

浅谈被动式建筑外窗

1 被动式建筑的概念

在新能源时代还未到来的今天，中国作为世界上最大的发展中国家和人口最多的国家，能源形势十分严峻。世界可持续发展委员会的调研数据显示：在人类建筑、工业、交通三大能耗中，建筑能耗占比 40%，而且在城市范围不断扩大、旧房改造急须开展、新建筑不断涌现的当下，建筑能耗也必将不断增长，因此降低建筑能耗、实施建筑节能对于促进能耗降低、能源合理利用以及推进经济社会发展，就显得至关重要。在保证合理舒适度的情况下，最大可能地降低建筑能耗已经成为国策。

如此来看，在欧洲国家率先倡导的被动式建筑理念尤为适合推动我国的建筑节能工作。

我国在“十三五”规划和《中共中央国务院对于城市发展的若干意见》中就进一步强调了节能减排、因地制宜、理性发展等理念，并且专门提到了被动式建筑等绿色发展理念。住建部对被动式超低能耗建筑的发展给予了高度重视，2015 年颁布了《被动式超低能耗绿色建筑技术导则（试行版）》，被动式超低能耗建筑正在从示范项目逐步走向规模化和市场化，这无疑从政策上大力推动了中国被动式建筑的发展。

被动式建筑经过国内外 30 余年的发展，已形成一整套完整的技术体系。它改变现有的建筑建造模式，充分利用太阳、人体、家电等释放的热量，重构人、建筑、气候之间的关系，实现建筑全生命周期内的低能耗，最大限度地减少温室气体排放。

2 被动式建筑的五个基本要素

为了实现被动式效果，被动式建筑应具有以下五个基本要素：

(1) 高性能的保温体系，建筑物所有外围护结构必须具备优良的保温性能， $U \leq 0.15 \text{W} / \text{m}^2 \text{K}$ ；

(2) 高效热回收新风系统，有效的热回收新风系统是保证室内良好的空气质量和降低能耗的重要因素， $\Psi_a \leq 0.01 \text{W} / \text{m}^2 \text{K}$ ；

(3) 极佳的气密性，被动式建筑的气密性至关重要，避免产生冷热气体的对流，造成热量流失， $N_{50} \leq 0.6 / \text{h}$ ；

(4) 无热桥设计，所有边部、角落、连接处和渗透物地方必须在设计和施工时要格外谨慎，避免热桥产生，要削弱围护结构中的传热能力，防止形成热流相对密集，同时也要控制热量的流失， $\Psi_a \leq 0.01 \text{W} / \text{m}^2 \text{K}$ ；

(5) 高性能被动式门窗体系，门窗必须有良好的保温隔热效果，配置充氧气、镀 Low-E 膜的高保温隔热玻璃、窗框体采用超级保温材料，使其具有超强的保温性能， $U_w \leq 0.8W / m^2 K$ 。

其中，高性能的被动式建筑外窗也就是被动式建筑外窗，则是被动式建筑透明围护结构的重要组成部分。在普通建筑中，透过外窗的散热损失占整个外围护结构能量损失的 40% 左右，以此换算，建筑外窗能耗几乎占据社会总能耗的 20%。因此，被动式建筑外窗是实现被动式建筑的先决条件，被动式建筑外窗材料的选择、加工、安装对于被动式建筑就显得格外重要。

被动式建筑外窗其实就是指符合被动式建筑用窗标准的窗产品，整窗具有超强的隔热保温系数、超强的气密性能， U_w 值需小于 $0.8w / (m \cdot K)$ 。

“被动房之父”菲斯特教授曾在《成功设计和建造被动房质量保证指南》一书中指出：“被动式建筑用窗整窗传热系数小于 $0.85w / (m \cdot K)$ ，是基于内表面平均温度在设计条件下要高于 $17^\circ C$ 。”也就是说，外窗传热系数是根据内表面温度来确定的，即在不采暖的情况下，建筑外窗窗内部表面温度只有高于 $17^\circ C$ ，才能保证外窗内表面的热舒适度，这被称之为“热舒适度准则”。研究表明，在室内空气温度为 $20^\circ C$ 、围护结构内表面温度高于 $17^\circ C$ 时，人体才不会感受到明显的来自围护结构的冷辐射。因此，被动式建筑外窗除了需要适用被动式建筑外，还应该要保证宜人的室内气候并提供能量的正平衡。

3 使外窗符合被动式建筑外窗传热系数的三大要素

建筑外窗属于透明部分外围护结构，传热系数 U 值是考核门窗保温性能的关键指标。如何来降低整窗的传热系数 U 值？我们可以根据下面这个 U 值计算公式来进行逐步分析。

$$U_w = (U_g A_g + U_f A_f + \Psi_g L_g) / (A_g + A_f)$$

其中公式中的各项指标分别为：

U_w 为整窗的传热系数，单位是 $W / (m^2 \cdot k)$ ；

U_g 为玻璃的传热系数，单位是 $W / (m^2 \cdot k)$ ；

U_f 为窗框体的传热系数，单位是 $W / (m^2 \cdot k)$ ；

A_g 为玻璃可视面积，单位是 m^2 ；

A_f 为窗框体的可视面积，单位是 m^2 ；

Ψ_g 为玻璃间隔条相关的线性热传导系数，单位是 $W / (m^2 \cdot k)$ ；

L_g 为玻璃可视面边缘的长度，单位是 m 。

由这个公式可以看出，要想减低整窗传热系数，也就是 U 值，取决于窗框体的型材使用、玻璃以及中空玻璃间隔条这三个要素，接下来就针对这三个要素进行分析。

3.1 窗框体的型材使用

型材是外窗节能和防结露的重要部位，德国被动式建筑标准及我国相关标准中，要求型材的传热系数 $U \leq 1.3W / (m^2 \cdot k)$ 。目前我国主要的型材节能产品有多腔塑料（PVC-U）型材、高性能断热铝型材、铝木复合型材等。

PVC 材料隔热性能良好，但自身的强度不高且刚性差，所以为了满足被动窗标准，塑窗企业通过提高型材厚度、腔室层数，采用增强型非金属内衬、填充发泡聚氨酯材料等措施提高塑钢窗的保温性能。

铝合金型材由于本身具有较高的强度、耐候性能良好、成本较低等优势，但是隔热性能较差导致门窗整体的热工性能较差，为了满足被动窗的标准，需要采用断热桥措施，如采用新型高分子材料，增大隔热条宽度、在隔条之间填充发泡材料等方法，但这也加大了门窗的宽度。

铝木复合型材为框体材料的铝包木窗则在被动式建筑中的应用更为广泛。在 PHI（PassiveHouseInstitute，德国被动房研究所）官方网站上认证的被动窗，铝合金占比最少，其次是 PVC 窗，包含纯木、铝包木、塑包木等木窗类的占比近 60%，以大幅度优势胜出。可见木窗产品的开发在被动房领域是非常活跃的。

铝木复合型材的主材为木材，木材是天然的保温材料，用木材做被动窗有先天的优势：力学强度高、导热系数低、先天具环保性能和低碳特质。为了更好地提高门窗的整体性能，木材还可与铝合金、高分子材料等材料进行复合进一步提高门窗的整体性能。

以中国第一幢自主研发生产并通过 PHI 认证的森鹰 P120 被动式铝包木窗为例，其主体框体由进口实木与 PVC 塑料型材组合而成，外部再扣以铝材，该产品集成木材厚度采用 68mm。多腔 PVC 塑料型材的导热系数 λ 值为 0.18，多腔室的优化设计可以在最大限度上减少气体对流，有效提高保温性能。因塑料型材本身属于非主受力构件，可以适当减少型材壁厚。框体四边嵌 A 级防火聚氨酯绝热材料，它的导热系数 λ 值为 0.035，在窗体上墙安装完毕后被外墙的保温板完全覆盖，最大限度地减少因边框及边框与洞口之间的部位产生的热能或冷能损失。最后，框扇搭接的密封采用了四道密封胶条的设计，形成的三个密封腔室有利于减少气体的对流，整窗的气密性达到 0.16。通过检测，森鹰 PASSIVE 120 的技术指标均达到顶级标准。

同时，木材本身的可再生属性，使其和其他型材在原材制作过程中消耗地下能源的制作方式不同，这首先符合被动式建筑的降耗追求。木质框体的使用寿命长，从建筑外窗角度可配合被动式建筑实现超长期使用，不影响其被动式效果，进而降低其改造或重建所带来的消耗问题。

3.2 玻璃

玻璃占整个门窗面积的 75% 左右，所以其保温性能对整窗是否可以达到被动式效果也是非常关键的。外窗热保护性能的改善速度超出了其他所有建筑构件，外窗 U 值已降至 40 年前的 1/8。20 世纪 70 年代起德国的多数外窗采用单玻，其 U 值约为 $5.5\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ ，经过了 50 年的发展，目前已经从简单的浮法玻璃推进到了目前的三层中空保温玻璃。玻璃的保温性能是由玻璃厚度、镀膜性能、中空玻璃间隔条及间距、内充惰性气体等要素决定的。玻璃表面用于降低玻璃热辐射透过率的金属镀膜被称作低辐射 (LOW-E) 镀膜。镀膜可以有效降低对红外光谱的辐射，玻璃间的空腔内充填的惰性气体通常为氩气，与固体不同，气体的热损失则是气体层到达一定厚度以后气体的对流循环所引起的。氩气是一种惰性气体，氩气比空气重，可以减少玻璃内部对流，提高保温性能。所以，目前填充 90% 以上氩气、中空层间距在 15~18mm 的三层双 LOW-E 玻璃，便可使中空玻璃的中心 U_g 值达到 $0.5\sim 0.8\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$ 的水平。

但除了 U_g 值外，玻璃的太阳得热系数 g 值也不可以忽略， g 值代表正常入射角的太阳辐射的透射比例，窗玻璃应满足 $U_g: 1.6\text{W}/\text{m}^2\text{K}\cdot g \leq 0$ 。满足这一条件意味着通过窗口的太阳能集热超出窗口热损失的补偿需求。

3.3 暖边间隔条

为获得最佳的门窗热工性能，除了保证窗框及玻璃具备优良的保温特性之外，同时还需要降低玻璃边部的线性热传导系数 Ψ_g 。通过对一定的框玻比及长宽比的玻璃窗进行热工模拟计算，会发现热量通过玻璃边部流失的比例占通过整窗流失的比例可高达 20%，这对于整窗性能的影响是巨大的，因此需要使用暖边间隔材料替换冷边间隔材料，以最大限度地降低玻璃边部的线性传热损失。

传统的中空玻璃边部采用金属间隔条，因其传热系数较高，在玻璃边部形成了局部热桥效应，增大了玻璃边部的线性传热损失。暖边间隔条采用非金属材料，或部分金属材料，或低于铝金属传导系数的金属间隔条，使其热传导系数低于铝金属的导热系数。暖边技术的应用就是为了降低 Ψ 值，减少中空玻璃边缘的热量损失。

同时在 PHI 被动窗要求中，还对外窗的热舒适度做了定义，要求窗户外表面温度与室温平均值的偏差不得超过 4.2K，即 $|\Delta S| \leq 4.2\text{K}$ ；而通常玻璃边缘为温度最低点，也是最容易结露发霉的地方。因此，采用暖边可以有效地解决这个问题，预防整窗边部结露，以获得最佳居住舒适度。

4 保证被动式建筑外窗的整体气密性

具有高等级的气密性对于被动式建筑达到降耗目的起着关键性的作用，国际上对被动式建筑的气密性标准为 $n50 \leq 0.6 \text{ h-1}$ ，该公式中的 $n50$ 表示室内外的压差为 50Pa ， h-1 为建筑物每小时的换气数。高等级的气密性不是自然形成的，这需要在所有建造环节中进行相关考虑，进行精细化设计及施工。气密层必须是一个连续不间断的封闭层，而建筑外窗则是其中最薄弱的一个环节。

如何在制造环节使被动式建筑外窗满足被动式建筑窗洞口的气密性要求？这需要做到以下几点：

(1) 选用符合性能要求和被动式建筑外窗标准的系统组成材料；(2) 满足性能设计要求；(3) 进行系统拼接的方案处理；(4) 严格按照工艺进行各种铣槽及钻孔加工；(5) 合理配置高性能五金。

对于建筑外窗来说，安装是重中之重，这对于被动式建筑更是如此。一樘被动式建筑外窗在建筑上是否真的可以达到被动式效果，尤其是可否保证整体被动式建筑的气密性，外窗安装技术尤为重要。

(1) 采用整窗悬挂于墙体外表面的安装方式，保证传热系数 U_w ， $\text{installed} \leq 0.85 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{k})$ ；(2) 窗体侧面及上面采用专用 L 型角钢进行多点固定，满足窗体的承重要求；(3) 室内侧防水隔汽膜可有效防止水汽渗透，并保证气体交换率 $n50 \leq 0.6 \text{ h-1}$ 的气密性要求；(4) 室外侧防水透汽膜可有效防止水分进入，并保证室内的气体流通；(5) 专用 L 型角钢的隔热垫片置于钢件与墙体间，减小热损失，起到了断桥隔热的作用。

通过以上几点可以看出，被动窗的安装采用了最大限度降低热桥的安装方法，同时保证了被动式建筑外窗在安装层面上的高气密性。

5 结语

被动式建筑用窗无论是从高品质化的材质选择、极低的传热系数呈现，还是高标准的气密性要求、特殊的安装工艺上，都较之普通的建筑外窗有着极大的区别。

被动式建筑外窗是实现被动式建筑的先决条件之一，所以必须从门窗设计、材料选择、加工生产、节点处理、成窗安装方面予以重视。正是如此严苛的细节把控才使其可以安装在被动式建筑上，达到被动式建筑整体的被动式效果。