

适应西北地区工业城镇特征的工业建筑环境保障技术研究

王怡^{1,2*}, 吴松恒^{1,2}, 杨洋^{1,2}, 黄艳秋^{1,2}, 曹智翔^{1,2}, 周宇^{1,2}, 刘雅琳^{1,2}

(1. 西部绿色建筑国家重点实验室, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学建筑设备科学与工程学院, 西安 710055)

摘要: 我国城镇化发展进入新阶段, 探索工业城镇绿色发展的差异化路径, 对于破解地区经济发展与宜居环境之间的矛盾具有积极意义; 西北地区工业城镇中依赖矿产资源禀赋的高污染、高能耗型重工业企业众多, 加强高污染散发类工业建筑的空气环境治理, 旨在提高污染源头控制效率、改善岗位作业环境质量、降低工业建筑环境控制能耗。本文辨识了西北地区工业城镇的资源禀赋与产业特征, 明确了开展工业建筑环境治理的基本背景; 从大气环境质量、工业建筑室内空气质量控制两方面分析了西北地区工业城镇多尺度空气环境关键问题。在此基础上, 系统论述了适应西北地区工业城镇特征的工业建筑环境保障技术体系, 涵盖污染物源头捕集能效提升技术、室内空间环境高效通风气流组织新模式、污染物高效除尘净化技术、工业建筑节能综合技术。研究总结了所提创新技术成果的适用性及推广价值, 还可配套管理、监测层面的新举措, 积极运用智能化技术以增强应用成效。

关键词: 西北地区; 工业城镇; 工业建筑; 环境保障; 高污染散发; 减污降碳协同

中图分类号: TU83 **文献标识码:** A

Environmental Protection Technology of Industrial Buildings Adapted to the Industrial Towns in Northwest China

Wang Yi^{1,2*}, Wu Songheng^{1,2}, Yang Yang^{1,2}, Huang Yanqiu^{1,2}, Cao Zhixiang^{1,2}, Zhou Yu^{1,2}, Liu Yalin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an 710055, China; 2. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: China's urbanization has entered a new stage, and exploring differentiated paths for the green development of industrial towns is significant for solving the contradiction between regional economic development and livable environment. There are many heavy industry enterprises in the industrial towns in Northwest China; these enterprises have high pollution and high energy consumption and rely on mineral resources of these regions. Strengthening the air environment control of industrial buildings with high pollution emissions is expected to enhance the source-control efficiency of pollution, improve the quality of operation environment, and reduce energy consumption for environmental control of industrial buildings. This study identifies the resource endowment and

收稿日期: 2022-12-08; 修回日期: 2023-02-28

通讯作者: *王怡, 西部绿色建筑国家重点实验室教授, 研究方向为工业建筑环境与节能; E-mail: wangyi@xauat.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“西部‘一带一路’沿线城镇绿色更新发展战略研究”(2022-XZ-38); 国家自然科学基金项目(52078409)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

industrial characteristics of industrial towns in Northwest China and clarifies the basic background of conducting industrial building environmental governance. The key air environment problems in industrial towns in Northwest China are analyzed from the aspects of air environment quality and indoor air quality control in industrial buildings. On this basis, an environmental protection technology system that adapts to the industrial towns in Northwest China is proposed, which includes key technologies for improving the energy efficiency of pollutant source capture, new modes of air distribution with high-ventilation efficiency in the indoor environment, efficient dust removal and purification technologies of pollutants, and comprehensive technologies for energy conservation of industrial buildings. Furthermore, we summarize the applicability and promotion values of the abovementioned innovative technology achievements. New measures at the management and monitoring levels and intelligent technologies can be actively used to enhance the application effect of the mentioned technologies.

Keywords: Northwest China; industrial towns; industrial buildings; environmental protection; high-pollution emission; synergizing the reduction of pollution and carbon emissions

一、前言

从城市“生产、生活、生态”功能视角看，产业结构是影响城市空间格局、职能、人口构成等特征的重要因素。以工业生产为主要职能的工业城市、规模相对较小的工业型镇级行政区，受主导产业影响而表现出显著的差异化特征。我国城镇化发展进入新阶段，针对典型工业城镇特征，探索差异化的城镇绿色发展目标及技术路径，对于破解经济发展与宜居环境之间的矛盾、实现工业生产和美好生活共生具有重要价值。

西北地区地域辽阔、民族众多、文化多元、自然环境恶劣、生态环境脆弱、矿产资源丰富，区域内工业城镇发展主要依赖矿产资源禀赋；地方支柱产业多为采矿业、制造业等基础性行业，存在能源与资源利用率低，高污染、高能耗型重工业企业众多的实际情况。西北地区依托资源优势形成的基础性行业，是我国产业供应链的重要源头，也将继续保持区域内工业城镇主导产业的地位。在此背景下，提升工业城镇基础性行业发展质量、着力开展生态环境治理，成为西北地区经济社会可持续发展的迫切需求。

工业建筑室内外空气质量控制是工业城镇生态环境整体治理工作的重要环节之一。工业建筑用于保障制造业发展，在建筑围合空间中完成工业生产过程，不可避免地产生多类气载污染物，多数情况下污染散发量大、毒性强。西北地区的生产企业多属冶金、化工等基础性行业，相关环境问题尤为突出。改善工业建筑空气环境质量、降低污染治理能耗，是西北地区工业城镇绿色更新发展的重要任务。气载污染物对人体健康的危害效应得到了广泛关注，有效控制气载污染物是工程领域的重要研究

内容。关于区域大气污染，我国近年来在演变规律、作用机制、污染物控制等方面不断提高研究水平；大气污染减排要求不断提高，颗粒物的排放浓度已从 200 mg/m^3 ^[1]降低至 10 mg/m^3 ^[2]，以细颗粒物（ $\text{PM}_{2.5}$ ）为特征污染物的大气环境问题改善明显^[3]。工业建筑室内污染物控制研究则由来已久，以相关职业卫生标准体系为代表^[4-7]。

随着制造业的迅猛发展，我国工业建筑年竣工面积从2000年左右的 $2\times 10^8\text{ m}^2$ 增长到2011年的 $5\times 10^8\text{ m}^2$ ^[8]；工业门类数量繁多，相应生产过程中的气载污染物种类复杂，污染物排放总量增加而大气排放容量减少，实施工业建筑环境控制的技术难度进一步增大。与此相对的是，发达国家早已完成工业化进程，环境保护、节能降碳问题处于“分阶段出现、分阶段解决”的有利状态；制造业规模整体回落，污染散发量较高的制造业基础性行业规模不大，因而可供我国直接借鉴的工业建筑环境控制的技术成果和经验极少。客观来看，针对我国西北地区产业结构现状及污染物散发条件，研发高效、节能、低碳的工业建筑环境控制关键技术，唯有走自主创新之路。

本文围绕西北地区工业城镇的产业结构特征、空气环境污染问题，分析高污染散发类工业建筑环境保障的突出矛盾，针对性论述工业建筑减污降碳协同的环境保障关键技术体系。推广应用工业建筑环境保障的新方法、新技术，对于西北地区工业城镇绿色更新发展具有现实意义。

二、西北地区工业城镇特征分析

（一）西北地区矿产资源分布特征

西北地区多种矿产资源富集，组合配置良好。

例如，陕西省已查明的矿产资源储量潜在总价值约为40万亿元（占全国的1/3），储量居全国前10位的矿产有60种；甘肃省已查明的矿产储量，居全国第1位的矿产有11种，居前5位的有33种，居前10位的有61种；青海省已查明的矿产储量，居全国前10位的有60种；宁夏回族自治区已查明的矿产资源中，煤、石灰岩、石膏等为优势矿产，储量均居全国前10位；新疆维吾尔自治区已查明的矿产储量，居全国第1位的有12种，居第2位的有20种，居第3位的有10种。

西北地区工业城镇发展具有显著依托资源禀赋的特征。西北地区诸多城市的主导产业甚至城市自身都是建立在优势的矿产资源基础之上的，工业成为促进城镇形成与发展的主要因素之一，构成了城镇的主要经济基础。相应地，以资源优势为基础的行业，是工业城镇生产活动、人口就业的主体；“生产、生活、生态”空间具有交叉性和重叠性，难以准确界定，而经济发展与健康宜居、环境保护之间的不协调问题不能回避。

（二）西北地区工业城镇特征

城市职能指城市在一定地域内的经济社会发展中起到的作用和承担的分工，可从此角度分析西北地区工业城镇特征。采用纳尔逊统计分析方法^[9]，依据从业人口数据^[10]、国民经济行业分类标准^[11]，完成西北地区33个地级及以上城市（可获得完整数据）中各行业职能强度的统计分析。结果显示，以采矿业为主导的城市有4个（铜川、延安、榆林、克拉玛依），以传统制造业为主导的城市有3个（宝鸡、嘉峪关、金昌），以电力、热力、燃气及水生产和供应业为主导的城市有7个（银川、石嘴山、吴忠、嘉峪关、白银、乌鲁木齐、哈密）。考虑到第二产业中除建筑业之外，采矿业，制造业，电力、热力、燃气及水生产和供应业均属工业领域范畴，故本文将上述城市统称为工业城市。

以甘肃省嘉峪关市、新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市两个典型城市为例，开展进一步的产业特征分析。①嘉峪关市是因“酒泉钢铁公司”（西北地区建设最早、规模最大、黑色与有色冶金并举的多元化生产基地）建设而逐步发展起来的工业城市，素有戈壁“钢城”之称；工业从业人口占城市总就业人口约57%，工业贡献了国内生产总值（GDP）总量的

60%以上^[10,12]。②乌鲁木齐市被称为“煤海上的城市”，市辖区内煤炭储量超过 1×10^{10} t，依托资源优势的大型企业应运而生，成为城市产业的重要组成部分。例如，华电新疆红雁池发电公司位于乌鲁木齐市天山区，是新疆维吾尔自治区单机容量和总装机容量最大的主力发电厂；宝钢集团新疆八一钢铁有限公司位于乌鲁木齐市头屯河区，现有职工2万余人，周边区域常住人口达到8万人。

除了大型城市，西北地区还有大量的工业小镇，在产业构成方面占据着一定地位。例如，榆林市下辖的神木市锦界镇是陕西省第二大经济开发区，已形成煤电、煤焦、化工、氯碱、载能、建材六大产业区，2021年镇域生产总值为655.6亿元^[13]；神木市大柳塔镇地处神府东胜煤田中心，是陕西省能源矿产资源型特色镇、陕西省首批镇级小城市综合改革试验区。

对于西北地区的工业城市和工业小镇，除采矿业外，钢铁冶金、有色冶金、化工、建材等制造业在产业构成中占据重要地位，规模以上工业企业中的重工业企业数量占比普遍较高（见图1）^[14-18]。

三、西北地区工业城镇多尺度空气环境关键问题分析

（一）西北地区大气环境质量分析

西北地区工业城镇的采矿业、传统制造业等基

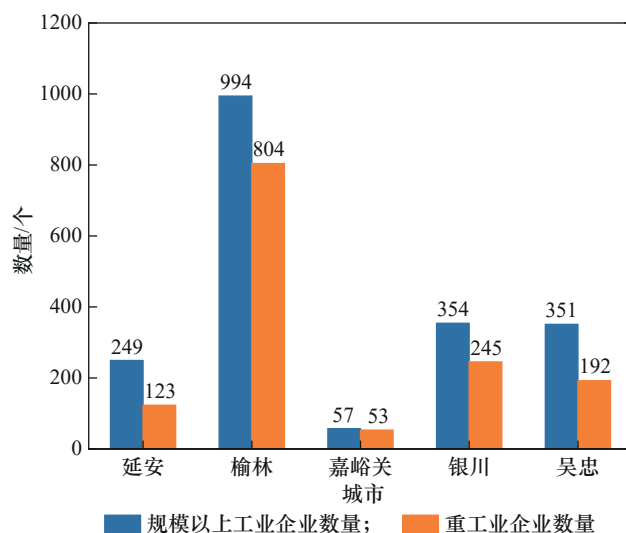


图1 西北地区代表性工业城市规模以上工业企业及重工业企业数量

基础性行业是地方支柱产业、国家产业供应链的重要源头，也是污染物排放的主要贡献者，给大气环境保护带来较大压力。西北地区相关城市的GDP总量排名居于全国中下游水平^[10,19]，但正好与空气质量优良天数的全国排名呈相反趋势；GDP总量排名相对靠前的陕西和新疆，多个城市的空气质量优良天数占比低于国内82%的平均水平（见图2）^[20]。

受大气环流、局地环流、下垫面等因素的共同影响，我国不同地区的大气环境容量、扩散条件具有显著的差异性。西北地区地貌复杂，许多城市坐落于山谷、川道之中，“两山夹一川”类型的山谷城市数量众多。山谷城市的静风逆温天气发生频率高，容易出现逆温层，存在大气环境容量、扩散条件受限等普遍性问题，使得城市区域热量及污染物的扩散能力受到明显制约^[21,22]。例如，兰州、西安等大型山谷城市以及数量众多的中小型山谷城镇，不同尺度的地形地貌直接影响大气环境容量和扩散条件，大气环境质量防控任务重、难度大。

人为改变大气环流、局地环流、下垫面条件异常困难，因而大气污染防治途径主要有两类：控制排放源并以减排、限排等应急措施来实现短期效应，优化产业结构、能源结构、重污染工业布局等以实现长期效应。① 排放源分为自然源、人为源，大气污染防治对象属于人为源。近年来，有关大气环境质量的要求越来越高，对工业排放控制提出了新要求，相应标准和规范的限值进一步加严。② 一些工业城市积极采取产业结构转型升级、产业链深化或延长等举措，以破解经济发展面临的困境。例如，合理延长铝产业链，由单纯的高污染、高能耗电解铝产业拓展至铝板带、线材等细分产业及精深

加工领域。

也要注意，相关产业的转型升级可能带来新的污染物控制问题。相较于以烟尘为主要污染物、尘肺病为主要职业病的基础性行业，产业转型升级会导致污染物类型、健康危害的多元化。例如，铝业压延轧制工艺会产生油雾、易挥发性有机物（VOCs）的复合污染，多相耦合作用机制更复杂，可吸入颗粒物的比例更高，污染物的毒性作用更强^[23,24]。此外，在从资源优势为基础的产业发展到深加工产业的过程中，行业类型更为多元。例如，在金属冶炼、压延到金属制品业的产业链条中，对金属进行深加工的制品业类型繁多，企业数量多、规模相对小、从业人员数量多；中小企业对环境问题的重视程度、投入力度相对薄弱，排放源管理与控制的难度进一步加大。

（二）工业建筑室内空气质量控制面临的突出矛盾

在西北地区工业城镇，为了应对大气污染控制要求，越来越多的行业将生产空间（厂房）进行密闭化，因而传统的热压通风、风压通风等自然通风运用受到严格限制；虽然可在一定程度上减少污染物向大气的直接排放，但衍生了工业建筑室内空气质量控制方面的新问题。很多露天、半露天的作业转为工业建筑室内完成，用于加强气载污染物的可控性、改善生产作业的基本条件，因而高污染散发类工业建筑的数量及规模持续增加。在严格控制大气污染物减排的背景下，高污染散发类工业建筑环境成为整体治理链条中的短板环节。

1. 污染源头控制效率亟待提高

高污染散发类工业建筑中的生产过程常年散发

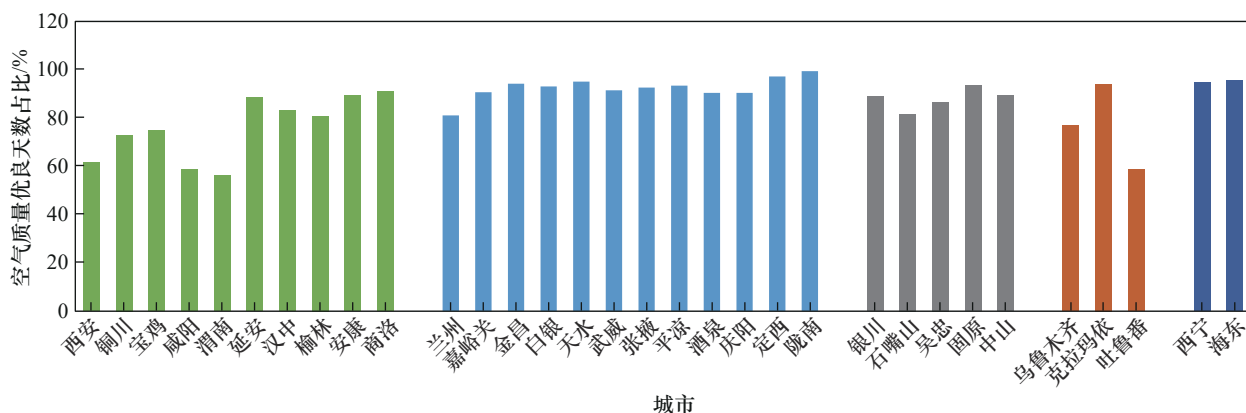


图2 西北地区33个地级及以上城市的空气质量优良天数占比（2019年）

高浓度的烟尘、雾、有害气体。传统的污染物捕集技术能效不足、污染物逃逸量大，导致很多行业难以实现室内空气环境质量的稳定达标。通过建筑门窗形成的污染物无组织逃逸，更是难以实施有效监测并严格管理，依然是大气污染的重要源头。工厂限产和停产仍是应对雾霾天气不得已而为之的选择，此类管理性举措干扰了西北地区工业城镇的经济社会发展质量。

2. 岗位作业环境质量需要改进

工业建筑室内工作场所的接触限值远高于民用建筑水平，相关标准和规范修订进展缓慢。近年来，我国新发职业病及职业性尘肺病的病例数虽已逐步下降，但职业暴露的整体现状仍不容乐观。在采矿业，制造业，电力、热力、燃气及水的生产和供应业三大行业，存在一种及以上职业病危害因素的工业企业约占总数的93%，存在粉尘危害的工业企业约占总数的75%；在被调查企业的从业人员中，接触职业病危害因素的约占39%（其中接触粉尘的劳动者占比约为47%）^[25]。工业建筑的空间环境特别是岗位局部环境的保障技术水平亟待提升。

3. 工业建筑环境控制的成本和能耗需要降低

实施大气超低排放标准往往带来环境治理系统能耗的大幅提升，相应成本极高。减污与降碳既有共性又存在矛盾，“超低排放”可能带来更多的能耗和碳排放。在以煤电为主的能源结构体系下，环境控制能耗的增大会产生污染排放转移的后果，这是造成偷排现象的原因之一。减污降碳协同增效是必然选择，降低工业建筑环境控制的能耗水平也是亟需。

四、适应西北地区工业城镇特征的工业建筑环境保障关键技术

在西北地区工业城镇，处于产业链上游的企业利润通常不高，而高污染散发类工业建筑应用较多，对高效节能、经济适用的环境控制技术需求迫切；这是相对于全国其他地区存在的显著差异性。研发高效的污染物控制技术，用于提高工业建筑环境质量，进而保障从业人员职业健康^[26]、降低环境控制能耗及碳排放量，是西北地区工业城镇开展减污降碳协同治理的重要路径。

（一）污染物源头捕集能效提升技术

对于高污染散发类工业建筑，污染物的源头治

理是首要任务。传统的污染源捕集技术多针对典型污染物散发的基本特性，依据经验、半经验的方法建立；然而面对实践中复杂多变的污染散发特性以及工程受限条件，污染物的捕集效果可能存在显著偏差。技术人员依赖经验进行方案改进，倾向于盲目增大系统设备容量，导致初始投资、运行成本大幅增加，运行效果却难言理想。因此，在复杂工程条件下提升污染物的捕集效率，是实践中普遍存在的迫切需求。

提高工程特征条件下的污染物治理能力，首先需要明晰复杂多变的污染物散发及迁移特征；进而依据工程特征条件，完善捕集增效机制，形成高性能技术及精细化设计方法。引入快速发展的实验测试、数值模拟等技术，深入研究三类代表性污染物（高温烟尘、油雾漆雾、有害气体）的散发及迁移特性。从精确匹配污染物迁移、有效抑制逃逸作用力的基本原理出发，提出显著提高捕集效率、有效降低运行能耗的系列高效捕集技术^[27,28]。

对于高温烟尘这一工业建筑中最普遍的污染物类型，提出的高效捕集技术在多个工业建筑中获得应用，污染物源头治理的各项关键指标改善显著。例如，在甘肃省某钢铁企业的不锈钢厂房改造项目中，准确匹配强热压作用的烟尘迁移规律、合理选用最佳能效比控制方法（见图3），形成的高效低成本技术解决了企业发展难题，使得室内环境浓度大幅下降（第三方检测结果表明，浓度峰值仅为职业接触标准限值的20%）。有关钢铁企业热轧工艺的工程试验表明，喷雾通风技术可有效削弱强热压作用引起的粉尘逃逸现象（见图4），采用喷雾通风技术后环境浓度平均值仅为标准限值的10%，运行能耗降低20%~40%。

（二）室内空间环境高效通风气流组织新模式

在积极发展制造业、大气环境问题趋于严峻的背景下，工业建筑呈现大型化、密闭化的建设趋势，也就导致工业建筑自然通风应用受限。传统环境控制技术的混合稀释机制是高大空间中污染物整体去除效率偏低的根本原因，需要发展新的气流组织模式以提高机械通风能效（见图5）。

研究提出“分而治之”的环境分区控制新思路，基于弱化传质理论形成污染物靶向输运或新风有效屏蔽的梯级环境营造机制，用于减少污染物扩

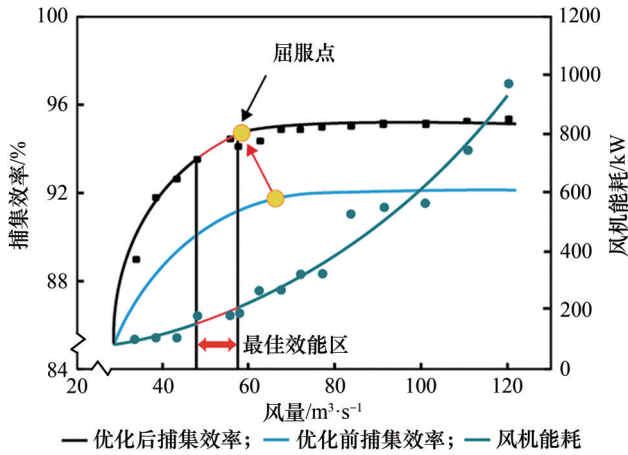


图3 最佳能效比的选取示意

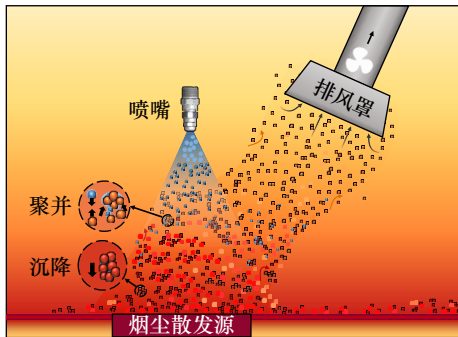


图4 针对热轧工艺的喷雾通风技术

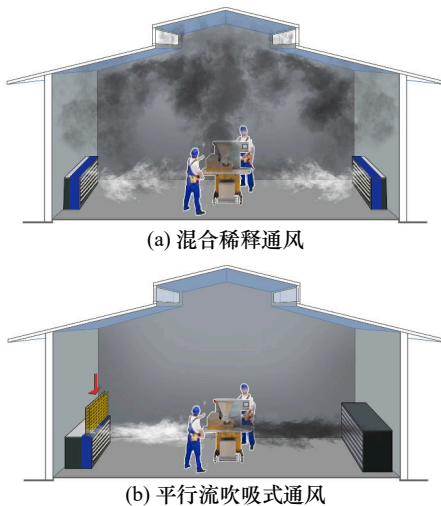


图5 工业建筑室内环境的两类通风形式

散范围、改善岗位微环境空气质量、实现高大空间环境的分区控制。揭示了涡流流动特征、等速同向的平行流流动特征，阐释了定向弱化传质的气流组织机制，明确了高大空间环境品质提升的技术途径。

针对性研发了两类气流组织新模式（涡流流动、平行流流动）及应用装置。① 利用涡旋通风构建了人工形成的类龙卷风流场（见图6），通过强负压梯度、高轴心速度的涡流流动实现污染物的长距离靶向输运；污染物在室内的滞留时间降低90%以上^[29]，显著提升了室内空气质量并降低了通风系统能耗。② 利用短流程低阻力整流装置来提升送风气流速度的均匀性和同向性（见图7），据此构建了长距离输送新风的平行流岗位送风、大幅降低能耗的平行流吹吸通风等技术。采用平行流送风技术使有害物工作区扩散范围减小了75%，有效提升了岗位微环境空气质量，显著降低了高大空间环境控制的能耗需求^[30]。

（三）污染物高效除尘净化技术

大气中的粉尘细颗粒污染问题逐步受到关注，对粉尘颗粒脱除技术提出了更高要求。袋式除尘器在细颗粒物的高效脱除方面具有显著优势，成为粉尘颗粒净化的主要手段。袋式除尘器多为分箱结构，多处局部构件导致气流阻力大、均匀性差等问题，相应性能提升主要围绕滤料性能改进、系统均流降阻展开。采用强基膜滤料技术，稳定滤袋工作周期中滤料的过滤特性，增加滤袋使用寿命^[31]。针对钢铁行业生产过程中的金属细颗粒，研发了磁性

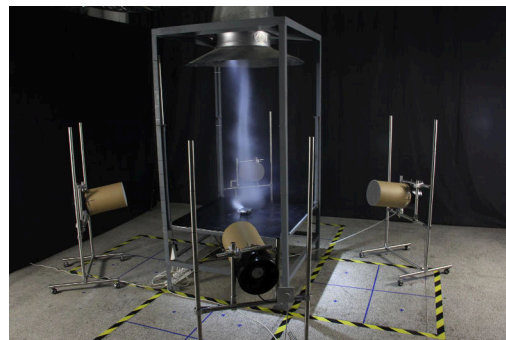


图6 涡旋通风



图7 平行流通风

纤维滤料以改善含铁基细颗粒的脱除效果^[32,33]。为降低袋式除尘器分箱结构的阻力，基于分流歧管的气流分配特征提出了气流均配装置设计方法^[34]，在各箱体内设置导流构件以进一步优化气流分布并降低阻力^[35]。单箱结构的直通式袋式除尘器方案有助于克服分箱结构的高阻力问题，采用多种均流/导流构件来优化内部气流的均匀性^[36]。

工业生产中产生的油雾颗粒具有小粒径占比高、黏性高，容易在净化设备上沉积等特点，高效油雾静电分离技术在实际工程中应用广泛。采取与生产工艺相适配的双区静电油雾分离技术，合理改进静电除油模块的结构形式，有效提升净化效率^[37]。相较油雾静电分离，油雾过滤分离具有更高的脱除效率，但是过滤分离过程阻力较大。利用油雾颗粒在非均匀超湿润性过滤材料之间的定向输运特性，可有效排除滤材表面的沉积油雾，降低过滤设备运行压降^[38,39]。

VOCs 的高效净化一直是有害气体净化研究领域的难题。发展了系列有害气体常温冷凝回收技术^[40,41]，借助活性炭吸附床辅助提纯 VOCs，提高了系统冷凝温度、降低了系统运行能耗；工程应用中的处理效率超过 98%，溶剂回收率超过 90%。对活性炭烷基化改性，可减少活性炭表面的亲水官能团数量，显著增强活性炭对高湿度废气中 VOCs 的吸附能力^[42]。发展净化和回收兼具的技术，充分挖掘了高散发强度下 VOCs 废气有效分离、“变废为宝”的潜力。

（四）工业建筑节能综合技术

我国行业种类众多，相应的工业建筑形式多样，不同行业的能耗与生产工艺特征也密切相关。目前业界对建筑节能问题的关注度集中于民用建筑，而在工业建筑方面明显不足，导致工业建筑方面较多沿用或直接参考民用建筑方面的节能成果及标准规范；二者的基本原理、技术路线都有显著的差异性，简单沿用往往不能实现工业建筑的节能目标^[43]。

针对上述问题，研究提出了以工业建筑源项特征、环境控制方式为依据的“两分法”节能设计分类准则（包括侧重围护结构保温、供暖空调节能设计的一类工业建筑，侧重通风除尘净化系统节能的二类工业建筑），构建了立足工业建筑能耗特征的

节能设计基本框架。进一步针对高污染、强余热工业建筑的环境特征，论证提出了节能设计方面的指标体系，界定了工业建筑与民用建筑节能设计的本质区别，形成了《工业建筑节能设计统一标准》（GB51245—2017）^[43]；还提出了减少能耗、提高余热利用率相结合的配套技术措施。

西北地区工业城镇的工业建筑低品位余热资源丰富，实现高效回收利用对于建筑节能具有价值；但广泛存在的 80℃ 以下低品位余热利用难度较大，有效利用措施长期缺失。西北地区分为气候条件严寒区、寒冷区，冬季采暖需求量大，部分地区有采暖、空调的双重需求；低品位余热用于采暖系统简便易行，宜“能用尽用”，亦可用作驱动夏季空调冷源。例如，提出了一种低品位余热驱动的工业建筑降温除湿空调系统^[44]，采用串联方式使热水先后驱动冷水机组、溶液除湿新风机组，由多元溶液工质降低驱动热源温度；在满足降温除湿需求的前提下，实现了 80℃ 以下低品位余热的梯级转化、深度利用。

五、工业建筑环境保障技术的思考及展望

我国是工业大国、制造业大国，工业城镇数量众多，绿色更新发展是推进新型城镇化建设的重要任务。高散发污染物治理新技术，在西北地区乃至全国其他以基础性行业为主导的工业城镇中均有待深化推广应用。工业建筑减污降碳协同的技术原理及共性技术方法，对于以先进制造业为主导的工业城镇亦具有应用借鉴价值；但需结合不同行业特征，持续推进适宜性专门化技术研发，契合工程应用背景多样化的基本特征。

我国工业建筑环境保障还面临着管理、监测层面的问题以及相应的技术瓶颈。工业建筑环境质量提升的目标与企业经济效益并不直接挂钩（行为人与受益人分离），相较于大气质量监测实施难度更大；完善评价方法、发展技术能力应置于同等位置，需要科学的职业健康环境评价及约束制度体系。不容忽视的是，在有关工业建筑特别是高污染散发类工业建筑的环境评价方面，改善环境空气质量的“健康增益”机制既不清晰，也鲜有探讨。未来可以医工交叉的形式开展污染暴露与健康效应研究，尽快形成工业建筑室内健康空气环境评价方法。

在我国积极推动制造业强国的发展过程中,智能控制技术不断深化应用,有利于全面革新工业建筑环境保障技术。结合智能化生产带来的智能化环境控制新需求,完成由集中式控制向分散增强型控制的模式转变,融合智能识别、数据优化、多源信息等新兴技术,精准制定环境控制系统的动态运行策略,最大限度提升环境保障系统的能效,进一步增强工业建筑减污降碳协同的整体水平。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: December 8, 2022; **Revised date:** February 28, 2023

Corresponding author: Wang Yi is a professor from the State Key Laboratory of Green Building in Western China. His major research fields include industrial building environment and energy saving. E-mail: wangyi@xauat.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on Green Renewal Development Strategy of Towns along the Western ‘Belt and Road’” (2022-XZ-38); National Natural Science Foundation of China (52078409)

参考文献

- [1] 全国环境保护会议筹备小组办公室. 工业“三废”排放试行标准(GBJ4—73) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1973.
National Environmental Protection Conference Preparatory Group Office. Trial standard of industrial “three wastes” emission(GBJ4—73) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1973.
- [2] 关于推进实施钢铁行业超低排放的意见 [EB/OL]. (2019-04-22) [2022-11-15]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-10/10/content_5438149.htm.
Opinions on promoting the implementation of ultra-low emissions in the iron and steel industry [EB/OL]. (2019-04-22) [2022-11-15]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-10/10/content_5438149.htm.
- [3] 吴志军, 王志立, 张强, 等. 气候协同的区域空气质量精细化调控战略研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(6): 164–172.
Wu Z J, Wang Z L, Zhang Q, et al. Strategical research on refined regulations for regional air quality with climate synergy [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 164–172.
- [4] 东北人民政府卫生部. 工厂设计卫生条例(FOCT1324—47) [S]. 沈阳: 东北人民政府卫生部, 1950.
Ministry of Health of the Northeast People’s Government. Sanitary regulations for factory design(FOCT1324—47) [S]. Shenyang: Ministry of Health of the Northeast People’s Government, 1950.
- [5] 中华人民共和国卫生部. 工作场所有害因素职业接触限值(GBZ 2—2002) [S]. 北京: 中华人民共和国卫生部, 2002.
Ministry of Health of the People’s Republic of China. Occupational exposure limit for hazardous agents in the workplace (GBZ 2—2002) [S]. Beijing: Ministry of Health of the People’s Republic of China, 2002.
- [6] 中华人民共和国卫生部. 工作场所有害因素职业接触限值第 1 部分: 化学有害因素(GBZ 2.1—2007) [S]. 北京: 中华人民共和国卫生部, 2007.
Ministry of Health of the People’s Republic of China. Occupational exposure limits for hazardous agents in the workplace part 1: Chemical hazardous agents(GBZ 2.1—2007) [S]. Beijing: Ministry of Health of the People’s Republic of China, 2007.
- [7] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 工作场所有害因素职业接触限值第 1 部分: 化学有害因素(GBZ 2.1—2019) [S]. 北京: 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 2020.
National Health Commission of the People’s Republic of China. Occupational exposure limits for hazardous agents in the workplace part 1: Chemical hazardous agents(GBZ 2.1—2019) [S]. Beijing: National Health Commission of the People’s Republic of China, 2020.
- [8] 王怡. 工业建筑节能 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
Wang Y. Energy efficiency of industrial buildings [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [9] 李强, 王成新. 中国地级以上城市的职能结构研究 [J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2014, 29(1): 93–97.
Li Q, Wang C X. Study on the urban function of the prefecture cities in China [J]. Journal of Shandong Normal University(Natural Science), 2014, 29(1): 93–97.
- [10] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴 2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
Department of Urban Socio-Economic Survey of National Bureau of Statistics. China city statistical yearbook 2019 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 国民经济行业分类(GB/T 4754—2017) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China, Standardization Administration. Industrial classification for national economic activities(GB/T 4754—2017) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [12] 甘肃发展年鉴编委会. 甘肃发展年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2010.
Gansu Development Yearbook Editorial Committee. Gansu development yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2010.
- [13] 瞿雲, 温媃, 杨学理, 等. 神木市锦界镇: 全力打造宜居宜业小城镇 [EB/OL]. (2022-11-11)[2022-11-15]. http://ydy1.china.com.cn/2022-11/11/content_78514520.htm.
Zi Y, Wen P, Yang X L, et al. Jinjie Town of Shenmu City: To build a livable and workable small town [EB/OL]. (2022-11-11) [2022-11-15]. http://ydy1.china.com.cn/2022-11/11/content_78514520.htm.
- [14] 延安市统计局, 国家统计局延安调查队. 延安统计年鉴(2019) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
Yan’an Bureau of Statistics, Yan’an Survey Team of National Bureau of Statistics. Yan’an statistical yearbook 2019 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [15] 榆林市统计局, 国家统计局榆林调查队. 榆林统计年鉴 2020 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.

- Yulin Bureau of Statistics, Yulin Survey Team of National Bureau of Statistics. Yulin statistical yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [16] 嘉峪关市统计局, 国家统计局嘉峪关调查队. 嘉峪关统计年鉴 2020 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- Jiayuguan Bureau of Statistics, Jiayuguan Survey Team of National Bureau of Statistics. Jiayuguan statistical yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [17] 银川市统计局, 国家统计局银川调查队. 银川统计年鉴 2020 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- Yinchuan Bureau of Statistics, Yinchuan Survey Team of National Bureau of Statistics. Yinchuan statistical yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [18] 吴忠市统计局, 国家统计局吴忠调查队. 吴忠统计年鉴 2020 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- Wuzhong Bureau of Statistics, Wuzhong Survey Team of National Bureau of Statistics. Wuzhong statistical yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [19] 国家统计局, 生态环境部. 中国环境统计年鉴 2020 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- National Bureau of Statistics, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. China statistics yearbook on environment 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [20] 中华人民共和国生态环境部: 2019年空气质量平均优良天数占比 82.0% [EB/OL]. (2020-05-07)[2022-11-15]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/spxw/202005/t20200507_778072.shtml.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China: The average number of days with good air quality in 2019 accounted for 82.0% [EB/OL]. (2020-05-07)[2022-11-15]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/spxw/202005/t20200507_778072.shtml.
- [21] Wu S H, Wang Y, Chen C W, et al. Valley city ventilation under the calm and stable weather conditions: A review [J]. Building and Environment, 2021, 194: 107668.
- [22] Wu S H, Chen C W, Wang Y, et al. Differential effects of valley city morphology on mesoscale flow field characteristics [J]. Building and Environment, 2021, 205: 108283.
- [23] Chen H L, Wu Y C, Chen M R, et al. Risk assessment of PAH exposure involving metal working fluids in fastener manufacturing industries [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2016, 16(12): 3212-3221.
- [24] Iwasaki M, Hirai K, Fukumori K, et al. Characterization of submicron oil mist particles generated by metal machining processes [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2020, 20(6): 1469-1479.
- [25] 中华人民共和国国家卫生健康委员会职业健康司. 全国职业病危害现状统计调查概况 [EB/OL]. (2022-05-09)[2022-11-15]. <http://www.nhc.gov.cn/zjyks/s3586s/202205/e391a7a3bdce44259a51d2782b9b2c60.shtml>.
- Department of Occupational Health, National Health Commission of the People's Republic of China. Overview of statistical investigation on occupational diseases hazards in China [EB/OL]. (2022-05-09)[2022-11-15]. <http://www.nhc.gov.cn/zjyks/s3586s/202205/e391a7a3bdce44259a51d2782b9b2c60.shtml>.
- [26] 王怡, 杨洋, 曹智翔. 工业建筑通风技术综述与展望 [J]. 暖通空调, 2022, 52(5): 47-53.
- Wang Y, Yang Y, Cao Z X. Research process and perspective of ventilation technology in industrial buildings [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2022, 52(5): 47-53.
- [27] 郭胜男. 喷雾-排风作用下高温含尘气流的流场特性研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学(硕士学位论文), 2021.
- Guo S. Study on the flow field characteristics of high temperature dusty airflow under the action of spray exhaust [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology(Master's thesis), 2021.
- [28] Liu F, Zhang T F, Zhang H Q, et al. Removing painting-generated VOCs in a commercial airplane hangar with multiple portable exhaust hoods [J]. Building and Environment, 2021, 196: 107797.
- [29] Cao Z X, Zhang C, Zhai C, et al. Evaluation of a novel curved vortex exhaust system for pollutant removal [J]. Building and Environment, 2021, 200: 107931.
- [30] Wang Y, Quan M F, Zhou Y. Effect of velocity non-uniformity of supply air on the mixing characteristics of push-pull ventilation systems [J]. Energy, 2019, 187: 115962.
- [31] 徐洲华. 脉冲喷吹次数对覆膜滤料膜结构和过滤性能影响的试验研究 [D]. 上海: 东华大学(硕士学位论文), 2020.
- Xu Z H. Experimental study on influence of pulse injection times on membrane structure and filtration performance of membrane filter material [D]. Shanghai: Donghua University(Master's thesis), 2020.
- [32] Zhou F S, Diao Y F, Wang R G, et al. Experimental study on PM_{2.5} removal by magnetic polyimide loaded with cobalt ferrate [J]. Energy and Built Environment, 2020, 1(4): 404-409.
- [33] 杨炳文, 刁永发, 杨学宾, 等. 耐高温磁性玄武岩滤料的制备及捕集微细颗粒物研究 [J]. 功能材料, 2021, 52(8): 8144-8150.
- Yang B W, Diao Y F, Yang X B, et al. Preparation and study on trapping fine particles of high temperature resistant magnetic filter material [J]. Journal of Functional Materials, 2021, 52(8): 8144-8150.
- [34] 杨宏刚. 宏观尺度流体分配歧管的流场特性及结构优化研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学(博士学位论文), 2018.
- Yang H G. Research on flow field characteristics and structure optimization of macro-scale fluid distribution manifolds [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology(Doctoral dissertation), 2018.
- [35] 任美桃. 下进风袋式除尘器内部流场模拟与结构优化 [D]. 西安: 西安建筑科技大学(硕士学位论文), 2018.
- Ren M. Numerical simulation and structure optimization of under inlet bag filters [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology(Master's thesis), 2018.
- [36] 姚群, 陈隆枢, 韦鸣瑞, 等. 直通导流式袋式除尘器: CN200410060736.4 [P]. 2005-03-23[2022-11-15].
- Yao Q, Chen L S, Wei M R, et al. Straight-through flow bag filter: CN200410060736.4 [P]. 2005-03-23[2022-11-15].
- [37] 龙正伟, 李姗姗, 孙静楠. 一种高效双区静电式油雾净化器: CN201921031937.X [P]. 2020-09-11[2022-11-15].
- Long Z W, Li S S, Sun J N. A High-efficiency dual-zone electrostatic oil mist purifier: CN201921031937.X [P]. 2020-09-11[2022-11-15].
- [38] Wei X, Zhou H, Chen F, et al. High-efficiency low-resistance oil-mist coalescence filtration using fibrous filters with thickness-

- direction asymmetric wettability [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(1): 1806302.
- [39] Wei X , Liu Y F, Zhou H, et al. Substantial improvement of oil aerosol filtration performance using in-plane asymmetric wettability [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(25): 28852–28860.
- [40] 高军, 张承全, 曹昌盛, 等. 一种利用活性炭静活性的 VOC 常温冷凝处理系统: CN211706335U [P]. 2020-10-20[2022-11-15].
Gao J, Zhang C Q, Cao C S, et al. A VOC ambient temperature condensation treatment system using activated carbon static activity: CN211706335U [P]. 2020-10-20[2022-11-15].
- [41] 高军, 张承全. 一种常温冷凝辅助提纯的 VOCs 处理系统: CN210171129U [P]. 2020-03-24[2022-11-15].
Gao J, Zhang C Q. An ambient temperature condensation-assisted purification of VOCs treatment system: CN210171129U [P]. 2020-03-24[2022-11-15].
- [42] Li J J, Ma X W, Wu H, et al. Adsorption of low-concentration VOCs on modified activated carbons in a humid atmosphere [J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(6): 5090–5100.
- [43] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 工业建筑节能设计统一标准(GB51245—2017) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Unified standard for energy efficiency design of industrial buildings(GB51245—2017) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [44] 周苇杭, 殷勇高, 程小松, 等. 低位热驱动的工业建筑除湿降温空调系统应用研究 [J]. *制冷学报*, 2022, 43(5): 10–15.
Zhou W H, Yin Y G, Cheng X S, et al. Application of industrial building dehumidification and cooling air-conditioning system driven by low-grade heat [J]. *Journal of Refrigeration*, 2022, 43(5): 10–15.