

传统与插入式T型管汇流混合研究综述

卜泓元, 赵磊*, 王大为, 谢廷涛

辽宁石油化工大学机械工程学院, 辽宁 抚顺

收稿日期: 2026年1月28日; 录用日期: 2026年2月23日; 发布日期: 2026年3月3日

摘要

T型管汇流广泛见于天然气管网、核能装备以及化工与制冷系统, 其混合过程及流动不稳定性将直接决定下游压降水平、温度/速度波动幅值与结构安全裕度。相较常见的相贯式构型, 插入式T型由于支管伸入主管造成局部阻塞并形成尾迹, 易诱发涡脱落甚至卡门涡街, 从而显著改变混合特性, 相关机理与工程影响仍需系统梳理。本文在综合实验与CFD文献的基础上, 按构型将T型汇流划分为相贯式与插入式两类, 围绕入口条件敏感性、几何改造手段以及动量比 M_R 主导的典型射流模式开展对比归纳。现有研究一致表明: M_R 决定射流形态并主导混合效率; 入口脉动与旋流可放大温度与速度波动; 几何改造虽可改善截面均匀性, 但往往伴随压降变化并可能重塑不稳定性。对于插入式结构, 尾迹涡脱落引起的周期性热扰动被认为是热疲劳风险的重要来源, 且在多相夹杂、相扩散与传质耦合条件下呈现更强的复杂性。后续工作应侧重高保真模拟与可验证数据库建设, 形成统一的评价指标体系, 并面向工程安全开展流动-传热-结构耦合的风险评估与结构优化设计。

关键词

T型管, 汇流混合, 动量比, 大涡模拟, 圆柱绕流

A Review of Confluence Mixing in Conventional and Inserted T-Junction Pipes

Hongyuan Bu, Lei Zhao*, Dawei Wang, Tingtao Xie

College of Mechanical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

Received: January 28, 2026; accepted: February 23, 2026; published: March 3, 2026

Abstract

T-junction confluence is widely encountered in natural-gas pipeline networks, nuclear energy equip-

*通讯作者。

ment, and chemical and refrigeration systems, where the mixing process and flow instabilities directly determine downstream pressure losses, the amplitudes of temperature/velocity fluctuations, and the structural safety margin. Compared with the commonly used intersecting configuration, an inserted T-junction, where the branch pipe penetrates into the main pipe, induces local blockage and a wake region, which can readily trigger vortex shedding and even a von Kármán vortex street. These phenomena can markedly alter mixing and pulsation characteristics, yet the underlying mechanisms and engineering implications still require a systematic synthesis. Building on a comprehensive review of experimental and CFD studies, this paper classifies T-junction confluence into two categories: intersecting and inserted types and provides a comparative assessment focusing on inlet-condition sensitivity, geometric modification strategies, and representative jet regimes governed by the momentum ratio (M_R). Existing studies consistently indicate that M_R controls jet morphology and dominates mixing performance; inlet pulsation and swirl can amplify temperature and velocity fluctuations; and geometric modifications may improve cross-sectional uniformity but are often accompanied by changes in pressure loss and may reshape instability characteristics. For inserted configurations in particular, periodic thermal disturbances driven by wake vortex shedding are widely regarded as a key source of thermal-fatigue risk, and the problem becomes even more complex when multiphase entrainment, interphase diffusion, and mass-transfer coupling are present. Future work should prioritize high-fidelity simulations and the development of verifiable benchmark databases, establish a unified set of evaluation metrics, and advance engineering-oriented risk assessment and structural optimization through coupled analyses of flow, heat transfer, and structural response.

Keywords

T-Junction, Confluence Mixing, Momentum Ratio, Large-Eddy Simulation, Cylinder Wake

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

T 型管汇流流动广泛存在于石油天然气输送、核能装备、化工流程、热力学循环系统以及生物医学微流控等工程领域。例如，在天然气管网中，多条支路气体需通过 T 型结构汇入主管并输送至储罐；在核工业系统中，冷热支路流体在 T 型管道中掺混，可能诱发热疲劳问题；在制冷系统中，闪蒸气体常通过 T 型旁路进入主管；在微流控器件中，T 型通道被广泛用于液滴合并、分裂与反应控制。上述工程实践表明，T 型管汇流区域往往是管路系统中流动最为复杂、风险最为集中的部位之一。

在实际管道输送过程中，T 型汇流区域面临多重工程问题：一方面，主管与支管在管径、管长、入口压力或速度等条件上的差异，会导致交汇区速度场、压力场及温度场出现显著梯度变化，较大的局部梯度可能对管壁或下游储罐产生冲击载荷；另一方面，在插入式 T 型管中，支管外壁可能诱发尾迹涡脱落（卡门涡街），周期性涡结构的产生将对下游混合过程及流动稳定性产生控制作用；此外，管道输送介质中常夹带固体颗粒或气液杂质，固体沉积可能引发堵塞，气液混合则可能影响最终储存介质的品质。上述问题直接关系到管网系统运行的安全性与经济性。

因此，有必要对 T 型管汇流混合研究进行系统综述，从结构类型、入口条件、主控参数及评价指标等方面总结研究进展，揭示不同工况下流动与混合的内在机理，并为工程结构优化与风险控制提供理论依据。

2. 研究内容

本文采用“结构-参数-机理-风险”的分类,对国内外T型管汇流混合研究进行系统梳理。文章结构框架如图1所示。

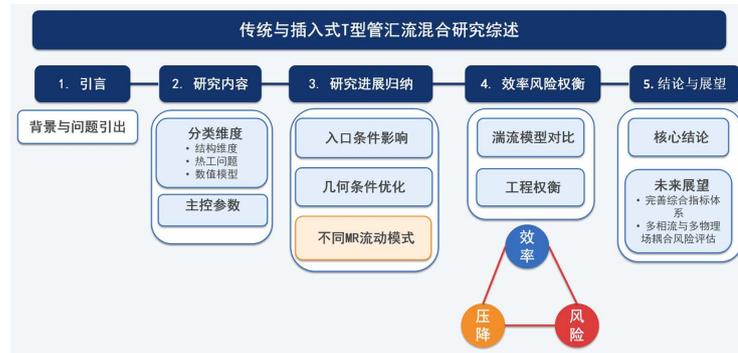


Figure 1. Article structuring flowchart
图1. 文章结构化流程图

2.1. 分类维度

按以下维度对T型管汇流混合问题进行分类:结构维度(相贯式与插入式);热工问题维度(等温混合与冷热流体掺混);数值模拟条件维度。不同维度相互耦合,共同决定了交汇区流动结构及混合特性。

2.1.1. 结构维度

T型管结构简单,大可分为主管和支管。为了便于直观了解不同结构对T型管汇流混合的影响,图2分别展示了相贯式(a)和插入式(b)管道的结构图。管道的流动特性对几何参数与结构设计极为敏感,微小改动可能从根本上改变流动状态。例如,在支管内设置会聚段可显著提高注入流体速度,但同时会加剧主管轴向压力波动与不稳定性,从而诱发管道振动、疲劳损伤并增加泄漏风险[1]-[3]。为强化混合性能,Huang等[4]提出在T型管交汇处下游布置旋转叶轮,可有效增强横向流混合。Sun等[5]进一步指出,有效混合长度与主管直径呈显著相关关系。姜丽娟[6]基于大涡模拟(LES)方法研究了T型管道内的流动与传热过程,并在混合区引入SK型混合器以削弱温度波动,降低热疲劳失效的可能性。黄可欣等[7]同样采用LES对加装旋转叶片的T型通道内冷热流体混合进行数值模拟;在主管与支管管径比为2:1的条件下,结果表明旋转叶片可促进通道底部及对称面两侧流体的温度混合,从而缩短混合长度,同时降低y方向平均温度梯度,进而缓解通道内热分层现象。

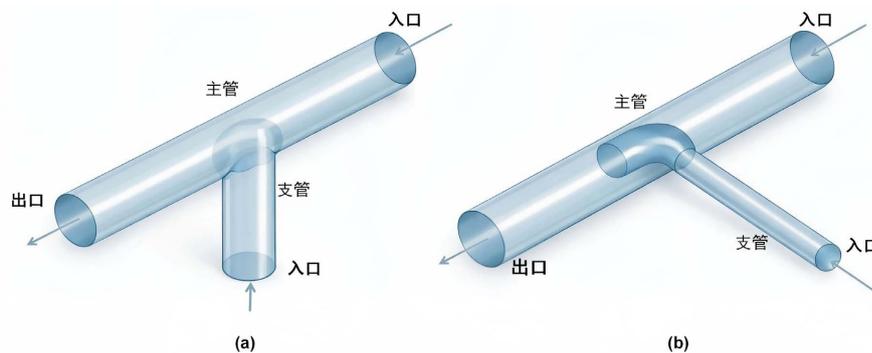


Figure 2. Schematic diagram of conventional (a) and inserted (b) T-junction pipes
图2. 相贯式(a)和插入式(b)管道的结构图

2.1.2. 热工问题维度

管道交汇处的流动模式和混合对运行参数(如流入特性、热分层和不稳定的外部作用力)非常敏感。Xu等[8]的实验研究确定了微通道 T 型管中混合两种混溶流体的最佳流入参数。李勇[9]搭建了冷热搅混可视化实验台,通过实验研究分析各影响因素对 T 型管内冷热流体搅混过程温度特性的影响,分析混合流型发展过程,获得各工况下的无量纲时均温度和无量纲均方根温度分布和温度波动幅值及频率的规律特点。

2.1.3. 数值模拟条件维度

计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)技术在探索管道交汇处流动和混合的三维特性方面非常强大。Naik-Nimbalka 等[10]通过 CFD 建模,对 T 型管交汇处横流的热分层流体混合情况进行了量化,并对不同纵向截面的速度分布进行了可视化分析。邹智鑫等[11]基于 fluent 混合雷诺平均 N-S 方程和大涡模拟方法,对管内冷热流体掺混问题进行仿真模拟。在对支管和主管入口流速剖面的各种组合进行比较后, Lampunio 等[12]发现,与主管入口流速剖面相比,支管入口流速分布对 T 型管交汇下游的温度分布影响更大。

2.2. 主控参数

在影响 T 型管汇流混合的诸多因素中,雷诺数 Re 和理查德森数 Ri [13]用于表示惯性力与浮力效应的相对重要性。

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (1)$$

其中 ρ 是流体密度(kg/m^3), v 是流体速度(m/s), D 是特征长度(m), μ 是粘性系数($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)。

动量比 M_R 则被广泛用于描述支管射流与主管来流之间的相对强弱关系。

$$M_R = \frac{M_m}{M_b} \quad (2)$$

式中, M_m 和 M_b 分别为主管和支管中流体的动量。

研究表明, M_R 不仅决定射流穿透深度和偏转行为,也是区分不同混合流型的重要参数。此外,管径比、插入长度及入射角等几何参数亦对流动结构产生显著影响。为了定量评价混合效果,研究中通常采用混合均匀性指标、混合长度和压降等参数;在涉及安全问题的研究中,还需关注温度或速度波动强度、主频特征及其与热疲劳风险之间的关联。

斯特劳哈尔数 St 是流体动力学中用于表征障碍物后面的周期性现象的无量纲数,尤其是测量圆柱体尾流区域中旋涡脱落的频率。 St 的计算公式如下:

$$St = \frac{fD}{U_{ref}} \quad (3)$$

式中, f 是旋涡脱落频率, D 为圆柱体直径, U_{ref} 为参考速度。

可以使用雷诺数 Re 计算 St 。对于雷诺数 Re (10^4 量级), St 有如下的计算公式:

$$St = 0.213 - 0.0248 \left(\log_{10} \frac{Re}{1300} \right)^2 + 0.0095 \left(\log_{10} \frac{Re}{1300} \right)^3 \quad (4)$$

圆柱形物体周围出现交替旋涡与雷诺数 Re 密切相关。在 $40 < Re < 150$ 的情况下,圆柱体后部会出现众所周知的卡门涡街,涡旋周期性脱落。随着雷诺数 Re 的增加,气体流动状态从层流转变为湍流,涡流脱落也从周期性脱落转变为随机性脱落。在 $300 < Re \leq 3 \times 10^5$ 的情况下,边界层内的流体保持层流的

流动特性，尾流则发展为完全湍流流动，这表明圆柱绕流已过渡到亚临界流动状态。当 $Re > 3 \times 10^5$ 时，流动达到完全湍流状态，涡旋模式变得不那么明显。

3. 研究进展归纳

在研究过程中，一些定律已得到证实，并且观察到了一致的现象。Su 等[14]发现，T 型管混合区的温度和速度随着支管流入量随时间的变化而周期性变化。为了更清晰了解这些结论，表 1 总结了各类因素对分支 T 型管的影响。

Table 1. Table of factors affecting T-junction

表 1. T 型管的影响因素表

影响因素	参数	结论
几何因素	进口和支管的方向	在宏观 T 型管中，当入口为水平方向且支管为垂直向上方向时，监控的气/液体流量分数可达到最大值[15]。在微观 T 型管中，支管方向的影响因素可以忽略不计[16]。
	管径	对于宏观 T 型接头[17]，直径对相分离几乎没有影响，而对于微观 T 型管[18]，管直径的变化则有着重要影响。液相流量随着管直径的减小而增大。
	管径比/截面形状	存在一个最佳的直径比，能使气相流量达到最大[19]，随着矩形横截面长宽比的增大，液相流量会减小。
	质量通量/速率	随着液体流速的增加，液相流量会减小[19]。随着气体流速的增加，气相流量会增大。含气质量通量/速率的增加相当于表观气体流速的增加。在相同流型下，质量流量的变化对相分离几乎没有影响，因为质量流量的变化不会改变气液之间的速度比。
	流动模式	在塞流状态下，气相更容易进入支管[20]，而在环状流状态下，液相则更倾向于进入支管。
工作条件因素	分流比	当分流比小时，液相更倾向于从支管流出[20]；当分流比大时，气相更倾向于从支管流出。
	液/气体粘度	随着黏度的增加，流量会增大[21]。
	表面张力	随着表面张力的减小，流量会减小[22]。
	工作压力	压力对相分离的影响仍需进一步研究。

3.1. 入口条件影响

大量研究表明，T 型管汇流混合对入口条件高度敏感。流入流体的不稳定性对 T 型管的流体混合也有很大影响。入口速度剖面的发展程度直接影响支管射流初始剪切层厚度及其稳定性。实验与数值研究一致指出，与主管入口条件相比，支管入口速度分布对下游温度场和浓度场的影响更为显著，当支管入口流动充分发展时，混合区分布更为均匀。

3.2. 几何条件优化

几何结构的微小改变往往会引起 T 型管内流动状态的本质变化。研究表明，在支管中引入会聚段可显著提高射流速度并增强混合，Lin 等[23]对 T 型管进行了改进，将支管延伸到主管中，流体通过以主管轴线为中心的侧孔注入，将偏转射流转变为与主管来流方向同轴的射流。陈雪恒[24]建立了 T 型管和内嵌套管 T 型管的管内冷热流体混合过程的数理模型，采用 LES 湍流模型对两种结构的 T 型管管内冷热流体混合过程进行数值模拟，对比分析两种结构的 T 型管管内流场温度和速度分布。不过，支管末端的流道急转弯可能会造成动量损失和管道振动。为改善混合效果并降低风险，有学者[2]提出在交汇区后方布置旋转叶轮或静态混合器，通过改变局部流动结构强化横向掺混。数值结果表明，这类结构可有效缩短混合长度并削弱热分层，但其带来的压降增加需在工程设计中综合权衡。

3.3. 不同 M_R 流动模式

T 型管内的流体具有复杂的混合特性, 但根据动量比 M_R , 可将流体大致分为三种状态, 分别为壁面射流, 偏转射流和冲击射流。三种状态如图 3 所示。

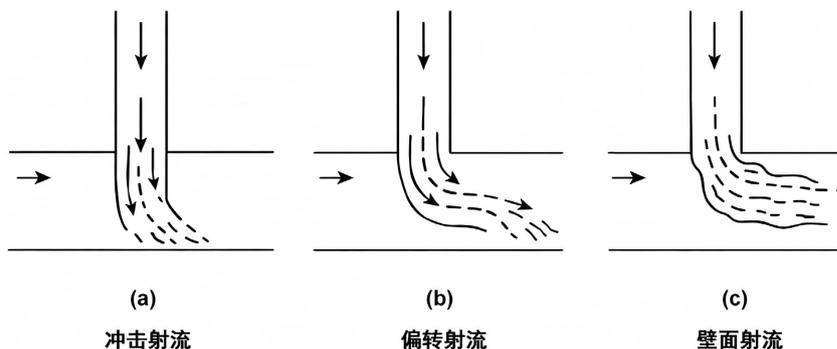


Figure 3. Schematic diagram of three different flow states in T-junction
图 3. T 型管内三种不同流动状态示意图

当 $M_R < 0.35$ 时, 会出现冲击射流, 此时从支管喷射的流体足以到达与射流前沿相对的主管壁。在 $0.35 < M_R < 1.35$ 的范围内, 支管射流会略微偏转, 并由沿主管轴线流动的来流驱动, 称为偏转射流。当 $M_R > 1.35$ 时, 支管注入的流体动量较小, 无法进一步渗透到主管来流中, 会立即偏向与支管出口同侧的主管道表面, 即壁面射流。李泽伟等[25]基于嵌入式大涡模拟(Embedded Large Eddy Simulation, ELES)方法对三通管内冷热掺混过程进行了数值仿真, 通过改变动量比观察流场和温度场变化情况, 支管流体在主管流体的压迫下, 流动方向发生偏折, 在支管背流面形成大小不一的涡旋, 动量比减小, 涡旋区域扩大, 冷热水掺混更加剧烈, 掺混区域变短。付心怡[26]通过 LES 方法结合传热、固体力学单元对 T 型管路内流体的流动与传热问题进行数值模拟, T 型输流管路中, 射流工况、支管入射角度、流体温差均会对管内流动与传热产生较大影响, 壁面射流工况时管壁的温度波动小于偏转射流和撞击射流, 流体混合区域主要位于管路上壁面, 支管入射角度减小, 管壁的温度波动也减小, 支管入射角度为 30° 时的壁面应力值最小, 主管管流体温差减小, 壁面温度波动先减小后增大, 主管管流体温差为 20°C 时管壁所受热应力最小。

4. 效率风险权衡

综合现有研究可发现, T 型管模拟过程与选用的模型关系密切。汇流混合过程虽然因不同研究关注的具体现象存在差异, 但均与剪切层不稳定性及大尺度涡结构密切相关。

4.1. 湍流模型对比

T 型管汇流过程伴随射流冲击、分离回流以及剪切层失稳等典型流动特征, 局部区域易形成显著的非定常涡结构与间歇性掺混行为。对于涉及冷热混合与热疲劳评估的工程问题, 数值模型除需给出平均速度与平均温度分布外, 还应能够表征速度/温度脉动统计量(如 RMS)、主导频率以及能量谱等关键非定常特征, 以支撑温度波动 - 壁面热载荷 - 热疲劳风险的关联分析。已有对于 T 型管热混合的研究指出: 传统的雷诺平均纳维 - 斯托克斯方法(Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS)对瞬态掺混结构与波动能量谱的再现能力有限, 而大涡模拟(LES)在捕捉瞬态湍动结构与关键频段方面更具优势。

雷诺平均纳维 - 斯托克斯方法(Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS)基于时间平均意义下的湍流封闭, 计算成本低、收敛稳定性好, 适用于对几何参数与运行工况开展快速扫描, 并对平均压降、平均

温度场与平均混合长度等指标进行对比评估。然而，当交汇区流动由强非定常结构主导(如剪切层大尺度涡流、回流区摆动)时，RANS 往往表现出较强的模型/数值耗散，可能导致对混合层厚度、涡结构强度及温度脉动强度(温度 RMS)的预测偏弱，且难以再现主导频段与宽频能量谱特征。

非稳态雷诺平均纳维-斯托克斯(unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes, URANS)在 RANS 框架下引入时间分辨求解，可在一定程度上捕捉大尺度、低频非定常行为，从而提供回流区摆动与剪切层低频不稳定等信息。URANS 对工程应用中存在显著非定常流动的现象及其强度等级的判别具有实用价值，但其对宽频谱湍动结构、小尺度间歇掺混以及能量谱细节的解析能力仍受限于湍流模型封闭与网格分辨率。

大涡模拟(LES)通过直接解析能量占优的大尺度涡结构，对剪切层卷吸、涡团合并以及瞬态混合界面演化的刻画通常更为可信，因而更适用于识别主导频段并获得速度/温度波动的谱分布特征，为热疲劳评估提供更直接的非定常载荷依据。但 LES 对网格与时间步长、入口湍流合成方法以及统计收敛长度高度敏感，计算成本显著高于 RANS/URANS，在工程项目中常受算力与周期约束。三种模可归纳为表 2。

Table 2. Comparison table of turbulence models

表 2. 湍流模型对比表

方法	主要特点/适用场景	主要局限
RANS (传统雷诺平均)	基于时间平均湍流封闭；成本低、收敛稳定；适合几何参数与工况快速扫描，对平均压降、平均温度场、平均混合长度等进行对比评估。	模型/数值耗散偏强；对混合层厚度、涡结构强度、温度 RMS 易低估；难可靠再现主导频段与宽频能量谱。
URANS (非稳态 RANS)	在 RANS 框架引入时间分辨；可一定程度捕捉大尺度/低频非定常(回流区摆动、剪切层低频不稳定)；适合工程上快速判别是否存在显著非定常及强度等级。	受湍流封闭与网格分辨率限制；对宽频谱结构、小尺度间歇掺混、能谱细节解析能力有限。
LES (大涡模拟)	解析能量占优的大尺度涡；对剪切层卷吸、涡团合并、瞬态混合界面演化更可信；适合识别主导频段、获取速度/温度波动谱特征，为热疲劳提供更直接的非定常载荷依据。	对网格/时间步、入口湍流合成、统计收敛长度高度敏感；计算成本显著更高，常受算力与周期约束。

4.2. 工程权衡

Benyamina 等[27]在主管道入口处施加螺流，产生漩涡和离心力，从而有效降低了管壁附近的温度波动幅度。这种流入方式加强了通过流体与主管中的大体积流体的混合，还有助于减少热疲劳。陈柏宇等[28]通过对 T 型管内不同主管流体动量比工况下冷热流体的掺混过程进行大涡模拟和流固耦合计算，得到管道壁面及管道内流体的温度波动情况以及不同动量比对管道热应力及热疲劳寿命的影响规律。当流型为偏转射流时，管道的热疲劳现象比壁面射流时的热疲劳现象得到明显改善。冲击射流和壁面射流都有可能导导致管道疲劳开裂。虽然偏转射流更适合用于 T 型管，但由于在参数控制方面的操作挑战，无法确保支管注入流体流动方向与主管内来流流动方向相同[29]，因此在所有射流模式下，传统 T 型管都无法实现径向均匀混合。

对支管结构稍加改动，可能会在本质上改变管道内流体的流动模式。但对支管结构的改动相应的可能会对主管内的流体流动造成影响，如支管的伸入会阻碍主管原有流体的流动方向，形成圆柱绕流现象，对流体的混合造成波动影响。邓勇等[30]基于圆柱绕流循环水槽实验台，结合粒子图像测速系统，对壁面边界层层流区域插入串联双圆柱模型进行了实验研究，通过改变横向间距比，结合速度流线、速度截面以及周期性对圆柱尾流和壁面附近流动不稳定性进行分析。当 $Re = 200$ 时，横向间距比对圆柱尾流与壁面附近流动不稳定性影响显著，横向间距比增加，两圆柱间由封闭流动转变为非封闭流动，圆柱间旋涡对尺度先增大后减小至稳定，下游圆柱由旋涡对演变为上游剪切层单向绕流，上游圆柱下剪切层加速效应增加，圆柱间近壁区域流动不稳定性增强，下游圆柱下剪切层加速效应减弱，近壁区域流速减小，导

致下游壁面涡导逐渐消失，壁面流动不稳定性减弱。童晓剑[31]利用 Fluent 研究多个柱体在不同排列方式、不同间距比和不同直径比下的圆柱绕流流动特性，重点对尾流形态以及各个柱体的表面受力情况进行分析，发现并列双圆柱绕流存在临界间距 $L/D = 2.0$ ，并列三圆柱绕流临界间距约为 $L/D = 2.5$ ，当间距小于临界间距时，难以形成规律分布的涡街，当间距大于临界间距时，圆柱之间相互作用减弱，形成规律的对称排列的涡街。

T 型管也可用于微结构中的液滴合并和分裂，促进微流体设备中的可控化学反应和生物医学过程[32]。对于 T 型管流动模型中流体混合问题，目前研究最多的是冷热流体混合，支管与主管之间流体的温度不同，混合部位出现温度波动和大尺度旋涡，而压力驱动下的 T 型流动，主管与支管之间流体的压力不同，推测混合部位也可能会出现波动，改变主管路的流场情况，因此需要进行数值研究。针对 T 型流动模型中圆柱绕流问题，目前已有的研究较少。针对 T 型流动模型中相的扩散问题，涉及多相流和离散相模型，有大气污染物扩散问题作为参考。

混合效率、压降与安全风险之间往往存在权衡关系。过度追求混合强化可能导致压降增加或波动增强，从而引入新的工程风险。因此，在 T 型管设计中应综合考虑混合性能、能耗与结构安全，建立多目标评价体系。

5. 结论与展望

如图 4 所示，可在 $M_R - (D_m/D_b)$ 参数空间内对 T 型管汇流的典型工况进行工程化分区。对于较低 M_R 区域，支路射流动量相对较弱，流动主要表现为附着卷吸，整体非定常性较弱、风险指数较低，但对混合的促进作用亦较为有限。随着 M_R 增大，流动逐步过渡至剪切层卷吸主导区：剪切层卷吸与间歇性掺混显著增强，通常可在较短混合长度内实现混合性能的明显提升，因此该区域构成兼顾混合效率与风险控制的主要候选工况带。进一步提高 M_R 并进入强回流/摆动主导区后，低频大尺度非定常显著加剧，近壁温度脉动强度及其谱能量集中程度上升，进而导致热疲劳风险指数明显增大。

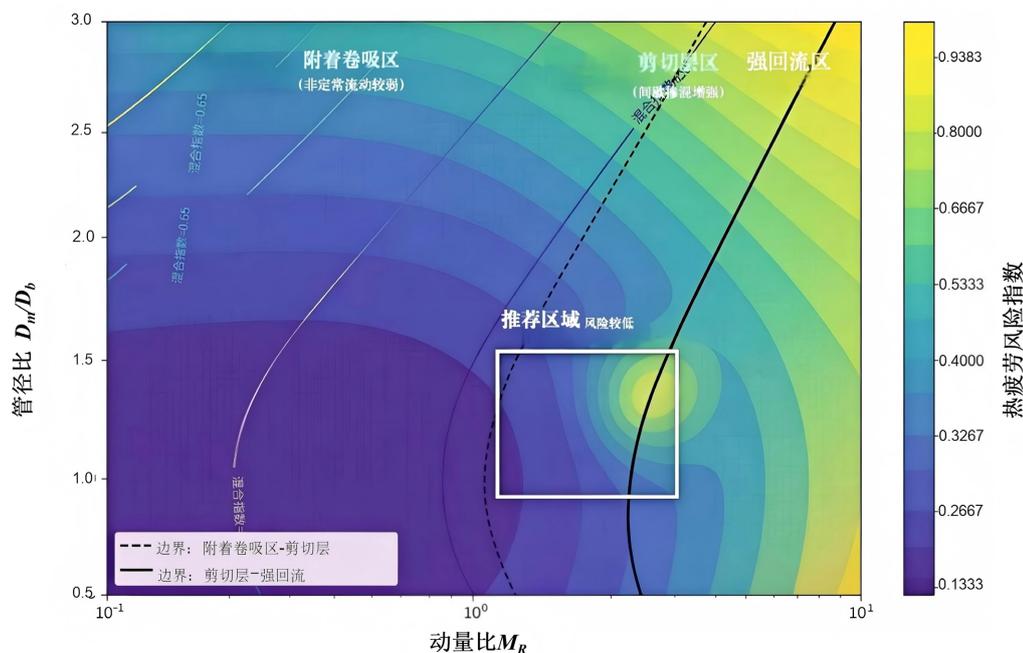


Figure 4. T-junction flow pattern-risk schematic diagram

图 4. T 型管流型 - 风险示意图

基于上述演化规律,图中给出的推荐运行窗口位于中等 M_R 的剪切层卷吸邻域,可在保证混合性能的同时避免进入强回流/摆动的高风险区,为 T 型管工况选择与几何参数设计(如管径比调控)提供直观的工程判据与参考边界。压降与安全风险之间往往存在权衡关系。过度追求混合强化可能导致压降增加或波动增强,从而引入新的工程风险。因此,在 T 型管设计中应综合考虑混合性能、能耗与结构安全,建立多目标评价体系。

5.1. 核心结论

1) T 型管汇流混合过程受结构形式、入口条件及主控参数共同影响,其中动量比 M_R 是区分不同射流形态和混合特征的关键无量纲参数,对混合效率及近壁波动具有决定性作用。

2) 相贯式与插入式 T 型管在流动机理上存在显著差异。相贯式结构以射流 - 剪切层相互作用为主,而插入式结构由于支管伸入形成局部阻塞与尾迹区,易诱发涡脱落并放大非定常波动,其对混合稳定性与热疲劳风险的影响更为复杂。

5.2. 未来展望

1) 未来有必要在统一参数体系下系统研究不同结构与工况对流动模态转变的影响,重点揭示动量比 (M_R)、雷诺数(Re)及几何参数对涡结构演化和非定常特征的控制机理。

2) 针对插入式 T 型管,应引入圆柱绕流等经典流动问题的理论框架,深入研究尾迹涡脱落的形成条件、频率特征及其与汇流混合过程之间的耦合关系。

3) 在研究方法上,应进一步发展高保真数值模拟与实验测量的协同验证路径,提升对瞬态流动结构与波动特性的预测能力,为建立具有普适性的机理模型奠定基础。

参考文献

- [1] Qian, S.X., Kanamaru, S. and Kasahara, N. (2015) High-Accuracy CFD Prediction Methods for Fluid and Structure Temperature Fluctuations at T-Junction for Thermal Fatigue Evaluation. *Nuclear Engineering and Design*, **288**, 98-109. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.04.006>
- [2] Zaragoza-Granados, J., Gallardo-Hernández, E.A., Vite-Torres, M., et al. (2019) Erosion Behaviour of AISI 310 Stainless Steel at 450 °C under Turbulent Swirling Impinging Jets. *Wear*, **426**, 637-642. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.076>
- [3] Zheng, S.J., Luo, M., Xu, K.F., et al. (2019) Case Study: Erosion of an Axial Flow Regulating Valve in a Solid-Gas Pipe Flow. *Wear*, **434**, Article 202952. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202952>
- [4] Huang, K.X., Su, B., Li, T., et al. (2022) Numerical Simulation of the Mixing Behaviour of Hot and Cold Fluids in the Rectangular T-Junction with/without an Impeller. *Applied Thermal Engineering*, **204**, Article 117942. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117942>
- [5] Sun, B., Liu, Q., Fang, H.Y., et al. (2020) Numerical and Experimental Study of Turbulent Mixing Characteristics in a T-Junction System. *Applied Sciences*, **10**, Article 3899. <https://doi.org/10.3390/app10113899>
- [6] 姜丽娟. 冷热流体混合过程中热波动削弱机理 LES 模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2019.
- [7] 黄可欣, 苏博, 林梅. 加装旋转叶片 T 型通道内流动混合的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(2): 367-375.
- [8] Xu, B., Wong, T.N., Nguyen, N.T., et al. (2010) Thermal Mixing of Two Miscible Fluids in a T-Shaped Microchannel. *Biomicrofluidics*, **4**, Article 044102. <https://doi.org/10.1063/1.3496359>
- [9] 李勇. T 型管内冷热流体搅混过程实验研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2020.
- [10] Naik-Nimbalkar, V.S., Patwardhan, A.W., Banerjee, I., et al. (2010) Thermal Mixing in T-Junctions. *Chemical Engineering Science*, **65**, 5901-5911. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.08.017>
- [11] 邹智鑫, 王合旭, 蒋彦龙, 等. T 型三通管冷热流体掺混数值模拟[J]. 计算机辅助工程, 2019, 28(1): 46-52.
- [12] Lampunio, L., Duan, Y. and Eaton, M.D. (2021) The Effect of Inlet Flow Conditions upon Thermal Mixing and Conjugate Heat Transfer within the Wall of a T-Junction. *Nuclear Engineering and Design*, **385**, Article 111484. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111484>

- [13] Soto-Meca, A., Serna, J. and Velasco, F.J.S. (2016) Heat and Mass Transfer Enhancement in a Double Diffusive Mixed Convection Lid Cavity under Pulsating Flow. *Computers & Chemical Engineering*, **94**, 128-140. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.06.018>
- [14] Su, B., Zhu, Z.L., Ke, H.B., et al. (2020) Large Eddy Simulation of Flow and Mixing Characteristics in a T-Junction under Inflow Pulsation. *Applied Thermal Engineering*, **181**, Article 115924. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115924>
- [15] Azzopardi, B.J. and Whalley, P.B. (1982) The Effect of Flow Patterns on Two-Phase Flow in a T-Junction. *International Journal of Multiphase Flow*, **8**, 491-507. [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(82\)90020-9](https://doi.org/10.1016/0301-9322(82)90020-9)
- [16] Tae, S.J. and Cho, K. (2006) Effect of Flow Direction on Two-Phase Flow Distribution of Refrigerants at a T-Junction. *Journal of Mechanical Science and Technology*, **20**, 717-727. <https://doi.org/10.1007/BF02915989>
- [17] Chen, J., Wang, S. and Zhang, X. (2015) Experimental Investigation of Two-Phase Slug Flow Splitting at a Micro Impacting T-Junction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **81**, 939-948. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.11.015>
- [18] Tae, S. and Cho, K. (2006) Two-Phase Split of Refrigerants at a T-Junction. *International Journal of Refrigeration*, **29**, 1128-1137. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2006.02.004>
- [19] Chen, J., Wang, S. and Ke, H. (2013) Gas-Liquid Two-Phase Flow Splitting at Microchannel Junctions with Different Branch Angles. *Chemical Engineering Science*, **104**, 881-890. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.10.013>
- [20] Yang, L.L., Liu, S. and Li, H. (2018) Gas-Liquid Flow Splitting in T-Junction with Inclined Lateral Arm. *Journal of Hydrodynamics*, **30**, 173-176. <https://doi.org/10.1007/s42241-018-0019-4>
- [21] Li, H., Li, J. and Zhou, Y. (2017) Phase Split Characteristics of Slug and Annular Flow in a Dividing Micro-T-Junction. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **80**, 244-258. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.08.024>
- [22] Van Gorp, C.A., Soliman, H.M. and Sims, G.E. (2001) The Effect of Pressure on Two-Phase Flow Dividing at a Reduced Tee Junction. *International Journal of Multiphase Flow*, **27**, 571-576. [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(00\)00032-X](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(00)00032-X)
- [23] Lin, Z., Yang, L., Tao, J.Y., et al. (2023) Thermal Mixing Characteristics of T-Junction Incident along Central Axis Based on Large-Eddy Simulations. *Applied Thermal Engineering*, **221**, Article 119756. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119756>
- [24] 陈雪恒. T型管内冷热流体混合以及流固耦合数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- [25] 李泽伟, 王合旭, 蒋彦龙, 等. 基于 ELES 方法的 T 型三通管掺混特性研究[J]. 计算机仿真, 2020, 37(5): 173-178+240.
- [26] 付心怡. T型输流管道内流体热混合及其削弱机理研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2020.
- [27] Benyamina, M., Knyazkov, P. and Imine, O. (2017) Large Eddy Simulation of Thermal Turbulent Mixing and Reduction of Temperature Fluctuations with Swirl in T-Junction. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **39**, 4985-4999. <https://doi.org/10.1007/s40430-017-0849-y>
- [28] 陈柏宇, 周照春, 孙燕, 等. 不同动量比对 T 型管冷热流体掺混及管道热疲劳的影响[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2021, 48(5): 94-101.
- [29] Georgiou, M. and Papalexandris, M.V. (2017) Numerical Study of Turbulent Flow in a Rectangular T-Junction. *Physics of Fluids*, **29**, Article 065106. <https://doi.org/10.1063/1.4986430>
- [30] 邓勇, 尹广洲, 周磊, 等. 间距比对近壁串列双圆柱绕流影响的实验研究[J]. 机械设计与制造, 2022(10): 174-177+181.
- [31] 童晓剑. 基于 Fluent 的低雷诺数下圆柱绕流流动特性数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- [32] Shen, F., Li, Y., Liu, Z.M., et al. (2017) Study of Flow Behaviors of Droplet Merging and Splitting in Microchannels Using Micro-PIV Measurement. *Microfluidics and Nanofluidics*, **21**, Article No. 66. <https://doi.org/10.1007/s10404-017-1902-y>