doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.202504006

基于粒子法的膝部气囊精细化建模与验证

代周杰[1],王建平[1],刘 磊[2],宋丛涛[2],陈永祥[1],邱子麒[1]
(1.安徽工程大学 机械与汽车工程学院,安徽 芜湖 241000;
2.芜湖金安世腾汽车安全系统有限公司,安徽 芜湖 241000)

摘要:为提升车辆正面碰撞中乘员膝部的保护性能,基于粒子法开展膝部气囊精细化建模与验证研究。建立某量产车型膝部气囊的有限元模型,通过LS-DYNA完成静态点爆和动态冲击仿真,并与控制体积法进行对比。结果表明:粒子法在展开形态、容积预测与动态响应方面均优于控制体积法,与实验高度一致,静态点爆容积误差仅为1.87%,相比控制体积法误差降低了72.82%;冲击块加速度与位移峰值误差分别为1.5%与2.8%,较控制体积法分别提升84.54%和55.56%,有效验证了织物泄气特性。

关键词:正面碰撞;膝部气囊;粒子法;LS-DYNA;模型验证
中图分类号:TP391.4 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-5322(2025)04-0041-08

随着汽车工业快速发展,安全气囊作为一种车辆被动安全技术已成为整车安全性的核心评价指标之一[1]。在正面碰撞时,乘员膝部易与仪表板、转向柱下部等硬质结构接触,导致膝关节骨折或软组织损伤等严重伤害,膝部气囊(knee airbag,KAB)作为乘员约束系统的关键部分,在碰撞瞬间迅速展开,在膝部和内饰件间形成缓冲区域,有效分散撞击能量,降低损伤风险,因此KAB的合理设计对提升整车安全性存在重要价值[2]。

在气囊设计与优化过程中,准确预测其在不同工况下的性能表现对后期约束系统开发至关重要。早期采用物理实验方法获取直观数据,但存在成本高、周期长且无法重复等缺点,随着计算机辅助工程(computer aided engineering,CAE)技术的发展,有限元分析方法已成为气囊系统开发的重要手段[3]。控制体积法(control volume,CV)与拉格朗日-欧拉耦合法(arbitrary-lagrangian-eulerian,ALE)作为早期传统仿真方法,适用于在位乘员保护分析,但其由于建模复杂、计算资源需求高,且对初期高速气体流动、非均匀压力分布及与离位乘员交互作用模拟的准确性不足,限制了其在工程实践中的应用。2006年出现的粒子法(corpuscular particle method,CPM)基于分子动力学理论,该方法将气体离散为粒子集合,通过粒子-织物碰撞机制模拟气体动态行为,能准确实现气流运动、压力分布和织物变形,尤其适合复杂折叠形态、多腔室结构及离位工况仿真[4]。

近年来,CPM在气囊仿真中展现出显著优势。Olovsson[5]对CPM仿真机理及其有效性进行了系统性研究与验证;Hirth等[6]对比了CV、ALE与CPM三种方法在气囊展开模拟中的性能,证实CPM在保证精度的同时大幅缩短计算时间;国内学者如赵越[7]在副驾驶气囊对标研究中验证了CPM建模可靠性;严松等[8]开发柔性气囊弹射系统,证实CPM在模拟柔性气囊展开中的准确性。然而,现有研究多关注常见气囊类型,针对KAB的CPM的精细建模与系统性实验验证研究较少,鉴于其安装空间受限、展开姿态复杂、与乘员交互频繁,对仿真模型的准确性要求更高,因此有必要开展面向KAB的CPM建模与验证研究。

针对上述研究空白,本文开展基于CPM的

收稿日期:2025-09-15
基金项目:芜湖市重点研发计划项目(2022yf05);安徽省重点实验室开放基金项目(QCKJJ202505)。
作者简介:代周杰(2001—),男,安徽芜湖人,硕士生,主要研究方向为汽车被动安全。
通信作者:王建平(1970—),男,甘肃天水人,正高级工程师,博士,主要研究方向为车辆工程。

KAB高精度仿真,以某量产车型KAB为研究对象,其模型尺寸与安装位置依据实际工程数据构建,并借助Tank实验气体发生器关键参数。通过系统开展静态点爆与动态冲击仿真,从展开形态、容积变化、泄气特性及动态力学响应等多个维度与CV进行对比分析,全面评估CPM在KAB仿真中的准确性,为KAB优化设计与整车约束系统开发提供可靠仿真模型。

1　CPM理论分析

CPM基于分子动力学理论,从微观、动态角度描述气体的行为,以此来搭建起与宏观气体参数(如压强、温度)之间的联系[9]。该方法将气囊内大量理想气体分子离散为数量有限、尺寸较大的刚性球形粒子,每个粒子代表一个气体分子群,如图1所示。在严格遵守质量、动量和能量守恒定律的情况下,对这些粒子和气囊织物之间的碰撞过程进行模拟,能够高精度地再现气囊展开过程中内部气流动态、压力分布变化及织物的结构变形状况。

在CPM中,气囊内压强P由粒子与织物边界的完全弹性碰撞所产生,从分子动力学角度来看,气囊内压强是分子平动动能的函数,表达式为:

$$P = \frac{2\bar{W}_k}{3V} \tag{1}$$

式中:P为气囊内压强,Pa;$\bar{W}_k$为粒子平动动能,J;V为气体体积,m^3。

粒子平动动能可进一步表示为:

$$\bar{W}_k = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N_p}\bar{m}_i\bar{v}_i^2 = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N_q}m_i v_i^2 = \frac{1}{2}m\bar{v}_{rms}^2 = \frac{1}{2}mv_{rms}^2 = \xi E \tag{2}$$

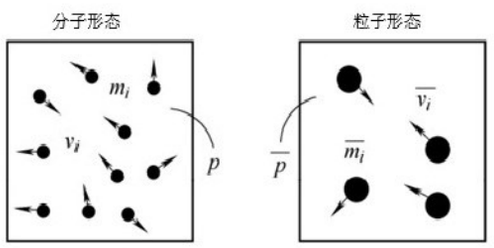


图1　粒子法理论示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the particle method theory

式中:N_p为粒子数;N_q为气囊内分子数;$\bar{m}_i$为粒子质量,kg;$\bar{v}_i$为粒子速度,m/s;m_i为分子质量,kg;v_i为分子速度,m/s;m为气体总质量,kg;$\bar{v}_{rms}$为粒子均方根速度,m/s;v_{rms}为分子均方根速度,m/s;ξ为平动动能与内能的比例系数;E为粒子内能,J。

$$E = \bar{W}_k + \bar{W}_s \tag{3}$$

式中:$\bar{W}_s$为粒子旋转/振动动能。

在CPM中,每个粒子都有一种平衡,这种平衡存在于比热容决定的平动动能与旋转/振动动能之间,而且平动动能和内能成正比;说明当粒子与气囊边界碰撞时,仅有平动动能被转移至边界,为维持平动动能与旋转/振动动能之间的比例关系,需要将旋转/振动动能转化一部分给平动动能以保持平衡[10]。

2　有限元模型建立

2.1　KAB有限元模型的建立

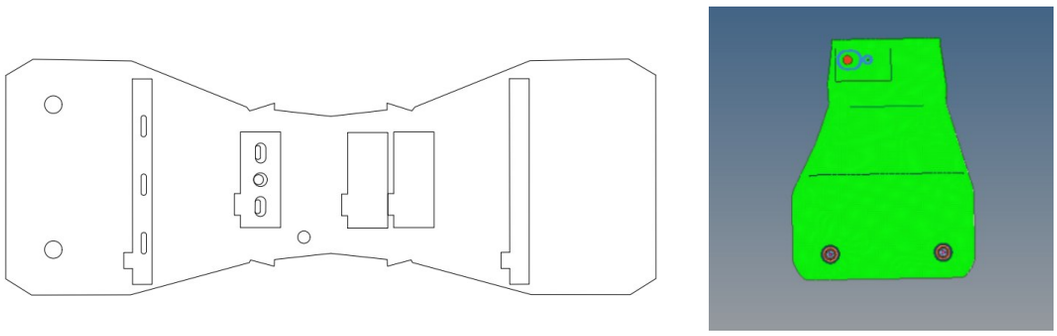
以某车型KAB的设计参数,在CATIA平台中构建如图2a所示的几何模型。为精确模拟织物行为,选择气囊织布材料为MAT_34_FABRIC,借助Hypermesh软件进行网格划分,单元类型选用四边形膜单元。通过网格无关性分析,确定5 mm的网格尺寸既能避免仿真中的网格穿透问题,又能保证计算效率。5 mm网格尺寸的KAB有限元模型如图2b所示。

由于气囊折叠方式会直接影响其展开形态和仿真精度[11],本文对比了有序折叠与无序折叠2种策略,结果表明有序折叠方式能够更好地控制KAB在受限空间内的展开路径和最终形态。因此本研究采用有序折叠方式。

为验证几何模型的准确性,将有序折叠后的气袋形状及模型截面与KAB实物进行对比,结果如图3所示。由图3可知,二者具有较好的一致性。

2.2　气体发生器的定义

气囊折叠完毕后,需对气体发生器的关键参数进行准确定义。通常,供应商会提供基于密闭容器试验(常称为Tank测试)得到的气体质量流率、温度以及压力-时间曲线[12]。为了提升仿真输入的可靠性,通过LS-DYNA软件开展仿真对标分析。具体的做法是:建立与物理试验对应的密闭容器有限元模型,如图4所示,将初始质量流率、温度曲线作为输入,通过仿真生成对应的压力-时间曲线,并与实验曲线进行对比。若两者



a KAB 2D模型　　b KAB有限元模型

图2　KAB 2D模型及有限元模型

Fig. 2　KAB 2D model and finite element model

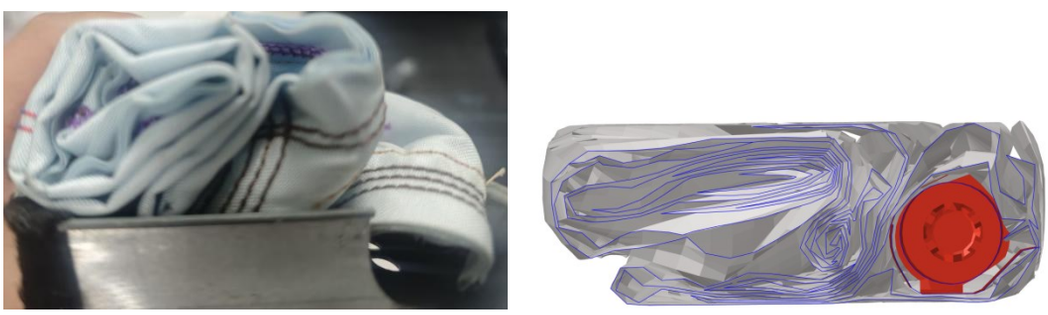


图3　KAB实物与仿真模型对比

Fig. 3　Comparison between the physical model and the simulation model of KAB

存在偏差，则对输入参数进行迭代调整，直至仿真曲线与实验曲线的吻合程度满足要求。仿真与实验所得的压力–时间曲线如图5所示，最终得到的质量流率曲线、温度曲线如图6所示。

气体发生器的有限元建模中，本体材料选用MAT_20_RIGID（刚体材料），排气孔的位置和尺寸、喷嘴的方向、数量以及空间分布等几何特征均依据实际结构进行精确建模。该模型的喷嘴数量设为6个，均布于发生器四周。在模型中，喷嘴作为刚性本体的一部分进行建模，其空间方位由几何造型精确确定，以此来保证力学传递的准确性。

2.3　工装和冲击块有限元模型的建立

为完成仿真模型的验证与对标，除建立气囊有限元模型外，还需搭建工装与冲击块的有限元模型[13]，如图7所示。图7中，工装由刚性避障结构及安装固定装置两部分组成，建模过程中需遵循实际工况下工装与避障间的距离参数。

工装与冲击块的有限元模型均采用MAT_20_RIGID刚体材料模型，其中工装采用固定约束，约束所有6个自由度；冲击块实体尺寸为520 mm×240 mm×80 mm，根据其实际尺寸构建的有限元模型质量达到20 kg，冲击块只约束5个自由度，撞向气囊的方向不设置约束。

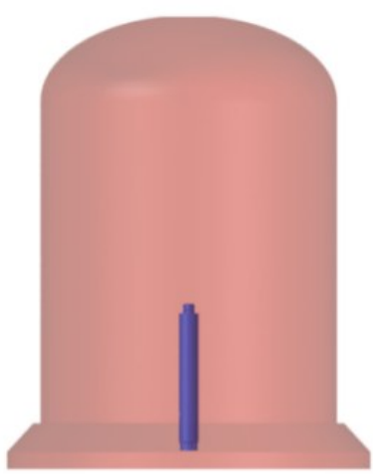


图4　罐容器模型

Fig. 4　Tank container model

3　仿真结果与分析

3.1　静态点爆仿真与分析

通过气囊静态点爆实验，可验证KAB展开性

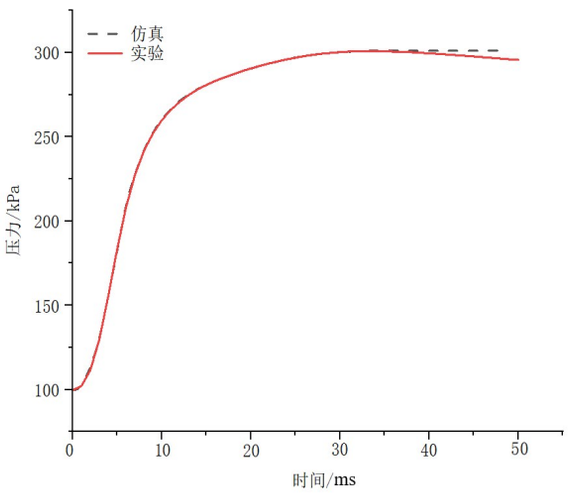


图5　仿真与实验的压力—时间曲线对比

Fig. 5　Comparison of pressure-time curves between simulation and experiment

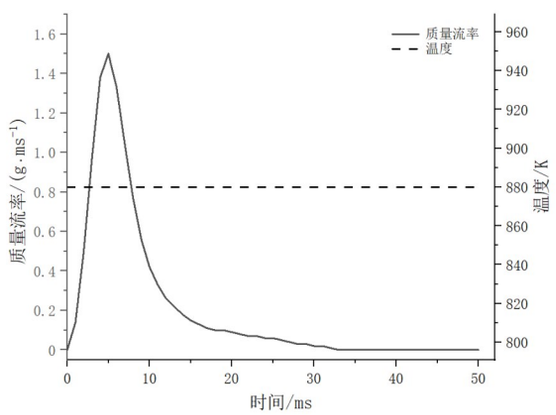


图6　质量流率、温度曲线

Fig. 6　Mass flow rate and temperature curve

能是否符合设计要求。气囊充气时间、形态演变过程以及最终展开范围等关键数据,可通过该实验方法有效获取[14]。进行静态点爆实验时,需预先在工装上安装KAB,并于工装侧面布置高速摄像设备,记录从0 ms点火时刻启动的气囊展开全过程,实验环境温度保持常温。在仿真分析时,将KAB有限元模型与工装模型进行装配并按实验要求施加约束条件,在Hypermesh中建立气囊自接触及其与工装的面面接触关系。

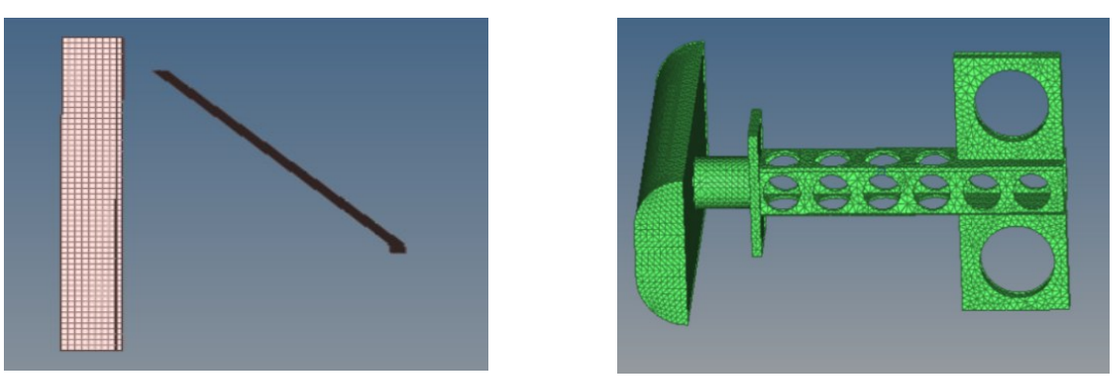
本文分别采用CPM和CV建立仿真模型,对比不同时刻气囊展开状态的仿真结果,并与实验结果相比较,如图8所示。图9、图10分别为CPM和CV两种方法计算得到的气囊体积和泄气率随时间变化的曲线。

由图8可知,两种方法模拟得到的气囊展开形态与实验结果基本一致。但结合图9与图10的分析可以看出:CPM能有效模拟气囊内部的高速气体流动,在展开初期相较于CV气囊内压力更大、泄气量更少,使气囊展开速度更快、形态更饱满。

气囊容积是发挥安全保护作用的关键参数。通过小球法实验测得的气囊实际容积为16 L,CPM计算得到气囊充满后的容积约为15.7 L,与实验值相差1.87%;CV计算得到气囊充满后的容积约为14.9 L,与实验值相差6.88%。显然,基于CPM建立的KAB模型在静态展开后的容积误差较CV降低了72.82%,该方法能捕捉更准确的流体–结构耦合效应,真实反映气囊的膨胀过程。

3.2　动态冲击仿真与分析

动态冲击实验旨在验证KAB在受力状态下的动态泄气特性(即织物透气性在冲击载荷下的表现),并为仿真模型提供关键的对标数据[15]。实验设置如下:将KAB安装在垂直于地面的实验台上,并在其右侧水平滑台处安装质量为20 kg的冲击块,以0 ms作为气囊点爆的起始时刻,点爆



a　工装有限元模型　　b　冲击块有限元模型

图7　工装与冲击块有限元模型

Fig. 7　Finite element model of the fixture and impact block

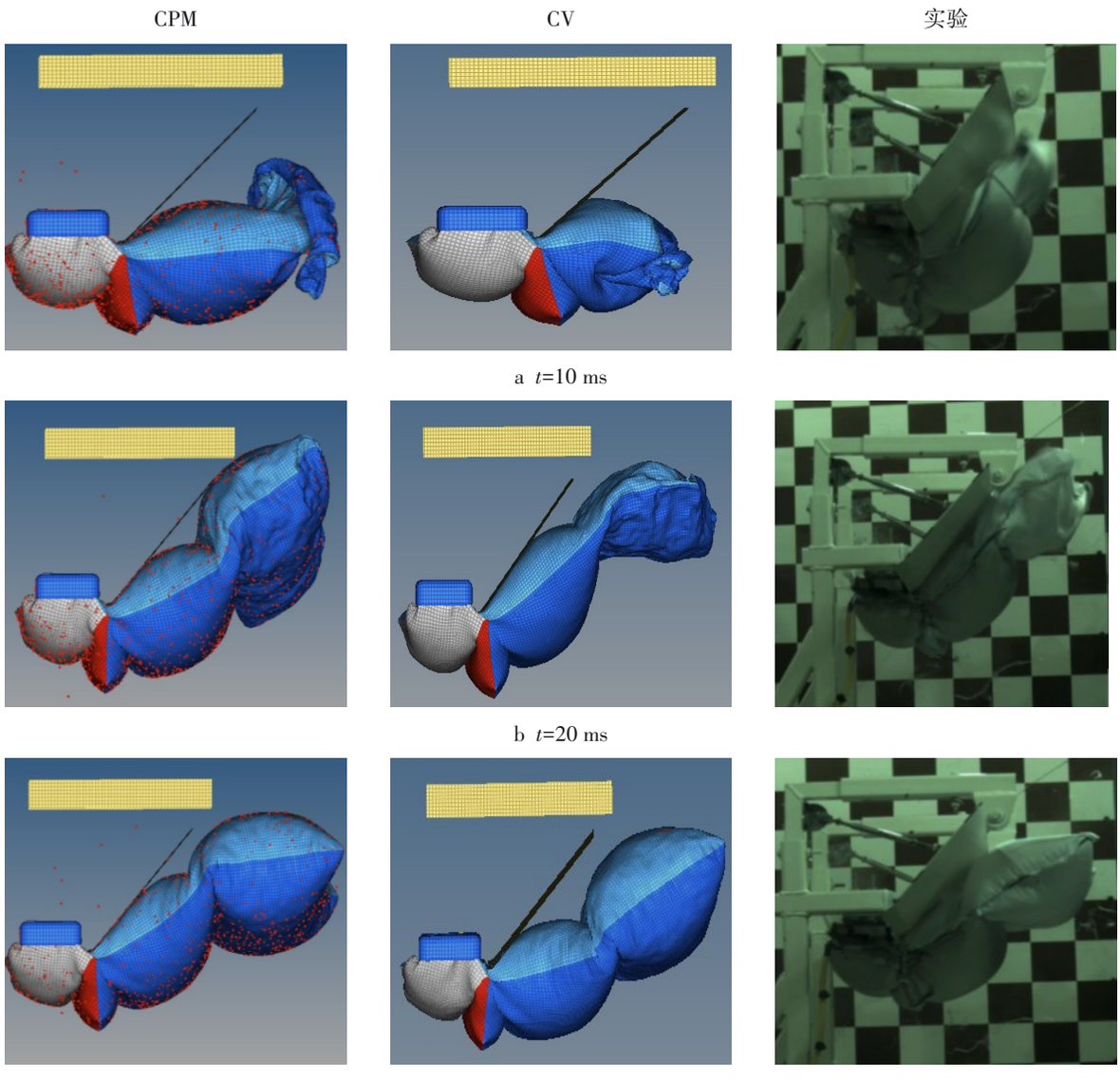


图 8　KAB 各时刻展开状态对比

Fig. 8　KAB deployment comparison at different times

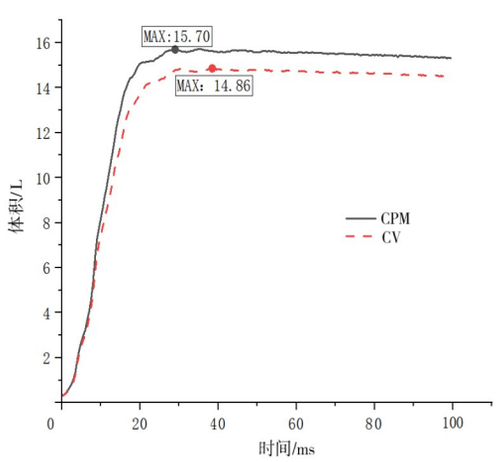


图 9　气囊体积对比

Fig. 9　Comparison of airbag volumes

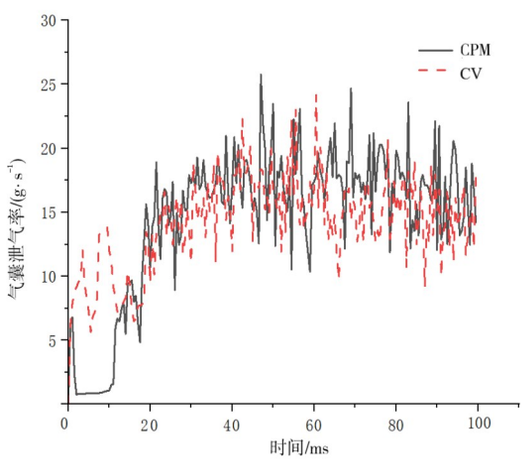


图 10　气囊泄气率对比

Fig. 10　Comparison of airbag deflation rate

后,冲击块以 3 m/s 的初始速度水平撞击气囊,加速度传感器被贴附于冲击块平面后部,用于采集加速度数据;同时,使用高速摄像机完整记录冲击过程,用于分析气囊的展开形态和冲击块的位移。

图 11 展示了 KAB 动态冲击过程中通过 CPM、CV 方法得到的仿真结果与实验录像在不同时刻的形态对比,图 12 为 CPM、CV 两种方法计算

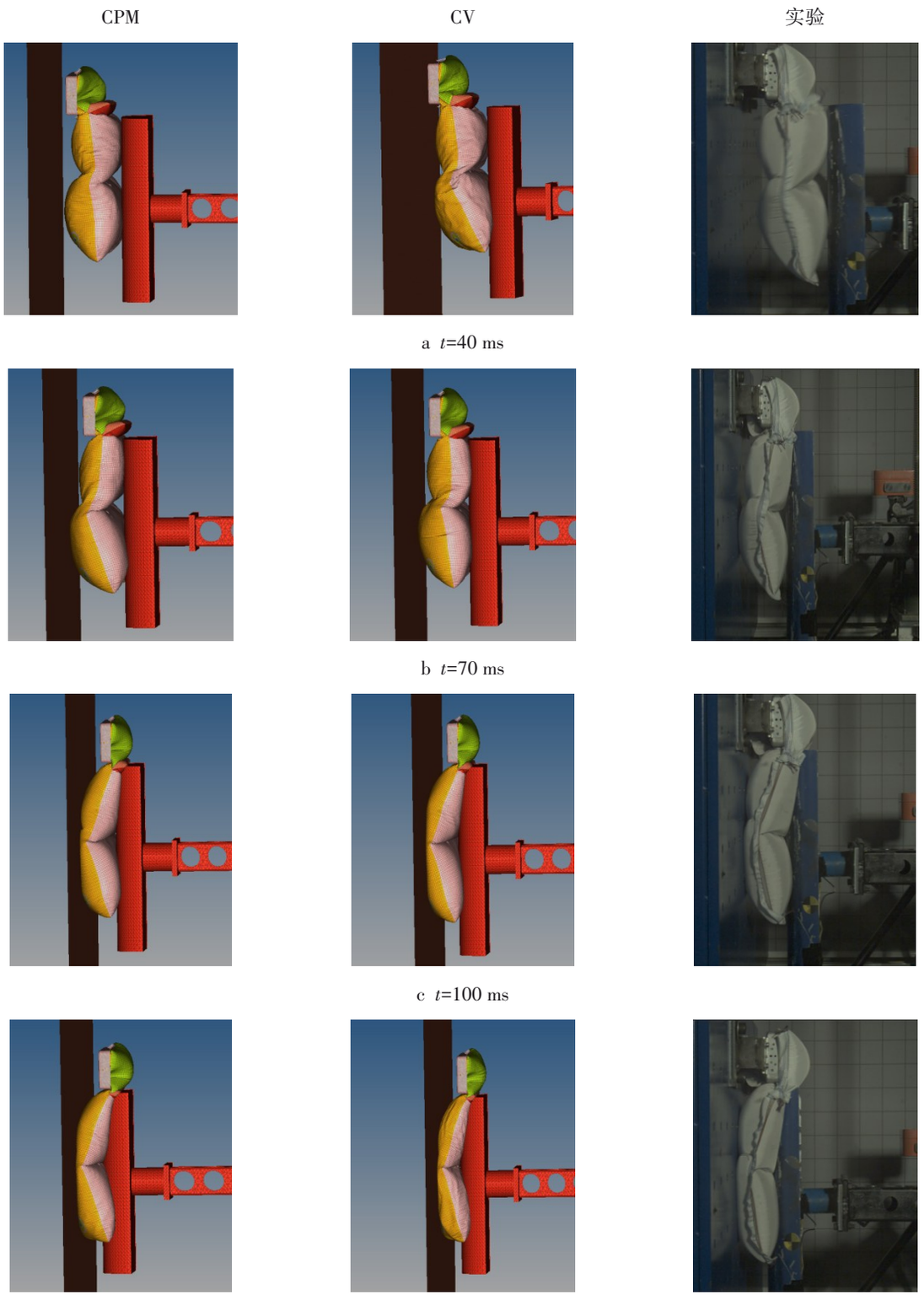
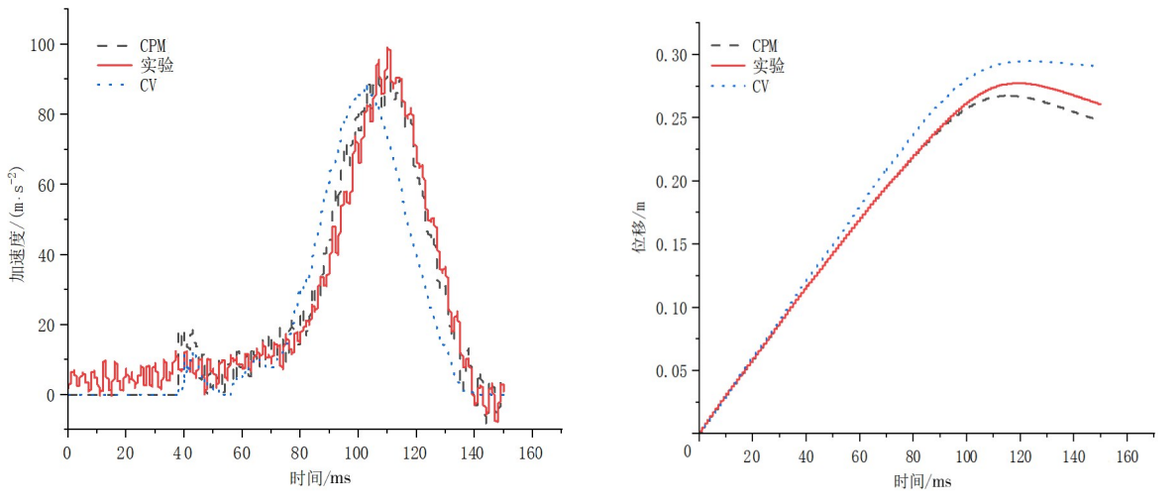


图 11　动态冲击实验和仿真结果对比

Fig. 11　Comparison of dynamic impact experiment and simulation results



a　冲击块加速度—时间曲线　　b　冲击块位移—时间曲线

图 12　冲击块加速度、位移曲线对比

Fig. 12　Comparison of acceleration and displacement curves of the impact block

获得的冲击块加速度、位移曲线与实验数据的对标结果[16]。通过对图 11 的分析可见，在冲击过程中，CPM、CV 两种方法所建立的 KAB 有限元模型在不同时刻的展开姿态均与实验结果基本吻合，KAB 在受冲击后均能完全展开，未出现气囊击穿现象。从图 12 可以看出，采用 CV 模拟得到冲击块加速度峰值出现的时刻相比 CPM 与实验均提前了 10 ms，其加速度最大值误差为 9. 7%，位移最大值误差为 6. 3%；基于 CPM 得到的冲击块加速度、位移曲线均与实验高度吻合，加速度最大值误差仅为 1. 5%，位移最大值误差为 2. 8%，都在 10% 的误差之内，精度较 CV 分别提高了 84. 54% 和 55. 56%。

以上误差主要源于 KAB 折叠复杂，CV 基于理想气体状态方程，假定压力在整个气囊内均匀释放；而 CPM 基于粒子法理论，通过粒子运动直接模拟气体从喷出、流动、扩散到充满的全过程，准确反映初始阶段因气体射流导致的局部高压与折叠区域未充气时的低压分布，能有效解决压力分布不均、气流复杂问题。验证了基于粒子法所建立的 KAB 有限元模型具有较高的准确性，其织布泄气性与真实情况基本吻合，可作为整车约束系统有限元仿真中的气囊输入模型。

4　结 论

本文针对 KAB 提出 CPM 高精度建模方法，借助密闭容器试验（Tank 试验）对标，对气体发生器质量流率与温度曲线进行验证，从仿真输入参数层面降低误差，并通过系统的静态点爆与动态冲击仿真，将 CPM 与 CV 进行对比。

在静态点爆实验中，CPM 与 CV 两种方法的仿真模型均能准确复现气囊展开过程，最终展开形态与实验相符；CPM 计算的容积仿真结果与实测值仅差 1. 87%，相比 CV 误差降低了 72. 82%，验证了基于 CPM 所建模型在充气性能和容积预测方面的可靠性。

在动态冲击实验中，仿真模型准确体现 KAB 缓冲特性与织布泄气过程，CPM 计算得到的加速度、位移最大值误差分别为 1. 5%、2. 8%，较 CV 精度分别提高了 84. 54%、55. 56%，表明 CPM 所建模型可有效预测 KAB 在动态冲击过程中的力学响应。

因此，本文建立的基于 CPM 的 KAB 有限元模型具备较高精度与可靠性，能为 KAB 结构优化、整车约束系统性能提升，以及乘员损伤评估提供有效的仿真依据。

参考文献：

[1] 周晓强，黑中垒，张钱赫，等. 汽车安全系统技术与应用展望[J]. 汽车测试报告，2023(19)：89-91.

[2] 谢奇彬，刘宇，林小刚. 浅析某乘用皮卡膝部安全气囊设计[J]. 南方农机，2023，54(10)：151-154.

[3] BENDJABALLAH D, SAHLI M, BARRIÈRE T. Experimental investigation and finite element analyses of the car dynamic frontal crash[J]. Journal of Engineering Research, 2025,13(2): 123-135 .
[4] 张雷. 基于颗粒法安全气囊的建模与仿真[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
[5] OLOVSSON L. Corpuscular method for OOP simulations, difficulty dealing with small vent holes[C]//Proceedings of the 6th German LS-DYNA Forum. Frankenthal, Germany: DYNAmore, 2007: 1-4.
[6] HIRTH A, HAUFE A, OLOVSSON L. Airbag simulation with LS-DYNA past-present-future[C]//Proceedings of the 6th German LS-DYNA Forum. Frankenthal, Germany: DYNAmore, 2007: 57-74.
[7] 赵越. 副驾驶安全气囊的对标分析[J]. 汽车零部件, 2023(9): 84-89.
[8] 严松,姜毅,邓月光,等. 柔性气囊弹射系统动力学特性研究[J]. 振动与冲击,2024,43(3):247-254.
[9] 周默涵, 狄长春, 杨玉良, 等. 圆柱筒式空投气囊缓冲模拟[J]. 包装工程, 2017, 38(17): 128-132.
[10] 汪娜, 彭雄奇, 鲁宏升, 等. 应用CPM法模拟折叠气囊[J]. 机械工程学报, 2015, 51(12): 120-126.
[11] 王晓祺, 王刚, 张柄楠, 等. 折叠气囊展开过程仿真与分析[J]. 装备环境工程, 2024, 21(12): 34-41.
[12] 刘敏慧, 韩芳, 王明. CAB不同折叠方式及展开状态研究[J]. 汽车实用技术, 2021, 46(14): 51-52, 128.
[13] 李红, 刘佳兵, 关栋. 基于C-NCAP远端气囊建模仿真与试验对标[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2024, 27(2): 9-14.
[14] 卢文明, 杨欣霖, 刘俊岐, 等. 气囊部品静态展开测试标准解析及测试平台搭建[J]. 汽车零部件, 2021(3): 104-109.
[15] 马健胜, 郭树文, 段丙旭. 某SUV副驾驶员安全气囊试验及LS-DYNA有限元模型对标[J]. 天津科技, 2022, 49(2): 22-29.
[16] 颜萍. 正面碰撞驾驶员膝部与骨盆气囊仿真及保护效果对比分析[D]. 扬州: 扬州大学, 2019.

Fine Modeling and Verification of Knee Airbags Based on CPM

DAI Zhoujie[1], WANG Jianping[1], LIU Lei[2], SONG Congtao[2], CHEN Yongxiang[1], QIU Ziqi[1]

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu Anhui 241000, China;
2. Wuhu Golden Safety System Co. Ltd., Wuhu Anhui 241000, China)

Abstract: To enhance occupant knee protection performance in vehicle frontal collisions, this study conducts a refined modeling and validation analysis of knee airbags (KAB) using the corpuscular particle method (CPM). A finite element model of a production vehicle's KAB was developed, with static deployment and dynamic impact simulations performed via LS-DYNA, and compared against the control volume (CV) method. Results indicate that CPM outperforms CV in terms of deployment morphology, volume prediction, and dynamic response, demonstrating high consistency with experimental data. Specifically, the static deployment volume error was only 1.87%, representing a 72.82% reduction compared to CV. Peak acceleration and displacement errors of the impact block were 1.5% and 2.8%, respectively, corresponding to improvements of 84.54% and 55.56% over the CV approach, thus effectively validating the fabric venting characteristics.

Keywords: frontal collision; knee airbag; corpuscular particle method; LS-DYNA; model validation

(责任编辑:邵 茗)