

文章编号: 1671-6612 (2026) 01-038-09

不同真空管道结构对列车气动热特性的影响

王战豪 毕海权 周远龙 毕云峰

(西南交通大学机械工程学院 成都 61003)

【摘要】 磁浮列车在真空管道内高速运行时, 气动热效应会导致管道内热环境显著恶化, 对列车安全运行构成威胁。因此, 国内外学者对真空管道气动热效应进行了系统研究, 旨在提出有效的气动热减缓措施。基于某在建真空管道试验平台, 分别针对单管结构、多孔介质结构和条形孔洞结构的真空管道, 建立了二维轴对称数值计算模型。通过数值模拟分析了列车在加速段、匀速段和减速段运行时的气动热效应, 揭示了不同管道结构对热环境的影响规律。研究表明: 在加速阶段, 相比单管结构, 多孔介质结构和条形孔洞结构分别使列车表面最大温度降低了 22°C 和 11°C, 管道内最高温度分别降低了 6°C 和 2°C; 匀速阶段, 两种新型管道结构均有效减缓了车前高温区和车尾低温区的范围及温度强度; 减速阶段, 多孔介质结构和条形孔洞结构能够有效降低反射压缩波的强度和温度。

【关键词】 真空管道; 磁浮列车; 管道结构; 气动热特性

中图分类号 U25 文献标志码 A

The Influence of Different Vacuum Tube Structures on Aerothermal Characteristics of Trains

Wang Zhanhao Bi Haiquan Zhou Yuanlong Bi Yunfeng

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 When the maglev train runs at high speed in a vacuum tube, the aerothermal effect will cause a significant deterioration of the thermal environment inside the tube, posing a threat to the safe operation of the train. Therefore, scholars at home and abroad have conducted systematic research on the aerothermal effect of the vacuum tube, aiming to propose effective measures to mitigate the aerothermal effect. Based on a certain in-progress vacuum tube test platform, this paper established two-dimensional axisymmetric numerical calculation models for the vacuum tube with a single-tube structure, a porous medium structure, and a strip-shaped hole structure. Through numerical simulation, the aerothermal effect of the train during acceleration, uniform, and deceleration processes was analyzed, revealing the influence laws of different tube structures on the thermal environment. The research results show that in the acceleration process, compared with the single-tube structure, the vacuum tube of the porous medium structure and the strip-shaped hole structure reduced the maximum surface temperature of the train by 22°C and 11°C respectively, and the highest temperature inside the tube decreased by 6°C and 2°C respectively. During the uniform process, both the two new types of tube structures effectively reduced the range and temperature intensity of the high-temperature region in front of the train and the low-temperature region at the tail of the train. During the deceleration process, the vacuum tube of the porous medium structure and the strip-shaped hole structure could effectively reduce the intensity and temperature of the reflected compression waves.

【Keywords】 Vacuum tube; Maglev train; Tube structure; Aerothermal characteristics

基金项目: 中央高校基本科研项目 (No.2682023ZTPY061)

作者简介: 王战豪 (2001.03-), 男, 在读研究生, E-mail: 13271256703@163.com

通讯作者: 毕海权 (1974.12-), 男, 博士, 教授, E-mail: bhquan@163.com

收稿日期: 2025-02-19

0 引言

自“八纵八横”高速铁路网建设以来,人员流动呈现出长时间、高频率的趋势,列车的承载能力和运行速度也在不断提升。然而,飞机和列车作为现有的高速交通工具,受到运行环境的制约很难进一步发展。前者承载运力较弱,飞行延误率高,而后者则要花费更多的路程时间。因此,迫切需要一种新型的交通工具来满足人们高效的出行要求,真空管交通系统(Vacuum tube transportation system)的发展应运而生。简单来说,真空管道交通系统是一种结合了低真空和高速磁悬浮技术的新型交通运输工具。既具有与飞机相当的运行速度,又保障列车的运载能力,且受天气影响有限,运行的安全性得到了极大的保证。总的来说,真空管道交通系统具有快速、便捷、安全、环保、高效等优势,正逐渐成为未来主流交通工具之一。

近百年来,许多学者已经通过实验和数值模拟的方法对真空管道列车气动阻力、气动热和气动噪声的影响因素及分布特性进行了研究^[1-5],主要包括系统阻塞比^[6]、列车运行速度^[7]、真空度^[8]、列车外形^[9]以及初始环境温度^[10]等,相关的研究取得了丰富的成果。贾文广等人^[6]研究了系统阻塞比、真空度和列车运行速度对管道内热特性的影响,指出当系统阻塞比越大、真空度越高以及列车的运行速度越大时,真空管道内的气动热效应越显著。陈文庆^[7]发现列车在加速、匀速和减速过程中激波和气动壅塞现象对管道内空气温度、列车表面温度和管道壁面温度产生显著波动。段瑞响^[8]基于热压耦合原理发现随着系统真空度的降低,空气的对流换热和辐射换热能力减弱,系统最大温度升高。董晨光^[9]研究了列车长时间运行时,气动生热对管道内热特性的影响,发现随着列车运行时间的增大,列车表面温度和管道空气温度会逐渐升高并趋于稳定,温度达到稳定所需的时间也会延长。睦洋^[11]研究了列车的壅塞流动特征,发现车体温度及尾流区域温度受列车运行时产生的波系干扰大,流场内局部高温区出现在车头附近。

到目前为止,相关的研究都是局限于对系统阻塞比、真空度和列车运行速度的单一研究。而真空管道的具体结构对列车气动问题的影响很少涉及。当列车在长真空管中高速运行时,活塞效应明显,车头和车尾的压差也明显增大。与此同时,气动热

也显著增加。它不仅影响列车的运行和能耗,而且增加了列车和真空管道的损坏,故有必要对长真空管道的真空管道结构进行研究和优化。因此本文基于某在建真空管道试验平台,分别针对单管结构、多孔介质结构和条形孔洞结构的真空管道,建立了二维轴对称数值计算模型,使用Fluent软件研究不同管道结构下气动热对管道内热环境的影响。

1 数学模型

1.1 连续介质理论

真空管道内压力较低,空气稀薄,气体的流动应满足连续介质理论。克努森数(Knudsen number)是判断该理论的主要依据,数学表达式如式(1)、式(2)所示^[10]。

$$Kn = \frac{\lambda}{H} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2\pi} d^2 p} \quad (2)$$

式中: λ 为分子平均自由程; H 为特征长度; k_B 为玻尔兹曼常数, $k_B=1.38 \times 10^{-23}$; p 为环境压力; T 为环境温度; d 表示分子直径。本文研究中,环境压力为0.01atm,环境温度300K,分子直径 3.5×10^{-10} m,特征长度 H 为3m,因此计算得 $Kn=2.5 \times 10^{-5}$,远小于0.01,因此本研究适用于连续介质假设。

1.2 多孔介质理论

多孔介质模型使用孔隙率表示单元控制体中固体骨架外流体所占的体积与控制体总体积的比值。结合本文模型,孔隙率为流体流过内壁管道的体积与内壁管道除去流体流过孔隙的体积比值^[12]。

$$\varepsilon = \frac{V_f}{V} \quad (3)$$

式中: ε 为多孔介质区域的孔隙率; V_f 为流体流过内壁管道的体积; V 为内壁管道除去流体流过孔隙的体积。

1.3 可压缩流动控制方程

列车在真空管道内高速运动时,管道内气体流动呈现二维、非定常、可压缩瞬态流,并且伴随着复杂的传热过程,但同样遵循空气动力学三大基本方程,即质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程。

质量守恒方程^[13]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0 \quad (4)$$

动量守恒方程^[13]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \text{div}(\rho u U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} u) + F_x \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \text{div}(\rho v U) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} v) + F_y$$

能量守恒方程^[13]:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho T U) = \text{div}\left(\frac{h}{C_p} \text{grad} T\right) + S_T \quad (6)$$

式中： ρ 为空气密度，是关于坐标 (x,y) 与时间 t 的函数，体现流体在不同位置、时刻的质量疏密程度； t 为流动时间； U 为速度矢量； μ 为动力粘度系数； p 为流体压强； u 、 v 分别为 x 、 y 方向的速度矢量； F_x 、 F_y 分别为 x 、 y 方向的体积力； T 为温度； h 为传热系数； C_p 为定压比热容； S_T 为粘性耗散项，代表流体的内热源和流体机械能转换为热能的部分。

列车在低真空管道内超高速运行时产生的激波、膨胀波以及尾部涡流等空气动力学现象会引起列车附近温度剧烈变化，因此空气的可压缩性不可忽略。空气密度遵循可压缩定律，数学方程为如式(7)所示^[13]。

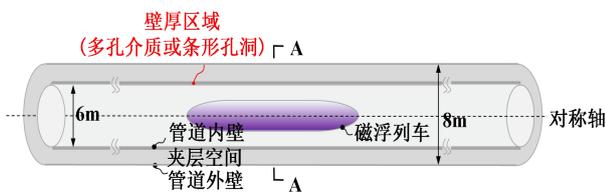
$$P = \rho R_g T \quad (7)$$

式中： R_g 为理想气体常数，取值 $8.31\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ 。

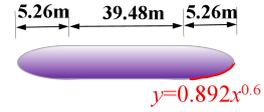
2 数值计算模型

2.1 几何模型

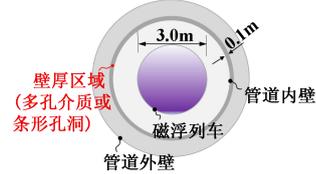
本文参考某在建的真空管道列车系统实验平台所用列车的头型，将其简化为列车-管道模型，建立 1:1 真空管道列车系统二维轴对称数值计算模型。图 1 所示为本研究中建立的真空管道交通系统的整体几何结构。管道总长度 1810m，列车总运行距离 1620m，其中加速段 800m，匀速段 200m，减速段 620m。列车设计总长度 60m，直径 3.6m，真空管道内径 6m，系统阻塞比 0.25。



(a) 磁浮列车在管道内运行示意图



(b) 列车模型尺寸示意图



(c) A-A 截面管道和列车尺寸示意图

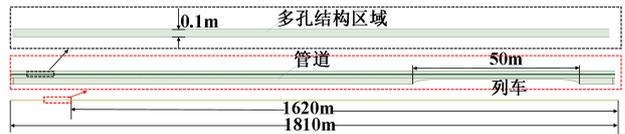
图 1 真空管道列车几何结构示意图

Fig.1 Geometric structure diagram of vacuum tube train

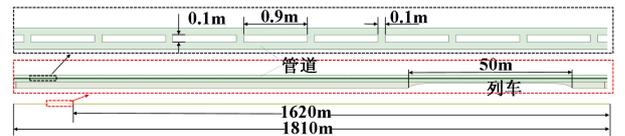
为了对比不同真空管道结构对管道内热环境的影响，本文基于图 1 的真空管道结构示意图，建立了三种制式的管道结构，如图 2 所示，分别为单管结构、多孔介质结构和条形孔洞结构。单管结构的内径为 6m；多孔介质结构的孔隙率为 0.1，孔洞尺寸直径大小 0.05m；条形孔洞结构孔洞大小 0.05m，按照多孔介质孔隙率换算后得出孔间距为 1m。



(a) 单管结构



(b) 多孔介质结构



(c) 条形孔洞结构

图 2 不同管道结构示意图

Fig.2 Illustration of different tube structures

为了解列车周围复杂气动现象和流动规律的形成及演化，有必要对计算模型加以简化，根据真空管道列车流场特征和热环境，结合空气动力学经验，对真空管道列车数学模型做出如下假设与简化：

(1) 由于真空管道列车尚未得到实际工程应用，基于 Hyperloop 概念，建立真空管道列车数值计算模型，并做适当简化处理，忽略车体外形复杂的构造及管道内部设备布置；

(2) 假设列车中心放置在圆管轴对称线上行驶, 且不考虑列车悬浮方式及地面效应;

(3) 假设管道内初始温度 (T_0) 恒定为 300K, 且忽略管道外环境带来的温度影响。

2.2 边界条件

列车运动通过 Fluent 软件中的动态层铺法 (Dynamic Layering) 实现。列车所在区域为运动区域, 其运动通过 Profile 文件控制, 如图 3 所示。本文研究列车在 1200km/h, 真空度为 0.01atm 下, 列车在加速、匀速和减速过程中真空管道结构对于气动热现象的影响。设置环境压力为 1016.25Pa, 环境温度为 26.85℃。管道外壁面设置为绝热壁面。在 Fluent 中, 设置空气为 “ideal-gas”, 软件依据式 (7) 计算空气导热系数、密度和比热容随压力和温度的变化。

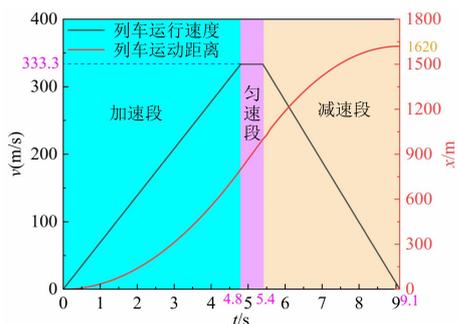


图 3 列车的运行速度和运行距离随时间变化曲线

Fig.3 Train speed and distance change curve with times

2.3 离散化求解

本文基于有限体积法离散控制方程, 考虑真空管道内的流体可压缩性, 采用耦合隐式流体求解器求解离散代数方程组。选择迎风通量分裂格式 (Improved Advection Upstream Splitting Method, AUSM+) 处理对流量, 可以准确地捕捉到激波的不连续性。时间项采用二阶精度隐式格式, 计算时间步长为 0.0003, 保证最大库朗数不超过 1.0。在每个时间步内, 最大内迭代次数为 50, 保证连续性和残差收敛至 10^{-3} , 能量方程收敛至 10^{-6} 。

2.4 网格尺寸分析

为了更加准确捕捉流体在列车表面附近的速度梯度和流动特性, 从而精确分析气动热、流动分离和转捩现象, 在列车表面建立 15 层以 1.3 倍增长率延伸的边界层网格。本文重点关注列车表面和列车周围的流动现象, 因此划分边界层网格时应保证列车表面 y^+ 值小于 1。图 4 显示了网格的局部示

意图。

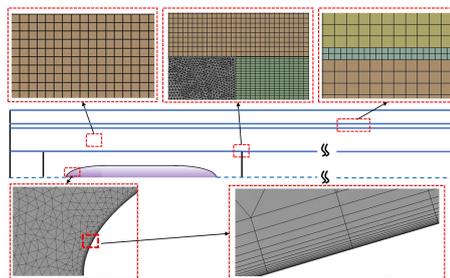


图 4 网格划分示意图

Fig.4 Mesh division diagram

列车瞬时启动并以 1200km/h 运行 1s 工况为例, 分析不同网格尺寸下列车车头鼻尖处的压力、温度、车身表面的最大温度以及整车气动阻力的差异, 从而确定合理的网格尺寸值。图 5 展示了车头附近不同尺寸的网格划分情况。表 1 展示了不同网格对应的计算域网格划分尺寸以及监测参数的对比结果。从表 1 中可以看出, 细网格与中等网格的计算结果相对接近, 其最大误差不超过 2.1%。考虑计算资源和计算精度要求, 本文选择中等网格尺寸。

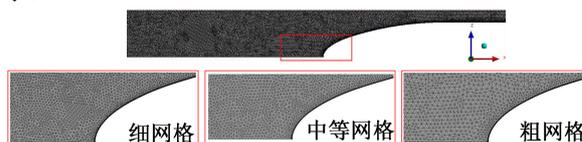


图 5 三组网格在车头附近的网格划分

Fig.5 Mesh division of three groups of meshes near the train's ahead

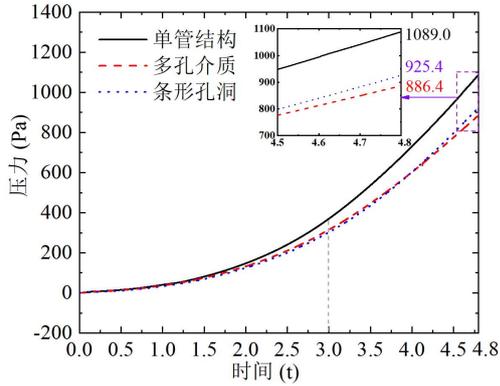
表 1 不同网格尺寸下计算结果综合对比

Table 1 Comprehensive comparison of calculation results under different mesh sizes

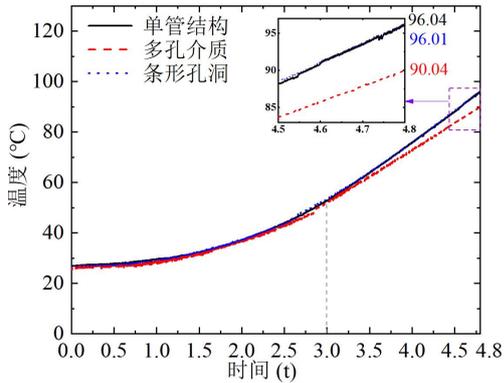
项目	细网格	中等网格	粗网格
网格总数/万	107.4	69.3	39.2
车前区域/m	0.08	0.1	0.12
列车区域 (加密区) /m	0.04	0.05	0.06
车后区域/m	0.08	0.1	0.12
列车表面/m	0.02	0.025	0.03
车头鼻尖压力/Pa	892	890	885
车头鼻尖压力误差	—	0.22%	0.78%
车头鼻尖温度/℃	92.1	91.5	90.3
车头鼻尖温度误差	—	0.65%	1.95%
列车表面温度/℃	90.7	88.8	85.8
列车表面温度误差	—	2.1%	5.4%

3 结果分析

3.1 加速段



(a) 列车车头鼻尖测点压力变化



(b) 列车车头鼻尖测点温度变化

图 6 加速段列车鼻尖测点压力变化和温度变化

Fig.6 Pressure and temperature changes at the measuring point of the nose of the train in the acceleration process

如图 6 所示，在 0~4.8s 时间内，列车从静止状态开始做匀加速运动，车头鼻尖持续挤压前方空气，导致鼻尖处的压力逐渐升高。与单管结构相比，多孔介质结构和条形孔洞结构下，气流在流经管道内壁面时受到的摩擦损耗和压差影响更为显著，使得车头鼻尖处的压力明显降低。在加速段末期，与单管结构相比，多孔介质结构和条形孔洞结构下车头鼻尖处的压力分别降低了 202Pa 和 164Pa。同理，车头鼻尖处的温度也受到气流与管道内壁面边界层的摩擦损耗影响，空气的动能逐渐通过黏性耗散作用转化为内能，导致车头鼻尖处的温度逐渐升高。从图 7 可以看出，由于气流在流经不同管道结构时，列车尾部边界层区域并未发生显著改变，导致流经车头鼻尖处的气流速度略有不同，从而引起

鼻尖处温度的细微差异。具体而言，车头鼻尖处的温度分别为 96.04℃（单管结构）、96.01℃（条形孔洞结构）和 90.04℃（多孔介质结构）。相比单管结构，多孔介质结构和条形孔洞结构在降低车头鼻尖处温度方面表现出一定优势，尤其是多孔介质结构，鼻尖温度降低更为显著。

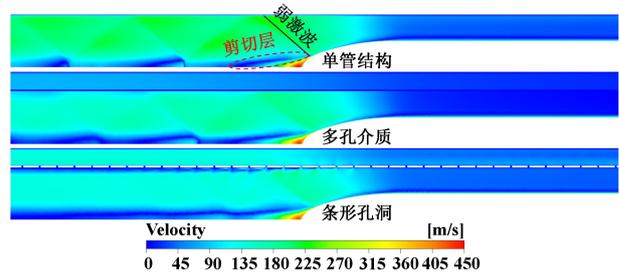
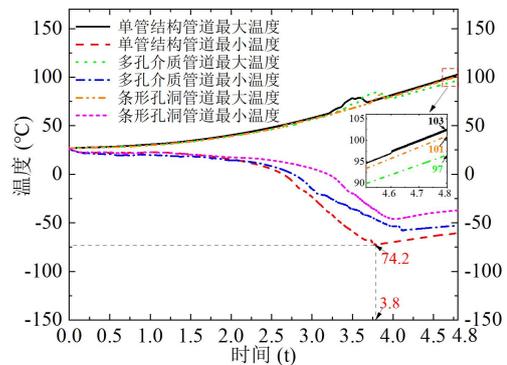


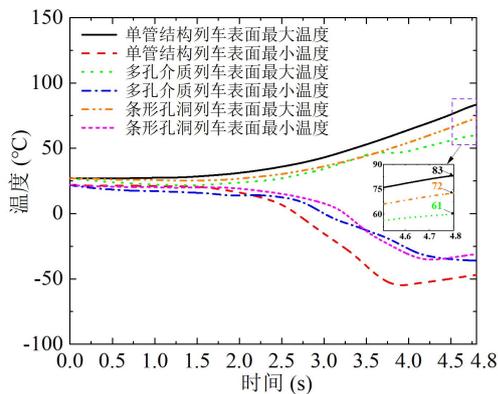
图 7 4.8s 时刻不同管道结构列车尾部速度分布云图

Fig.7 Cloud picture of tail speed distribution of trains with different pipeline structures at 4.8s

如图 8 所示，加速段内不同管道结构下管道内和列车表面的最大值分布显示，最大值的变化规律在各管道结构中基本一致。总体表现为：相同管道结构下，管道内的最大值高于列车表面的最大值。这种现象的主要原因是，列车在运动过程中持续挤压前方空气，导致列车前方形成高温壅塞区。高温气体通过气动热效应加热列车表面，使得管道内的最大空气温度始终高于列车表面的最大温度。而在列车尾部，由于气流受到激波和膨胀波的影响，流经激波的空气温度较低。从图 8 还可以看出，列车表面出现最低温度的时间早于管道内出现最低温度的时间。这是因为，当气流速度超过亚音速时，会率先在列车肩部表面形成激波，导致尾车肩部位置的温度降低。随后，激波逐渐向管道内部传播，使得流经激波区域的空气温度逐渐降低。



(a) 管道内最大温度和最小温度



(b) 列车表面最大温度和最小温度

图 8 加速段真空管道内和列车表面的最值温度

Fig.8 The maximum temperature in the vacuum pipe and on the train surface in the acceleration process

如图 9 所示, 三种管道结构下, 管道内最大温度均出现在车头鼻尖区域, 而最小温度位于气流流经激波处。而列车表面的最大温度出现在车头鼻尖位置, 最小温度出现在车尾肩部。相比单管结构, 具有多孔介质结构或条形孔洞结构的真空管道, 列车表面最大温度分别降低了 22°C 和 11°C, 管道内最高温度分别降低了 6°C 和 2°C。这表明, 具有多孔介质结构或条形孔洞结构的真空管道在降低列车表面温度和管道内空气温度方面具有一定优势; 优化管道结构对改善列车运行热环境具有积极作用。

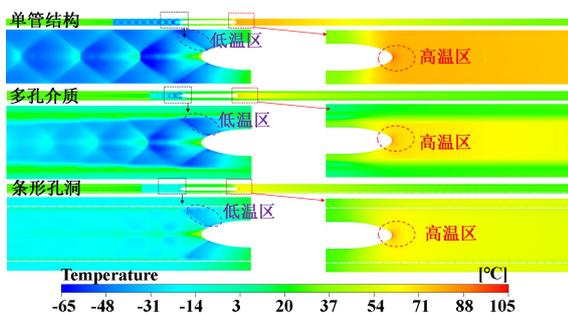


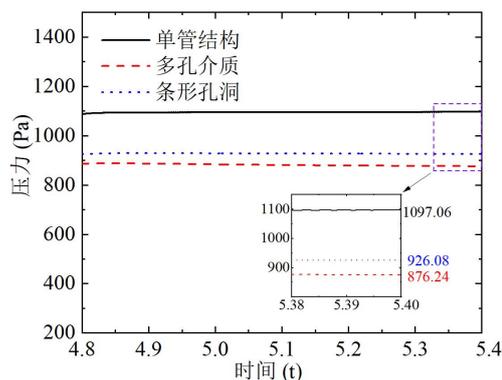
图 9 4.8s 时列车周围温度云图

Fig.9 Temperature cloud picture around the train at 4.8s

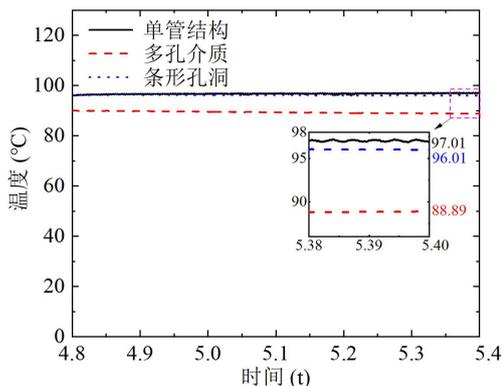
3.2 匀速段

如图 10 所示, 列车进入匀速段后, 车头鼻尖的的压力和温度基本保持稳定。相比单管结构, 多孔介质结构和条形孔洞结构下, 车头鼻尖测点的压力分别降低了 220.82Pa 和 170.98Pa, 温度分别降低了 8.12°C 和 1°C。这一结果表明, 本文所建立的条形孔洞结构在降低车头鼻尖温度方面的效果不明

显, 而多孔介质结构不仅显著降低了列车头部的压力, 还有效减少了气动热效应所导致的温度升高。



(a) 列车车头鼻尖测点压力变化



(b) 列车车头鼻尖测点温度变化

图 10 匀速段列车鼻尖测点压力变化和温度变化

Fig.10 Pressure changes and temperature changes at the measuring point of the nose of the train at uniform process

从图 11 (a) 可以看出, 与单管结构相比, 多孔介质结构和条形孔洞结构分别使管道内的最大温度降低了约 7°C 和 2°C, 而管道内的最低温度分别升高了约 6.5°C 和 23°C。这表明, 不同管道结构对降低管道内最大温度的影响较小, 但在提升管道内最低温度方面表现出明显的差异性。从图 11 (b) 可以看出, 相比单管结构, 多孔介质结构和条形孔洞结构列车表面最大温度分别降低了约 26.5°C 和 11.5°C, 列车表面最低温度分别升高了约 8°C 和 16.5°C。从图 12 中 5.4s 时刻不同结构列车周围温度云图可以看出, 这是由于管道结构的不同引起气流流经车头鼻尖处的温度产生差异, 相比单管结构, 气流在流经多孔介质结构和条形孔洞结构时受到惯性阻力和黏性阻力的影响向夹层空间流动, 气流速度在内壁面处受到损耗, 在流经车头处时速度

减小。这表明不同的管道结构对列车表面最大温度和最小温度有显著影响。

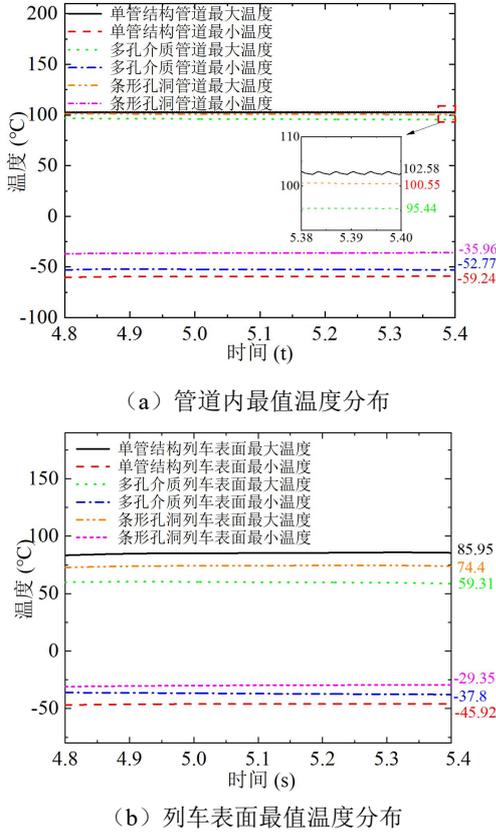


图 11 匀速段管道内和列车表面最值温度分布

Fig. 11 Distribution of the maximum temperature inside the tube and on the surface of the train at uniform process

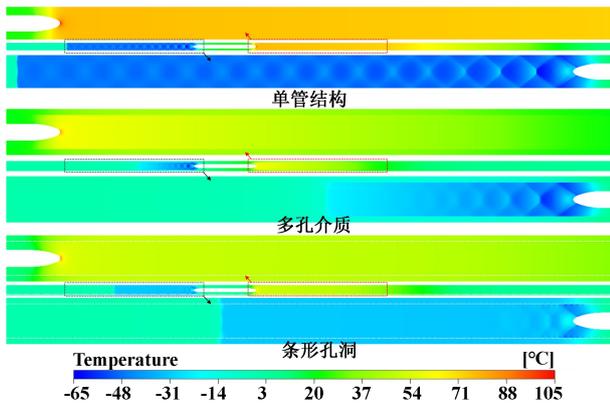


图 12 5.4s 时刻不同管道结构列车周围温度云图

Fig.12 Temperature cloud picture around trains with different tube structures at 5.4s

如图 13 所示，5.4s 时不同管道结构下列车周围的温度分布呈现出显著差异。温度云图中标记的

虚线表示管道内监测线 1 的位置。从图中可以明显看出，管道结构的不同确实引起了列车尾部激波和膨胀波区域的显著变化。具体而言，在三种管道结构下，单管结构的列车尾部低温区长度最长，而多孔介质结构的列车尾部低温区长度最短。与此同时，管道结构的差异还显著影响了车前高温区的长度和强度，相较于单管结构，多孔介质结构和条形孔洞结构均有效降低了车前高温区的范围和温度强度。

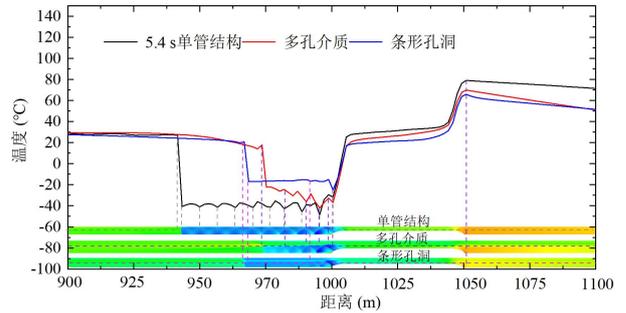
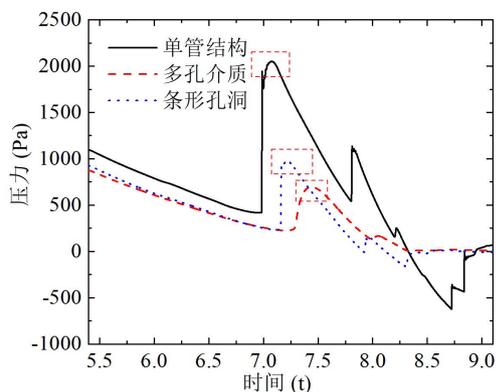


图 13 5.4s 时列车周围温度分布曲线图叠加图

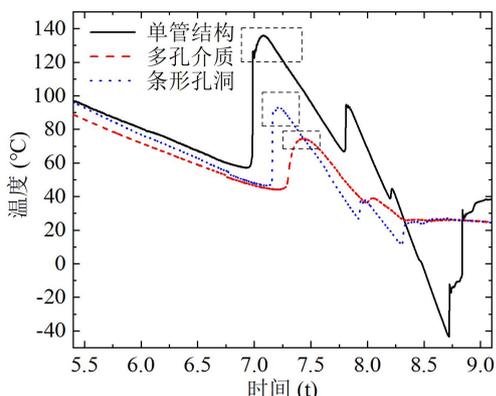
Fig.13 Superimposed diagram of temperature distribution curves around the train at 5.4s

3.3 减速段

在 5.4s 后，列车进入减速段，车前的高温壅塞区逐渐减弱，车头鼻尖的压力和温度开始逐步降低。然而，由于真空管道两端封闭，当压缩波撞击管道端部后会发生反射，并沿反方向继续传播。当反射压缩波再次撞击列车车头时，车头鼻尖的压力和温度会迅速升高。如图 14 中方框所示，不同管道结构对这一现象的影响显著。具体而言，真空管道结构的不同使得反射压缩波撞击车头表面的时间有所差异。如图 14 (a) 方框所示，相比单管结构，多孔介质结构和条形孔洞结构下，反射压缩波撞击车头鼻尖后造成的压力强度分别下降了约 1356Pa 和 1073Pa。这表明反射压缩波在传播过程中受到管道结构的影响，其能量通过多孔介质或条形孔洞逐渐向夹层空间耗散。同样地，如图 14 (b) 方框所示，相比单管结构，多孔介质结构和条形孔洞结构下，反射压缩波撞击车头鼻尖后造成的温度分别降低了约 61℃和 44℃。这进一步表明，多孔介质结构和条形孔洞结构能够有效削弱反射压缩波的强度，优化列车前方的气动热环境。



(a) 列车车头鼻尖测点压力变化



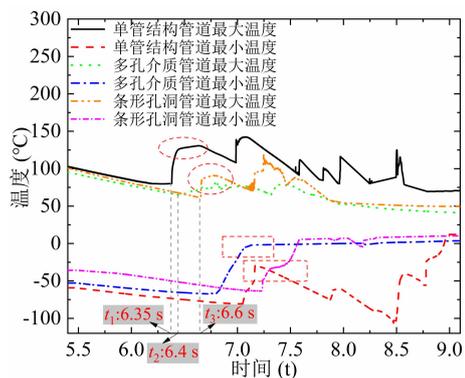
(b) 列车车头鼻尖测点温度变化

图 14 减速段列车鼻尖测点压力和温度变化

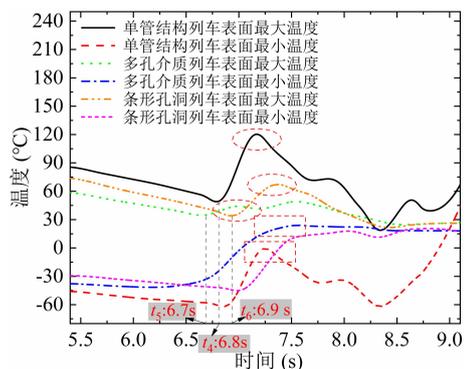
Fig.14 Changes of pressure and temperature at the measuring point of the nose tip of the train in deceleration process

如图 15 所示, 减速段内管道和列车表面的最高温度变化表现出较为复杂的特征。具体而言, 随着列车持续减速, 前方的高温壅塞区逐渐减弱, 导致管道内的最大温度逐渐降低。而在列车尾部, 由于膨胀波受到激波强度衰减的影响而逐渐增强, 空气的最低温度则持续降低。如图 15 (a) 所示, 在 t_1 、 t_2 和 t_3 时刻, 由于管道结构的差异, 压缩波撞击管道端部的时间不同, 从而导致最大温度突然升高的时间有所不同。当压缩波撞击管道端部时, 部分动能转化为热能, 使管道内的空气温度升高。随后, 压缩波发生反射, 并在 t_4 、 t_5 和 t_6 时刻分别撞击列车表面。反射压缩波的撞击导致列车表面温度突然升高, 如图 15 (b) 中椭圆框所示。此外, 不同管道结构对反射压缩波的影响差异显著。相比单管结构, 多孔介质结构和条形孔洞结构的真空管道在减弱反射压缩波作用方面表现出明显优势, 反射

压缩波撞击管道和列车表面引起的温升幅度明显降低。如图 15 中矩形框所示, 不同管道结构下管道内和列车表面的最小温度变化规律一致。从图中还可以明显发现, 相比单管结构, 多孔介质结构和条形孔洞结构的真空管道温度的波动值更小, 这主要是因为压缩波在撞击端部、反射、传播和再撞击端部等过程中, 能量的耗散更快, 这表明管道结构的影响对反射压缩波的强度和幅度产生了影响。



(a) 管道内最大值温度分布



(b) 列车表面最大值温度分布

图 15 减速段管道内和列车表面最大值温度分布

Fig.15 Distribution of the maximum temperature inside the tube and on the surface of the train

4 结论

本文基于某在建的真空管道列车系统实验平台, 分别针对单管结构、多孔介质结构和条形孔洞结构的真空管道, 建立了二维轴对称数值计算模型, 研究了不同管道结构下列车在加速段、匀速段和减速段各阶段气动热对管道内热环境的影响。主要结论如下:

(1) 在加速段, 相比单管结构, 具有多孔介质结构或条形孔洞结构的真空管道, 列车表面最大

温度分别降低了 22℃和 11℃，管道内最高温度分别降低了 6℃和 2℃。

(2) 在匀速段，具有单管结构的真空管道其列车尾部低温区长度最长，具有多孔介质结构的真空管道其列车尾部低温区长度最短。相较于单管结构，多孔介质结构和条形孔洞结构均有效降低了车前高温区的范围和温度强度。

(3) 在减速段，多孔介质结构和条形孔洞结构能够有效减缓反射压缩波的强度和温度。

(4) 相比单管结构的真空管道，具有多孔介质结构或条形孔洞结构的真空管道可以降低列车表面温度和管道内空气温度。

本文所用列车模型主要基于试验台模型设计，得出的结论可以为真空管道列车气动热减缓措施提供参考。但值得注意的是，除了参考上述列车模型外，考虑具有悬浮间隙的三维工程实际列车模型对气动热的影响可能与二维模型产生差异，对于此影响可在后续研究工作中予以考虑。

参考文献：

- [1] 王智华.超高速真空管道列车气动特性及管内环境研究[D].成都:西南交通大学,2022.
- [2] 周晓.真空管道运输高速列车空气阻力数值仿真[D].成都:西南交通大学,2008.
- [3] Zhou P, Zhang J Y, Li T, et al. Numerical study on wave phenomena produced by the super high-speed evacuated tube maglev train[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019,190:61-70.
- [4] Bi H Q, Lei B. Aerodynamic characteristics of evacuated tube high-speed train[C]. *International Conference on Transportation Engineering 2009*, 2009:3736-3741.
- [5] 刘加利,张继业,张卫华.真空管道高速列车气动噪声源特性分析[J].*真空科学与技术学报*,2013,33(10):1026-1031.
- [6] 贾文广,董晨光,周艳,等.基于阻塞比的真空管道交通系统热压耦合研究[J].*工程热物理学报*,2013,34(9):1745-1748.
- [7] 陈文庆.真空管道交通热环境特性研究[D].成都:西南交通大学,2024.
- [8] 段瑞响.真空管道交通系统热压耦合的气动特性研究[D].青岛:青岛科技大学,2014.
- [9] 董晨光.阻塞比对真空管道交通系统气动生热及传热的影响[D].青岛:青岛科技大学,2013.
- [10] 刘加利,张继业,张卫华.真空管道高速列车气动阻力及系统参数设计[J].*真空科学与技术学报*,2014,34(1):10-15.
- [11] 睦洋.高速列车低真空管道内壅塞流动特征与气动热效应[D].成都:西南交通大学,2022.
- [12] 朱淮东,江世杰.孔隙率对多孔板弥散送风效果的影响研究[J].*制冷与空调*,2024,38(2):189-195.
- [13] 陈文庆,毕海权,周远龙.真空管道内直线电机定子温度分布与散热特性研究[J].*制冷与空调*,2024,38(3):293-298,312.
- [14] Xiaohang L, Baoyi H, Houkui X, et al. A novel phase change materials used for direct photothermal conversion and efficient thermal storage[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2023,251.
- [15] Huizhi Y, Lili H, Rui L, et al. Ultralight and flexible carbon-based phase change composites with high porosity for enhanced shape memory and photothermal conversion performance[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022,244.
- [16] Xiao Q, Cao J, Zhang Y, et al. The application of solar-to-thermal conversion phase change material in novel solar water heating system[J]. *Solar Energy*, 2020,199:484-490.
- [17] 高欢,王喆毅,张羽翔,等.膨胀石墨/石蜡定形相变蓄热太阳能集热器传热行为模拟分析[J].*上海第二工业大学学报*,2022,39(1):36-42.
- [18] Zhang J, Zhang N, Zhang Z, et al. Numerical study of the heat transfer of a solar air collector integrated phase change material with supercooling[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025,117:116158-116158.
- [19] Yafen S, Nan Z, Qinrong S, et al. A novel form-stable phase change material based on elastomeric copolymer and carbon nanotubes with photo-thermal conversion performance[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023,63.

(上接第 18 页)