

船舶下水用气囊的非线性分析

刘志毅¹, 吴剑国¹, 孙菊香²

(1. 浙江工业大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310032; 2. 济南昌林气囊容器厂, 山东 济南 250023)

摘要:对船舶下水用气囊的材料、几何和接触等非线性特性进行分析, 并采用非线性有限元分析软件 MSC. Marc 对其进行数值模拟, 研究气囊内压和外载荷与气囊压缩高度的关系。与试验结果对比表明, 本研究方法具有较高的精度。另外, 还分析了气囊帘线和橡胶层的应力分布, 为气囊设计提供了依据。

关键词:气囊; 非线性; 船舶下水; 有限元分析

中图分类号: TQ336. 8; O241. 82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2012)10-0605-05

船舶气囊下水是一项由我国近年独创的新型下水技术。气囊下水具有机动灵活、成本低和效率高等优点, 对中小船舶企业发展起到了极大的推动作用。船舶气囊下水早期基本上是凭借经验, 缺乏理论支持。随着气囊承载力的增大, 采用气囊下水的船舶愈来愈大, 风险愈来愈高。2006 年浙江省科技厅曾立项进行“船舶气囊下水技术与应用研究”, 但研究的重点在气囊下水的计算和测试以及下水工艺, 对气囊特性缺乏研究, 相关的船舶气囊下水计算中采用了较为粗糙的气囊刚度公式。研究表明, 船舶气囊下水的安全性、经济性与气囊的力学特性有关, 气囊的刚度特性对气囊下水计算的准确性有重要影响^[1-2]。因此, 对船舶下水用气囊进行理论和试验研究很有必要。然而, 船舶下水用气囊体积很大(直径为 1.5~1.8 m, 长约 20 m), 受力巨大(300~500 t), 无法进行足尺寸试验。济南昌林气囊容器厂曾做过模型试验(直径为 0.6~0.8 m, 总长约 3 m), 获得了气囊内压和外载荷与气囊压缩高度的关系。

本研究利用非线性有限元分析软件 MSC. Mentat(版本 2005R2)建立模型, 并用 MSC. Marc 求解器进行气囊压缩模拟的数值计算, 分析气囊内压和外载荷与气囊压缩高度的关系, 并与气囊压缩试验数据进行对比, 判断有限元模拟的精度^[3-7]。另外, 还分析了气囊帘线和橡胶层的应力分布, 以期气囊设计提供依据。

作者简介:刘志毅(1984—), 男, 浙江杭州人, 浙江工业大学在读硕士研究生, 主要从事船舶用橡胶制品研究。

1 气囊的非线性特性

船舶下水用气囊是一种以橡胶为基础材料和增强纤维为加强层(帘线层)构成的复杂多层柔性层合结构。从结构上讲, 气囊是一个复杂的帘线-橡胶复合材料层合壳, 其几何形状为不等厚双曲壳。为了提高帘线的性能, 制造帘线时必须加捻, 相当于给帘线施加一个初始应力。船舶下水时, 气囊的工作高度变化很大, 因此气囊刚度分析过程涉及材料、几何和状态等多重强非线性问题。

1.1 材料非线性

船舶下水用气囊具有弹性非线性、粘弹性、非均质和各向异性的性质。帘线可认为是线弹性材料, 其力学性能由各层帘线的力学和几何特性等决定。橡胶可认为是各向同性、近似不可压缩的超弹性材料, 在变形过程中, 应力是瞬时应变的非线性函数。本研究为简化橡胶材料模型, 假设橡胶材料为各向同性、不可压缩的超弹性材料, 并且只考虑其弹性非线性而不考虑粘弹性, 其力学特性可用 Mooney-Rivlin 模型应变能密度函数(U)来描述:

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (1)$$

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (2)$$

$$I_2 = \lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_3^{-2} \quad (3)$$

式中, C_{10} 和 C_{01} 为超弹性材料常数, I_1 和 I_2 分别为第一和第二偏应变变量, λ_1 , λ_2 和 λ_3 分别为 3 个拉伸方向的拉伸系数。

1.2 几何非线性

橡胶具有低模量、大变形和外载荷去掉后迅

速恢复等特点。橡胶气囊是一种薄壁结构,一般为8~10 mm厚,受力作用时,尽管应变较小,未超过弹性极限,但位移和变形较大,已远超过线性理论的范畴,1.5 m高的气囊最低工作高度仅为0.2 m,具有高度的几何非线性。这种几何非线性特性是由工作时橡胶气囊大变形引起的,其结构刚度不仅取决于材料和初始变形,而且在很大程度上取决于受载后的应力分布和位移,因此采用几何非线性全拉格朗日法进行求解。

1.3 接触非线性

在工作过程中,橡胶气囊发生变形,与上、下盖板之间产生接触。气囊的接触面积变化与径向变形呈非线性关系,使其在大压缩变形的情况下的弹性非线性特性表现得更加明显。实际上,从力学角度分析,接触本身就是边界条件高度非线性的复杂问题。气囊受力变形后发生的接触是不能事先准确判断的,也就是在接触问题中边界条件不是在计算开始前就给出,而是计算的结果。相互接触过程中,接触面的面积与压力分布随外载荷变化而变化,并与接触体的刚性有关,可利用面接触的力学模型,借助主动体与被动体的概念,建立主动体节点和被动体面的自由度与变形的关系,采用拉格朗日乘子法求解,从而确定接触边界条件。

综上所述,船舶下水用气囊是多重强非线性问题,在理论上求解相当困难,本研究利用高级非线性有限元软件 MSC. Marc 对其进行数值分析。

2 有限元模型建立

船舶下水用气囊如图1所示。建模可分2步进行。第1步,建立二维平面单元:首先建立几何模型,由若干个四边形和若干条直线组成,将四边形和直线分别转变为二维平面单元和线单元(如图2所示),并定义二维平面单元为四节点平面轴对称单元、线单元为二节点轴对称单元,分别作为橡胶基体和帘线单元。利用 MSC. Mentat 里的 INSERTS 功能把加强筋单元嵌入到基体单元中。在二维模型里建立空腔,为气体加载作准备。第2步,建立三维模型:以模型中心轴(X轴)为旋转轴旋转二维模型,橡胶基体单元和帘线单元将自动转换成八节点实体单元和四节点平面薄膜单

元(如图3所示)。本模型共产生1740个橡胶基体单元和3480个帘线单元。



图1 船舶下水用气囊

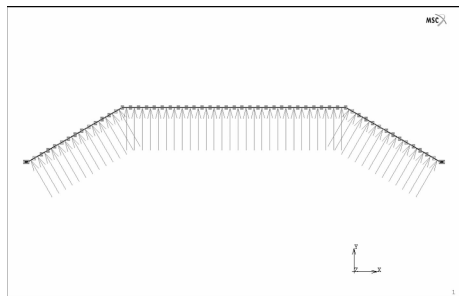


图2 二维模型

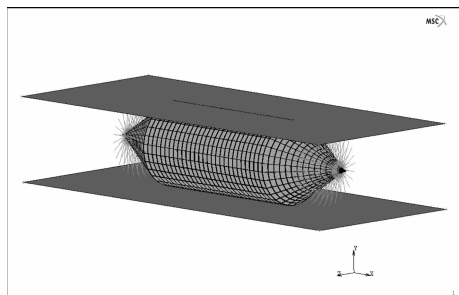


图3 三维模型

2.1 有限元模型材料

气囊主要由橡胶和帘线两部分组成。在 MSC. Mentat 里,通过定义 Mooney 模型的超弹性材料常数对橡胶材料进行描述。气体压力载荷主要由增强纤维承受。由于帘线的各向拉伸模量不同,使帘线层呈现出复杂的力学各向异性和非线性特性,合理地模拟帘线层是有限元分析结果合理和准确的关键。在 MSC. Mentat 里,提供了加强筋模型 Rebar 单元,用于增强帘线复合材料的几何和物理非线性分析,效果极好。Rebar 单元通过设定各层帘线的相对位置、排列密度、截面积、与相关轴的夹角及其弹性模量和泊松比等参数,可方便而准确地处理各帘线层的帘线空间方向等问题。

2.2 空气模拟

气囊同时受到外部大气和内部气体的压力,其中大气压力保持不变,内部气体对气囊刚度起

着决定性作用。气囊发生垂向位移时,其容积变化较大,因此气压将发生较大变化,需要对气体进行适当模拟。在 MSC. Mentat 里通过定义空腔 CAVITY,并定义气体初始内压、密度和温度进行模拟。

2.3 接触关系

船舶下水用气囊在工作时主要涉及船底板和船台。由于船底板和船台变形相对气囊变形是微小的,因此在有限元分析中,可把气囊定义为弹性体,底板和船台定义为刚体,并定义船底板位移随时间的变化关系。然后在接触表中定义气囊与船台和船体之间的接触关系,以减少不必要的计算费用,见图 4。

CONTACT TABLE PROPERTIES				SECOND		
FIRST	BODY NAME	BODY TYPE		1	2	3
1	deform	deformable		T	T	T
2	rigid_down	rigid				
3	rigid_up	rigid				

图 4 接触表定义

2.4 大变形几何非线性

采用大位移 UPDATED LAGRANGE 格式的增量方法处理气囊的大变形几何非线性问题,通过调整加载时间步长即可获得稳定的计算结果。为了模拟气囊边界位移和力,第 1 步施加初始内压,模拟对气囊充气;第 2 步封闭已经施加初始内压的气囊,并对刚体施加一个随时间变化的垂向位移来模拟加载过程。

3 有限元分析与试验结果对比

济南昌林气囊容器厂所设计的气囊模型的刚度试验原理如图 5 所示,每压缩(或卸载)一定高度,测量气囊的内压和外载荷。试验所用气囊直径为 0.6 m、长度为 2.8 m,气囊初始内压分别为 0.03 和 0.05 MPa。试验所得内压与压缩量的关系如图 6 所示。

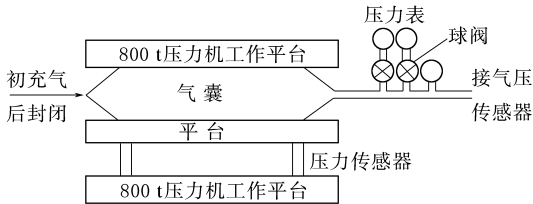
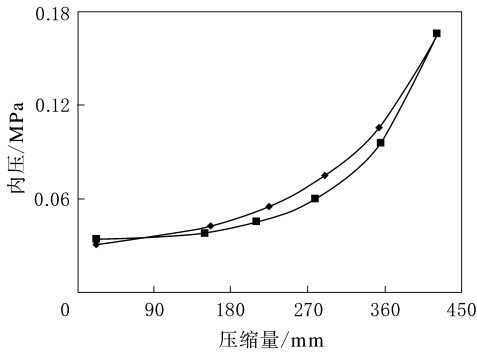
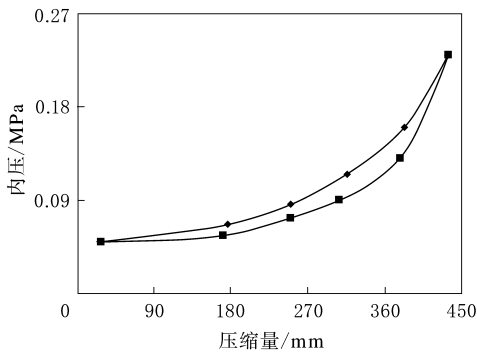


图 5 气囊内压和外载荷测试示意



(a) 初始内压 0.03 MPa



(b) 初始内压 0.05 MPa

◆—压缩过程;■—卸载过程。

图 6 气囊试验内压与压缩量的关系

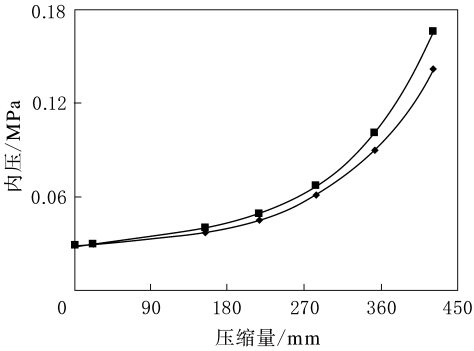
本研究采用非线性有限元分析方法进行气囊试验的数值模拟。气囊内压和外载荷与压缩量的关系分别如图 7 和 8 所示(内压为压缩和卸载两过程的平均值)。

从图 7 可以看出,有限元分析与试验结果吻合得很好。气囊内压随着刚体位移的增大而增大,小位移时内压变化比较平缓,大位移时内压增大速率提高。

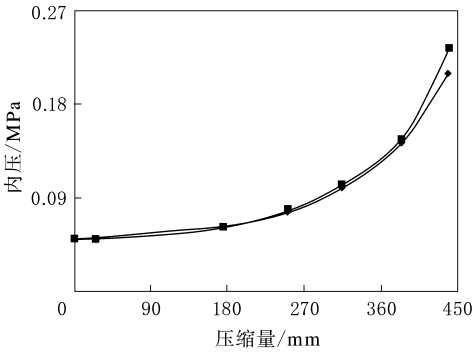
从图 8 可以看出,有限元分析与试验结果吻合得较好。气囊外载荷随着刚体位移增大而增大,且增幅也越来越大;气囊初始内压越大,气囊刚度越大,且变化率也越大。在气囊内压较小时,有限元分析与试验结果的差异很小,随着内压增大,差异也逐渐增大,但误差较小,在工程许可范围内。

另外,数值模拟还获得气囊帘线和橡胶层的 Mises 应力分布,如图 9 所示。

从图 9 可以看出,周向帘线层 Mises 应力总体分布比较均匀,最大值主要分布在气囊两端及端部与中部相交处(27 MPa);纵向帘线层应力分



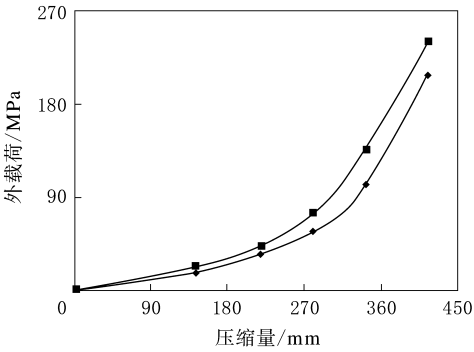
(a) 初始内压 0.03 MPa



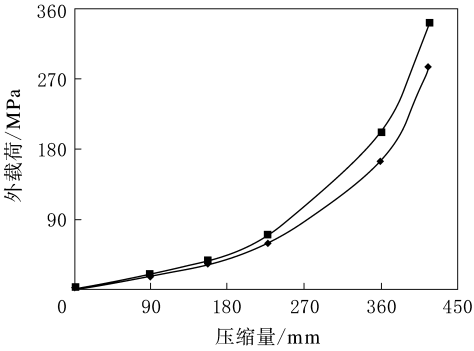
(b) 初始内压 0.05 MPa

◆—模拟; ■—试验。

图 7 气囊模拟和试验内压与压缩量的关系对比



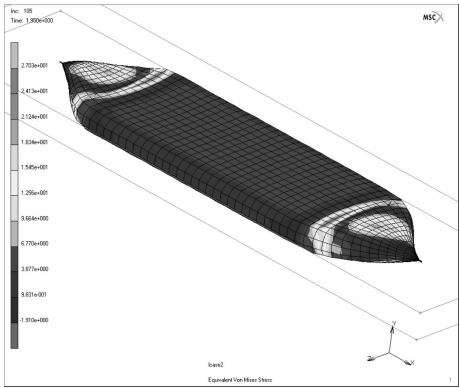
(a) 初始内压 0.03 MPa



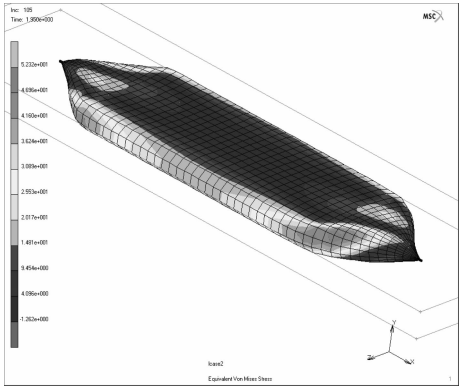
(b) 初始内压 0.05 MPa

注同图 7。

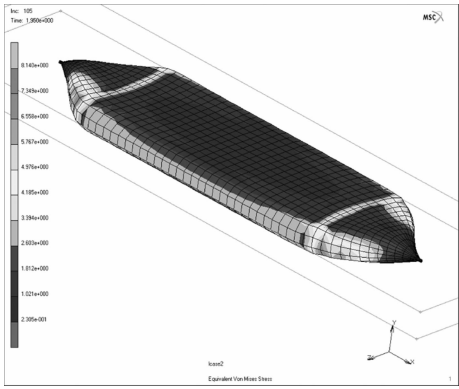
图 8 气囊模拟和试验外载荷与压缩量的关系对比



(a) 周向帘线层



(b) 纵向帘线层



(c) 橡胶层

图 9 气囊帘线和橡胶层的 Mises 应力分布

布不均匀,中部帘线受力比较小,最大值主要分布在端部与中部相交处外侧面(52.3 MPa);橡胶层受力相对帘线很小,最大值分布在两端部外侧面(仅 8.14 MPa)。

因此在船舶气囊下水时,橡胶层主要起保护帘线和密闭内部气体的作用,而帘线承受绝大部分应力。

4 结语

本研究采用非线性有限元分析方法模拟船舶下水用气囊的非线性力学特性,取得与试验较吻合的计算结果,说明使用该方法进行船舶下水用气囊力学性能计算分析是可行的,计算结果可为气囊设计提供依据。

参考文献:

[1] 吴剑国,杨俊,张凯敏,等. 气囊下水船台的形状优化[J]. 船舶工程,2010(4):56-59.
[2] 吴剑国,孙燕,马剑,等. 气囊下水安全性研究[J]. 造船技术,2010(4):7-9.

[3] 陈火红. Marc 有限元实例分析教程[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
[4] 袁春元,周孔亢,吴琳琪,等. 汽车空气弹簧橡胶空气弹簧的结构分析方法[J]. 机械工程学报,2009(9):221-225.
[5] Barone F,Grassini R. Logicoalgebraic Foundations of Contact Mechanics[J]. International Journal of Theoretical Physics, 2004(24):435-440.
[6] Xiaomin Deng,Ares J Rosak. A Finite Element Investigation of Quasi-Static and Dynamic Asymptotic Crack-tip Fields in Hardening Elastic-Plastic Solids under Plane Stress[J]. International Journal of Fracture,1992,57:291-308.
[7] Mooney M. A Theory of Large Elastic Deformation[J]. Appl. Phys.,1940,11:582-592.

收稿日期:2012-04-18

Nonlinear Analysis of Air-bag for Ship Launching

LIU Zhi-yi¹,WU Jian-guo¹,SUN Ju-xiang²

(1. Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China; 2. The Factory of Changlin Air-bag Container, Jinan 250023, China)

Abstract: The nonlinearity of the material, geometry and contact condition of air-bag used for ship launching was analyzed. Numerical simulation was carried out to analyze the relationship between inner and outer stress of the air-bag and compressive displacement by using the commercial nonlinear finite element analysis software MSC. Marc. The comparison between simulation and experiment results indicated that the method had high precision. The stress distribution of cord and rubber was also analyzed, which provided the basis for air-bag design.

Key words: air-bag; nonlinearity; ship launching; finite element analysis

一种制作高性能弹性平带的模具

中图分类号:TQ330.4⁺¹ 文献标志码:D

由宁波凯驰胶带有限公司申请的专利(公开号 CN 202241698U, 公开日期 2012-05-30)“一种制作高性能弹性平带的模具”, 涉及的模具主体为整体结构, 包括模具工作部、模具上柄、法兰和模具下柄。其中模具工作部呈长圆筒形, 包括工作部主体和模具内腔; 模具上柄包括上柄主体、出气孔和上顶针孔, 出气孔包括与胶套内腔相通的出气孔横向部和与模具内腔相通的出气孔纵向部; 法兰设置在模具工作部和模具下柄之间; 模具下柄包括下柄主体、进气孔和下顶针孔, 进气孔包括与硫化平台连接的进气孔横向部和与模具内腔相通的进气孔纵向部。该模具可节约橡胶原料、稳定产品尺寸、提高产品韧性和耐磨性能。

(本刊编辑部 马 晓)

用于越野车变速箱上部的悬置软垫总成

中图分类号:TQ336.4⁺¹ 文献标志码:D

由安徽江淮汽车股份有限公司申请的专利(公开号 CN 202242967U, 公开日期 2012-05-30)“用于越野车变速箱上部的悬置软垫总成”, 涉及的悬置软垫总成包括由橡胶衬套和圆筒状壳体组成的悬置软垫, 壳体轴向一侧设有盒体状下悬置骨架, 下悬置骨架内设有长方体配重块; 壳体轴向顶部设有板状上悬置骨架, 上悬置骨架一侧固定于壳体轴向顶部, 另一侧经过下悬置骨架顶部向外伸。该悬置软垫总成合理布置了配重块位置, 为拥挤的发动机舱节省了空间; 合理设计了配重块形状, 并将其与下悬置骨架焊接在一起, 进一步提高了悬置骨架强度, 进而增强了悬置软垫总成的承载能力和抗冲击载荷能力。

(本刊编辑部 马 晓)