



顾泰昌

人造板材幕墙工程技术规范主编，中国建筑标准设计研究院副总工程师，教授级高级工程师，一级注册结构工程师。

ANALYSIS ON ARTIFICIAL PANEL CURTAIN WALL TECHNICAL STANDARD

人造板材幕墙工程技术规范要点解析

撰文 顾泰昌 中国建筑标准设计研究院

1 人造板材幕墙的定义及适用范围

1.1 人造板材幕墙的定义

人造板材幕墙 (Artificial Panel Curtain Wall)，即面板材料为人造外墙板 (除玻璃和金属与天然石材板以外) 的建筑幕墙。包括瓷板幕墙、陶板幕墙、微晶玻璃幕墙、石材蜂窝板幕墙、高压热固化木纤维板幕墙和纤维增强水泥板幕墙。

1.2 人造板材幕墙的适用范围

规范适用于非抗震设计和抗震设防烈度不大于8度抗震设计的民用建筑用瓷板、陶板、微晶玻璃板、石材蜂窝复合板、高压热固化木纤维板和纤维水泥板等外墙用人造板材幕墙工程。人造板材幕墙的应用高度不宜超过100m。

鉴于人造板材幕墙面板材料的特性和在超高层建筑中应用的工程经验比较少的情况，因此本规范对人造板材幕墙工程所适用的抗震设防烈度和应用高度进行了限制。当人造板材幕墙工程的应用高度超过本规范所适用的范围时，应根据工程实际进行专门设计。

2 人造板材幕墙面板材料特点

2.1 幕墙用人造板材与人造板的区别

“人造板材”幕墙并非“人造板”幕墙。人造板在《人造板及其表面装饰术语》(GB/T 18259-2000) 中的定义是：“以木材或其他非木材植物为原料，经一定机械加工分离成各种单元材料后，施加或不施加胶粘剂和其他添加剂胶

合而成的板材或模压制品。主要包括胶合板、刨花 (碎料) 板和纤维板三大类型”。人造板英文 Wood-based Panel，人造外墙板英文 Artificial Panel for Exterior Application，人造板材幕墙英文译名是 Artificial Panel Curtain Wall，而不是 Wood-based Panel Curtain Wall。

2.2 幕墙用人造板材的产品标准

人造板幕墙规范编制组成员分别完成了下列5项标准：《建筑幕墙用瓷板》(JG/T 217-2007)，《建筑幕墙用高压热固化木纤维板》(JG/T 260-2009)，《建筑幕墙用陶板》(JG/T 324-2011)，《建筑装饰用石材铝蜂窝复合板》(JG/T 328-2011)，《外墙用非承重纤维增强水泥板》(JG/T 396-2012)。

以上产品标准提供了建筑幕墙工程应用所需的板材弯曲强度、弹性模量、泊松比、吸水率、热及湿膨胀系数、耐化学腐蚀性和耐污染性等性能数据，推动了这些新型幕墙材料的国产化，为《人造板材幕墙工程技术规范》的编制打下了坚实的基础。

除已有建材行业标准《建筑装饰用微晶玻璃》(JC/T 872-2000) 外，标准中微晶玻璃是早期采用的单炉批自流平烧结法。目前微晶玻璃已有新的连续压延法新工艺和配方体系，亟需制定新的微晶玻璃产品标准以代替《建筑装饰用微晶玻璃》(JC/T 872-2000)，使微晶玻璃的力学性能、表面质量和装饰效果更好地满足建筑幕墙需要。

2.3 人造板材幕墙材料燃烧性能

幕墙所用材料应具有一定的防火功能以防止建筑物火灾蔓延,减少火灾造成的损失。但幕墙作为非承重的建筑外墙围护结构,又必须具有一定的热工性能,以达到建筑外墙的保温隔热要求,所以,幕墙用的材料不可能都是不燃材料。

人造板材幕墙材料品种多、材质差异大,六种面板材料中有A级、B1级和B2级三种:瓷板、陶板、微晶玻璃、纤维水泥板为A级不燃材料;石材蜂窝复合板为B1级难燃材料;高压热固性木纤维板普通型为B2级可燃材料、阻燃型为B1级难燃材料。

根据正在修订的《建筑设计防火规范》(GB 50016)的有关规定,考虑到材料燃烧性能和国内消防设备的可救援高度,本《规范》对幕墙主要材料燃烧性能作下述具体规定:1)幕墙支承构件和连接件材料的燃烧性能应为A级;2)幕墙用面板材料的燃烧性能,当建筑高度大于等于50m时应为A级;当建筑高度小于50m时应不低于B1级;3)幕墙用保温材料的燃烧性能等级应为A级;4)幕墙用防火封堵材料应符合现行国家标准《防火封堵材料》(GB 23864)和《建筑用阻燃密封胶》(GB/T 24267)的规定。

3 人造板材幕墙的分类及构造特点

3.1 开放式幕墙、封闭式幕墙

背后有实体墙的装饰型幕墙,包括下列两种幕墙:

(1)开放式幕墙:背部通风的外墙装饰层,即幕墙板块之间接缝不采取密封措施,不具有气密和水密性能。包括开缝式、板缝遮挡式、板缝搭接式、板缝嵌条式。围护墙体外的开放式装饰层幕墙,形成了遮阳、通风的空气间层,而进入空气间层内的少量雨水由自然通风的效果而蒸发走,有效地保护了背后的墙体系统。

(2)封闭式幕墙:幕墙板块之间接缝采取密封措施,具有气密和水密性能的建筑幕墙。包括注胶封闭式、胶条封闭式幕墙。

3.2 外墙挂板

背后没有实体墙的围护型幕墙,包括下列两种封闭式幕墙。

(1)单面板体系围护系统:只有一层面板构造的封闭式幕墙,类似围护型玻璃幕墙。

(2)外墙板和墙板集成一体化围护系统:外墙板和墙板及其连接件和保温防火材料等集成的一体化复合外墙系统,将是高层和超高层人造板材幕墙建筑工业化的发展方向,如混凝土外墙挂板、GRC外墙挂板等。但是本规范没有包括此内容。

4 人造板材幕墙的性能和构造设计特点

4.1 抗风压性能

背部通风的开放式人造板材幕墙:有关试验证明与封闭式幕墙比较,开放式幕墙承受的风荷载较低。但由于受到立面形状、板缝构造形式(对接、搭接)、开缝宽度尺寸、单位面积上缝长以及试验数据较少等各种因素的影响,目前尚无法给定统一的折减系数。在进行幕墙设计时,可根据工程实际情况,通过风洞模型试验确定折减系数。

4.2 热工性能

背后有实体墙的开放式幕墙:采用计算流体力学CFD软件模拟计算结果表明,板缝宽为10mm、空腔深度为100mm时,在不考虑太阳辐射的情况下,垂直板缝的室外风速分别为3m/s和5m/s时,空气间层内的平均风速分别为0.75m/s和1.2m/s,均达到了良好的通风状态。开放式幕墙的传热阻贡献可不考虑。

封闭式幕墙:(细化了《公共建筑节能设计标准》的相关规定)

(1)人造板材幕墙背后无其他墙体时,幕墙本身的保温隔热构造系统应符合建筑节能设计对外墙的传热系数要求。

(2)人造板材幕墙背后有其他墙体时,幕墙与该墙体共同组成的外围护结构,应符合建筑节能设计对外墙的传热系数要求。

带有封闭式人造板材幕墙的外墙系统,应按《民用建筑热工设计规范》(GB 50176)的规定,采用稳定传热计算公式进行多层围护结构热阻的计算。

4.3 构造设计

4.3.1 面板接缝设计

(1)瓷板、微晶玻璃幕墙可采用封闭式或开放式板缝。瓷板、微晶玻璃板是高温烧制的吸水率低、耐候性好的匀质材料,采用开放式和封闭式均可。

(2)石材蜂窝板幕墙宜采用封闭式板缝,也可采用开放式板缝。石材铝蜂窝板是石材面板与铝蜂窝板粘结而成的复合材料板

材,应优先考虑采用注胶封闭式,采用开放式则应进行封边防水保护处理。

(3)陶板、纤维水泥板幕墙宜采用开放式板缝,也可采用封闭式板缝。陶板的吸水率偏高,宜优先采用开放式板缝设计,对于吸水率较低(接近下限)的陶板,如建筑气候适合,也可采用封闭式板缝设计。纤维水泥板是含有有机合成纤维或纤维素纤维的吸水率较高的高压蒸汽养护的水泥板材,应优先考虑采用开放式,如环境适合并对板材做好防护处理也可采用封闭式。

(4)木纤维板幕墙应采用开放式板缝。木纤维板是含有70%木质纤维的有机材料,由于木材的自然属性,板材将随着环境相对湿度的变化而发生变化。因此,木纤维板对板材正反面的环境温度和湿度的一致性要求较高,否则易发生变形,所以应采用开放式板缝构造,降低面板内侧空腔与外部环境的气压差,减少因压力差而带入面板内侧空腔的雨水,使面板内侧空腔与室外空气保持相互流通,保持面板内外部温湿度环境一致。

4.3.2 空气间层构造设计

背部通风的开放式幕墙,面板与其背部墙体外表面的最小间距不宜小于20mm,是参照德国标准“(DIN18516-4-1990)外墙饰层.背部通风.单片安全玻璃.要求、测量、检验”的规定而确定的,是幕墙面板背部通风空间的最低要求。在具体工程中,要根据幕墙所处风环境和面板接缝设计具体情况确定合适的通风间层的空间要求。

开放式幕墙板缝设计,应根据外墙立面的装饰效果和空气间层通风需要,选择平口对接的开缝式或平板及企口板搭接的遮挡式,以及加装镶嵌条的遮挡式板缝设计。

5 人造板材幕墙面板材料的力学性能

5.1 单一材质面板的力学性能

5.1.1 抗弯强度设计值

面板材料的抗弯强度设计值等于弯曲强度(抗折强度)标准值除以面板材料性能分项系数。弯曲强度(抗折强度)标准值可根据面板材料产品标准的性能数据确定。面板材料性能分项系数,则根据面板材料的不同特性确定:1)瓷板、陶板和微晶玻璃是脆性材料,材料性能分项系数取1.8;2)纤维水泥板材材质介于脆性和延性材料之间,其材料性能分项系数取1.6;3)木纤维板是

表1 石材蜂窝板石材面板材料性能分项系数 γ_r			
背板材质类型	花岗石	砂岩	石灰石
铝蜂窝板 钢蜂窝板	1.5	1.8	1.8
玻纤蜂窝板	1.8	2.15	2.15

表2 面板支承连接形式						
	瓷板	陶板	微晶玻璃	纤维水泥板	木纤维板	石材蜂窝板
短挂件	√	√	√			
通长挂件	√	√	√	√		
背栓	√		√	√		
穿透螺钉、铆钉				√	√	
背面切口螺钉					√	
背面预置螺母						√

延性材料，其材料性能分项系数取1.5。

5.1.2 抗剪强度设计值

瓷板、陶板、微晶玻璃和纤维水泥板在分别采用短挂件和长挂件支承连接时，板材在挂件槽口处都会受到挂件的支承反力作用而产生剪切应力，因此需要规定面板材料的剪切强度设计值。由于这些材料均为非各向同性的非金属材料，其剪应力与正应力的强度关系不适合采用第四强度理论，不能直接采用 $\tau = 0.577 \sigma$ 的方法确定板材的抗剪强度。因此，规范编制组进行了瓷板、陶板、微晶玻璃和纤维水泥板四种材料抗剪强度与抗弯强度的对比试验，确定了面板材料的抗剪强度与抗弯强度的数量关系分别是：瓷板0.5；陶板、微晶玻璃为0.2；纤维水泥板为0.4。

5.2 复合材料面板的力学性能

石材蜂窝板是由天然石材薄板与蜂窝板经胶粘剂粘结复合而成，石材面板厚度为5mm左右，总厚度15mm以上，通常采用背面粘结预置螺母的四点支承连接安装。板材构造特点——沿板面厚度方向为非对称结构，且材质各异，其力学性能不同于一般的铝蜂窝板和其他实心板材。规范编制组对这种新型复合材料的力学性能进行了专门的理论和试验研究，成功地解决了这一难题。

5.2.1 石材蜂窝板的弯曲刚度和弯曲强度标准值

以石材蜂窝板的石材面板在弯曲受拉状态下产生裂缝或断裂时的极限状态弯曲应力作为整板的弯曲强度值；不以整板弯曲屈服时的弯曲应力作为弯曲强度值。

（1）整板弯曲刚度的确定：a）试验法：按《夹层结构弯曲性能试验方法》（GB/T 1456-2005）规定的外伸梁三点

弯曲法，测得石材蜂窝板的石材面板产生裂缝或断裂时的最大荷载p和整板的弯曲刚度D；b）计算法：按照《人造板材幕墙规范》附录A“石材蜂窝复合板刚度计算”。

（2）石材面板弯曲强度的确定：由下式计算石材面板弯曲应力。

$$\sigma = \frac{p l E y_0}{4 D}$$

式中： σ 为弯曲应力（MPa）；p为最大荷载（N）；l为支点间距（mm）；E为石材弹性模量（MPa）； y_0 为中性轴到石材面板的距离（mm）；D为石材蜂窝板弯曲刚度（N·mm²）。

根据整板试验所得数据和按上式计算得到的弯曲应力值，再用数理统计等方法取得弯曲强度标准值。

5.2.2 石材蜂窝板的抗弯强度设计值

抗弯强度设计值等于石材蜂窝板石材面板抗弯强度标准值fk除以石材面板材料性能分项系数 γ_r 。考虑不同复合板材质和石材面板的特点和工程经验，《人造板材幕墙规范》规定了石材蜂窝板石材面板材料性能分项系数 γ_r 的取值，见表1。

6 人造板材幕墙面板支承连接设计

6.1 面板支承连接形式

面板支承连接形式多样是人造板材幕墙另一大特点，六种面板材料及六种支承连接形式是根据材质特性及支承连接承载能力验证试验，分别确定了每种面板所适宜采用的支承连接形式，如表2所示。

6.2 面板的抗弯设计

六种面板的六种支承连接形式，其受力形式分别为：1）点支承（四点支承、多点支承）；2）对边支承。都可采用有限元方

法分析计算，规范中给出常用的四点支承、对边支承计算公式。

空心陶板的截面形状相当复杂，其最大弯曲应力标准值宜采用有限元方法分析计算，也可采用均布静态荷载弯曲试验结果，再将其除以陶板的材料性能分项系数1.8，确定其受弯承载能力。

对于穿透面板支承连接的木纤维板和纤维水泥板，通常采用的是超过四点的多点支承连接支承点位置的弯矩一般均比四点支承面板跨中弯矩要小，因此超过四点连接的面板可选择间距最大的四点的距离作为计算跨度，参考四点支承面板公式进行近似计算。

6.3 面板弯曲挠度限值

高压热固化木纤维板：弹性模量低，仅为玻璃的1/8，但其弯曲强度标准值约为玻璃的2倍，是高强度的延性材料，可以发生较大的变形而不致损坏，根据板材的弯曲试验和工程实践经验确定挠度限值为1/60。

纤维水泥板：弹性模量较低，约为玻璃的1/5，而且其弯曲强度标准值约为玻璃的1/2.8，是刚度和强度均较低的材料。根据对纤维水泥板弯曲试验结果，不同厚度的板材在断裂破坏时的挠度为1/60~1/140，确定为1/180。

石材蜂窝复合板：是由脆性的超薄石材面板与铝蜂窝芯及三种不同背板胶结而成的复合板材，有一定的柔性。根据计算和验证试验结果，结合工程经验分别确定为1/120和1/180。

瓷板、陶板和微晶玻璃为弹性模量较高的脆性材料并且其使用时的板材截面厚度比较大，面板的刚度较高，因此不需控制其弯曲变形时的挠度。木纤维板、纤维水泥板和

表3 面板弯曲挠度限值

木纤维板	纤维水泥板	石材铝蜂窝板（铝合金板背板）	石材钢蜂窝板（镀铝锌钢板背板）	石材玻纤蜂窝板（玻璃纤维板板背板）
L/60	L/180	L/120		L/180
L为面板支承点的的长边边长				

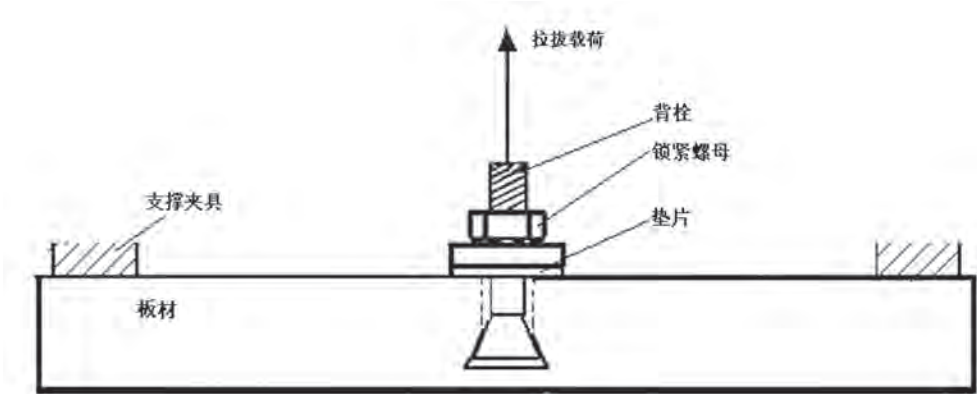


图1 背栓连接组件的轴向受拉试验示意图

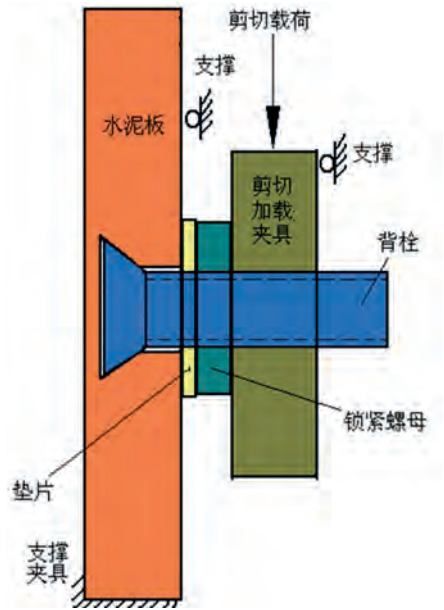


图2 背栓连接组件的横向受剪试验示意图

石材蜂窝复合板是柔性比较大的材料，均需控制其弯曲变形时的挠度（表3）。

6.4 面板支承连接的受拉和受剪承载能力

6.4.1 背面预置螺母点支承连接的石材蜂窝板

石材蜂窝板背面支承的异形连接螺母，在工厂采用胶粘剂预置。

现场安装时用连接螺栓固定。规范编制组进行了受拉和受剪的对比试验，验证了粘结预置连接螺母螺栓的拉拔与剪切的破坏形式和两者承载力之间的数量关系。《规范》规定：石材蜂窝板预置螺母受拉承载力和受剪承载力应经试验确定，受拉承载力设计值等于实测预置螺母连接受拉破坏力最小值除以预置螺母连接承载力分项系数2.15，受剪承载力设计值不大于受拉承载力的0.5倍。

6.4.2 背栓支承连接的瓷板、微晶玻璃和纤维水泥板

背栓属于局部的机械连接方式，背栓连接的受拉和受剪承载力，与面板和背栓的材质、背栓的品种、规格及其构造型式、锚固深度、背栓孔的加工精度和背栓的装配质量等因素密切相关，无法进行准确的计算，只能通过试验确定。对瓷板、微晶玻璃、纤维水泥板三种面板，采用规范编制组内的慧鱼、旗鱼和斯泰三个背栓生产单位的三种具有不同细部构造的背栓，进行了背栓连接的拉拔和剪切承载力

试验，验证了拉拔与剪切的破坏形式和两者承载力之间的数量关系（图1，2）。

试验表明：

（1）介于脆性和延性材料之间的纤维水泥板，背栓拉拔试验后均为锥形破坏，剪切试验后均为背栓弯曲然后伴随背栓安装处板材局部破坏。

（2）比较薄的脆性瓷板，背栓拉拔试验主要破坏方式瓷板断裂（大、小支撑间距），只有一部分样品为锥形破坏。剪切试验后主要破坏形式瓷板局部被撬坏、瓷板断裂和瓷板正面被顶坏。

（3）比较厚的脆性微晶玻璃板，背栓拉拔试验主要破坏方式为微晶玻璃板断裂只有一部分样品为锥形破坏，但其剪切试验破坏形式均为背栓产生剪切屈服破坏，个别是微晶玻璃板被局部撬坏，但在撬坏之前背栓已经屈服。

（4）总体而言，背栓连接的受剪破坏荷载不大于受拉破坏荷载的0.8倍。

据《人造板材幕墙规范》规定：背栓连接的受拉、受剪承载力应经试验确定，受拉承载力设计值等于实测背栓连接受拉破坏力最小值除以背栓连接承载力分项系数2.15，受剪承载力设计值不大于受拉承载力的0.8倍。

7 人造板材幕墙支承结构设计

7.1 支承构件设计

人造板材幕墙的支承结构主要是钢、铝等金属结构。《规范》规定：横梁、立柱等主要支承构件截面的抗弯强度、抗剪强度和稳定性等应符合下列要求：1）轧制或焊接钢型材构件应符合现行国家标准《钢结构设计规范》（GB 50017）的规定；2）冷弯薄壁型钢构件应符合现行国家标准《冷弯薄壁型钢结构技术规范》（GB 50018）的规定；3）铝合金型材构件应符合现行国家标准《铝合金结构设计规范》（GB 50429）的规定；4）构件截面的抗弯强度、抗剪强度和稳定性也可采用有限元方法分析计算。

7.2 横梁、立柱构件的挠度控制限值

幕墙横梁、立柱的挠度限值，是要控制幕墙面板在风荷载作用下的变形不致过大，与横梁和立柱的材质无关，参考国外相关规范的规定和工程经验，《人造板材幕墙规范》将幕墙横梁和立柱的挠度控制值统一规定为：

当跨度不大于4 500mm时， $f_d \leq l/180$

当跨度大于4 500mm时， $f_d \leq l/250+7$

式中：d为横梁或立柱挠度（mm）；l

为横梁或立柱计算跨度（mm），悬臂构件可取挑出长度的2倍（玻璃幕墙、金属与石材幕墙、人造板材幕墙三本规范统一协调确定）。

表4 横梁和立柱构件型材截面主要受力部位厚度规定 (mm)

铝型材	横梁	≥2.0		螺纹连接处型材局部加厚 ≥4.0 (还应进行螺纹受力计算)
	立柱	截面开口部位 ≥3.0	截面闭口部位 ≥2.5	
热轧钢 型材	横梁	≥2.5		螺纹连接受力部位还 应进行螺纹受力计算
	立柱	≥3.0		
冷成型薄 壁型钢	横梁	≥2.0		
	立柱	≥2.5		



国家气象局大厦 (千思板幕墙)



上海南洋国际学校 (水泥纤维板幕墙)



北京高等法院 (瓷板幕墙)



北京饭店二期 (陶板幕墙)



呼和浩特市内蒙高速公路公司 (微晶玻璃幕墙)



佛山环球国际广场 (石材蜂窝板幕墙)

7.3 构件型材截面壁厚控制

支承构件型材截面厚度是关系幕墙结构安全和材料用量的技术经济综合指标。根据钢结构和铝结构设计规范和工程经验,《人造板材幕墙工程技术规范》规定见表4。

8 结语

《人造板材幕墙工程技术规范》的制定,是在对六种材质、构造和特性不同的面

板材料,从建筑幕墙所需性能研究试验开始,在编制了建筑幕墙用板材产品标准的基础上,经过一定的理论研究和验证试验,参考国内外相关的标准和规范,总结近年来我国人造板材幕墙工程实践经验,新研制了六种新型板材非透明幕墙的工程技术规范,从术语定义、材料选用、性能设计和检测要求、建筑构造和结构设计,到加工制作、安

装施工、工程验收、保养和维修,为我国人造板材幕墙工程做到技术先进、安全可靠、美观适用、环保节能而提供了全面的技术依据,填补了我国新型人造板材幕墙工程技术的空白,经住房和城乡建设部审查,认为该规范总体达到了国际先进水平。AT