

# 建筑中空玻璃腔体内部起雾原因分析

杨帆

杨恣信息技术(上海)有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i11.5018

**[摘要]** 中空玻璃在建筑节能与隔声领域有着广泛应用,建筑中空玻璃腔体内部起雾对其性能、寿命及建筑外观均有较大负面影响。受限于当前行业对中空玻璃腔体起雾机理认知的局限性,使得中空玻璃起雾问题成为困扰行业发展的一项重要质量问题。本文拟通过揭示中空玻璃内部起雾本质规律,为优化中空玻璃生产工艺、提升耐久性提供理论支撑,推动建筑节能材料技术发展。

**[关键词]** 中空玻璃; 腔体内部; 起雾机理

中图分类号: O6-336 文献标识码: A

## Analysis of Internal Fogging Mechanisms in Building Insulated Glass Cavity

Fan Yang

Yangzi Information Technology (Shanghai) Co., Ltd.

**[Abstract]** Insulated glass is extensively utilized in building energy conservation and sound insulation applications. Internal fogging within the cavity of such glass significantly compromises its performance, lifespan, and architectural aesthetics. Due to current industry limitations in understanding the fogging mechanisms, this issue has emerged as a critical quality challenge hindering industry progress. This study aims to elucidate the fundamental principles of internal fogging in insulated glass, providing theoretical foundations for optimizing manufacturing processes and enhancing durability, thereby advancing the development of energy-efficient building materials.

**[Key words]** insulated glass; cavity interior; foaming mechanism

### 引言

在建筑节能理念持续深化与绿色建筑快速发展的背景下,中空玻璃凭借优异的保温隔热、隔声降噪性能,成为现代建筑门窗、幕墙的核心节能材料,广泛应用于住宅、商业建筑及公共设施领域,对降低建筑能耗、提升室内舒适度发挥着关键作用。当前行业内对中空玻璃起雾机理的研究多聚焦单一因素,缺乏对材料、工艺、使用环境及标准规范的系统性分析,且现有国标对起雾判定、耐久性测试的规定与实际工况存在脱节,难以从根源上解决起雾隐患。

### 1 中空玻璃的结构组成与核心功能

中空玻璃是由两片或多片玻璃以有效支撑间隔分离,并在周边采用密封材料密封,使玻璃层间形成干燥气体腔体(或惰性气体腔体)的复合玻璃制品,其结构组成与核心功能紧密关联,具体如下:

1.1 结构组成。中空玻璃的结构是实现其功能的核心载体,主要由玻璃基板、间隔支撑系统、密封系统三大关键部分构成,各组件协同作用以维持腔体的稳定性:

(a) 玻璃基板: 作为中空玻璃的主体结构,通常采用浮法玻璃、钢化玻璃、夹层玻璃或低辐射(Low-E)镀膜玻璃等,厚度多

为5-12mm。(b) 间隔支撑系统: 包括间隔条和干燥剂; 间隔条多为铝制、不锈钢或暖边间隔条(如复合材料间隔条),其作用是保持玻璃层间的固定距离(腔体厚度通常为9-20mm),同时为密封系统提供支撑。(c) 密封系统: 是保障腔体密封性的核心,通常采用“双道密封”设计:

第一道密封(primary seal): 多为丁基橡胶,具有极低的水蒸气透过率,主要作用是防止气体和水分渗透,确保腔体的初始密封;

第二道密封(secondary seal): 常用聚硫橡胶或硅酮密封胶,用于增强结构强度,抵抗外界压力(如风压、温度变化引起的热胀冷缩),防止间隔条与玻璃基板脱离。

1.2 核心功能。中空玻璃的功能源于其“双层/多层玻璃+干燥气体腔体”的结构设计,通过物理阻隔与能量传递控制,实现多重性能提升,核心功能体现在以下方面:

(1) 优异的保温节能性; (2) 良好的隔声降噪性; (3) 防结露与透光性平衡; (4) 提升建筑安全性与耐久性。

### 2 中空玻璃腔体内部起雾现象的定义与表现形式

2.1 定义。中空玻璃腔体内部起雾(也称内部结露),是指密封失效导致外界水汽侵入中空玻璃干燥腔体,在温差作用下,水

汽在两片玻璃内表面凝结成雾、水珠、冰霜或水痕的现象。它是中空玻璃密封系统失效的核心标志。

2.2表现形式。雾气/水珠/冰霜只出现在两层玻璃之间的中空层内,无法从室内/室外任何一侧擦拭干净。

初期:均匀/不均匀雾状白斑、朦胧感,遮挡视线。

中期:细小水珠、水膜,沿玻璃内表面流淌。

后期:大面积结霜、结冰、积水,甚至出现霉斑、污渍、水痕残留。

时间规律上,昼夜温差大、室外低温的秋冬/清晨最明显;温度回升后可能暂时消散,但会反复出现。

常伴随密封胶开裂/老化、惰性气体泄漏、保温/隔音性能下降等。

### 3 起雾对中空玻璃性能的影响

3.1保温隔热性能大幅下降。中空层雾化表明干燥剂失效或密封性受损,干燥空气/惰性气体被破坏,内部空气湿度升高,水汽可降低中空层隔热效果,使整体传热系数升高,影响节能效率。冬季更易结露结霜,室内外热量快速传导,能耗增加;

3.2透光与视觉效果完全破坏。玻璃内表面长期朦胧、发白、有水痕、污渍;无法擦拭,严重影响室内自然采光、美观、观景和视觉效果;

3.3玻璃与构件加速腐蚀、老化。水汽长期腐蚀铝间隔条、密封胶的老化、分子筛过饱和失效;可能出现型材金属构件锈蚀、锈斑、霉变、密封胶开裂;甚至引发玻璃表面霉变、结垢等,整窗寿命大幅缩短;

### 4 建筑中空玻璃内部起雾失效原因分析

4.1行业标准对起雾界定的边界不足。(a)定义与判定模糊、无分级:虽然国标GB/T 11944-2025中明确在中空玻璃的15年寿命中不能出现结露现象,但更细化的7.5水汽密封耐久性能条款中,对加热制冷温度范围过小( $-18^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}\sim 53^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ ),按中国目前气象带条件下建筑用中空玻璃实际使用工况中玻璃表面高温远不止 $53^{\circ}\text{C}$ ;

无“起雾/结露”明确定义,单点测试不能反映实际使用中的渐进式起雾;

无起雾程度分级(轻微/中度/严重),和时间阈值(如使用几年内起雾算不合格);

(b)测试方法与生产实际脱节:国标GB/T 11944-2025,7.5水汽密封耐久性能条款中,试样要求固化7天以上,实际中空玻璃的生产加工周期很难控制满足固化7天的要求;

密封性测试仅能做实验室静态测试,不能模拟现场温差循环以及由此导致的泵吸效应、风压、紫外线、安装应力等真实工况;

无现场快速判定方法(如腔体湿度、密封完整性),只能靠肉眼观察,无量化指标;

(c)配套标准缺失、门槛低:国标GB/T 29755-2013无长期耐久性、热循环、界面粘结强制要求,劣质胶易通过检测;

暖边间隔条、复合密封系统无统一兼容性标准,材料匹配失

效难追责;

安装环节无窗型材槽口区域密封防水、应力控制等的专项标准,现场失效难界定责任;

4.2起雾防控存在核心技术瓶颈。(a)密封系统:长期可靠性难突破:密封胶型选择不当:密封胶一般为高分子聚合物,密封胶两侧存在逸度差(压差或浓度差)的情况下,在逸度较高的一侧,气体分子(氩气、空气和水)能够进入固体聚合物中,移动并穿过聚合物链阵从逸度较低的一侧释放出来。气体渗透系数较大的硅酮密封胶,易出现密封性不良、中空玻璃露点上升、结露或结霜甚至进水等现象。

品牌选用:选用掺白油密封胶,白油与丁基胶相溶,导致密封胶流淌失效;

加工工艺:基材粘结面清洁度不够,密封胶混胶比例不当、清洗设备溶剂未挥发干净或加工养护条件不达标均容易导致密封胶失效;

胶层厚度:国标GB/T11944-2025中规定的密封胶厚度均为下限指标,工厂施打时,往往很难控制密封胶层厚度。

密封缺陷:丁基胶易断涂/流淌、二道胶易开裂;热胀冷缩“泵吸效应”撕裂密封,水汽持续渗入;

兼容性:暖边条与密封胶适配性差,界面易形成水汽通道;国产胶长期老化后水汽渗透率飙升;

耐候性:国产胶难通过10000次热循环( $-40^{\circ}\text{C}\sim +70^{\circ}\text{C}$ ),5-7年即出现微裂纹;

(b)间隔条系统:连续稳定性难维持;拼接断点:国标中未对间隔条拼接断点部位进行密封和结构加强约束,出现在中空玻璃下部的拼接断点加剧了密封缺陷的显化;

(c)玻璃系统:变形控制意识薄弱:刚度:较多家装门窗公司玻璃设计选用未达到国标基准,玻璃尺寸偏大,玻璃厚度偏薄,挠度值变大,对密封胶都有破坏作用;未采用钢化玻璃,使玻璃受压挠度变形量大,增加了中空玻璃腔体的泵吸效应;

隔热性能:普通玻璃受外界环境温度变化大,未采用高隔热性Low-E镀膜玻璃,增加了中空玻璃腔体的泵吸效应;

(d)型材系统:型材内腔底部必定积水:槽口设计:一般型材槽口设计为压力平衡腔+排水腔,内外气压平衡,雨水靠重力排出。重力排水前提是内腔积水需要达到一定高度才能形成重力流;但腔体截面尺寸有限,表面聚酯粉末涂层分子结构中含有羟基(-OH)、酯基(-COO-)等极性基团,会与水分子形成氢键,具备一定亲水性,水滴接触角通常在 $60^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 之间,故在表面张力作用下,水在重力作用小于表面张力作用时无法被排净。尤其进行高性能门窗设计时,为提高型材隔热性能,交联聚乙烯密封胶的闭孔不透水特性也降低了腔体内水和水汽移动效率。常规普通铝合金型材槽口在玻璃入槽后,腔体内部为高湿工况,从而导致玻璃腔体内外水汽压差增大;

玻璃垫块/定位块安装缺陷:玻璃入型材槽口时,如果玻璃垫块/定位块未充分拖住玻璃下口,导致玻璃偏心受力,导致密封胶受拉应力过大而失效;

(e)干燥剂系统: 长效吸湿难保障: 3A分子筛瓶颈: 静态吸附量 $\geq 20\%$ 为优, 但填充率不足、暴露超时、劣质品吐湿, 2-3年即饱和;

无动态补偿: 腔体一旦进水, 干燥剂无法再生、无法补充, 只能坐等失效;

(f)工艺与环境: 过程控制难稳定: 手工/半自动化为主: 丁基胶涂布、分子筛灌装、合片精度差、一致性低, 易留隐患;

生产环境难控: 合片室湿度超标、正压不足, 初始水汽带入腔体, 出厂即埋下隐患;

清洁剂失效: 采用非中性不易挥发的清洁剂, 会在玻璃表面形成残留, 有可能与密封胶发生反应, 或者降低密封胶与玻璃表面的亲油浸润性, 从而影响玻璃边部密封胶与玻璃表面的粘结强度;

安装应力破坏: 框架变形、压块不当导致玻璃边部受力, 密封胶疲劳开裂;

(g)长效技术: 成本与普及矛盾: 充氩气与智能密封: 氩气浓度 $\geq 85\%$ 可延缓失效, 但充气涉及成本增加、检测设备贵; 即便要求充氩气, 配置氩气检测设备, 对氩气泄漏率仍难以检测, 长期效果难保证;

在线监测: 腔体湿度/压力传感器成本高、安装复杂, 暂无民用普及方案;

4SG/超级间隔条: 一体化柔性密封可抗泵吸, 但柔性密封材料成本高、设备投入大, 中小厂难以普及; 且4SG柔性间隔条目前也存在边部内溢变形的质量客诉风险, 目前国内在幕墙项目上幕墙中空玻璃尚处于禁用4SG柔性间隔条的阶段, 该技术仍具备较大的成长空间;

## 5 腔体内部起雾失效与防控

从失效防控的角度分析, 如需要有效防控中空玻璃腔体漏气, 推荐采用如下控制措施: 有效双道密封+有效连续间隔条+Low-E膜+钢化玻璃+玻璃足够刚度+暖边+腔体微发泡找坡+高纯度氩气+足量干燥剂+立式合片工艺+在线检测;

(a)有效双道密封: 需要控制玻璃表面洁净度, 优秀的密封胶供应商提供的合格的聚硫密封胶, 规定的打胶温湿度条件打胶及养护; 确保第一道密封胶丁基胶涂胶均匀, 涂胶截面要一致, 宽度应按4mm正差控制, 中间无断线、气泡以及影响美观的杂质, 四角丁基胶条应互相接触压合, 除膜宽度需要足够, 不得出现丁基胶压膜现象。第二道密封胶采用双组分聚硫密封胶, A、B组分应严格按照生产厂商提供的混合比例配比, 两组分应充分混合均匀, 打胶量准确, 宽度应按8mm正差控制无气泡, 与间隔条不应接触且应有隔离。

(b)有效连续间隔条: 用以支撑密封胶落地的间隔条本身连接应达到密封条件。需要确保间隔条完整连续且拼接点在中空玻璃腔体上部中间位置, 周长超过3米的中空玻璃间隔条应确保拼接点在玻璃两侧的上部, 拼接点应可靠密封, 不采用插接式间隔条;

(c)玻璃足够刚度: 用以支撑密封胶落地的玻璃本身刚度需

足够。采用钢化玻璃, 玻璃板面面积应符合国标限值条件, 超高层玻璃还需通过荷载变形量计算, 减少因玻璃刚度不足导致的泵吸效应对密封胶的失效影响。

(d)Low-E膜: 采用Low-E低辐射玻璃, 利用Low-E低辐射的反射特性, 降低中空玻璃的总体的温差热量变幅, 减少因温差热量变幅导致的泵吸效应对密封胶的失效影响。

(e)暖边: 采用技术成熟的复合暖边间隔条, 利用复合暖边间隔条聚丙烯的隔热特性以及不锈钢的隔气特性, 降低中空玻璃的总体的温差热量变幅和气体渗透率, 减少因温差热量变幅导致的泵吸效应和气体渗透对密封胶的失效影响。

(f)腔体微发泡找坡: 采用型材内微发泡/外找坡工艺来降低腔体内水汽压, 提高型材腔体隔热性, 降低气体对流形成热扰动的同时, 兼具腔体气密+排水要求, 减少腔体积水导致的腔体内部高湿工况形成的玻璃腔体内外水汽压差导致水汽渗透密封胶的玻璃起雾失效影响。

(g)高纯度氩气: 采用高纯度氩气灌注中空玻璃, 利用氩气的热惰性, 降低中空玻璃的总体的温差热量变幅。即便中空玻璃密封体系有密封失效导致的渗漏现象, 也需要在氩气渗漏完毕后, 且在特定高湿水汽进入中空腔体的条件下才会发生起雾失效现象, 减少因温差热量变幅导致的泵吸效应对密封胶的失效影响, 等于额外延长了中空玻璃的使用寿命。

(h)足量有效干燥剂: 采用足够干燥孔径为0.3nm的堆积密度约为0.68-0.72g/cm<sup>3</sup>的3A级钾型沸石分子筛, 确保25克/米以上足够量的分子筛灌装, 控制合片室温度 $\geq 26^\circ$ , 湿度 $\geq 50\%$ ; 微正压, 拆封、灌装至合片完成时间严格控制在30分钟内, 确保分子筛的水汽吸附能力有效。

## 6 结论

综上所述, 中空玻璃密封胶失效的原因是多方面的, 在实际应用过程中, 应优先选用有效双道密封、有效连续间隔条、Low-E膜、钢化玻璃、玻璃足够刚度、暖边、腔体微发泡找坡、高纯度氩气、足量干燥剂、立式合片工艺、在线检测等涉及门窗设计生产安装、玻璃深加工、密封胶原材料多条线多门类多产品的设计构造、材料选型、加工工艺、检测控制、有效运维等综合集成技术来实现有效的预防中空玻璃腔体起雾的方法, 延长中空玻璃的有效使用寿命。

## [参考文献]

[1]程鹏, 邢峰群, 秦灵芳. 中空玻璃密封胶失效原因分析及预防措施[J]. 门窗, 2013 (06): 36-39.

[2]蔡镛. 中空玻璃作的失效原因分析及预防措施[J]. 江西建材, 2007(04): 38-40.

[3]王文高, 张红. 中空玻璃产品检验中常见质量问题及原因分析[J]. 玻璃, 2011(5): 41-45.

## 作者简介:

杨帆(1975--), 男, 汉族, 上海人, 硕士, 职称职务: 副高, 中共党员, 研究方向: 住建全产业链技术。