

# 汽车侧气囊动态冲击试验仿真

任忠波<sup>1</sup>, 钟 原<sup>2</sup>, 刘 军<sup>1\*</sup>, 吴 鑫<sup>1</sup>, 党雪芒<sup>1</sup>

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 中国汽车技术研究中心, 天津 300300)

**摘要:** 通过侧安全气囊的动态冲击试验, 优化了仿真模型的参数, 并在此基础上讨论了不同速度和不同气孔参数情况下, 侧安全气囊对乘员的保护性能. 使用 LS-DYNA 提供的 Hybrid 模型模拟侧气囊的点爆, 分析了气囊排气孔的气体流动数学模型, 也对冲击槌与气囊的冲击模型进行了介绍. 试验与仿真结果数据对比后表明, 在一定碰撞速度范围内, 侧气囊具有良好的保护作用, 并且气孔对侧气囊有相关影响.

**关键词:** 有限元方法; 侧气囊; 动态冲击试验; 控制体积法

中图分类号: U491.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2016) 02-0077-04

汽车安全事故频发的今天, 如何有效发挥汽车安全系统对乘员的保护受到了更多重视. 随着计算机辅助工程的发展, 它能有效缩短汽车被动安全的开发周期, 在乘员约束系统的开发中也有非常重要的作用. 在安全气囊开发及仿真研究中, 需通过一系列试验确定安全气囊的相关参数, 例如气体发生器的质量流量和安全气囊的泄气效率等. 笔者以某型号侧气囊为例, 模拟该型号侧气囊的动态冲击试验, 将仿真结果与试验结果对比分析; 并使用 Hyperwork、Oasys Primer 等建立有限元模型, 利用 LS-DYNA 的 CV 算法模拟侧气囊的点爆, 接触算法模拟冲击槌与侧气囊的作用.

## 1 理论基础

### 1.1 气囊算法

目前气囊算法主要分为控制体积法(Control Volume Method, CV)、计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)和近年来研究比较广泛的粒子法(Corpuscular Method, CPM), 综合比较针对离位乘员(Out-of-Position, OOP)的情况, 选择计算流体力学和粒子算法能更真实地模拟出气囊对人体的损伤情况. 而针对一般工程应用而言, CV 算法更为成熟有效<sup>[1-3]</sup>. 控制体积法假设气囊内部的气

体为理想气体, 且压力和温度分布均匀. 1988 年, Wang 和 Nefske 开发了通用的安全气囊模型, 可以模拟气囊展开过程和对乘员的平均作用, 为 CV 方法奠定了理论基础.

控制体积定义为由控制表面包围的体积, 例如组成安全气囊织物材料的壳或膜单元. 在每个时间步长内, 气囊织物单元的位置、方向和表面积都可以计算出来, 因此可以利用单元的这些特性计算出气囊的控制体积<sup>[2]</sup>. 气囊被控制的表面和被控制的体积可通过格林定理联系起来:

$$\iiint_V \phi \frac{\partial \psi}{\partial x} dx dy dz = - \iiint_V \psi \frac{\partial \phi}{\partial x} dx dy dz + \oint_S \phi \psi n_x \Gamma \approx \sum_{i=1}^N \bar{x}_i n_{ix} A_i, \quad (1)$$

式中, 前 2 个积分是在封闭空间上的积分, 也就是  $dv = dx dy dz$ , 最后 1 个积分组成了封闭空间表面上的积分,  $n_x$  是表面法线与  $x$  轴夹角的余弦. 同理, 在  $y$  和  $z$  方向也写成了相似的形式. 通过选择任意函数  $\phi = 1$  和  $\psi = 1$ , 并将表面积分组成气囊的单元来估算. 其中, 对于每个单元  $i$  而言,  $\bar{x}_i$  为  $x$  坐标的平均值,  $n_{ix}$  为单元法矢量与  $x$  轴夹角的余弦,  $A_i$  为单元的表面积.

### 1.2 气囊泄气原理

通常情况下, 气囊织布厚度在 0.3 mm 左右, 则

收稿日期: 2014-09-16.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(11372148); 浙江省新苗人才计划(A00161114200).

第一作者: 任忠波(1988—), 男, 黑龙江牡丹江人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 气囊及乘员约束系统. E-mail: rentony@hotmail.com

\*通信作者: 刘军(1963—), 男, 江苏苏州人, 副教授, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: liujun@nbu.edu.cn

可将排气孔周围流体流动的形式简化成图 1, 流体流过压力不相等的薄壁孔, 其数学模型为(2)式<sup>[4-5]</sup>. 气囊的点爆过程相当于一次爆炸过程, 由于气囊完全充满时间大致为 20 ms 左右, 而泄气过程大概持续 0.1 s 左右, 且安全气囊要承担对人体冲击的缓冲作用, 并吸收人体因碰撞而获得的动能, 因此在此极短时间内气囊内外的压力差是相当大的.

$$\dot{m} = C_d A P_{\text{down}} \left( \frac{2}{RT} \right) (\gamma / (\gamma - 1)) (P_{\text{up}} / P_{\text{down}})^{(\gamma-1)/\gamma} / (1 + (P_{\text{down}} / P_{\text{up}})^{(\gamma-1)/\gamma})^{1/2}, \quad (2)$$

式中,  $C_d$  是跟气体流速有关的参数;  $A$  为气孔的面积;  $d$  为气孔直径;  $P_{\text{up}}$  为气囊内部压力;  $P_{\text{down}}$  为气囊外部压力;  $\gamma$  为气体热容系数.

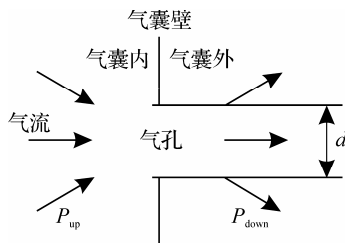


图1 泄气孔结构

由于(2)式考虑的只是理想情况下流体流过薄壁孔的数学模型, 而在实际情况中随着安全气囊的充气 and 泄气气囊内部的压力是随着时间变化的, 因此, (2)式并不能完全胜任安全气囊的泄气模型. 在 LS-DYNA 提供了多种泄气方程中, 在不考虑气孔受阻的情况下, Wang-Nefske 泄气模型完善了(2)式, 并增加了多重的影响因素, 如气体流速也会因气囊泄气而随时间变化. 图2为应用 Hybrid 模型中气囊充气于泄气的结构示意图<sup>[6]</sup>, 其中气体从织布泄气方式可以看作是有很多个微小的泄气孔在泄气, 因此同样可以应用(2)式的模型.

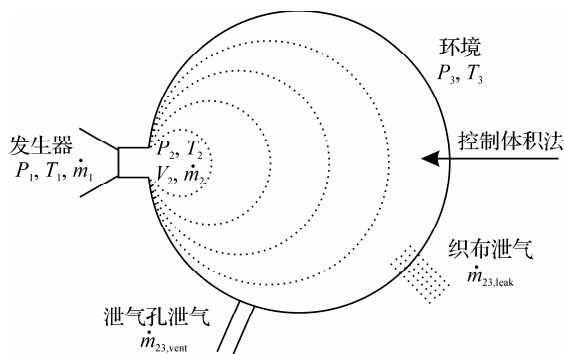


图2 气囊充气与泄气结构

气囊压力关系为  $Q = p_3 / p_2$ , 其中,  $p_3$  为气囊

外部压力,  $p_2$  为气囊内部压力. 临界压力关系为  $Q_{\text{crit}} = (2 / (k + 1))^{k / (k - 1)}$ , 其中,  $k$  为热容比,  $k = c_p / c_v$ .

Wang 和 Nefske 定义的气体从气孔和织布泄漏的流量为:

$$\dot{m}_{23} = C_{23} A_{23} \frac{P}{R \sqrt{T_2}} Q^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{2 g_c \left( \frac{\gamma R}{\gamma - 1} \right) \left( 1 - Q^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)}, \quad (3)$$

$$\dot{m}'_{23} = C'_{23} A'_{23} \frac{P}{R \sqrt{T_2}} Q^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{2 g_c \left( \frac{\gamma R}{\gamma - 1} \right) \left( 1 - Q^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)}, \quad (4)$$

式中,  $C_{23}$ 、 $A_{23}$ 、 $C'_{23}$ 、 $A'_{23}$ 、 $R$  和  $g_c$  分别为排气口系数、排气口面积、泄气系数、泄气面积和气体常数. 则气囊单位时间内总泄气量为  $\dot{m}_{\text{out}} = \dot{m}_{23} + \dot{m}'_{23}$ .

## 2 建模方法

侧气囊一般由左右 2 片织布组成, 其形式有多种, 根据保护区域范围可分为胸部气囊、头胸一体式气囊和胸腹一体式气囊. 本文以胸腹一体式气囊为例, 该类型气囊的特点是体积大, 可以同时为胸部、腹部和骨盆提供保护作用, 侧气囊配合侧气帘能够起到更好的保护作用.

侧气囊划分方法有多种, 为避免在折叠过程中网格穿透以及保持气囊网格形态, 将侧气囊网格以边长为 10 的正方形划分. 如图 3 所示, 首先根据 SAB 的几何轮廓划分一定区域的网格, 然后将临近边界的点投影到边界上, 修剪边缘不贴合网格, 直至最终生成完整的侧气囊网格. 将划分好的侧气囊网格导入 Oasys Primer 中进行折叠.

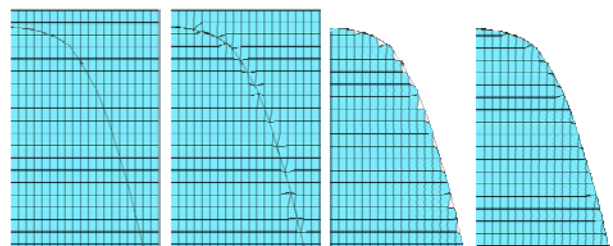


图3 网格划分

## 3 动态冲击试验

图 4 为侧气囊动态冲击试验的数学结构模型, 图中冲击槌的质量为  $M$ , 冲击槌距刚性墙的距离为  $d$ , 虚线内为侧气囊, 将其视为弹簧阻尼系统, 阻尼系数为  $C$ , 弹簧系数为  $k$ .

冲击槌与气囊碰撞的过程应分为 2 个阶段, 前

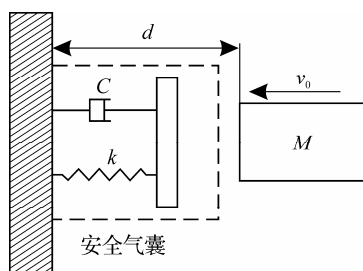


图4 动态冲击数学模型

一阶段为冲击槌与气囊的碰撞接触, 后一阶段为冲击槌与气囊接触后, 气囊对冲击槌起阻尼作用. 冲击槌与气囊的接触过程属于冲击动力学问题<sup>[7]</sup>, 但由于气囊本身材质非常柔软, 且内部充有可压缩气体, 其冲击效应并不明显. 设冲击槌与气囊充分接触后的位移为  $x$ , 由于气囊一直在泄气, 因此阻尼系数  $C$  和弹簧系数  $k$  都随时间变化:  $m\ddot{x} + c_t\dot{x} + k_t x = 0$ , 解方程得  $x = e^{\gamma t}$ , 其中,  $\gamma$  为参数(一般为复数).  $\gamma$  的特征方程为  $\gamma^2 + 2\zeta\omega_n\gamma + \omega_n^2 = 0$ , 其中,  $\omega_n = \sqrt{k_t/m}$ ,  $\zeta = c_t/(2\sqrt{k_t m})$ , 并解得  $\gamma = \omega_n(-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1})$ .

试验环境为标准气压常温, 侧气囊气体质量流量曲线如图5所示, 以C-NCAP法规为基础, 侧面  $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  碰撞过程中乘员胸部与入侵车门及B柱内饰间的相对速度大致为  $4.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 简化胸部与侧气囊间的相对运动, 将冲击槌比作乘员胸部, 并将动态冲击试验冲击槌速度设置为  $v_0 = 4.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

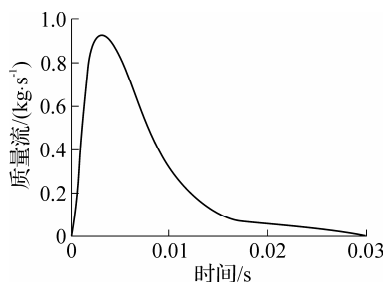


图5 气体流量曲线

将建好的模型提交LS-DYNA计算, 得到计算与试验结果如图6所示, 图中分别为仿真与试验冲击槌的加速度、速度、位移和能量曲线. 根据试验结果可知气囊与落槌接触时刻为  $30 \text{ ms}$ , 在  $80 \text{ ms}$  时基本完成泄气, 冲击槌位移保持不变速度为零, 从而可以说明该型号侧气囊实现了对冲击槌的缓冲作用, 吸收了冲击槌的动能. 在  $30\sim 80 \text{ ms}$  区间的图6中, 各对应曲线基本拟合, 说明动态冲击仿真

试验基本实现了对侧气囊动态特性的模拟. 前  $30 \text{ ms}$  中, 加速度与能量曲线偏差较大, 这是由于冲击槌没有与气囊充分接触; 而  $80 \text{ ms}$  开始, 图中各曲线都开始出现偏差是由于气囊基本完成泄气.

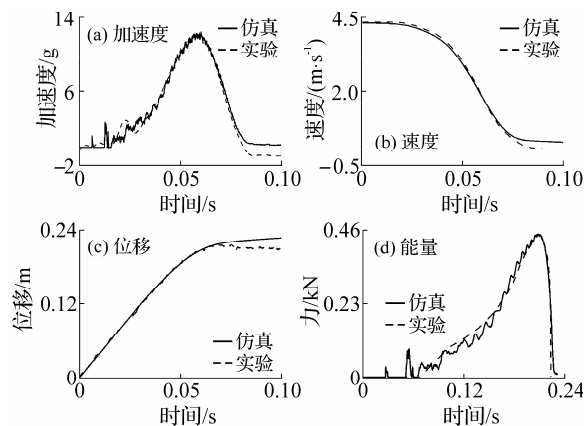


图6 试验与仿真结果对比

获得气囊的泄气特性后, 将冲击槌速度分别设置成  $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $3.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 重复上述试验, 得到结果如图7所示. ORI 曲线是碰撞初速度为  $4.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的仿真结果, B2 曲线是碰撞速度为  $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的仿真结果, B1 曲线是碰撞速度为  $3.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的仿真结果. 撞击速度越高冲击槌与气囊之间的压力越大, 在撞击瞬间气囊内部的压力也越大, 根据(3)式和(4)式可知, 气囊内部压力越大, 从泄气孔和织布泄漏的气体越多. 图7结果表明, 侧面碰撞过程中, 气囊起作用的  $100 \text{ ms}$  不足以泄漏更多气体, 因此可以得出普通侧气囊对于  $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  以下的侧面碰撞中可以起到非常好的保护作用.

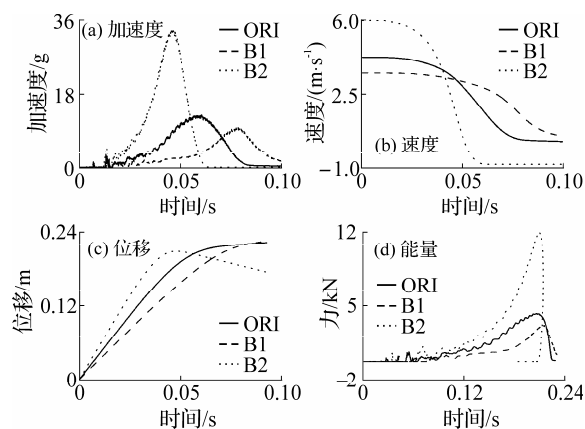


图7 试验与仿真结果对比

调整气囊泄气孔大小, 气孔分别扩大和缩小  $50 \text{ mm}^2$ , 以  $4.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  速度撞击, 得到结果如图8所

示. 图中, ORI 曲线是气孔为正常值的仿真结果, A2 曲线是气孔扩大后的仿真结果, A1 曲线是气孔缩小后的仿真结果. 根据(3)式和(4)式气孔的放大和缩小可直接影响气体从气囊中流出的量. 气体发生器、气囊容积和排气孔匹配直接影响侧气囊在侧碰中乘员的保护程度, 图 8 表明, 在碰撞速度相同情况下, 气孔越大气体排出越快, 在碰撞后期冲击槌依然具有一定速度, 而此时气囊已经没有气体, 在侧面碰撞中人体容易受到冲击. 将气孔适当缩小, 冲击槌的加速度增加了 4%, 其最终使冲击槌静止, 结果相对于气孔为初始情况较为理想.

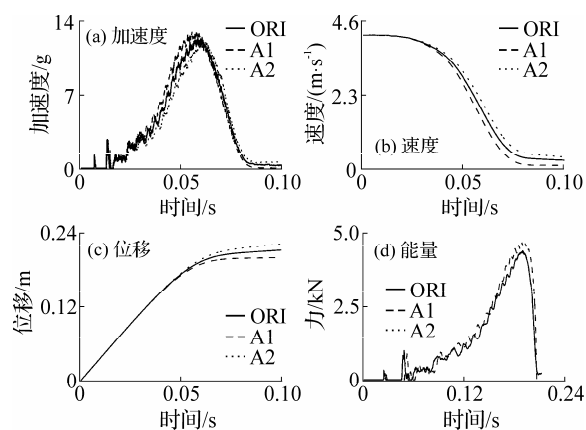


图 8 试验与仿真结果对比

#### 4 结论

通过仿真与试验结果对比可以得出, 在 30~80 ms 时间内仿真与试验结果基本一致, 在其他时间

内有一定偏差, 其造成原因是由于气囊与冲击槌未充分接触和完全泄气造成, 而在冲击槌与气囊有效接触的时间内, 动态冲击试验基本实现了气囊对冲击槌的缓冲作用, 吸收了冲击槌的动能. 说明模拟动态冲击仿真试验, 可以确定侧气囊的各项泄气特性, 在约束系统中侧气囊也同样可以模拟出侧气囊对假人的缓冲作用, 吸收人体在碰撞过程中获得的动能, 这为约束系统的开发提供了有利的保证.

#### 参考文献:

- [1] 吴奕娴, 吴光强. 安全气囊展开数字仿真研究方法综述[J]. 汽车科技, 2011, 1(1):12-16.
- [2] LSTC. LS-DYNA theoretical manual[R]. Version 971, 2014.
- [3] LSTC. LS-DYNA user's Manual[R]. Version 971, 2014.
- [4] MICHEL A S. Compressible fluid flow[M]. 2nd Ed. London: Prentice Hall Presses, 1992.
- [5] EISENREICH N, NEUTZ J. Airbag for the closing of pipelines on explosions and leakages[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2007, 20:589-598.
- [6] WANG J T. An analytical model for an airbag with a hybrid inflator[J]. Crashworthiness Occupant Protection in Transportation System, 1995, 30:467-497.
- [7] KHAN M U, MOATAMEDI M. A review of airbag test and analysis[C]. 10th International LS-DYNA Users Conference, 2008.

## Dynamic Impact Test for Side Airbag: Numerical Simulation

REN Zhong-bo<sup>1</sup>, ZHONG Yuan<sup>2</sup>, LIU Jun<sup>1\*</sup>, WU Xin<sup>1</sup>, DANG Xue-mang<sup>1</sup>

( 1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211;

2.China Automotive Technology & Research Center, Tianjin 300300 )

**Abstract:** The author uses the Hybrid model based on LS-DYNA to activate the side airbag, and to analyze the model of choked flow through an orifice, as well as describe the impact model of impactor and airbag. By comparing the test and simulation results, the reliability of the numerical model is validated, and it also suggests that the side airbag provides a good protection in a certain crash speed range, and the effectiveness of buffer action with different vent orifice area is satisfying.

**Key words:** numerical simulation; side airbag; dynamic impact test; control volume method

(责任编辑 章践立)