

爆破片开启后膜片形态对氢气流动影响

齐万聪*, 张秀珩, 巴 鹏, 杨晓东

沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2026年6月25日; 录用日期: 2026年7月18日; 发布日期: 2026年7月27日

摘 要

为研究爆破片开启后不同膜片形态对高压氢气管路内稳态流动特性的影响, 建立了膜片开启 45° 、 65° 、 75° 和无膜片四种模型, 并在相同边界条件和求解设置下进行数值模拟。结果表明, 流场变化主要集中在中部过渡区域。与无膜片模型相比, 45° 、 65° 和 75° 模型中心区域速度分别降低约29.2%、20.8%和8.3%, 下游恢复长度分别增加约200%、120%和60%。静压力结果表明, 有膜片模型更易形成局部低压区, 其中 75° 模型最大局部压降最大。局部马赫数分布表明, 45° 模型达到临界状态并形成小范围局部超音速区, 65° 模型局部接近临界状态, 75° 和无膜片模型整体仍以亚声速流动为主。四种模型出口平均速度均接近495 m/s, 出口流场均匀性差异较小。研究表明, 膜片形态是影响高压氢气管路内局部流场分布的重要因素。

关键词

爆破片, 残余膜片, 数值模拟, 流动特性

Rupture Disc Deformation after Opening and Its Effect on Hydrogen Flow

Wancong Qi*, Xiuheng Zhang, Peng Ba, Xiaodong Yang

School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

Received: June 25, 2026; accepted: July 18, 2026; published: July 27, 2026

Abstract

To investigate the influence of different diaphragm morphologies after rupture on the steady-state flow characteristics in a high-pressure hydrogen pipeline, four models were established, including diaphragm opening angles of 45° , 65° , and 75° , as well as a diaphragm-free model. Numerical simulations were conducted under identical boundary conditions and solver settings. The results show that the flow variations are mainly concentrated in the middle transition region. Compared with the

*通讯作者。

文章引用: 齐万聪, 张秀珩, 巴鹏, 杨晓东. 爆破片开启后膜片形态对氢气流动影响[J]. 建模与仿真, 2026, 15(7): 67-78. DOI: 10.12677/mos.2026.157108

diaphragm-free model, the centerline velocity in the 45°, 65°, and 75° models decreases by approximately 29.2%, 20.8%, and 8.3%, respectively, while the downstream recovery length increases by about 200%, 120%, and 60%, respectively. The static pressure results indicate that models with a residual diaphragm are more likely to form localized low-pressure regions, and the 75° model exhibits the largest local pressure drop. The local Mach number distributions show that the 45° model reaches a critical state and develops a small localized supersonic region, whereas the 65° model is locally close to the critical condition. In contrast, the 75° and diaphragm-free models remain predominantly subsonic. In addition, the outlet mean velocities of the four models are all close to 495 m/s, and the differences in outlet flow uniformity are relatively small. The results indicate that diaphragm morphology after rupture is an important factor affecting the local flow-field distribution in high-pressure hydrogen pipelines.

Keywords

Rupture Disc, Residual Diaphragm, Numerical Simulation, Flow Characteristics

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高压氢气在排放通道形成后的管内流动属于典型的可压缩流动问题[1], 其压力、速度和密度在局部区域内往往发生明显变化[2]。对于设置爆破片的管路而言, 开启后形成的实际流通边界并非理想光滑通道, 残余膜片的保留与否以及开口形态差异, 会直接改变局部流道结构, 从而影响管内静压分布、速度再分布及流动发展过程[3][4]。因此相比仅将通道简化为无障碍流道, 围绕爆破片开启后的稳态流动特征开展分析, 更有助于反映实际工况下管内流场的变化规律。

已有研究表明, 高压气体在管道、喷口及局部收缩通道中的流动对几何边界较为敏感, 局部结构变化会引起压力梯度、速度梯度及流线形态的明显改变[5][6]。对于爆破片开启后的管路而言, 残余膜片不仅会影响中部区域的局部通流能力, 还可能改变下游流场的均匀性和稳定性。因此, 仅讨论开启后是否形成通道仍然不够, 还需要进一步关注不同膜片形态下稳态流场的差异[7]。

爆破片开启后残余结构可能改变泄放流场分布, 并影响下游压力恢复与流动均匀性。爆破片开启后通常仍会保留一定残余结构, 如翻边、瓣片、残余舌片及非对称开口等, 这些结构可能引起局部阻塞、二次流、射流偏转及压力恢复延后等现象, 从而影响下游流场分布。现有研究较多关注开启瞬态过程及相关流动响应, 而针对开启后残余膜片条件下稳态流动差异的研究仍相对不足。

本文基于控制变量法的参数化数值模拟方法, 建立无膜片和不同膜片开口角条件下的多组模型并抽取流体域, 在相同边界条件和求解设置下开展数值模拟, 对比分析不同膜片形态对管内静压分布、速度分布及流动轨迹的影响。研究结果可为爆破片开启后排放通道的流动特性认识及相关结构优化提供参考。

2. 物理模型

常见爆破片结构主要包括正拱形、平板型和反拱形三类。为分析爆破片开启后膜片形态对高压氢气管路内流动特性影响, 本文以平板型爆破片 DN100 管路为研究对象, 建立了四种三维模型, 并提取流体域。四种模型均基于同一管路结构进行简化。DN100 平板型爆破片相关几何参数见表 1。

Table 1. Geometric parameters of DN100 flat rupture disc
表 1. DN100 平板型爆破片几何参数

公称直径	外径 D/mm	有效泄放直径 d/mm	膜片厚度 t/mm
DN100	122	100	2.0

建立模型如图 1。

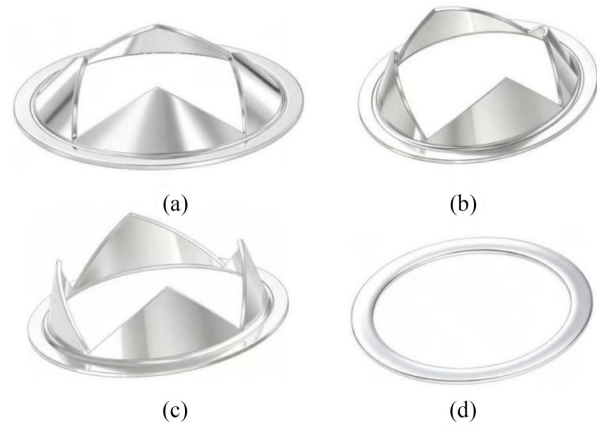


Figure 1. Models of rupture disc at different opening angles
图 1. 爆破片开启不同角度模型

图 1 中(a)~(d)四个模型分别对应着爆破片开启 45°、65°、75°以及无膜片状态，本文设置四种模型，目的是在保持其余边界条件和求解参数一致的前提下，系统比较膜片形态变化对高压氢气管路内稳态流动特性的影响。其中，45°可代表开口较小、膜片对流动道遮挡较强的状态，65°可作为中等开口基准状态，75°可代表较大开口状态，而无膜片模型则作为理想无遮挡参考工况。已有研究表明，爆破片开启方式会影响高压氢气下游流场演化[8]；开口面积变化会改变高压氢气释放过程中的流动强度[9]；局部收缩、不同狭窄入口形式以及不同障碍物布置均会显著影响管内压力波传播、速度分布及流动发展过程[10] [11]。基于上述研究基础，采用 45°、65°、75°和无膜片四种参数化工况开展对比，具有明确的物理依据和建模合理性。

3. 数值方法

3.1. 基本假设与控制方程

考虑到本文重点在于比较四种结构形式下的稳态流动差异，因此计算中作如下处理：

- (1) 流动为三维稳态流动；
- (2) 工质为氢气，并按可压缩介质处理；
- (3) 忽略重力作用对流场的影响；
- (4) 壁面采用无滑移边界条件；
- (5) 残余膜片在计算过程中视为固定壁面，不考虑其进一步变形、振动及流固耦合作用。
- (6) 不考虑化学反应与相变过程。

在上述假设下，流场满足质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程。其一般形式可表示为：连续方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

动量方程:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}$$

能量方程:

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{u} (\rho E + p)] = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T + \mathbf{u} \cdot \boldsymbol{\tau}_{\text{eff}})$$

式中: ρ 为流体密度; $\mathbf{u}$ 为速度矢量; p 为静压; E 为总能量; T 为温度; $\boldsymbol{\tau}$ 为应力张量; k_{eff} 为有效热导系数。

同时, 引入理想气体状态方程:

$$\rho = \frac{p}{RT}$$

3.2. 网格无关性分析

为验证网格划分对计算结果的影响, 选取 65° 膜片模型作为代表性工况开展网格无关性分析。在保持几何模型、边界条件及求解参数一致的条件下, 分别构建粗、中、细三组网格方案, 并选取最小静压、出口平均速度和出口质量流量作为评价指标。三组网格下的计算结果见图 2。

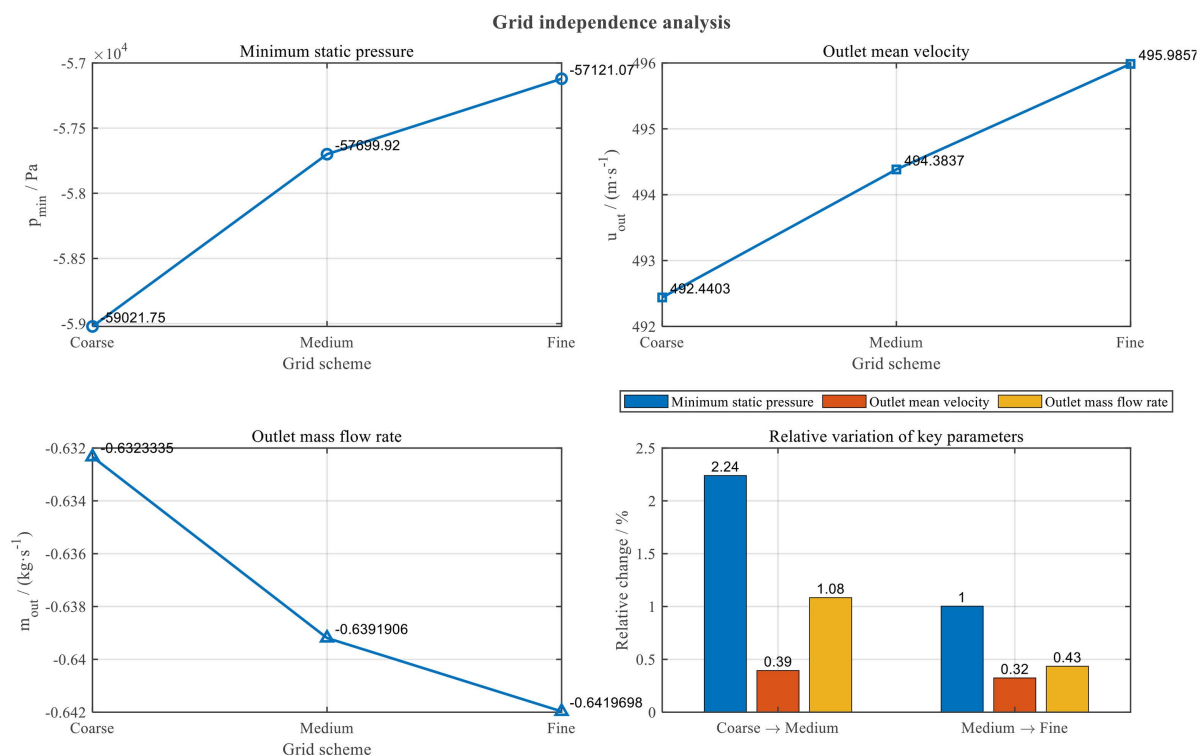


Figure 2. Grid independence analysis results

图 2. 网格无关性分析结果

随着网格不断加密, 三项数据逐渐趋于稳定; 中网格与细网格相比, 变化率较小; 考虑到综合计算

精度与计算成本, 本文后续四种模型的数值计算均采用中网格方案。网格划分完成后, 对网格质量进行了检查。最大偏度平均约为 0.784, 最小正交质量平均约为 0.216。四种模型的网格质量处于可接受范围内, 能够满足后续数值计算要求。网格划分见图 3。

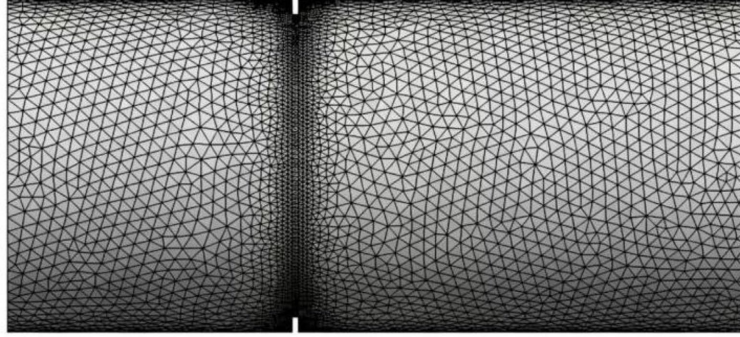


Figure 3. Fluid domain meshing
图 3. 流体域网格划分

3.3. 评价指标定义

为定量比较不同膜片形态对高压氢气管路内流动特性的影响, 本文引入压降和流场均匀性指标对计算结果进行表征。

为表征膜片形态对局部通流阻力的影响, 本文选取膜片前后两个特征截面作为压降计算位置, 定义其压降为:

$$\Delta p = \bar{p}_1 - \bar{p}_2$$

式中, $\bar{p}_1$ 和 $\bar{p}_2$ 分别为上游截面与下游截面的面积平均静压。

为定量评价不同膜片形态对下游流场均匀性的影响, 本文采用出口截面速度均匀性指标进行表征, 其定义为:

$$\gamma_u = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |u_i - \bar{u}| A_i}{2\bar{u} \sum_{i=1}^n A_i}$$

式中, u_i 为出口截面第 i 个面元的速度大小; $\bar{u}$ 为出口截面的面积平均速度; A_i 为对应面元面积。该指标的取值越接近 1, 表明出口截面速度分布越均匀; 反之, 则说明流场速度分布越不均匀, 下游流动扰动越明显。

3.4. 边界条件与求解设置

本文采用 ANSYS Fluent 进行数值求解。根据高压氢气在管内流动的特点, 求解器采用密度基稳态求解器, 速度格式采用绝对速度格式, 并开启能量方程。湍流模型选用 SST $k-\omega$ 模型。边界条件设置如下: 出入口定义为压力出入口, 入口总压取 0.5 MPa, 总温取 300 K; 壁面均采用无滑移边界条件。入口总压取 0.5 MPa, 主要是考虑到该压力水平相对于常压出口条件能够形成较明显的压力差, 可保证氢气在管内表现出典型的可压缩流动特征, 并使不同膜片形态下的局部加速、局部压降及局部马赫数差异得到较清晰体现。同时, 本文研究重点在于比较不同残余膜片形态对稳态流场的影响, 因此在各工况中采用统一入口压力条件, 以突出膜片形态这一单一因素, 避免入口压力变化对对比结果造成干扰。基于上述考虑, 0.5 MPa 被选作本文的基准工况。

在数值离散方面, 对流项采用一阶迎风格式, 空间梯度采用最小二乘单元中心格式, 通量类型采用 Roe-FDS。求解控制中, 库朗数取 0.2, 以改善数值稳定性。初始化方法采用混合初始化。

4. 结果与分析

4.1. 计算稳定性分析

为保证流场结果具有可分析性, 首先对四种模型的计算收敛过程进行检查。四种模型的残差曲线均表现出较为明显的下降趋势, 湍流动能 k 和比耗散率 ω 残差下降较快, 速度分量残差和连续性残差也逐步进入缓慢下降或平台收敛状态。总体来看, 四种模型均获得了较为稳定的数值结果, 可用于流场分布的比较分析。

4.2. 压力特征分析

图 4 为四种模型纵向中心截面的静压力云图, (a)~(d) 分别代表爆破片开启 45° 、 65° 、 75° 以及无膜片模型, 后续图示全部按照此顺序。图 5 为对应的轴向静压力分布曲线。由图 4 可见, 四种模型的静压力均沿流动方向逐渐降低, 压力变化主要集中在中部过渡区域附近。与无膜片模型相比, 有膜片模型在膜片邻近区域形成了更明显的局部低压区, 说明残余膜片会增强中部区域的局部压力梯度。

由图 5 可进一步看出, 不同模型的压力差异主要体现在中部过渡区域前后的局部压降变化。根据后处理结果统计得到, 四种模型的最大局部压降分别约为: 45° 膜片模型 1.56×10^5 pa、 65° 膜片模型 1.55×10^5 pa、 75° 膜片模型 1.58×10^5 pa、无膜片模型 1.54×10^5 pa。以无膜片模型为基准, 45° 、 65° 和 75° 膜片模型的最大局部压降分别增加约 1.3%、0.6% 和 1.9%。

从分布规律看, 无膜片模型的压力下降过程相对平缓, 而有膜片模型的压力下降区间更集中, 表明膜片残余结构会使中部区域压力变化更加局部化。综合云图与曲线可知, 膜片形态会改变管路内静压力分布特征, 不同开口角条件下局部压降存在一定差异, 其中 75° 膜片模型对应的局部压降最为明显。

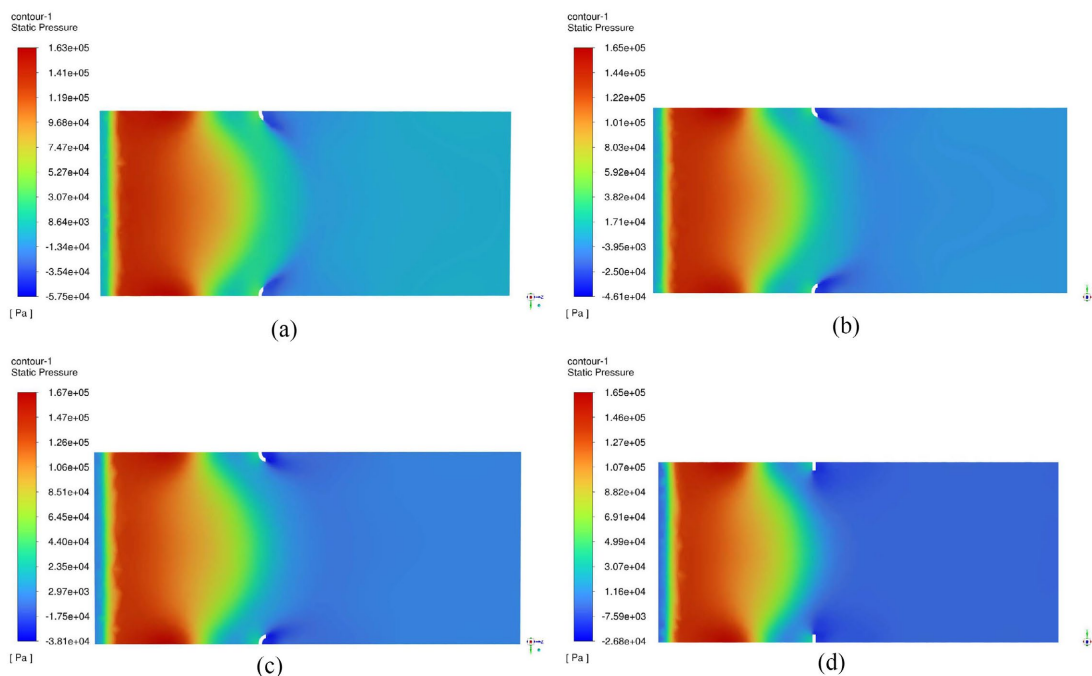


Figure 4. Four models axial static pressure cloud map
图 4. 四种模型轴向静压力云图

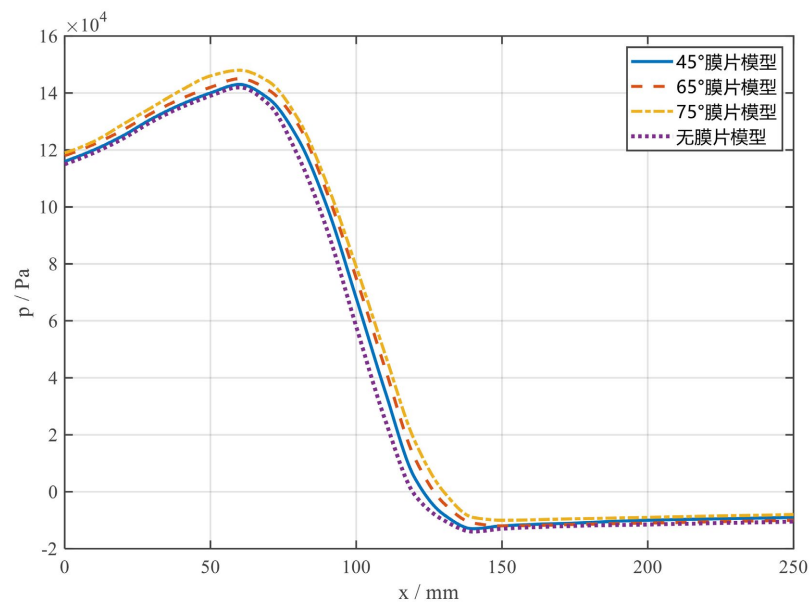


Figure 5. Four models static pressure distribution curve
图 5. 四种模型静压力分布曲线

4.3. 速度特征分析

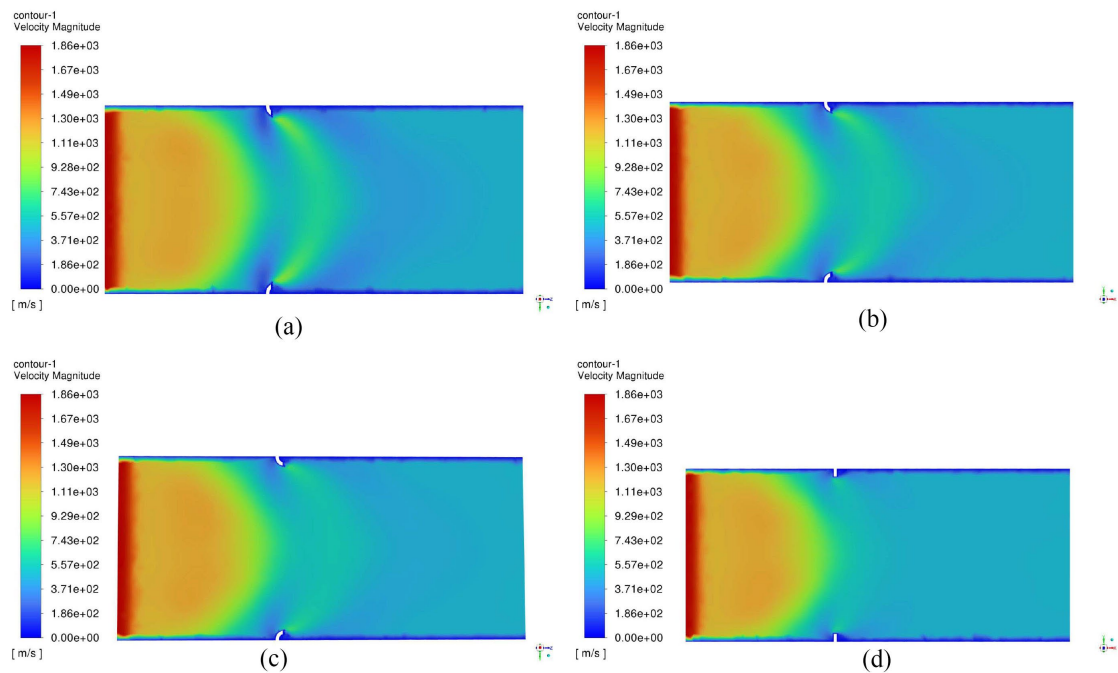


Figure 6. Four models axial velocity cloud map
图 6. 四种模型轴向速度云图

由图 6 可知, 四种模型入口区域速度均较高, 沿程逐渐降低, 并在中部过渡区域附近出现明显扰动。与无膜片模型相比, 有膜片模型在膜片邻近区域形成更明显的局部低速区, 下游则出现再加速现象, 其中 45°模型最明显, 65°次之, 75°与无膜片模型较为接近。

由图7可见,四种模型在 $x = 125 \sim 130$ mm 附近均出现局部速度谷值。根据后处理结果统计得到 45° 、 65° 、 75° 和无膜片模型在中部过渡区特征位置的中心区域最低速度分别约为 340、380、440 和 480 m/s。以无膜片模型为基准, 45° 、 65° 和 75° 模型中心区域速度分别降低约 29.2%、20.8%和 8.3%。说明膜片开口角越小,中部区域对主流的阻滞作用越强。

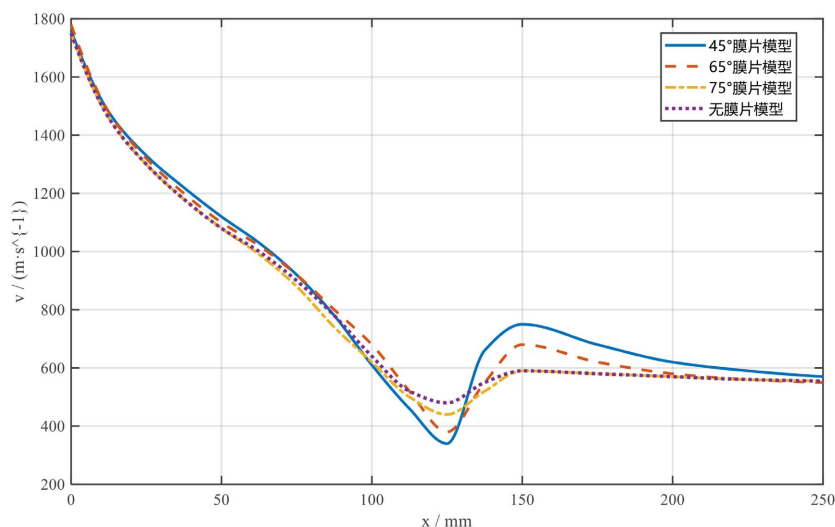


Figure 7. Four models velocity distribution curve

图 7. 四种模型速度分布曲线

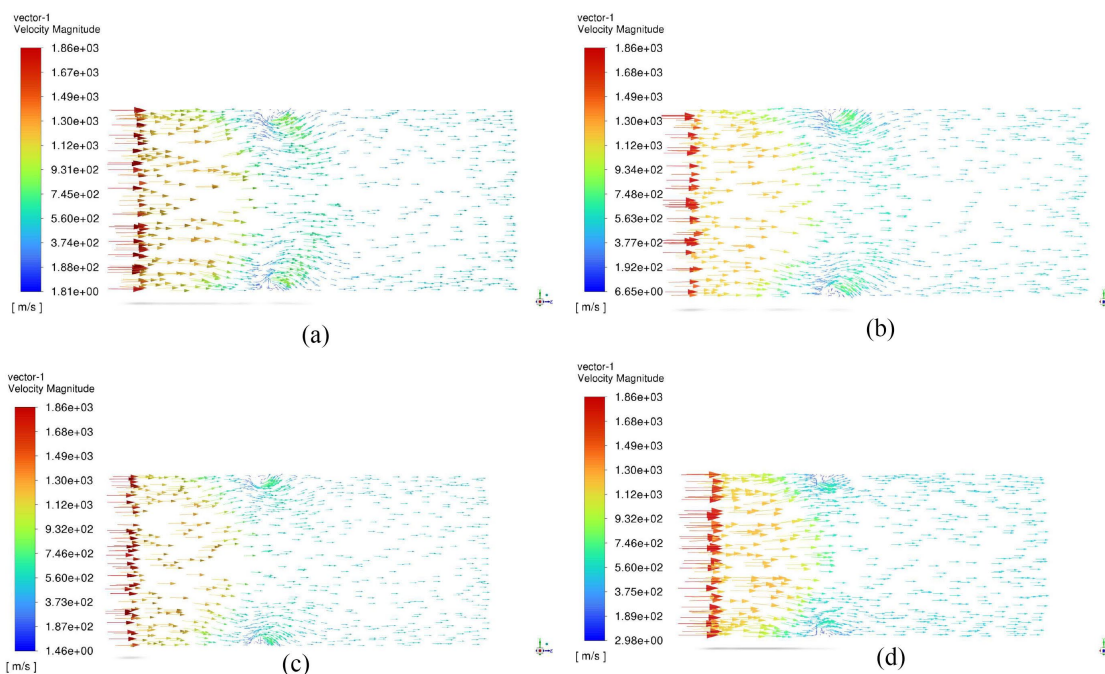


Figure 8. Four models flow field vector diagram

图 8. 四种模型流场矢量图

在下游恢复区,四种模型在 $x = 150$ mm 附近的速度恢复水平存在差异。 45° 、 65° 、 75° 和无膜片模型在中部过渡区特征位置的速度分别约为 750、680、590 和 590 m/s。相较于无膜片模型, 45° 和 65° 模型的

恢复速度分别提高约 27.1%和 15.3%，75°模型与无膜片模型基本一致。说明较小开口角会使下游再加速现象更加明显。

若将速度由局部谷值恢复至重新趋于平缓的轴向距离定义为下游恢复长度，则无膜片模型约为 25 mm，75°模型约为 40 mm，65°模型约为 55 mm，45°模型约为 75 mm。以无膜片模型为基准，75°、65°和 45°模型的下游恢复长度分别增加约 60%、120%和 200%。这表明膜片形态会显著影响下游流场恢复过程。

结合图 8 和图 9 可知，四种模型在入口至中部区域均形成较为集中的主通道，表现出明显的高速射流特征。无膜片模型迹线较平顺，有膜片模型在膜片邻近区域的迹线收缩和偏折更明显，其中 45°模型最突出。综合来看，膜片开口角越小，对速度场和射流结构的影响越显著。

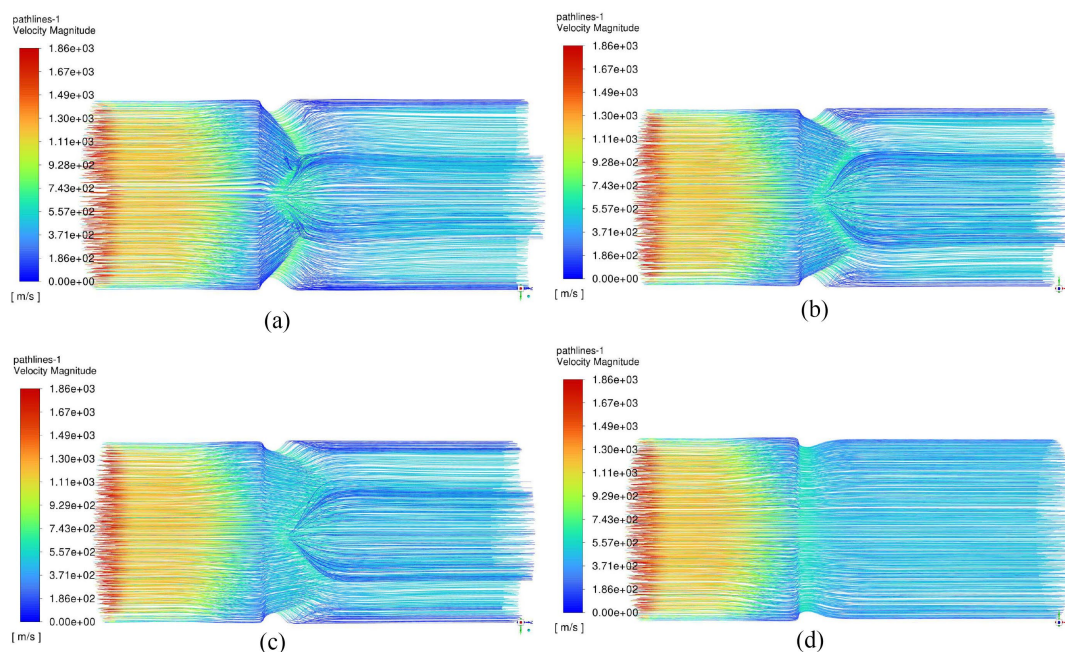


Figure 9. Four models pathline diagram
图 9. 四种模型迹线图

4.4. 局部马赫数特性分析

图 10 给出了四种模型纵向中心截面的局部马赫数云图。总体上，四种模型均表现为入口区域马赫数较高，沿程逐步降低；膜片邻近位置均出现局部马赫数升高区，说明中部区域存在明显局部加速现象。

不同模型相比，45°膜片模型在膜片边缘附近的高马赫数区最明显，范围也最大；65°模型次之；75°模型局部高马赫数带进一步减弱；无膜片模型整体分布最平缓，仅在中部突变位置附近存在较弱的局部升高区。说明随着膜片开口角增大，残余膜片对局部流动的加速作用逐渐减弱。

以 $Ma = 1$ 作为临界状态判断依据，45°模型在膜片边缘附近已达到临界状态，并出现小范围 $Ma > 1$ 区域，表明形成了局部超音速区；65°模型局部马赫数接近 1，表现出较弱的临界加速特征；75°模型虽存在局部升高，但整体仍以亚声速流动为主；无膜片模型未出现明显临界流动特征。综合来看，局部临界和超音速现象主要出现在小开口角膜片工况下，其中 45°模型最为明显。

将本文结果与已有研究进行对比可以发现，文献[8]指出爆破片开启方式会显著影响高压氢气下游流场演化，本文在开启后稳态条件下同样观察到，不同膜片开口角会明显改变膜片邻近区域的压力分布、

速度衰减及局部马赫数特征;文献[9]表明开口面积变化会改变高压氢气释放过程中的流动强度,本文 45°、65°和 75°模型在中心区域速度降低幅度、下游恢复长度及局部压降上的差异,说明有效通流面积对稳态流场分布同样具有重要影响;文献[10]针对不同狭窄入口形式指出,局部收缩会增强流动扰动并改变速度分布,本文在膜片边缘附近观察到的局部低压区、局部高马赫数区及射流偏折现象,与该规律具有一致性。与上述研究主要关注瞬态泄放和局部障碍效应不同,本文进一步补充了爆破片开启后残余膜片形态对管内稳态流场的影响规律。

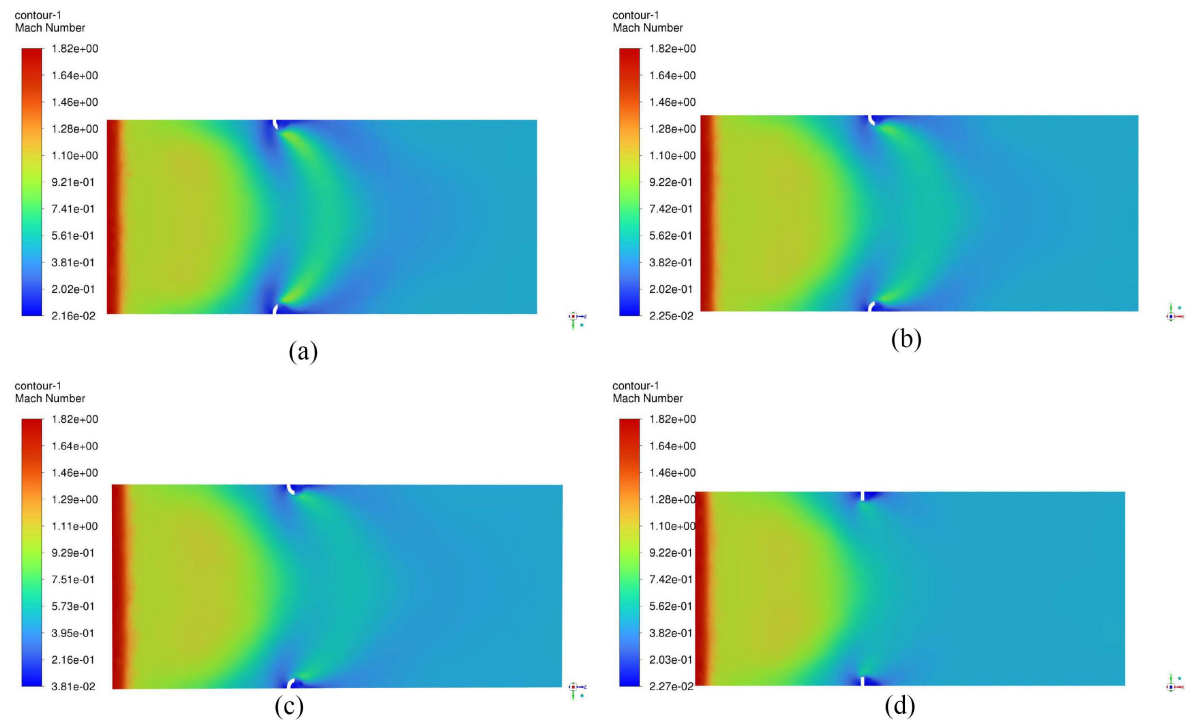


Figure 10. Four models axial mach number cloud map
图 10. 四种模型轴向马赫数云图

4.5. 出口流场均匀性分析

为比较不同膜片形态对下游流动恢复状态的影响,选取出口截面的平均速度和速度均匀性指标作为评价参数,结果见表 2。

Table 2. Uniformity parameters of outlet flow field for four models
表 2. 四种模型出口流场均匀性参数

模型	出口平均速度 $\bar{u}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	速度均匀性指标 γ_u
45°膜片模型	493.8258	0.9979776
65°膜片模型	494.3837	0.9981844
75°膜片模型	494.6254	0.9982209
无膜片模型	495.3656	0.9978359

由表 2 可见,四种模型的出口平均速度均集中在 494~495 m/s 范围内,整体差异较小。其中,无膜片模型出口平均速度最高,45°膜片模型最低,65°和 75°模型介于两者之间。这表明不同膜片形态对出口截

面整体通流速度存在一定影响, 但影响幅度有限。

从速度均匀性指标看, 四种模型的 γ_u 均接近 1, 说明出口截面速度分布整体较为均匀。相比无膜片模型, 三种有膜片模型的均匀性指标略有提高, 其中 75°模型最大, 65°次之, 45°模型相对较低。但各模型之间差异较小, 说明在出口位置, 前方中部区域引起的局部扰动已得到较大程度恢复, 不同膜片形态对出口流场均匀性的影响相对有限。

综合出口平均速度和均匀性指标可知, 膜片形态对管路中部局部流场影响较明显, 而在出口位置, 其影响已明显减弱。对于本研究所设工况, 出口流场整体均表现出较好的恢复特征。

5. 结论

根据 45°膜片、65°膜片、75°膜片和无膜片四种模型的数值模拟结果, 对高压氢气管路内稳态流场进行了比较分析, 可得出如下结论:

- 1) 四种模型均表现出入口高压、沿程压降和下游速度调整的基本规律, 流场变化主要集中在中部过渡区域附近。
- 2) 膜片形态会影响局部静压力分布。有膜片模型较无膜片模型更易形成局部低压区, 其中 75°模型的最大局部压降最大, 45°和 65°次之, 无膜片模型压力过渡相对更平缓。
- 3) 膜片形态对速度场影响明显。与无膜片模型相比, 45°、65°和 75°模型中心区域速度分别降低约 29.2%、20.8%和 8.3%, 下游恢复长度分别增加约 200%、120%和 60%, 其中 45°模型影响最明显。
- 4) 局部马赫数结果表明, 45°模型在膜片边缘附近达到临界状态并形成小范围局部超音速区, 65°模型局部接近临界状态, 75°模型和无膜片模型整体仍以亚声速流动为主。
- 5) 四种模型的出口平均速度均接近 495 m/s, 速度均匀性指标均接近 1, 说明不同膜片形态对出口流场均匀性的影响相对有限。

参考文献

- [1] 李雪芳, 毕景良, 柯道友. 高压氢气储存系统泄漏的热力学模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(4): 503-508.
- [2] 李雪芳, 毕景良, 林曦鹏, 等. 高压氢气泄漏扩散数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(12): 2482-2485.
- [3] 刘延雷, 徐平, 郑津洋, 等. 管道输运高压氢气与天然气的泄漏扩散数值模拟[J]. 太阳能学报, 2008, 29(10): 1252-1255.
- [4] 郭崇志, 幸莎. 安全阀开启过程的瞬态模拟与试验验证[J]. 高校化学工程学报, 2014, 28(2): 376-383.
- [5] Mogi, T., Wada, Y., Ogata, Y. and Koichi Hayashi, A. (2009) Self-Ignition and Flame Propagation of High-Pressure Hydrogen Jet during Sudden Discharge from a Pipe. *International Journal of Hydrogen Energy*, **34**, 5810-5816. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.04.079>
- [6] Xu, B.P. and Wen, J.X. (2012) Numerical Study of Spontaneous Ignition in Pressurized Hydrogen Release through a Length of Tube with Local Contraction. *International Journal of Hydrogen Energy*, **37**, 17571-17579. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.04.150>
- [7] Zhang, J., Zhang, X., Huang, W., Dong, H. and Wang, T. (2020) Isentropic Analysis and Numerical Investigation on High-Pressure Hydrogen Jets with Real Gas Effects. *International Journal of Hydrogen Energy*, **45**, 20256-20265. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.111>
- [8] Lu, C., Zhang, R., Zheng, J., Ma, K. and Li, Q. (2025) Numerical Study on the Effects of Rupture Disk Opening Manner on High-Pressure Hydrogen Release and Spontaneous Ignition. *International Journal of Hydrogen Energy*, **139**, 854-867. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.332>
- [9] Cha, S., Roh, T. and Lee, H.J. (2021) Effect of Opening Area on the Suppression of Self-Ignition of High-Pressure Hydrogen Gas Leaking in the Air by an Extension Tube. *International Journal of Hydrogen Energy*, **46**, 5904-5915. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.132>
- [10] Duan, Q., Wu, Y., Jiang, G., Tang, J., Zeng, Q., Zhang, S., et al. (2023) Experimental Investigation on the Shock Wave

- and Spontaneous Ignition of High-Pressure Hydrogen Released into a Tube through Different Narrowness Inlets. *International Journal of Hydrogen Energy*, **48**, 33346-33357. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.059>
- [11] Li, P., Zeng, Q., Duan, Q., Chen, X. and Sun, J. (2023) Effects of Obstacles inside the Tube on Initial Self-Ignition of High-Pressure Hydrogen Release through a Tube. *Fuel*, **339**, Article 127354. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127354>