

外来物损伤条件下航空轮胎爆破碎片产生机理及速度分析

白杰^{1,2}, 董兴普¹, 王伟^{1,2}

(1. 中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300; 2. 中国民航大学 适航审定技术研究与管理中心, 天津 300300)

摘要:以外来物损伤条件下的轮胎爆破为例, 研究航空轮胎碎片的形成过程。利用压力容器爆炸模型建立轮胎碎片速度计算数学模型, 采用热力学方程和力矩方程确定碎片的偏离角和散射角方程, 再根据材料断裂准则得到碎片速度函数。

关键词: 航空轮胎; 爆破; 碎片; 散射角; 速度

中图分类号: TQ336.1+1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2011)11-0658-04

航空轮胎爆破可能产生各种形状、尺寸和质量并以不同速度飞行的碎片。轮胎碎片的这些特性称为碎片散射特性。碎片的散射特性不仅决定了碎片可能的影响范围, 还可以用来评估碎片对影响范围内人员和设施的危害。

由于轮胎爆破后碎片散射特性的不确定性, 目前对轮胎碎片危害性的研究很少, 缺乏描述碎片散射特性的数学模型。本研究首先分析外来物损伤条件下航空轮胎爆破产生碎片的过程, 然后根据压力容器爆炸形成碎片与航空轮胎爆破形成碎片过程的相似性, 建立轮胎碎片速度计算数学模型, 确定轮胎碎片散射角方程以及碎片速度。

1 外来物损伤条件下航空轮胎爆破碎片产生机理

假设航空轮胎碾压到外来物发生爆破而形成碎片的条件是轮胎先在外来载荷作用下产生应力集中, 应力集中处在轮胎爆破载荷的作用下形成垂直于轮胎帘线方向的裂纹 a 和沿轮胎帘线方向的裂纹 l_0 ; 由于帘线刚性较大, 因此垂直于帘线方向的裂纹 a 不易扩展, 而轮胎沿帘线方向较容易撕裂, 裂纹 l_0 容易沿帘线方向继续扩展; 最后在

轮胎爆炸载荷作用下, 轮胎碎片连接端断裂, 形成碎片, 如图 1 所示。裂纹 a 的长度可近似看作切割轮胎帘线的外来物的尺寸, 裂纹 l 的长度可由橡胶材料的裂纹扩展速度函数确定^[1]。

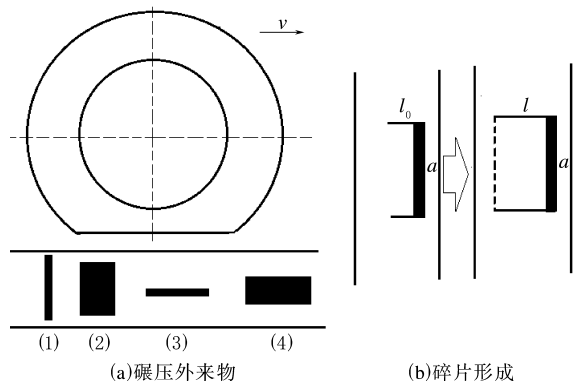


图 1 航空轮胎碾压到外来物导致爆破后碎片的形成过程示意

由上述分析可知: 图 1(a) 中轮胎碾压过外来物(1)和(2)时, 更倾向于形成沿帘线方向的裂纹, 但是不容易形成较大碎片, 尤其在碾压到(1)时; 当轮胎碾压到外来物(3)和(4)时, 更倾向形成垂直于帘线方向的裂纹, 容易产生较大碎片, 尤其在碾压到外来物(4)时。

沿帘线方向和垂直于帘线方向的裂纹都不可能是理想的直线。假设产生应力集中的外来物形状是长方形, 裂纹 a 可以近似看作垂直于帘线方向的直线; 前面分析了裂纹沿帘线方向的扩展, 再

基金项目: 民航科技项目(MHRD200810); 中国民航大学科研启动基金资助项目(08QD15X)

作者简介: 白杰(1963—), 男, 天津人, 中国民航大学教授, 硕士, 主要从事航空器/航空发动机适航审定技术研究工作。

考虑到橡胶与帘线的脱粘,因此裂纹 l 也可以近似看作直线。考虑到两条沿帘线方向扩展的裂纹处材料受爆炸载荷相差不大,因此认为两条裂纹扩展长度均为 l 。

轮胎碾压过图 1(a)中外来物(3)时,会在爆炸载荷作用下形成图 1(b)所示的裂纹(实线),裂纹会在爆炸载荷的作用下继续扩展,直至产生碎片。最后在轮胎内部压力作用下断裂的裂纹近似垂直于帘线方向,且平行于裂纹 a (虚线)。轮胎碎片质量可近似看作图 1(b)所示长方形裂纹围成面积内的质量。

2 航空轮胎爆破碎片的速度计算数学模型

A. M. Bartenev 等^[2]在研究压力容器爆炸形成的圆形碎片速度时,把压力容器的爆炸过程分为如图 2(a)所示的两个阶段:

(1)材料在容器内高压气体作用下沿圆形碎片圆周方向断裂,并形成长度为 s 的连接端;

(2)碎片在压力容器内气体冲击力的作用下,连接端断裂,碎片飞出。

从上述分析可知,由于外来物损伤轮胎而导致轮胎爆破直至最后产生轮胎碎片与压力容器爆炸直至形成碎片的情况相似,如图 2(b)所示。在这里, s 与图中的 a (虚线)均表示连接端。

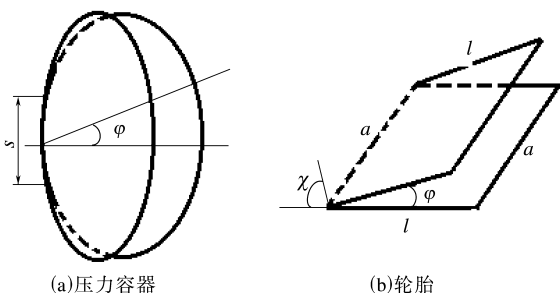


图 2 轮胎与压力容器碎片形成过程比较

两者不同之处除了形成碎片的形状不同外,主要是压力容器材料多为刚性材料,而轮胎碎片因包含有橡胶材料,不可避免地会在气体压力作用下发生弹性形变。考虑到轮胎是由橡胶/帘线复合材料构成的,并且其中的帘线材料刚性较大;另外,由于轮胎内部压力相对压力容器的压力小得多,因此可忽略轮胎碎片在分离轮胎瞬间的弯曲变形。

在轮胎碎片与轮胎分离的过程中,气体通过碎片与胎体的缝隙向外膨胀,使轮胎表面受到的气体压力 $[P(t), t$ 为时间] 发生变化。轮胎碎片离开轮胎的运动过程可看作物理摆运动过程,如图 2(b)所示。

根据力矩和转动惯量公式,碎片运动方程(假设轮胎内部各处压力是均匀分布的)为

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{3}{2}a[P(t) - P_1]M^{-1} \quad (1)$$

式中, φ 为碎片偏离初始位置的角度,即碎片偏离角; P_1 为大气压; M 为碎片质量, $M = \rho alh$, ρ 为密度, h 为碎片高度。

由于碎片形成过程非常短,因此碎片与轮胎分离过程中碎片所受重力和空气阻力可以忽略不计,并且气体向外膨胀的过程可以认为是绝热膨胀过程。气体状态方程和绝热方程分别为

$$P(t)V(t) = m(t)RT(t) \quad (2)$$

$$P(t)[V(t)/m(t)]^\gamma = C \quad (3)$$

式中, V 和 m 分别为轮胎中气体的体积和质量, R 为气体常数, T 为热力学温度, γ 为比热率, C 为常数。

考虑气体从轮胎中以临界速度膨胀出来的情况,轮胎中气体质量随时间的变化可表示为

$$\frac{dm}{dt} = -l(a+l)\varphi(t)\rho^*(t)a^*(t) \quad (4)$$

其中

$$\rho^*(t) = \rho(t)n^{1/(\gamma-1)}$$

$$a^*(t) = a(t)n^{1/2}$$

$$n = 2/(\gamma+1)$$

式中, ρ^* 和 a^* 分别为气体的临界密度和临界声速, n 为计算常数。

根据式(2),(3)和(4)可以得到:

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{Pal\gamma}{V} \left\{ \frac{a+l}{a} \varphi(t) n^{1/n(\gamma-1)} \cdot a_0 \left[\frac{P(t)}{P(0)} \right]^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} + \frac{l}{2} \frac{d\varphi}{dt} \right\} \quad (5)$$

其中

$$P(0) = P_0$$

$$V(t) = V_0 + \frac{1}{2}al^2\varphi(t)$$

$$a_0 = a(0)$$

令 $p = P(t)/P(0)$, 式(5)可化简为

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{pal\gamma}{V_0 + \frac{a}{2}l^2\varphi(t)} \left[\frac{a+l}{a} \varphi(t) n^{1/n(\gamma-1)} \cdot \right]$$

$$a_0 p^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} + \frac{l}{2} \frac{d\varphi}{dt} \quad (6)$$

因为 $P_0 \gg P_1$, 碎片运动方程(1)可化简为

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{3}{2} a p P(0) M^{-1} \quad (7)$$

其中 $P(0) = 1$

式(6)和(7)联立, 得到碎片偏离角方程:

$$\frac{d^3\varphi}{dt^3} (V_0 + \frac{a}{2} l^2 \varphi) = K_1 \varphi (\frac{d^2\varphi}{dt^2})^{\frac{3\gamma-1}{2\gamma}} + K_2 \frac{d\varphi}{dt} \frac{d^2\varphi}{dt^2} \quad (8)$$

其中

$$K_1 = -a l \gamma \left[\frac{a+l}{a} n^{1/n(\gamma-1)} a_0 \left(\frac{3}{2} a P_0 M^{-1} \right)^{-\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \right]$$

$$K_2 = -\frac{a l^2 \gamma}{2}$$

方程(8)的边界条件为

$$\varphi(0) = \frac{d\varphi(0)}{dt} = 0$$

$$\frac{d^2\varphi(0)}{dt^2} = \frac{3}{2} a P_0 M^{-1}$$

$$\frac{d^3\varphi(0)}{dt^3} = 0$$

可以在 MATLAB 软件中利用 Runge-Kutta 方法求解方程(8)。

在碎片连接端断裂瞬间, 认为作用在碎片上的轮胎气体压力降至大气压, 碎片受力为零。此时, $P(t_{\max}) \varphi(t_{\max}) = P_1$, 可利用式(6)确定 $t_{\max}$ 。碎片与轮胎分离后, 轮胎连接端对碎片的作用力视为零时, 碎片的散射角(χ)为

$$\chi = \frac{\pi}{2} - \varphi(t_{\max})$$

当气体对碎片的冲击强度超过材料的许用强度(σ)时, 碎片与轮胎连接端会断裂。裂纹分离时, 垂直于碎片平面的合力降为零, 根据材料断裂准则:

$$\frac{Ml}{2} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \geq \sigma a h \quad (9)$$

材料断裂时碎片在气体作用下偏离, 此时

$$-P_0 a l + 2(a+l) h \sigma = 0 \quad (10)$$

碎片的抛射角速度(ω)为

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \left[\frac{P_0 a^2}{(a+l)M} \right]^{1/2} \quad (11)$$

碎片的抛射速度(v)为

$$v \approx \frac{l}{2} \omega \approx \frac{1}{2} \left[\frac{P_0 a^2 l^2}{(a+l)M} \right]^{1/2} \quad (12)$$

碎片抛射瞬间的能量即碎片的动能(W)为

$$W = \frac{1}{2} M v^2 = \frac{P_0 a^2 l^2}{8(a+l)} \quad (13)$$

3 结论

(1) 提出航空轮胎碾压到外来物发生爆破而形成碎片的条件: 轮胎先在外部载荷作用下产生应力集中, 应力集中处在轮胎爆破载荷的作用下形成垂直于轮胎帘线方向和沿帘线方向的裂纹; 由于帘线刚性较大, 垂直于帘线方向的裂纹不易扩展, 而沿帘线方向的裂纹容易沿帘线方向继续扩展; 最后在轮胎爆炸载荷作用下, 轮胎碎片连接端断裂, 形成碎片。

(2) 根据航空轮胎爆破产生碎片与压力容器爆炸条件下形成碎片过程的相似性, 建立轮胎碎片速度计算数学模型。根据热力学和力学相关原理确定碎片的偏离角函数及其边界条件, 同时得到碎片的散射角, 然后根据材料断裂力学准则确定碎片的速度函数, 最后得到碎片的能量表达式。

参考文献:

- [1] 张士齐, 贾红兵. 论轮胎结构设计中材料力学的局限与断裂力学的发展[J]. 橡胶工业, 1997, 44(9): 546-551.
- [1] Bartenev A M, Gelfand B E, Medvedev S P, et al. Kinematics of Fragments from Disintegrating Pressure Vessels[J]. Fluid Dynamics, 1988, 23(6): 874-878.

收稿日期: 2011-05-13

Formation Mechanism and Speed of Aircraft Tire Burst Debris under FOD

BAI Jie, DONG Xing-pu, WANG Wei

(Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Aircraft tire burst under FOD (foreign object damage) was shown to illustrate the for-

mation process of debris. Based on the pressure vessel explosion model, the mathematical model of tire debris speed was established. Thermodynamic equation, moment equation and dynamic fracture criteria were used to confirm deflection angle, scattering angle and debris speed.

Key words: aircraft tire; burst; debris; scattering angle; speed

2011 胶管胶带信息与技术国际论坛 在大连召开

中图分类号: TQ336.2 文献标志码: D

2011 年 9 月 20—23 日, 由中国橡胶工业协会胶管胶带分会主办、阜新环宇橡胶(集团)有限公司承办的 2011 胶管胶带信息与技术国际论坛在辽宁省大连市召开。来自胶管胶带生产企业、相关原材料和设备生产企业以及科研机构的 200 余位代表出席了论坛。

此次论坛主题为“节能、环保、绿色发展, 高效、创新、科技进步”, 旨在促进我国胶管胶带行业技术进步和结构升级。中国橡胶工业协会会长范仁德出席论坛并介绍了建设世界橡胶工业强国的战略措施。他指出, 我国橡胶工业正面临自身经济发展转型和外部市场环境复杂多变的双重考验, “十二五”期间将是中国橡胶工业发展面临更大挑战的 5 年, 也是中国由世界橡胶工业大国向强国转变的关键时期。为了实现橡胶工业强国目标, 我国橡胶行业将实施新材料发展战略、多元化市场战略、低碳经济战略、循环经济战略、橡胶产品名牌战略、现代营销模式战略、循环经济战略、现代企业管理战略、技术创新战略和人才战略。

中国橡胶工业协会常务副秘书长徐文英介绍了 2010—2011 年我国胶管和输送带产品进出口情况。2010 年, 我国输送带产品出口出现增长, 其中钢丝绳芯输送带出口增幅最大, 纯胶管、钢丝胶管和纤维胶管出口增长; 织物芯输送带进口大幅度下降, 钢丝绳芯输送带进口略有增长, 各类型胶管进口都出现增长。2011 年 1—6 月, 我国输送带产品出口形势良好, 出口价格有所提高, 胶管出口也有所增长, 但增速趋缓; 织物芯输送带进口继续下降, 各类输送带产品进口价格有所降低, 除不带附件的纯胶管外, 其他各类胶管进口均有所

增长。我国输送带和胶管产品出口量远大于进口量, 但出口产品价格远低于进口产品, 因此我国胶管胶带生产企业需大力提高产品技术附加值, 提升国际竞争力。

出席论坛的有关方面代表还对胶管胶带相关新材料、新设备和新工艺的发展及应用进行了交流, 部分胶管胶带生产企业介绍了先进的管理经验和企业文化。

我国胶管胶带行业存在技术和管理相对落后、科研投入不足、产品同质化严重以及高精尖产品匮乏等问题, 今后应着力加大科研投入, 加强管理, 强化上下游企业信息交流, 注重新材料和新技术的应用, 努力使我国早日成为橡胶工业强国。

(本刊编辑部 葛 南)

一种直拌橡胶沥青混合料及其生产方法

中图分类号: TQ321.3 文献标志码: D

由周其强申请的专利(公开号 CN 101798203A, 公开日期 2010-08-11)“一种直拌橡胶沥青混合料及其生产方法”, 涉及的橡胶沥青混合料配方组分质量比为级配石料: 石油基质沥青: 胶粉改性剂为 $(89 \sim 94) : (4 \sim 6) : (2 \sim 5)$, 其中胶粉改性剂各组分质量比为胶粉: 己二醇为 $100 : (3 \sim 7)$ 。混合料制备方法为: 将己二醇按比例掺入废轮胎胶粉中, 拌和润湿得胶粉改性剂; 将矿料加热至 $210 \sim 220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后同时向矿料中加入胶粉改性剂和石油基质沥青, 拌合 $40 \sim 60\text{ s}$, 即得混合料。该方法无需将胶粉与石料进行预拌, 方法简单, 可以实现“胶变油”, 混合料的油石比可降低为 $6 \sim 8$ 。采用该方法生产的直拌橡胶沥青混合料各项技术指标均明显高于行业标准, 可用于公路施工和屋面隧道防水防漏等。

(本刊编辑部 马 晓)