

# 基于阻塞比的真空管道交通系统流场特性初探

青岛科技大学机电工程学院 贾文广

**【摘要】**基于粘性流体的Navier-Stokes方程和k-ε双方程湍流模型,建立真空管道交通系统三维数学模型,数值计算不同阻塞比下的真空管道系统内部流场,并分析其流场特征。结果表明:在真空管道交通系统中,随着阻塞比的增大,气流流速也逐渐增大,其中,流场内气流最高流速约为 $v_{\max}=1002\beta^2-227\beta+289$ 。

**【关键词】**真空管道交通;阻塞比;流场

近年来,随着跨区域合作的深化和经济全球化的发展,人口流动日趋频繁,人们对交通工具的要求也越来越高。列车和飞机是中长途旅客最常选用的交通工具,但二者各有自身无法突破的发展瓶颈。前者作为地面交通工具,其运营速度受到了空气阻力的严重制约,研究表明,当列车速度为300km/h时,运行时受到的气动阻力占总阻力的80%以上,因此,尽管近年来我国高铁建设取得了长足的进步,但未来可提升的空间已十分有限;飞机在介质稀薄的高空运行,可以在低阻力状态下保持高速,然而天气及运载能力限制了飞机的进一步发展。因此,人们一直在寻找一种能够适应时代发展要求的交通工具,真空管道交通系统(Evacuated Tube Transportation, ETT)就是这样一种满足旅客出行需要的安全高速新型交通工具。

## 1. 真空管道交通系统

真空管道交通系统这一设想最早由现代火箭之父Robert Goddard于1904年提出<sup>[1]</sup>,目前,国际上得到普遍认可的真空管道交通系统有两种形式,分别是美国的ETT和瑞士的Swissmetro。虽然中国对真空管道交通系统的研究起步较晚,但因其兼有火车单位能耗低、运量大、不受天气影响和飞机高速的优点,所以真空管道交通系统的科学性、现实性、发展前景及重大意义得到了中国科学界的权威认可,并在2004年被提升到国家战略高度,我国计划于2035年前后建成世界第一条真空管道交通线路<sup>[2]</sup>。

在真空管道交通系统中,列车可看做是一个在封闭的高阻塞比真空管道内运动的大长径比细长物体。当列车在行驶时,管道内介质因列车高速推进被压缩,在管道空间的束缚下,介质无法像在敞开的大气环境中及时、顺畅地外掠车体表面流线后逃逸,只能在管道与列车的环状空间中碰撞、压缩,在这一复杂过程中,介质借压缩正压力与管道内壁面和列车外表面产生剧烈摩擦、生热、传热,产生一系列的空气热、动力学现象。这些现象引起的空气热、动力学问题决定着真空管道交通系

统能否安全、高速、高效运营,而要研究上述问题产生的机理和规律,必须从了解真空管道交通系统的流场分布及流场特性入手<sup>[3]</sup>。

## 2. 真空管道交通系统三维模型

高速列车在真空管道内运行时引起的车体周围空气流动状态十分复杂,流场 $Re>10^5$ ,故认为该流场为湍流流动。本文计算时采用k-ε双方程湍流模型模拟这一湍流流场。一般来说,当马赫数小于0.3时,应当按照不可压缩流动处理,当马赫数大于0.3时,应按可压缩流动处理。本文中列车车速高于0.3马赫数,介质应视为可压缩流体。此外,假设列车为光滑外形的几何体,忽略了如受电弓、转向架等列车外部复杂的结构。列车车长40m,宽3m,高3m,车头长6.7m,车头、车尾均采用相同的单拱流线外形。在列车车速为200m/s,系统压力为0.1atm的条件下,数值模拟了阻塞比分别为0.23, 0.32, 0.46, 0.57下列车周围流场分布。

图1是真空管道交通系统数值计算模型。

## 3. 系统内最高流速与阻塞比

图2为阻塞比为0.32时,真空管道交通系统内部流场分布图(β=0.23、β=0.46、β=0.57时流场分布规律相似,在此不一一列举)。在不同阻塞比条件下,系统内的流场分布大致相同,气流流速随阻塞比而逐渐增大,表现为列车与周围空气介质的相对速度增大,并且气流速度都大于列车初始运行速度。流场分布具体表现为:车头前端的驻点位置气流速度最小,绕过驻点后,经过车头前端向列车顶部流动的气流速度逐渐加大,并在车头与车身顶部过渡位置流速达到最大,之后气流以较大的速度流动,至车身顶部与车尾过渡处时流速又达到最大,然后速度降低,在车尾处形成了一个尺寸大小相当的尾涡。车体底部气流流速也较高。

系统内流速最大处,是Re最大的区域,此区域内流态复杂,因湍流产生的气动热、力现象也较为复杂,需要特别关注。通过对实验数据的对比发现,系统内

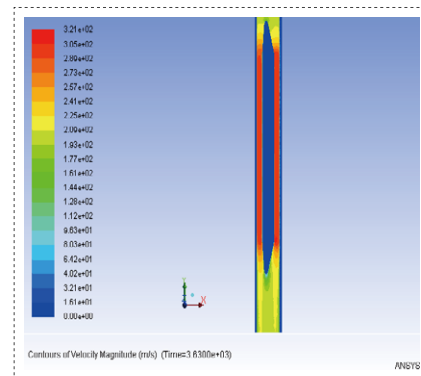


图2 系统内流场分布( $v=200\text{m/s}$ ,  $p=0.1\text{atm}$ ,  $\beta=0.32$ )

最高流速随列车与管道之间的减小而增大,即随系统阻塞比的增大而增大。进一步观察研究发现,系统内气流最高流速随阻塞比的变化呈抛物线变化,当列车车速为200m/s,系统压力为0.1atm时,拟合公式为: $v_{\max}=1002\beta^2-227\beta+289$ 。

## 4. 结论

通过以上探讨分析,在真空管道交通系统中,随着阻塞比的增大,流场中各处的气流流速也逐渐增大,整体呈现两端小,环隙大的特点,并在车头与车身顶部过渡位置流速达到最大。其中,当 $v=200\text{m/s}$ ,  $p=0.1\text{atm}$ 时,流场内气流最高流速与阻塞比的关系可以表示为: $v_{\max}=1002\beta^2-227\beta+289$ 。

## 参考文献

- [1] Daryl Oster. Evacuated Tube Transport: America, 5950 543 [P]. 1999-9-14.
- [2] 沈志云. 关于我国发展真空管道高速交通的思考 [J]. 西南交通大学学报, 2005, 24(2): 133-137.
- [3] 周晓, 张耀平, 姚应峰. 真空管道交通中高速列车空气阻力数值仿真 [J]. 科学技术与工程, 2008, 8(6).

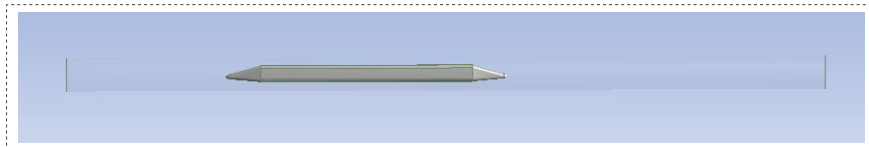


图1 真空管道交通系统数值计算模型