

新型吸气式安全气囊的保护性能的研究*

宋志强 曹立波 白中浩 吴金正

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室 长沙 410082)

摘要: 针对传统式安全气囊在车辆碰撞后气囊充气时间短,火药用量大并产生有害气体,同时噪音大,且刚弹开的气囊具有高温高压会给乘员造成致命的损伤问题,本文研究了新一代吸气式安全气囊。首先,建立整车碰撞模型;然后,通过调节气囊点火时刻、点火间隔及火药用量,来控制进入气袋和排出气袋的气流量,实现火药多腔延时起爆的方式;最后,利用 LS-DYNA 软件进行大量的仿真计算,并研究分析气囊提供的压力波形对乘员的损伤性和防护性。旨在降低气囊爆炸冲击强度、维持较长的充气时间过程,提高气囊对乘员保护效果。结果表明,吸气式安全气囊可达到与直接充气式气囊等同的保护效果,同时增加安全性、降低灼伤的危险性与减少环境污染的问题,因此具有巨大的应用价值和市场前景。

关键字: 安全气囊, 碰撞损伤, 仿真模型, LS-DYNA 软件, 环保安全

中图分类号:

Research on the Protection Performance of a new type of Aspirated Air bag

SONG Zhiqiang, CAO Libo

Advanced design and manufacture for vehicle body State Key Laboratory
Hunan University Changsha 410082

Abstract: In view of the existence problems of traditional airbag that are large amount of gunpowder and harmful gas, and big noise, and the airbag may cause fatal damage to the occupant when it is opened with high temperature and high pressure, a new generation of aspirated airbag has been studied in this paper. First of all, a model of vehicle collision was established; Then, the air ignition time, ignition interval and amount of gunpowder, which control the gas flow to get into and discharge the air bag, were adjusted to achieve the way that gunpowder is blasting with multi cavity and delay; Finally, a lot of models were simulate by using LS-DYNA software, and researching the pressure waveform for occupant injury and protection. In order to reduce the air inflation impact strength, improve the effect of occupant protection. The results show that the new type airbag can reach the protective effect, while increasing safety, reducing the risk of burns and reducing environmental pollution, so it has great application value and market prospect.

key words: Air bag, Collision injure, Simulation model, LS-DYNA software, Environmental safety

0 前言

近年来,随着科学技术的发展和国民经济水平的提高,汽车行驶速度越来越快,且道路上的车流密度越来越大,致使交通安全问题日益迫切。据专家估计,如果安全气囊和安全带的普及率接近 100%,那么每年可以挽救 1.5 万人的生命。同时,我国政府对安全气囊的发展也十分地重视,在 1995 年,我国就把安全气囊系列被列入汽车零部件发展计划,并制定了相应的发展战略和政策措施。然而传统的安全气囊并非人们想象中的那么安

作者简介: 宋志强,男,1985 年出生,博士研究生。主要研究方向为汽车主被动安全。

E-mail: 642209530@qq.com。

电话: 18613980550。

曹立波(通信作者),男,1964 出生,教授,博士研究生导师。主要研究方向为汽车车身设计及主被动安全。

E-mail: hdbl@163.com。

*高新技术产业发展专项基金资助项目(kq1602008)。

全，安全气囊在防止重大损伤和减少事故死亡的同时，也可能由于它的快速展开而引发新的损伤。研究表明气囊展开速度的峰值可达到 192~320 km/h，并可产生约 9kN 的冲击力。乘员如果在气囊膨胀的阶段与之接触，可能会由于气囊展开力的“拍击”，而遭受致命的损伤[1]。因此，成为新的伤害源。

美国早就有关于乘员被气囊严重损伤甚至致死的报道，在 1990—2000 年间，由于安全气囊的误起爆共造成 162 名乘员死亡^[2]，在美国国内引起了很大的反响。德、英、澳等国也有类似的报道。目前，由于我国对安全气囊导致的乘员损伤的统计数据的缺乏，暂不清楚相关的数

据。因此，研究开发一种经济而又更安全新型汽车气囊成为汽车业界的需求。在本文中将对新一代吸气式安全气囊进行研究，该新型吸气式安全气囊系统的概念是由美国安全气囊创始人之一的 David Breed 先生在其专利中提出，吸气式安全气囊是利用其充气器内部流场的设计，使化学爆发的气体转换成低压超音速流体，而造成强大的吸力吸入外界空气充填安全气囊。可达到与直接充气式等同的效果，同时减少火药用量与环境污染问题，增加安全性与降低灼伤的危险性，可以解决传统式汽车气囊的缺点，将具有极为广泛的应用前景^[3-4]。

目前，国内外关于吸气式安全气囊系统的研究报道都很少，相关工作处于起步阶段。David Breed 先生在其专利中对吸气式安全气囊的工作原理以及基本结构进行了阐述，但如何提高安全气囊系统的吸气效率以及相应的起爆策略还有待深入研究。Nusholtz 等人利用非稳态可压缩气体流动方程并结合计算机仿真技术研究了气体发生器吸气孔的大小以及位置对吸气效率的影响^[5-6]。中国台湾的谢锦升通过 Fluent 商业软件分析了吸气式安全气囊系统中流场特性参数 Coanda effect、震波效应、尺寸参数、吸气口温度、高压入口压力以及温度对吸气效率的影响^[7]。中国台湾王长志等人介绍了利用计算机数值分析方法及 Fluent 软件来进行吸气式充气器的流场分析，探讨了不同几何尺寸气体产生器所产生的气体流特性^[8-11]。上述充气器采用的仍然是传统的单腔气体发生器，难以在实质上解决吸气式安全气囊充气效率低以及充气量不足等问题。

本文将通过 Hypermesh 建立包括假人和乘员约束系统在内的整车有限元碰撞模型，在 LS-DYNA 关键字中调整气囊点火时刻、点火间隔及火药用量，然后提交给 LS-DYNA 软件进行计算仿真，来仿真流入气袋和排出气袋的气流，实现火药多腔延时起爆的均匀充气特性，从而可以吸收更多周围空气充入气囊，解决充气效率低以及充气量不足的问题，进而研究分析气囊提供的压力波形对乘员的防护性和损伤性。旨在降低气囊爆炸冲击强度、维持较长的充气时间过程，提高乘员保护效果。较理想的多腔延时起爆充气特性与传统的单点起爆和双级起爆的充气特性对比如图 1 所示。

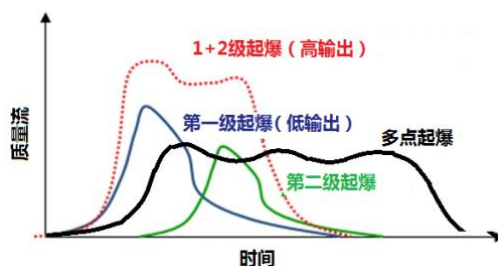


图 1 充气特性对比

1 安全气囊工作过程的仿真理论

汽车安全气囊模块仿真研究主要是建立在有限元和气体热力学基础上，在有限元程序计算过程中，气囊的控制容积可由格林公式算出。通过计算机仿真来模拟汽车安全气囊工作过程，实际上是一个接触碰撞问题，可用统一的模型来描述^[12-14]，即

$$\int_{\Omega} \sigma \varepsilon_i d\Omega - \int_S F_i S_i dS - \int_A F_i \bar{S}_i dA + \int_{\Omega} \rho a S_i d\Omega + \sum F_i \bar{S}_{i1} = 0$$

式中, Ω : 仿真模型中所有零部件所占空间; σ : 应力矩阵; ε_e : 虚应变矢量; S : 零部件受外载荷的面积; F_e : 作用在 S 上的外载矢量; S_e : 虚位移; A : 零部件自身相互接触面积; F_c : 作用在 A 上的接触力; $\bar{S}_e$: 与 F_c 对应的两接触点的相对虚位移; ρ : 零部件的质量密度; a : 加速度矢量; F_i : 内部点载荷; $\bar{S}_{ei}$: 对应于 F_i 的虚位移。这里, 气体对气囊和其他零部件的作用被作为外力包含在 F_e 中。

在 DYNA 和 MADYMO 软件中采用均匀压力模型计算气囊的展开过程。在模型中基于理想气体状态方程, 考虑了由气囊排气孔和其它泄露出气囊的气体质量流量, 根据气囊内气体质量和温度的变化计算得到气囊内的体积变化过程, 气囊的模型如图 2 所示。

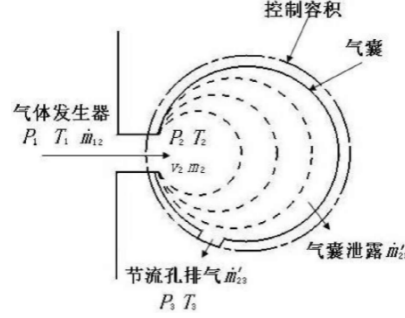


图 2 均匀压力方法原理

将气囊看成是不断扩大的控制体积, 气体的流入和流出以质量流量计算^[15-18]。

$$\begin{cases} \dot{m}_2 = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \\ \dot{m}_{in} = \dot{m}_{12} \\ \dot{m}_{out} = \dot{m}_{23} + \dot{m}'_{23} \end{cases}$$

式中, $\dot{m}_{in}$ 为进入气囊内的气体质量流率, 也就是气体发生器产生的气体进入气囊的质量流率 $\dot{m}_{12}$; $\dot{m}_{out}$ 为从气囊泄出的气体质量流率, 也就是经排气孔流出的质量流率 $\dot{m}_{23}$ 和织袋泄露出的质量流率 $\dot{m}'_{23}$ 的和。

假设控制容积内部的气体是理想气体且热容量系数为常数, 与外界没有热量交换; 进一步假设在控制容积内部温度和压力都是均匀的。于是有:

$$\begin{cases} p_2 v_2 = m_2 R T_2 \\ p_2 = (k - 1) \cdot \rho \cdot e \\ de/e = (1 - k)(dv_2/v_2) \end{cases}$$

式中, p_2 、 v_2 、 m_2 、 T_2 分别为气囊的压力(kPa)、体积(m^3)、气体质量(kg)、气体温度(K); R 为气体常数($8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$); ρ 为气体密度; e 为气体能量; $k = c_p/c_v$ 。

驾驶员侧安全气囊的标准体积为 60L, 设在吸气式气囊完全张开时需要的时间约为 80ms, 空气的摩尔质量为 29g/mol, 设大气的温度为 293 K, 则根据理想气体状态方程, 可计算出安全气囊完全展开时气囊内部的空气质量约为 0.072kg, 则进入气囊的气体平均质量流量为 0.9kg/s(此值应该为已减去排气孔泄露的气流量)。

2 仿真模型的建立

通过 Hypermesh 建立包括假人和乘员约束系统在内的整车有限元碰撞模型, 如图 3 所示, 气囊使用纤维织物材料模型, 定义好剪切和弹性模量等参数, 各单元的法向方向应一致向外, 定义气囊的接触方式, 最后在 LS-DYNA 关键字中调整气囊点火时刻、点火间隔及火药用量, 对假人加载的减速度曲线如图 4 所示, 然后提交给 LS-DYNA 软件进行计算仿真^[19]。

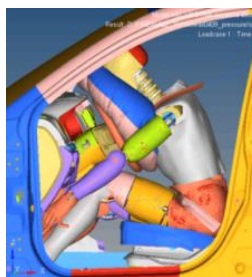


图3 整车有限元模型

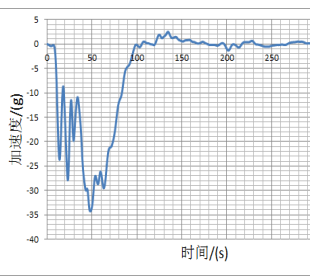


图4 加载的碰撞减速度曲线

3 安全气囊压力波的分析

通常，气囊内的压力在气囊起作用的整个过程中要经历如图5所示的几个阶段。

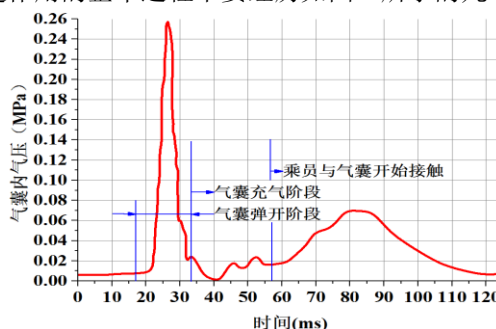


图5 气囊内气室压力图解

安全气囊工作性能参照美国 BREED 公司同类气体发生器的技术指标^[20]，主要从如下四个方面进行评定，①是从碰撞开始到气体发生器点火开始产生气体的时间 t_0 ，该值取决于气囊系统和碰撞强度，它关系到气囊系统是否在最佳时刻开始展开去有效地保护乘员；②是从气囊点火时刻到气囊完全打开所经历的时间 t_1 ，压力值上升到最大压力的 95%所需时间要小于 55ms^[21]；③是气囊充气压力和温度，气囊充气压力取决于气体发生器的类型、点火方式以及充气系统结构。对于传统的气囊，气袋内产生的最大气体压力值为 0.26~0.34MPa，其直接关系到对乘员的防护效果；④是乘员的损伤程度，乘员的损伤程度以 HIC 值和胸部加速度值及压缩量来衡量^[22]。

目前对气囊设计的准则是气袋 30ms 完成充气时，乘员在惯性力的作用下前移了 127mm。显然，这一准则是与时间—速度和乘员的初始位置直接相关的，只要其中任何一个因素有变化，都将影响到损伤防护的效果^[23、24]。

4 对仿真结果的对比分析

下图曲线中新型吸气式气囊 2 与新型吸气式气囊 1 的进气质量流一样，只是模型 2 以高温进行仿真，模型 1 以常温仿真的结果。结果显示，高温气体对气囊的压力及乘员的损伤都有显著的加剧。由于吸气式气囊的气体主要来源是周围的空气，也就是常温态的气体，故下边主要对比气囊模型 1 的曲线与传统气囊模型曲线。

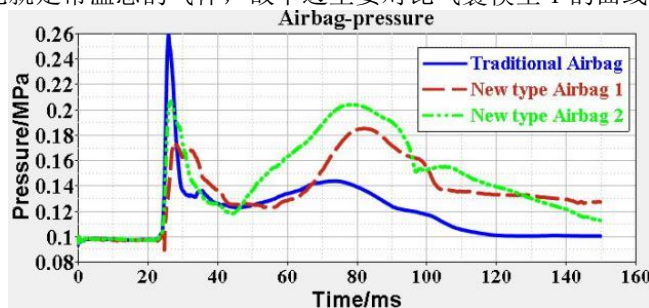


图6 气囊压力的对比

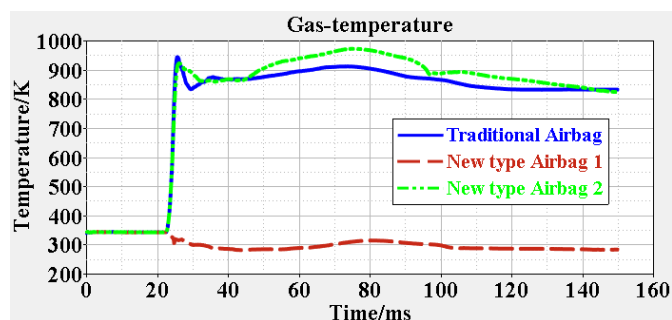


图 7 气囊内温度的对比

由图 6、7 可知，在汽车发生碰撞后的 23~25ms 时，传感器引爆气体发生器；新型吸气式气囊的充气压力峰值约为 0.17MPa，气体温度基本维持在 293K；传统气囊的压力峰值 0.26MPa，气体温度高达 950K，压力峰值可至少降低 34.6%。在 45~50ms 时由于乘员头部接触到气囊，气囊受到挤压，压力又开始上升。由于气袋的阻隔，避免了乘员与汽车内部结构发生直接碰撞起到了防护作用。气囊展开的过程中同时也通过排气孔排气，约在 100ms 左右整个防护过程完成。

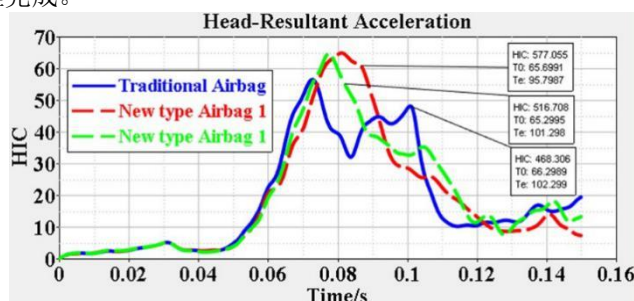


图 8 头部损伤程度 HIC 值的对比

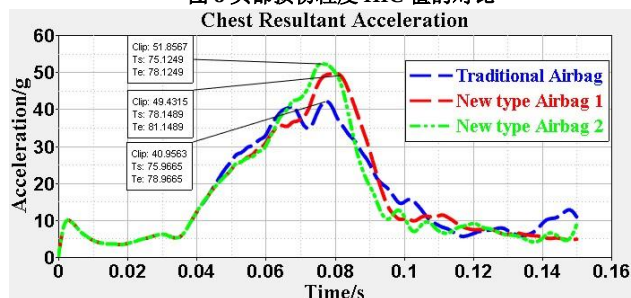


图 9 胸部加速度的对比

由图 8、9 可知，新型吸气式气囊和传统气囊防护的乘员头部加速度峰值分别为 65g、58g，HIC 值分别为 516.708、468.306；胸部损伤指标 Clip 值分别为 49.43、40.95 都在标准规定值之内可以起到有效的保护。不过新型吸气式气囊还可以通过多目标优化算法达到更佳的保护效果。

5 结论

根据吸气式安全气囊的特性，为了对乘员起到更好的防护效果，应该尽量降低进气质量流率峰值，减少充气量。通过调整安全气囊的进气质量流率曲线的进气峰值、充气时间、泄气口面积及气体温度四个主要参数进行仿真，发现进气质量流率的峰值大小和充气时间及气体温度对气囊的展开状态影响重大。当进气质量流率峰值小于 0.8kg/s 时，气囊不能有效的展开；当进气质量流率峰值偏大且充气时间较长时，气囊缓冲吸能变差，致使头部接触到气囊后加速度更大，不利于对乘员的保护。最终通过采用上述的参数仿真得到了预期的结果，结果表明新型吸气式安全气囊在充气过程中具有低温低压的状态，其保护的乘员在头部损伤指标 HIC 值和胸部损伤指标 Clip 值都达到了标准，起到了很好的保护效果。下一步计划通过多目标优化算法优化气囊点火时刻、点

火间隔及火药用量, 并开展相关实验验证。

参考文献

- [1] 刘子建, 黄天泽, 张建华, 等. 安全气囊对汽车乘员碰撞损伤防护的研究[J]. 机械工程学报, 2001, 37(5):12-17.
- [2] 曹立波, 喻伟雄, 白中浩, 等. 某量产 SUV 安全气囊结构改进研究[C]// 2010 中国汽车工程学会年会论文集. 2010.
- [3] Breed D S, Castelli V. Problems in Design and Engineering of Air Bag Systems[C]// SAE International Congress and Exposition. 1988.
- [4] 王运韬. 汽车主动与被动保护充气式防撞安全气囊:, CN 101367367 A[P]. 2009.
- [5] Nusholtz G S, Shi Y, Xu L. Optimization of Single-Point Frontal Airbag Fire Threshold[C]// SAE 2000 World Congress. 2000.
- [6] Nusholtz G, Wylie E B, Wang D. Air Bag Aspiration Simulation[J]. 1996.
- [7] 謝錦昇. 吸氣式安全氣囊之充氣器模擬分析與設計[J]. 2003.
- [8] 王长志, 宋岗. 後座安全气囊吸气式充气器之设计与分析[J]. The Numerical Analysis and Design of the Aspirated Inflator on Backside Airbag 台北海洋技术学院学报, 2 卷 1 期 (2009/03/01), P1-9
- [9] 王长志, 宋岗. 側边安全气囊吸气式充气器之动态流场设计与分析[J]. The Design and Analysis of the Dynamic Flow Field in Aspirated Inflator on Airbag 台北海洋技术学院学报; 2 卷 2 期(2009/09/01), P15-43
- [10] 王长志, 宋岗, 张彦森. 後座安全气囊吸气式充气器之动态流场设计与分析[J]. 台北海洋技术学院学报, 4 卷 1 期(2011/04),39-61
- [11] 张绳, 程涵, 刘雄, 等. 气囊充气过程流场特性研究[C]// 中国系统仿真技术及其应用学术年会. 2011.
- [12] 钟志华. 汽车安全气囊展开过程计算机仿真及其接触搜寻方法[J]. 汽车工程, 2000, 22(5):303-305.
- [13] 何文, 钟志华, 杨济匡. 汽车安全气囊工作性能仿真试验验证技术研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(4):126-129.
- [14] 曹立波, 姜继龙, 钟志华. 新型汽车前保险杠安全气囊系统的计算机仿真研究[C]// 国际机械工程学术会议. 2000.
- [15] 黄晶. 新型安全气囊在前碰撞乘员防护技术中的理论和方法研究[D]. 湖南大学, 2009.
- [16] 田婧婷. 汽车正面安全气囊充气过程模拟及试验验证技术[D]. 吉林大学, 2009.
- [17] 黄晶, 钟志华, 胡林, 等. 新型管式气囊的防护性能分析及结构优化[J]. 机械工程学报, 2009, 45(6):107-112.
- [18] 车凯凯, 王美松. 安全气囊展开的三种数值模拟方法的对比[J]. 汽车安全与节能学报, 2013(3):250-256.
- [19] 马亮. 安全气囊织物透气的数值模拟与实验研究[D]. 东华大学, 2009.
- [20] 尉存娟. 汽车安全气囊系统气体发生器产气性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2005
- [21] 谭迎新, 谭立新, 尉存娟, 等. 用于汽车安全气囊的气体发生器产气性能研究[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(2):95-98.
- [22] 章剑雄. 安全气囊防护的仿真模型及实验系统研究[D]. 上海交通大学, 2007.
- [23] 白中浩, 龙瑶, 曹立波. 安全气囊展开试验装置, Airbag deployment test device:, CN 102564771 B[P]. 2015.
- [24] 刘建斌, 陈平霞. 安全气囊气体发生器 Tank 试验中 P-t 曲线的分析[C]// 2007 中国汽车工程学会年会论文集. 2007.