

doi: 10.7690/bgzdh.2024.08.012

装甲车三防系统超压数值模拟及影响因素

李思维, 李宁宁

(陆军防化学院指挥系, 北京 102205)

摘要: 针对装甲车三防系统超压状态的准确控制问题, 基于 CFD 仿真分析法, 研究不同因素对装甲车内部超压状态的影响。通过理论分析、几何建模、数值仿真和模拟试验等方法, 研究外流场速度、漏气面积与风机速度等因素对内部超压的影响规律。结果表明: 外流场速度与超压值基本呈线型反比关系, 但总体影响较小; 风机流量、漏气面积对车舱内超压值具有显著影响, 并呈幂函数关系; 可为作战决策、装备维修、装备改进提供科学依据。

关键词: 机动平台; 三防系统; 超压; 影响因素

中图分类号: TJ811 **文献标志码:** A

Numerical Simulation and Influencing Factors of Overpressure in Armored Vehicle's NBC Defense System

Li Siwei, Li Ningning

(Department of Command, Institute of NBC Defense, Beijing 102205, China)

Abstract: Aiming at the accurate control of the overpressure state of the three-proof system of the armored vehicle, the influence of different factors on the overpressure state of the armored vehicle interior is studied based on CFD simulation analysis. Through theoretical analysis, geometric modeling, numerical simulation and simulation test, the influence of external flow field velocity, leakage area and fan speed on the internal overpressure was studied. The results show that the velocity of the external flow field is inversely proportional to the overpressure value, but the overall effect is small. The fan flow rate and leakage area have a significant effect on the cabin overpressure, and the relationship is a power function. It can provide scientific basis for operational decision-making, equipment maintenance and equipment improvement.

Keywords: mobile platform; NBC defense system; overpressure; influencing factors

0 引言

装甲车是供作战、乘载和运输的车辆, 是合成部(分)队输送战斗力量的主要工具, 除具有较高的机动速度、较强的越野性能和一定的对空自卫外, 还具有一定的核生化防护能力。战时发生核生化袭击后, 三防系统内的核化报警器会立即报警, 同时开启过滤通风系统, 利用风机向车舱内输送过滤净化后的气体, 使得车舱内部压力大于外部, 即达到超压状态, 从而有效地对环境空气中的核生化污染物进行隔绝, 起到加压防护的效果^[1]。

从调研的部队装备实际情况看, 受长期磨损、局部变形、风机老化等因素影响, 装甲车的三防系统防护效果难以保证, 主要原因是内部超压不满足设计要求, 难以对外部有毒有害气体进行有效防护。笔者以典型装甲车辆为例, 采用 CFD 仿真软件建立三防系统的物理模型和流体动力学模型^[2], 设置合理的边界条件进行仿真计算, 通过改变各因素的参数模拟产生压强, 从而模拟超压建立时间和压力分

布, 根据计算结果分析影响因素并研究其影响规律, 为核生化环境下防护决策以及后续装备改型升级提供数据支撑。

1 陆上机动平台模型构建与分析

1.1 数值模型

气体在舱内的流动满足质量守恒定律和动量守恒定律, 其公式分别为:

连续性方程:

$$\partial\rho/\partial t + \nabla(\rho u) = 0。 \quad (1)$$

动量方程:

$$\partial(\rho u)/\partial t + \nabla(\rho uu) = \rho f - \nabla p + \nabla\tau。 \quad (2)$$

能量方程:

$$\rho c \partial T_f / \partial t + \nabla \cdot (\rho c v T) = \nabla \cdot (k \cdot \nabla T)。 \quad (3)$$

式中: ρ 为流体密度; t 为时间; u 为流体速度; ρf 为体积力; ∇p 为压力梯度力; $\nabla\tau$ 为流体黏性力; c 为比热容; T_f 为导热系数。

在三防系统工作时, 风机的出风口可能会受到

收稿日期: 2024-05-13; 修回日期: 2024-06-25

第一作者: 李思维(1989—), 女, 河北人, 硕士。

过滤系统和除尘系统的影响，出口空气的流量、温度会出现变化，也可能出现表面滑移和空穴等现象。为了简化工程计算，采用瞬态流场仿真分析方法，进行以下假设：1) 忽略体积力的作用；2) 风机流量恒定；3) 流体在界面上无滑移；4) 空气是牛顿流体；5) 外流场为层流，装甲车内部为湍流；6) 温度恒定。

1.2 几何模型

典型的装甲车包括坦克、装甲运输车、指挥车和自行火炮等。为了能够适应核生化环境下作战需要，在设计时都安装了过滤通风系统，实现对核生化防护。以典型的某履带装甲运输车作为研究对象，在其内部尺寸测量数据及 CAD 3 维模型数据基础上，结合数值模拟计算需求，建立车内舱室、窗户缝隙、鼓风机全尺寸 3 维模型^[3]。在建立 3 维模型时，为了避免计算在局部不收敛，对部分结构进行了简化，并对不影响流场分布的履带部分进行了合并和等效处理，最终形成了如图 1 所示的装甲车几何模型。

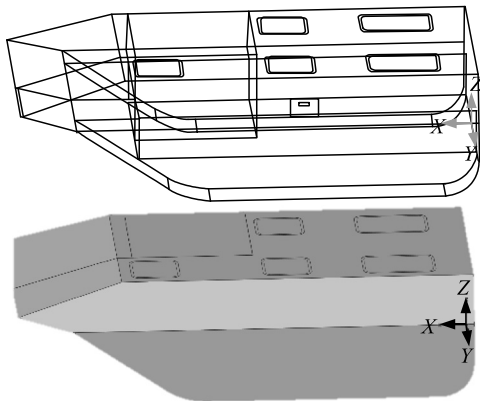


图 1 装甲车辆 3 维模型

为了模拟装甲车在运行过程中因磨损、老化造成的漏气情况，模型主要考虑在车窗与车体之间设置缝隙，来等效车体的漏气面积。车内的三防系统主要包括风机、除尘系统和过滤系统，在车内主要以出风口的形式提供洁净空气，模型中以直径相同的圆柱体等效风机出风口，如表 1 所示。

表 1 装甲车模型基本参数 mm

类目	数值	类目	数值
车长	6 600	壁厚	10
车宽	3 200	盖板厚度	1
车高	1 800	风机出口半径	130

在装甲车模型外部设立流场，以模拟装甲车三防系统的工作环境，并设置相应的空气组分。为了避免回流导致 CFD 计算不收敛的情况，在模型的下

风方向设置 4 倍的模型特征长度。结合装甲车模型特点和计算量需求，将外部流场延伸到车前方、顶部、两侧均为 1 600 mm，车后方为 27 000 mm，以保证计算域足够大，且计算域边界条件尽可能的接近实际流场，如图 2 所示。

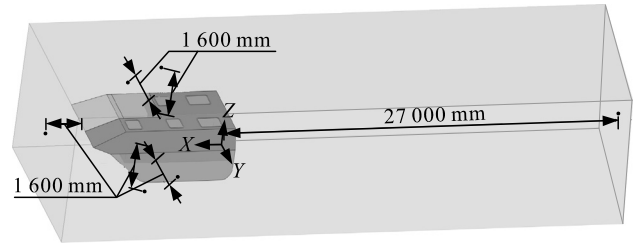


图 2 计算域设置

1.3 网络划分

在 ANSYS Mesh 软件中，采用混合四面体网络划分。为了保证格网络正交质量，同时避免网格单元过多使得运算量过大，采用了整体网格单元尺寸为 1 m，捕获曲率最小尺寸为 0.002 m，捕获邻近度最小尺寸为 0.002 m 的网格划分，图 3 为以装甲车一个车窗存在 1 mm 缝隙的结构模型为例，生成的网格文件。其中，生成网格数量为 5 572 553。网络最小正交质量为 0.116，最小单元质量为 0.207。

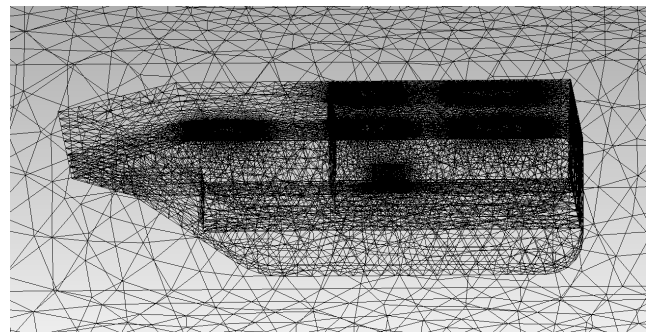


图 3 局部网格

1.4 边界条件设置

设置流体材料为 Air，流体区域为外流场和内流场。其中外流场模拟外界受污染的空气，而内流场模拟车内洁净的空气。定义 inlet-1 为外流场的速度入口，参数值设为外界风速与装甲车行驶速度的相对值，定义 inlet-2 为内流场速度入口，参数值设为装甲车内部风机的排风速度。定义 Outlet 为外流场压力出口，参数值设为一个大气压。内壁设置为移动壁面。选取 Hybrid Initialization 的方法进行初始化，采用 SIMPLE 算法处理控制方程，包括压力、动量和能量方程。流动与热能方程均选择 second order upwind 格式。计算的绝对收敛残差设置为 1.0×10^{-3} 。

2 超压数值影响因素分析及规律研究

模型中风机出风口横截面半径为 130 mm，其面积为 0.053 09 m²。在装甲车的实际工况条件下，影响车体密封的最大影响因素为车窗的密封条老化，造成密封不严；因此，模型中气体泄漏面积采用装甲车窗户缝隙来等效。假定装甲车窗户缝隙为 1 mm，分别研究一个车窗泄漏，到几个车窗同时泄漏的不同情况，来模拟车辆密封条件逐渐变差的过程。车窗 1、2、3 的周长为 2.180 m，车窗 4、5 的周长为 2.842 m。换算成车窗 1、2、3 的气体漏气面积为 2.180×10⁻³ m²，车窗 4、5 的漏气面积为 2.842×10⁻³ m²。

在上述初始条件下，最终结果为稳态过程，车体内部的任意一点压强是相同的，为了在计算时监控车内压强的数据变化，选取舱内一点(x=1.6 m, y=0, z=0.5 m)进行计算监控。

2.1 外流场速度影响分析及规律研究

外流场的存在使得车体缝隙区域的气体流场产生变化，如图 4 所示。设外流场速度为 v_0 ，在迎风方向由于外流场空气流动方向与内部气流方向相反，因此 $v_1 < v_0$ ；而在背风方向由于外流场空气流动方向与内部气流方向一致，同时叠加车窗盖板尾部的射流效应，因此 $v_3 > v_0$ ；根据连续性方程，伴随着加速运动的是密度的变化，可推导出在 A 点形成局部正压，B 点形成负压，从而形成对内部空气的“抽吸”效应，加速内部空气流出，使内部压强变小。

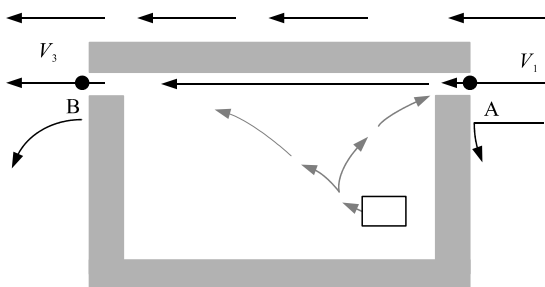


图 4 缝隙局部流场

设外流场速度入口 inlet1 分别设置为 0、2.5、5.0、7.5、10 和 12.5 m/s，当速度入口 inlet2，即风机排风速度为 2 m/s，泄漏面积为 3 个车窗同时漏气，即漏气面积为 3×2.180×10⁻³ m²时，对应不同超压值(内外压差)结果如表 2 所示。

将以上数据绘制散点图，观察发现超压值与外流场速度基本呈现一个线性关系，利用线性回归的方法进行拟合，得到如图 5 所示的拟合结果。从图

中可以看到，外流场速度越大，超压值越小，两者呈现线性反比的关系，与理论分析一致。

表 2 不同风速对超压值的影响(风机流速 2 m/s)

序号	外流场速度/(m/s)	超压值/Pa
1	0	374.0
2	2.5	368.6
3	5.0	360.9
4	7.5	351.7
5	10.0	338.7
6	12.5	334.1

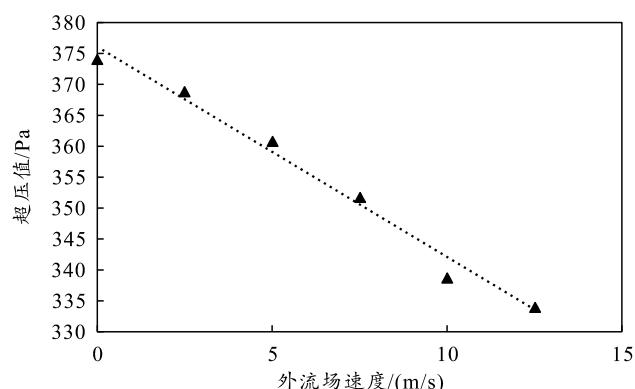


图 5 外流场速度-超压值拟合曲线

对仿真模拟数据进一步分析，比较外流场的最大速度 12.5 m/s 与最小速度 0 条件下的计算结果，超压值的变化为 10.7%。外流场速度与超压值之间基本呈线型反比关系，但总体影响比较小。

2.2 漏气面积与风机速度影响分析及规律研究

由常用气体泄漏率计算公式：

$$Q = C \times A \times \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (4)$$

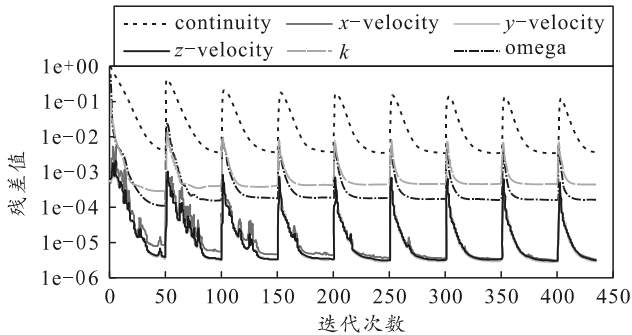
式中： Q 为气体泄漏率，m³/s； C 为流量系数，取决于容器形状和泄漏口形式； A 为泄漏口面积，m²； ΔP 为内外压力差，Pa； ρ 为气体密度，kg/m³。可知气体的泄漏率与泄漏面积以及内外压差值有关，且成幂函数曲线规律。

在本模拟实验中，当风机流量与气体泄漏率相等时，即 $Q=V \times S$ ，其中 V 为风机排风速度，m/s； S 为风机出风口横截面积，m²。流场动态平衡，仿真结果输出稳定，从而得到最终的模拟实验值。通过以上分析可知，装甲车三防系统启动后的超压值与装备等效泄漏面积、风机排风速度存在特定关系，并且三者之间可用幂函数曲线规律来表达。基于此，设计了双因素，5 水平的全面试验，进行模拟仿真，得到表 3 所示的超压值数据。

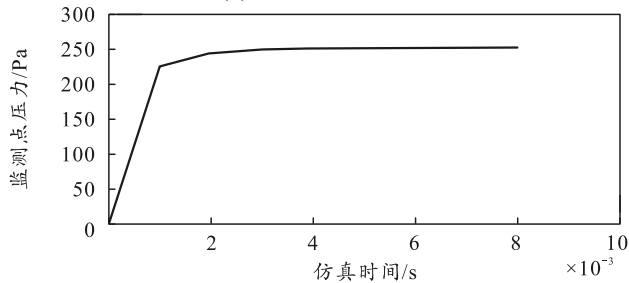
图 6 所示为该仿真实验中，风机速度为 3 m/s、泄漏面积为 12.220×10⁻³ m²(5 个车窗同时泄漏)时的计算残差图以及得到的监测点压力曲线。

表 3 风机速度与漏气面积对超压值的影响 Pa

漏气面积 × 10 ⁻³ /m ²	风机速度/(m/s)				
	1	1.5	2	2.5	3
2.180	767.1	1 636.1	2 815.2	4 301.2	6 092.6
4.360	223.0	463.7	787.6	1 193.5	1 680.3
6.540	110.0	223.0	374.0	562.5	787.8
9.382	60.8	119.3	196.9	293.2	407.9
12.220	40.1	76.4	123.5	183.5	252.3



(a) 计算残差曲线



(b) 监测点压力曲线

图 6 计算结果(风机速度 3 m/s, 泄露面积 12.22 × 10⁻³ m²)

将风机速度换算成风机流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$, 依据气体泄漏率公式, 对风机流量、漏气面积、超压值进行曲线拟合, 如图 7 所示。并得到变量之间的关系式为^[4]:

$$Q/A = 0.5907 \Delta P^{0.5568} \quad (5)$$

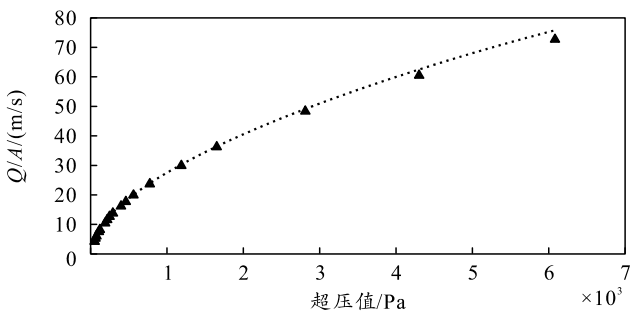


图 7 风机流量/漏气面积-超压值拟合曲线

通过仿真实验, 拟合得出了适用于本文中研究模型的气体泄漏公式。在理论公式基础上, 确定了流量系数值, 并对幂指数进行了实际修正, 使得拟合结果更具有现实指导意义。例如, 在实际装备运用中, 风机流量为 300 m³/h, 装甲车三防系统开启, 要求超压值能达到 300 Pa, 通过以上公式计算, 可以得到漏气面积要小于 $5.89 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, 一旦漏气面积超过该数值, 要及时进行维修, 以确保三防系统的有效性。

基于此公式, 后续也可对风机进行装备改进, 使其排风速度依据漏气面积的变化规律进行自动控制调节^[5], 以保证超压值能够达到三防系统设计的要求, 确保核生化条件下人员的生命安全。

3 结论

笔者构建了装甲车 3 维仿真模型, 运用数值模拟方法分别研究了外流场速度、漏气面积、风机流量对于陆上机动平台建立超压状态时的影响, 并进行了数据拟合。研究发现, 外流场速度与超压值呈线型反比关系, 但总体影响较小。风机流量、漏气面积对车舱内超压值具有显著影响, 呈幂函数关系, 并通过实际仿真, 得出了适用于该研究模型的因素之间关系式。当风机流量和超压值确定时, 可以计算得出漏气面积的临界值, 提示装备维修人员及时进行漏气维修。该研究对后续研究风机排风速度的自动控制、装备性能改进提供了实际数据支撑。

参考文献:

- [1] 胡劲. 集体防护系统自动控制和监测技术[J]. 兵工自动化, 2010, 29(3): 79-80.
- [2] 凌桂龙. Fluent 2020 流体计算从入门到精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2021: 48-68.
- [3] 冯誉柏. 坦克装甲车辆设计(防护系统卷)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015: 310-319.
- [4] 方勇. 集体防护系统泄漏量分析[J]. 航海工程, 2013, 42(4): 114-115.
- [5] 刘秀峰, 喻俊峰, 益诚, 等. 集体防护区超压建立过程分析[J]. 航海工程, 2017, 46(3): 147-149.