

大型风洞建设中的管道系统设计方法分析

杨帅 陈辉

(中国航空工业空气动力研究院 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要：大型风洞建设中工艺管道是个错综复杂的系统，科学合理的管道系统设计是建设高效率风洞的关键内容之一。本文首先分析了风洞管道按照工作介质和功能的分类，然后详细地介绍了管道设计计算的内容和方法，说明了管道系统工艺布局设计、支架设计、绝热保温工程的要点。管道系统设计分析内容对未来国内大型风洞的建设具有重要的借鉴意义。

关键词：大型风洞；管道系统；设计计算；工艺布局

0 引言

风洞是空气动力学领域研究常用的设备，是飞行器研制不可或缺的试验装置，早期以常规气动力风洞为主，主要完成测力、测压试验。随着真空、制冷等相关配套技术的发展，集成了附属功能的风洞试验装置涌现出来，这使得风洞建设中管道系统设计需求日渐增多。

常规气动力风洞中的管道主要是为了解决动力系统的发热冷却问题，而综合了附属功能的大型风洞则融入了压缩空气管道、真空管道等诸多功能的管道。按照工作介质分类，风洞管道有循环水管道、空气管道、载冷剂管道、液氮管道等；按照功能分类，风洞管道主要有制冷管道、真空管道、压缩空气管道、给水管道、排水管道、暖通管道等。由此可见，大型风洞的管道系统是多功能、跨专业的综合复杂工程，为了满足未来的大型风洞建设的总体工艺设计要求，开展管道系统设计方法分析十分必要。

1 大型风洞管道设计要点

大型风洞管道系统设计受建设经费、场地条件等多因素限制，还需兼顾使用环境、管道功能、施工安装、检修维护等诸多条件。科学合理的管系设计是建设高性能风洞的关键之一。风洞管系设计主要包括：管径、壁厚、压阻计算、管道应力分析、热补偿设计等。

1.1 风洞管径设计计算

设计风洞管径时，首先应根据管道输送介质、流动状态、工作压力、业主需求等因素确定管道材料。大型风洞常用材料是材质为 06Cr19Ni10 或 Q235 的流体输送用无缝钢管。然后依据流量、流速即可计算管径，公式如下：

$$d = 18.81W^{0.5}u^{-0.5}\rho^{-0.5} \text{ 或 } d = 18.81V_0^{0.5}u^{-0.5} \quad (1)$$

式中：

d ——管道的内径，mm；

W ——管内介质的质量流量，kg/h；

V_0 ——管内介质的体积， m^3/h ；

ρ ——介质在工作条件下的密度， kg/m^3 ；

u ——介质在管内的平均流速，m/s。

风洞管道工作介质的流速取决于介质的性质、输送的状态等，可参照 HG/T 20570.6-1995《管径选择》标准中给出的不同介质、不同工况流速的经验值取用。

1.2 风洞管壁厚度计算

风洞管道壁厚与工作介质的压力、温度、腐蚀性、重力荷载等因素有关。为简化计算方法，一般按承压情况计算壁厚，对其他影响壁厚的因素，在安全系数中考虑。若计算壁厚值小于最小壁厚值（表 1），应选用最小壁厚值。

表 1 无缝钢管最小使用壁厚值/mm

外径	最小采用壁厚	外径	最小采用壁厚
14~17	2	140~159	4.5
18~34	2.5	168	5
38~60	3	219	6
76~89	3.5	273	7
108~133	4	325	8

管壁厚度 δ 可近似按薄壁圆筒公式计算：

$$\delta_{\min} = \frac{npd_i}{2[\sigma]\phi np} + c \quad (2)$$

式中：

p ——管内气体压力，MPa；

n ——强度安全系数， $n=1.5\sim 2.5$ ；

$[\sigma]$ ——管材的许用应力，MPa，壁厚 $\leq 12mm$ ，20℃ 常温下，Q235 为 113MPa，06Cr19Ni10 为 137MPa；

ϕ ——焊缝系数，无缝钢管 $\phi=1$ ，直缝焊接钢管 $\phi=0.8$ ；

c ——附加壁厚，mm，为简便起见，通常 $\delta > 6mm$ ， $c=0.18\delta$ ，当 $\delta \leq 6mm$ ， $c=1mm$ 。

当管子被弯曲时，管壁应适当增加厚度，可取：

$$\delta = \delta + \delta \frac{d_0}{2R}$$
 (3)

式中：

d_0 ——管道外径；

R ——管道弯曲半径。

1.3 风洞管道压阻的计算

流体在管道流动遇到不同的阻力，造成压力损失，以致流体总阻力减小。总阻力为沿程阻力 $H1$ 和局部阻力 $H2$ 之和。沿程阻力是流体流经一定管径的直管时，由于摩擦产生的阻力，它伴随着流体流动而出现。局部阻力是流体在流动中，由于管道的某些局部阻碍（管件、阀门、弯头、出入口因素等）所引起的。

1.4 风洞管道应力分析

管道应力分析的目的是防止管道塑性变形、疲劳破坏、对系统内其他设备作用力、法兰密封泄露，风洞管道受到应力（表 2）。如图 1 和图 2 所示，管道应力分析可通过有限元分析核算管道的强度和刚度是否满足工作要求。

1.5 温度变形补偿设计

风洞管道在温度变化时会发生热胀冷缩变形，若管道变形处被固定，将导致管道被破坏。温度变形补偿的措施有：改变管道走向，选用波形补偿器或球形补偿器，采用弹簧支吊架，改变设备的布置（如卧式容器固定端和滑动端换位）。管系温度变形补偿设计时，应保证管

表 2 风洞管道承受的主要应力载荷

载荷种类	载荷特点	载荷来源
内、外压力	静载（长期）	装置运行时，管道流体内外压差
重力	静载（长期）	管道、隔热材料、流动介质的重量
试验载荷	静载（短期）	安装后水压试验或气压试验的载荷
热胀冷缩变形	交变应力	热胀冷缩导致变形而产生
管道端点位移	交变应力	与管道连接的设备膨胀
管道振动	振动载荷（长期）	输送介质流动引起的振动
基础下沉	刚性变形力	基础较差引起刚性变形

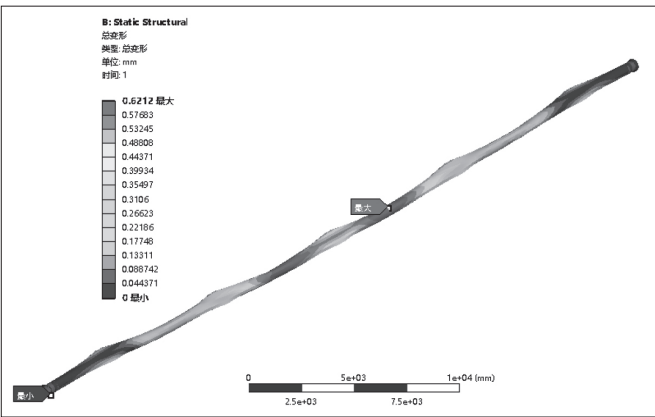


图 1 管道刚度（变形）有限元分析示意图

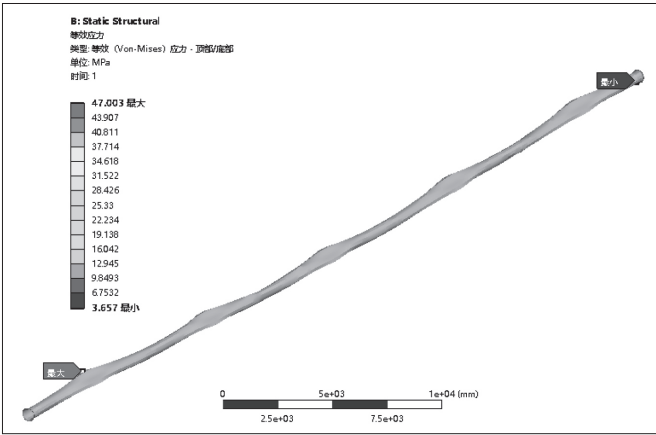


图 2 管道强度（应力）有限元分析示意图

道具有足够柔性来吸收位移应变，管道伸长或收缩量计算公式为：

$$\Delta L_0 = 1000 \cdot \alpha_{L0} \cdot L \cdot \Delta T$$
 (4)

式中：

ΔL_0 ——管道的伸长或收缩（为负值时）量，mm；

α_{L0} ——管道的线膨胀系数， $1/^\circ\text{C}$ ；

L ——伸缩缝间距，m；

ΔT ——管道内外的温度差， $^\circ\text{C}$ 。

2 大型风洞管道总体工艺设计

2.1 风洞管道工艺布置原则

大型风洞管道总体工艺设计主要工作是绘制表示管道空间位置连接（含阀件、管件及控制仪表安装）的图样。管系在厂房内往往是分层设计，纵横交错，在管道布置时，需综合功能、走向、就近原则、施工、操作、维修及安全生产等多重因素设计管道的布局。

风洞管道的工艺总体原则：

第一，布置设计应符合工艺管道及仪表流程图要求。

第二，应统筹规划，做到安全可靠、经济合理、满足施工、操作、维修等方面的要求，并力求整齐美观。

第三，管道应尽可能沿墙面架空或地上敷设，或固定在墙上的管架上，如确有需要，可埋地或敷设在管沟内。

第四，宜集中成排布置，地上的管道应敷设在管架或管墩上。

第五，管道布置应使管道系统具有一定柔性。

第六，应在管道规划的同时考虑其支承点设置，宜利用管道布置进行自然补偿。

第七，管道之间、管道与墙壁之间应保持一定的距离。

风洞管道的工艺细节注意事项：

（1）先布置管径较大的管线，后布置管径较小的管线，遇管线交叉时，应小管避让大管。

(2) 有压让无压。

(3) 气体管道让液体管道。

(4) 附件少的管道避让附件多的管道。

(5) 各种管线在垂直方向布置时遵循: 风管在上, 电气管槽在中间, 给排水在下; 风管在线槽或电气管上面, 水管在线槽或电缆在下面; 无腐蚀介质管道在上, 腐蚀性介质管道在下; 风管在上, 水管在下, 热水管在上, 冷水管在下; 高压管道在上, 低压管道在下; 气体介质管道在上, 液体介质管道在下; 保温管道在上, 不保温管道在下。

(6) 真空管线应尽量缩短, 避免过多曲折, 尽量减少弯头和阀门, 使阻力小, 达到更大的真空度, 避免用截止阀。

(7) 管道敷设坡度一般按介质流动方向, 坡度大小: $1/100 \sim 5/1000$ 。

(8) 管道布置不得妨碍门窗开启及阀门、管件、设备、机泵和自控仪表的操作检修。

(9) 管道应避免通过电机、仪表盘、配电盘的上方。

(10) 阀门、仪表的安装应方便操作与维修, 阀门高度 1.2m, 安全阀高度 2.2m, 温度计、压力表高度 1.5m 左右, 水平管道上的阀门阀杆不宜垂直向下。

(11) 不锈钢管不得与普通碳钢制的管架直接接触, 以免产生因点位差造成腐蚀核心。

(12) 在人员通行处, 管道底部的净高不宜小于 2.2m, 通行大型检修机械或车辆时, 净高不小于 4.5m。

(13) 阀门要布置在便于操作的部位, 容易开错且引起重大事故的阀门, 相互间距要拉开, 并涂刷不同颜色。

(14) 管道在穿墙和楼板时, 应在墙面和楼板上预埋一个直径大的套管。

2.2 风洞管道支架设计

支架的设计是管道工艺设计的重要工作, 管道支架种类分为: 承重型、刚性支吊架、可调刚性支吊架、可变弹簧支吊架、弹簧支吊架。管道支吊架的受力分析可为支吊架的基础设计提供依据。管架设计为应力分析提供的条件包括: 设置支吊架的位置及支吊架型式; 阀门、法兰等刚性元件的重量、保温层的厚度和密度, 以及其他几种或均布载荷条件; 管道端点约束条件或附加位移、管道所连接的设备。

2.3 绝热保温工程

管道保温绝热的目标是减少设备、管道及其附件的

热(冷)量损失; 或保证操作工人的安全; 或冬季用保温来延缓或防止设备、管道内液体的冻结; 或用耐火材料绝热提高设备的防火等级。管道的绝热结构应有一定的机械强度, 绝热结构主要由保护层、防潮层、绝热层组成。保护层是保护保温层免受外力和雨水侵袭, 并使保温结构外形整洁美观。防潮层用于防潮、防水。绝热层是利用保温材料的优良绝热性能, 增加热阻, 减少散热。管道保温绝热的材料以选择阻燃材料为宜, 其使用温度应包含材料的设计温度。

3 结语

大型风洞的管道系统设计是在其总体设计方案的基础上, 考虑建设需求, 协调试验需求, 兼顾厂房设计, 迭代优化设计而成。本文分析了风洞管道系统设计中需综合考虑的流体输送、载荷种类、工艺布局等多种因素, 系统性地梳理了大型风洞建设中的管道设计分析内容(包括管径、壁厚、应力等)、管道总体工艺设计等工作要点, 分析结果可为中国未来大型风洞的管道系统设计提供参考。

参考文献:

- [1] 石领先, 焦园圆, 叶迎春, 等. 常规直流式低速风洞的气动设计[J]. 海峡科技与产业, 2021(3): 50-52.
- [2] Green J, Quest J. A short history of the european transonic wind tunnel ETW[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2011, 47(7): 319-368.
- [3] 陈建兵, 荣超, 杨明学, 等. 浅谈风洞工艺布局[J]. 新技术新工艺, 2020(1): 20-23.
- [4] 孙敏. 联合厂房的工艺布局设计[J]. 新技术新工艺, 2012(11): 36-38.
- [5] 张德姜, 王怀义, 刘绍叶. 石油化工装置工艺管道安装设计手册(第三版)[M]. 北京: 中国石化出版社, 2005.
- [6] 张吉全, 顾榕彬. 低温管道的设计要点[J]. 华东科技, 2021(6): 470.
- [7] 丘平. 管道支架设计若干问题浅议[J]. 石油化工设计, 2010, 27(4): 44-46.

作者简介: 杨帅(1987.01-), 男, 汉族, 辽宁丹东人, 硕士, 工程师, 研究方向: 机械设计。