DOI: 10.11883/bzycj-2016-0378 文章编号: 1001-1455(2018)04-0931-06

空气炮碰撞实验台发射过程的数值模拟*

肖程欢[1,2],鲁寨军[1,2]
(1.中南大学轨道交通安全教育部重点实验室,湖南 长沙 410075;
2.轨道交通安全协同创新中心,湖南 长沙 410075)

摘要: 利用计算流体动力学方法对单级空气炮碰撞实验台的发射过程进行了数值仿真,所得碰撞车发射速度与实验结果吻合。在此基础上,对碰撞车发射过程的流场变化、车体前后压力以及储气罐压力变化进行分析。结果表明,泄漏气体先于碰撞车充满整个发射空间,形成初始流场,使得车前压力出现正负交替现象,但其数值较小,对车体加速过程的影响可以忽略。当碰撞车进入泄压段后,受冲击射流作用,碰撞车仍处于加速状态,且速度增量约为 2 m/s。

关键词: 计算流体力学;模拟分析;动态网格;空气炮
中图分类号: O351.2 **国标学科代码**: 13025 **文献标志码**: A

为了确保高速列车运行过程中乘员的安全,需要对列车吸能材料的动态特性进行深入研究。高速撞击试验、实车碰撞试验可以较真实地反映材料的动态性能。气体炮是一种通用的加速装置,其原理是基于高压气体膨胀做功推动试验车运动,使试验车在极短的时间内获得较高的发射速度。目前中南大学所建的单级空气炮碰撞实验台(single stage air gun impact testbed, SSAGIT)主要由储气罐、加速段、泄压段和速度测控系统组成,可将质量为 1 t 的碰撞车加速至 90 m/s。

在空气炮理论研究方面,一般是基于等熵流的膨胀做功理论估算投射物的运行速度[1-2]。需要特别指出的是,Seigel[3]和 Sheppard[4]对单级气体炮无泄漏等熵膨胀的发射过程进行了详细的阐述。常用的空气炮投射物截面为圆形,而 SSAGIT 投射物截面为矩形,这种设计可有效避免碰撞车在加速过程中产生自旋[5]。为了减小摩擦阻力,大矩形截面的碰撞车与加速段内壁有一定的间隙,受此影响,实验结果比通用的速度估算结果小 10%[4]。观察实验结果还发现,碰撞车离开加速段进入泄压段后速度仍在增加,碰撞速度与离开加速段的速度不同。

随着计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)非稳流仿真计算的发展,利用 CFD 原理并结合动网格理论及 6DOF 理论的应用[6]研究弹道发射过程已经成为一种有效的方法,并广泛应用于子弹、炮弹和导弹等武器发射过程或飞机投弹分离过程等领域[7-10]。此外,Zhang 等[11]还利用 CFD 方法研究了投射物离开 30 mm 口径枪口后的加速过程,结果表明,其速度在 0.8 ms 内由 843.99 m/s 增加到 899.28 m/s。本文中利用 CFD 方法对 SSAGIT 的发射过程进行仿真计算,得出碰撞车的运行速度,并与实验结果作比较,进而分析发射过程中整个发射空间的流场变化,提取所需参数的变化曲线,以期为建立准确的速度估算理论提供依据和参考。

1 仿真计算方法

ANSYS-Fluent 中的动网格模型可用来模拟边界运动或变形引起的流体域形状随时间变化问题。在 SSAGIT 发射过程中,碰撞车在气压推力的作用下向前加速运动,加速段和泄压段的流体域形状均随着碰撞车的运动而改变,为便于计算,流体域模型中需区分静态网格区域和动态网格区域[12]。碰撞

* 收稿日期: 2016-12-13; 修回日期: 2017-03-13
基金项目: 国家自然科学基金项目(U1334208)
第一作者: 肖程欢(1989—),男,硕士研究生; 通信作者: 鲁寨军,qlzjzd@csu.edu.cn。

车的运动规律则利用 6DOF 解算器确定[13]。动网格的计算原理是:在每个时间步上计算碰撞车边界的位移,根据计算所得边界的位置更新内部体网格节点的位置。

1.1 静态网格区域流体守恒方程

静态网格区域采用可压缩理想气体模型,流体连续性方程和动量方程可写成通用变量形式[12]:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\varphi\boldsymbol{u})=\nabla\cdot(\Gamma\nabla\varphi)+S_{\varphi} \tag{1}$$

式中:φ 为通用变量,Γ 为广义扩散系数,ρ 为流体密度,$\boldsymbol{u}$ 为流体速度矢量,S_{φ} 为 φ 所对应的源项。方程左边两项分别表示变量随时间的变化率和对流引起的流出率,右边两项分别表示扩散引起的增加率和源项引起的增加率。

1.2 动网格区域流体守恒方程

边界移动的任意控制体 V 中,一般标量 φ 的守恒型方程[13]可以表示为:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_{V}\rho\varphi\,\mathrm{d}V+\int_{\partial V}\rho\varphi(\boldsymbol{u}-\boldsymbol{u}_{g})\,\mathrm{d}\boldsymbol{A}=\int_{\partial V}\Gamma\,\nabla\varphi\,\mathrm{d}A+\int_{V}S_{\varphi}\,\mathrm{d}V \tag{2}$$

式中:V 为空间中大小和形状都随时间变化的控制体积;$\boldsymbol{A}$ 为控制体所对应的面向量;∂V 为控制体积的运动边界;$\boldsymbol{u}_{\mathrm{g}}$ 为运动网格的运动速度。CFD 中对时间的微分项采用一阶向后差分方程进行离散。

1.3 湍流模型

为了更好地描述湍流,选用二方程的 Realizable k-ε 模型[13],其湍动能及耗散率输运方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial \mathrm{t}}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_{\mathrm{t}}}{\sigma_{\mathrm{k}}}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_{\mathrm{k}}+G_{\mathrm{b}}-\rho\varepsilon-Y_{\mathrm{M}}+S_{\mathrm{k}} \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_{\mathrm{t}}}{\sigma_{\varepsilon}}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+\rho C_1 E\varepsilon-\rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{v\varepsilon}}+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}G_{\mathrm{b}}+S_{\varepsilon} \tag{4}$$

式中:$C_1=\max\left(0.43,\dfrac{\eta}{\eta+5}\right)$,$\eta=\sqrt{2S_{ij}S_{ij}}\dfrac{k}{\varepsilon}$,$S_{ij}=\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial u_i}{\partial x_j}+\dfrac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$;$u_i$ 为流体沿 i 方向的流速,μ_{t} 为流体动力黏度;G_{k} 由平均速度梯度引起的湍动能产生;G_{b} 由浮力影响引起的湍动能产生;Y_{M} 为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响;$C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$、$C_{3\varepsilon}$、C_2、A_0 为经验常数,默认值可分别取为 1.44、1.92、0.09、1.9、4.0。σ_{k} 和 σ_{ε} 分别为湍动能和湍动能耗散率对应的普朗特数,默认值分别为 1.0 和 1.3。

1.4 6DOF 耦合运动方程

仿真计算中,碰撞车的运行速度由其所受的气动载荷所决定,这里采用 6DOF 方法[13]计算其加速过程。由于碰撞车的截面呈矩形,故不考虑其绕质心的转动,惯性系下质心平动方程为:

$$ma=\sum F \tag{5}$$

式中:m 为碰撞车质量,a 为碰撞车的加速度,$\sum F$ 为碰撞车所受外力之和。

1.5 PISO 算法

对于非稳态可压缩流动的数值计算,Issa[14]提出了 PISO 算法,即为压力的隐式算子分割算法。与 SIMPLE 算法不同的是,PISO 算法中的压力和速度解需经过两次修正,即在 SIMPLE 算法的基础上对压力和速度进行二次修正,如图 1 所示。与 SIMPLE 算法和 SIMPLEC 算法相比,虽然 PISO 算法涉及更多的计算步骤,但收敛速度更快,计算效率更高。

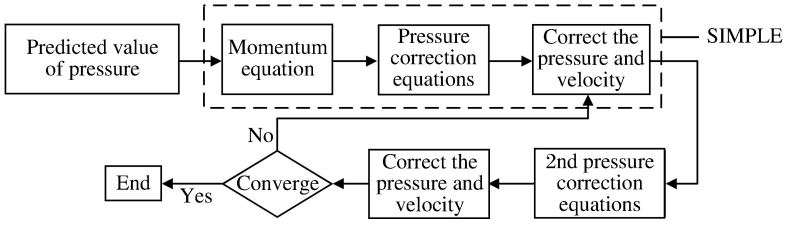


图 1 PISO 算法流程图

Fig. 1 Flowchart of PISO algorithm

2　计算模型与相关参数

碰撞车加速模型如图 2 所示。该模型由储气罐、碰撞车、加速段、泄压段和外部空气组成，储气罐的容积为 4 m^3，加速段长度为 21 m，泄压段和外部空气计算域长度为 9 m，碰撞车壁面与加速段壁面间存在 10 mm 的间隙。加速段和泄压段横截面均为 440 mm×205 mm 矩形，但泄压段上、下面均开有宽度为 200 mm 的泄压槽，泄压段中的气体通过泄压槽与外部空气连接。储气罐采用四面体非结构网格，加速段、泄压段和外部空气均采用六面体结构网格，其中加速段和泄压段网格大小为 10 mm，间隙处取为 2 mm，储气罐和外部空气网格大小为 40 mm，总网格数为 887 584。外部空气为静止区域，加速段和泄压段为运动区域，车体为刚体，静止区域与运动区域采用滑移网格界面连接，将轨道两端口设为静止边界。运动区域采用铺层算法再生体网格，设置分裂因子为 0.4，合并因子为 0.2。

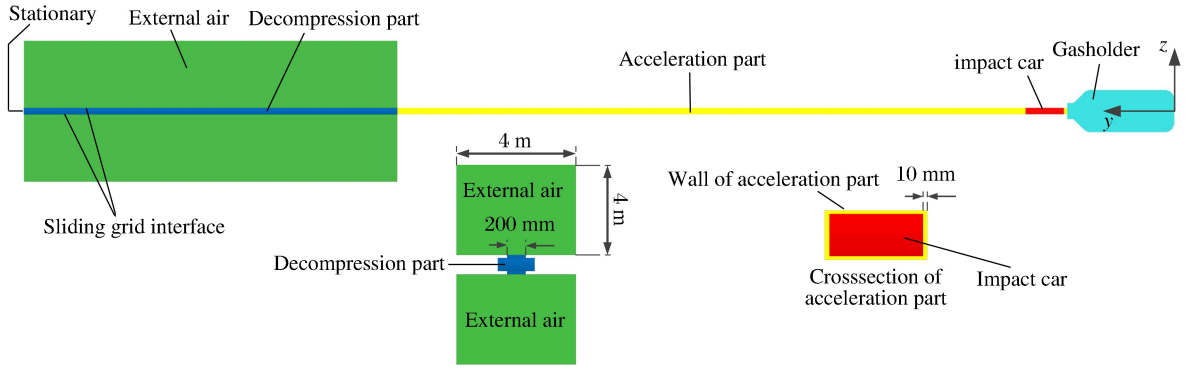


图 2　SSAGIT 模型

Fig. 2　SSAGIT model

设置气罐中初始压力为 p_0，出口边界条件为压力出口，采用 PISO 算法求解压力速度方程组，使用标准壁面函数计算近壁面区域的流动。在 UDF 中定义碰撞车的质量 m 和 6DOF 中的运动自由度，在理想状态下，车体在轨道内的加速过程仅考虑沿 y 轴的平移运动。根据实验要求，共进行了两种工况的碰撞实验，且每种工况进行 2 次重复性实验，实验参数如表 1 所示。

表 1　工况参数

Table 1　Parameters in two different work conditions

工况编号	m/kg	p_0/MPa	T/℃	工况编号	m/kg	p_0/MPa	T/℃
C1	355	0.98	20	C2	1 040	2.98	13

3　结果验证与加速过程分析

3.1　速度结果验证

为了测量碰撞车的运行速度，在泄压段入口处和出口处各安装一套激光测速系统，测速系统所测得 2 次实验中 C1、C2 工况下的速度如表 2 所示，v_1 表示碰撞车在加速段出口时（21 m）的速度，v_2 表示碰撞车在泄压段出口时 30 m 的速度。

表 2　实验速度

Table 2　Experiment velocity

实验编号	C1		C2	
	v_1/(m·s^{-1})	v_2/(m·s^{-1})	v_1/(m·s^{-1})	v_2/(m·s^{-1})
1	78.1	79.8	80.3	82.1
2	77.6	79.5	80.0	81.7

图 3 为工况 C1、C2 下碰撞车速度的仿真计算结果。曲线 1 为工况 C1 的仿真计算结果，速度 v_1 和 v_2 的值分别为 78.4 和 80.2 m/s，曲线 2 为工况 C2 的计算结果，v_1 和 v_2 分别为 80.8 和 82.7 m/s，两种工况的计算结果表明，碰撞车进入泄压段后速度在继续增加，且在泄压段中的速度增加量 Δv 约为 2 m/s。仿真计算结果与实验测量结果非常接近，因此，仿真分析的结果具备参考价值。

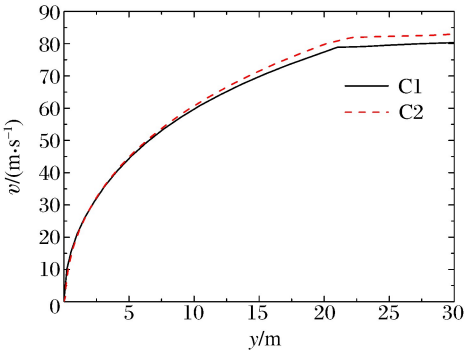


图 3 碰撞车速度仿真结果

Fig. 2 Simulation velocities of impact car in C1, C2 conditions

3.2 加速过程分析

碰撞车在加速段的加速过程如图 4 所示，高压气体推着碰撞车不断沿 y 轴方向加速前进。由于碰撞车与加速段内轨道之间有 10 mm 宽度的间隙，储气罐中的一部分气体通过间隙加速膨胀至碰撞车前端，产生气体泄漏现象，泄漏出的气体逐渐充满加速段，在 70 ms 时进入泄压段，并最终形成较稳定的车前初始流场。在 470 ms 时，碰撞车开始进入泄压段，经加速段端口流出的气体压力迅速降低，并膨胀加速进入泄压段和外部环境，形成矩形射流，碰撞车在射流的冲击作用下继续加速前进。

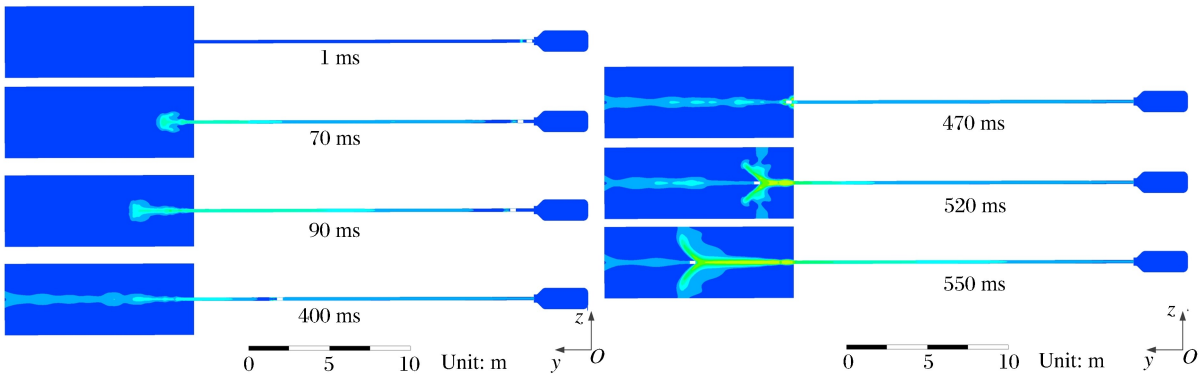


图 4 加速过程(速度云图)

Fig. 4 Process in acceleration part (velocity contour)

初始时刻气体泄漏过程如图 5 所示。由黎曼问题[15]可知，储气罐中的高压气体和加速段中的低压气体之间存在间断面，在间断面处产生一个左行激波和右行膨胀波，高压侧气体经间断面往低压侧加速流动，流体在间隙中的速度达到亚音速，亚音速流体进入车前空间后继续膨胀加速，车前近壁面气体最高流速达到 544 m/s，带动加速段中气体加速流动，导致碰撞车前端的气压呈微弱的负压状态，形成车前初始流场。

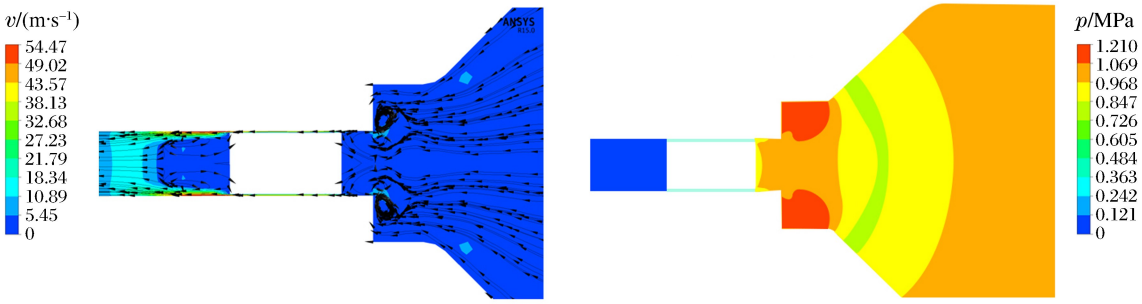


图 5 车前初始流场

Fig. 5 Initial flow field in front of impact car

图 6 为碰撞车进入泄压段后的压力和速度云图，上半部分为速度云图，下半部分为压力云图。由图 6 可知，碰撞车进入泄压段后，车前端面的泄压段初始流场受压缩扰动的影响而逐渐消失。车后高压气体进入泄压段后，气体膨胀，在加速段出口处形成一系列简单中心膨胀波，气体速度增加，压力下降，形成冲击射流。近尾部端面所积聚的流体不断受到高速气体的压缩作用，产生一系列压缩波，该处的气体流速下降，压力升高，由此推动碰撞车加速前进。外部空气受冲击射流的高速剪切作用，产生剪切层，剪切层两侧的流体流速不等，压力相当。

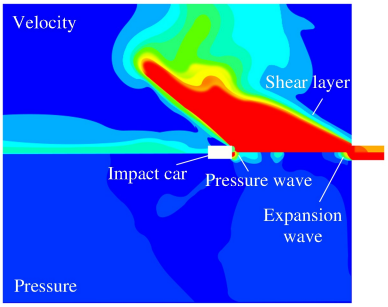


图 6　泄压段运行图

Fig. 6　Running diagram of impact car in decompression part

3.3　压力变化分析

两种工况下，碰撞车发射过程中 p_f、p_b、p_g、p_f/p_b 随运行距离 y 的变化情况如图 7 所示，其中 p_f 为车前气压，p_b 为车后气压，p_g 为储气罐气压，p_f/p_b 为车前气压与车后气压之比。发射初始时刻，储气罐中的高压气体进入发射段，车后存在一系列波，各种波的反射相交使得车后气体参数变化十分复杂，因此车后气压在发射初期存在明显波动现象。在加速段，p_g 和 p_b 的值相差不大。进入泄压段后，储气罐中的气体通过射流形式喷出，并通过泄压槽进入周围大气中，p_g 缓慢下降，而车后气压 p_b 出现断崖式下跌，最后保持一个较小数值，因此碰撞车在泄压段存在缓慢加速，其最终的碰撞速度 v_2 略大于加速段出口时的速度 v_1。观察车前气压的变化情况可知：一方面，经过间隙泄漏出来的气流带动碰撞车前端面气体流动，车前气压下降；另一方面，碰撞车加速前进压缩车前气体，使其压力上升。因此，车前气压出现负压和正压交替现象。由于其数值始终较小，p_f/p_b 值始终在 0.06 以下，故车前气压对碰撞车运动过程的影响非常小，可以忽略不计。

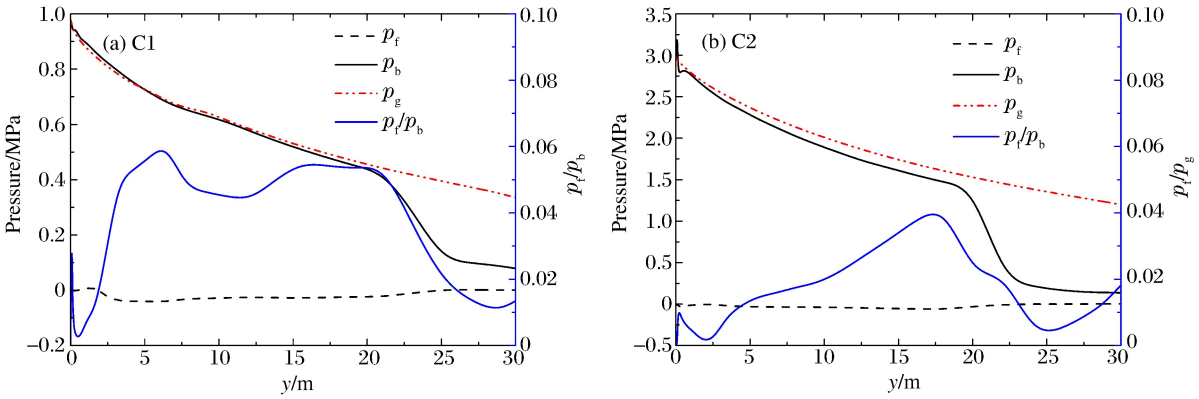


图 7　C1、C2 工况下压力随碰撞车运行距离变化

Fig. 7　Variation of pressure with running distance in C1, C2 conditions

4　结　论

利用 CFD 方法计算了 SSAGIT 装置两种工况下的发射过程，得到的碰撞车速度与实验测量结果吻合，说明了仿真结果的可靠性。在此基础上，分析碰撞车在整个发射过程的流场变化。在发射过程中，储气罐的高压气体通过间隙进入车前空间，形成车前初始流场，并依次逐渐充满加速段和泄压段。碰撞车在泄压段中仍存在加速现象，且速度增量约为 2 m/s。

参考文献：

[1]　陈大年. 二级轻气炮内弹道的数值模拟与性能分析[J]. 爆炸与冲击，1989，9(1)：37-42.

CHEN DANIAN. Numerical simulation and performance analysis of the two-stage light gun[J]. Explosion and Shock Waves, 1989,9(1):37-42.
[2] FRANCESCONI A, PAVARIN D, BETTELLA A, et al. A special design condition to increase the performance of two-stage light-gas guns[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008,35(12):1510-1515.
[3] SIEGEL A E. The theory of high speed guns: AD475660[R]. France: Advisory Group for Aerospace Research and Development, 1965.
[4] SHEPPARD L M. Theory of transonic gas gun[R]. Australia: Defense Science and Technology Organization Weapons Research Establishment, 1977:1-14.
[5] HUTCHINGS I M, ROCHESTER M C, CAMUS J J. A rectangular-bore gas gun[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1977,10(5):455-457.
[6] 张来平,邓小刚,张涵信. 动网格生成技术及非定常计算方法进展综述[J]. 力学进展,2010,40(4):424-447.
ZHANG Laiping, DENG Xiaogang, ZHANG Hanxin. Reviews of moving grid generation techniques and numerical methods for unsteady flows[J]. Advances in mechanics, 2010,40(4):424-447.
[7] QIN Q Y, ZHANG X B. Numerical investigation on combustion in muzzle flows using an inert gas labeling method [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2016,101:91-103.
[8] ZHUO C F, FENG F, WU X S. Development process of muzzle flows including a gun-launched missile[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015,28(2):385-386.
[9] COSTA E, LAGASCO F. Development of a 3D numerical methodology for fast prediction of gun blast induced loading[J]. Shock Waves, 2014,24(3):257-265.
[10] SANDOVAL P, CORNEJO P, TINAPP F. Evaluating the longitudinal stability of an UAV using a CFD-6DOF model[J]. Aerospace Science & Technology, 2015,43:463-470.
[11] ZHANG X B, YU W. Aerodynamic analysis of projectile in gun system firing process[J]. Journal of Applied Mechanics, 2010,77(5):769-775.
[12] BLAZEK J. Computational fluid dynamics: principles and applications[M]. New York: Elsevier, 2015:81-96.
[13] ANSYS Inc. ANSYS FLUENT: 14.0 theory guide[Z]. PA, Canonsburg, 2011.
[14] ISSA R I, GOSMAN A D, WATKINS A P. The computation of compressible and incompressible recirculating flows by a non-iterative implicit scheme[J]. Journal of Computational Physics, 1986,62(1):66-82.
[15] 王保国,离歌,黄伟光,等. 非定常气体动力学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2012:122-150.

Numerical simulation of launching process of air gun impact test-bed

XIAO Chenghuan[1,2], LU Zhaijun[1,2]
(1. *Key Laboratory of Traffic Safety on Track, Ministry of Education, Central South University, Changsha* 410075, *Hunan, China*;
2. *Collaborative Innovation Center of Traffic Safety on Track, Changsha* 410075, *Hunan, China*)

Abstract: We simulated the launching progress of SSAGIT using the computational fluid dynamics (CFD) and the velocity of the impact car obtained from calculation are consistent with the experiment results. Based on this, we investigated the flow field, the pressure in the front and back of the car, and the pressure of the gasholder. The results showed that the launch field was filled with the leakage gas before the arrival of the impact car, causing the development of an initial flow field, and the alternatively positive and negative variations of the pressure in the front of the car, but its influence on the acceleration process was negligible because of its small value. In addition, the acceleration was maintained due to the effect of the jet after the impacted car entered the decompression part, and the increment was about 2 m/s.

Keywords: computational fluid dynamics (CFD); simulation analysis; dynamic mesh; air gun

(责任编辑 王玉锋)