

DOI:10.11918/202502027

暴雨环境下 155 mm 榴弹气动特性多相流耦合分析

管 军^{1,2}, 卯昌杰¹, 蒋桂林³, 尹洪桥¹, 易文俊²

(1. 江苏科技大学 自动化学院, 江苏 镇江 212100; 2. 瞬态物理全国重点实验室(南京理工大学), 南京 210094; 3. 淮海工业集团有限公司, 山西 长治 046012)

摘要: 为研究恶劣气候条件下弹丸飞行过程中的绕流流场和气动特性, 基于 Marshall-Palmer 雨滴谱, 采用双向动量耦合 Eulerian-Lagrangian 方法研究了某 155 mm 榴弹在暴雨环境中的气动性能。利用离散相模型 (DPM) 对雨滴粒子的运动轨迹进行非稳态追踪, 并结合随机游走扩散模型模拟连续相湍流对雨滴扩散的影响。提出了一种拉格朗日多相流 (LMF) 与拉格朗日壁膜 (LWF) 相结合的方法, 研究雨滴撞击弹体表面后液膜的形成和演化规律。结果表明, 雨滴撞击弹体表面形成液膜并呈现流动轨迹, 液膜主要分布在迎风面 (尤其是弹头区域及弹带前缘), 最大厚度约 0.02 mm, 最大质量接近 0.16 mg; 液膜的形成增大了弹体表面的粗糙度, 使最大剪切应力从无雨环境下的 666 Pa 增至暴雨条件下的 2 350 Pa, 最大摩擦系数从 0.008 增至 0.025; 暴雨对弹丸的气动系数也会产生不利影响, 最大阻力系数较无雨条件下增加了 6.75%, 而升力系数略有下降, 最大下降了 1.9%。该研究可有效捕捉暴雨环境下弹体表面液膜的动态变化及其气动效应, 为复杂环境下弹丸设计与性能优化提供理论支持。

关键词: 暴雨环境; 气动特性; DPM 模型; Eulerian-Lagrangian 模型; 液膜; 雨滴谱

中图分类号: E932.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2026)02-0183-15

Multiphase coupling analysis of the aerodynamic characteristics of 155 mm howitzer shell flow in a heavy rain environment

GUAN Jun^{1,2}, MAO Changjie¹, JIANG Guilin³, YIN Hongqiao¹, YI Wenjun²

(1. School of Automation, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, Jiangsu, China; 2. National Key Laboratory of Transient Physics (Nanjing University of Science and Technology), Nanjing 210094, China; 3. Huaihai Industry Group Co., Ltd., Changzhi 046012, Shanxi, China)

Abstract: To investigate the flow field and aerodynamic characteristics of a projectile during flight under adverse weather conditions, this study applies the two-way momentum-coupled Eulerian-Lagrangian method to analyze the aerodynamic performance of a 155 mm howitzer shell in a heavy rain environment based on the Marshall-Palmer raindrop spectrum. The unsteady tracking of raindrop particle trajectories is conducted using the discrete phase model (DPM), while the random walk diffusion model is incorporated to simulate the effects of turbulent diffusion in the continuous phase on raindrop motion. A novel methodology is proposed that combines the Lagrangian multiphase flow (LMF) model with the Lagrangian wall film (LWF) model to simulate the formation and evolution of wall films resulting from raindrop impacts on the projectile surface. The results show that raindrop impacts lead to the formation of wall films that exhibit flow trajectories, with the films predominantly distributed on the windward surface (particularly around the projectile nose and band regions). The maximum wall film thickness reaches approximately 0.02 mm, and the maximum film mass is about 0.16 mg; The formation of wall films increases the surface roughness, significantly raising the shear stress, the maximum shear stress escalates from 666 Pa in rain-free conditions to 2 350 Pa under heavy rain, and the maximum value increasing from 0.008 to 0.025; Rainfall also adversely affects the projectile's aerodynamic coefficients, with the maximum drag coefficient increasing by 6.75%, while the lift coefficient experiences a slight reduction, with a maximum decrease of 1.9%. This approach effectively captures the dynamic evolution of wall films on the projectile surface under heavy rain conditions and their impact on aerodynamic performance, providing theoretical support for the projectile design and performance

收稿日期: 2025-02-19; 录用日期: 2025-03-13; 网络首发日期: 2025-10-20

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20220822.0756.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(62203191); 国防基础加强技术领域基金(2023JCJQJ0357); 国防科技重点实验室基金(2022JCJQLB06105); 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(22KJB590001)

作者简介: 管 军(1987—), 男, 副教授, 硕士生导师

通信作者: 管 军, jguan@just.edu.cn

optimization in complex environmental conditions.

Keywords: heavy rain environment; aerodynamic characteristics; DPM model; Eulerian-Lagrangian model; wall film; raindrop spectrum

在未来战场中,战场时空界限逐渐模糊,恶劣气象条件频发,武器装备(尤其是火炮系统)的作战适应性面临更高要求。暴雨作为典型的恶劣气象条件,对弹药的外弹道性能影响显著。传统武器装备研发通常规避复杂气象环境,侧重于剥离其对弹药性能的干扰。然而,暴雨可能对弹丸的飞行轨迹、稳定性及气动特性造成严重干扰,影响射击精度、机动性和控制效率,从而影响武器装备的实际使用效果。尤其在火炮武器的科研和定型试验中,暴雨条件常被忽视,限制了弹丸实际作战适应性分析^[1-2]。因此,研究暴雨环境对弹药性能的影响,对于提升弹丸在复杂气象条件下的作战能力、优化武器系统设计和提高作战效能具有重要的理论和实用价值。

多相流气动特性是流体力学的重要研究领域,涵盖了气相、液相和固相的相互作用及其在复杂环境中的流动行为。近年来,针对气液两相流的研究取得了重要进展,主要集中在交通工具(如飞机、汽车)在暴雨条件下的气动性能影响^[3-6]。然而,这些研究大多基于低速、不可压、低雷诺数的经典空气动力学模型,通过数值模拟和实验探索液滴撞击、表面水膜形成及气动性能退化机理^[7]。现有研究虽提供了重要参考,但在高速(亚音速、跨音速、超音速)飞行中的弹丸和极端环境的气液流动规律方面,仍存在诸多未解难题。

在多相流的建模方法中,欧拉-欧拉(Euler-Euler)法和欧拉-拉格朗日(Eulerian-Lagrangian)法是两种最为常用的技术手段。Euler-Euler法适用于密度较大的连续相流动问题,通过建立两相的质量、动量和能量守恒方程模拟交互作用,如VOF模型适用于相界面流动,Mixture模型适用于混合流动,Eulerian模型适用于分离与混合过程^[8-9];相比之下,Eulerian-Lagrangian法更适合描述稀疏分布的离散相流动(如降雨、飞溅液滴、颗粒扩散)^[10-11],其离散相模型(discrete phase model,DPM)能够精确追踪离散颗粒的运动轨迹,揭示离散相对连续相的影响机制,但在高浓度流动环境中存在局限性。现有研究主要针对大尺度物体(如飞机、汽车或翼型)的静态气动性能,较少关注动态气动特性和流动稳定性^[12],对于高速弹丸等小尺度、高速运动体在多相流环境下的气动性能及流场特性尚缺乏系统研究。近年来,针对高速弹丸在暴雨环境下的绕流流场和

气动特性的研究,开始重点围绕水膜层、边界动量损失等方面展开。文献[13]采用考虑转捩的剪切应力输运湍流模型(Transition SST)研究弹丸表面的贴体水膜层;文献[14]以M910弹丸和某120 mm迫击炮弹为研究对象,分析了不均匀的水膜层及雨滴粒子碰撞导致的弹丸边界层动量损失与气动性能下降的问题;文献[15]使用DPM模型研究了液滴颗粒与弹丸壁面碰撞及液膜形成过程,指出不稳定的液膜会加剧弹丸的气动性能损失,而稳定的液膜对弹丸气动性能的影响则相反。但是对于弹丸表面液膜(wall film)的形成、雨滴二次破碎、水膜分布、剪切应力、表面摩擦系数等因素对弹丸气动性能的影响和雨滴轨迹追踪仍是亟待解决的研究难点^[16]。此外,在气液两相流环境下,弹丸经历的非线性动力学过程较为复杂^[17-18]。液滴撞击弹丸表面时,可能形成水膜、溅射液滴或射流,不仅会改变弹丸的表面粗糙度,还会显著影响边界层特性和气动效率。同时,弹丸的高速运动和短时间尺度导致流场中的多相流耦合效应更为剧烈,这对传统的建模与数值方法提出了更高的精度和稳定性要求。

综上所述,现有研究在宏观气动性能恶化的机理探索方面取得了重要进展,但在小尺度高速弹体的多相流气动特性、动态气动性能及复杂流场演化规律等方面尚存明显不足,并且暴雨对弹丸气动特性的研究尚处于起步阶段。针对弹丸在暴雨环境下的绕流流场和气动特性开展深入研究,不仅对优化弹丸气动外形和结构具有重要指导意义,也为多相流的基础理论研究提供了新的视角和挑战。

本文以155 mm榴弹为研究对象,将空气视为连续相,雨滴视为离散相,基于Marshall-Palmer雨滴谱,采用Eulerian-Lagrangian方法,利用DPM模型对雨滴粒子的运动轨迹进行非稳态追踪,并结合双向动量耦合机制,分析暴雨环境下弹丸在飞行过程中外部绕流场的气-液两相流特性。

1 物理模型和假设条件

弹丸气动特性和结构外形密切相关,为研究超高速、高动态弹丸在复杂气象条件下的多相流耦合机理,首先明确研究对象的三维结构模型、网格划分方案及假设条件。

1.1 物理模型

以某155 mm榴弹为研究对象,采用三维建模软件SolidWorks根据某真实弹丸的全尺寸数据进行三维建模,坐标原点位于弹丸重心处,为聚焦弹丸气动特性的多相流耦合机制,对模型进行了适当简化,仅保留两条弹带,忽略弹丸船尾处的圆角,以便于后续的网格划分。物理模型如图1所示。

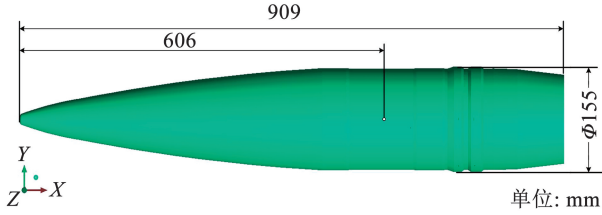


图1 某155 mm榴弹模型

Fig. 1 The model of a 155 mm howitzer shell

1.2 网格划分

为了平衡网格数量和计算精度,对弹丸的整体流体计算域采用结构网格划分。利用ICEM三维建模模块建立弹丸外流场的流体计算域:前方远场距离弹丸重心 $26D$ (D 为弹体直径),后方远场距离弹丸重心 $40D$,大圆柱体直径为 $30D$ 。

在网格划分过程中,弹丸边界层区域使用外O-Block切分,以加密其周围网格,第一层网格的高度设为 5×10^{-6} m,生成三维六面体结构化网格,总单元数约为 4.93×10^6 个。整体三维结构网格、整体二维结构网格、弹体附近结构网格分别如图2、3、4所示。

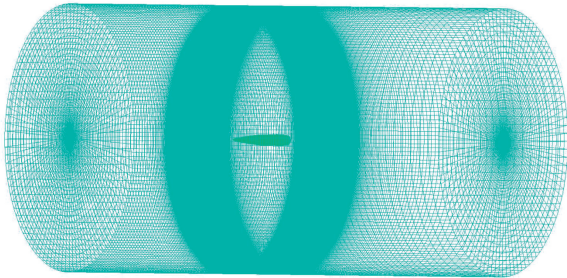


图2 整体三维结构网格

Fig. 2 Overall three-dimensional structured mesh

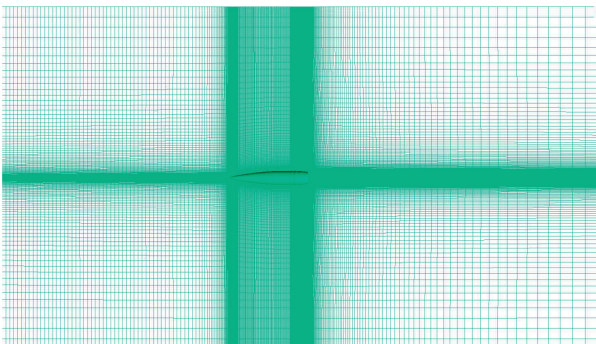


图3 整体二维结构网格

Fig. 3 Overall two-dimensional structured mesh

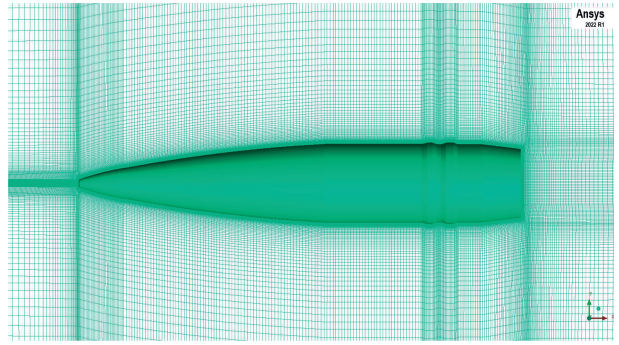


图4 弹体附近结构网格

Fig. 4 Structural mesh near the projectile body
其中第1层网格高度的计算公式为

$$\begin{cases} Re = \frac{\rho ul}{\mu} \\ C_f = 0.058 \left(\frac{Re}{10^6} \right) - 0.2 \\ \tau_w = 0.5 C_f \rho U_\infty^2 \\ U_t = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \\ y = \frac{y^+ \mu}{U_t \rho} \end{cases} \quad (1)$$

式中: Re 为来流雷诺数; ρ 为来流密度; u 为来流速度; l 为弹丸的参考长度; μ 为来流黏性系数; C_f 为壁面摩擦系数; τ_w 为壁面切应力; U_t 为壁面摩擦速度; y 为第一层网格高度。在边界层模拟中,合理选取 y^+ 值可提高边界层模拟的准确性,详细操作可参照文献[19]中关于机翼气动特性求解的实例。相同的边界条件下,当 y^+ 值过大或过小时,导致的仿真值与真实值偏离较大,本研究取 $y^+ < 2$,满足边界层计算要求,如图5所示。

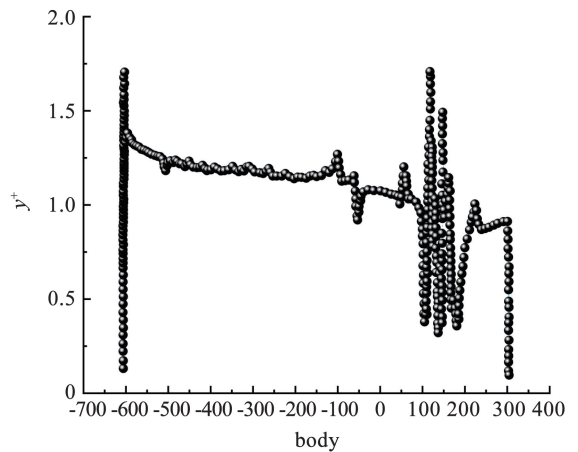


图5 弹体壁面 y^+ 值

Fig. 5 y^+ value on the projectile wall surface

1.3 假设条件

由于该155 mm榴弹在亚、跨和超音速飞行中流场结构异常复杂,若对雨滴在该过程中运动与变形的细节进行精确建模,将显著增加计算的复杂度

并降低仿真效率。为了简化仿真过程并有效获得该榴弹在暴雨环境下的主要气动特性,文中做出了如下假设:

1) 雨滴为不蒸发、不变形、无相互作用的球体,在洁净空气中只受阻力和重力的作用,雨滴的初始速度与来流速度相等;

2) 由于本文研究的雨滴直径较大,而 Saffman 升力通常适用于亚微米级颗粒,因此其升力效应可忽略不计;

3) 鉴于雨滴在撞击弹体表面后会形成液膜且飞行时间较短,假设雨滴撞击弹体表面无侵蚀作用;

4) 压力梯度力是由于流体中压力分布不均匀而作用在流体上的力,对于雨滴这样的液相颗粒,不仅要考虑重力和阻力的影响,还要考虑受周围气体压力梯度的影响;

5) 雨滴与弹丸壁面碰撞时产生破碎;

6) 离散相雨滴的运动受连续相的作用力(阻力、湍流扩散力)影响,同时,对连续相施加反作用力,进而改变连续相的流场特性。因此使用双向湍流耦合物理模型。

2 数值模拟方法

2.1 多相流模型

暴雨环境实质为气液两相流动,将空气视为连续相,雨滴视为离散相。数值模拟可采用两种主要模型: Euler-Euler 模型将不同相处理为互相贯穿的连续介质,而 Eulerian-Lagrangian 模型则将流动分为连续相和离散相,适用于离散相体积分数小于 10% 的情况,其中连续相通过求解定常可压雷诺平均 Navier-Stokes 方程,结合 SST $k-\omega$ 两方程湍流模型来描述质量和动量传递,从而模拟弹丸的绕流场;而雨滴粒子作为离散相,则采用 Eulerian-Lagrangian 模型进行模拟,该模型通过将雨滴颗粒注入连续相中来描述其运动,雨滴的运动方程可表示为

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \frac{3\mu C_D Re_p}{4\rho_p D_p^2}(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) + g \\ \frac{dx_p}{dt} = \mathbf{u}_p \\ Re_p = \frac{\rho_p D_p |\mathbf{u} - \mathbf{u}_p|}{\mu} \\ C_D = \frac{K_1}{Re_p} + \frac{K_2}{Re_p^2} + K_3 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x_p = (x_p, y_p, z_p)$ 为雨滴粒子位置; $\mathbf{u}_p = (u_p, v_p, w_p)$ 和 $\mathbf{u} = (u_a, v_a, w_a)$ 分别为雨滴和空气速度矢量; g 为重力加速度; ρ_p 为雨滴粒子密度; Re_p 为雨滴粒子雷诺数(相对雷诺数); C_D 为雨滴粒子曳力系数,

采用高马赫数曳力系数 (high-Mach-number drag coefficient) 模型,满足高雷诺数、马赫数大于 0.4; D_p 为雨滴粒径; K_1 、 K_2 和 K_3 为常数,与 Re_p 相关。

2.2 DPM 非稳态追踪

Euler-Lagrange 模型对离散相雨滴轨迹的追踪方式分为稳态和非稳态。本文采用非稳态追踪,即稳态计算连续相收敛后,利用 DPM 通过非稳态方法追踪雨滴颗粒的运动轨迹,时间步长取 0.000 1 s。离散相颗粒运动轨迹可由式(3)计算:

$$\frac{dx_p}{dt} = u_p \quad (3)$$

式中 u_p 为离散相颗粒速度。

通过求解式(3)可以得到雨滴在各方向上的轨迹,轨迹方程可简写为

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{1}{\tau_p}(u_a - u_p) \quad (4)$$

式中: τ_p 为粒子松弛时间, u_a 为空气来流速度。

采用梯形差分格式对轨迹方程积分,可得

$$\frac{u_p^{n+1} - u_p^n}{\Delta t} = \frac{1}{\tau_p}(u_a^* - u_p^*) \quad (5)$$

式中 u_a^* 、 u_p^* 分别表示气流和颗粒速度的平均值,可由下式得到:

$$\begin{cases} u_p^* = \frac{1}{2}(u_p^n + u_p^{n+1}) \\ u_a^* = \frac{1}{2}(u_a^n + u_a^{n+1}) \\ u_a^{n+1} = u_a^n + \Delta t u_p^n \cdot \nabla u_a^n \end{cases} \quad (6)$$

颗粒在下一个位置处的速度为

$$u_p^{n+1} = \frac{u_p^n \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\tau_p}\right) + \frac{\Delta t}{\tau_p} \left(u_a^n + \frac{1}{2} \Delta t u_p^n \cdot \nabla u_a^n\right)}{1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\tau_p}} \quad (7)$$

可利用下式计算出颗粒的下一个位置:

$$x_p^{n+1} = x_p^n + \frac{1}{2} \Delta t (u_p^n + u_p^{n+1}) \quad (8)$$

文中采用连续相与离散相相间耦合方法模拟降雨环境,相间动量交换公式为

$$M_{ex} = \sum \frac{3\mu}{\rho_p D_p^2} \frac{C_D Re_p}{4} (u - u_p) \dot{m}_p \Delta t \quad (9)$$

相对雷诺数定义为

$$Re_p = \frac{\rho_a d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (10)$$

式中: M_{ex} 为相间动量交换项; \dot{m}_p 为单位体积内雨滴质量流率; μ 为动力黏度; Δt 为时间步长。

结合连续相(空气)与离散相(雨滴)的相间耦合作用,流体的动量守恒方程表示为耦合形式,以描述连续相与离散相之间的相互影响,离散相的动量

守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mu [(\nabla \vec{v}) + \nabla \vec{v}^T] - M_{ex_i} \quad (11)$$

式中 M_{ex_i} 为相间动量交换的第 i 个分量。

2.3 随机游走模型与拉格朗日液膜(LWF)模型

在湍流环境下,雨滴的扩散行为受到流场脉动影响,可采用随机游走模型(Random Walk Model)进行模拟;通过随机扰动描述湍流对雨滴运动轨迹的影响,结合时间积分尺度计算雨滴的湍流扩散特性。

针对雨滴撞击壁面的液膜形成与演化过程,采用拉格朗日液膜(LWF)模型^[20]。液滴与壁面相互作用可能导致黏附、铺展、反弹或飞溅等现象,其中

表 1 24 h 平均降雨强度等级

Tab.1 24-hour average rainfall intensity classification

等级	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨
降雨强度/(mm·h ⁻¹)	0.1~9.9	10.0~24.9	25.0~49.9	50.0~99.9	100.0~249.9

表 1 中,最大平均降雨强度在 100~249.9 mm/h 之间,而文献[24-25]通过仪表测得的最大降雨量为 2 920 mm/h,由此可见,若采用平均降雨强度进行降雨环境模拟,可能会低估降雨天气对弹丸气动性能的影响。因此,本研究选择瞬时降雨强度作为暴雨环境模拟的参数。

2.4.2 雨滴谱

雨滴谱用于描述单位体积空气中,不同直径雨滴的数量或质量分布的统计规律。常见的表示方式包括数量谱 $N(D_p)$ 和质量谱 $M(D_p)$,其中数量谱反映了各尺寸雨滴的数量分布,而质量谱则描述了不同尺寸雨滴的质量分布特性。

数量谱 $N(D_p)$ 描述了单位体积空气中,直径为 D_p 的雨滴的数量,计算公式为

$$N(D_p) = N_0 \exp\left(-\frac{(D_p - D_m)^2}{2\sigma_{D_p}^2}\right) \quad (12)$$

式中: N_0 为谱的最大值,表示雨滴谱的峰值,通常与雨滴的总体数量或质量相关联; D_m 为谱的平均直径,反映了雨滴大小的集中趋势; σ_{D_p} 为谱的宽度,表示直径分布的标准偏差,表示雨滴大小分布的宽度。

质量谱 $M(D_p)$ 描述了单位体积空气中,直径为 D_p 的雨滴的质量分布。质量谱可以基于数量谱结合雨滴的密度和体积来计算。

在实际应用中,数量谱通常遵循对数正态分布、伽玛分布和指数形式分布。其中,对数正态分布是最常用的分布之一,公式为

液膜的厚度、应力分布及分离特性受液滴初始动能、壁面特性及环境条件影响^[21]。当壁面剪切应力超过临界阈值时,液膜可能发生分离,并在弹体表面形成非均匀分布,进一步改变表面粗糙度与气动特性^[22-23]。

2.4 雨场模拟

2.4.1 降雨等级

实际降雨环境通过降雨强度、雨滴终末速度和质量流量等参数描述。其中,降雨强度是评估降雨严重程度的关键指标,不同地区因地理条件差异呈现显著不同。根据中国气象局发布的标准,按 24 h 平均降雨量将降雨划分为 5 个等级,如表 1 所示。

$$N(D_p) = N_0 \exp\left(-\frac{(\ln D_p - \ln D_m)^2}{2\sigma_{D_p}^2}\right) \quad (13)$$

伽玛分布也是数量谱中常用的一种分布,公式为

$$N(D_p) = N_0 \frac{D_p^{n-1} \exp\left(-\frac{D_p}{\mu}\right)}{\mu^n \Gamma(n)} \quad (14)$$

式中: n 为形状参数; μ 为尺度参数; $\Gamma(n)$ 为伽玛函数。

另一种数量谱以指数形式分布。在降雨量数据的分析中,传统上假定数量谱 $N(D_p)$ 等于单位体积、单位尺寸间隔内,具有等体积球形直径 D_p (mm) 的雨滴数量。该模型后来由 Marshall 和 Palmer^[26] 进一步完善,表达式为

$$N(D_p) = N_0 \exp(-ID_p), 0 \leq D_p \leq D_{pmax} \quad (15)$$

式中: D_{pmax} 为最大雨滴直径; N_0 为常数; I 为 $N(D_p)$ 的参数。不同类型降雨的 N_0 和 I 值如表 2 所示。

表 2 不同类型降雨的 N_0 和 I 值

Tab.2 N_0 and I values for different types of rainfall

降雨类型	$N_0/(m^{-3} \cdot mm^{-1})$	I/mm
小雨	30 000	$I = 5.7 \times R^{-0.21}$
中雨-大雨	7 000	$I = 4.1 \times R^{-0.21}$
暴雨	1 400	$I = 3.0 \times R^{-0.21}$
Marshall and Palmer 模型的通用参数	8 000	$I = 4.1 \times R^{-0.21}$

2.4.3 液态水含量和降雨率之间的关系

为更准确地描述降雨环境,常用降雨率(R)和

液态水含量(LWC)作为表征降雨强度的重要参数。降雨率指单位时间内地面上的线性累积降水深度,单位为 mm/h,用于表征地面上的降雨;液态水含量则表示单位体积内的液态水质量,单位为 g/m²。两者的关系取决于降雨类型。根据马歇尔于 1948 年发布的研究报告^[27-28],液态水含量可通过以下公式进行描述:

$$LWC = \int_0^{\infty} \rho_a \frac{\pi}{6} D_p^3 N(D_p) d(D_p) \quad (16)$$

使用表 2 中不同降雨类型的水滴尺寸分布并对式(22)进行积分,得到暴雨环境下 LWC 与 R 之间的关系为 $LWC = \frac{1}{3^4} \frac{400\pi 10^{-3}}{R^{-0.84}} = 0.054 \times R^{0.84}$ 。

2.4.4 终端雨滴速度

雨滴在下落过程中受重力、空气阻力和浮力作用,其中空气阻力随速度增加而增大。当重力与阻力和浮力的合力相等时,雨滴达到终端速度,并以此速度匀速下落至地面。关于雨滴终端速度的研究由来悠久,其中 Markowitz^[29]提出的模型被广泛应用,该模型建立了雨滴终速与其尺寸及高度之间的函数关系。在低海拔条件下,其表达式为

$$v_p = 9.58 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{D_p}{1.77} \right)^{1.147} \right] \right\} \quad (17)$$

2.4.5 降雨参数

在进行降雨参数设置时,需要考虑总质量流量、降雨面积、自由流速度,计算公式为

$$Q = SV \cdot LWC \quad (18)$$

式中:Q 为质量流量,kg/s;S 为降雨面积,m²;V 为自由流速,m/s。

为了简化计算,可选取在一定降雨强度下雨滴数量最多的粒径作为代表粒径,Best^[27]给出了该粒径的计算公式为

$$D_p = aR^b \left(\frac{l-1}{l} \right)^{1/l} \quad (19)$$

式中:a 和 b 的经验系数分别取 1.3 和 0.232;l 为雨型常数,取 2.25。

综合以上雨滴相关参数计算公式,可得到本研究的降雨强度的雨滴设置参数,如表 3 所示。

表 3 文中采用的降雨参数

Tab. 3 Rainfall parameters used in the text

R/(mm·h ⁻¹)	LWC/(g·m ⁻³)	D _p /mm	v _p /(m·s ⁻¹)
2 029	30.0	5.858 4	9.395

2.5 计算方法

设定计算的收敛准则为:连续相的连续方程、动量方程以及能量方程的残差,相较于初始残差需下

降至少 4 个数量级,同时,需监测并确认各项残差曲线均已进入平缓状态。

首先,在洁净空气条件下对空气相流场展开数值模拟,基于定常雷诺平均 N-S (Reynolds-Averaged Navier Stokes, RANS) 方程和 SST k-ω 两方程湍流模型,在高马赫数及大攻角条件下使用 Realizable k-ε 两方程湍流模型求解弹丸的绕流场^[30]。

其次,采用欧拉-拉格朗日(Eulerian-Lagrangian) 框架对雨滴粒子进行模拟,将其视为离散相,在连续相中追踪其运动。在计算雨滴轨迹时,运用随机游走模型来考虑连续相中湍流对雨滴轨迹的影响。同时,构建液膜的动量守恒方程来处理连续相(空气)和颗粒相(雨滴)之间的相互作用。当壁面液膜的厚度超出 2 μm 时,判定该处壁面单元已被液膜所覆盖,使用式(9)进行双向耦合计算,将雨滴对空气相的作用耦合至雷诺平均方程中。通过更新后的空气相流场,重新确定雨滴轨迹以及相间作用项,并迭代此过程,直至连续相和离散相均达到稳态。计算流程如图 6 所示。

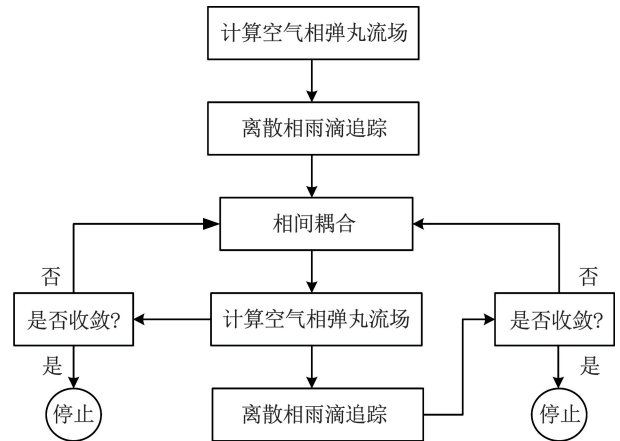


图 6 计算过程流程图

Fig. 6 Flowchart of the calculation process

2.6 边界条件

在数值模拟中,边界条件的设定对模拟结果的准确性起到关键作用。因此在数值模拟前,需先合理确定边界条件,具体设置如下:

1) 连续相边界条件。计算域边界采用压力远场条件,该条件适用于模拟无限远场区域,假定远离物体处流体压力均匀,速度趋于自由流值;设定来流入口处的压力为标准大气压(101 325 Pa),温度为海平面温度(300 K);弹丸壁面边界条件设置为无滑移壁面。

2) 离散相边界条件。本研究采用非稳态追踪方法对离散相粒子的运动进行模拟,并设置粒子射入面。为确保雨滴粒子能够完全落到弹体表面,射

入面布置在弹体正前方 5 倍弹径处的平面,雨滴初始速度与来流速度一致。弹体表面设置为液膜边界条件,假设雨滴在与弹体表面碰撞后破碎成小液滴并在弹体表面形成液膜,其中雨滴碰撞计算选用 Stanton-Rutland 模型。外流场边界则设置为 Escape 边界条件。

3) 气动性能评估。为评估暴雨环境下弹丸飞行的气动性能,采用阻力系数、升力系数和俯仰力矩系数作为评价指标进行评估,其计算公式为

$$\begin{cases} C_d = C_a \cos \alpha + C_n \sin \alpha \\ C_l = C_n \cos \alpha - C_a \sin \alpha \\ C_m = \frac{M_z}{\left(\frac{1}{2}\rho_\infty V_\infty^2\right)SL} \end{cases} \quad (20)$$

式中: C_d 为阻力系数; C_l 为升力系数; C_m 为俯仰力

矩系数; C_a 为轴向力系数; C_n 为法向力系数; S 为特征面积,通常取弹丸最大横截面积 $S = \pi D^2/4$; $(1/2)\rho_\infty V_\infty^2$ 为动压,表示单位体积中气体质量的动能; L 为参考长度,通常取弹丸的最大弹径^[31]。

2.7 计算验证

2.7.1 网格无关性检验

为了平衡计算时间和精度,需进行网格无关性验证:设置 coarse、medium、fine 3 组不同网格密度,对来流马赫数为 1.5、攻角 5° 的工况进行数值模拟,得到不同网格下弹丸的升力系数、阻力系数,如表 4 所示。从表 4 可知,medium 网格和 fine 网格的阻力系数误差为 0.8%,升力系数的误差为 1.19%。综合考虑计算精度和时间,本文选取 medium 网格进行后续数值模拟。

表 4 不同网格时数据对比

Tab. 4 Comparison of data for different meshes

类别	网格数	阻力系数	升力系数	阻力系数与 fine 网格误差/%	升力系数与 fine 网格误差/%	计算时间/h
coarse	2 734 506	0.350 2	0.181 6	2.6	3.30	3.5
medium	4 213 059	0.356 9	0.177 9	0.8	1.19	5.0
fine	6 135 838	0.359 7	0.175 8	—	—	9.0

2.7.2 风洞试验验证

为了验证方法的有效性,在无雨条件下将 CFD 计算结果与 155 mm 榴弹风洞试验数据对比。风洞试验的物理模型及装置如图 7 所示。风洞试验工况为来流马赫数 0.6~3,攻角 0° 和 3°。

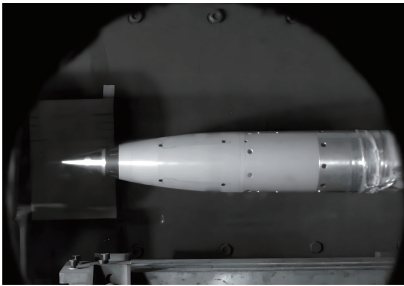


图 7 风洞试验

Fig. 7 Wind tunnel test

图 8 和图 9 分别给出了 155 mm 榴弹模型 CFD 计算的零升阻力系数和升力系数随马赫数的变化规律,并和风洞试验相比较。从图 8 中可以得出,零升阻力系数变化趋势与风洞试验一致,CFD 计算与风洞试验绝对平均误差为 3.920 7%,在跨声速阶段,CFD 计算值大于风洞试验值;在超声速阶段,CFD 计算值低于风洞试验值。从图 9 中可以看出,升力系数 CFD 计算值低于风洞试验值,3° 攻角下的升力系数误差大于零升阻力系数,但总的变化趋势一致,符合空气动力学规律。验证了本文所采用的数值计算方法的可行性。

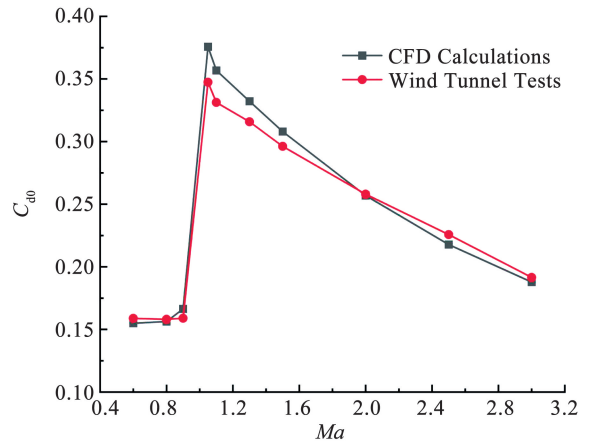


图 8 零升阻力系数

Fig. 8 Zero-lift drag coefficient

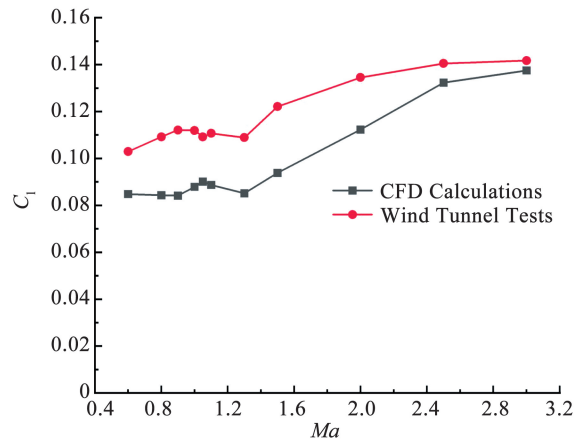


图 9 升力系数

Fig. 9 Lift coefficient

2.7.3 气液两相流验证

为了验证 DPM 模型在降雨环境下模拟弹丸气动性能的有效性,选用文献[7]中的 NACA 0012 翼型作为验证对象,其结构网格如图 10 所示。

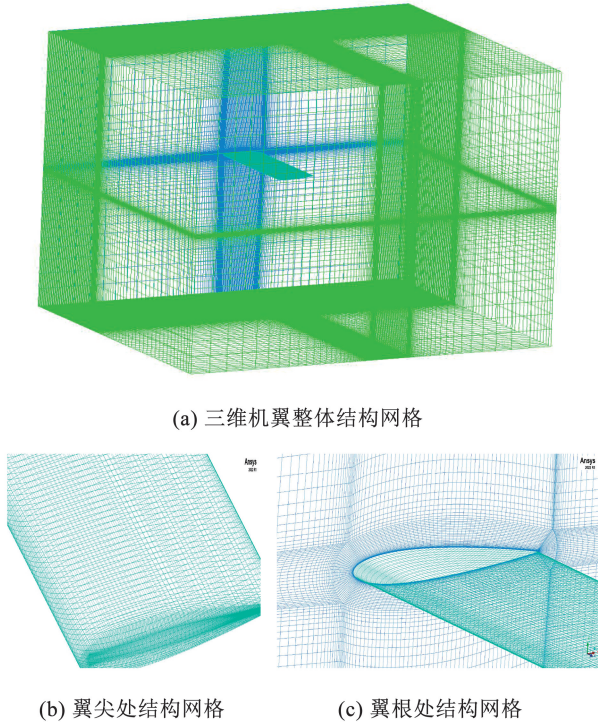


图 10 NACA 0012 翼型结构网格

Fig. 10 Structural mesh of the NACA 0012 airfoil

对 NACA 0012 翼型进行数值模拟,选取雨滴直径为 5.8 mm,液态水含量 $LWC = 30 \text{ g/m}^3$ 。求解过程采用 SST $k-\omega$ 湍流模型,速度和压力耦合采用 SIMPLEC 算法。初始阶段使用稳态计算连续相,待计算收敛后,采用瞬态计算离散相,时间步长设置为 0.000 5 s。表 5 和表 6 分别为不同攻角下无雨与暴雨环境中的升阻力系数、升力系数;图 11 对比了无雨与暴雨条件下文献[7]与本文 CFD 计算结果。结果表明,在暴雨条件下,阻力系数整体变化较小(略有降低),且误差随攻角增大而增大。相比之下,降雨对升力系数的影响较为显著,升力系数随攻角增大逐渐降低,最大降幅约为 3.02% (发生在 12° 攻角处)。计算结果与实验数据趋势一致,验证了该模拟方法的合理性。

表 5 无雨和降雨环境下数值模拟阻力系数值

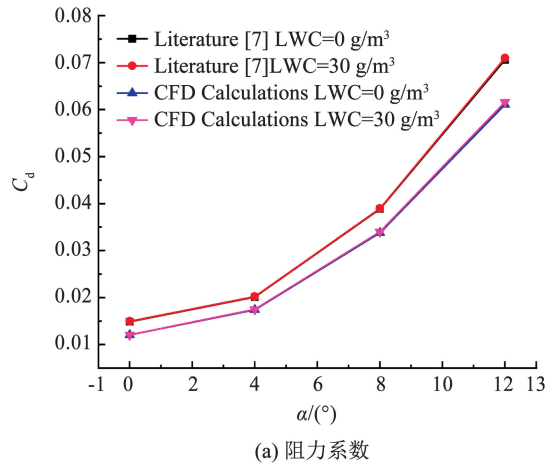
Tab. 5 Numerical simulation drag coefficient values under rain-free and rainy conditions

攻角/ $^\circ$	无雨	$LWC = 30 \text{ g/m}^3$ 降雨	误差/%
0	0.012 038	0.012 043	0.04
4	0.017 420	0.017 494	0.43
8	0.033 818	0.034 000	0.54
12	0.061 100	0.061 600	0.82

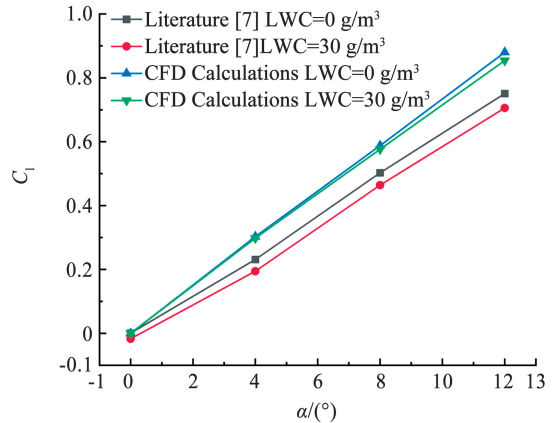
表 6 无雨和降雨环境下数值模拟升力系数值

Tab. 6 Numerical simulation lift coefficient values under rain-free and rainy conditions

攻角/ $^\circ$	无雨	$LWC = 30 \text{ g/m}^3$ 降雨	误差/%
0	—	—	—
4	0.302 8	0.298 1	1.58
8	0.587 8	0.576 5	1.96
12	0.879 7	0.853 9	3.02



(a) 阻力系数



(b) 升力系数

图 11 无雨和降雨环境下文献[7]和本文方法在不同攻角下的升、阻力系数

Fig. 11 Lift and drag coefficients from reference [7] and the present method under rain-free and rainy conditions at different angles of attack

3 气液两相流耦合机理

3.1 数值模拟分析

为探究弹丸在恶劣气候条件(暴雨)下飞行的绕流流场及气动特性等问题,在不同来流、不同攻角条件下对该榴弹进行数值模拟,揭示其绕流特性及发展规律,明确弹丸所受各空气力和空气力矩变化原因。分别在马赫数 0.6、0.8、0.9、1.05、1.1、1.3、1.5、2.0、2.5、3.0 的来流速度和 0° 、 3° 、 5° 、 8° 、 10° 攻角条件下,组合形成 50 组工况,如表 7 所示。对

该榴弹的绕流流场分布、变化趋势进行数值分析。

表 7 计算工况

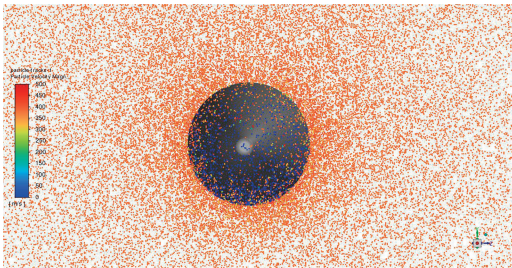
Tab. 7 Calculation conditions

变量	数值
来流马赫数	0.6、0.8、0.9、1.05、1.1、1.3、1.5、2.0、2.5、3.0
攻角/(°)	0、3、5、8、10

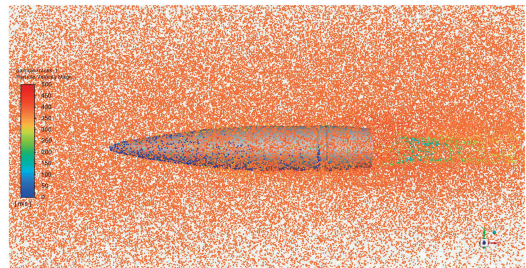
3.1.1 离散相粒子分布

自由下落的离散相雨滴在连续相风场和重力的共同作用下,水平方向上获得一定速度(近似与风场流速相等),雨滴粒子运动轨迹发生改变。图 12

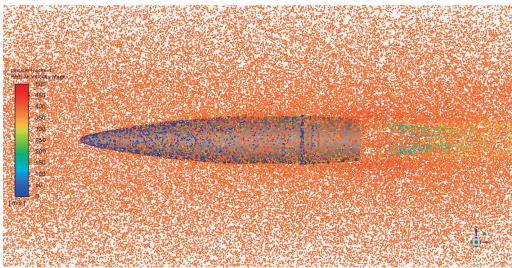
显示了在马赫数 1.1 和 5° 攻角条件下,弹体周围离散相雨滴的分布及速度变化情况。从图中可观察到,在有攻角情况下,雨滴撞击弹丸迎风面的颗粒数量明显多于背风面,尤其弹头和弹带区域的撞击雨滴最多,表明弹体的形状和姿态对雨滴的分布产生了显著影响,迎风面成为雨滴的主要撞击区域。图 13 提供了更为详细的粒子追踪统计信息。在数值模拟迭代到 2 719 步时,总计追踪了 309 565 个雨滴粒子,其中,仅有 37 个粒子逃逸出计算域,819 个粒子发生了二次破碎,而 416 个粒子发生了飞溅现象。



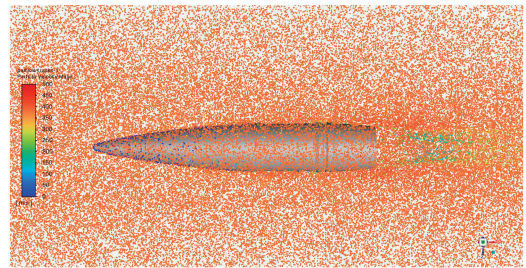
(a) 弹头正面雨滴粒子分布情况



(b) 弹体侧面雨滴粒子分布情况



(c) 弹体迎风面雨滴粒子分布情况



(d) 弹体背风面雨滴粒子分布情况

图 12 离散相雨滴粒子速度大小分布

Fig. 12 Velocity magnitude distribution of discrete phase raindrop particles

Injecting 4480 particle parcels with mass 0.0137

number tracked = 309565, escaped = 37, shed = 819, splashed = 416

2720	3.1043e-01	1.6324e-01	1.2844e-01	1.3677e-01	6.6990e-02	8.1094e-05	1.8384e-05	4.2496e-01	4.0447e-01	1.4911e-01	0:24:48	236
2721	3.4859e-01	2.3127e-01	1.3369e-01	1.3796e-01	8.6162e-02	8.4656e-05	1.8652e-05	4.2482e-01	4.0447e-01	1.4906e-01	0:23:40	235
iter	continuity	x-velocity	y-velocity	z-velocity	energy	k	omega	cm	cd	cl	time/iter	
2722	2.9713e-01	1.9154e-01	1.5492e-01	1.5624e-01	6.2299e-02	8.3712e-05	1.8430e-05	4.2485e-01	4.0451e-01	1.4903e-01	0:23:32	234
2723	3.0624e-01	1.8266e-01	1.1329e-01	1.3456e-01	6.4482e-02	8.2964e-05	1.8190e-05	4.2487e-01	4.0454e-01	1.4905e-01	0:22:38	233
2724	3.1035e-01	2.3596e-01	1.4269e-01	1.4494e-01	7.0836e-02	8.2380e-05	1.8116e-05	4.2492e-01	4.0457e-01	1.4910e-01	0:22:40	232
2725	3.1123e-01	1.54750e-01	1.1444e-01	1.3360e-01	6.6339e-02	8.1836e-05	1.7883e-05	4.2493e-01	4.0459e-01	1.4910e-01	0:21:54	231

图 13 图形控制台显示的粒子追踪

Fig. 13 Particle tracking displayed on the graphics console

3.1.2 弹体表面水膜分布

雨滴与弹体表面碰撞时可能会发生黏附、反弹、扩展或飞溅等物理现象,其中黏附、扩展和飞溅均可能在弹体表面形成液膜。图 14 和图 15 为马赫数 1.1 和 5° 攻角条件下不同时刻的弹体表面液膜厚度云图。从图中可以观察到,在降雨环境下,高速雨滴撞击弹体表面后会积聚形成厚度不均匀的液膜,并

显示出液膜的流动轨迹。水膜覆盖范围随降雨持续时间的增长而不断扩大,且厚度不断增加,在 $t = 0.05$ s 时(连续相收敛后,注入离散相雨滴的时刻),最大液膜厚度接近 0.01 mm,在 $t = 0.08$ s 时,最大液膜厚度约 0.02 mm。液膜较厚的区域主要集中在弹头前表面及弹带前缘,这与该区域雨滴撞击堆积较多有关。迎风面液膜覆盖范围显著大于背风

面和侧面。图 16 为弹体表面液膜质量分布,液膜质量随弹体长度方向总体呈现先增后减趋势,在弹带处液膜质量最大。在 $t = 0.05$ s 时液膜最大质量接

近 0.11 mg, $t = 0.08$ s 时液膜最大质量接近 0.16 mg,且液膜质量随着时间增加逐渐增大。

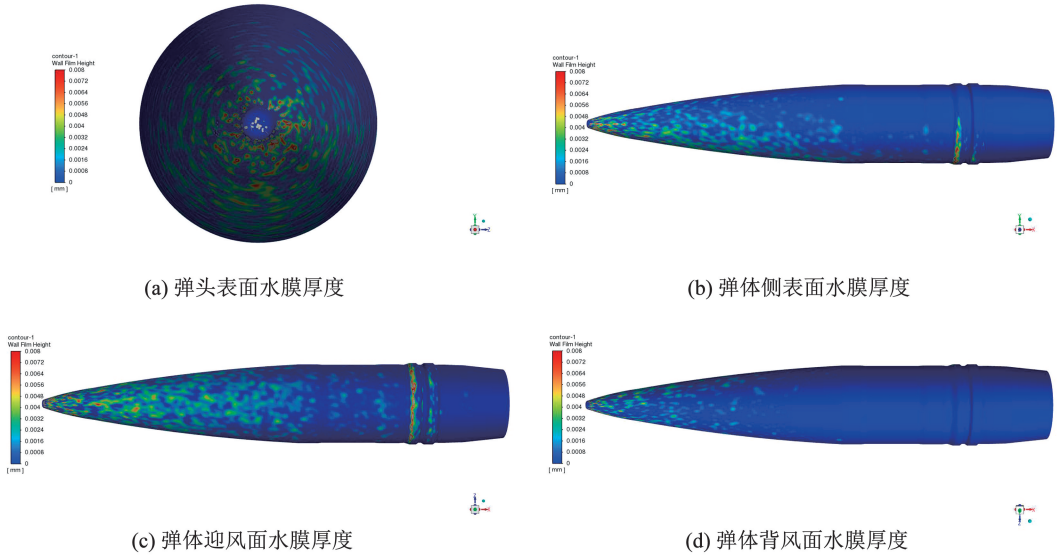


图 14 在 $t = 0.05$ s 时弹体表面水膜分布

Fig. 14 Water film distribution on the surface of the projectile at $t = 0.05$ s

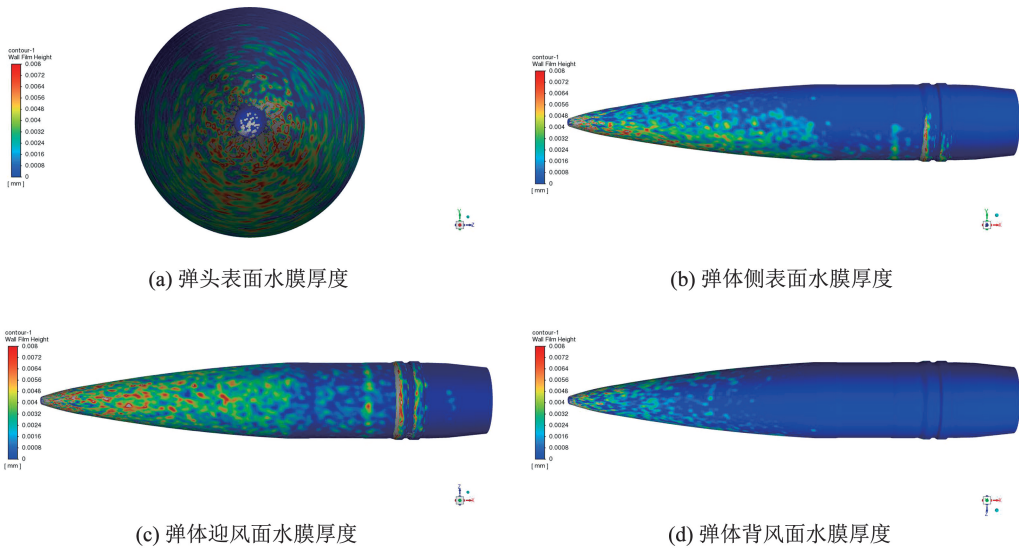


图 15 在 $t = 0.08$ s 时弹体表面水膜分布

Fig. 15 Water film distribution on the surface of the projectile at $t = 0.08$ s

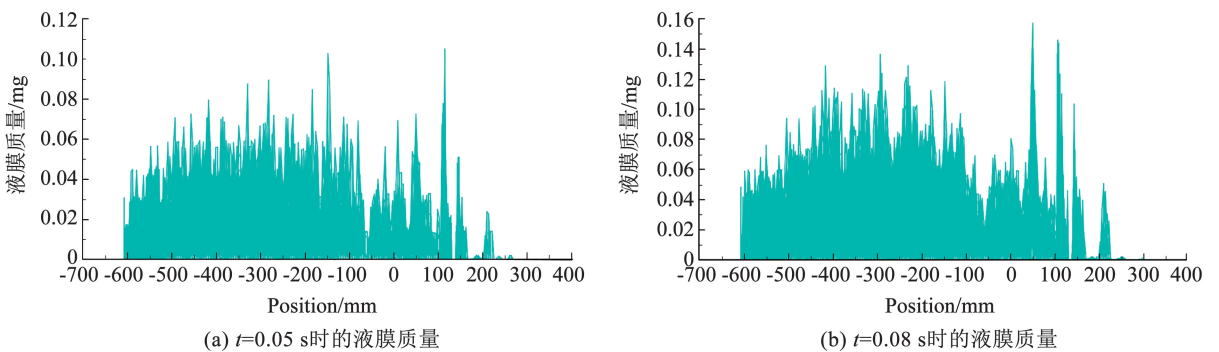


图 16 液膜质量

Fig. 16 Wall film mass

3.1.3 剪切应力

图 17 为马赫数 1.1 和 5° 攻角条件下,无雨环境与 $LWC = 30 \text{ g/m}^3$ 暴雨环境下弹头、弹体侧面、迎风面及背风面表面剪切应力云图。从图中可见,无雨环境下弹体表面剪切应力的分布变化较小;在暴雨环境下,由于液膜的形成增加了表面粗糙度,导致弹

头区域、弹头后缘与弹体过渡部分以及弹带区域的表面剪切应力较大。无雨环境下的最大剪切应力为 666 Pa,如图 18(a)所示;在 $LWC = 30 \text{ g/m}^3$ 条件下, $t = 0.05 \text{ s}$ 时的最大剪切应力为 1 389 Pa,如图 18(b)所示, $t = 0.08 \text{ s}$ 时的最大剪切应力增加至 2 350 Pa,如图 18(c)所示。

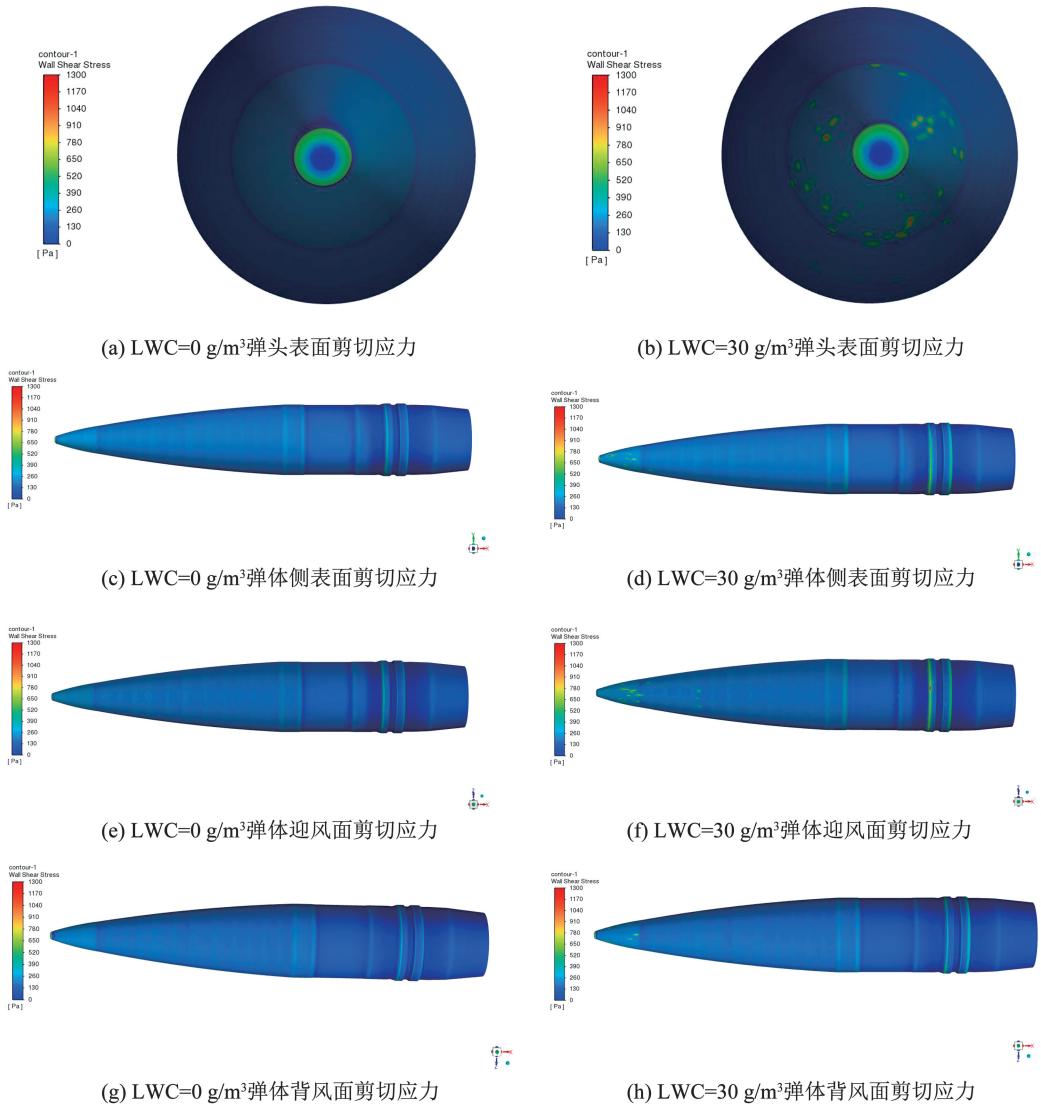


图 17 弹丸表面剪切应力云图

Fig. 17 Contour of shear stress on the projectile surface

3.1.4 表面摩擦系数

图 19 为马赫数 1.1、 5° 攻角条件下,无雨环境与 $LWC = 30 \text{ g/m}^3$ 暴雨环境下弹头、弹体侧面、迎风面和背风面表面摩擦系数云图。由图 19 可以看出,弹体表面摩擦系数分布与剪切应力分布规律相似,无雨环境下弹体表面摩擦系数变化较小;暴雨环境下弹体表面摩擦系数变化较大。相关实验研究表明,水滴撞击到稀薄的液膜层上便会形成凹坑,原来滞留在凹坑里的水全部形成凸膜层。正是

由于液膜和水坑的存在,弹体表面粗糙度增加,使得弹头处、弹头后缘与弹体过渡部分以及弹带处的表面摩擦系数增大,导致了弹丸在暴雨环境下气动性能的恶化。无雨环境下的最大表面摩擦系数接近 0.008,如图 20(a)所示; $LWC = 30 \text{ g/m}^3$ 条件下, $t = 0.05 \text{ s}$ 时的最大表面摩擦系数为 0.016,约为无雨环境下的 2 倍,如图 20(b)所示; $t = 0.08 \text{ s}$ 时的最大表面摩擦系数增加至 0.025 以上,如图 20(c)所示。

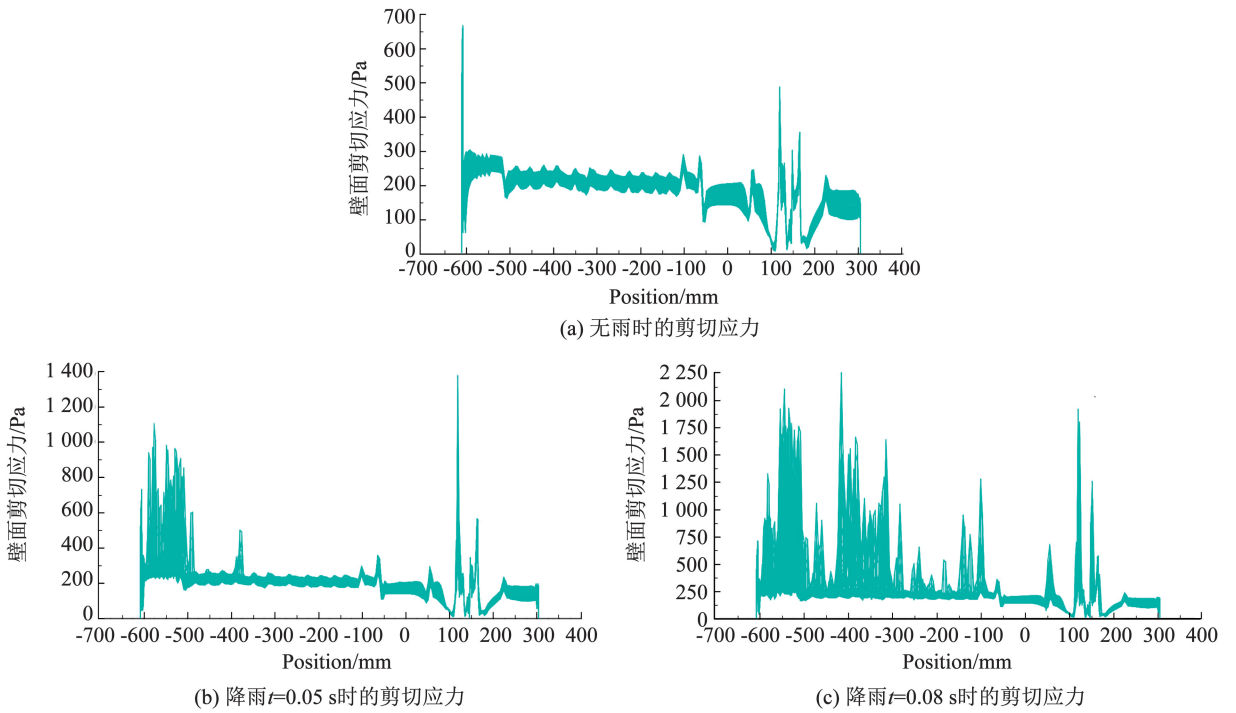


图 18 不同时刻弹丸壁面所受剪切应力

Fig. 18 Shear stress on the projectile surface at different time instants

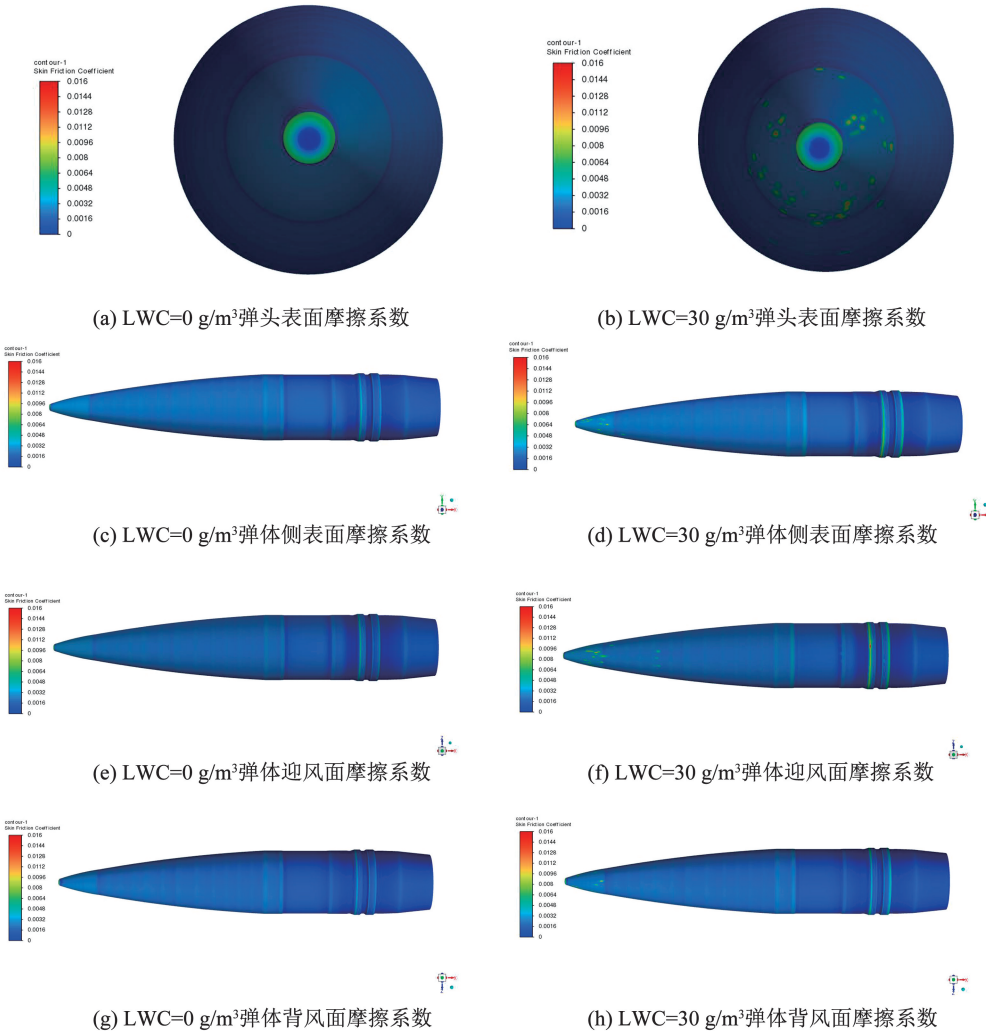
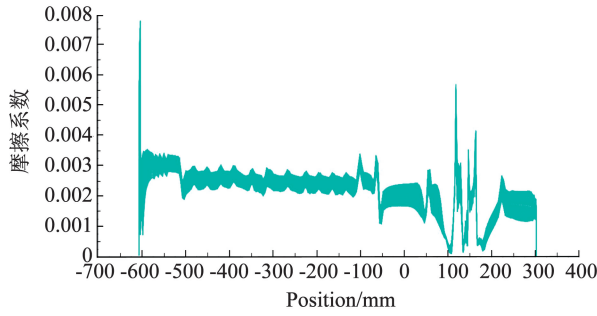
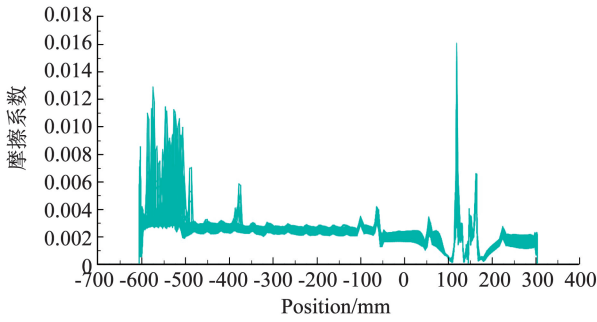


图 19 弹体表面摩擦系数

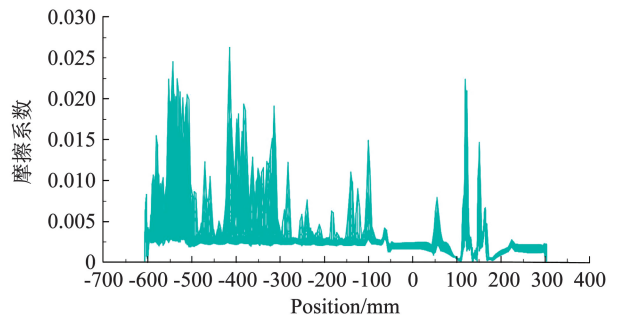
Fig. 19 Friction coefficient on the projectile surface



(a) 无雨时的摩擦系数



(b) 降雨 $t=0.05$ s时的摩擦系数



(c) 降雨 $t=0.08$ s时的摩擦系数

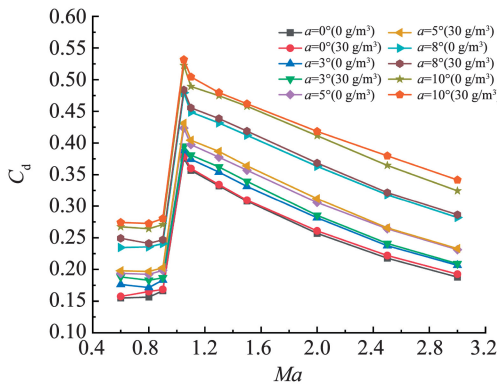
图 20 不同时刻弹丸壁面所受摩擦系数

Fig. 20 Friction coefficient on the projectile surface at different time instants

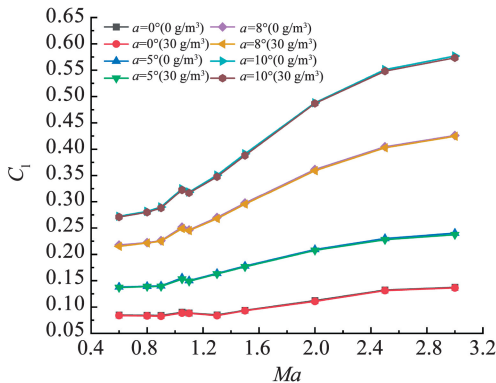
3.2 暴雨环境弹丸气动系数分析

通过对暴雨环境下弹丸的数值模拟,在来流马赫数分别为0.6、0.8、0.9、1.05、1.1、1.3、1.5、2.0、2.5、3.0和攻角 0° 、 3° 、 5° 、 8° 、 10° 的50组工况下进行CFD数值模拟,得到无雨、暴雨环境下弹丸的升

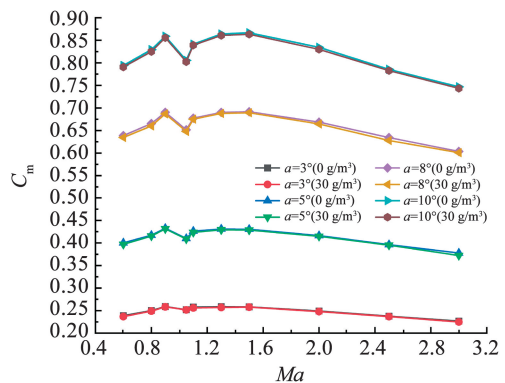
力系数 C_l 、阻力系数 C_d 和俯仰力矩系数 C_m 的统计仿真数据。通过拟合仿真数据,图21展示了无雨与暴雨环境($LWC = 30 \text{ g/m}^3$)下气动特性参数随马赫数的变化趋势。



(a) 阻力系数



(b) 升力系数



(c) 俯仰力矩系数

图 21 无雨与暴雨环境下阻力、升力和俯仰力矩系数随马赫数变化情况

Fig. 21 Variation of drag, lift and pitching moment coefficients with Mach number under rain-free and heavy rain conditions

3.2.1 阻力系数分析(图 21(a))

阻力系数随马赫数增大呈现出先增后减的趋势。暴雨环境下的阻力系数整体高于无雨环境,最大增幅出现在 $0.6, 3^\circ$ 攻角条件下,较无雨环境增大约 6.75% 。在亚声速范围内,阻力系数随马赫数增大逐渐上升;跨声速范围内,由于弹体激波形成及流场复杂性,阻力系数迅速增大;超声速范围内,阻力系数随着马赫数增大逐渐减小。在同一马赫数下,攻角越大,迎风面积越大,阻力系数也越大,计算结果符合空气动力学规律。

3.2.2 升力系数分析(图 21(b))

升力系数整体随马赫数增大而上升。与无雨环境相比,暴雨环境下的升力系数略有下降。在亚声速范围,升力系数随马赫数缓慢增大;跨声速范围内呈现先增后减再增的变化趋势;超声速范围内,升力系数随马赫数增大而逐渐趋于平稳。同一马赫数下,升力系数随着攻角的增大而增大。

3.2.3 俯仰力矩系数分析(图 21(c))

俯仰力矩系数以弹丸质心为参考点进行计算。暴雨环境下,俯仰力矩系数整体略低于无雨环境,总体随马赫数呈先增后减趋势。在跨声速范围内,俯仰力矩系数呈先减后增的局部变化,这与亚跨音速过渡阶段弹体激波特性相关——激波从正激波逐渐演变为斜激波,正激波受空气动力效应影响更为显著,同时流场复杂性增加。在同一马赫数下,攻角越大,俯仰力矩系数亦随之增大。

4 结 论

1) 马赫数 1.1 和攻角 5° 条件下,雨滴的分布和运动特性受到弹体攻角、形状以及空气流场的多重影响,弹体迎风面成为雨滴的主要撞击区域。模拟结果表明,雨滴粒子在撞击过程中发生了二次破碎和飞溅现象。

2) 弹体表面因高速雨滴撞击逐渐形成厚度不均且随时间增长的液膜,液膜主要分布在迎风面的弹头及弹带区域,厚度与质量均随降雨时间增加, $t = 0.05\text{ s}$ 至 $t = 0.08\text{ s}$,液膜厚度由 0.01 mm 增长至 0.02 mm ,质量分布由 0.11 mg 增长至 0.16 mg ,液膜流动轨迹及分布规律与弹体受雨滴撞击的堆积效应密切相关。

3) 液膜与水坑的形成增大弹体表面粗糙度,导致剪切应力与摩擦系数大幅提升,最大剪切应力从无雨环境下的 666 Pa 增至 $2\ 350\text{ Pa}$,最大摩擦系数从 0.008 增至 0.025 以上。变化主要集中在弹头、弹头后缘、弹体过渡部分及弹带区域,显著恶化了弹

丸的气动性能。

4) 暴雨环境下,弹丸阻力系数、升力系数和俯仰力矩系数随马赫数变化的趋势整体符合空气动力学规律,但与无雨环境相比存在明显差异,其中阻力系数显著增大,最大增幅约 6.75% ;升力系数略有下降,最大降幅为 1.9% ;俯仰力矩系数整体略低于无雨环境,且跨声速范围内因弹体激波从正激波逐渐演变为斜激波,呈现出先减后增的局部非线性变化,表明暴雨对弹丸气动特性有显著影响。

参 考 文 献

- [1] 中国人民解放军总装备部. 地炮榴弹射表编拟方法: GJB 7915 - 2012[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2013
The General Armaments Department of the PLA. The production method of firing tables for high explosive shell of ground artillery: GJB 7915 - 2012 [S]. Beijing: Military Standards Publishing and Distribution Department of the General Armaments Department of the PLA, 2013
- [2] 中国人民解放军总装备部. 榴弹定型试验规程: GJB 4225A - 2015 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2015
The General Armaments Department of the PLA. The qualification test procedure for howitzer shells: GJB 7915 - 2012 [S]. Beijing: Military Standards Publishing and Distribution Department of the General Armaments Department of the PLA, 2015
- [3] CAO Y, WU Z, XU Z. Effects of rainfall on aircraft aerodynamics [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2014, 71: 85. DOI: 10.1016/j.paerosci.2014.07.003
- [4] CUI Y, WANG R, MA T, et al. Study on similarity criterion for fluid-thermal coupling responses of metal plate simultaneously exposed to laser irradiation and airflow [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2024, 204: 109230. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2024.109230
- [5] ZENG G Z, LI Z W, HUANG S, et al. Aerodynamic characteristics of intercity train running on bridge under wind and rain environment [J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 66: 873. DOI: 10.1016/j.aej.2022.10.058
- [6] PATEL P Y, KRISHNAMURTHY C, CLAUSMAN G, et al. Modelling effect of rain on the external aerodynamics of the utility truck with the morphing boom equipment: computations and wind tunnel testing [C]//AIAA SCITECH 2023 Forum. 2023: 1761. DOI: 10.2514/6.2023-1761
- [7] ISMAIL M, CHEN Y H, WU Z, et al. Numerical study of aerodynamic efficiency of a wing in simulated rain environment [J]. Journal of Aircraft, 2014, 51(6): 2015. DOI: 10.2514/1.C032594
- [8] FATAHIAN H, SALARIAN H, NIMVARI M E, et al. CFD simulation of aerodynamic performance and flow separation of a single element and slatted airfoils under rain condition [J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 83: 683. DOI: 10.1016/j.apm.2020.01.060
- [9] CHEN N, YI X, WANG Q, et al. Numerical study on wind-driven thin water film runback on an airfoil [J]. AIAA Journal, 2023, 61(6): 2517. DOI: 10.2514/1.J062618
- [10] WU Z, CAO Y. Numerical simulation of flow over an airfoil in heavy rain via a two-way coupled Eulerian-Lagrangian approach

- [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, 69: 81. DOI:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.11.006
- [11] WU Z, LV B, CAO Y. Heavy rain effects on aircraft lateral/directional stability and control determined from numerical simulation data[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 80: 472. DOI:10.1016/j.ast.2018.07.037
- [12] WU Z, CAO Y, YANG Y. Direct CFD prediction of dynamic derivatives for a complete transport aircraft in the dry and heavy rain environment[J]. *The Aeronautical Journal*, 2018, 122(1247): 1. DOI:10.1017/aer.2017.121
- [13] 刘译蔓, 陈琦, 常思江. 暴雨环境下滑翔制导炮弹气动特性研究[J]. *弹道学报*, 2024, 36(2): 37
LIU Yiman, CHEN Qi, CHANG Sijiang. Study on aerodynamic characteristics of gliding guided artillery shell in rainstorm environment [J]. *Journal of Ballistics*, 2024, 36(2): 37. DOI:10.12115/j.issn.1004-499X(2024)02-005
- [14] 杨鹏, 常思江, 张竞文. 暴雨环境下的弹丸气动特性数值模拟[J]. *弹道学报*, 2022, 34(2): 33
YANG Peng, CHANG Sijiang, ZHANG Jingwen. Numerical simulation on aerodynamic characteristics of projectiles in rainstorm environment [J]. *Journal of Ballistics*, 2022, 34(2): 33. DOI:10.12115/j.issn.1004-499X(2022)02-005
- [15] NGUYEN V, PARK W. Numerical study of the thermodynamics and supercavitating flow around an underwater high-speed projectile using a fully compressible multiphase flow model [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 257: 111686. DOI:10.1016/j.oceaneng.2022.111686
- [16] SHAO X, WAN J, CHEN D, et al. Aerodynamic modeling and stability analysis of a high-speed train under strong rain and crosswind conditions[J]. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 2011, 12(12): 964. DOI:10.1631/jzus.A11GT001
- [17] WU J, WU Y, LI Y, et al. A numerical study of flow over supersonic projectile under heavy rain[J]. *AIP Advances*, 2023, 13(11): 1. DOI:10.1063/5.0171938
- [18] ZHAO K, LIU P, QU Q, et al. Numerical simulation of aircraft tire-generated spray and engine ingestion on flooded runways[J]. *Journal of Aircraft*, 2017, 54(5): 1840. DOI:10.2514/1.C034164
- [19] 纪兵兵, 陈金瓶. ANSYS ICEM CFD 网格划分技术实例详解 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012
JI Bingbing, CHENG Jinping. Detailed explanation of ANSYS ICEM CFD mesh division technology example [M]. China Water Power Press, 2012
- [20] ANSYS Inc. ANSYS FLUENT theory guide[M]. Canonsburg, Pa: ANSYS Inc., 2011: 794
- [21] BELL M, WATTERSON J, LISK D. A numerical study into a local protuberance interaction with a fin on a supersonic projectile [C]//47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2009, DOI:10.2514/6.2009-1092
- [22] SOMASHEKAR V, IMMANUEL S A. Aerodynamic study of low Reynolds number airfoil and mini-unmanned aerial vehicle in simulated rain environment [J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2022, 94(10): 1748. DOI:10.34293/acsjse.v4i1.104
- [23] O'ROURKE P, AMSDEN A. A particle numerical model for wall film dynamics in port-injected engines [R]. Warrendale: SAE International, 1996. (SAE Technical Paper 961961)
- [24] FRIEDRICH M A, et al. A separation criterion with experimental validation for shear-driven films in separated flows[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2008, 130(5): 0513011. DOI:10.1115/1.2907405
- [25] REINMANN J J. Effects of adverse weather on aerodynamics[C]//AGARD Conference Proceedings, 1991, 496
- [26] MARSHALL J S, PALMER W M. The distribution of raindrops with size[J]. *Journal of Meteorol*, 1948, 5(4): 165. DOI:10.1175/1520-0469(1948)005<0165:tdorwsx0003e;2.0.co;2
- [27] BEST A C. The size distribution of raindrops[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1950, 76(327): 16. DOI:10.1002/qj.49707632704
- [28] ISMAIL M, CAO Y H, WU Z L. Numerical simulation of airfoil aerodynamic penalties and mechanisms in heavy rain [J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2013, 2013: 1. DOI:10.1155/2013/590924
- [29] MARKOWITZ A H. Raindrop size distribution expressions [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1976, 15(9): 1029. DOI:10.1175/1520-0450(1976)015<1029.CO;2
- [30] 钱龙, 刘丹, 常思江. 带微型扰流片旋转稳定弹气动特性分析 [J]. *弹道学报*, 2020, 32(3): 61
QIAN Long, LIU Dan, CHANG Sijiang. Aerodynamic characteristics of a spin-stabilized projectile equipped with microspoiler [J]. *Journal of Ballistics*, 2020, 32(3): 61. DOI:10.12115/j.issn.1004-499X(2020)03-012
- [31] 王中原, 史金光, 常思江, 等. 现代外弹道学 [M]. 北京: 科学出版社, 2024
WANG Zhongyuan, SHI Jinguang, CHANG Sijiang, et al. Modern exterior ballistics [M]. Beijing: Science Press, 2024

(编辑 丁晓清)