

文章编号: 1006-9941(2017)04-0333-09

基于随机和认知不确定性分离的 PBX 构件可靠性分析

沈展鹏^{1,2}, 臧朝平¹, 陈学前², 刘信恩², 郝志明²

(1. 南京航空航天大学能源与动力学院, 江苏 南京 210016; 2. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 由概率或概率盒方法量化高聚物粘结炸药 (PBX) 构件几何尺寸、材料属性、所受载荷等参数的不确定性, 通过嵌套抽样法进行了不确定性传播分析, 以分离随机和认知不确定性的影响。定量叠加了数值误差和模型形式误差, 最终获得结构关心响应量的不确定性和炸药件的可靠度区间, 与传统确定性的强度校核方法以及经典概率方法的可靠性分析结果进行了比较。结果表明, 考虑不确定性的可靠性评估比传统确定性强度校核降低了工程应用的风险, 而本方法给出的可靠度区间包含了经典概率方法计算的可靠度, 在认知不确定性影响严重时仍然适用, 并随着认知不确定性的缩减收敛于真实可靠度。

关键词: 高聚物粘结炸药, 概率盒, 认知不确定性, 可靠度

中图分类号: TJ55; TB1

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.04.011

1 引言

高聚物粘结炸药 (Polymer Bonded Explosive, PBX) 是一类由高能炸药晶体、高聚物粘接剂和降感剂等多种成分组成的混合炸药。与 TNT 炸药相比, PBX 具有能量高、感度低、强度高优点, 所以在各相关领域中应用更为广泛^[1]。

由 PBX 浇注或压制的炸药件存在随机和认知两类不确定性。一方面, 由于制作工艺、加工精度、以及颗粒物实际分布情况的影响, 炸药件客观地存在不可缩减的不确定性, 称之为随机 (或固有) 不确定性。另一方面, 在对其进行建模计算时, 由于其本身特性和真实工作环境的复杂性, 往往需要引入一定的假设以便于简化处理, 或者由于认识不足、观测样本太少等原因造成某些参数不能够被准确估计。这些假设简化或不准确估计造成的不确定性将随着建模的精细化和有效信息 (试验更新、理论完善等) 的补充, 而不断减少, 将其称之为认知不确定性^[2]。这两类不确定性由于其本质的不同, 对炸药件响应量的影响也不同。若对两者分离地量化、传播, 进而获得关心响应量的随机和认知不确定性, 则不仅掌握了响应量的不确定性范围, 还

可以清晰地看出模型是否具有改进空间以及多大的改进空间, 指导模型改进方向。

在对 PBX 构件进行强度可靠度分析时, 传统的确定性方法将一次确定性的有限元计算结果乘以安全系数, 根据强度理论获得二元 (成败型) 可靠性分析结果^[3]。这种方法曾在工程应用中起到至关重要的作用, 但随着技术的进步和工程需求的发展, 已经难以满足工程设计需求。20 世纪 50 年代, 基于概率论和数理统计理论的概率可靠性方法开始发展并迅速成熟起来, 并从最初的军工、电子产品扩展到许多其他技术领域, 得到了越来越广泛的应用^[4]。在结构的概率可靠性方法中, 应力和强度被视为随机变量, 并受载荷、环境温度、边界约束、结构尺寸、材料特性等不确定性参数的影响, 最终由应力-强度干涉模型给出结构的可靠度或失效概率。相比于传统确定性方法, 概率可靠性方法考虑了结构的固有不确定性, 为工程决策提供了有力支撑。但是当试验数据并不充分, 参数不确定性难以准确表征时, 或者模型本身的精确程度不够时, 认知不确定性对结果影响较大, 不能轻易忽略, 此时概率方法给出的可靠度仅是真实可靠度的一个估计, 并不能保证与真实可靠度足够接近。2001 年, 美国能源部三大实验室提出了裕量与不确定性量化 (Quantification of Margins and Uncertainties, QMU) 方法^[5], 致力于解决在数据不足、知识缺乏情况下的结构可靠性评估问题, 其关键思想即在于不确定性的严格量化。目前, 以 Helton 等为代表的诸多学者^[5-8] 基于经典概

收稿日期: 2016-10-24; 修回日期: 2016-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助 (11472256), 中国工程物理研究院院长基金项目 (YZ2015011)

作者简介: 沈展鹏 (1987-), 男, 助理研究员, 主要从事不确定性量化、模型验证与确认, 以及结构力学等方向的研究。e-mail: zpshen@sohu.com

率论、证据理论、贝叶斯估计、凸集模型或概率盒等不确定性表征方式,研究工程结构的可靠性分析方法,丰富了不确定性量化和 QMU 的理论。国内学者中,姜潮等^[9-10]关注了不确定性参数的相关性对可靠性分析的影响,吴丹青等^[11]则重点研究了认知不确定性对可靠性分析的影响,并强调了两类不确定性的分离。这些学者们采用各种方式对参数的不确定性进行了量化,但是没有详细地量化数值不确定性和模型形式不确定性并考虑三者叠加,且仅有少数学者强调并严格执行了随机和认知不确定性的分离。

基于此,本研究针对拱形 PBX 构件,采用经典概率或概率盒方式表征材料特性、几何尺寸、所受载荷等参数不确定性,由理查森外推法^[12-14]量化炸药件关心响应量数值不确定性,并由面积度量法^[15]获得模型形式不确定性,并将三者叠加,以分析炸药件的可靠性。在整个过程中,通过概率盒和嵌套抽样法严格分离量化随机、认知两类不确定性,获得了可靠度区间,以期给出更多有效的信息,为风险决策者提供依据和支持。

2 有限元模型建立

2.1 炸药件结构

拱形的 PBX 构件模型放置在刚性水平平面上,拱两侧的位移不限制约束,顶部受到竖直向下的集中力作用,如图 1 所示,其几何尺寸、材料属性以及所受载荷等模型参数的名义值如表 1 所示。

PBX 炸药属于拉压不对称材料,其强度准则有很多,本研究为展示两类不确定性分离的强度分析方法,采用简单的最大应力强度准则评估炸药件的静力可靠性,同时为保证结构件的特殊功能,假设要求炸药件竖向位移不超过 0.0406 mm。因此,研究中炸药件的关心响应量为最大拉、压应力和最大竖向位移。

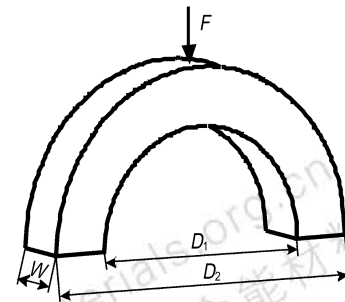


图 1 拱形 PBX 构件的结构示意图

Fig. 1 Sketch of arched polymer bonder explosive

表 1 模型参数的名义值

Table 1 Nominal values of the model parameters

parameter	W /mm	D_1 /mm	D_2 /mm	elastic modulus /GPa	Poisson's ratio	density / $g \cdot cm^{-3}$	F /N
nominal value	12.7	38.1	76.2	7	0.365	1.89	700

2.2 有限元模型

在有限元软件 ANSYS 中,选取线性各项同性材料,并取 20 节点六面体实体单元 solid186 进行模型离散,如图 2 所示。为减少计算量,根据左右和前后方向的对称性建立了 1/4 模型,模型的左端面和后端面均施加对称约束,底部所有节点的竖直方向位移约束为零。为近似试验加载情况,将集中力等效为顶部小部分位置上(图 2 中红色区域)的均匀压力载荷。由于需要估计离散数值误差,在基准网格(特征尺寸记为 $h_0 = 3.35$ mm,图 2a 所示)上进行均匀一致加密,获得了特征尺寸分别为 $h_0/2$, $h_0/4$ 和 $h_0/8$ 的离散网格。

采用特征尺寸为 $h_0/2$ 的离散网格(图 2b),在各参数取表 1 所示的名义值(1/4 模型中厚度仅取一半,

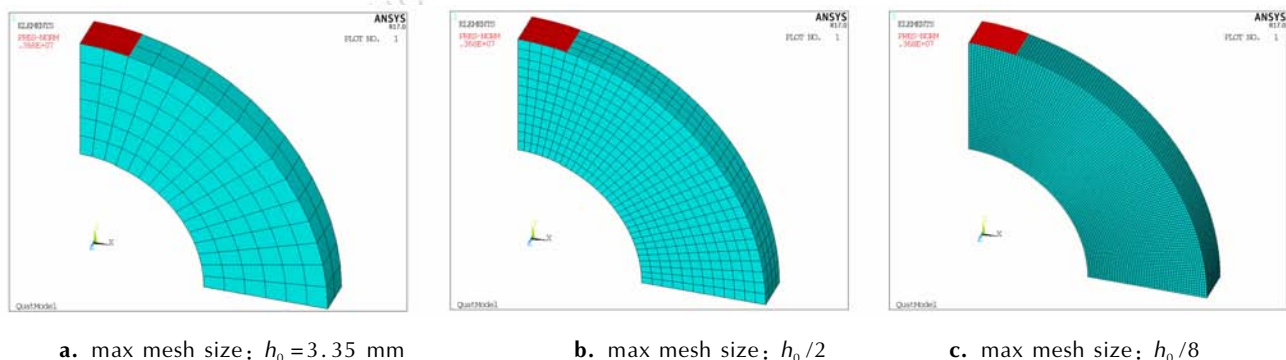


图 2 炸药件的 1/4 有限元离散模型

Fig. 2 Quarter finite element model of the explosive

集中力仅取 1/4) 下进行有限元计算, 获得炸药件拉应力(第一主应力)、压应力(第三主应力)以及竖直方向位移的云图如图 3 所示。从图 3 中可看出, 炸药件最

大拉应力(9.75 MPa) 发生在圆拱顶部的内环表面, 最大压应力(8.84 MPa) 发生在圆拱底部的内环表面, 最大竖直位移(0.0382 mm) 发生在圆拱最顶端。

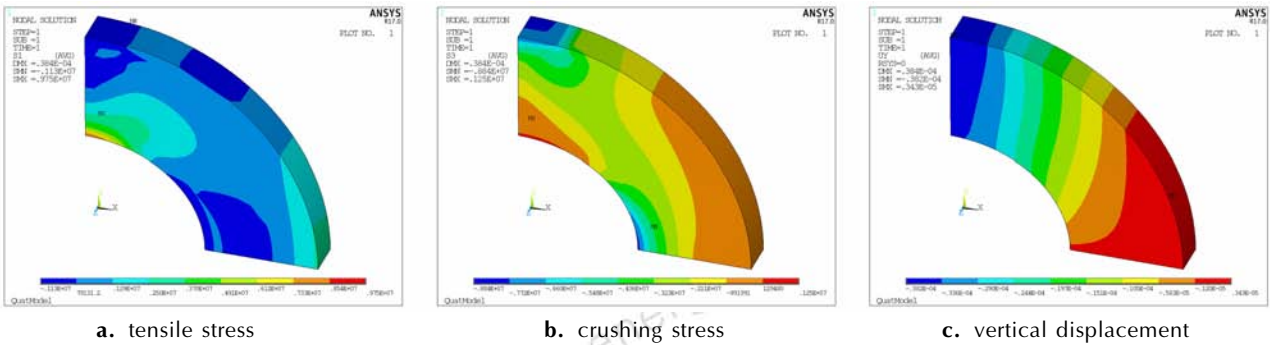


图 3 参数取名义值时炸药件的响应云图

Fig. 3 Response cloud diagram of explosive with the parameters valued in their nominal values

3 不确定性量化与传播

3.1 数值不确定性

采用成熟的商业有限元软件计算线性静力学问题, 保证了迭代误差、舍入误差、统计误差等数值误差远远小于离散误差, 即离散误差是最主要的数值误差。采用理查森外推(Richardson Extrapolation)法^[12], 可直接估计关心响应量的离散数值误差。

假设均匀、系统、一致加密的三重网格(特征尺寸为 $h_1 < h_2 < h_3$) 下, 有限元模型的数值计算解分别为 y_1 , y_2 和 y_3 , 理查森外推法给出响应量的真解估计和最精细网格(特征尺寸 h_1) 的数值误差如式(1)所示, 数值不确定性可由式(2)给出^[13-14]。

$$y_{RE} = y_1 - \varepsilon_h$$

$$\varepsilon_h = \frac{y_2 - y_1}{r^p - 1} \quad (1)$$

$$U_{num} = \frac{F_s |y_2 - y_1|}{r^p - 1} \quad (2)$$

$$\hat{p} = \ln\left(\frac{y_3 - y_2}{y_2 - y_1}\right) / \ln(r) \quad (3)$$

式中, y_{RE} 表示理查森外推法估计的真解, ε_h 为最精细网格解的数值误差, 它们都与关心响应量 y 的单位相同; $r = h_2/h_1$ 为无量纲化的加密因子; p 为关心响应量的收敛精度阶, 无量纲量; F_s 为安全因子, 无量纲量。 p 与 F_s 的取值由理论精度阶 p_i 及观测精度阶 \hat{p} 的匹配关系决定, 如表 2 所示。响应量的理论精度阶 p_i 由有限元中形函数(或有限差分法中差分格式)的阶次决定, 例如位移形函数为二阶多项式时, 位移响应的理论

精度阶为 2。响应的观测精度阶 \hat{p} 则由多重网格下的计算近似解决定, 当 $h_2/h_1 = h_3/h_2 = r$ 时, 可由式(3)计算获得^[13-14]。

表 2 安全因子和收敛精度阶的确定^[14]

Table 2 Determination of the safety factor and the order of accuracy^[14]

$ (\hat{p} - p_i) / p_i $	F_s	p
≤ 0.1	1.25	p_i
> 0.1	3.0	$\min(\max(0.5, \hat{p}), 1)$

根据理查森外推的应用要求划分四重网格, 炸药件的最大拉应力、最大压应力及最大竖向位移随网格特征尺寸的变化情况如图 4 所示, 基于特征尺寸分别为 $h_0/2$, $h_0/4$ 和 $h_0/8$ 的三重网格计算关心响应量的数值不确定性如表 3 所示, 表 3 中相对数值不确定性等于数值不确定性和精细网格计算解绝对值的比值。另外, 由于有限元计算选取 20 节点的六面体实体单元, 其形函数为二阶多项式, 因此位移的理论精度阶 2, 应力的理论精度阶为 1。

表 3 关心响应量在精细网格 $h_0/8$ 下的数值不确定性估计结果

Table 3 Numerical uncertainty estimation of the response when the mesh size valued in $h_0/8$

response of interest	formal order of accuracy	observed order of accuracy	relative numerical uncertainty / %
maximum tensile stress	1	0.0463	14.1
maximum crushing stress	1	0.5194	12.5
maximum vertical displacement	2	1.9711	0.03

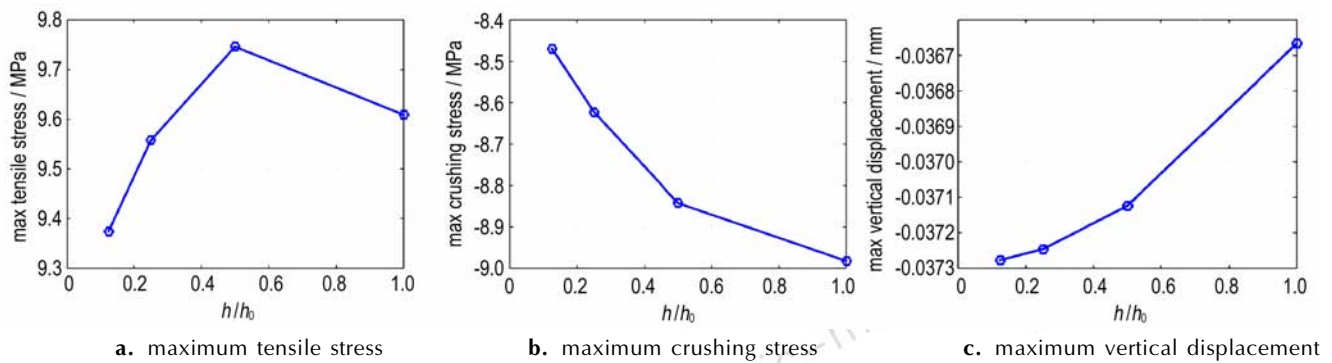


图4 不同网格特征尺寸下的关心响应量数值解

Fig. 4 Numerical solution of responses of interest based on the FE model with different mesh sizes

图4和表3表明:最大拉应力在特征尺寸 h_0 网格下的计算解并没有进入收敛域;位移的收敛速度比应力响应快得多;位移的观测精度阶与理论精度阶相差很小,安全因子取为1.25,对应力而言两者差距较大,安全因子取为3;精细网格 $h_0/8$ 下竖向位移的数值误差非常小,可忽略,而最大拉应力和最大压应力的数值误差不可忽略。应力的数值误差虽然较大,但是随网格加密收敛于绝对值较小的方向,即当前计算的应力结果偏保守。后续分析中,除了灵敏度分析基于尺寸为 $h_0/2$ 的网格模型计算,代理模型建立、参数不确定性传播、可靠性分析等过程均基于尺寸 $h_0/8$ 的精细网格模型完成。

3.2 参数不确定性

在参数不确定性传播分析之前,需要进行灵敏度分析以剔除对响应不敏感的参数,减少计算量。初步考虑炸药件加工尺寸误差为 ± 0.05 mm,弹性模量 E 、泊松比 ν 和密度 ρ 的变化范围分别为 $[6.5, 7.5]$ GPa、 $[0.36, 0.37]$ 和 $[1.78, 2]$ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,集中力 F 的误差为名义值的0.5%,采用基于抽样的秩相关灵敏度分析^[16]可获得如图5所示的参数灵敏度饼图。由图5可知,弹性模量和密度对最大拉、压应力影响很小,可以忽略;但弹性模量对竖向位移影响占绝大部分。值得注意的是,参数不确定性变化时,最大拉、压应力,最大竖向位移的变化相对其名义值的百分比分别为2.75%, 2.42%和15.9%。

采用概率盒表征具有随机、认知两类混合的输入参数不确定性,并结合嵌套抽样法进行不确定性传播,可保证响应不确定性中随机不确定性和认知不确定性的分离,有利于可靠性评估。概率盒是一种非精确概率方法^[2,8,17],可以清晰地表征两类混合不确定性,且形式上保留两类不确定性可分离,如图6所示。当认

知不确定性缩减时,概率盒收窄,直至退化为单条概率曲线,即随机变量服从的真实概率分布。

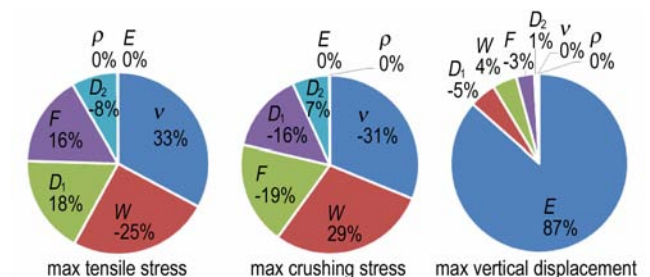


图5 关心响应量的灵敏度分析结果

Fig. 5 Sensitivity analysis of the response of interest

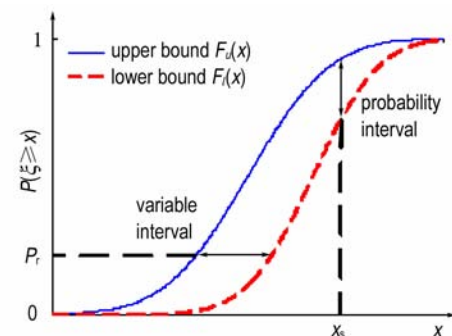


图6 概率盒示意

Fig. 6 Schematic diagram of probability box

为了细致地考察输入参数的不确定性并将其传播到关心响应量,根据工程经验对各参数的不确定性做出合理假设如下。集中力服从均值为名义值、标准差1 N的正态分布,三个几何尺寸(W, D_1, D_2)服从中值为名义值、半宽度为加工误差0.05 mm的均匀分布,它们均为随机变量,由概率分布曲线量化其不确定性。由于PBX的材料属性复杂,弹性模量和泊松比具有混合不确定性,假设它们分别服从区间参数的正态分布和均匀分布,即弹性模量的均值在区间 $[6.9,$

7.1] GPa 内变化,标准差在区间[0.09, 0.11] GPa 内变化;泊松比的上界在[0.368, 0.37]内,下界在[0.36, 0.362]内。需要说明,在解决工程实际问题时,输入参数不确定性的分布形式和分布超参数(指均值、方差、区间上界等)往往需要结合工程经验和一定实验数据,并根据核密度估计等方法获得,而本文研究重点并不在此,因此根据工程经验直接进行了假设。

基于双层嵌套抽样将输入参数的不确定性传播至响应,可获得由概率盒表征的响应量不确定性。外层

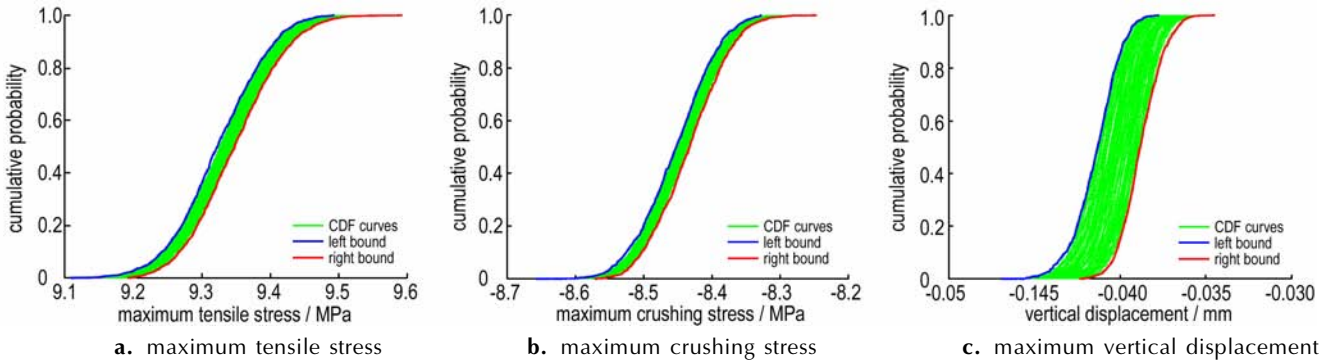


图 7 概率盒表征参数不确定性引起的响应量不确定性

Fig.7 Response uncertainty caused by model input uncertainty represented with p-box

为保证样本的收敛性, M 和 N 往往比较大(本研究分别取 100 和 10000),有限元计算耗时太长,工程上不能接受。为减少计算量,本文基于少量有限元计算建立了三个关心响应量的 Kriging 代理模型。它们在另外 10 个测试样本上的相对均方根误差分别为 $1.3E-6$, $1.1E-6$ 以及 $1.8E-6$,证明代理模型精度很高,其误差可忽略。

3.2 模型形式不确定性

除了计算模型的参数具有不确定性外,由于假设简化或样本不足造成的模型形式不确定性(或称为模型形式误差)也应该被量化,它通常需要通过比较间接获得。面积度量(Area metric)方法通过响应量实验观测和仿真计算的概率分布曲线之间围城的面积定量地表征两者不一致性,其表达式如式(4)所示^[17]。当仿真计算结果的不确定性由概率盒表征时,则采用概率盒和实验观测分布之间所围成的最小面积作为度量,如图 8 阴影面积所示。

$$d(F_{x_i}^e, F_{x_i}^m) = \int_{-\infty}^{+\infty} |F_{x_i}^e(y) - F_{x_i}^m(y)| dy \quad (4)$$

式中, y 为关心的不确定性响应量,函数 F 为累积概率分布函数,上标 e 表示实验观测,上标 m 表示仿真预测,下标 x_i 为由输入变量表示的位置点,面积度量值 d 与关心响应量 y 的单位相同。 d 越小表示模型越准

由拉丁超立方抽样(Latin Hypercubes Sampling)获得认知不确定性变量(泊松比的上界和下界、弹性模量的均值及方差)的样本 M 组;在每一组外层样本下,由蒙特卡洛法抽样获得 N 组随机变量样本。将 $M \times N$ 组参数样本代入有限元模型中计算,可获得对应的关心响应量样本。对于每一组外层样本,都可通过内层样本绘制响应量的一条经验概率分布曲线;当绘制出所有外层样本对应的概率分布曲线后,即获得了关心响应量的概率盒,如图 7 所示。

确, d 越大表示模型和实验之间的差异越大。需要注意的是,面积度量还包含由于实验样本不足(概率分布函数呈阶梯状)而带来的不确定性,这将会增大模型形式不确定性,使可靠性评估结果趋于保守。

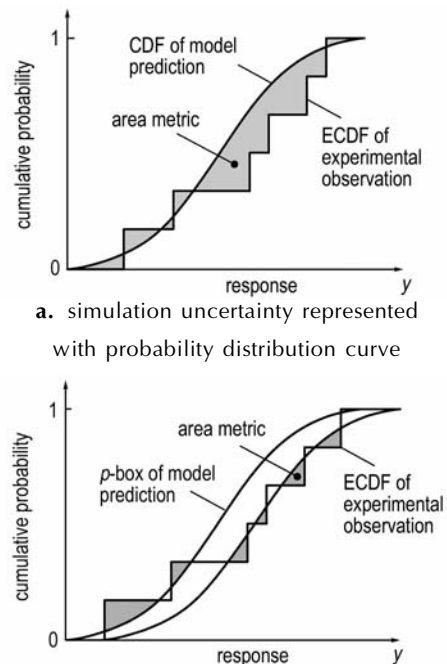


图 8 响应量的面积度量示意

Fig.8 Schematic diagram of the area metric for the response

由于缺乏真实的实验数据,以高精度数值计算结果叠加工人试验误差构造虚拟实验数据,采用面积度量量化关心响应量的模型形式不确定性。虚拟实验的样本量取为 10,人工试验误差假设为零均值的正态分布,如式(5)所示,最终面积度量结果如图 9 所示。

$$y_e^{(i)} = y_m^{(i)} + \varepsilon, \quad i=1,2,\dots,10$$

$$\varepsilon \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2), \quad \sigma_\varepsilon = 0.01 \bar{y}_m$$
(5)

式中,下标 e 表示虚拟实验观测,下标 m 表示仿真预测,虚拟实验误差 ε 、误差标准差 σ_ε 与关心响应量 y 的单位相同,当响应量 y 为应力和位移时单位分别为 MPa 和 mm。

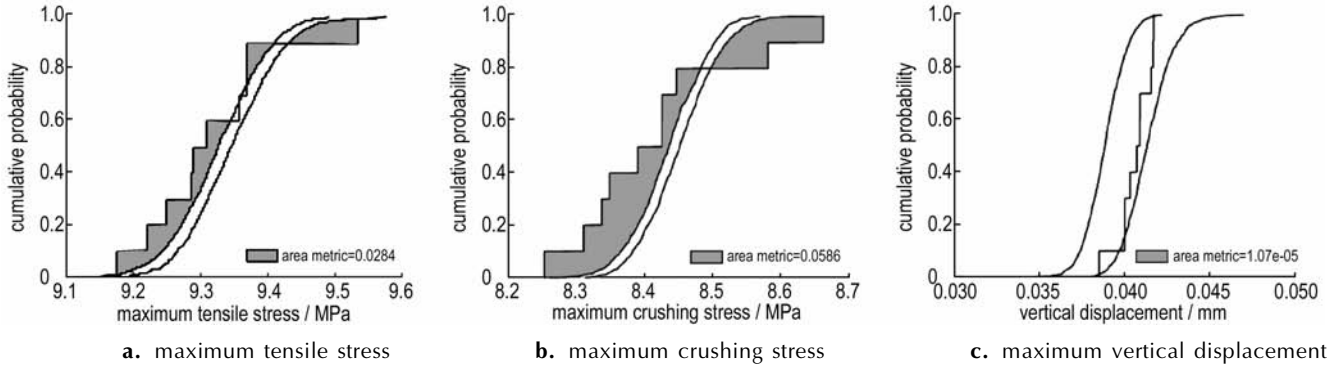


图 9 关心响应量的面积度量
Fig. 9 The area metric for the response of interest

4 可靠性评估

为了分离表征响应量的随机和认知不确定性,前文采用嵌套抽样法进行参数不确定性传播分析,获得了关心响应量的概率盒,如图 7 所示。但这仅为参数不确定性引起的响应不确定性,还应该叠加数值不确定性和模型形式不确定性。而由于它们两者都属于认知不确定性,因此可对图 7 所示的概率盒进行两侧拓宽。当然,如果认知不确定性有明确的方向性,则仅需向一侧拓宽即可,例如由图 4 中的曲线即表明了数值解的收敛方向。将三种不确定性通过概率盒叠加后,可获得炸药件最大应力和最大竖向位移的总不确定性如图 10 所示。从

图 10 中还可清晰地看出三种不确定性对总不确定性的贡献。

假设选取的 PBX 炸药材料的拉伸强度为 9.5 MPa,压缩强度为 25 MPa。根据最大应力准则,结构内的最大应力超过相应的强度值视为失效,同时为保证结构的特殊功能,要求竖向位移不超过 0.0406 mm。图 10 表明最大压应力远远小于压缩强度,而最大拉应力接近于拉伸强度值,更危险。因此通过概率盒截断可知,强度可靠度 R_1 在区间 [0.974, 1] 内,功能可靠度 R_2 在 [0.284, 0.939] 内。也就是说,如果仅考虑结构件不破坏,现有设计的可靠度超过 97.4%;但是如果同时考虑结构的功能性要求,可靠度会高于 0.284 且低于 0.939。

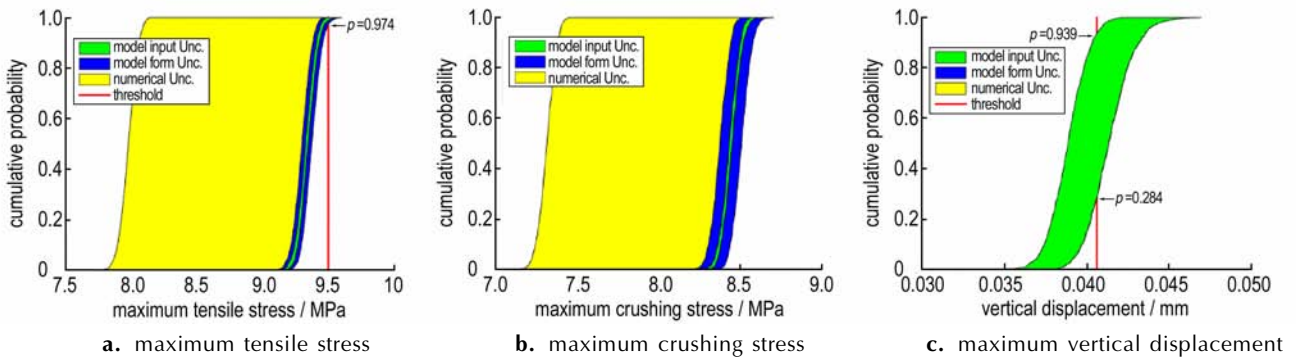


图 10 炸药件最大拉、压应力和最大竖向位移的总不确定性
Fig. 10 Total uncertainty of the maximum tensile stress, crushing stress and vertical displacement of the explosive

如果仅在各参数取名义值时由精细网格进行一次确定性计算,可知最大拉应力为 9.3747 MPa(小于拉伸强度),最大竖向位移为 0.037277 mm(小于功能性要求阈值),可靠性校核结果为二元逻辑值(是或否)^[3]。通常出于保守性需要给出安全因子,但安全因子的取值大小往往依赖于工程经验,且主观成分极大。因此,这种确定性方法难以成为产品可靠性设计的有力支撑。

如果仅考虑模型参数的随机不确定性,根据经典概率方法和蒙特卡洛抽样,可以获得概率形式表征的炸药件可靠性^[4],如图 11 所示。当计算模型与工程实际足够接近,实验数据也比较充足时,模型参数的固有不确定性可以准确地表征,该方法非常有效且实用,是经常采用的可靠性设计方法。但是还有很多情况下,数据并不充分,参数不确定性难以准确表征,或者模型本身的精确程度不够,总之认知不确定性对结果影响较大,难以轻易忽略。此时概率方法给出的可靠度仅是真实可靠度的一个估计,并不能保证与真实可靠度足够接近。

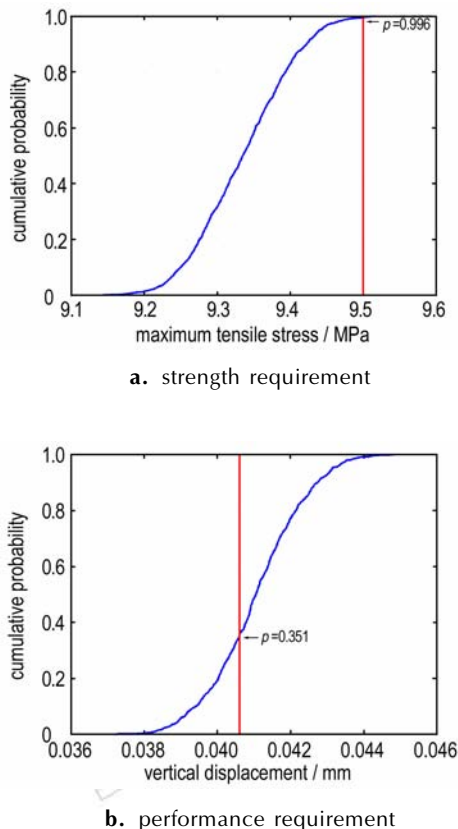


图 11 概率方法获得炸药的可靠度^[4]
Fig. 11 Reliability obtained by probabilistic method^[4]

本文的概率盒方法分离地表征、量化认知和随机

两类不确定性,相比于前两种方法^[3-4],至少有三个优点。

(1)当认知不确定性影响严重时,经典概率方法给出的可靠度可能误差较大,本方法给出了结构的可靠度区间,该区间覆盖了真实可靠度和经典概率方法给出的可靠度(如表 4 所示)。

表 4 三种方法对炸药件可靠度的表征对比

Table 4 Comparison of the explosive reliability representation with the three methods

method	R_1	R_2	representation of reliability
determinate checking method	reliable	reliable	logic value
probabilistic method	0.996	0.351	probability
p-boxmethod	[0.974, 1]	[0.284, 0.939]	interval-valued probability

(2)随着有效信息的增加(例如更多的 PBX 材料实验数据可获得其力学参数更准确的概率分布,更精细的材料本构关系将会使计算结果更逼近于实验),该区间逐渐变窄,收敛于真实可靠度。

(3)区间值的可靠度还可以在某种程度上指导设计改进方向。当计算获得的可靠度区间下界大于可靠度设计期望值时,产品肯定可靠;当可靠度区间包含了设计期望值时,说明产品可能可靠、也可能不可靠,需要减少认知不确定性的范围重新评估其可靠性;当可靠度区间上界小于设计期望值时,说明产品一定不可靠,需要更改方案、重新设计。例如,如果要求炸药件的可靠度不低于 0.95 时,由于位移给出的可靠度 R_2 为 [0.284, 0.939],说明该炸药件肯定不满足可靠性设计要求,需要重新更改设计。

本方法还适用于拉伸强度也具有不确定性的情形。在可靠性分析前定义新变量 R ,它是结构应力 σ 和材料强度 S 的函数,当其大于零时结构可靠。当选取最大应力准则作为强度判据时, R 的表达式如式(6)所示。由于 R 与零的大小关系直接表征可靠性,因此可将 R 作为关心响应量,采用文中方法由概率盒量化、叠加各种不确定性,并进行可靠性分析。实际上,这样可以更灵活地选取强度准则,并可考虑应力和强度的相关性。

$$R(\sigma, S) = S - \max(\sigma) \quad (6)$$

式中,结构应力 σ 、材料强度 S ,以及新变量 R 的单位均为 MPa。

5 结 论

(1) 参数不确定性、数值误差以及模型形式不确定性都会影响 PBX 构件位移、应力等响应量的预测值, 并且影响程度与感兴趣响应量有关(例如数值误差对位移的影响很小, 但是对应力影响较大), 相比于确定性强度校核法, 考虑不确定性的可靠性评估会降低工程应用的风险。

(2) 采用概率盒方法量化响应的不确定性, 可直观地展示参数不确定性、数值不确定性以及模型形式不确定性对响应不确定性的贡献比例。

(3) 基于本文方法, 保持随机和认知不确定性分离, 可获得 PBX 构件的可靠度区间, 该区间覆盖了真实可靠度, 并随着认知不确定性的减少逐渐收敛于真实可靠度。

(4) 认知不确定性影响严重时, 经典概率方法计算的可靠度可能误差较大, 而本方法仍可给出可靠度区间(该区间覆盖了经典概率法的可靠度和真实可靠度), 补充了经典概率方法的不足。

(5) 本方法并不局限于文中的炸药件结构, 也适用于其他结构的可靠性分析。

参考文献:

- [1] 高军, 黄再兴. PBX 炸药粘弹性损伤本构模型的参数识别[J]. 工程力学, 2013, 30(7): 299-304.
GAO Jun, HUANG Zai-xing. Parameter identification for viscoelastic damage constitutive model of PBX[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(7): 299-304.
- [2] Helton J C, Johnson J D. Quantification of margins and uncertainties: Alternative representations of epistemic uncertainty[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2011, 96(9): 1034-1052.
- [3] 刘鸿文. 材料力学[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2004: 212-251.
LIU Hong-wen. Material mechanics[M]. 4th edition. Beijing: Higher Education Publishing, 2004: 212-251.
- [4] Svetlitsky V A. Statistical dynamics and reliability theory for mechanical structures [M]. Berlin: Springer-Verlag Publishing, 2003: 313-348.
- [5] Helton J C. Quantification of margins and uncertainties: Conceptual and computational basis[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2011, 96(9): 976-1013.
- [6] Shah H, Hosder S, Winter T. A mixed uncertainty quantification approach using evidence theory and stochastic expansions[J]. *International Journal for Uncertainty Quantification*, 2015, 5(1): 21-48.
- [7] Hamada M, Martz H F, Reese C S, et al. A fully Bayesian approach for combining multilevel failure information in fault tree quantification and optimal follow-on resource allocation[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2004, 86(3): 297-305.
- [8] Sentz K, Ferson S. Probabilistic bounding analysis in the quantification of margins and uncertainties[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2011, 96(9): 1126-1136.
- [9] Jiang C, Han X, Lu G Y, et al. Correlation analysis of non-probabilistic convex model and corresponding structural reliability technique[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2011, 200(33-36): 2528-2546.
- [10] 姜潮, 郑静, 韩旭, 等. 一种考虑相关性的概率-区间混合不确定模型及结构可靠性分析[J]. 力学学报, 2014, 46(4): 591-600.
JIANG Chao, ZHENG Jing, HAN Xu, et al. A probability and interval hybrid structural reliability analysis method considering parameters' correlation[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2014, 46(4): 591-600.
- [11] 吴丹清, 吕震宙, 程蕾. 正态相关变量主客观不确定性分离和参数影响分析[J]. 力学学报, 2014, 46(5): 794-801.
WU Dang-qing, LÜ Zhen-zhou, CHENG Lei. An separation of the aleatory and epistemic uncertainties with correlated normal variables and analysis of the influence of parameters[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2014, 46(5): 794-801.
- [12] Richards S A. Completed Richardson Extrapolation in Space and Time[J]. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 1997, 13(7): 573-582.
- [13] Roache P J. Verification and validation in computational science and engineering[M]. Albuquerque: Hermosa Publishers, 1998: 15-180.
- [14] Oberkampf W L, Roy C J. Verification and validation in scientific computing[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010: 315-326.
- [15] Ferson S, Oberkampf W L, Ginzburg L. Model validation and predictive capability for the thermal challenge problem[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2008, 197(29-32): 2408-2430.
- [16] Helton J C, Johnson J D, Sallaberry C J, et al. Survey of sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2006, 91(10-11): 1175-1209.
- [17] Williamson R C, Downs T. Probabilistic arithmetic I: numerical methods for calculating convolutions and dependency bounds [J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 1990, 4: 89-158.

Reliability Analysis of Polymer Bonder Explosive Based on Separation between Aleatory Uncertainty and Epistemic Uncertainty

SHEN Zhan-peng, ZANG Chao-ping, CHEN Xue-qian, LIU Xin-en, HAO Zhi-ming

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Institute of Systems Engineering, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: The uncertainties of model parameters, structural geometry, material property, and external force of the polymer bonder explosive, were quantified with probability box and propagated with nested sampling method in order to separate the different effect of aleatory uncertainty and epistemic uncertainty on response of interest. Moreover, numerical error and model form error were also quantitatively superposed to acquire the response uncertainty and the reliability interval of the polymer bonder explosive (PBX) structure consequently. In addition, the results of proposed method in this paper were compared with the determinate checking method and the probabilistic reliability method. It is indicated that the reliability assessment with the consideration of uncertainty can reduce the engineering risk than the determinate method. Furthermore, the reliability interval obtained by the proposed method covers the reliability calculated by probabilistic method, and can narrow down to the true reliability as the epistemic uncertainty decreases.

Key words: polymer bonder explosive(PBX); probability box; epistemic uncertainty; reliability

CLC number: TJ55; TB1

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.04.011



《含能材料》“损伤与点火”征稿

含能材料的损伤特征与点火过程有密切的联系,炸药、推进剂的内部损伤及其对力学特性、安全特性和点火行为的影响规律受到了含能材料学界的高度重视,为推动这一重要研究方向的学术交流,本刊特设立“损伤与点火”专栏。专栏主要征集炸药、推进剂等含能材料的损伤观测与多尺度表征技术、含损伤的本构方程、准静态与动态损伤演化规律、损伤与破坏的宏(细)观模式、损伤对起爆、爆炸、爆轰成长以及非冲击起爆行为的影响等方向的原创性研究论文。来稿请注明“损伤与点火”专栏。

《含能材料》编辑部