半径, R_2 为罩内曲率半径, h 为罩壁厚。

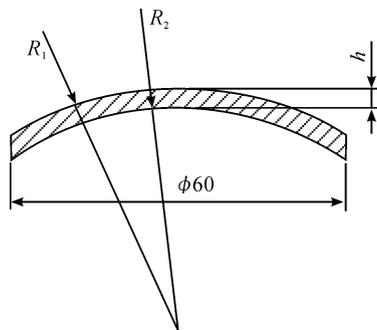


图 1 药形罩结构示意图

1.2 有限元模型及网格划分

利用 TrueGrid 软件构建有限元模型后导入 LS-DYNA 中进行求解计算。由于结构的平面对称性,所以在施加对称约束的情况下可利用 TrueGrid 软件建立 1/4 有限元模型,大大提高了效率而不失精确,如图 2 所示,所有单元均为 8 节点实体单元 Solid164。忽略铝壳对 EFP 成型的影响。

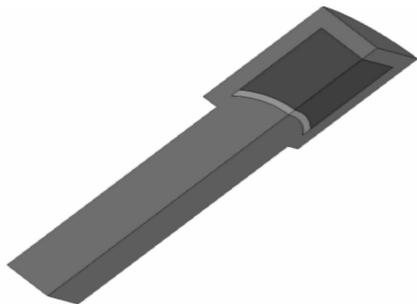


图 2 1/4 有限元模型

1.3 材料模型及参数

在数值模拟计算中,材料参数的选取直接影响到计算的精确性,不同材料模型对材料的描述不同,这些区别都会影响仿真计算的结果。因此,选择合理的本构模型及材料参数是保证结果准确的必要前提。

炸药选用 8701 炸药,使用 JWL 状态方程来精确描述炸药爆轰过程中的体积、压力和能量特性,具体表达式为

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \eta} \right) e^{-R_1 \eta} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \eta} \right) e^{-R_2 \eta} + \frac{\omega e}{\eta}$$

$$P = FP_{\text{eos}}(\eta, e)$$

式中: P_{eos} 为炸药爆轰产物的压力; P 为炸药单元所释放的压力; F 为炸药燃烧质量分数; $\eta = \rho/\rho_0$ 为爆轰产物相对体积,其中 ρ_0 和 ρ 分别为炸药初始密度和爆轰产物密度; e 为单位体积爆轰产物的内能; A 、 B 、 R_1 、 R_2 为输入参数。

药形罩对成型聚能侵彻体的质量好还起决定作用,直接决定了其毁伤性能的优劣。本次计算选用的是紫铜,材料模型为 MAT_JOHNSON_COOK,它是在考虑了金属材料承受大应力、高应变率以及高温的情况下,用来描述动态响应过程和材料变形问题。其屈服应力表达式为

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon_p^*) (1 + C \ln \varepsilon_p^*) (1 - T_m^*)$$

式中: σ_y 为材料屈服应力; A 、 B 、 C 、 n 和 m 是与材料有关的常数; ε_p 为等效塑性应变; $\varepsilon^* = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$ 为量纲为 1 的等效塑性应变率; $T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}$ 是温度的无量纲化,其中 T_m 、 T_r 分别指材料的熔点和室温。

2 EFP 成型过程仿真

采用中心点起爆的方式,针对 EFP 战斗部模型进行数值模拟,得到不同时刻的成型情况如图 3 所示。

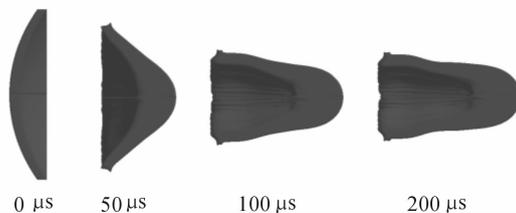


图 3 EFP 战斗部成型情况

仿真结果表明:起爆 40 μs 后,炸药的爆轰作用基本结束;100 μs 后 EFP 基本成型结束;200 μs 后,EFP 首尾没有速度差,形状匀称、结构紧凑、不再改变,结束仿真。

3 EFP 侵彻带水隔舱研究

3.1 结构模型

计算中,药型罩、EFP 装药、模拟战斗部目标均为轴对称结构,侵彻过程中也是轴对称的,为方便计算,建立 1/2 结构模型,计算模型如图 4 所示。起爆方式采用装药顶端中心点起爆,药型罩、EFP 装药,都采用 Euler 形式的网格进行计算,装药壳体与等效目标靶板(储水仓)采用 Lagrange 网格,使用 45# 钢材料,忽略水介质影响。两种网格之间的接触采用程序自带的 Lagrange-Euler 自由耦合算法。

3.2 仿真计算分析

在查阅国内外参考文献的基础上,对带水隔舱目标进行易损性分析,最终选定壁厚为 5 mm 的圆柱课题(等效为 5mm 厚双层间隔靶板),根据仿真成型过程的优化分析,综

合考虑各个影响因素,初步选用装药直径 60 mm、装药高度为 8 mm、内罩壁曲率半径为 46.86 mm,壁厚分别为 2.5 mm、3.0 mm、3.5 mm 等壁厚药形罩作为战斗部毁伤元对目标进行毁伤效能分析。由表 1 可看出,三种壁厚条件下 EFP 均贯穿靶板,且穿孔孔径均大于 EFP 直径。

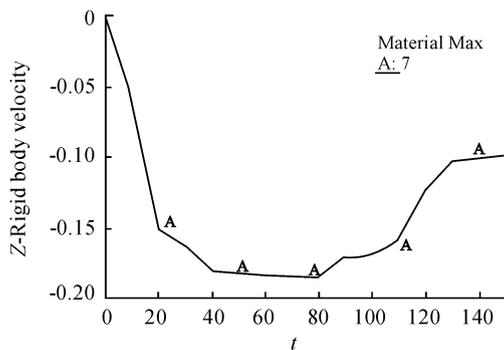


图 4 1/2 计算模型

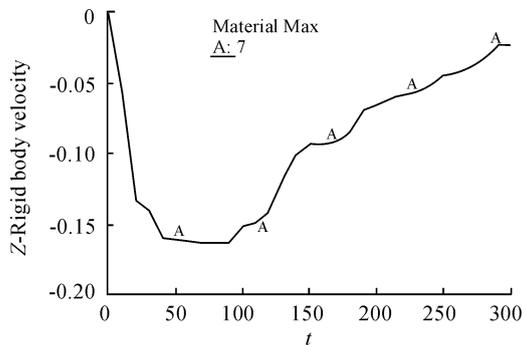
表 1 壁厚对侵彻效果的仿真

壁厚	2.5 mm	3.0 mm	3.5 mm
0 μ s			
100 μ s			
180 μ s			
孔径一	38.66 mm	42.26 mm	35.52 mm
孔径二	34.28 mm	32.90 mm	35.12 mm
形式	贯穿	贯穿	贯穿

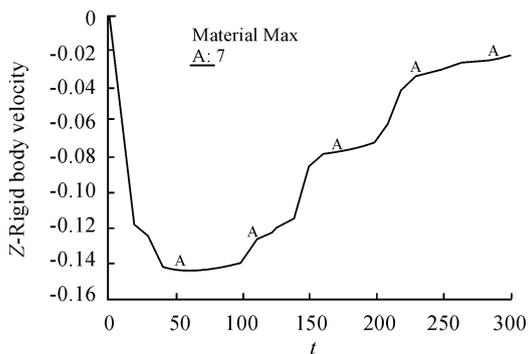
从图 5 所示的 EFP 速度曲线来看,壁厚为 2.5 mm 药型罩剩余速度最大,壁厚 3.5 mm EFP 剩余速度最小,EFP 贯穿第一层靶板后,并不是匀速运动,其原因是因为炸药的爆轰产物在短时间对其作用力并未消失,当贯穿第二层靶板后,EFP 经历一个减速的过程之后,速度趋于定值,整个侵彻过程结束;从贯穿口径来看,当壁厚选取 3 mm 药型罩所形成的 EFP 对目标第一层开孔效果较好,对第二层靶板开孔效果一般。壁厚为 2.5 mm EFP 与壁厚 3.5 mm EFP 对两层靶板开孔效果相当,由此可看出并不是速度越大,开孔能力就越大,也并不是药型罩壁厚越大,开孔效果越好。



(a) 壁厚 2.5 mm



(b) 壁厚 3.0 mm



(c) 壁厚 3.5 mm

图 5 EFP 速度曲线(m/s)

4 结论

根据试验和模拟计算结果,将 EFP 战斗部的侵彻过程分为两个阶段:开坑阶段和稳定侵彻阶段。本文选用了壁厚 2.5 mm、3.0 mm、3.5 mm,装药高度 80 mm,曲率半径为 46.86 mm 的药型罩进行威力性能测试。研究结果表明,壁厚为 3.0 mm 的药型罩对目标靶板具有较好的开孔能力,较适合作为战斗部使用。

参考文献:

- [1] 王志军,尹建平. 弹药学[M]. 北京:北京理工大学, 2005:207-257.

3 结论

1) 60Si2Mn 钢惯性轴向摩擦焊后接头主要组织为珠光体、铁素体、马氏体与下贝氏体混合组织,经热处理后,焊接接头组织差异性消失。焊后焊接接头拉伸试样断裂位置位于远离焊缝中心的母材,焊接接头的显微硬度、强度均高于母材。

2) 经热处理后,23.5 mm 厚的 60Si2Mn 钢管管壁上各位置的抗拉强度基本一致,抗拉强度均达到 1 200 MPa 以上,拉伸断口呈现沿晶断裂与韧窝断裂结合的混合断裂特征。

3) 采用轴向惯性摩擦焊工艺可实现 60Si2Mn 厚壁钢管的高强度连接。本文的研究结果对高碳钢、高强度厚壁钢管的高强度连接具有一定的指导意义和参考价值。

参考文献:

[1] 柳燕,钱小亮,姜春茂. 60Si2Mn 钢摩擦焊后热处理工艺的改进[J]. 精密成形工程, 2011, 3(3): 25-28.

[2] 沈世瑶. 焊接方法及设备[M]. 北京:机械工业出版社, 1982, 183-198.

[3] LI Wenya, VAIRIS A, PREUSS M, MA Tiejun. Linear and rotary friction welding review [J]. International Materials Reviews, 2016, 61(2): 71-100.

[4] AHMAD C, MOHAMMAD J, JONATHAN C. A Review on Inertia and Linear Friction Welding of Ni-Based Superalloys [C]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46A: 1639-1669.

[5] BENNETT C J, HYDE T H, SHIPWAY P H. A transient finite element analysis of thermoelastic effect during inertia friction welding [J]. Computational Materials Science, 2011, 50(9): 2592-2598.

[6] Nirmal S, Kalsi Vishal S, Sharma. A statistical analysis of rotary friction welding of steel with varying carbon in work-pieces[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 57: 957-967.

[7] HUANG Z W, LI H Y, BAXTER G, et al. Electron microscopy characterization of the weld line zones of an inertia friction welded superalloy [J]. Journal of Material processing Technology, 2011(12): 1927-1936.

[8] 桂方亮,张全忠,张立文. GH4169 合金大型环形件惯性摩擦焊数值模拟[J]. 航空制造技术, 2006(10): 78-81.

[9] 王非凡,李文亚. 轴向压力对轴向惯性摩擦焊的影响数值分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(2): 41-44.

[10] 卜文德,刘金合,徐韦锋,徐晓菱,吴玮. GH4169 高温合金惯性摩擦焊接头温度场分布及变化规律[J]. 航空制造技术, 2010(7): 84-88.

[11] 杨军,楼松年,严隽民. GH4169 高温合金惯性摩擦焊接头晶粒分布特征[J]. 焊接学报, 2001, 22(3): 33-35.

[12] MOAT R J, KARADGE M, et al. Detailed Diffraction and Electron Microscopy Study of Inertia-friction-Welded Dissimilar High-Strength Steels [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42A: 3130-3140.

(责任编辑 杨继森)

(上接第 255 页)

[2] 吕锦锋. 高速侵彻体与水下爆炸波对舰舷结构的联合作用研究[D]. 南京:南京理工大学,2005.

[3] 王海福,江增荣,俞为民,等. 杆式射流装药水下作用行为研究[J]. 北京理工大学学报,2006,26(3):189-192.

[4] 杨莉,张庆明,巨圆圆,等. 反舰聚能战斗部装药结构研究[J]. 兵工学报,2009,30(S2):154-158.

[5] 邱磊. 潜艇结构的失效模式及影响分析[J]. 黑龙江科技

信息,2016(30):64.

[6] 陈虹,冷文军. 美、俄核潜艇技术发展述评[J]. 舰船科学技术,2008,30(2):38-44.

[7] 常向阳,王自力. 爆炸成型弹丸侵彻钢靶的 ALE 算法[J]. 解放军理工大学学报,2004,5(3):70-73.

(责任编辑 杨继森)