

文章编号: 1009-6094(2004)增刊-0168-05

民航客机防爆箱的研制*

陈力, 丁雁生

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 本文简介研制民航客舱防爆箱遇到的困难, 指出这是爆炸火球区内抗爆容器的设计问题。在实验和理论分析基础上, 就爆炸火球区内抗爆措施提出了建议并得到验证。

关键词: 抗爆容器; 爆炸火球; 民用航空

中图分类号: V268.6 **文献标识码:** A

0 引言

美国“911”事件之后, 世界各国都在努力加强航空保安工作。为了保证航空安全, 中国民航需要研制民航客舱防爆箱。

民航安技中心要求, 民航客舱防爆箱的大小形状与民航客舱的餐车相仿, 重量不超过 75 公斤, 200 克 TNT 当量的炸药在客舱防爆箱中心爆炸后, 要求防爆箱的两侧和上下四面没有碎片高速飞出伤及飞机和乘员, 同时防爆箱也不应整体快速运动。

试爆的防爆箱用民航客舱旧餐车改造而成。旧餐车内放置一胶囊, 胶囊一边有门, 目的是向某一个特定方向泄掉爆炸的载荷; 胶囊四周预制许多小孔, 以便泄放炸药爆炸后的高压产物; 防爆箱的两个门用两个直径为 20 mm 的圆钢箍紧, 目的是不让炸药爆炸后的高压产物将门炸开。爆炸实验药量为 180 克黑索金。爆炸的结果是防爆箱严重解体, 碎片四飞; 胶囊四周小孔的泄压效果不明显; 胶囊一侧炸破; 胶囊整体后座冲击, 移动至 4 米外(因爆炸洞内铁架的阻挡)停止。胶囊门内侧的爆后最大压力约为 5.5 MPa, 正压持续时间约 4 ms (图 1)。若把 5.5 MPa 视为空间均布的压力, 则作用在胶囊门上的总力最大时约 100 t, 质量 35 kg 胶囊的加速度最大时可达 $3 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。图 2 为爆炸后碎片堆积现场照片。

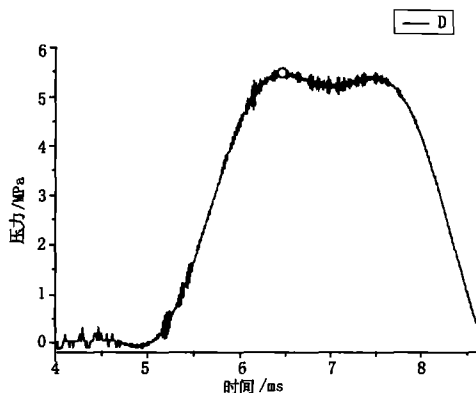


图 1 模拟实验中胶囊门附近的爆后压力

* 收稿日期: 2003-11-03

作者简介: 陈力, 男, 副研究员, 从事爆炸力学研究。

实验表明, 这样的防爆箱结构不足以耐受 200 克梯恩梯炸药的冲击, 其爆炸后果可能危及飞机和乘客的安全。分析原因, 寻找解决办法, 成为中国科学院力学研究所的工作。



图 2 爆炸实验后拾在一起的碎片

1 对关键问题的分析

放在餐车里的胶囊的容积约 147 L。

TNT 炸药的爆容为 730 L/kg。200 g 当量 TNT 爆炸产生的气体为 146 L, 与胶囊容积相当。如果爆炸气体无泄漏, 因化学反应升温, 胶囊内平衡后的平均气压约为 1 MPa。胶囊厚约 16 mm, 抗拉强度 2 MPa, 完全能承受 1 MPa 的压力。更何况胶囊壁上预制了几十个不到 10 mm 直径的泄气孔。

以上分析可能是原设计者的思路。但是, 炸药爆炸产生的是极强的瞬态载荷, 它对胶囊的作用不同于静态载荷。

设 TNT 炸药密度为 $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 200 g TNT 的体积为 125 mL。

若待试装药为集中药包, 200 g TNT 的特征尺度为 5 cm, 是胶囊宽的 1/5, 胶囊高或深的 1/16 到 1/15。在药包尺度的 10 到 15 倍之内是爆炸火球区, 空气激波与爆炸产物尚未分离。胶囊的窄面恰在火球区边界, 空气激波压力在 10~20 MPa, 空气激波速度 4~5 km; 胶囊的大面还在火球区内, 空气激波压力不到百兆帕, 空气激波速度略高于炸药爆速, 激波阵面气温近万 K。

空气激波参数见表 1。

表 1 空气激波参数

$\Delta p_m / \text{MPa}$	T / K	$u / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$D / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$
160	2.0×10^4	10.4	11.9
100	1.3×10^4	8.6	9.5
40	7000	5.2	5.8
20	5600	3.9	4.4

若炸药装药为薄板形, 例如厚 1 cm, 面积 125 cm^2 , 这时胶囊宽约为药厚的 25 倍, 胶囊侧壁可能处于火球边缘, 使得胶囊能承受这样的冲击载荷。但是, 使用防爆箱时不可能限定炸药装药为薄板形。

在集中药包的爆炸火球冲击下, 胶囊不可能发挥复合材料的综合效应, 其基体一橡胶将压碎、被反射稀疏波抛出, 增

强纤维可能被拉断抛出。一句话,胶囊会被炸出破洞。胶囊外的组装式铝合金餐车不可能抵抗一二十兆帕到近百兆帕的动压冲击,必然解体飞散。

这就是原设计达不到要求的原因。

2 解决办法和结果

民航客机防爆箱的设计,提出了一个在爆炸火球区内防爆的研究课题。要求设计在火球区内的抗爆容器,而且对重量、形状和泄爆空间均有苛刻限制。这确实是个难题,技术含量较高。

抵抗集中药包的最佳结构是球腔。如果球腔内径为半米,钢壁足够厚,有可能抗住200 g TNT药包的爆炸。但是民航方面告知,客机舱内不允许放这样一个钢球,要求在餐车框架内解决问题。

仔细分析防爆箱炸坏的情况,得到如下判断:(1)改进爆炸火球冲击性能,是改进防爆箱的头号技术关键。(2)防止胶囊的喷气推动,是改进防爆箱第二位的的技术关键。(3)胶囊没全坏,有相当好的抗爆性能,特别是能承受爆炸产物的后期冲击,但不能抵抗爆炸火球区冲击。胶囊优良的延伸性和抗拉强度,是它适用于火球区防爆的重要特性。改进的防爆箱应当趋利避害地继续使用胶囊。

为了研究爆炸火球区内防爆措施,用直径24 mm的薄壁钢容器做了一批实验(壁厚约为直径的1/30),寻找火球区抗爆的临界条件。部分实验条件和结果见下表2。

表2 部分实验条件及结果

序号	RDX 含量/g	L/ϕ	常压容器(ϕ 24 cm)	真空容器(ϕ 24 cm)
1	100	4.4	破碎	破碎
2	20	7.6	环胀 $\epsilon_{\theta} \sim 1.4\%$	无塑性变形
3	40	6		环胀 $\epsilon_{\theta} \sim 5.9\%$
4	50	5.6		环胀 $\epsilon_{\theta} \sim 8.7\%$
5	67	5.1		撕裂
6	67	5.1	撕裂(浮盖 900 g)	
7	67	5.1	撕裂(浮盖 85 g)	
8	67	5.1	环胀 $\epsilon_{\theta} \sim 18\%$ (无盖)	

* 塑性炸药:组分为RDX/环氧树脂/机油 1/0.25/0.015,密度 $\sim 1.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

+ L 为腔体尺度; ϕ 为炸药特征尺度。

从实验现象看,薄壁金属容器的爆炸破坏有两类。一是冲击作用下容器壳体瞬间破碎,产生大量碎片,断口近 45° 角,材料呈剪切破坏。不论是否真空,只要腔体尺度 L 相对炸药特征尺度 $\phi = \left(\frac{M_c}{\rho_c}\right)^{1/3}$ 足够小,均发生这类冲击破坏(上表实验1, $L/\phi \sim 4.4$)。二是容器膨胀到一定程度发生撕裂,破片尺度相当大,断口也近 45° 角,材料呈剪切流动破坏。不论是否真空,只要腔体尺度与炸药特征尺度比适中,均会发生这类膨胀破坏(上表实验5、6、7, $L/\phi \sim 5.1$)。

随腔体尺度渐增,可见容器膨胀程度逐渐下降直到塑性变形消失。实验表明,只要腔体尺度相对炸药特征尺度足够大,容器不再破坏(上表实验2、3、4, $L/\phi > 5.6$)。

对比实验2中有无真空的结果,可知抽真空利于火球区抗爆。

设计和使用抗爆容器,希望出现的是,在较大药量条件下抗爆容器发生塑性变形而不破坏。因此,寻找抗爆容器由撕裂转入塑性变形阶段的条件,成为技术关键。由上表可见,序号5的实验给出了恰使特定密闭钢容器撕裂的条件:约含67 g RDX的塑性炸药, $L/\phi \sim 5.1$ 。

在这个药量下调整密封盖,观察溢盖泄压的效果。如序号6至8的实验所示,常压容器,质量900 g的钢盖和质量85 g的聚氨酯盖浮盖容器口,照样撕裂;不加盖 ϕ 24 cm的容器口敞开,爆炸后环向应变($\epsilon_{\theta} \sim 18\%$,容器壁出现一条局部裂纹,没有撕裂。这三个实验表明,对于火球区防爆,容器大敞口才能有效泄爆。

爆后的产物运动属于黎曼波,其压力骤降,质点速度激增。对于空气,界面处爆炸产物压力不到100 MPa,质点速度略超爆速;对于真空,界面处爆炸产物压力趋向零(密度极低),质点速度接近两倍爆速。炸药量相同时,两者的总能量相同,但对壳体冲击的规律不尽相同。空气中爆炸,强激波作用于壳体,前沿极陡;真空中爆炸,爆炸产物前沿密度极低,速度极高,对壳体的冲击有一个取决于黎曼波宽度的上升过程,冲击前沿在一定条件下没有强激波陡峭。真空爆炸时泄爆,不可能影响火球冲击前沿,但可能影响“后沿”。如果黎曼波已经展得足够宽,泄爆可能削掉火球对壳体冲击的高峰。

根据上述实验和分析,采取如下措施改进抗爆炸火球冲击性能:在防爆箱外侧加适当厚的水层吸收并分散冲击能;抽真空,用大口径轻质门泄爆。

另外,对称设置两个泄爆门,防止胶囊发生喷气推动。

采取上述措施改进防爆箱,爆炸后效果较为理想,防爆箱没有解体,其两侧和上下四面无任何碎片,爆炸后防爆箱原地不动,无任何整体运动(图3),两个轻质门破成碎块。

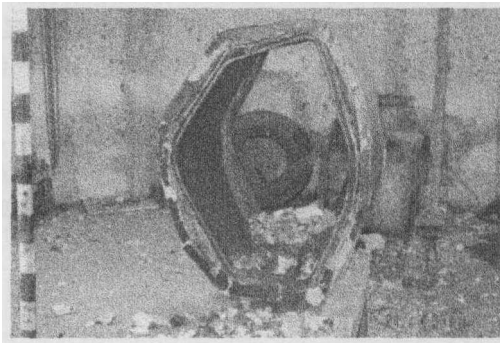


图3 采取改进措施后,爆炸变形的防爆箱

3 结语

餐车型民航客机客舱防爆箱是一种爆炸火球区内抗爆容器。它面临爆炸火球的强冲击,设计时可以采用外置水层吸收和分散激波能量、内抽真空消除激波、大口径泄爆、高性能材料缓冲等技术。实验表明,综合使用这些技术措施,可以收到良好效果。