

直线型和渐缩型喷嘴结构对涡流管性能的影响

劳有杰¹, 王鹏飞^{1,2*}, 谢雍哲¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 采用 FLUENT 数值模拟软件, 对喷嘴入口面积相同的圆形渐缩型、矩形渐缩型以及圆形直线型、矩形直线型这4种涡流管进行数值模拟。研究在压力为 0.3, 0.4, 0.5 MPa 条件下4种涡流管在 0.5 MPa 下的温度场、压力场和速度场分布。结果表明, 矩形直线型喷嘴在 0.5 MPa 压力下具有最优的能量分离性能; 矩形渐缩型喷嘴在各工作压力下均展现出稳定的制冷效果和较高的流动稳定性。进一步分析发现, 渐缩型喷嘴因其压力分布更均匀、径向压力梯度更明显, 有助于提升涡流管的制冷效率和工作稳定性。

关键词: 数值模拟; 制冷效应; 涡流管; 喷嘴形状; 压力场; 速度场

中图分类号: TB619

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2025)02-0056-10

The Impact of Straight and Convergent Nozzle Structures on the Performance of Vortex Tubes

LAO Youjie¹, WANG Pengfei^{1,2}, XIE Yongzhe¹

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Numerical simulations are conducted by using Fluent to investigate vortex tubes with identical nozzle inlet areas, including circular and rectangular configurations, each with both convergent and straight types. The cooling effects of these four vortex tubes are investigated under pressures of 0.3, 0.4, and 0.5 MPa, and the distributions of temperature field, pressure field, and velocity field were analyzed at 0.5 MPa. Results indicate that the rectangular straight nozzle exhibits the highest energy separation efficiency at 0.5 MPa, while the rectangular convergent nozzle demonstrates stable cooling performance and superior flow stability across all tested pressures. Further analysis reveals that convergent nozzles, characterized by more uniform pressure distribution and pronounced radial pressure gradients, effectively enhance the cooling efficiency and operational stability of vortex tubes.

Keywords: numerical simulation; cooling effect; vortex tube; nozzle shape; pressure field; velocity field

Ranque-Hilsch 涡流管 (Vortex Tube, RHVT) 是一种能够将压缩气体分离为高温流和低温流的设备, 自 Ranque 于 1933 年首次提出以来^[1], 由于其具有结构简洁、高可靠性、无移动部件和无须外部能量输入等优点, 因此受到了学术界和工业领域的持续关注^[2-4]。涡流管主要依靠高速旋转的压缩气体在管内实现冷流和热流的分离, 广泛应用于局部制冷和工业降温等场合^[5-6]。尽管其总体能效不及传统制冷设备, 但由于具有无须化学反应与冷媒、维护简单等优势, 故其在特定应用领域具有不可替代的潜力。然而, 涡流管内部能量分离的物理机制极为复杂, 长期以来一直是流体力学与热物理研究的重要课题。

为深入揭示涡流管内部复杂的流动与能量分离机理,近年来国内外学者采用试验测试与计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)数值模拟等多种方法对其性能进行了系统研究. SKYE 等^[7]和 ALJUWAYHEL 等^[8]通过 CFD 模拟与试验结果对比,证实了数值模拟在涡流管温度分离预测方面的有效性; PARULEKAR^[9]通过试验证明了渐缩型喷嘴结构在能量分离方面的优势,但未深入阐释其内部机理;何丽娟等^[10]针对多种喷嘴结构(如渐缩型、直线型、阿基米德型等)开展性能对比试验,发现渐缩型喷嘴具有更佳的能量分离效果,但对于不同喷嘴流场结构与能量分离效率之间的耦合关系缺乏细致探讨.

近年来,数值模拟已成为研究涡流管内部流动与能量分离规律的主要工具. THAKARE 等^[11]通过 CFD 对不同气体、湍流模型及离散化格式下的能量分离效果进行了深入分析,验证了模拟方法的可靠性; DUTTA 等^[12]进一步比较了多种湍流模型对温度分离预测的影响,强调了湍流模型选择对仿真准确性的决定性作用;何丽娟等^[13]利用 FLUENT 平台,系统研究了喷嘴结构参数对涡流管内部流场与能量分离性能的影响,并提出了针对性的结构优化建议.

针对目前不同喷嘴结构对涡流管能量分离影响的认识尚不充分的问题,本文以圆形渐缩型、矩形渐缩型以及圆形直线型、矩形直线型这 4 种喷嘴结构为对象,采用数值模拟软件进行三维数值模拟,对涡流管内部温度场、压力场和速度场进行可视化与对比分析,旨在揭示不同喷嘴结构对能量分离性能的影响规律,并为涡流管结构优化和高效应用提供理论支持与参考依据.

1 数值模拟

1.1 物理模型建立

考虑成本效益和精度,本研究采用物理简化模型对矩形渐缩型涡流管进行仿真分析.图 1 展示所采用的简化物理模型,主要包含冷端管、热端管、热端锥形阀及进口流道 4 个基本部分.4 种涡流管的喷嘴形状不同,但入口面积保持一致,具体差异见图 2.

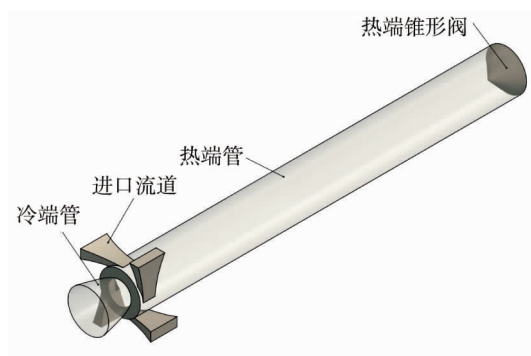


图 1 矩形渐缩型涡流管物理简化模型

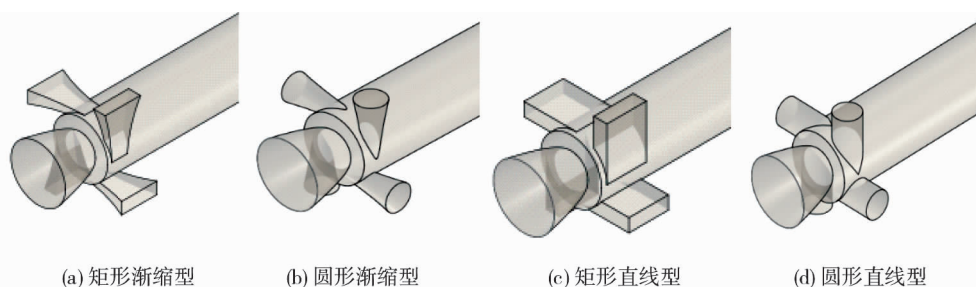


图 2 涡流管喷嘴形状对比

本研究对涡流管模型进行优化,最终确定关键尺寸参数:进口流道共 4 个,单个入口面积为 18.75 mm^2 ,入口总面积为 75 mm^2 ;热端管的直径为 11.5 mm ,长度为 110 mm ;冷端管的出口直径为 6.4 mm .此外,锥形

阀的高度设定为 5.88 mm.在相同冷流率下,不同喷嘴结构涡流管出口的等效面积不同,通过调节锥形阀的半径,调节出口面积,实现对冷端与热端气流比例的精准调控,进而有效地改变制冷与制热效果.

1.2 网格划分

在 ANSYS FLUENT 2023 R2 软件中对所提出的计算模型进行网格划分.选用基于 Mosaic 技术的 Poly-Hexcore 网格类型,该网格类型融合了多面体网格与六面体核心网格的优势.在靠近墙面的模型区域采用多面体网格单元,以便更精准地处理流体在这些区域的高梯度特性;在模型的中心区域使用六面体网格核心单元,旨在提升计算的稳定性和效率.网格划分结果相关细节见图 3.

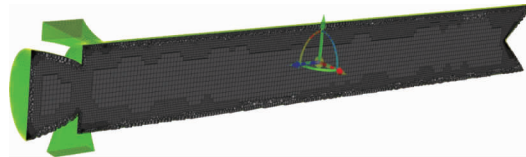


图 3 网格划分

为了确保所得结果的准确性,本文进行网格无关性验证.验证的基本原理:在保持边界条件不变的情况下,细化网格后的仿真结果应与原始网格的结果相差不大.网格无关性验证结果如图 4 所示,当网格数超过 384 752 个时,制冷效应与网格尺寸或数量的变化无显著相关性,从而证明了数值解已经排除了网格大小或密度的影响.

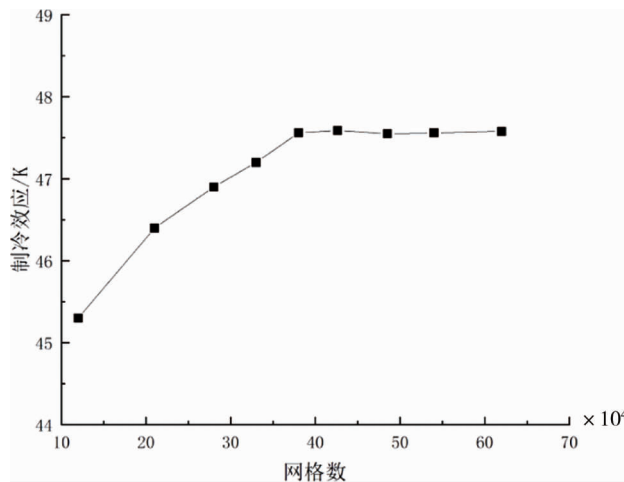


图 4 网格无关性验证

鉴于喷嘴的几何复杂性、计算域的尺寸及形状多样性,并确保计算的效率和结果的准确性,本次模拟选择网格节点数在 390 000~450 000.

1.3 湍流模型和边界条件

在 ANSYS FLUENT 软件中针对涡流管等复杂流场的模拟,可以选用多种湍流模型,如 standard $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型、 $k-\omega$ 模型、SST $k-\omega$ 模型以及混合 LES/RANS 模型,这些计算模型可以精确地反映流体的流动情况.根据文献[11],standard $k-\varepsilon$ 模型与 $k-\omega$ 模型的预测结果较为一致.在本研究中,综合计算效率和预测准确性的考量,选择使用 standard $k-\varepsilon$ 模型进行模拟.该模型适用于各种复杂的湍流场,且相较于更为复杂的模型,其具有较高的计算效率.

本数值模拟工作采用稳态求解策略完成,以简化瞬态湍流的复杂性,同时确保计算结果的稳定性和收敛性.入口压力 P_{in} 设置 3 个不同条件:0.3,0.4,0.5 MPa.每种涡流管的 4 个喷嘴入口设置相同的边界条件.模拟中的流体为理想的可压缩空气,温度设定为 300 K.对于冷端和热端出口,均设定为标准大气压.假设壁面为无滑移边界,并采用壁面函数法对近壁区进行处理,以便更准确地捕捉到靠近壁面的流动特性.

2 模拟结果分析

涡流管的性能可以通过几个关键的参数来评估,其中包括冷流率、制冷效应、制热效应和分离效应.现设涡流管进口、冷端出口和热端出口温度依次为 T_{in}, T_c, T_h ; 喷嘴入口、冷端出口和热端出口流体质量流量依次为 m_{in}, m_c, m_h , 转换关系如下:

1) 涡流管冷流率 μ 为冷端流体质量流量与进口流体总质量流量之比,反映了流入涡流管的气体被分配到冷端的比例:

$$\mu = \frac{m_c}{m_{in}}.$$

2) 涡流管制冷效应 ΔT_c 为进口流体介质与冷端出口流体介质的温度差:

$$\Delta T_c = T_{in} - T_c.$$

3) 涡流管制热效应 ΔT_h 为热端出口流体介质与进口流体介质的温度差:

$$\Delta T_h = T_h - T_{in}.$$

4) 涡流管分离效应 ΔT , 热端出口流体介质与冷端出口流体介质的温度差:

$$\Delta T = T_h - T_c.$$

2.1 管内温度场分析

在入口压力为 0.5 MPa、进口温度为 300 K, 且冷端与热端静压均为标准大气压的工况下, 对 4 种不同喷嘴结构的涡流管进行温度场数值模拟, 结果如图 5 所示. 由图 5 可知, 所有结构均表现出明显的能量分离现象, 即热端气流的总温普遍高于冷端, 且沿轴向方向温度梯度显著. 其中, 直线型喷嘴涡流管的能量分离效应尤为突出, 轴向温度变化明显. 在 4 组温度云图中, 矩形直线型喷嘴的能量分离性能最优, 最大温差达到 72.66 K.

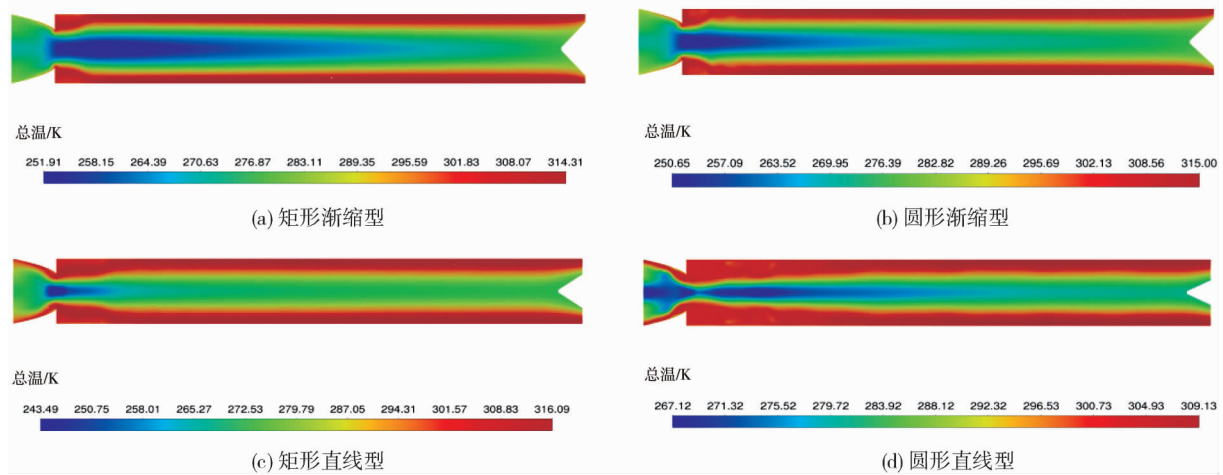


图5 $P=0.5\text{ MPa}, \mu=0.1$ 时不同喷嘴涡流管温度场云图

进一步对比发现, 在冷流率较低时, 矩形直线型喷嘴涡流管展现出更优的制冷效应, 不同压力下制冷效应随冷流率的变化规律见图 6. 这主要是由于低冷流率下, 冷端出口的高温回流现象减弱, 轴心回流的气体体积较少, 大部分气体得以在近冷端出口充分完成能量分离, 进而提升局部的制冷效果. 随着冷流率的增加, 流向冷端的高温气体体积分数增多, 轴心回流加强, 高温气体未能充分分离就被带出冷端, 局部温降幅度减小, 整体制冷效应降低.

以图 6(c) 为例, 圆形直线型涡流管在入口压力为 0.5 MPa 时, 制冷效应的最低值为 12 K, 最高值为 38.5 K, 呈现先上升后下降的趋势. 当冷流率较低时, 高温气流沿壁面逆流至冷端, 抑制了冷端温降, 逆流情况见图 5(d). 随着冷流率由 0.1 增加至 0.2, 逆流现象减弱, 能量分离增强, 制冷效果提升. 以冷流率 $\mu =$

0.1 为临界点,冷端出口的气体流量占比增大使得大量气体尚未在管内完成充分的能量分离和分层过程便直接流出.此时,冷端出口混杂了部分高温及中间温度气体,导致冷端温度升高,温降幅度减小,整体制冷效应下降.

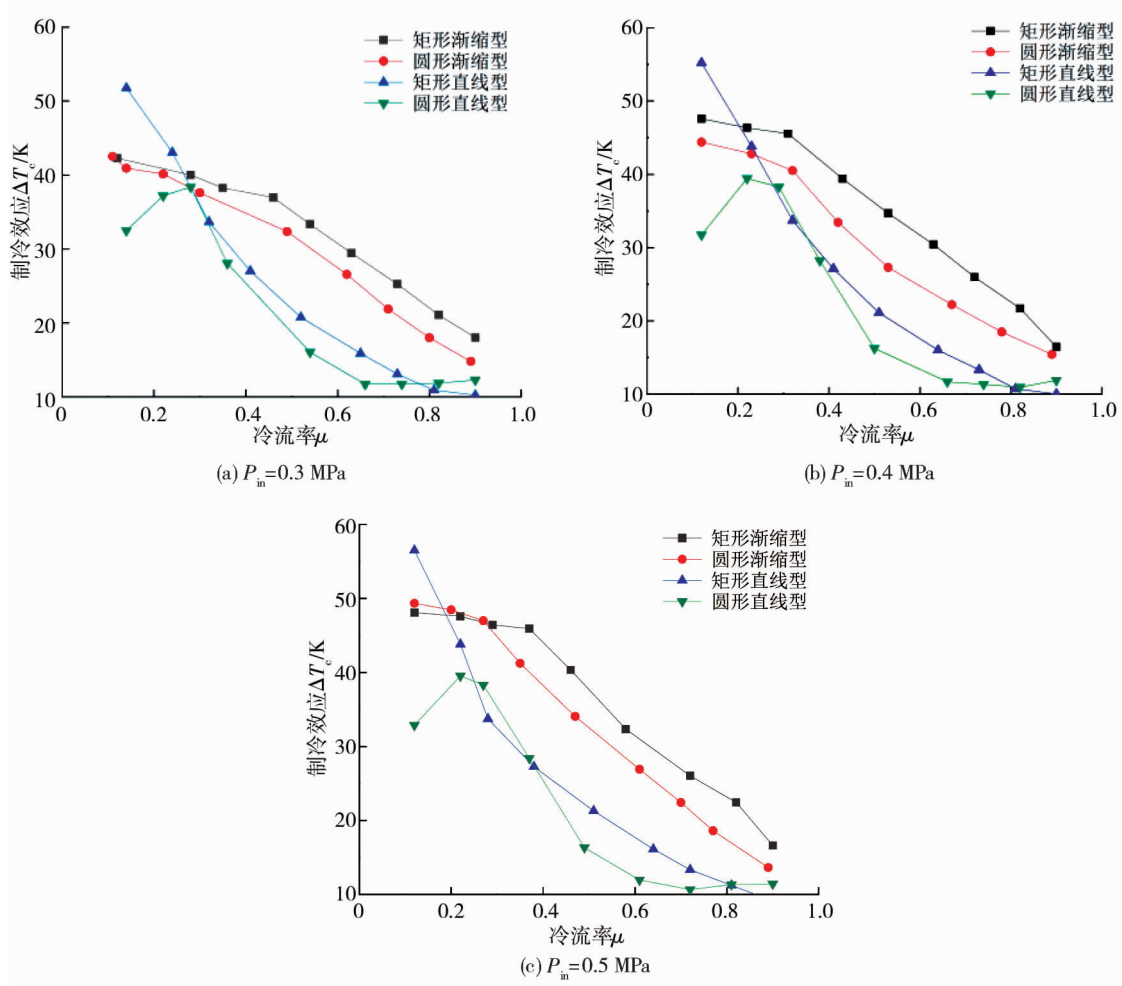


图 6 4 种涡流管在不同压力、冷流率下的制冷效应

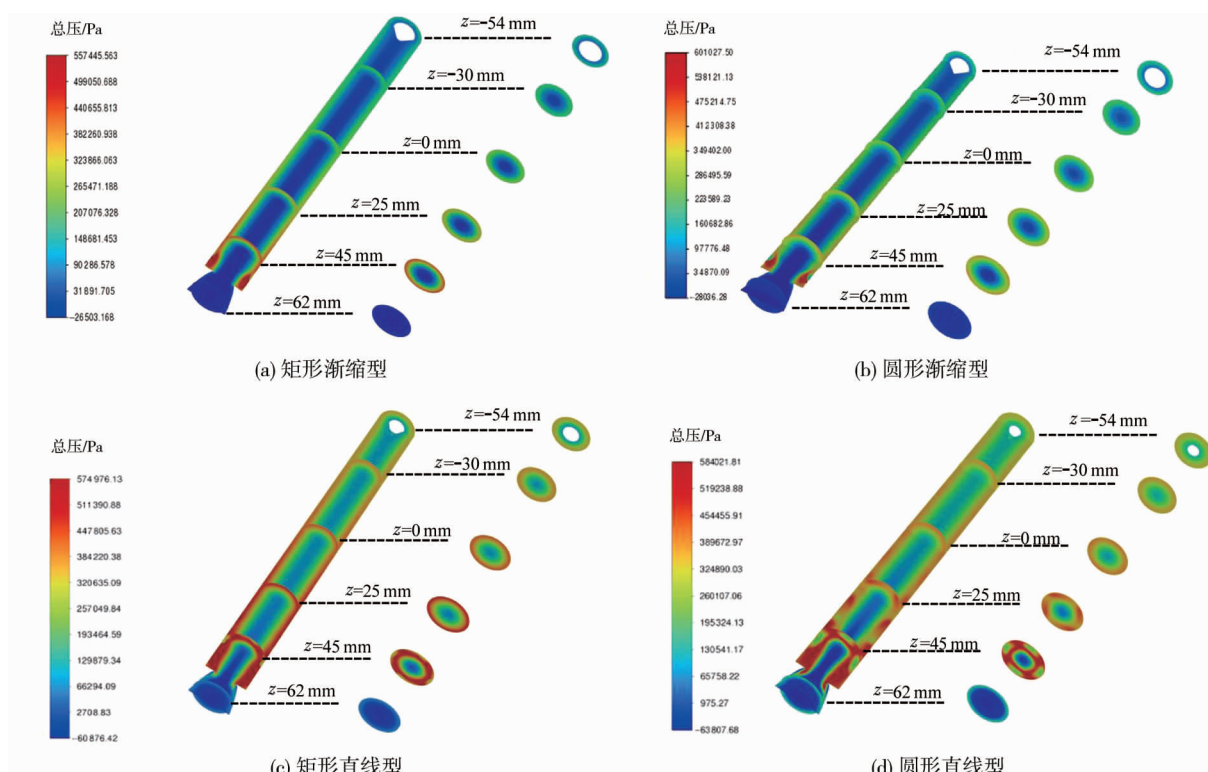
2.2 管内压力场分析

2.2.1 轴向压力

轴向压力的大小及其梯度变化直接影响涡流管的制冷效应.轴向压力分布决定气体分子从高压区向低压区的流动趋势,进而影响涡流管内部的能量分离过程.

以热端管中心为坐标原点,将涡流管中心轴线设为 z 轴,并规定指向冷端的方向为 z 轴正向.在 z 为 $-54, -30, 0, 25, 45, 62 \text{ mm}$ 这 6 个位置截取横截面云图进行分析,结果见图 7.由图 7 可知:在 $z = 62 \text{ mm}$ 横截面,直线型涡流管存在回流现象,冷端出口管壁保持着较大的压力,其中圆形直线型尤为明显,表明其冷端管内形成了较大的负压,进而导致更显著的回流;相比之下,渐缩型涡流管回流现象并不明显.

进一步观察 $z = -54 \sim 45 \text{ mm}$ 处截面可知,渐缩型涡流管轴心处压力沿轴向方向基本保持平稳,无明显变化.这主要是由于在离心力作用下,靠近管壁的气体压力较高,而轴心区由于旋流较弱,压力相对较低.相反,直线型涡流管轴心处沿轴向方向存在更大的压力梯度,反映出流体在流道入口附近加速流动,有助于提升局部制冷效果.

图7 $P=0.5\text{ MPa}$ 、 $\mu=0.1$ 时不同喷嘴涡流管压力场云图

轴心处总压的轴向分布如图8所示.直线型涡流管沿轴向方向上的压力差显著大于渐缩型涡流管.压差越大,进入管内的气体获得的流速和动能更高,涡流管中的能量分离现象更加明显;此外,压差的增大还会加剧内部湍流,强化湍流强度.然而,若轴向压力梯度过大,导致动能损失增加,则会影响制冷效率.直线型喷嘴虽然能提供更高的温差和制冷效率,但其流动稳定性和压力分布均匀性有所降低.

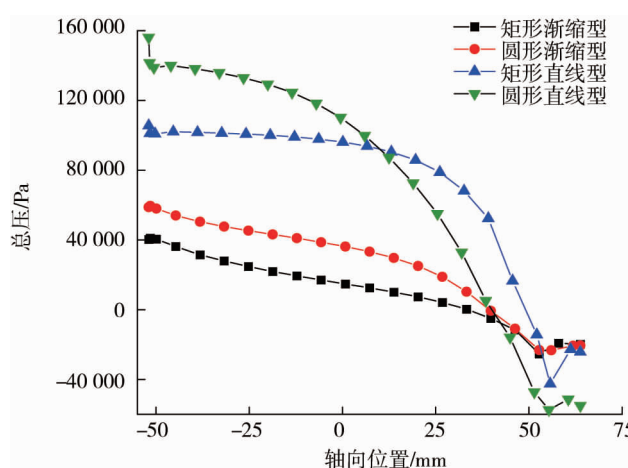


图8 轴心处总压的轴向变化

渐缩型涡流管轴心处的压力沿轴向方向的变化较小,压力分布更均匀,表明流体动力学更为平稳,形成更稳定的低压区,有利于促进冷热能量分离,降低热损失,提高制冷效率.均匀的压力分布还能降低轴向干扰,提高系统的可靠性与持久性.与之相应,渐缩型喷嘴涡流管的制冷效应随着冷流率的增加平缓下降.

2.2.2 径向压力

在涡流管内部,气体分子的径向迁移伴随着能量的再分配,直接影响制冷效果.径向压力梯度不仅决定了气流的分布,还影响了热量与动量的传递机制.从宏观上看,径向压力变化会改变流体动力学特性,进

而影响整体制冷效率;微观角度上,压力梯度是气体分子的运动状态和能量分布共同决定的,是能量分离机制的重要影响因素。

图 9 为 4 种喷嘴在 $z=0$ mm 界面处的总压分布.由图 9 可知:矩形渐缩型、矩形直线型、圆形渐缩型和圆形直线型这 4 种涡流管在 $z=0$ mm 截面处的总压分布均呈现“中心低压—外围高压”的典型特征,但不同结构的压力云图在分布形态和均匀性上存在明显差异.以矩形渐缩型为代表,截面外围形成完整且连续的高压环带,等压线近似同心圆状分布,径向压强梯度显著且分布平稳.这种均匀、陡峭的径向压力场有利于建立稳定的旋流结构,提升气体在径向上的分层与离心分离效果,从而增强制冷效率和制冷性能的稳定性.与此同时,矩形渐缩型在中心区域表现出集中的低压区,冷流能够在核心区持续膨胀降温,为后续冷端输出提供更强的温降驱动力。

与此不同,矩形直线型在 $z=0$ mm 截面并未表现出明显的中心低压集中区,压力分布相对平缓,原因在于该结构在 $z=0$ mm 截面处的能量分离并不充分,实际上其最显著的局部低压和能量分离效果主要集中在靠近喷嘴入口 $z=45$ mm 处(图 5(c)和图 7(c)),即能量分层与制冷作用更依赖于入口附近的局部区段.圆形渐缩型总体表现介于两者之间,具有连续的高压环带和明显的径向压力梯度,但均匀性略逊于矩形渐缩型.圆形直线型压力分布最不均匀,中心低压区范围较小,分层效果有限.除矩形直线型外,中心低压区的显著性和分布均匀性是决定涡流管能量分离和制冷性能稳定性的重要因素。

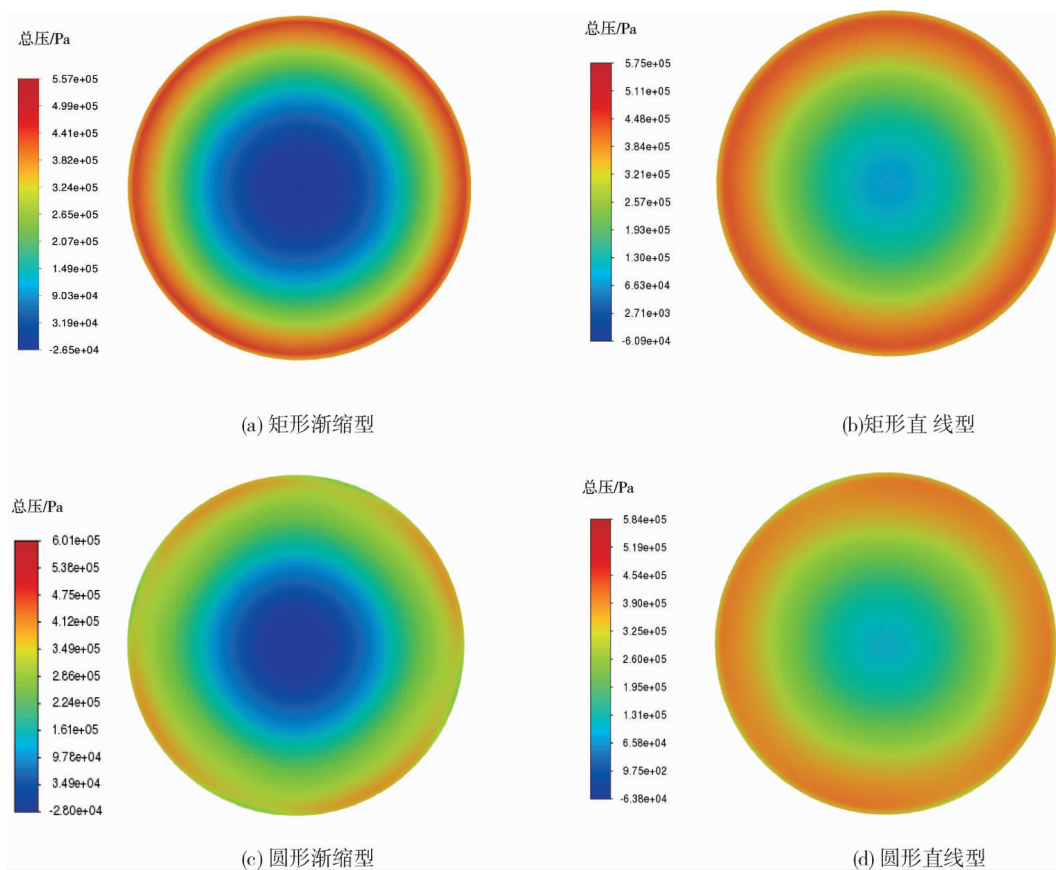


图 9 $P=0.5$ MPa, $\mu=0.1$, $z=0$ mm 截面压力云图

2.3 管内速度场分析

2.3.1 轴向速度

轴向速度是衡量涡流管内部气体沿主轴方向流动特性的关键参数,对于揭示能量分离机理和制冷性能具有重要意义.在涡流管的内部流动中,流体动能与流动稳定性之间存在复杂的平衡关系.一方面,足够的轴向动能有助于强化能量分离效果;另一方面,过大的轴向速度变化则可能引发流动不稳定,进而降低制冷效率。

为明确喷嘴结构对轴向速度的影响,对4种涡流管中心轴线上的速度分布进行分析,结果如图10所示。由图10可知:不同类型涡流管在中心轴线上的轴向速度分布存在显著差异。矩形直线型和圆形直线型涡流管在 $z=55$ mm左右的位置,其最大正向轴向速度分别达到230 m/s和190 m/s;而圆形渐缩型和矩形渐缩型的最大正向速度则分别为130,58 m/s。直线型喷嘴的几何结构促使流体在喷嘴入口附近获得更高的加速度和动能,但也导致其流场局部出现更剧烈的速度变化。分析其物理机理发现,直线型结构气流受约束较少,动能提升空间大,但流体在主轴区域的速度分层更强烈,导致能量分离效应显著增强。相比之下,渐缩型喷嘴的收缩效应使气流分布更加平缓,动能提升受限,但整体流动更加均匀稳定。因此,直线型喷嘴结构有助于提升气体动能与能量分离,但其流场的不均匀性和潜在不稳定性也更为突出;而渐缩型结构则更有利于获得均匀稳定的流动状态。

图11为不同喷嘴结构下中心轴线处轴向速度的分布趋势。进一步分析图6和图11的数据可知,轴向速度梯度差与制冷效果稳定性呈负相关关系。中心轴线轴向速度梯度差较大的涡流管,如圆形直线型(395 m/s)和矩形直线型(385 m/s),往往制冷效果波动较大,运行稳定性较差;而梯度差较小的结构,如圆形渐缩型(172 m/s)和矩形渐缩型(80 m/s),则制冷效果更为平稳。其物理机理在于,较大的轴向速度梯度会在主轴区域形成更高的速度剪切层,促进湍流发生能量级联,破坏能量分离的稳定结构,从而使涡流管的制冷性能表现出更大的波动性。反之,速度梯度较小则有助于气流沿轴向平稳分布,增强系统运行的持续性。轴向速度梯度分布不仅直接影响气流的动能分层和回流结构,还决定了涡流管制冷性能的波动性与稳定性。

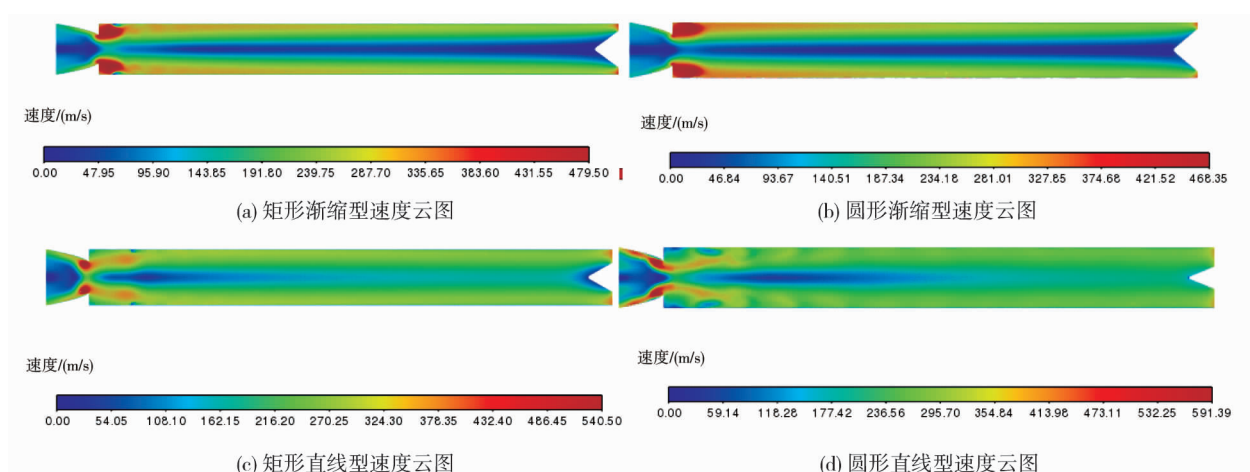


图10 $P_{in}=0.5$ MPa, $\mu=0.1$ 时的速度云图

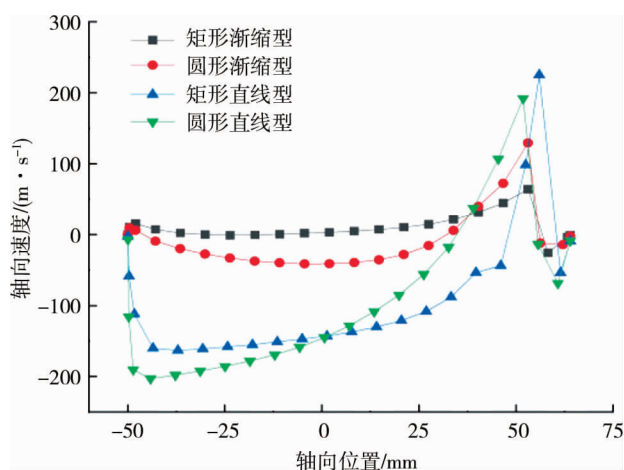


图11 中心轴线处轴向速度变化

2.3.2 切向速度

切向速度是衡量涡流管内部旋流强度与能量分离效率的重要参数.在总压力为 0.5 MPa、冷流率 $\mu = 0.1$ 的工况下,分析 $z=52$ mm 截面(即喷嘴中心截面)处不同喷嘴结构对切向速度分布的影响,结果见图 12.由图 12 可知,矩形渐缩型和圆形渐缩型涡流管在喷嘴出口环带区域的切向速度显著增强,而中心区域的速度相对较低.这说明渐缩型结构能够更有效地引导气流沿切向加速,强化管壁附近的高速旋流,从而增强离心作用和径向能量分离,有助于冷、热气流的分层和持续制冷输出.

与之相比,矩形直线型涡流管切向速度的较高区域主要分布在轴心与管壁之间的中间环带,既覆盖了部分近壁区域,又明显向管芯区延展.直线型喷嘴将进气的动能直接转化为旋流动能,使喷嘴出口附近产生强烈的局部旋流,这一特性促使入口区域的瞬时能量分离增强.然而,这类结构高速旋流区域的分布范围有限,冷流区整体较短且分布狭窄,加之中心低压区并不明显,使得制冷过程更多依赖于靠近入口的局部强化作用,难以保证制冷效果在空间上的均匀性与长期运行时的稳定性.圆形直线型涡流管的切向速度分布同样不均匀,虽然在靠近轴心区域可观察到较高的旋流速度,但整体旋流核的空间范围较小,周向分布不连续,导致冷、热气流界面模糊,局部混合现象突出.这种流动模式削弱了热气流有效向管壁迁移的能力,从而影响能量分离的完整性和冷端温降幅度的提升.

直线型喷嘴结构尽管能够在喷嘴出口及管道中心区实现局部高速旋流和一定的瞬时能量分离,但由于旋流分布有限,中心低压区不明显,冷端气流分离不彻底,整体制冷效率和流场稳定性均不如渐缩型结构理想.渐缩型喷嘴则凭借更合理的流道设计,使高速旋流覆盖管壁环带,显著提升离心作用和稳定的制冷效果.

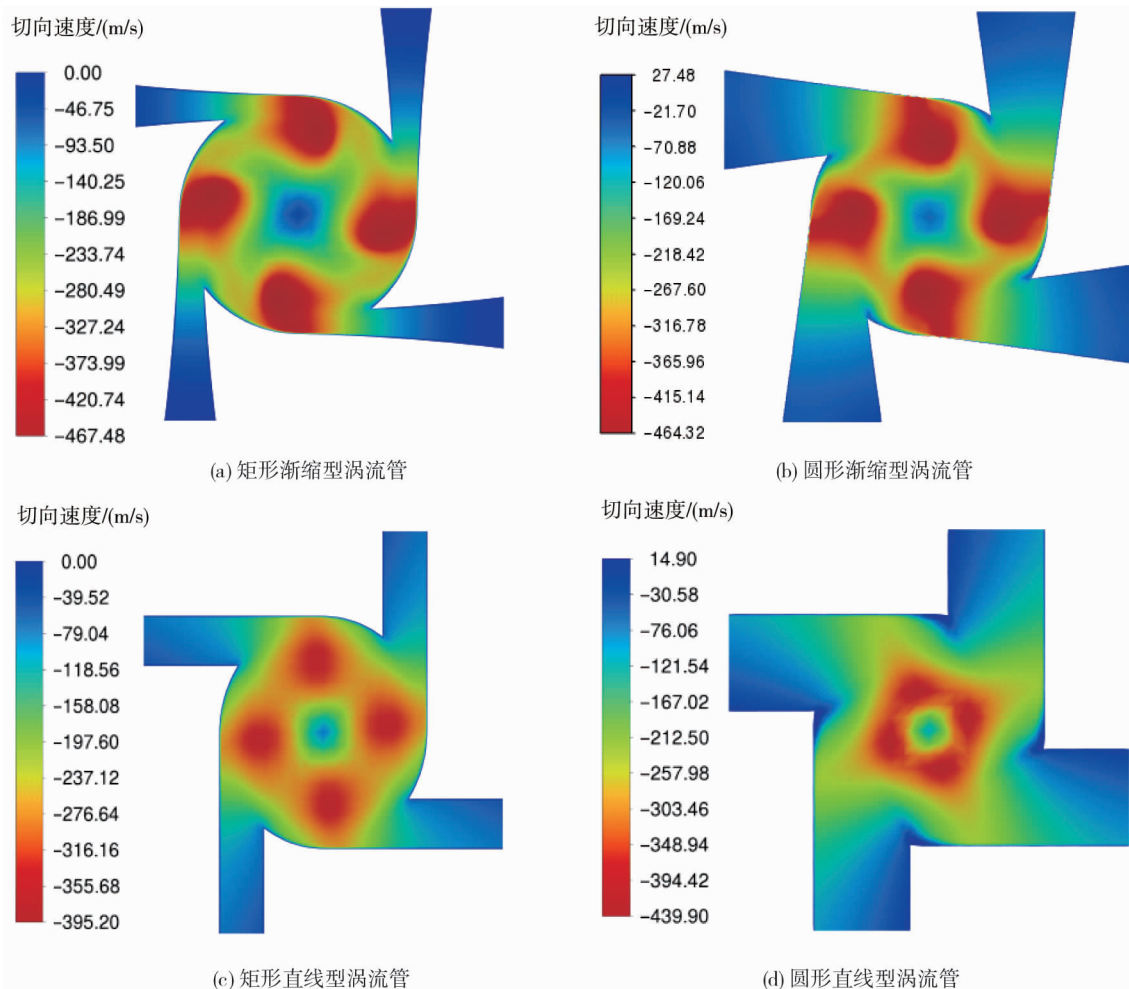


图 12 4 种涡流管在 $z=52$ mm 横截面切向速度云图

3 结论

1) 矩形直线型喷嘴在 0.5 MPa 工作压力下显示出最佳的能量分离性能,尤其在低冷流率时,制冷效果显著优于其他类型.相比之下,矩形渐缩型喷嘴则在不同冷流率下均保持稳定的制冷效果,并展现出优异的流动稳定性.

2) 渐缩型喷嘴在轴心处的低轴向压力梯度有助于维持流动的稳定性和制冷效率;反之,直线型喷嘴较大的轴向压力梯度虽然在某些条件下可以提高制冷效率,但牺牲了流动的稳定性和压力分布的均匀性.

3) 直线型喷嘴在流动稳定性和制冷性能方面表现不稳定,而渐缩型喷嘴则提供了较为均匀和稳定的流动特性.在涡流管的设计过程中,速度场的分析对于优化涡流管切向和轴向速度分布至关重要,为提高能量分离效率提供关键依据和设计方向.

4) 喷嘴的几何结构对涡流管内部的流体流动和制冷效能有着重要影响.冷流率较低时,直线型喷嘴能提供更高的能量分离效率,而渐缩型喷嘴则在多种工作条件下展示出更高的流动稳定性和制冷效果的均一性.矩形直线型设计往往更适合需要高效制冷的应用场景,而矩形渐缩型更适合精确温控的应用.至于圆形设计,在考虑喷嘴选型时,则可能需考虑到成本和制造的便利性,以在性能与成本之间取得平衡.

参考文献:

- [1] RANQUE G J. Method and apparatus for obtaining from alpha fluid under pressure two currents of fluids at different temperatures: US1952281[P]. 1934-03-27.
- [2] 李玲琦,邵雪,李承霖.涡流管制冷技术应用研究与发展综述[J].节能,2021,40(5):66-70.
- [3] 李晓燕,矫佳伟,丁奕涵,等.“双碳”背景下制冰新技术研究进展[J].包装工程,2023,44(23):245-254.
- [4] 曹勇,刘加永,公茂琼,等.小流量涡流管特性的实验研究[J].工程热物理学报,2005,26(1):14-17.
- [5] 刘存祥,胡荣生.空气涡流制冷及在切削冷却中的应用[J].制造技术与机床,1997(1):30-31.
- [6] 刘磊,何亚军,赵志芳,等.涡流冷却技术在机械加工中的应用[J].煤矿机械,2021,42(11):144-145.
- [7] SKYE H M, NELLIS G F, KLEIN S A. Comparison of CFD analysis to empirical data in a commercial vortex tube[J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(1): 71-80.
- [8] ALJUWAYHEL N F, NELLIS G F, KLEIN S A. Parametric and internal study of the vortex tube using a CFD model[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(3): 442-450.
- [9] PARULEKAR B B. The short vortex tube[J].The Journal of Refrigeration,1961(4): 74-80.
- [10] 何丽娟,王淑旭,吴心伟,等.喷嘴结构对涡流管性能的影响[J].热能动力工程,2020,35(6):123-128.
- [11] THAKARE H R, PAREKH A D. CFD analysis of energy separation of vortex tube employing different gases, turbulence models and discretisation schemes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 78: 360-370.
- [12] DUTTA T, SINHAMAHAPATRA K P, BANDYOPDHYAY S S. Comparison of different turbulence models in predicting the temperature separation in a Ranque-Hilsch vortex tube[J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(4): 783-792.
- [13] 何丽娟,潘鹏,黄艳伟,等.基于 Fluent 的涡流管数值模拟与结构优化研究[J].真空科学与技术学报,2018,38(1): 59-64.