

文章编号: 1671-6612 (2024) 05-692-13

新风系统在我国超低能耗建筑中的应用及思考

吴傲立¹ 王彬彬¹ 岳仁亮²

(1. 江苏中科睿赛污染控制工程有限公司 盐城 224000;

2. 中国科学院过程工程研究所多相复杂系统国家重点实验室 北京 100190)

【摘要】 建筑气密性的不断提高, 导致依靠室外渗透解决室内新风的传统模式不再适用, 也带来了室内空气质量降低的问题, 机械式新风系统成为超低能耗建筑的必要手段。同时新风系统的使用带入了新的能耗负荷, 其中新风热回收技术的应用可以有效降低新风负荷, 因此热交换效率指标成为了超低能耗建筑新风系统的重要能耗评价指标。通过检索全国各地超低能耗建筑相关标准, 揭示了我国超低能耗建筑标准因出台区域、建筑属性、标准类别等差异导致了该类建筑中新风系统产品技术要求的差异化, 并重点针对热交换效率指标对比了各地建筑标准、协会产品标准、国家产品标准的差异, 总结了标准差异化导致产品差异化、验收差异化等问题, 探讨了新风系统在超低能耗建筑中应用的问题及机遇。

【关键词】 超低能耗建筑; 新风系统; 标准; 热交换效率; 差异

中图分类号 TP242 文献标志码 A

Application and Thoughts of Fresh Air System in Ultra-Low Energy Buildings in China

Wu Aoli¹ Wang Binbin¹ Yue Renliang²

(1. Jiangsu CASRS Pollution Control Engineering Co., Yancheng, 224000;

2. State Key Laboratory of Multi-phase Complex Systems, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190)

【Abstract】 With the continuous improvement of building air tightness, the traditional mode of relying on outdoor infiltration to solve indoor fresh air is no longer applicable, and also brings about a decrease in indoor air quality, mechanical fresh air systems have become a necessary means for ultra-low energy buildings. At the same time, the use of fresh air systems has brought new energy consumption load, and the application of fresh air heat exchange technology can effectively reduce the load of fresh air, therefore, the heat exchange efficiency has become an important energy consumption evaluation index for Fresh Air System of ultra-low energy buildings. The article, by searching for relevant standards for Ultra-Low Energy Building in China, reveals the differences in technical requirements for fresh air system products due to differences in regions, building attributes, and standard categories. It focuses on comparing the differences in heat exchange efficiency indicators between building standards, association product standards, and national product standards, summarizing the issues of product differentiation and acceptance differentiation caused by standard differentiation, and exploring the problems and opportunities of applying Fresh Air System in ultra-low energy buildings.

【Keywords】 Ultra-Low energy building; Fresh air system; Standards; Heat exchange efficiency; Differences

基金项目: 国家重点研发计划“科技助力经济2020”重点专项, 防疫空气净化系统研发及产业化 (SQ2020YFF0425164)

作者(通讯作者)简介: 吴傲立(1990-), 女, 硕士, 高级工程师, E-mail: jszkrswal@126.com

收稿日期: 2024-01-12

0 引言

双碳背景下,大力发展节能低碳建筑,持续提高新建建筑节能标准,已成为建筑领域必然的发展趋势。提高建筑气密性是降低能耗的重要途径之一,伴随建筑气密性的不断提升,室内空气品质如何得以保证成为了关注点,新风系统的引入可有效解决室内空气品质需求,同时也带来了能耗负荷,新风热回收技术可以有效降低新风负荷,因此热交换效率成为了超低能耗建筑中新风系统的重要能耗评价指标。本文对超低能耗建筑的定义、内涵,标准发展情况,新风系统在超低能耗建筑中的应用等进行分析研究,旨在推动超低能耗建筑中新风系统的实践与发展。

1 超低能耗建筑定义、内涵

超低能耗建筑的内涵,是在比较中产生的,即超低能耗建筑的建筑能耗远低于常规建筑,但又高于近零能耗和零能耗建筑。近零能耗建筑的概念最早来源于1976年丹麦Esbensen教授利用太阳能进行节能改造试验后提出的“零能耗住宅”,之后在发达国家中形成相似的建筑定义,如德国的“被动房”(Passive House)、瑞士的“近零能耗房”(Minergie)与意大利的“气候房”(Climate House)等^[1]。2010年《建筑能效指令》(Energy Performance of Building Directive recast, EPBD2010)要求欧盟各成员国确保在2018年12月31日后,所有政府拥有或使用的建筑应达到“超低能耗建筑”(Nearly Zero-energy Buildings),在2020年12月31日前,所有新建建筑达到“超低能耗建筑”。此后各国、各领域专家将超低能耗建筑进一步定义。

国家标准《近零能耗建筑技术标准》GB/T 51350-2019给出了超低能耗建筑、近零能耗建筑和零能耗建筑的定义。

近零能耗建筑(Nearly zero energy building),适应气候特征和场地条件,通过被动式建筑设计最大程度降低建筑供暖、空调、照明需求,通过主动技术措施最大程度提高能源设备与系统效率,充分利用可再生能源,以最少的能源消耗提供舒适室内环境,且其室内环境参数和能效指标符合本标准规定的建筑,其建筑能耗水平应较国家标准《公共建筑节能设计标准》GB 50189-2015和行业标准《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》JGJ

26-2010、《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》JGJ 134-2016、《夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准》JGJ 75-2012降低60%~75%以上。

超低能耗建筑(Ultra low energy building),指标略低于近零能耗建筑,其建筑能耗水平应较国家标准《公共建筑节能设计标准》GB 50189-2015和行业标准《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》JGJ 26-2010、《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》JGJ 134-2016、《夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准》JGJ 75-2012降低50%以上。

零能耗建筑(Zero energy building),是近零能耗建筑的高级表现形式,其室内环境参数与近零能耗建筑相同,充分利用建筑本体和周边的可再生能源资源,使可再生能源年产能大于或等于建筑全年全部用能的建筑。

综上,从节能降耗的角度来看,三种建筑分别处于不同的阶段,如表1所示。

表1 超低能耗建筑、近零能耗建筑及零能耗建筑的分类差异^[1]

Table 1 Classification differences of ultra-low energy building, nearly zero energy building, and zero energy building^[1]

项目	超低能耗建筑	近零能耗建筑	零能耗建筑
级别	初级	中级	高级
技术应用	被动式	被、主动式(可再生能源)	被、主动式(清洁能源)
可再生能源利用率/%	—	≥10	充分利用
节能率(较现行节能标准)/%	>50	60~75	100
降低碳排放量(较节能65%同类建筑)/%	10	41	100

与常规建筑不同,超低能耗建筑设计之初即以性能结果为导向,具有明确的设计能效指标。对超低能耗建筑的建筑能耗综合值及节能率达标判定时,考察内容包括供暖、供冷、新风、照明、生活热水及电梯系统的能源消耗。

2 超低能耗建筑标准发展历程

2.1 国家及行业层面

1986年原建设部颁布的《民用建筑节能设计标准》(采暖居住建筑部分)(试行JGJ 26-1986),

开启了我国建筑节能新阶段。2005 年我国历史上第一部公共建筑节能设计的综合性国家标准《公共建筑节能设计标准》(GB 50189-2005) 出台, 在室内环境节能设计、建筑与建筑热工设计、采暖、通风和空气调节节能设计等方面制定了强制性规范。2015 年, 在原 GB 50189-2005 基础上增加了建筑分类和建筑设计规定, 颁布新的《公共建筑节能设计标准》(GB 50189-2015), 整个标准更完善。

至 2015 年 10 月, 我国出台了《被动式超低能耗绿色建筑技术导则(试行)(居住建筑)》, 为

我国进一步提高建筑节能与绿色建筑发展水平提出了具体性标准, 标志着我国超低能耗建筑标准体系开始建立。后陆续出台了行业和国家标准, 见表 2。2019 年发布《近零能耗建筑技术标准》GB/T 51350-2019, 进一步推动了建筑节能产业转型升级, 要求建筑能耗水平应较 2016 年国家建筑节能设计标准降低 60%~75% 以上。2021 年 9 月发布的强制性工程建设规范《建筑节能与可再生能源利用通用规范》GB 55015-2021, 更要求超低能耗建筑能耗水平进一步降低, 对节能设计工作提出了更高的要求。

表 2 超低能耗建筑国家标准/行业标准

Table 2 National standards/industry standards for ultra-low energy building

标准/导则名称	实施时间	备注
《被动式超低能耗绿色建筑技术导则(试行)(居住建筑)》	2015 年 10 月	——
JGJ 26-2018《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》	2019 年 8 月 1 日	行标
GB/T 51350-2019《近零能耗建筑技术标准》	2019 年 9 月 1 日	国标
GB 55015-2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》	2022 年 4 月 1 日	国标

2.2 地方层面

自国家层面对超低能耗建筑提出要求后, 各地

陆续出台地方性的技术导则、设计标准、验收规范等, 见表 3, 其中以东部、北部区域出台量为多。

表 3 超低能耗建筑地方标准/技术导则

Table 3 Local standards/technical guidelines for ultra-low energy building

适用地方	标准/导则名称	实施时间
河北	DB13(J)/T 177-2015《被动式低能耗居住建筑节能设计标准》	2015 年 5 月 1 日
	DB13(J)/T 238-2017《被动式超低能耗建筑施工及验收规程》	2017 年 9 月 1 日
	DB13(U)/T 263-2018《被动式超低能耗公共建筑节能设计标准》	2018 年 9 月 1 日
	DB13(J)/T 273-2018《被动式超低能耗居住建筑节能设计标准》	2019 年 1 月 1 日
	DB13(J)/T 8323-2019《被动式超低能耗建筑评价标准》	2019 年 10 月 1 日
	DB13/T 5087-2019《超低能耗交通附属建筑节能应用设计导则》	2019 年 12 月 28 日
	DB13(J)/T 8389-2020《被动式超低能耗建筑节能工程施工及质量验收标准》	2021 年 3 月 1 日
	DB13(J)/T 8359-2020(2021 年版)《被动式超低能耗居住建筑节能设计标准》	2021 年 7 月 1 日
	DB13(J)/T 8360-2020(2021 年版)《被动式超低能耗公共建筑节能设计标准》	2021 年 7 月 1 日
	DB13(J)/T 8324-2022《被动式超低能耗建筑节能检测标准》	2022 年 7 月 1 日
山东	DB13(J)/T 8503-2022《超低能耗居住建筑节能设计标准》	2023 年 6 月 1 日
	DB13(J)/T 8506-2022《超低能耗公共建筑节能设计标准》	2023 年 6 月 1 日
北京	DB37/T 5074-2016《被动式超低能耗居住建筑节能设计标准》	2016 年 12 月 1 日
	JD 14-041-2018《山东省超低能耗建筑施工技术导则》	2018 年 10 月 1 日
北京	DB37/T 5237-2022《超低能耗公共建筑技术标准》	2023 年 2 月 1 日
	《北京市超低能耗农宅示范项目技术导则》	2018 年 3 月
	《北京市超低能耗示范项目技术导则》	2018 年 4 月
	DB11/T 1665-2019《超低能耗居住建筑设计标准》	2020 年 4 月 1 日
	DB11/T 1971-2022《超低能耗居住建筑节能工程施工技术规程》	2022 年 7 月 1 日

续表3 超低能耗建筑地方标准/技术导则

Table 3 Local standards/technical guidelines for ultra-low energy building

适用地方	标准/导则名称	实施时间
河南	DBJ41/T 205-2018《河南省超低能耗居住建筑节能设计标准》	2018年11月1日
	DBJ41/T 246-2021《河南省超低能耗公共建筑节能设计标准》	2021年8月1日
	DBJ41/T 247-2021《河南省超低能耗建筑节能工程施工及质量验收标准》	2021年8月1日
	DBJ41/T 268-2022《河南省超低能耗建筑运行维护技术标准》	2022年11月1日
吉林	《吉林省超低能耗绿色建筑技术导则(试行)》	2019年1月
	DB22/T 5128-2022《超低能耗公共建筑节能设计标准》	2022年11月7日
	DB22/T 5129-2022《超低能耗居住建筑节能设计标准》	2022年11月7日
上海	DB22/T 5145-2023《超低能耗建筑节能工程施工及验收标准》	2023年10月17日
	《上海市超低能耗建筑技术导则(试行)》	2019年3月
	《上海市超低能耗建筑(居住建筑)现场专项检测实施细则(施行)》	2023年4月
天津	DB/T 29-274-2019《超低能耗居住建筑设计标准》	2020年4月1日
	《天津生态城超低能耗居住建筑设计导则》	2020年9月
江苏	《天津生态城超低能耗居住建筑施工技术规程》	2020年9月
	《江苏省超低能耗居住建筑技术导则(试行)》	2020年12月
深圳	DB32/T 4171-2021《近零能耗建筑检测技术标准》	2022年6月1日
	《深圳市超低能耗建筑技术导则》	2021年5月
陕西	DBJ61/T 189-2021《超低能耗居住建筑节能设计标准》	2021年6月30日
湖南	DBJ43/T 017-2021《湖南省超低能耗居住建筑节能设计标准》	2021年11月1日
	DBJ43/T 544-2022《湖南省超低能耗居住建筑评价标准》	2023年7月1日
湖北	DB42/T 1757-2021《被动式超低能耗居住建筑节能设计规范》	2021年12月30日
沈阳	DB2101/T 0048-2022《超低能耗居住建筑节能设计标准》	2022年5月29日
	《乌鲁木齐市超低能耗建筑及近零能耗建筑适用技术应用导则》	2022年7月
新疆	XJJ 158-2022《近零能耗建筑技术标准》	2023年4月10日
	DB23/T 3335-2022《黑龙江省超低能耗公共建筑节能设计标准》	2022年9月29日
	DB23/T 3337-2022《黑龙江省超低能耗居住建筑节能设计标准》	2022年9月29日
	DB2301/T 127-2023哈尔滨市《既有公共建筑超低能耗改造设计标准》	2023年8月12日
	DB23/T 3559-2023《黑龙江省超低能耗建筑检测技术标准》	2023年10月20日
安徽	DB23/T 3597-2023《黑龙江省超低能耗建筑评价技术标准》	2023年11月27日
	DB34/T 4281-2022《被动式超低能耗民用建筑节能技术标准》	2022年9月30日
	DB34/T 4293-2022《近零能耗建筑技术标准》	2023年3月1日
海南	《海南省超低能耗建筑技术导则(试行)》	2022年12月
福建	《福建省超低能耗建筑技术导则》	2023年1月
重庆	DBJ50/T 451-2023《近零能耗建筑技术标准》	2023年11月1日

注:数据来源于标准网、各地住建部公开资料,检索时间截至2023年12月31日

2015年,河北省发布实施我国首部被动式超低能耗建筑地方标准DB13(J)/T 177-2015《被动式超低能耗居住建筑节能设计标准》。后实施涵盖设计、评价、施工及验收、节能检测等各环节的被动式超低能耗建筑标准多部,形成相对完善的技术标

准体系,填补了国内相关标准空白。中国第一座被动式超低能耗公共建筑和居住建筑均位于河北省,同时,河北配套出台了被动式超低能耗建筑专项节能构造图集,为规模化发展提供了有力支持^[2,3]。

自GB/T 51350-2019《近零能耗建筑技术标准》

实施后，各地出台的相关规范占到了 77%以上，随着设计标准的明确，相关验收标准、评价标准也随需求应运而生，例如河北出台 DB13(J)/T 8389-2020《被动式超低能耗建筑节能工程施工及质量验收标准》、吉林出台 DB22/T 5145-2023《超低能耗建筑节能工程施工及验收标准》、湖南出台 DBJ43/T 544-2022《湖南省超低能耗居住建筑评价标准》、上海出台《上海市超低能耗建筑（居住建筑）现场专项检测实施细则（施行）》等，这些都是由于工程应用的现实需求而衍生出来的地方性规范或标准。在标准更替上，地方性变化也尤为迅速，例如河北、吉林、黑龙江三个省份相关标准前后出台数量众多，既有更替的，也有作为补充性质的，说明地方对于超低能耗建筑设计标准的应用上差异化需求非常明显。受国家政策导向影响，地方性超低能耗建筑系列标准发展的高峰在 2020 年之后（见图 1）。

除表 3 所列外，各地也在陆续筹划出台超低能耗相关标准。2023 年，北京市《超低能耗公共建筑设计标准》，上海市《超低能耗建筑设计标准（居

住建筑）》、上海市《超低能耗建筑设计标准（公共建筑）》、黑龙江省《既有公共建筑超低能耗节能改造设计标准》、《黑龙江省超低能耗建筑节能施工质量验收标准》意见征求工作都已经开展。

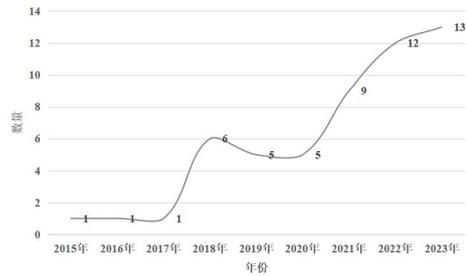


图 1 历年地方性超低能耗建筑标准/规范/导则出台趋势
Fig.1 Trends in the introduction of local ultra-low energy building standards/codes/guidelines over the years

2.3 团体协会层面

2019 至 2022 年，超低能耗建筑相关的团体标准发布了 10 项，见表 4，涉及玻璃、混凝土、新风系统、门窗、保温材料等行业，也反映出此期间我国超低能耗建筑的市场化程度极高，市场对于新技术、新产品的需求很高。

表 4 超低能耗建筑团体标准

Table 4 Group standards for ultra-low energy building

团体名称	标准编号	标准名称	实施日期
中国建筑玻璃与工业玻璃协会	T/ZBH 012-2019	被动式超低能耗建筑透明部分用玻璃	2019 年 5 月 1 日
中国建筑节能协会	T/CABEE 003-2019	近零能耗建筑测评标准	2020 年 2 月 1 日
中国工程建设标准化协会	T/CECS 713-2020	公共机构超低能耗建筑技术标准	2020 年 12 月 1 日
中国工程建设标准化协会	T/CECS 742-2020	装配式混凝土结构超低能耗居住建筑技术规程	2021 年 1 月 1 日
中国工程建设标准化协会	T/CECS 739-2020	超低能耗农宅技术规程	2021 年 1 月 1 日
中关村材料试验技术联盟	T/CSTM 0325-2021	被动式低能耗居住建筑—新风系统	2021 年 4 月 29 日
中国民族建筑研究会	T/NAIC 001-2021	超低能耗建筑新风系统技术规程	2021 年 5 月 1 日
中国工程建设标准化协会	T/CECS 803-2021	既有居住建筑低能耗改造技术规程	2021 年 6 月 1 日
中国工程建设标准化协会	T/CECS 10140-2021	超低能耗建筑用门窗认证通用技术要求	2021 年 12 月 1 日
中国散装水泥推广发展协会	T/CBCA 013-2022	被动式超低能耗建筑材料第一部分：保温系统材料	2022 年 11 月 1 日

注：数据来源于标准网、各协会公开资料，检索时间截至 2023 年 12 月 31 日

通过对超低能耗建筑相关标准发展历程的分析，我国各省市、各行业超低能耗建筑相关的标准体系从无到有，尤其是在 2020 年之后，发展迅猛。从出台区域看，东部、北部严寒及寒冷地区的力度较大，其他地区相对较少。从建筑属性看，居住建筑标准较多，而对涉及交通、医院、学校、商业等公共建筑标准较少，甚至大部分区域存在空白。从

标准类别需求看，以技术导则、设计标准为先，随后衍生实施细则、施工标准、验收标准、评价标准，再细化至产品标准，相辅相成。这些都标志着我国超低能耗建筑的蓬勃发展。

3 新风系统在超低能耗建筑中的应用

超低能耗建筑以其不断提升的建筑围护结构

性能、严格控制的建筑能耗、以及对环境的高度适应性极大地开发建筑节能的潜力。伴随着建筑气密性要求的大幅提升,寒冷地区采暖能耗中由于冷风渗透造成的热负荷大幅降低,但与此同时,也使得依靠室外渗透解决室内新风的传统模式不再适用,机械式新风系统成为超低能耗建筑、特别是居住建筑,满足新风需求的必要手段。

2019年3月,住房和城乡建设部发布了国家标准《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378-2019)。其中“电机驱动的蒸气压缩循环冷水(热泵)机组”被列为绿色建筑供暖空调系统中一种重要的冷、热源提供设备,并规定在现行《公共建筑节能设计标准》(GB 50189)基础上能效提升6%,在绿色建筑评价过程中可获得5分加分;能效提升12%,在绿色建筑评价过程中可获得10分加分。“新风产品”虽然没像热泵一样被直接写入《绿色建筑评价标准》,但是在评价标准中,对室内空气品质、室内热湿环境都提出了严格要求,新风产品的净化、除湿功能在绿色建筑中都大有可为。

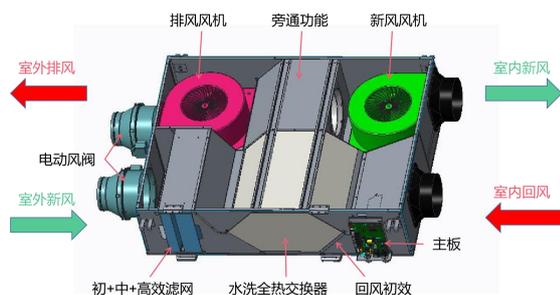


图 2 超低能耗新风产品示意图

Fig.2 Schematic diagram of Ultra-Low Energy Fresh Air System product

在超低能耗建筑中,室内环境品质如何得以保证,新风系统带来的能耗负荷如何降低,寻求适用于超低能耗建筑的新风系统成为了新的关注点。超低能耗建筑主要通过围护、门窗、无热桥设计、气密性设计、高效新风热回收及冷热源系统等来最大限度降低冷热负荷需求^[4]。新风热回收技术的应用可以有效降低新风负荷,在超低能耗公共建筑中,采用全热回收装置可至少降低三分之一的建筑能耗^[5],因此采用高效的新风热回收系统(见图2)在超低能耗建筑中尤为重要。一是新风系统中的热交换芯体可以通过回收新风、排风过程中冷量或热量,以降低换气过程中的能耗损失,同时降低空调

运行的能耗,特别是在寒冷冬季,使用新风热回收的节能效果非常明显;二是因为超低能耗建筑具有较高要求的气密性,容易导致室内的空气质量的降低,例如颗粒物、二氧化碳、挥发性有机物等浓度的增加,新风系统通过新风净化、回风、补风等方式可以有效改善室内空气质量。

3.1 研究应用现状

3.1.1 性能研究

新风系统通风装置的技术参数主要包括换气量、机外余压、噪声、功率、换热效率等^[6]。超低能耗建筑新风系统重点针对室内新风量、全热和显热装置的选用、辅助冷热源三方面进行设计^[7]。

新风量通常根据人均法和换气次数法两种方式计算。目前超低能耗住宅的新风量设计相对明晰,GB/T 51350-2019《近零能耗建筑技术标准》明确规定居住建筑主要房间的室内新风量不应小于 $30\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{人})$ 。王昭俊等^[8]在严寒地区超低能耗住宅热回收式新风机组换热效率的研究中也建议按照人均最小新风量 $30\text{m}^3/\text{h}$ 作为设计新风量。曹依蕾^[9]以河南省寒冷地区超低能耗建筑为研究对象,建议换气次数范围宜为 $0.2\text{次}\cdot\text{h}^{-1}\leq N_{50}\leq 0.6\text{次}\cdot\text{h}^{-1}$ 。支持公共建筑新风量设计的实测案例和研究相对较少,李莹莹等^[5]建议寒冷气候区超低能耗公共建筑基于舒适、换热效率和经济性等方面考虑,高密度人群区按稍大风量人均 $30\text{m}^3/\text{h}$ 作为设计新风量。

热交换效率直接影响新风系统的能耗。热交换效率影响因素的研究相对较多,王立峰等^[10]探索功率、风量、换气率、交换效率等因素对热回收装置节能性能的影响,相同的热回收装置交换效率与风量和有效换气率呈负相关,制冷工况下风机输入功率越大、交换效率越低,制热工况下风机新风输入功率越大、交换效率越高。王昭俊等^[8]对严寒地区某被动式超低能耗住宅的新风系统冬季的换热效率进行测试,换热效率随风量的增大呈下降趋势。XP等^[11]指出换热器核心几何形状是影响热回收系统整体性能的关键因素之一,在实际应用中可以在指定的风机能耗下最小化材料成本,或者在给定的材料成本下最小化风机能耗。刘俊杰等^[12]基于感热、潜热和热效率之间的关系,研究了在五种不同的室外气候条件下热交换效率、风机能耗和新风换气率对节能性能的影响,对更高效的热交换材料和风机提

出了探索方向。陈彤^[13]结合 GB/T 21087-2021《新风热回收机组》标准要求和模拟,认为我国 4 类气候区供热季、供冷季的能耗所受影响因素不同,得出严寒、寒冷地区适宜选择显热回收方式,夏热冬冷、夏热冬暖地区更适宜选择全热回收方式。

也有相当多学者对于新风负荷的计算、热交换降低负荷的方式开展研究。徐伟等^[14]认为在严寒和寒冷地区超低能耗建筑中,由于实际开启时段差异造成的新风系统实际新风热负荷及能耗计算偏差,提出合理将系统实际运行时间表融合入能耗计算中有助于建筑能耗的准确计算。吕燕捷等^[15]认为超低能耗建筑新风系统设计时负荷计算应根据系统实际组成,考虑建筑气密性及热回收对系统负荷造成的影响,严寒及寒冷地区还需考虑冬季室外气温过低造成热回收装置排风侧霜冻的情况。

3.1.2 控制策略

新风系统的运行模式与控制策略将直接影响风机能耗^[6]。新风系统通过监测温湿度、焓值差、二氧化碳浓度、污染物浓度等单一或组合因素进行运行控制,得出一种相对合理、节能的控制策略。

Tao Huang 等^[17]利用 Trnsys 新风系统的控制模型,并模拟了夏季典型日北京办公室空调系统的冷却效果。基于“变温”控制策略,提出了“变风量辅助调节”的运行策略。在两种控制策略下,模拟室内温度,室内湿度,供水温度和回水温度的变化。采用两种控制策略对整个夏季系统的能耗进行比较,分析室内热舒适性,提出最优控制策略。邝文君^[18]提出根据室内污染物浓度变动的新风控制策略。张夏^[19]根据焓值控制理论与各空气状态参数之间的关联,提出了最小焓差控制算法。陈彤^[13]提出选用合理的热回收新风机组控制方法能降低建筑能耗,使用旁通控制法在供冷季和过渡季能显著降低热回收芯体造成的能量损失,从而进一步提升热回收机组的全年净节能量。王晶^[20]研发的智能新风系统可以根据每个房间人员实际需求自动调节房间新风量,充分考虑到建筑物内人员的流动性。杨俊俊等^[21]提出新风优先运行,可以让新风承担自身负荷、夏季除湿负荷、部分室内显热负荷甚至全部建筑负荷,当新风负荷不足以承担整个建筑物负荷时,可以采用新风+风机盘管系统来匹配室内负荷。何东阳^[22]研究了板翘式三角流道传热芯体的传热传质机理,并提出了一种新风系统的综合优化控

制策略。

3.1.3 适用性研究

不同地区、气象参数、建筑物的功能属性等,都会影响热回收系统的选择,同时基于经济性分析,新风系统的适用性也有不同。

高峰^[23]利用 Dest 能耗模拟软件,基于天津市室外逐时气象参数,研究了季节、室内温度、相对湿度等因素对显热和全热回收新风系统能耗的影响,结果表明,天津地区夏季热回收性能远不如冬季,且冬季显热回收占优势,夏季潜热回收具有优越性。冬、夏季热回收能力与室内温湿度有着密切的联系,近似呈线性变化,且全热回收相对于潜热回收具有明显变化速率。张灿^[24]以重庆、南京、武汉为例,研究了夏热冬冷地区冬、夏两季全热回收装置的热回收量,重庆的净节能效率接近 40%,南京和武汉两地的净节能率均超大于 100%,得出南京地区居住建筑中新风热回收系统全年所需要的最少运行时间,具有很好的节能效益。曹依蕾^[9]评价新风热回收系统在河南省寒冷地区的应用潜力,结果显示 11 月到次年 3 月新风热回收节能效果显著,最高节能率达到 55.25%,6 月、7 月、8 月次之,节能率分别为 23.64%、32.82%、26.83%。通过分析最小经济焓差,河南省寒冷地区全年适合使用新风热回收的天数为 243 天。建议当新风量需求小于 900m³/h 时优先考虑开窗通风,新风量需求 900m³/h~1500m³/h 优先采用不带热回收的机械通风,当新风量需求大于 1500m³/h 时优先采用带热回收的机械通风。孟富强^[25]根据焓湿图划分区域的方法来判断热回收装置的适用性,并以北京为例给出了选择方案和节能效果。何东阳^[22]利用最小焓差法模拟出上海全年可进行新风热回收的天数为 225 天,利用新风度时数和焓时数法计算出夏热冬冷地区单位体积流量的新风可回收的能量。张文^[26]研究了热回收新风系统的适用性,寒冷、夏热冬冷、夏热冬暖及较湿润的严寒地区使用全热回收相对更具节能和经济性,较干燥的严寒地区和温和地区采用显热回收则相对更具经济性,但温和地区采用热回收系统的投资回收期高于 5 年,不适合全面推广

3.1.4 技术优化

超低能耗建筑的新风系统供能区别于传统的单一能源,可与可再生能源等结合,用最小的能耗来保证室内舒适度。

新风系统与太阳能的结合。太阳能是低能耗建筑应用最广泛的可再生能源系统,孙峙峰等^[27]提出了一种太阳能集热系统与带热回收的新风系统相结合的方案,以西宁市为例论证了太阳能新风系统在被动式超低能耗建筑中的应用是经济可行的。王选等^[28]对太阳能新风系统中的太阳能集热系统进行优化设计研究,王丽敏^[29]研究带太阳能新风系统的被动式超低能耗建筑采暖能耗理论计算方法。马海玲^[30]提出了一种基于风光互补的超低能耗高效通风系统,是一种利用自然风和太阳能实现室内通风换气的装置,有效解决了现代空调能耗高、经济性差以及环境污染的问题。封媛等^[31]针对夏热冬暖地区近零能耗建筑的热湿特性,提出了一种与太阳能技术相结合 PV/T 除湿新风复合系统,能同时供冷、供热水及产电。

新风系统与热泵技术的结合。部分超低能耗建筑以超低温、低温空气源热泵配合低能耗辅助冷热源设备的模式。如我国北方第一个幼儿园被动式超低能耗中德合作示范项目一烟台市的建城丽都居住区 E 地块幼儿园项目^[32],采用低温空气源热泵的可再生能源系统,在末端设备的选择上该项目采用直流无刷风机盘管和带热回收的新风系统,原军伟等^[33]利用 DEST 软件进行了能耗模拟得到该项目一次能源消耗量,与基准建筑相比较每年可减少碳排放 130.41t。潘玉亮^[34]热泵型新风环境控制一体机的研发提出了噪声控制、温度控制等注意事项。何东阳^[22]应用 Design Builder 软件进行运行工况的热舒适性模拟和能耗计算,结果表明依靠新风热泵系统不仅可以提供室内人员所需的新风,还能消除室内热湿负荷,满足室内热舒适性的要求。

新风系统与空调技术的结合。杨俊俊等^[21]从超低能耗的负荷与运行特点出发,结合工程实际,提出了新风+风机盘管系统设计理念,在超低能耗建筑中采用直膨新风机与 VRF 空调组合,一级或二级新风除湿+干风机盘管的干、湿工况,一级或二级新风除湿+风机盘管干工况能较好地匹配室内末端负荷。

新风系统与储能技术的结合。黄凯良^[35]提出利用相变材料储能技术为新风系统提供能量,大大减少了新风系统的能耗,有效解决了住宅建筑新风能耗问题,还保证了室内的空气质量,为新风系统供能方向上提供了前瞻性和可行性方案。金磊等^[36]

提出了一种利用低辐射太阳能、夜空冷辐射等可再生能源的相变蓄能单元,该装置应用于新风预处理系统可显著降低环控能耗。罗怡琳等^[37]提出了一种新风预处理系统,利用低辐射太阳能、夜空冷辐射与相变材料相结合的一种相变蓄能单元,其结构由空气换热器、水换热器和低温相变材料石蜡组成。通过该装置储存太阳和夜空冷辐射的能量,耦合空气、水换热器实现对空气的预热和预冷处理。高林^[38]提出在新风处理机组前设置新风蓄能器,结合相变蓄能技术利用可再生能源对新风进行预处理,通过实验得出石蜡更适合作为新风蓄能器内部的相变填充材料。

目前新风系统在超低能耗建筑中的应用研究以单一切入点研究为主,更深入更全面研究新风系统与超低能耗建筑的结合、以及工程实践,具有重大意义。

3.2 技术指标差异

3.2.1 新风热交换效率指标差异性

在新风系统中,新风与排风是同时进行的。如果室内空气在排风过程中将空气中的热量保留,并传递给进入室内的新风,这样就保留了室内空气的热量,形成了热量的回收。因此衍生了带有热交换功能的新风系统,热交换材料和部件作为新风系统的一种核心部件,热交换效率成为了热交换新风系统的重要技术指标,热回收效率越高,新风系统换气造成的冷、热量流失就越少。

GB/T 40438-2021《热泵型新风环境控制一体机》以及热回收新风机组,热交换效率均比对 GB/T 21087-2020《热回收新风机组》的标准。T/NAIC001-2021《超低能耗建筑新风系统技术规程》比照 GB/T 51350-2019《近零能耗建筑技术标准》,T/CSTM 00325-2021《被动式低能耗居住建筑一新风系统》,要求“冬季热回收的显热交换效率应不小于 75%,全热交换效率应不小于 70%;夏季冷回收的显热交换效率应不小于 65%,全热交换效率应不小于 55%”。不同的产品标准对于热交换效率指标规定出现了差异。

GB/T 51350-2019《近零能耗建筑技术标准》规定了新风热回收装置显热型显热交换效率不应低于 75%,全热型全热交换效率不应低于 70%。青海、吉林、河北、天津、北京、江苏、陕西、沈阳、乌鲁木齐、黑龙江相关规定比照 GB/T 51350-2019。

但吉林省 DB22/T 5145-2023《超低能耗建筑节能工程施工及验收标准》、北京市 DB11/T 1971-2022《超低能耗居住建筑节能工程施工技术规程》又提出了热回收机组的性能应符合现行国家标准《热回收新风机组》GB/T 21087 的规定（见表 5），技术导则、地方设计标准与施工验收标准出现了差异。

表 5 GB/T 21087-2020《热回收新风机组》交换效率限值

Table 5 GB/T 21087-2020 "Heat Recovery Fresh Air Units" exchange efficiency limits

类型	冷量回收	热量回收
全热交换效率	≥55%	≥60%
显热交换效率	≥65%	≥70%

部分省市地方标准中的超低能耗建筑的热交换效率（显热/全热）以 GB/T 21087-2020《热回收新风机组》为对比，例如《上海市超低能耗建筑技术导则（试行）》、安徽 DB34/T 4293-2022《近零能耗建筑技术标准》规定全热型在此标准上冷量回收、热量回收效率各提高了 10%，显热型在此标准上冷量回收、热量回收效率各提高了 5%；河北

DB13(J)/T 8503-2022《超低能耗居住建筑节能设计标准》规定全热型、显热型在此标准上冷量回收、热量回收效率各提高了 5%。河北在超低能耗公共建筑和居住建筑上对于热交换效率的要求不同，公共建筑要求“新风热回收装置应符合显热型显热交换效率不应低于 75%、全热型全热交换效率不应低于 70%”，居住建筑要求“制冷全热交换效率 60%、制热全热交换效率 65%；制冷显热交换效率 70%、制热显热交换效率 75%”。河南在超低能耗公共建筑和居住建筑上对于热交换效率的要求保持一致，均为“显热型显热交换效率不应低于 75%、全热型全热交换效率不应低于 70%”，与 GB/T 21087-2020《热回收新风机组》有差异。深圳、海南、新疆则无具体数值要求。部分地区对于选用显热型、全热型做了适当的规定，例如上海规定优先选用全热交换型产品，湖南规定采用全热交换效率不低于 70% 的全热回收新风机组，乌鲁木齐等则规定宜优先选用显热回收装置等。各地超低能耗建筑技术标准中有关热交换效率的规定不尽一致，如表 6 所示。

表 6 超低能耗建筑标准对新风热回收的技术要求

Table 6 Technical requirements for fresh air heat recovery in ultra-low energy building standards

标准情况	新风热回收装置要求
GB/T 51350-2019 《近零能耗建筑技术标准》	6.2.7 新风热回收装置换热性能应符合下列规定， 显热型显热交换效率不应低于 75%；全热型全热交换效率不应低于 70%
河北 DB13/T 5087-2019 《超低能耗交通附属建筑节能应用设计导则》	6.1.7.1 显热回收装置的温度交换效率（显热交换效率）不应低于 75%； 全热回收装置的焓交换效率（全热交换效率）不应低于 70%
河北 DB13(J)/T 8360-2020（2021 年版） 《被动式超低能耗公共建筑节能设计标准》	4.5.2 新风热回收装置应符合显热型显热交换效率不应低于 75%、 全热型全热交换效率不应低于 70%
河北 DB13(J)/T 8503-2022 《超低能耗居住建筑节能设计标准》	6.4.12 制冷全热交换效率 60%、制热全热交换效率 65%； 制冷显热交换效率 70%、制热显热交换效率 75%
山东 DB37/T 5074-2016 《被动式超低能耗居住建筑节能设计标准》	5.2.7 新风系统的设置应符合下列规定： 热回收装置采用全热回收装置，焓交换效率不低于 65%
北京 DB11/T 1665-2019 《超低能耗居住建筑设计标准》	7.3.2 显热型显热交换效率不应低于 75%； 全热型全热交换效率不应低于 70%
北京 DB11/T 1971-2022 《超低能耗居住建筑节能工程施工技术规程》	9.1.1 新风热回收机组的性能应符合 现行国家标准《热回收新风机组》GB/T 21087 要求
青海 DB63/T 1682-2018 《被动式低能耗建筑技术导则（居住建筑）》	4.8.4 显热回收装置的温度交换效率不应低于 75%； 全热回收装置的焓交换效率不应低于 70%
河南 DBJ41/T 205-2018 《河南省超低能耗居住建筑节能设计标准》	5.3.10 显热回收装置的温度交换效率不应低于 75%； 全热回收装置的焓交换效率不应低于 70%

续表 6 超低能耗建筑标准对新风热回收的技术要求

Table 6 Technical requirements for fresh air heat recovery in ultra-low energy building standards

标准情况	新风热回收装置要求
河南 DBJ41/T 246-2021 《河南省超低能耗公共建筑节能设计标准》	5.4.4 显热型显热交换效率不应低于 75%; 全热型全热交换效率不应低于 70%
《吉林省超低能耗绿色建筑技术导则(试行)》	5.7.1 显热回收装置的温度交换效率不应低于 75%; 全热回收装置的焓交换效率不应低于 70%
吉林 DB22/T 5145-2023 《超低能耗建筑节能工程施工及验收标准》	4.6.1 热回收机组的性能应符合 现行国家标准《热回收新风机组》GB/T 21087 的规定
《上海市超低能耗建筑技术导则(试行)》	4.3.3.1 制冷焓效率 65%、制热焓效率 70%; 制冷温度效率 70%、制热温度效率 75%; 优先选用全热交换型产品
天津 DB/T 29-274-2019 《超低能耗居住建筑设计标准》	7.3.2 新风热回收装置采用全热回收型时, 全热交换效率不应低 70%; 采用显热回收型时, 显热交换效率不应低于 75%
《江苏省超低能耗居住建筑技术导则(试行)》	4.3.1.1 利用高效新风热回收系统时, 显热交换效率不应低于 75%; 全热交换效率不应低于 70%
《深圳市超低能耗建筑技术导则》	——
陕西 DBJ61/T 189-2021 《超低能耗居住建筑节能设计标准》	5.3.4 显热型显热交换效率 $\geq 75\%$; 全热型全热交换效率 $\geq 70\%$
湖南 DBJ43/T 544-2022 《湖南省超低能耗居住建筑评价标准》	6.1.4 采用全热交换效率不低于 70%的全热回收新风机组 对排风进行能量回收利用, 并具备节能运行控制功能
湖北 DB42/T 1757-2021 《被动式超低能耗居住建筑节能设计规范》	8.2.5 显热回收装置的温度交换效率不应低于 75%; 全热回收装置的焓交换效率不应低于 65%
沈阳 DB2101/T 0048-2022 《超低能耗居住建筑节能设计标准》	5.2.2 显热型显热交换效率 $\geq 75\%$; 全热型全热交换效率 $\geq 70\%$
《乌鲁木齐市超低能耗建筑及近零能耗建筑 适用技术应用导则》	5.6.2 宜优先选用显热回收装置, 显热回收装置的显热交换效率不低于 75%; 当选择全热回收装置时, 全热回收装置的全热交换效率不低于 70%
新疆 XJJ 158-2022 《近零能耗建筑技术标准》	——
黑龙江 DB23/T 3335-2022 《黑龙江省超低能耗公共建筑节能设计标准》	7.3.10 显热型名义显热交换效率不应低于 75%; 全热型名义全热交换效率不应低于 70%
安徽 DB34/T 4293-2022 《近零能耗建筑技术标准》	5.5.14 全热型制冷 $\geq 65\%$ 、制热 $\geq 70\%$; 显热型制冷 $\geq 70\%$ 、制热 $\geq 75\%$
《海南省超低能耗建筑技术导则(试行)》	——
《福建省超低能耗建筑技术导则》	5.4.7 显热型热回收装置的显热交换效率不应低于 70%, 全热型热回收装置的全热交换效率不应低于 65%
重庆 DBJ50/T 451-2023 《近零能耗建筑技术标准》	6.2.6 显热回收装置的温度交换效率不应低于 75%; 全热热回收装置的焓交换效率不应低于 70%

注: 数据来源于标准网、各地住建部公开资料, 检索时间截至 2023 年 12 月 31 日

3.2.2 其他指标差异性

净化效率。《福建省超低能耗建筑技术导则》要求空气净化装置对大于等于 $0.5\mu\text{m}$ 细颗粒物的一次通过计数效率不低于 70%。GB/T 51350-2019《近零能耗建筑技术标准》及其他地区现行标准均

要求新风热回收系统空气净化装置对 $\geq 0.5\mu\text{m}$ 细颗粒物的一次通过计数效率宜 80%, 且不应低于 60%。而在 GB/T 34012-2017《通风系统用空气净化装置》要求了 PM2.5、气态污染物、微生物的净化效率, 并分为了 A、B、C、D 四个等级, 其中 A

级 PM_{2.5} 净化效率 $E_{PM2.5} > 90\%$ 。

单位功率。各地出台的超低能耗建筑标准，均要求新风热回收装置单位风量耗功率不应大于 $0.45W/(m^3 \cdot h)$ 。GB/T 21087-2020《热回收新风机组》仅要求了实测功率与额定功率的差异范围。

旁通功能。各地出台的超低能耗建筑标准，均要求新风系统宜设置新风旁通管，当室外温湿度适宜时，在过渡季或室内外焓差较小时，新风可不经过热回收装置直接进入室内。常规新风系统无此要求。

系统联动。各地出台的超低能耗建筑标准，均要求与室外连通的新风、排风和补风管路上均应设置保温密闭型电动风阀，并应与系统联动。常规新风系统无此要求。

4 总结

新风系统在超低能耗建筑中的应用，有围绕性能设计、控制策略、适用性、技术优化等方面的研究，大部分研究以单一因素切入或结合典型工程实践研究，热交换效率作为直接影响新风能耗的重要技术指标，基于能效性、经济性、舒适性，如何提高换热效率、选择适配的热回收装置、合理节能的控制逻辑、利用可再生能源补充供能等都受到了关注，但研究相对不够完善，未形成研究体系。

在实际应用中，新风系统的使用效果会受到多因素交织影响，并且超低能耗建筑本身是一个系统性工程，新风系统的产品标准、技术差异、安装规范、验收标准等的不同以及超低能耗建筑的区域、属性、标准等不同，都将会影响整个建筑的能效及验收使用。

(1) 各地标准体系存有差异

我国的超低能耗建筑建造技术，是以德国的被动房为基础发展起来的。我国地域辽阔，不同气候区的气象条件、建筑特点、生活习惯及用能特点等方面均存在较大差异，和德国指标值统一情况不同，我国不同气候区指标值不一样，严寒地区比照国外标准，而温和地区则宽泛一些^[39]。从现有的标准体系建立及工程实施情况来看，目前超低能耗建筑在北方严寒及寒冷地区的发展力度较大，其他地区则比较欠缺。如前述表 3，东部、北部区域标准、政策发布较多。

已出台的相关标准规范中有针对公共建筑、居

住建筑、附属建筑的，不通类型的建筑要求的性能参数、能耗特征等不一样，且不同区域气候特点不尽相同，难以有统一的能耗指标和技术参数。另外，各地区标准体系中设计标准、施工标准、验收标准、评价标准、检验标准等因出台时间、政策变化等，一是地区与地区之间存在差异，二是地区自身几种标准存在差异。

在分析新风系统在我国超低能耗建筑中应用时，也发现高寒、寒冷地区的相关研究应用较多。各地标准体系的差异，导致了新风系统产品的适用性差异。

(2) 产品的技术指标存有差异

现行的超低能耗新风产品标准多由行业协会、联盟等发布的团体标准。其中中国民族建筑研究会于 2021 年发布的 T/NAIC 001-2021《超低能耗建筑新风系统技术规程》比照 GB/T 51350-2019《近零能耗建筑技术标准》，要求“新风热回收装置显热型显热交换效率不应低于 75%，全热型全热交换效率不应低于 70%”；同年中关村材料试验技术联盟发布 T / CSTM 00325-2021《被动式低能耗居住建筑—新风系统》，要求“冬季热回收的显热交换效率应不小于 75%，全热交换效率应不小于 70%；夏季冷回收的显热交换效率应不小于 65%，全热交换效率应不小于 55%”。如前述表 6，各地超低能耗建筑技术标准中有关热交换效率的规定不尽一致。而常规新风系统技术设计主要比照 GB/T 34012-2017《通风系统用空气净化装置》、GB/T 21087-2020《热回收新风机组》，不同的地区、不同的行业协会、不同的产品属性，产品标准存在差异。

再如 2018 年实施的北京市地方标准 DB11/T 1525-2018《居住建筑新风系统技术规程》，2022 年 3 月实施的 GB/T 40438-2021《热泵型新风环境控制一体机》规定新风热回收效率要满足 GB/T 21087-2020《热回收新风机组》要求，实施至今来，历经 GB/T 18883-2022《室内空气质量标准》等相关标准不断更新，建筑节能相关标准的陆续出台，都对居住建筑新风系统提出了更高的要求。原有的产品技术规范已不能完全满足现实的需求。

新风系统单一产品或者联合产品，因其适用范围有指标参数的差异，且不同地区的应用其效果也受到诸多因素的影响，因此新风系统在超低能耗建

筑中的应用需因地制宜。

(3) 验收及后评价有待完善

北京^[40]、河北^[41]、河南等^[42]有超低能耗建筑示范项目通过验收。超低能耗建筑中新风系统的验收,依赖于设计标准、测评标准、安装标准的有效实施和应用,而在实际验收过程中,因标准差异、技术差异、时效性差异等,导致项目在招投标、施工、验收过程中出现差异和矛盾性,上海某超低能耗新风项目设计之初规定优先全用全热型产品,要求“显热型显热交换效率不应低于75%、全热型全热交换效率不应低于70%”,在安装完成后验收阶段出现用全热型产品达到显热型热交换效率的要求,超低能耗建筑相关单位、队伍的专业化亟待提升。

河南^[43]、新疆^[44]有部分以单体超低能耗项目开展后评价研究的个案,整体来说,我国对绿色建筑使用后评估还处于起步阶段,缺乏对绿色建筑在运营阶段实施效果的综合评价方法和技术手段,目前我国涉及“绿色建筑运营”的标准规范主要有JGJ/T 391-2016《绿色建筑运行维护技术规范》、GB/T 50378-2019《绿色建筑评价标准》、《绿色建筑后评估技术指南(办公和商店建筑版)》。河南省出台了DBJ41/T 268-2022《河南省超低能耗建筑运行维护技术标准》。超低能耗建筑项目建设完成后全过程后评价,将对今后的超低能耗建筑发展起到巨大的指导性作用,对超低能耗建筑中新风系统产品的进一步研发也将带来更大的支撑意义。

新风系统在超低能耗建筑中的应用,因行业新生而发展迅猛,需求量巨大;也因行业新生而受限,技术差异、验收差异等给产品发展带来了一定的瓶颈。但不可否认,超低能耗建筑的发展给传统新风产品的拓展带来了新的机遇,如前所述,与太阳能、热泵、可再生能源、储能等的结合,新风系统产品应用将迎来无限可能。新风系统与超低能耗建筑的有机结合今后应有更深入、更全面的研究。

参考文献:

- [1] 沈泽南.“双碳”目标下近零能耗建筑的节能性探索[J].新型建筑材料,2022,49(8):14-18.
- [2] 徐双军,朱天志,张雅静,等.双碳背景下河北被动式超低能耗建筑产业创新发展路径的思考[J].建筑经济,2021,42(12):27-32.
- [3] 于震,刘伟.中国被动式超低能耗建筑发展现状及展望[J].电力需求侧管理,2018,20(5):1-4.
- [4] 游又能,康一亭,马健,等.我国被动式超低能耗装配式建筑关键技术的研究与发展[J].建筑科学,2019,35(8):137-142.
- [5] 李莹莹,晁岳鹏,曹依蕾.寒冷地区公共建筑新风热回收系统适用性分析[J].建筑节能,2021,49(2):49-52.
- [6] 何东阳,康智强,黄凯良,等.被动式超低能耗建筑户式全热新风系统的应用研究与进展[C].第十六届沈阳科学学术年会论文集(理工农医),2019:4.
- [7] 刘旭峰.高寒地区被动式低能耗居住建筑新风系统的特点及设计[J].中国设备工程,2021,(1):251-252.
- [8] 王昭俊,薛庆雯,余志义,等.严寒地区被动式超低能耗住宅新风机组换热效率测试与分析[J].建筑科学,2017,33(6):21-25.
- [9] 曹依蕾.河南省寒冷地区超低能耗建筑气密性及新风系统研究[D].郑州:中原工学院,2020.
- [10] 王立峰,曹阳,陈方圆,等.空气-空气能量回收装置交换效率影响因素的试验研究[J].暖通空调,2013,43(12):141-144.
- [11] XP Liu, JL Niu. An optimal design analysis method for heat recovery devices in building applications[J]. Applied Energy, 2014,129:364-372.
- [12] Junjie Liu, Wenshen Li, Jiang Liu, et al. Efficiency of energy recovery ventilator with various weathers and its energy saving performance in a residential apartment[J]. Energy & Buildings, 2009,42(1):43-49.
- [13] 陈彤.不同气候区居住建筑新风热回收效果研究[D].北京:北京建筑大学,2022.
- [14] 徐伟,吕燕捷,孙德宇.超低能耗建筑新风系统不同运行策略下新风热负荷计算[J].建筑科学,2016,32(4):10-14.
- [15] 吕燕捷,徐伟,孙德宇,等.被动式超低能耗居住建筑新风热负荷计算方法研究[J].建筑科学,2015,31(6):80-85.
- [16] 薛庆雯.严寒地区被动房能耗敏感性分析与热工性能参数优化研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [17] Tao Huang, Hao Li. Research on the operation control strategy of the cooling ceiling combined with fresh air system[C] 2017 International Conference on Renewable Energy and Environment (ICREE 2017), 2017.
- [18] 邝文君.住宅新风系统的数值模拟与控制仿真[D].成都:西华大学,2016.
- [19] 张夏.变新风的最小焓差控制[D].西安:西安建筑科技

- 大学,2014.
- [20] 王晶.基于超低能耗建筑的智慧可控新风系统[J].自动化博览,2024,41(3):28-30.
- [21] 杨俊俊,撒世忠,吴志成,等.超低能耗建筑给空调设计带来的新变化—以“新风+风机盘管”为例[J].暖通空调,2023,53(S1):162-165.
- [22] 何东阳.夏热冬冷地区被动式新风热泵系统的应用研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2020.
- [23] 高峰,涂光备.天津地区排风热回收系统节能量化研究[J].洁净与空调技术,2013,(2):88-90.
- [24] 陈灿,张少凡,张建忠.排风热回收技术在夏热冬冷地区居住建筑中的应用研究[J].暖通空调,2012,42(3):55-59,75.
- [25] 孟富强.绿色建筑中新风系统运行策略及适用性研究[D].北京:北京建筑大学,2018.
- [26] 张文.新风热回收系统气候适用性及性能优化研究[D].北京:北京建筑大学,2023.
- [27] 孙峙峰,袁静,王选,等.太阳能新风系统在被动式超低能耗建筑中的应用分析[J].建筑节能,2016,44(8):39-41,88.
- [28] 王选,孙峙峰,袁静,等.被动式超低能耗居住建筑太阳能新风系统的应用分析及其优化设计[J].建筑科学,2017,33(2):107-112.
- [29] 王丽敏.西宁地区带太阳能新风系统的某被动式超低能耗建筑案例研究[D].昆明:昆明理工大学,2016.
- [30] 马海玲.基于风光互补的超低能耗高效通风系统设计[J].科技创业月刊,2017,30(8):126-129.
- [31] 封媛,陈柳,杨婷婷,等.夏热冬暖地区近零能耗建筑PV/T除湿新风复合系统研究[J].建筑科学,2023,39(12):184-195.
- [32] 赵明明,马伊硕.烟台市建城丽都居住区 E 地块幼儿园被动式超低能耗绿色建筑能耗分析[J].建设科技,2018,(13):61-64,60.
- [33] 原军伟,赵明明.被动式超低能耗幼儿园暖通设计分析[J].节能,2021,40(1):1-4.
- [34] 潘玉亮.超低能耗居住建筑用热泵型新风环境控制一体机的应用浅析[J].暖通空调,2023,53(S1):445-447.
- [35] 黄凯良.北方住宅冬季通风与高效储能新风系统研究[D].重庆:重庆大学,2015.
- [36] 金磊,王勇,吴蔚兰,等.不同气候区相变蓄能新风预处理系统节能性分析[J].重庆大学学报,2022,45(S1):156-162.
- [37] 罗怡琳,许鸿翔,王勇.基于可再生能源的相变蓄能新风预处理系统的实验研究[J].制冷与空调,2021,35(4):467-473.
- [38] 高林.基于低温相变材料的新风蓄能器的优化[D].重庆:重庆大学,2021.
- [39] 高凤,冯璐,刘宾灿,等.国内外低能耗建筑研究标准体系发展综述[J].建筑节能,2023,51(12):123-128.
- [40] 沙岭村新农村建设工程通过北京市超低能耗建筑示范项目验收[J].建设科技,2019,(2):7.
- [41] 国靛青,孙阳.秦皇岛市“被动式—低能耗住宅”示范项目通过国家验收[J].建筑,2013,(24):35.
- [42] 孙文峰,姚海清,张文科,等.超低能耗建筑可再生能源系统的研究进展[J].区域供热,2021,(6):64-73.
- [43] 廉中秋.被动式超低能耗建筑的使用后评价研究[D].郑州:河南工业大学,2022.
- [44] 张静.被动式超低能耗建筑后评估研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2020.