

通风系统中引入实时监测与动态调节算法,通过风速、风压与浓度联动控制,及时调整风机运行参数,保持风流分布的连续性与均匀性。实践表明,该方法能有效降低高浓度区域形成概率,稳定系统流场结构,显著提高通风安全系数。

### 4.3 通风控制参数与瓦斯涌出量的动态关系

通风系统的关键控制参数——风压、风量与风向——决定了瓦斯运移的宏观方向与局部浓度变化。不同的风压分配会导致瓦斯流动路径的显著差异。若局部风压过高,瓦斯可能被快速推移至回风巷形成高浓度积聚区;若风压过低,则稀释能力不足,导致瓦斯滞留。研究基于多场耦合仿真模型发现,风压梯度与瓦斯释放量之间存在显著的耦合敏感性,适度的压力梯度有助于维持稳定稀释流场。通过分区调控与滚动优化算法,可实现风压—风量—浓度的动态协调。应用实例显示,该策略可使瓦斯浓度峰值降低40%以上,风能利用率提高约15%,实现通风效率与安全性的双重优化,充分体现了智能化耦合控制的工程价值。

## 5 通风系统优化与耦合控制策略

### 5.1 基于CFD的通风流场优化设计

计算流体力学(CFD)技术为煤矿通风系统的定量分析与优化提供了科学支撑。通过建立矿井三维数值模型,可在多工况条件下对气流速度场、压力场及瓦斯浓度场进行可视化分析,揭示通风系统内部的流动特性与紊流结构。基于模拟结果,可识别出气流死区、湍流集中区及风压损失大的关键位置,进而针对性调整风门布置、风筒走向与风机运行参数,实现通风系统的全局优化。CFD仿真还可与现场实测数据融合,形成“虚实结合”的动态校正模型。工程应用结果显示,经优化后的系统风能利用率提升约20%,瓦斯积聚区减少约三分之一,显著改善了风流分配的均匀性与系统安全裕度,为矿井高效通风提供了可靠的技术路径。

### 5.2 多源信息融合的智能控制方法

在矿井运行环境复杂、动态变化频繁的背景下,传统人工调控方式已难以满足通风系统的实时性与精细化要求。基于多源信息融合的智能控制方法,通过整合瓦斯浓度、风速、温湿度及设备状态等监测数据,实现系统的实时感知与自适应调节。采用模糊控制与强化学习算法构建控制模型,能够在环境参数波动和工况突变时自动修正控制策略,实现对主通风机转速、局部风门开度及风量分配的优化调度。该方法具备自学习与预测能力,可在无须人工干预的条件下完

成参数优化。现场应用结果表明,该系统在高瓦斯矿井中的瓦斯超限报警率降低45%,通风能耗下降15%,实现了“安全—节能—智能”三维目标的统一,为“智慧通风”提供了可行的技术基础。

### 5.3 通风—瓦斯—监测系统的协同管理机制

建立通风、瓦斯与监测系统的协同管理机制,是实现矿井通风系统动态优化的关键环节。通过部署多参数传感器网络,实现风速、瓦斯浓度、压力及温湿度等数据的高频采集与远程传输。数据中心借助云计算与大数据分析技术,对瓦斯涌出趋势进行预测,并依据模型输出自动生成调控方案。系统能够在瓦斯浓度异常时实现快速响应与联动控制,如自动调节风量、启动备用通风机或关闭局部电源,从而防止危险扩散。该平台形成了“监测—诊断—决策—反馈”的闭环控制体系,实现了通风系统的智能化、协同化与自适应运行。该机制的建立使矿井从静态安全管理向动态风险防控转型,为实现煤矿通风系统的精细化与可持续运行提供了系统化支撑。

## 6 结语

煤矿瓦斯涌出规律与通风系统的耦合特征决定了矿井安全管理的复杂性与系统性。研究表明,瓦斯运移与气流分布之间存在显著的非线性反馈关系,只有在多场耦合与动态优化框架下,才能实现通风效率与安全性的统一。基于CFD模拟、智能控制与数据融合的耦合优化策略,为瓦斯灾害防治提供了新思路。未来应在深部矿井、复杂地质条件及智能化监测平台中进一步推广该技术,实现通风系统的动态感知与智能决策。通过强化通风—瓦斯耦合研究,构建安全、高效、低碳的煤矿通风体系,将为我国煤炭工业的本质安全与绿色转型提供坚实支撑。

### 参考文献

- [1] 李志远.煤矿瓦斯涌出分布规律分析与GM(1,1)预测研究[J].煤矿现代化,2018,(02):39-41.
- [2] 赵莉,曾勇,吕倩,等.煤矿瓦斯赋存与瓦斯涌出规律研究[J].煤炭工程,2011,(03):84-86.
- [3] 田水承,张漾,王娜.基于R/S分析法的煤矿瓦斯涌出规律研究[J].陕西煤炭,2009,28(03):12-13+11.
- [4] 梁辉,刘志文,崇立国.煤矿通风系统优化与瓦斯控制技术[J].内蒙古煤炭经济,2024,(16):37-39.
- [5] 丁庆法,高峰.保障矿井安全生产的煤矿通风系统优化设计策略[J].现代职业安全,2024,(08):88-90.

# Study on wind pressure characteristics of super high-rise twin tower buildings

Lei Zhang<sup>1</sup> Weijuan Wang<sup>2</sup> Yaguang Yan<sup>1\*</sup>

1. Civil Engineering College, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei, 056000, China

2. Shougang Jingtang United Iron & Steel Co., Ltd., Tangshan, Hebei, 063210, China

## Abstract

Supertall twin-tower buildings stand as critical structures in urban development, operating within complex wind field environments. Their wind pressure characteristics not only determine structural safety, curtain wall design, and equipment placement, but also influence overall wind resistance stability. Due to intense aerodynamic interactions between twin towers—particularly wake effects, turbulent intensification, accelerated zones, and vortex-induced vibrations (both synchronous and counter-phase)—these structures exhibit distinct wind pressure patterns compared to single-tower buildings. This study investigates the aerodynamic interference effects governing wind pressure characteristics in twin-tower configurations through three key dimensions: spatial concentration, directional sensitivity of shape coefficients, and enhanced wind pressure fluctuations across tower spans. By analyzing average wind pressure, pulsating wind pressure, and shape coefficients, the research provides theoretical and technical foundations for understanding wind load behavior in supertall twin-tower designs, offering valuable insights for architectural planning.

## Keywords

super high-rise building; double tower structure; wind pressure characteristics

## 超高层双塔建筑风压特性研究

张磊<sup>1</sup> 王伟娟<sup>2</sup> 闫亚光<sup>1\*</sup>

1. 河北工程大学土木工程学院, 中国·河北 邯郸 056000

2. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司, 中国·河北 唐山 063210

## 摘要

超高层双塔建筑是当今城市建设复杂风场环境作用下的关键建筑, 其风压特性不仅关系到结构的受力安全、幕墙设计布置和建筑设备安置, 同时也关系到整体抗风性能的稳定性。超高层双塔建筑由于两塔之间气动干扰作用的强烈性, 尤其是塔间尾流、紊流加强、加速区域形成、涡激作用的同步或反步态等因素导致风压特征是与单体塔结构存在巨大差异的复杂性风压特性。本文首先结合风工程理论和空气动力学机理从空间布局的集中性、体型系数的方向敏感性以及跨塔区风压脉动的明显增强等方面综合分析讨论了双塔结构气动干扰效应决定的双塔风压特征表现形态及其形成机理, 其次从平均风压、脉动风压以及体型系数等三个主要方面的内容进行了进一步讨论分析, 将有利于加深对超高层双塔建筑设计中双塔风荷载作用规律的理解, 为其提供理论和技术分析依据。

## 关键词

超高层建筑; 双塔结构; 风压特性

## 1 引言

随着城市发展的竖向拓展, 超高层双塔建筑日益成为城市综合体、城市 CBD 和区域级枢纽中重要建筑的组合方式。双塔结构建筑多由两座功能互补, 相互间相对独立但整体布局紧凑的塔楼, 通过连廊、裙房、共享平台等连成一体

结构, 在高度尺寸、体型布局、布局方式等方面具有复杂特点, 其所处风环境表现出明显的三维性。由于双塔建筑相对单塔建筑, 其流场干扰、尾流干涉及局部加速的风速变化均更加复杂, 在风压变化规律方面更为复杂。风压作为风荷载作用中最关键的参量, 其变幅将决定结构的安全性、幕墙的密闭性、屋面设备的抗风能力以及整体减阻节能措施。

## 2 超高层双塔建筑风压特性形成机理

一是来流碰到双塔建筑, 在双塔的迎流侧外侧产生极大正压, 但由于塔体阻挡作用与塔间距的关系, 会引起塔身的强烈分流、加速以及绕射。尤其由于双塔之间形成狭管效应导致通过狭缝间隙的风速变大, 在双塔迎流侧会产生较大

【作者简介】张磊 (1999–), 男, 中国山东潍坊人, 硕士, 从事高层结构抗风研究。

【通讯作者】闫亚光 (1978–), 男, 中国河北邯郸人, 博士, 副教授, 从事隧道空气动力学研究。

的压强梯度。此时迎流侧的高速气流流经塔间后，在下游形成明显的尾流分离和紊流增强的现象，导致背流侧压强减小并随机性强的特性<sup>[1]</sup>。二是双塔建筑高度及宽高比对双塔风压产生作用十分明显，随着建筑高度变大，近地面的边界层风速成指数变化，而大高度风速变大，因此在迎风侧的中上部位置会变大。此外，高大建筑顶部的涡旋结构也易于发展成强且周期性作用的涡脱落，进而增强脉动风压幅值。

### 3 超高层双塔建筑风压特性的主要表现

#### 3.1 风压分布空间差异显著

超高层双塔建筑实际风场中风压分布的室内空间不均匀主要受气流在复杂体型下发生分流、绕流、增速及尾流作用，使室内不同位置流场发生相互干扰产生流线的三维叠加，使压力分布不仅仅是一个简单的正压区和负压区，而是在三个维度上呈现不同的空间分层、分区方向，明显分层。在迎风侧，受大气边界层风速随高度增大影响，塔体上部受到动压较大，使塔体整体垂直压力梯度增大。流动在塔体迎风边缘绕流，边缘由于流体的分离使压力降低而出现局部负压，迎风中心位置依旧由于流动的整体性而呈现相对较高的静压，使横向压力分布进一步呈现不对称趋势。同时两塔对迎风侧气流的共同作用使一部分气流流过两塔体外侧，一部分气流流过塔间区域，流线受流场的强迫收缩作用而呈现增速，从而使塔体内部的迎风侧风压比外侧迎风侧风压要大。这种由于塔体几何相对位置不同带来的内侧和外侧不同的风压差则是双塔独有的气动特性<sup>[2]</sup>。

#### 3.2 体型系数呈方向敏感性

双塔超高层由于体型组合是非对称、塔与塔间的相对位置关系、绕流结构与来流方向角的关系是非线性的耦合，所以双塔超高层的体型系数方向敏感现象要比单塔明显得多。双塔体型系数随来流方向的变化规律与单塔有所不同。因为塔对来流的干扰作用因来流方向不同呈现不同程度的增强或削弱。双塔超高层体型系数曲线常常出现较大的起伏。当来流方向与其中单一座塔主轴平行时，两塔的迎风面上分别承受主要压力，绕流路径比较单一，流动分离点位置相对稳定，体型系数随来流方向的变化曲线则与一般高层建筑物的分布特征相似。当来流方向位于两塔对称轴之间，气流将会不同程度地穿越塔间空间，风道内气流加速产生“风口”，从而会改变体型系数的中心位置，甚至使体型系数局部出现峰值或谷值。这是双塔建筑体型系数风向敏感的主要标志，也是典型的风压方向敏感现象之一。

#### 3.3 跨塔区域风压脉动增强

塔间区域风压脉动增强是超高层双塔建筑风压特性中最明显、最复杂、工程影响最大的一种表现形式。塔间风压脉动增强的主要原因是由于双塔之间的气流约束和加速作用。塔间风道往往具有类似文丘里收缩的流动特征，来流进入该风道之后由于流场受限，流速得到提升，使得其速度梯度及湍流强度都进一步提高。风速的提高导致塔体所受压强

脉动幅值也得到放大，而湍流增强进一步使得风压时域序列的随机性提高，因此导致塔间风压峰值、均方根值及变化频率均明显大于塔体外侧或单塔建筑同高度区域。

## 4 超高层双塔建筑风压研究的重点内容

### 4.1 平均风压特性研究

塔楼的平均风压特性研究是超高层双塔风工程分析中最为原始也最为重要的一部分，它的目的在于真实地确定风荷载在塔楼外表面沿空间方向分布的稳定部分，用于结构的整体受力设计、风荷载布置计算和幕墙的安全验算。由于双塔建筑本身结构特殊的体型组合形式使得其平均风压分布不再是普通高层建筑的那种对称的或者有规律线性变化的形式，它是由来流方向、塔楼的相对位置、塔楼的高度剖面形式、体型外形变化等多个因素综合造成的。故对于其风压平均值的研究必须分别对平均风压在不同高度层面上的变化、不同相对风向角上的变化以及塔楼内外侧风压上的差异进行研究。高度方面，由于大气边界层风速剖面的指数规律性变化，使得塔楼迎风面上部的平均风压值远大于迎风面下部风压，下部风压主要受地面粗糙度、地形地物的干扰而表现为分布的不规律；横向上表现为塔楼边缘由于分离、流场旋转使得边缘处产生局部小负压，从而造成平均风压表现为塔楼边缘向塔楼中部呈现衰减的作用；塔间区域由于有风道作用，导致其平均风压存在局部突增，使得内侧迎风面和外侧迎风面的平均风压出现差别<sup>[3]</sup>。其次，平均风压随风向的变化规律有明显的方向特性，特别是当风向位于2个塔轴线之间的位置时，因气流进入塔间区的比例及分布状态的不同，风压分布可能发生较大的偏移或突变，必须借助风洞实验或数值模拟才能获得。研究平均风压不仅要知道压力分布的大趋势，还应该关注压力梯度的变化趋势，因为它与结构的总弯矩要求、结构的剪力分配型式和构件的局部承载力有关。因它的重要性，在平均风压的研究中应该使用风向分布的多风向试验、三维数值流场计算及分区的统计模型等多种方法结合进行研究，确保能够为后续安全性分析使用平均风压提供稳定的参数依据，图1为吉隆坡国油双峰塔。



图1 吉隆坡国油双峰塔