

文章编号: 1674-8190(2024)02-077-13

基于正交试验的民用飞机抗爆结构参数敏感性分析

薛小锋¹, 欧靖¹, 林心怡¹, 冯蕴雯¹, 杨祥²

(1. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

(2. 上海飞机设计研究院 机体集成部, 上海 201210)

摘要: 最小风险炸弹位置(LRBL)结构是放置飞机上可疑爆炸物的装置, 探究结构尺寸和炸药位置对其抗爆性能的影响程度可为其改进设计提供参考。基于正交试验设计与数值模拟相结合的方法, 以LRBL结构各危险部位的最大应变和变形为评价指标, 分别运用极差分析法和方差分析法对LRBL结构的罐体壁厚、底盖厚度、连接凸台厚度、剪切销直径和炸药位置5个影响因素开展参数敏感性分析。结果表明: 在200 g炸药当量的工况下, 各因素对LRBL结构的抗爆性能的影响显著程度从大到小为炸药位置、罐体壁厚、底盖厚度、凸台厚度和剪切销直径; 结合评价指标综合分析得到各个因素最优水平下的LRBL结构设计方案。

关键词: 最小风险炸弹位置; 参数敏感性分析; 正交试验设计; 结构优化; 爆炸仿真

中图分类号: V223+.5; V214

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.02.09

Sensitivity analysis of anti-explosion structure parameters of civil aircraft based on orthogonal experiment

XUE Xiaofeng¹, OU Jing¹, LIN Xinyi¹, FENG Yunwen¹, YANG Xiang²

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Fuselage Integration Department, Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: Least risk bomb location (LRBL) structure is a device for placing suspicious explosives on the aircraft. Exploring the influence of structure size and explosive location on its anti-explosion performance can provide a reference for improving the design. Based on the method of combining orthogonal experimental design with numerical simulation, the maximum strain and deformation of each dangerous part of LRBL structure are used as evaluation indicators. The range analysis method and variance analysis method are respectively used to carry out parameter sensitivity analysis on the five influencing factors of the tank wall thickness, bottom cover thickness, connection boss thickness, shear pin diameter and explosive position of LRBL structure. The results show that when the explosive equivalent is determined as 200 g, the significant degree of influence of each factor on the antiknock performance of the LRBL structure from large to small is as follows: explosive position, tank wall thickness, bottom cover thickness, boss thickness and shear pin diameter; Based on comprehensive analysis of evaluation indicators, the LRBL structural design scheme at the optimal level of each factor is obtained.

Key words: least risk bomb location; parameter sensitivity analysis; orthogonal experimental design; structural optimization; explosion simulation

收稿日期: 2023-01-06; 修回日期: 2023-04-04

通信作者: 欧靖(1999-), 男, 硕士研究生。E-mail: 540463017@qq.com

引用格式: 薛小锋, 欧靖, 林心怡, 等. 基于正交试验的民用飞机抗爆结构参数敏感性分析[J]. 航空工程进展, 2024, 15(2): 77-89.

XUE Xiaofeng, OU Jing, LIN Xinyi, et al. Sensitivity analysis of anti-explosion structure parameters of civil aircraft based on orthogonal experiment[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(2): 77-89. (in Chinese)

0 引言

恐怖分子将爆炸物携带上飞机导致飞机事故的事件时有发生^[1],美国联邦航空管理局颁布 FAR 25-127 修正案^[2]要求制造商针对大型民用飞机,必须设计一个“最小风险炸弹位置(Least Risk Bomb Location,简称LRBL)”^[3]用于放置飞机上发现的可疑爆炸物。我国的民用飞机反恐抗爆技术体系尚处于起步阶段^[4],鲜见有关LRBL结构的研究资料,目前只有与之相关的民用飞机防爆装置研究可以参考。国外研究人员在新型防爆装置设计和仿真分析方面做了大量工作^[5-9],在失效机理方面也有一定研究,例如,Ma L等^[10]应用绝热剪切带损伤机理解释了防爆容器的破坏模式。国内,苏培刚等^[11]提出一种航空餐车内置式防爆罐,并对防爆罐的强度进行了评估与优化。

影响防爆装置性能的因素众多,如材料性能、结构尺寸和爆炸载荷等。这些因素对防爆装置性能的影响程度不同,需要重点关注敏感参数。在敏感性分析方面,正交试验设计的方法不仅可以在较少试验次数的基础上得出较好的结果,而且还能得出每个因素对相应指标影响的主次顺序。程文强^[12]采用基于正交试验设计的数值模拟方法,对超燃冲压发动机燃烧室多个构型因素的几何参数进行了优化;杨世全等^[13]采用正交试验法对杆式射流侵彻性能影响因素进行敏感性分析,确定了药型罩壁厚是影响成型射流头尾速度的最主要因素;钱小辉等^[14]采用正交试验设计的方法,研究灌封胶材料属性参数对玻璃壳热应力的影响,确定了弹性模量是玻璃壳热应力的显著影响参数;王瑞骏等^[15]采用正交试验法,基于公伯峡面板堆石坝进行7参数流变模型的参数敏感性分析,确定了最大影响参数;Deng Y W等^[16]基于正交试验设计对影响液冷电池热管理模型冷却效果的4个参数进行敏感性分析,确定了管道数量对冷却板平均温度的影响最明显,冷却液流速次之,管道高度影响最小,并找到了最优水平组合。

目前国内关于防爆装置的研究主要集中在评估抗爆性能和结构设计方面^[11,17],而有关LRBL结构抗爆性能参数敏感性方面的研究未见报道。本文针对LRBL结构需要满足的功能要求,首先给出一种LRBL结构初步设计方案,其次采用正交试验设计确定试验因素、水平和方案,然后利用LS-

DYNA对试验方案进行仿真计算,得出试验指标数据,最后结合极差分析法、方差分析法对结构尺寸和爆炸载荷两方面因素进行LRBL结构的参数敏感性分析,以期对LRBL结构的改进设计提供参考。

1 LRBL结构参数敏感性分析理论

1.1 LRBL结构参数敏感性分析流程

为确定影响LRBL结构抗爆性能的主要因素,本文提出基于正交试验的民用飞机抗爆结构参数敏感性分析流程,流程如图1所示。

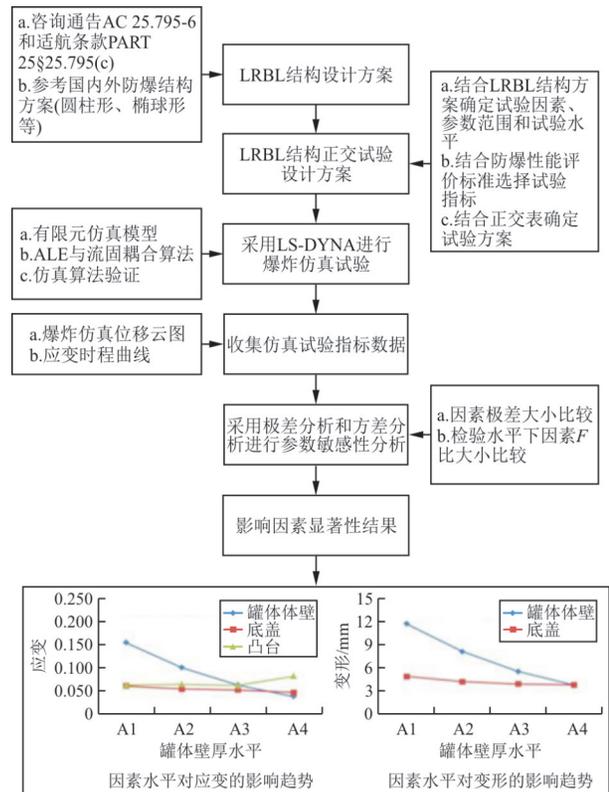


图1 基于正交试验的LRBL结构参数敏感性分析流程图
Fig. 1 Flow chart of LRBL structural parameter sensitivity analysis based on orthogonal test

根据咨询通告和适航条款的要求,参考国内外防爆结构方案,首先给出一种LRBL结构设计方案,其次结合设计方案、防爆性能评价标准和正交表依次确定试验因素、参数范围、试验水平、试验指标和试验方案,然后根据试验方案,利用LS-DYNA进行爆炸仿真试验获得试验指标数据,最后采用极差分析和方差分析对输入和输出数据进行处理,得到影响因素的显著性结果,完成对LR-

BL结构的参数敏感性分析。

1.2 正交试验设计原理

正交试验设计是利用正交表安排多因素试验,并进行试验结果分析的科学技术。在解决实际问题时,根据需求选择相应的正交表作为试验方案和统计依据。正交表常用的表示符号为 $L_N(m^k)$,如 $L_8(2^7)$ 等,符号内各字母的含义分别是: L 为各种试验方案组合的正交表; N 为试验方案的总数; m 为试验中不同因素的水平数; k 为试验中最多可安排因素的数目。

1.3 正交试验结果分析方法原理

针对不同因素对试验结果影响的主次水平问题,本文采用极差分析法^[18]和方差分析法^[19-20]处理正交试验结果^[21-22],开展LRBL结构参数敏感性分析。

1) 极差分析法

极差反映了一组数据的离散程度,极差越大,该因素的水平变化对试验结果的影响也越大。极差的表达式为

$$R_j = \max \{K_{1j}, K_{2j}, \dots, K_{ij}\} - \min \{K_{1j}, K_{2j}, \dots, K_{ij}\} \quad (1)$$

式中: K_{ij} 为第 j 因素在第 i 水平下的统计参数; R_j 为第 j 因素的最大值与最小值的差。

2) 方差分析法

方差分析法可以排除试验误差的影响,确定因素水平变化的影响及不同因素的敏感性程度,验证极差分析的结果。方差分析的原理如下:

假设正交表为 $L_N(m^k)$,当完成所有试验后可测得 N 个数据,依次记为 y_1, y_2, \dots, y_N ,它们的和可记为 $T = y_1 + y_2 + \dots + y_N$,方差分析具体流程如下:

①计算每列的各水平之和,如:每列有 m 个水平,就有 m 个水平和,可分别记为 X_1, X_2, \dots, X_m 。

②计算各列的平方和及其对应的自由度,分别记为 S_j, f_j ,即:

$$S_j = (X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_m^2) / r - T^2 / N \quad (2)$$

$$f_j = m - 1 \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (3)$$

式中: r 为水平的重复数, $r = N/m$ 。

③计算总平方和 S_T 和总自由度 f_T ,即:

$$S_T = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \quad (4)$$

$$f_T = N - 1 \quad (5)$$

式中: \bar{y} 为 N 个数据的平均值, $\bar{y} = T/N$ 。

在完全正交表场合可用如下平方和分解公式来检查各列平方和计算是否有误,即:

$$S_T = S_1 + S_2 + \dots + S_k \quad (6)$$

$$f_T = f_1 + f_2 + \dots + f_k \quad (7)$$

④确定误差平方和,它由诸空白列的平方和与若干相对较小的列平方和组成,记为 S_e ,其自由度为相应列自由度之和,记为 f_e 。但是当无重复试验,又无空白列时,可以在诸平方和中寻找相对较小的平方和作误差用。

⑤进行方差分析,把上述计算结果写入方差分析表,如表1所示,再计算均方和 V_i 及 F 比,其中 $V_e = S_e/f_e$ 。在给定检验水平 α 下,确定拒绝域,并进行参数敏感性分析。

$$W = \{F > F_{1-\alpha}(f_j, f_e)\} \quad (8)$$

式中: $F_{1-\alpha}(f_j, f_e)$ 为 F 分布 $F(f_j, f_e)$ 的 $1 - \alpha$ 分位数。

表1 方差分析表

Table 1 Analysis of variance table

因素	平方和 S_j	自由度 f_j	均方和 V_j	F 比
1	S_1	f_1	$V_1 = S_1/f_1$	V_1/V_e
2	S_2	f_2	$V_2 = S_2/f_2$	V_2/V_e
3	S_3	f_3	$V_3 = S_3/f_3$	V_3/V_e
...
误差	S_e	f_e	$V_e = S_e/f_e$	—
总和	S_T	f_T	—	—

1.4 LRBL结构试验因素与试验指标

根据适航条款FAR PART 25§25.795(c)和咨询通告AC 25.795-6^[2-3],明确LRBL结构的设计要求:在一定当量爆炸物的条件下,LRBL结构能够实现单方向爆破功能。因此民用飞机LRBL结构应当是指在内爆作用下能承受超过弹性变形或弹塑性变形的极限范围而不会发生爆裂的容器。一旦LRBL结构内存放的爆炸物发生爆炸,应该设置有泄压装置能够释放爆炸产生的巨大能量,保

障客机上人员和飞机关键设备的安全。另外,为了缩短爆炸物的应急处置时间,LRBL结构应当具有快速装填爆炸物的能力。

冯蕴雯等^[23]开展了高可靠单向爆破的民用飞机防爆结构设计研究,给出了满足高可靠性要求的LRBL设计方案,本文基于该设计方案进行数值模拟。LRBL结构整体如图2所示,包括LRBL结构罐体1,底盖2,冲头3和剪切销4,除此之外还有定位螺栓5和剪切销螺母6。LRBL结构罐体1和底盖2通过旋转卡位凸台1-1和2-1配合使用,实现爆炸物的快速装入与密闭,使用定位螺栓5防止底盖在民用飞机飞行过程中可能发生的旋转脱落。LRBL结构罐体1和冲头3通过剪切销4连接使用,实现泄压功能:冲头3在炸弹爆炸产生的巨大能量推动下向前移动,使得剪切销4断裂,冲头3沿罐体导向方向冲击破蒙皮,释放能量。

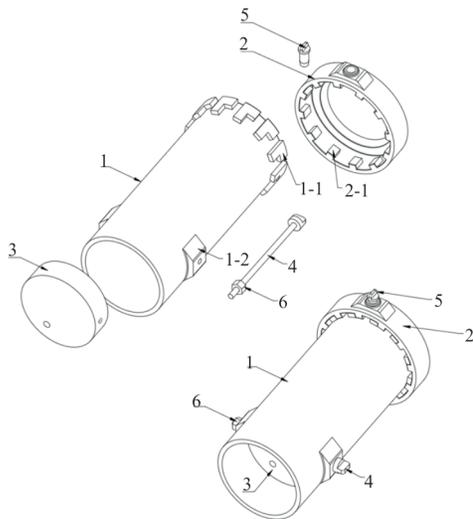


图2 LRBL结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of LRBL structure

影响结构应力应变的主要因素有:外载、几何形状、尺寸及材料物理特性等。在LRBL结构初步方案中罐体、底盖、冲头、凸台、定位螺栓均采用钛合金,剪切销采用结构钢。

在材料选型确定的前提下,针对LRBL结构考虑的主要影响因素包括结构尺寸和承受的爆炸载荷。关于LRBL结构尺寸因素,根据LRBL结构的初始设计方案和需要满足的功能要求,罐体、底盖和连接凸台三个部位应在承受爆炸载荷后不产生破损,保持结构整体完整,剪切销应剪断以实现泄压功能,因此选择LRBL结构的罐体壁厚 A 、底盖

厚度 B 、连接凸台厚度 C 和剪切销直径 D 共4个因素进行分析;关于LRBL结构承受的爆炸载荷,可选择炸药当量和炸药位置进行分析,由于炸药当量不可控,LRBL结构改进设计应在给定炸药当量下从结构自身出发,因此选择炸药位置 E 进行分析。

根据LRBL结构所要承受的200 g TNT爆炸物当量,参考国内外防爆结构在给定炸药当量下的设计尺寸,结合本文提出的LRBL结构初始设计方案,初步确定LRBL结构方案的4个尺寸参数的变化范围为:罐体壁厚10~20 mm、底盖厚度10~16 mm、凸台厚度10~15 mm、销直径10~20 mm;关于炸药位置的选择,抗爆容器内部一般会布置约束网,使爆炸物进入容器后处于居中位置,爆炸过程中罐体内腔所受冲击较为均匀,但考虑到当炸药贴近罐体壁时,所设计的LRBL结构也应保证防护作用,因此炸药位置考虑在中间和贴近体壁两种典型情况,如图3所示。

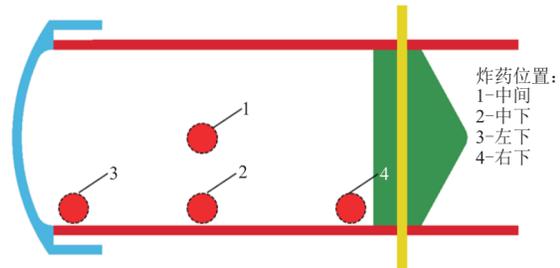


图3 炸药位置工况

Fig. 3 Explosive location conditions

为了得到更合理的影响趋势直观图,对每个因素取四个水平进行分析研究,各影响因素及其水平汇总如表2所示,表中水平取值从左到右依次为水平1~4。

表2 试验因素取值范围及水平

Table 2 The range and level of the test factors

试验因素	取值范围	水平取值
罐体壁厚 A /mm	10~20	10, 13, 16, 20
底盖厚度 B /mm	10~16	10, 12, 14, 16
凸台厚度 C /mm	10.0~15.0	10.0, 11.5, 13.0, 15.0
销直径 D /mm	10~20	10, 13, 16, 20
炸药位置 E	位置1~位置4	中间, 中下, 左下, 右下

由于试验因素为5个,各因素水平为4,根据正交试验设计准则,可以选择的正交表有 $L_{16}(4^5)$,即

共设计16个设计方案,每个因素安排4个水平。LRBL结构的5因素4水平正交试验表如表3所示。

表3 LRBL结构5因素4水平正交试验表
Table 3 LRBL structure 5 factor 4 horizontal orthogonal test table

试验编号	试验因素				
	A/mm	B/mm	C/mm	D/mm	E
1	10	10	10.0	10	中间
2	10	12	11.5	13	中下
3	10	14	13.0	16	左下
4	10	16	15.0	20	右下
5	13	10	11.5	16	右下
6	13	12	10.0	20	左下
7	13	14	15.0	10	中下
8	13	16	13.0	13	中间
9	16	10	13.0	20	中下
10	16	12	15.0	16	中间
11	16	14	10.0	13	右下
12	16	16	11.5	10	左下
13	20	10	15.0	13	左下
14	20	12	13.0	10	右下
15	20	14	11.5	20	中间
16	20	16	10.0	16	中下

试验指标必须满足能够客观评价试验对象特定性质的要求,试验指标的选择要具有代表性,能够评价LRBL结构的安全性。

本文在动力学仿真中采用最大塑性应变失效准则,因此选取最大应变作为试验指标之一。考虑到结构的最大变形也是防爆结构设计领域中评估防爆装置抗爆性能的常用指标^[21-22,24-26],故也选择结构最大变形量作为试验指标。选择LRBL结构罐体体壁、底盖、凸台和剪切销4个关键位置的最大应变以及罐体体壁和底盖的最大变形进行综合分析。

2 LRBL结构仿真模型与方法验证

2.1 LRBL结构有限元模型

根据正交试验表开展LRBL结构在爆炸载荷下的仿真计算,需要建立LRBL结构、空气和炸药的有限元模型。虽然LS-DYNA具有强大的计算分析能力,但其前处理功能相对一般,因此本文采

用联合建模求解技术。首先利用CATIA软件建立LRBL结构的三维数模,而后使用HyperMesh软件进行网格划分,建立LRBL结构的有限元模型,如图4所示。



图4 LRBL结构有限元模型

Fig. 4 Finite element model of LRBL structure

使用TrueGrid软件的vd和mtv命令限定空气中指定区域为炸药,空气和炸药网格模型如图5所示。建模过程采用kg-mm-ms单位制。

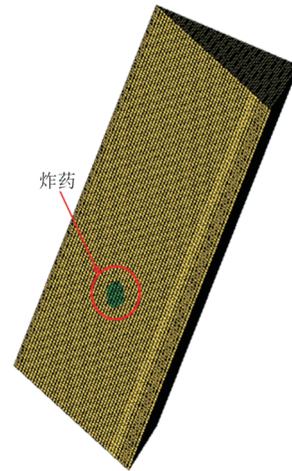


图5 空气域和炸药的有限元模型

Fig. 5 Finite element model of air domain and explosives

在LS-DYNA中将建立的LRBL结构有限元模型和流体(空气、炸药)有限元模型组合,得到LRBL结构的爆炸仿真有限元模型,如图6所示。

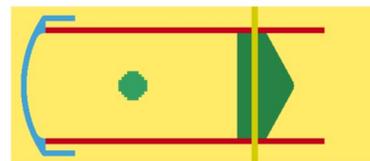


图6 LRBL结构的爆炸仿真计算有限元模型

Fig. 6 Explosion simulation of LRBL structure to calculate finite element model

LRBL 结构的网格均为 SOLID164 六面体实体单元,单元数量为 45 270;图 5 中长方形黄色区域是空气域,空气域设置无反射边界条件以模拟无限空气域;中间绿色球形区域为炸药,单元数量为 314 496。仿真中使用 ALE 算法定义流体单元(空气和炸药),Lagrange 算法定义结构单元(LRBL 结构),流固耦合算法定义流体和结构之间的相互作用。

2.2 材料模型及参数

LRBL 结构中罐体、底盖和冲头的材料是 Ti-6Al-4V,剪切销的材料是 15-5PH 不锈钢。采用 Simplified-Johnson-Cook 模型对直接受到爆炸冲击波作用的 LRBL 结构罐体、底盖和冲头的动态响应进行描述,采用 Plastic-kinematic 本构模型对剪切销在爆炸载荷作用下的力学行为进行描述。下文对 LRBL 结构金属材料模型及本构模型进行说明。

Simplified-Johnson-Cook 本构模型的公式如式(9)所示^[27]。Plastic-kinematic 本构模型的公式如式(10)所示^[28]。

$$\sigma_{eq} = (A' + B'\epsilon^n)(1 + C'\ln \dot{\epsilon}^*) \quad (9)$$

式中: A' 为准静态下的屈服强度; B' 为应变强化系数; n 为应变硬化系数; C' 为应变率敏感系数; ϵ 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}^*$ 为无量纲应变率。

$$\sigma_Y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C'} \right)^{\frac{1}{p}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{eff}) \quad (10)$$

式中: σ_0 为初始屈服压力; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; β 为硬化参数; ϵ_p^{eff} 为有效塑性应变; p 为应变率参数; E_p 为塑性硬化模量。

Ti-6Al-4V 和 15-5PH 的材料参数如表 4~表 5 所示, A_1 、 B_1 、 n_1 、 C_1 为材料本构方程参数。

表 4 Ti-6Al-4V 材料参数^[29-31]
Table 4 Ti-6Al-4V material parameters^[29-31]

模拟参数	数值	模拟参数	数值
密度/($\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3}$)	4.43×10^{-6}	B_1/GPa	0.467
弹性模量/GPa	105.4	n_1	0.614
泊松比	0.342	C_1	0.017
失效塑性应变	0.25	参考应变率/ s^{-1}	1×10^{-3}
A_1/GPa	0.953		

表 5 15-5PH 不锈钢材料参数^[28]
Table 5 15-5PH stainless steel material parameters^[28]

模拟参数	数值	模拟参数	数值
密度/($\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3}$)	7.78×10^{-6}	屈服应力/GPa	1.077
弹性模量/GPa	196.507	正切模量/GPa	1.22
泊松比	0.27	硬化参数	1
失效塑性应变	0.2		

2.3 计算方法验证

为了验证本文所用的 ALE 算法和流固耦合算法的正确性,保证后续敏感性分析输出数据的准确性,利用 LS-DYNA 有限元软件对参考文献[32-33]中的爆炸冲击载荷下铝板的损伤试验进行数值模拟。试验铝板为直径 500 mm 的 2024-T3 铝合金,通过法兰盘固定在 750 mm 高的支架上,试验装置如图 7 所示。

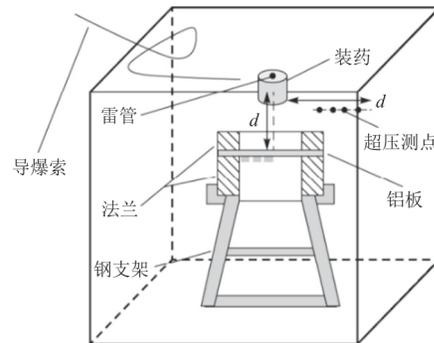


图 7 铝板固支及试验系统示意图^[33]
Fig. 7 Schematic diagram of aluminum plate solid support and test system^[33]

对该试验进行数值模拟,建立数值计算模型,如图 8 所示。

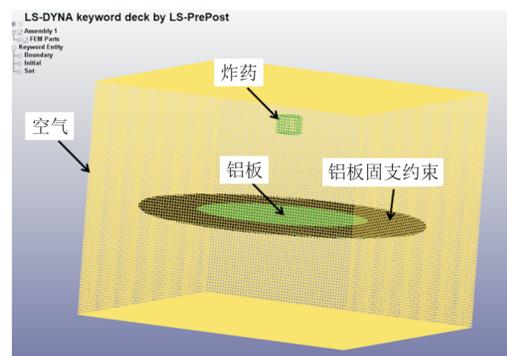
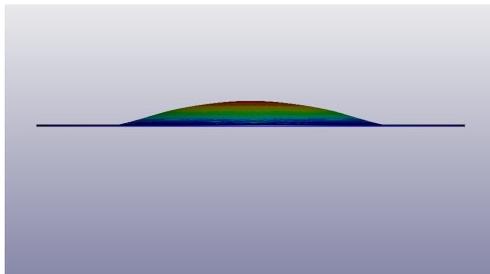
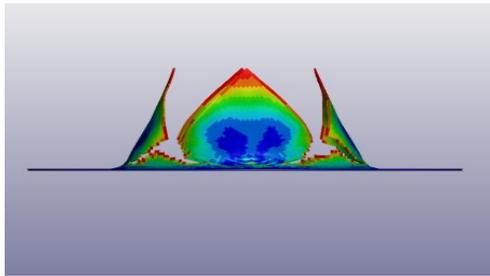


图 8 铝板的爆炸仿真计算有限元模型
Fig. 8 Finite element model for explosion simulation calculation of aluminum plates

空气、炸药以及铝板均选用 SOLID164 实体单元进行实体网格划分。空气域设置无反射边界条件以模拟无限空气域,铝板与参考文献中试验一样采用固支边界条件。空气和炸药使用 ALE 算法,铝板使用 Lagrange 算法,流体和铝板之间采用流固耦合算法。其他具体参数设置参考文献 [33]。计算结果如图 9 所示,文献中试验结果如图 10 所示。



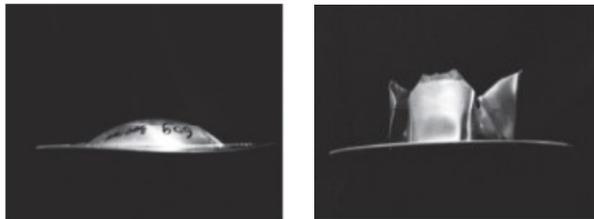
(a) 60 g, 300 mm 工况铝板响应



(b) 60 g, 175 mm 工况铝板响应

图 9 仿真计算结果

Fig. 9 Simulation calculation results



(a) 60 g, 300 mm 工况

(b) 60 g, 175 mm 工况

图 10 文献中的试验结果^[32]

Fig. 10 Test results in the literature^[32]

从图 9~图 10 可以看出:炸药 60 g,爆距 175 mm 工况下,铝板在爆轰产物作用下发生了花瓣状破裂,与如图 10(b)所示的铝板试验结果破坏形式一致;炸药 60 g,爆距 300 mm 工况下,铝板在爆炸载荷作用下发生了大变形,数值仿真结果的误差在 10% 以内,如表 6 所示。

表 6 60 g, 300 mm 工况下铝板变形数值计算与试验结果
Table 6 Numerical calculation and test results of aluminum plate deformation under 60 g, 300 mm working conditions

工况	铝板最大变形/mm		误差/%
	试验结果	数值模拟	
60 g, 300 mm	45.45	43.1	5.1

表 6 的结果证明了本文所选计算方法的合理性,同时保证了后续敏感性分析输出数据的准确性。

3 LRBL 结构参数敏感性分析

3.1 仿真计算结果

根据表 3 的正交试验方案,建立动力学仿真模型,进行 16 组数值仿真计算。提取试验数据结果,如表 7 所示。

表 7 LRBL 结构仿真计算结果
Table 7 LRBL structure simulation calculation results

试验编号	试验评价指标					
	罐体体壁应变	底盖应变	凸台应变	销应变	罐体体壁变形/mm	底盖变形/mm
1	0.017 5	0.114 0	0.018 7	0.2	1.88	8.16
2	0.242 0	0.070 8	0.062 5	0.2	17.80	4.52
3	0.115 0	0.060 8	0.161 0	0.2	7.72	4.77
4	0.249 0	0.000 0	0.012 3	0.2	20.00	2.19
5	0.168 0	0.009 3	0.042 2	0.2	13.60	4.24
6	0.063 3	0.079 4	0.160 0	0.2	5.52	4.99
7	0.163 0	0.075 4	0.044 7	0.2	12.30	4.05
8	0.010 8	0.056 3	0.014 4	0.2	1.28	3.61
9	0.102 0	0.069 8	0.089 8	0.2	8.18	4.98
10	0.005 8	0.105 0	0.024 9	0.2	1.01	5.15
11	0.115 0	0.001 1	0.040 2	0.2	9.45	2.54
12	0.032 4	0.035 7	0.096 4	0.2	3.60	3.06
13	0.021 5	0.075 0	0.152 0	0.2	2.56	5.56
14	0.077 4	0.005 8	0.031 7	0.2	6.47	2.90
15	0.000 9	0.087 8	0.023 6	0.2	0.81	4.06
16	0.054 0	0.020 0	0.124 0	0.2	5.21	2.71

从表 7 可以看出:剪切销均达到失效应变并发生剪断,按照“最小风险炸弹位置”结构的设计要

求,泄压装置部位的结构允许发生破坏,即剪切销需剪断以达到泄压的目的。因此在后续计算中不对销应变指标进行分析计算,只针对其他 5 组试验指标进行极差分析和方差分析。

3.2 基于极差分析的 LRBL 结构敏感性分析结果

针对除剪切销以外的其他 5 组试验指标开展极差分析。三个应变指标的极差分析结果如表 8~表 10 所示,同时,为直观地观察各因素水平变动时,各试验指标的变化情况,绘制直观变化图如图 11 所示。

表 8 罐体体壁应变极差分析
Table 8 Tank wall strain range analysis

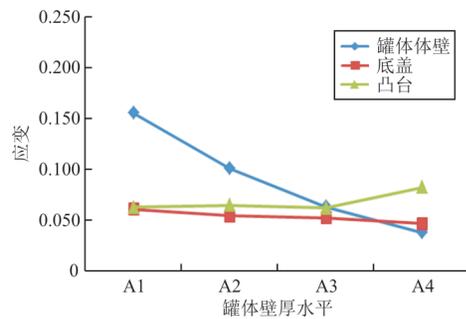
指标	罐体体壁应变				
	A	B	C	D	E
K_1	0.624	0.309	0.250	0.290	0.035
K_2	0.405	0.388	0.443	0.389	0.561
K_3	0.255	0.394	0.305	0.343	0.232
K_4	0.154	0.346	0.439	0.415	0.609
$K_1/4$	0.156	0.077	0.062	0.073	0.009
$K_2/4$	0.101	0.097	0.111	0.097	0.140
$K_3/4$	0.064	0.098	0.076	0.086	0.058
$K_4/4$	0.038	0.087	0.110	0.104	0.152
R	0.118	0.021	0.049	0.031	0.143

表 9 底盖应变极差分析
Table 9 Strain range analysis of the bottom cover

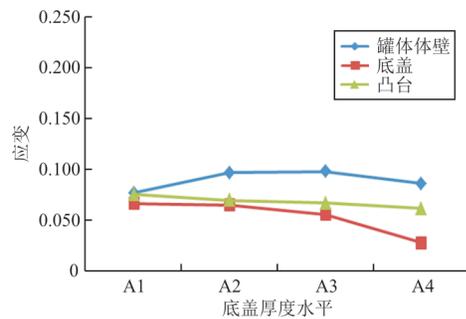
指标	底盖应变				
	A	B	C	D	E
K_1	0.246	0.268	0.215	0.231	0.363
K_2	0.220	0.261	0.204	0.203	0.236
K_3	0.212	0.225	0.193	0.195	0.251
K_4	0.189	0.112	0.255	0.237	0.016
$K_1/4$	0.061	0.067	0.054	0.058	0.091
$K_2/4$	0.055	0.065	0.051	0.051	0.059
$K_3/4$	0.053	0.056	0.048	0.049	0.063
$K_4/4$	0.047	0.028	0.064	0.059	0.004
R	0.014	0.039	0.016	0.010	0.087

表 10 凸台应变极差分析
Table 10 Boss strain range analysis

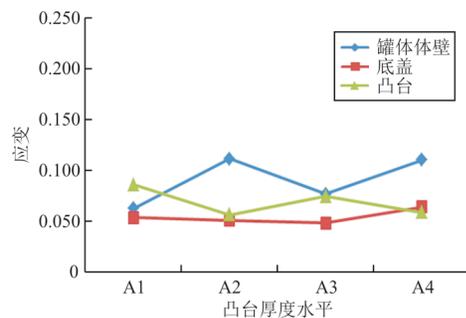
指标	凸台应变				
	A	B	C	D	E
K_1	0.255	0.303	0.343	0.192	0.082
K_2	0.261	0.279	0.225	0.269	0.321
K_3	0.251	0.270	0.297	0.352	0.569
K_4	0.331	0.247	0.234	0.286	0.126
$K_1/4$	0.064	0.076	0.086	0.048	0.020
$K_2/4$	0.065	0.070	0.056	0.067	0.080
$K_3/4$	0.063	0.067	0.074	0.088	0.142
$K_4/4$	0.083	0.062	0.058	0.071	0.032
R	0.020	0.014	0.030	0.040	0.122



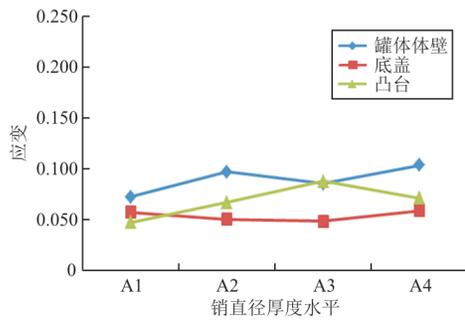
(a) 罐体壁厚水平影响趋势



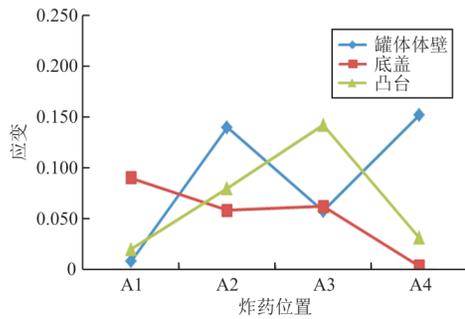
(b) 底盖厚度水平影响趋势



(c) 凸台厚度水平影响趋势



(d) 销直径水平影响趋势



(e) 炸药位置水平影响趋势

图 11 因素水平对应变的影响趋势

Fig. 11 Influence trend of factor level on strain

从表 8~表 10 可以看出:对于罐体体壁应变、底盖应变和凸台应变,炸药位置均为它们的最主要影响因素。

从图 11 可以看出:对于罐体体壁,当炸药位于罐体体壁附近时,体壁应变有明显增加,其中,炸药位于水平 3,即炸药位于贴近罐体体壁且靠近底盖时,相较于炸药位于水平 2、水平 4 的位置有所降低,结合 LRBL 结构形式分析,这是由于此时炸药位置位于罐体与底盖的连接区,连接凸台区域和底盖的壁厚都对体壁起了一定的加强作用,使得炸药在该位置时造成的体壁应变下降。对于凸台,当炸药从中间向罐体体壁移动时,凸台应变有所增加;当炸药位置再向凸台连接区域移动时,凸台应变又有明显地增加;当炸药向远离凸台连接区域方向移动时,凸台应变有明显下降。对于底盖,炸药位于罐体中间时应变值最大,当向罐体体壁移动时,底盖应变值减小;当炸药向底盖移动时,底盖应变略有增大;当炸药向冲头移动时,底盖应变明显减小。这些现象也与空气域爆炸冲击波超压变化的规律相吻合,即在炸药当量一定时,峰值超压仅与计算点到爆心的距离有关,当距离增大时,冲击波对结构的载荷作用减小^[34-35]。

另外,罐体体壁变形和底盖变形指标的极差分析结果分别如表 11~表 12 所示,绘制直观变化图如图 12 所示。

表 11 罐体体壁变形极差分析

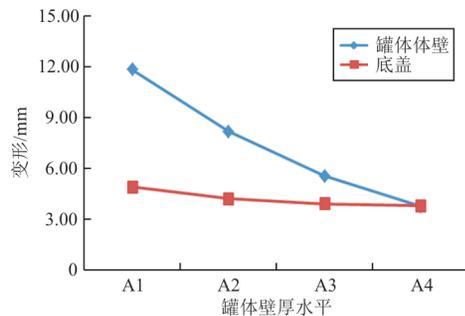
Table 11 Tank wall deformation range analysis

指标	罐体体壁变形/mm				
	A	B	C	D	E
K_1	47.40	26.22	22.06	24.25	4.98
K_2	32.70	30.80	35.81	31.09	43.49
K_3	22.24	30.28	23.65	27.54	19.40
K_4	15.05	30.09	35.87	34.51	49.52
$K_{1/4}$	11.85	6.56	5.52	6.06	1.25
$K_{2/4}$	8.18	7.70	8.95	7.77	10.87
$K_{3/4}$	5.56	7.57	5.91	6.89	4.85
$K_{4/4}$	3.76	7.52	8.97	8.63	12.38
R	8.09	1.14	3.45	2.57	11.13

表 12 底盖变形极差分析

Table 12 Bottom cover deformation range analysis

指标	底盖变形/mm				
	A	B	C	D	E
K_1	19.64	22.94	18.40	18.17	20.98
K_2	16.89	17.56	15.88	16.23	16.26
K_3	15.73	15.42	16.26	16.87	18.38
K_4	15.23	11.57	16.95	16.22	11.87
$K_{1/4}$	4.91	5.74	4.60	4.54	5.25
$K_{2/4}$	4.22	4.39	3.97	4.06	4.07
$K_{3/4}$	3.93	3.86	4.07	4.22	4.60
$K_{4/4}$	3.81	2.89	4.24	4.06	2.97
R	1.10	2.85	0.63	0.48	2.28



(a) 罐体壁厚水平影响趋势

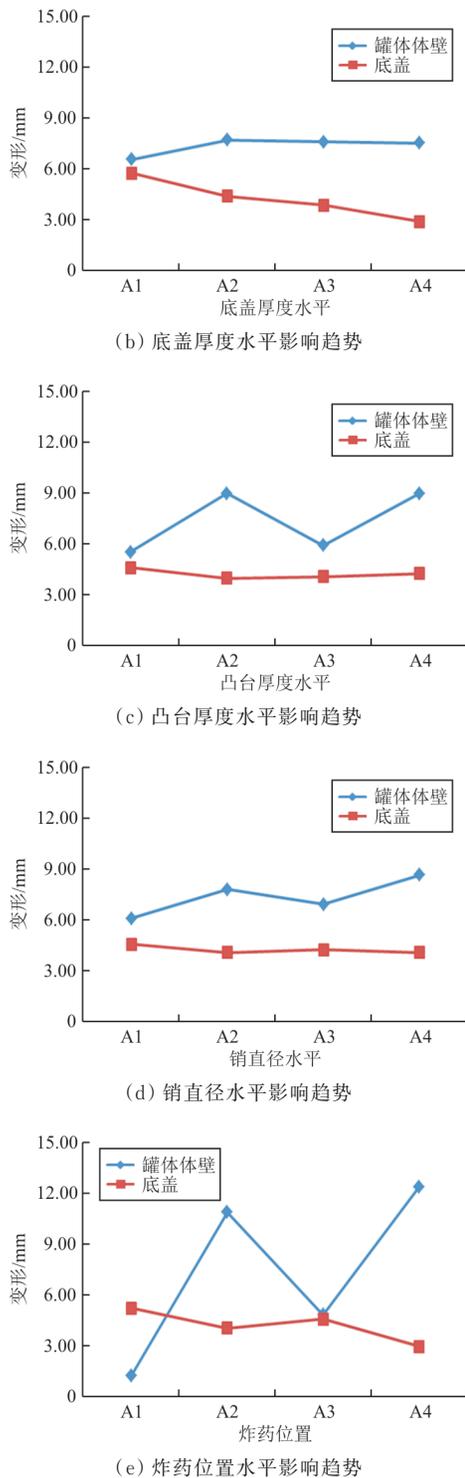


图12 因素水平对变形的影响趋势

Fig. 12 Influence trend of factor level on deformation

从表11~表12可以看出:炸药位置对于罐体体壁变形和底盖变形都是主要影响因素。

从图12可以看出:对于罐体体壁,当炸药位置位于水平2、3、4时,即炸药贴近罐体体壁时,体壁变形明显大于炸药位于罐体正中间(水平1)时造

成的变形。其中炸药位于贴近罐体体壁且靠近底盖(水平3)时,体壁变形有所下降,导致该情况的原因是此时炸药位置位于罐体与底盖的连接区,连接凸台区域和底盖的壁厚都对体壁起了一定的加强作用,使得该位置的体壁变形下降。对于底盖,炸药位于罐体中间时变形值最大,当向罐体体壁移动(水平2)时,底盖变形值略微减小;当炸药向底盖移动(水平3)时,底盖变形略有增大;当炸药向冲头移动(水平4)时,底盖变形略有下降。这些现象也与空气域爆炸冲击波超压变化的规律相吻合。

采用多试验指标来设计方案的正交试验设计,其指标之间可能存在矛盾。此时为了兼顾各个指标,需要综合分析寻求每个指标都尽可能好的因素水平。

在5项试验指标中,最显著影响因素的出现次数分别为:0次A,1次B,0次C,0次D,4次E;第2重要影响因素的出现次数为:2次A,1次B,0次C,1次D,1次E;最弱影响因素的出现次数为:0次A,3次B,0次C,2次D,0次E。在3项应变试验指标中,最主要因素的出现次数为:0次A,0次B,0次C,0次D,3次E;最不显著影响因素出现次数为0次A,2次B,0次C,1次D,0次E。因此,可以明确炸药位置E是最主要的影响因素,对LRBL结构的影响最大。

通过分析表8~表12可知,对于罐体体壁厚度因素A,其最优水平出现次数是:0次A1,0次A2,1次A3,4次A4;最次水平的出现次数是:4次A1,0次A2,0次A3,1次A4;在3个应变指标中A4出现2次为最优水平,综上可确定其最优水平是A4。

同样的,通过分析表8~表12可知,底盖厚度,凸台厚度,销直径和炸药位置4个因素的最优水平分别为B4、C3、D1、E1。

综上所述,通过正交试验设计的极差分析,可以确定炸药位置E是影响LRBL结构抗爆性能的最主要因素,同时得出各影响因素的最优水平组合为A4、B4、C3、D1、E1,即建议以该组合设计LRBL结构,可以具备较好的抗爆性能。

3.3 基于方差分析的LRBL结构敏感性分析结果

当运用方差分析法进行参数敏感性分析时,

一般认为若 F 比 $< F_{0.05}$ (5% 置信水平), 则认定因素对指标无显著影响; 若 $F_{0.05} < F$ 比 $< F_{0.01}$ (1% 置信水平), 则认定因素为指标的敏感参数, 对指标有显著影响; 若 F 比 $> F_{0.01}$, 则认定因素为指标的极敏感参数, 对指标有极显著影响^[21]。分别对 5 个试验指标进行方差分析, 分析结果如表 13~表 17 所示。

表 13 罐体体壁应变方差分析
Table 13 Tank wall strain variance analysis

因素	平方和 S_j	自由度 f_j	F 比	显著性
A	0.031 24	3	26.252	显著
B	0.001 19	3	1.000	
C	0.007 09	3	5.958	
D	0.002 26	3	1.899	
E	0.056 14	3	47.176	极显著
误差	0.001 19	3		
总和	0.413 93	15		

表 14 底盖应变方差分析
Table 14 Bottom cover strain variance analysis

因素	平方和 S_j	自由度 f_j	F 比	显著性
A	0.000 42	3	1.312	
B	0.003 90	3	12.188	显著
C	0.000 56	3	1.750	
D	0.000 32	3	1.000	
E	0.015 80	3	49.375	极显著
误差	0.000 32	3		
总和	0.021 00	15		

表 15 凸台应变方差分析
Table 15 Boss strain variance analysis

因素	平方和 S_j	自由度 f_j	F 比	显著性
A	0.001 08	3	2.700	
B	0.000 40	3	1.000	
C	0.002 33	3	5.825	
D	0.003 27	3	8.175	
E	0.037 07	3	92.675	极显著
误差	0.000 40	3		
总和	0.044 15	15		

表 16 罐体体壁变形方差分析
Table 16 Tank wall deformation variance analysis

因素	平方和 S_j	自由度 f_j	F 比	显著性
A	148.016 77	3	44.477	极显著
B	3.327 97	3	1.000	
C	42.469 02	3	12.761	显著
D	14.734 82	3	4.428	
E	324.916 97	3	97.632	极显著
误差	3.327 97	3		
总和	533.465 55	15		

表 17 底盖变形方差分析
Table 17 Bottom cover deformation variance analysis

因素	平方和 S_j	自由度 f_j	F 比	显著性
A	2.915 62	3	4.624	
B	16.878 37	3	26.769	显著
C	0.924 87	3	1.467	
D	0.630 52	3	1.000	
E	11.136 07	3	17.662	显著
误差	0.630 52	3		
总和	32.485 45	15		

在 F 分布表中查出: $F_{0.05}(3, 3) = 9.28, F_{0.01}(3, 3) = 29.5$ 。以表 13 为例, 罐体体壁应变受炸药位置影响的 F 比为 47.176, 大于 $F_{0.01}(3, 3)$, 即认为炸药位置是罐体体壁应变的极敏感参数。罐体体壁应变受罐体壁厚影响的 F 比为 26.252, 大于 $F_{0.05}(3, 3)$ 但小于 $F_{0.01}(3, 3)$, 即认为对 LRBL 结构而言, 罐体壁厚是罐体体壁应变的敏感参数。罐体体壁应变受底盖厚度影响的 F 比为 5.958, 小于 $F_{0.05}(3, 3)$, 即认为底盖厚度对罐体体壁应变无显著影响。因此由 F 比大小可知, 对罐体体壁应变而言, 参数敏感性由高到低依次为 $E、A、C、D、B$ 。

同样的, 从表 14~表 17 可以看出: 对底盖应变而言, 参数敏感性由高到低依次为 $E、B、C、A、D$ 。对凸台应变而言, 参数敏感性由高到低依次为 $E、D、C、A、B$ 。对罐体体壁变形而言, 参数敏感性由高到低依次为 $E、A、C、D、B$, 对底盖变形而言, 参数敏感性由高到低依次为 $B、E、A、C、D$ 。

综上, 通过方差分析可知, 对 LRBL 结构应变和变形而言, 炸药位置的影响最显著, 罐体壁厚和底盖厚度的影响一般显著, 而凸台厚度和剪切销

直径的影响不显著;由此可见,方差分析所得结论与极差分析基本一致。

4 结 论

1) 针对 LRBL 结构提出了基于正交试验的参数敏感性分析方法,该方法可以在较少试验次数的基础上探究影响 LRBL 结构抗爆性能的主要因素,并得出在研究范围内的因素最优水平组合。

2) 通过对仿真数据的极差分析和方差分析表明,炸药位置的影响最显著,是影响 LRBL 结构应变和变形的最主要因素;罐体壁厚和底盖厚度对 LRBL 结构有一定影响,而凸台厚度和剪切销直径对 LRBL 结构无显著影响。

3) 根据极差分析结果,本文 LRBL 结构影响因素的最优水平组合为 A4、B4、C3、D1、E1,即罐体壁厚 20 mm、底盖厚度 16 mm、凸台厚度 13 mm、销直径 10 mm、炸药位于罐体正中间的设计方案具备较好的抗爆性能。

参 考 文 献

- [1] Flight Safety Foundation. Aviation safe network[EB/OL]. [2023-01-06]. <http://www.aviation.safety.net>.
- [2] FAA. Security considerations requirements for transport category airplanes: FAR Part 25 Amendment No: 25-127[S]. United States: Federal Aviation Administration, 1965.
- [3] FAA. Least risk bomb location: AC No: 25.795-6[S]. Washington: Federal Aviation Administration, 1993.
- [4] 冯振宇,周书婷,李恒晖,等. 运输类飞机“最小风险炸弹位置”的研究进展[J]. 航空工程进展, 2018, 9(3): 316-325.
FENG Zhenyu, ZHOU Shuting, LI Henghui, et al. Research progress on the basic technologies of airworthiness verification of least risk bomb location [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(3): 316-325. (in Chinese)
- [5] ANDREW C, JAVID B. Analysis of a novel mobile aircraft explosive containment unit [C] // The 55th AIAA/ASME/ASCE/AHS/SC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Maryland, USA: AIAA, 2014: 1404-1414.
- [6] ZANGANI D, AMBROSETTI S, BOZZOLO A, et al. Textile-based luggage containers for onboard blast protection [J]. SAE International Journal of Aerospace, 2011, 4(2): 690-698.
- [7] ALESSANDRO B, APPOLONIA S. Advanced technologies for bomb-proof cargo containers and blast containment units for the retrofitting of passenger airplanes: FPT-AAT-2012-RTO-1[R]. London: CAA, 2015.
- [8] BURNS G N, BAYANDOR J. Analysis and modeling of explosive containment box for aircraft in-flight protection [C] // The 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando: AIAA, 2011: 802-811.
- [9] LANGDON G S, OZINSKY A, CHUNG K Y S. The response of partially confined right circular stainless steel cylinders to internal air blast loading[J]. Engineering Structures, 2014, 59: 113-126.
- [10] MA L, HU Y, ZHENG J Y, et al. Failure analysis for cylindrical explosion containment vessels[J]. Engineering Failure Analysis, 2010, 17(5): 1221-1229.
- [11] 苏培刚,陈剑平,殷国祥,等. 航空餐车内置式防爆罐抗爆性能的数值模拟[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(4): 460-464.
SU Peigang, CHEN Jianping, YIN Guoxiang, et al. Numerical simulation of blast resistant characteristics for the anti-explosion container built in airline cart [J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(4): 460-464. (in Chinese)
- [12] 程文强. 基于正交试验设计超燃燃烧室数值模拟[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2013.
CHENG Wenqiang. Numerical simulation of scramjet combustor based on the orthogonal experimental design [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2013. (in Chinese)
- [13] 杨世全,拜云山,郭锋,等. 基于正交试验方法的杆式射流成型和侵彻性能影响因素敏感性分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(11): 240-247, 261.
YANG Shiquan, BAI Yunshan, GUO Feng, et al. Sensitivity analysis of influencing factors of JPC forming and penetration performance based on orthogonal test method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(11): 240-247, 261. (in Chinese)
- [14] 钱小辉,马晓妍,秦中华,等. 基于正交试验的玻璃壳热应力影响因素分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(12): 91-98.
QIAN Xiaohui, MA Xiaoyan, QIN Zhonghua, et al. Analysis of glass shell's thermal stress based on orthogonal experiment [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(12): 91-98. (in Chinese)
- [15] 王瑞骏,李阳,丁占峰. 堆石料流变模型参数敏感性分析的正交试验法[J]. 水利学报, 2016, 47(2): 245-252.
WANG Ruijun, LI Yang, DING Zhanfeng, et al. Orthogonal experimental design of liquid-cooling structure on the cooling effect of a liquid-cooled battery thermal management system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(2): 245-252. (in Chinese)
- [16] DENG Y W, HAN D D, QIU A, et al. Quasi-static and dynamic loading responses and constitutive modeling of titanium alloys[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 132: 508-520.
- [17] 张镇洲. 复合结构防爆罐抗爆性能研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2020.
ZHANG Zhenzhou. Research on anti-explosion performance of composite structure explosion-proof tank [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2020. (in Chinese)

- [18] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
FANG Kaitai, MA Changxing. Orthogonal and homogeneous experimental design [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [19] 茆诗松, 王静龙, 史定华, 等. 统计手册[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
MAO Shisong, WANG Jinglong, SHI Dinghua, et al. Statistics handbook[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [20] 伍鹤皋, 于金弘, 石长征, 等. 基于正交试验法的埋地钢管参数敏感性分析[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(8): 97-103.
WU Hegao, YU Jinhong, SHI Changzheng, et al. Sensitivity analysis for parameters of buried steel pipes based on orthogonal test method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(8): 97-103. (in Chinese)
- [21] 徐博明. 爆炸作用下防爆墙破坏规律及防护效果的仿真研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2022.
XU Boming. Simulation study on the failure law and protection effect of blast under the action of explosion[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2022. (in Chinese)
- [22] 钟柏春. 环境腐蚀对等边角钢构件抗爆性能影响研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2018.
ZHONG Baichun. Research on influence of dynamic response of equilateral angle steel components under environmental corrosion [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [23] 冯蕴雯, 林心怡, 薛小锋, 等. 高可靠单向爆破的民机防爆结构设计研究[J/OL]. 航空学报: 1-14 [2023-03-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20230303.1610.010.html>.
FENG Yunwen, LIN Xinyi, XUE Xiaofeng, et al. Design and research of civil aircraft explosion-proof structure for high reliable one-way blasting[J/OL]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica: 1-14 [2023-03-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20230303.1610.010.html>. (in Chinese)
- [24] 刘季冬, 明瑞, 李湾, 等. 防爆门抗爆性能数值分析[J]. 金属世界, 2021(2): 59-69.
LIU Jidong, MING Rui, LI Wan, et al. Numerical analysis of anti-explosion performance of explosion door[J]. Metal World, 2021(2): 59-69. (in Chinese)
- [25] EAMON C D, BAYLOT J T, O'DANIEL J L. Modeling concrete masonry walls subjected to explosive loads [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(9): 1098-1106.
- [26] ZHU G, DING J G. Simulation study on blast resistance test of blast wall based on LS-DYNA coupling method [C]// 2021 the 5th International Conference on Civil and Environmental Engineering. USA: Science Publishing Group, 2021: 61-67.
- [27] SOUTIS C, MOHAMED G, HODZIC A. Multimaterial arbitrary-lagrangian-eulerian formulation for blast-induced fluid-structure interaction in fiber-metal laminates [J]. AIAA Journal, 2012, 50(9): 1826-1833.
- [28] 周琳. 金属材料新的动态本构模型[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
ZHOU Lin. A new dynamic constitutive model for metallic materials[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)
- [29] KHAN A S, SUH Y S, KAZMI R. Quasi-static and dynamic loading responses and constitutive modeling of titanium alloys [J]. International Journal of Plasticity, 2004, 20(12): 2233-2248.
- [30] MIRONO G, BARBAGALLO R, CORALLO D. A new yield criteria including the effect of lode angle and stress triaxiality [J]. Procedia Structural Integrity, 2016, 2: 3684-3696.
- [31] 李川平. Ti6Al4V 钛合金动态本构模型与高速切削有限元模拟研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.
LI Chuanping. The research on dynamic constitutive model of Ti6Al4V alloy material and finite element simulation of high-speed cutting [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [32] 郑金国, 周书婷, 解江, 等. 爆炸载荷作用下 2024-T3 铝合金板动态响应试验研究[J]. 装备制造技术, 2017(2): 127-130.
ZHENG Jinguo, ZHOU Shuting, XIE Jiang, et al. Experimental method for dynamic response of 2024-T3 aluminum alloy plate under load [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2017(2): 127-130. (in Chinese)
- [33] 解江, 姜超, 周书婷, 等. 近爆场下固支铝合金圆板的动态响应研究[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(12): 1222-1230.
XIE Jiang, JIANG Chao, ZHOU Shuting, et al. Dynamic response of fully clamped circular aluminum alloy plate subjected to near field explosion [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(12): 1222-1230. (in Chinese)
- [34] 罗兴柏, 张玉令, 丁玉奎, 等. 爆炸及其防护简明教程 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
LUO Xingbo, ZHANG Yuling, DING Yukui, et al. A brief tutorial on explosion and its protection [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [35] HENRYCH J, MAJOR R. The dynamics of explosion and its use [M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979.

(编辑: 马文静)