寒地建筑外窗玻璃结露机理、影响因素及多层级防控体系研究

阿克良

（甘肃铭轩建创工程有限公司，甘肃 临夏 731200）

摘 要 我国寒地面积广，冬季气温低、霜冻期长且室内湿度偏高的气候特点使建筑外窗玻璃结露现象时有发生。外窗玻璃结露不但会使窗户玻璃起雾、滴水，影响建筑室内的采光和居住舒适度，而且长期结露还会造成窗框腐蚀、墙体霉变、保温层受潮失效等问题，加剧建筑能耗损耗，缩短围护结构使用寿命，严重时还会滋生霉菌危害人体健康。为了系统解决寒地建筑外窗结露问题，本文以寒地气候特征和建筑外窗构造特点为依托，从热力学和物理机理入手，对外窗玻璃结露的形成原因进行分析，从环境、材料、构造、运维四个方面整理出影响结露的主要因素。根据寒地建筑的建设和维护实际情况，创建包含前期设计、材料选用、施工控制、后期运维等各个层面的结露防控体系，确定各个层面的实施步骤和技术要点。研究结果旨在为寒地建筑外窗防结露设计、改造和运维管理提供理论参考，有效减少建筑结露病害的发生率，提高寒地建筑围护结构保温防潮性能，实现建筑节能和居住品质的双提升。

关键词 寒地建筑；外窗玻璃；结露机理；气候环境；门窗材料

中图分类号：TU111.43 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.29.041

0 引言

寒地一般是指我国东北、内蒙古、新疆北部等冬季漫长、极端低温的严寒和寒冷地区，冬季室外最低温度可达 -30 ℃以下，室内外温差普遍大于 30 ℃，昼夜温差大、空气干燥但是室内湿度偏高，特殊的气候条件使得建筑外窗成为围护结构中热量流失最严重、结露病害最突出的薄弱部位。建筑外窗是室内外热量、水汽交换的主要通道，保温隔热性能远不如墙体、屋面等围护结构，冬季室内高温高湿空气接触到低温的玻璃表面时，很容易产生水汽凝结，出现结露、结霜甚至结冰的现象。因此，寒地建筑外窗玻璃结露多层级防控体系的研究意义重大。

1 寒地建筑外窗玻璃结露机理

1.1 露点温度临界特性机理

露点温度是决定玻璃表面是否会结露的主要临界参数，指空气中水汽含量与气压保持不变时，空气冷却至水汽达到饱和状态的临界温度。当物体表面温度低于空气露点温度时，一定会出现结露现象。寒地冬季室内环境比较稳定，人体呼吸、地面蒸发、生活用水等不断产生水汽，使室内空气保持一定的湿度，一般相对湿度在 40% ～ 65% 之间。

在室内温度不变的情况下，空气的露点温度固定，但外窗玻璃直接与室外低温环境接触，玻璃表面温度会随着室外温度的大幅度下降而降低。当玻璃内表面温度低于室内空气的露点温度时，空气里不能再容纳饱和水汽，多余的水汽就会在玻璃表面凝结成微小的水珠[1]。寒地冬季室内外温差大，玻璃内表面温度远低于露点温度，比其他地区结露临界条件更容易达到，结露量大、持续时间长，这也是寒地建筑外窗结露常态化的根本原因。

1.2 围护结构热量传递机理

建筑外窗玻璃为薄壁透明围护结构，导热系数远远大于墙体、保温板材等保温构件，热阻很小，是建筑热量散失的薄弱节点。寒地冬季室内为采暖环境，温度保持在 18 ℃～ 24 ℃之间，室外低温冷空气不断通过外窗玻璃的传热而进入室内。热量通过玻璃从室内传到室外，符合稳态导热规律，玻璃各个面的温度呈梯度分布，外表面温度接近室外气温，内表面温度远低于室内空气温度。普通单层玻璃热阻很低，热量传递快，内表面温度下降很大，极易降至露点温度以下。即便采用中空玻璃、双层玻璃，若存在密封失效、气体层厚度不足、间隔条导热系数过高等问题，也会

作者简介：阿克良（1995-），男，本科，工程师，研究方向：建筑工程。

出现快速散热现象，导致玻璃内表面低温结露。由于持续的热量流失，玻璃表面一直处在低温状态，给结露现象的持续发生打下了温度基础。

1.3 室内水汽扩散与附着机理

水汽不断扩散、附着是结露形成的基础。寒地冬季室外空气干燥、水汽含量很低，室内密闭采暖环境通风不良，室内产生的水汽不能及时排出，不断积聚形成湿热空气层[2]。根据流体运动规律可知，室内湿热空气密度小，会向上流动并聚集在建筑上部空间，外窗玻璃垂直分布，和室内湿热空气充分接触。当湿热空气流过低温玻璃表面的时候，空气流速变慢，水汽分子和玻璃表面相互碰撞附着在玻璃表面形成薄水膜。随着水汽一直附着、聚集，微小水珠不断融合、变大，最后就形成了可以看见的结露滴水。玻璃表面光滑、附着力强，水珠不易扩散挥发，会持续积聚留存，低温环境下还会进一步冻结形成霜层，霜层融化后又会加重结露积水问题，形成恶性循环。

2 寒地建筑外窗玻璃结露影响因素

2.1 气候环境因素

气候环境是造成寒地建筑外窗结露的主要外部原因，具有客观性、不可控性的特点，主要包含室外温度、室内外温差、空气湿度、通风状况这四个关键指标。室外极端低温是结露的必要条件，寒地冬季寒冷而漫长，低温持续时间长，极端低温天气所占比例大，室外温度越低，玻璃内表面降温幅度越大，越容易超过露点温度，结露现象就越严重。其次，室内外温差直接影响热传递效率，寒地冬季采暖期室内外温差一般在25 ℃～40 ℃之间，温差大导致外窗玻璃热量迅速流失，玻璃表面一直保持低温状态，结露概率大大增加。再次，室内空气湿度影响露点温度，室内湿度越大，空气露点温度越高，玻璃表面就越容易达到结露临界条件；寒地冬季建筑密闭采暖，通风次数少，室内水汽积聚，相对湿度很容易超标，引起结露[3]。通风条件不佳会加剧室内水汽积聚，阻碍室内外水汽交换，使湿热空气持续与外窗玻璃接触，导致结露现象反复出现。

2.2 门窗材料因素

外窗玻璃、窗框型材、密封材料的性能是决定外窗保温防潮能力的关键，也是结露防控的内部主要因素。玻璃材料方面，普通单层平板玻璃导热系数大、热阻小，保温性能差，是寒地建筑结露的主要材料原因；常规中空玻璃如果空气层厚度不够、玻璃原片质量不好或者使用导热系数高的间隔条，就会导致中空层保温失效，出现温度衰减过快、局部低温结露的情况；低辐射玻璃、真空玻璃等节能玻璃如果选型不当、参数不匹配，也不能起到防结露的作用。

窗框型材以铝合金、铜合金等金属型材为主，导热系数大，容易产生热桥效应，窗框部位温度远低于玻璃区域，是结露、结霜的高发区；普通塑料型材、木质型材保温性能较好，但老化后易出现变形、开裂，影响保温效果。密封材料中密封胶、密封条的老化、开裂、脱落会造成外窗气密性、水密性降低，室外冷风渗透、室内水汽外溢，破坏外窗保温密闭环境，引起局部结露。同时劣质密封材料耐低温性能差，在寒地低温下容易硬化失效，从而加剧结露问题。

2.3 构造设计因素

建筑外窗的构造设计缺陷是造成结露问题频繁发生的又一重要人为因素，主要表现在窗型设计、节点构造、热桥处理、窗墙配比这四个方面。在窗型设计方面，一些建筑为了达到采光的效果，盲目增大外窗的面积，使用落地窗、大跨度飘窗等，不仅扩大了外窗散热面积，也削弱了建筑整体保温性能，进而扩大了结露发生的区域。在节点构造方面，外窗和墙体连接节点没有设置保温层、防水隔汽层，窗框和墙体的缝隙填充不密实，会形成冷热交换通道，引起节点局部结露；窗台、窗楣没有设置排水坡度、滴水线，结露积水不能及时排出，容易造成积水回流、滞留，加重玻璃受潮结露[4]。在热桥处理方面，大部分建筑外窗安装时忽略热桥阻断设计，金属窗框、固定连接件等没有做保温隔断处理，热桥效应明显，造成局部温度急剧下降，出现局部结露、结霜病害。窗墙比不合理，过度增大窗墙比，没有结合寒地气候特点优化围护结构配比，会整体降低建筑保温性能，加重外窗结露问题。

3 寒地建筑外窗玻璃结露多层级防控体系

3.1 前期设计优化，源头规避结露隐患

设计阶段是结露防控的关键源头，要根据寒地气候特点，从窗型设计、构造改良、热桥阻断、通风设计四个方面展开专项改良，从根本上削减结露出现的可能性。首先，对窗墙比和窗型进行优化设计，严格按照寒地建筑节能设计标准控制最大窗墙比，严禁无节制地增大外窗面积；尽量选用小分格、规整的窗型，减少大跨度飘窗、落地窗的使用，平衡采光与保温要求，缩小散热面积。其次，在窗框和墙体连接节点上增设保温岩棉、聚氨酯保温层，设置防水隔汽膜，防止水汽渗透和热量流失，规范设计窗台、窗楣的排水坡度和滴水线，保证结露积水可以及时排出，防止积水滞留。再次，要加强热桥阻断设计，金属窗框、固定五金件

均需要设置隔热隔断结构，采用断桥式型材，消除热桥效应，提高窗框区域保温性能，防止局部低温结露。最后，对室内通风进行优化，根据寒地建筑的特点设置机械通风系统、新风系统，预留自然通风通道，保证冬季密闭采暖环境下的定时通风换气，及时排出室内多余的水汽，降低室内空气湿度，提高结露临界阈值。

3.2 材料科学选型，强化保温防潮性能

材料性能是结露防控的基础保障，要根据寒地低温、高温差、高密闭的特点来制定专项材料选型标准，选用高保温、高气密、耐低温的外窗材料。玻璃选型上严寒地区选用真空玻璃、三玻两腔 Low-E 中空玻璃，寒冷地区选用双玻中空 Low-E 玻璃，合理控制中空层厚度，用暖边间隔条代替传统的金属间隔条，大幅度降低玻璃的导热系数，提高玻璃的整体热阻，防止玻璃内表面温度过低。型材选型上全部采用断桥铝合金型材、高性能塑钢型材，严禁使用普通非断桥金属型材，保证型材导热系数达到寒地建筑节能要求，从根本上消除窗框热桥结露现象。密封材料选用耐低温、高弹性、耐老化硅酮密封胶、三元乙丙密封条，保证低温下不硬化、不开裂，持续保持外窗气密性、水密性[5]。同时，严格控制进场材料的质量，对玻璃、型材、密封材料进行低温性能、保温性能抽样检测，不合格材料不得进入施工现场，保证材料适应寒地极端气候环境。

3.3 施工精准管控，杜绝工艺性结露隐患

施工阶段的标准化控制是防止工艺缺陷、杜绝后期结露的重要环节，要对外窗加工、安装、密封、节点处理全过程制订专项施工控制标准。首先，规范玻璃加工工艺，中空玻璃采用双道密封工艺，保证密封层完整密实，杜绝中空层进水、进尘、漏气问题，出厂前做密封性、保温性能检测。其次，对外窗安装精度进行精准控制，保证窗框安装平整、垂直、缝隙均匀，防止由于安装偏差造成密封不严。规范缝隙填充和密封施工，窗框与墙体之间用聚氨酯发泡保温材料饱满填充，外侧涂抹耐候密封胶，内侧做隔汽密封处理，实现保温、密封、防水一体化；所有的拼接缝隙、五金连接点位都必须进行精细化密封，防止冷风渗透、水汽滞留。最后，加强施工验收控制，对外窗保温构造、密封性能、节点处理、排水构造做专项验收，重点检查热桥部位、缝隙密封薄弱点位，及时整改施工缺陷，防止工艺性隐患留有后患，保证施工质量符合防结露设计要求。

3.4 后期运维提质，常态化防控结露病害

后期运维属于长效防控结露的关键部分，需要创建常态化的、标准化的运维管理体系，借助环境调节、定时检修、专项改造、规范使用这四个途径，不断保持外窗防结露性能。首先，改善室内环境调节，冬季采暖期合理控制室内温湿度，利用新风系统、定时开窗通风等手段把室内相对湿度控制在 30% ～ 50% 的合适范围之内，防止湿度过高造成结露现象；同时注意室内外温差不能过大，减少室内外温差，减缓热量流失的速度。其次，建立定期检修制度，每季度、冬季采暖期前后对建筑外窗进行全面检查，重点检查密封胶条、密封胶老化开裂情况，玻璃破损、中空层失效问题，窗框变形、缝隙渗漏隐患，发现问题及时维修更换，保证外窗保温密封性能。再次，推进老旧外窗专项改造，对寒地既有老旧建筑单层玻璃、非断桥型材、密封失效外窗进行节能改造，更换高性能保温外窗，增设保温节点构造，消除老旧设备结露隐患。最后，规范用户使用管理，普及寒地建筑采暖期通风、湿度控制常识，杜绝长期密闭不通风的使用习惯，从使用端减少结露诱因，实现结露长效防控。

4 结束语

多层级防控体系从源头优化设计、中端严格控制质量、末端长效运维三个方面入手，对寒地建筑外窗结露问题进行系统、全方位的防控，很好地解决了目前单点防控技术的不足。经过该体系的落地执行，明显改善了寒地建筑外窗保温、气密、防潮性能，大大削减外窗结露病害的发生概率，消除结露引发的墙体霉变、构件腐蚀、能耗上升等状况，切实提升寒地建筑居住舒适度和耐久性。未来可以结合寒地不同区域的气候特点，对防控参数进行进一步的优化，研发适合寒地使用的超低能耗防结露外窗技术，为寒地建筑绿色节能、高质量发展提供更好的技术支持。

参考文献：

[1] 杨宜儒.严寒地区被动式超低能耗建筑外窗节能模拟研究 [D]. 沈阳 : 沈阳建筑大学 ,2024.
[2] 陈锦远,孙天慧.肉食品加工厂分割车间观察窗结露问题的研究 [J]. 冷藏技术 ,2024(04):5-10.
[3] 张锐.基于全生命周期的严寒地区外窗物理性能优化研究 [D]. 哈尔滨 : 哈尔滨工业大学 ,2023.
[4] 刘晔 , 张雅杰 , 朱林.严寒地区建筑物外窗玻璃结霜防霜问题 [A]. 全国暖通空调制冷 2002 年学术年会论文集 [C]. 中国建筑学会暖通空调专业委员会、中国制冷学会第五专业委员会 ,2022.
[5] 于中源.严寒地区近零能耗建筑外窗节能技术优化研究 [D]. 沈阳 : 沈阳建筑大学 ,2022.