

爆炸螺栓分离对热防护系统冲击响应分析

陈炎, 金伟, 王用岩, 黄虎

(中国航空工业集团公司 成都飞机设计研究所, 成都 610091)

摘要: **目的** 考察在爆炸螺栓分离过程中, 作用在 TPS (热防护系统) 上的冲击响应是否会导致其破坏, 从而影响航天器飞行安全, 对过程进行数值仿真分析。**方法** 提出四阶段仿真方案, 基于 MSC. Dytran 软件, 采用流固耦合方法对爆炸螺栓分离过程进行动力学仿真; 根据单个爆炸螺栓地面分离试验的结构进行建模和分析, 获取结构响应曲线; 再根据实测的冲击响应数据, 对爆炸过程中炸药及 JWL 方程的参数等设置进行调整, 获取准确爆炸螺栓的分析模型; 最后应用于对真实结构中 TPS (热防护系统) 在分离过程里受爆炸螺栓冲击响应的动力学分析与评估。**结果** 通过参数调整, 获得的仿真模型与爆炸螺栓地面分离试验实测结果一致, 证明了仿真模型的有效性和四阶段仿真方案的可行性。**结论** 提取的真实结构爆炸螺栓分离过程中作用在 TPS (热防护结构) 上的最大加速度响应曲线, 可用于指导 TPS (热防护系统) 的设计。

关键词: 爆炸螺栓; 流固耦合; 冲击响应

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.09.005

中图分类号: TJ450

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)09-0021-05

Impact Response of Thermal Protection System under Explosive Bolt Separation Procedure

CHEN Yan, JIN Wei, WANG Yong-yan, HUANG Hu
(AVIC Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Chengdu 610091, China)

ABSTRACT: Objective To obtain the impact response of TPS (Thermal Protection System) during the separation process of explosive bolt, to evaluate whether it may suffer from damage and sequentially affect flight safety, and to have numerical analysis on the process. **Methods** A four step numerical analysis program was held out. First, based on the MSC. Dytran software and fluid-structure interaction method, the process of explosive bolt separation was simulated. Afterwards, FEM and analysis according to the ground test of separation process was held out and the response curve of the structure was extracted. Then, parameters on explosive and JWL equation were adjusted according to the ground test, so a proper model of explosive bolt was obtained. Finally, this model was applied to analyze and assess the dynamics of impact response of explosive bolts in the separation process in real structure and TPS (Thermal Protection System). **Results** By means of parameter adjustment, the response result from the simulation model had great agreements with the test result, which certified the validity of the model and the feasibility of the four step program. **Conclusion** The maximum impact acceleration response obtained from the true structure during explosive bolt's separation process could offer important reference for the design of TPS (Thermal Protection System).

KEY WORDS: explosive bolt; fluid-structure interaction; impact response

在航天器上, 经常会使用大量火工装置来完成一些特定功能, 如部段分离、设备驱动等。这些火工品

装置的动作会在航天器结构上导致强烈的高频冲击环境,对航天器上的仪器设备产生不利影响,特别是对电子产品、轻薄结构、脆性材料的破坏尤为明显^[1]。

对于完成任务后需返回地面的一类航天器来说,为了在返回大气层阶段能抵御高温烧蚀的严酷环境,在飞行器表面会安装隔热瓦、隔热毡或其他耐高温材料,统称为热防护系统(TPS)。隔热瓦材料往往具有脆性的特质,承受高频冲击的能力不如金属材料,因此在设计这一类航天器的火工装置时应当尤为注意。

航天器结构及设备是否能够承受火工产品爆炸冲击环境,目前多采用各种试验的方法来评估,文献[2]总结了各种试验方法,并总结了各种方法的适用范围和效果。火工品爆炸的数值模拟,多基于LS-DYNA3D软件,采用ALE算法。陈敏^[3]等基于LS-DYNA3D软件,采用ALE算法,很好地模拟了宇航线式火工分离装置爆炸分离时流体与固体相互耦合问题,并预测了材料在爆轰波冲击下的非线性动态响应,但并未得到试验验证。杜龙飞^[4]等同样基于LS-DYNA3D软件,采用ALE算法,对爆炸螺栓结构进行了精细建模,通过仿真选取了合适的药剂,计算得到的螺栓分离速度与试验基本吻合。赵欣^[5]等基于LS-DYNA的Hydrocodes提出了“振源系统-近场结构”一体化建模分析方法,研究了火工品对结构响应的直接加载和解耦加载的结果对比,与文中方法类似,但同样缺乏试验验证。

文中基于MSC.Dytran软件,建立了爆炸螺栓分离过程对航天器热防护系统响应评估的一整套仿真方案流程,并解决了计算中的几个难点:首先,采用流固耦合中的“一般耦合”方法对爆炸螺栓的分离过程进行了仿真,并利用“快速耦合”大大提高了计算效率;其次,在爆炸螺栓中炸药量和参数未知的条件下,通过对已有试验的仿真,调试出具有实测意义的爆炸螺栓分离仿真模型,并应用于真实结构;最后,在对试验的仿真过程中,探索了零件之间不同连接方式对结果的影响,并选择了计算效率高的共节点方式。

1 数值仿真方案

为了评估爆炸螺栓分离对热防护结构的影响,提出的数值仿真方案如图1所示。整个数值仿真分四个阶段进行:完成爆炸螺栓分离仿真;完成对收纳装置原理试验的数值仿真;调整炸药量和参数,实现仿真结果与试验结果的匹配;将具有实测意义的仿真方案应用于实际结构。

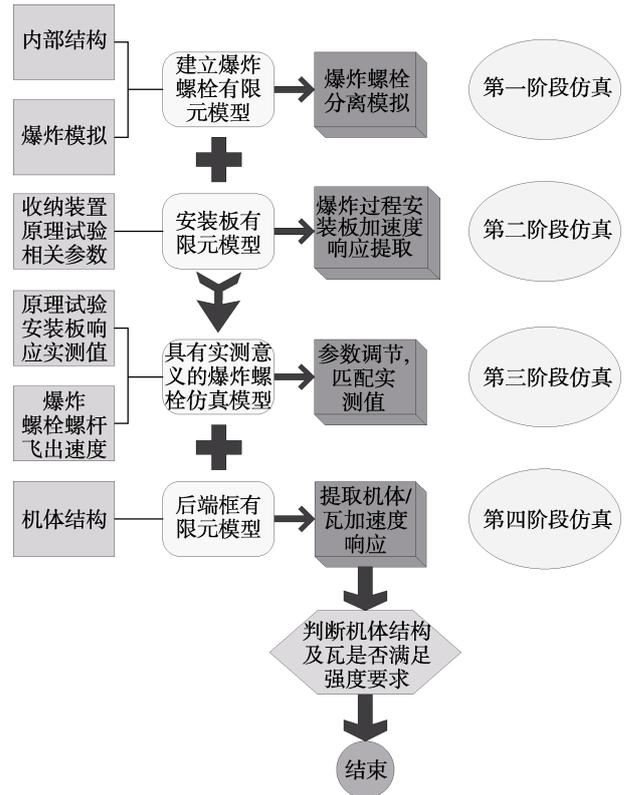


图1 数值仿真方案

2 爆炸螺栓分离仿真

爆炸螺栓分离仿真的有限元模型分为拉格朗日模型和欧拉模型两部分,拉格朗日模型用于模拟爆炸螺栓及其内部结构,欧拉模型用于模拟炸药、空气等欧拉体。爆炸螺栓分为螺栓头和螺杆两部分,有限元模型如图2所示,剖面图如图3所示。螺杆为拉格朗日体元,设置为刚体。螺栓头为一个内部变截面的圆柱形空腔,螺栓头外壁为拉格朗日体元,设置材料为钢材。

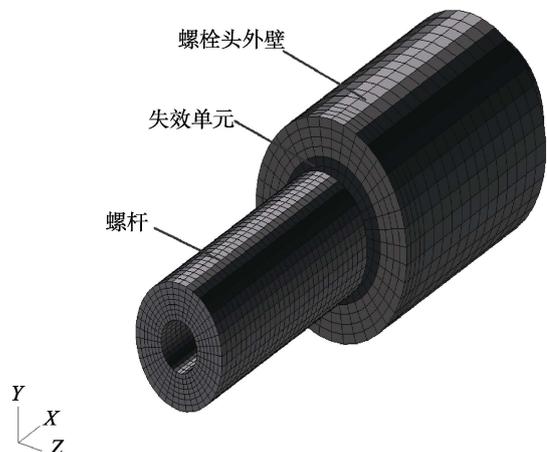


图2 爆炸螺栓有限元模型

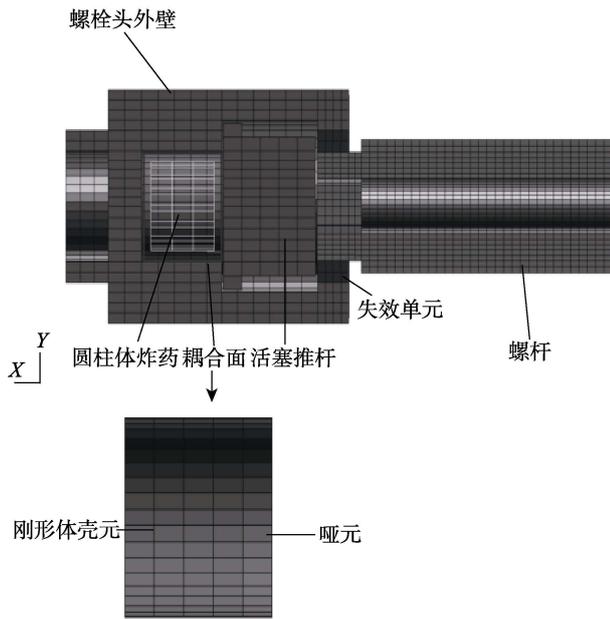


图 3 爆炸螺栓有限元模型剖面

螺栓头内的空腔分为两部分，左半部分内壁有共节点壳元，形成封闭耦合面。其中耦合面部分为刚形体壳元，与螺栓头壁共节点，耦合面右端一排单元为哑元，与螺栓头壁和活塞推杆共节点。哑元没有物理属性，可以无限变形，仅用于形成封闭耦合面之用。之所以要设置哑元，是由于在使用一般耦合方法时，需要在拉格朗日模型上定义耦合面，作为欧拉网格和拉格朗日网格之间相互作用力的传递者，并且耦合面应当是封闭的^[6]。文中哑元属性为不透气，封闭耦合面内置圆柱体炸药（欧拉网格）。

文中之所以尝试流固耦合中的一般耦合方法，而非应用较多的 ALE（任意拉格朗日-欧拉耦合）方法，其原因在于：首先，ALE 方法要求拉格朗日与欧拉网格共节点，建模上工作量更大；其次，一般耦合方法中，当欧拉网格与基本坐标系轴平行时，可打开快速耦合开关，大大提高计算效率。

螺栓头右半部分内有圆柱体活塞推杆，设置为拉格朗日体元、刚体。活塞推杆左侧与哑元共节点，右侧与螺杆设置接触，圆柱面与螺栓头外壁设置接触。活塞与螺杆均约束了刚体的 TY、TZ、RY、RY 方向的自由度。

螺栓头底部与螺杆之间有一圈失效单元，失效单元为拉格朗日体元，并设置破坏参数。分离过程：炸药爆炸后，气体膨胀，推动活塞推杆向右运动；由于活塞与螺杆之间设有接触，故活塞推动螺杆向右运动，失效单元由于达到其失效最大应变而产生破坏，从而螺杆脱离螺栓头向右飞出。分离过程如图 4 所示。

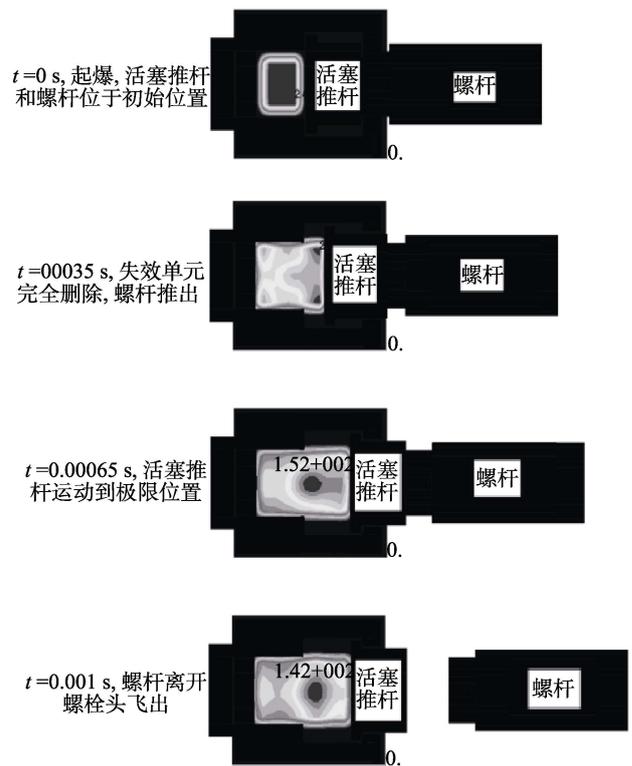


图 4 爆炸螺栓分离过程

3 原理试验仿真及参数调节

爆炸螺栓减振收纳装置原理试验将单个爆炸螺栓安装与安装板上，通过加速度传感器测量了安装板上的加速度响应。爆炸螺栓与安装板有限元模型如图 5 所示。安装板采用拉格朗日体元，材料定义采用 DMATEL 卡片（线弹性），采用钢材的材料参数。

位于安装板凸台正下方的加速度传感器，测得加速度响应峰值为 $1.4 \times 10^8 \text{ mm/s}^2$ ，螺栓的螺杆末速度为 46.6 m/s。

在未进行参数调节前，对螺栓头和安装板凸台之间的连接方式进行了探索，共尝试了三种不同的建模方式：共节点、设置接触、刚性连接。

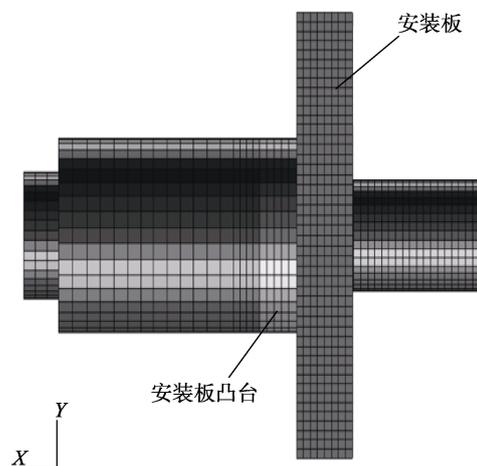


图 5 爆炸螺栓与安装板有限元模型

共节点和刚性连接获得的螺杆末速度基本相同，设置接触获得的螺杆末速度偏高。共节点和设置接触的最大加速度响应峰值基本相同，但共节点响应比较稳定，设置接触响应由小变大，且经常出现跳跃性峰值。刚性连接的加速度响应比前两者大，如图6所示。综合考虑，由于共节点方式所耗计算时间最短，故选择共节点方式建模。

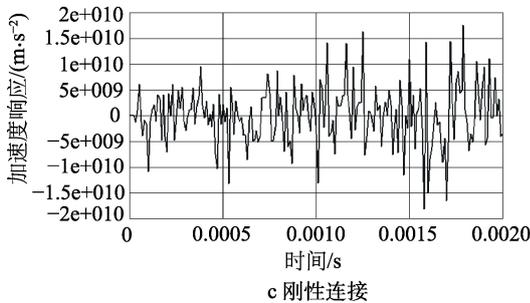
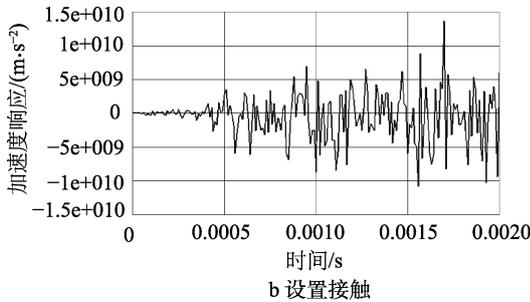
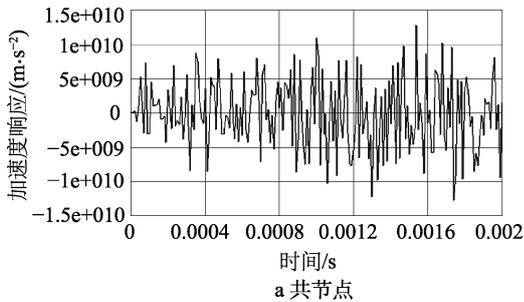


图6 螺栓头与凸台不同连接方式下加速度响应

通过对炸药的尺寸、内能、JWL方程参数的调整，获得与试验结果基本一致的参数。参数调整后螺杆的速度曲线如图7所示，可见螺杆末速度为44.47 m/s，

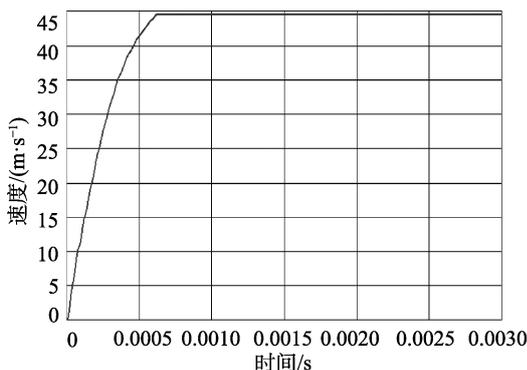


图7 调参后螺杆速度曲线

与目标46.6 m/s误差为-4.58%。参数调整后的加速度响应曲线如图8所示，最大加速度响应峰值为 $1.46 \times 10^8 \text{ m/s}^2$ ，与目标值 $1.40 \times 10^8 \text{ m/s}^2$ 相比误差为4.62%。

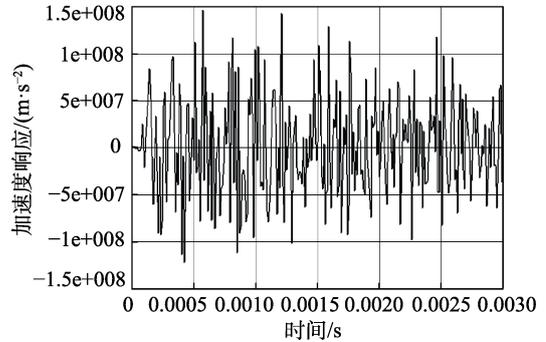


图8 调参后加速度响应曲线

4 获取机体结构响应

分析机体结构的连接关系后，对局部机体结构进行体元建模。将调试好参数的爆炸螺栓安装于机体结构有限元模型，进行爆炸分离计算，并提取隔热瓦接触面节点的加速度响应。与隔热瓦直接接触部分和通过应变隔离垫连接的结构的最大加速度响应曲线如图9所示。由图9a可见，与隔热瓦直接接触部分结构最大加速度响应峰值为 $1.60 \times 10^8 \text{ mm/s}^2$ ，换算成过载为16310g；由图9b可见，与隔热瓦通过应变隔离垫连接的结构，最大加速度响应峰值为 $3.89 \times 10^8 \text{ mm/s}^2$ ，换算成过载为39653g。

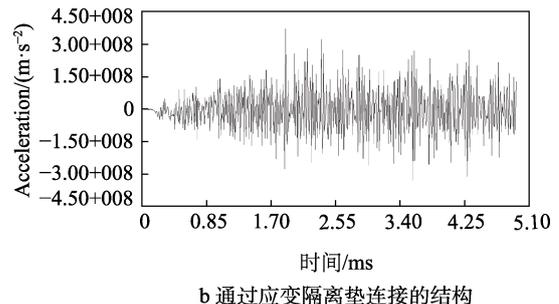
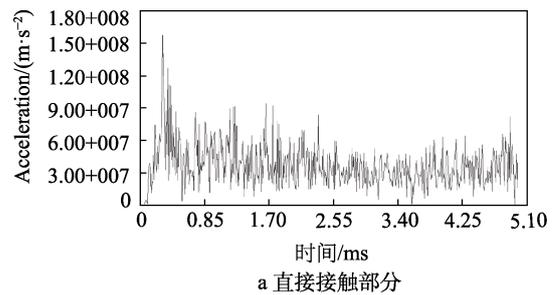


图9 加速度响应最大点加速度曲线

5 结语

文中基于 MSC. Dytran 软件, 采用四个阶段仿真的方案, 对航天飞行器中热防护系统隔热瓦的设计提供了指导。首先, 采用流固耦合中的一般耦合方法, 并打开快速耦合开关, 对爆炸螺栓分离过程进行了仿真; 其次, 对单个爆炸螺栓的地面分离原理试验进行了仿真; 然后参照试验结果进行调参, 获得具有实测意义的爆炸螺栓仿真模型; 最后将调参后的爆炸螺栓仿真模型应用于真实结构, 提取了结构中隔热瓦在爆炸螺栓分离过程中所承受的最大过载响应, 用于指导热防护结构的设计。

关于热防护结构的加速度响应承载能力还有待试验验证。文中提供的方法思路为热防护结构设计和校核提供参考依据。

参考文献:

- [1] 张建华. 航天产品的爆炸冲击环境技术综述[J]. 导弹与航天运载技术, 2005(3): 30-36.
- [2] 马斌捷, 张建华, 吴江. 火工品爆炸加载方法在火箭分离冲击环境模拟试验中的应用与效果[J]. 强度与环境, 2007, 34(5): 1-7.
- [3] 陈敏, 隋允康, 阳志光. 宇航火工分离装置爆炸分离数值模拟[J]. 火工品, 2007(5): 5-8.
- [4] 杜龙飞, 马玉环, 陈慧能, 等. 爆炸螺栓作用过程的仿真研究[J]. 火工品, 2015(3): 29-32.
- [5] 赵欣, 韩增尧, 邹元杰, 等. 一种航天器火工冲击源建模和分析方法[J]. 宇航学报, 2015, 36(10): 1210-1218.
- [6] 卞文杰. 瞬态动力学 CAE 解决方案-MSC. Dytran 基础教程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2004.