

建筑幕墙玻璃的合理选用

Rational Application of Glass Curtain Wall

撰文 王珣 金绍凯 现代都市建筑设计院幕墙设计研究中心

随着科学技术的发展，高层、超高层建筑不断涌现，为了减轻主体结构的荷载，玻璃幕墙成为外围护结构的首选。作为建筑的采光部分，如何根据建筑的功用合理地选用幕墙玻璃，同时又要满足美观、经济、安全的要求，是幕墙设计师必须要慎重考虑的问题。

1 保温性能

按照国家标准，建筑门窗使用的玻璃厚度正常情况下应该在 4mm 以上。《建筑幕墙》（GB/T 21086-2007）6.2.1 中规定“不宜小于 6mm”。由于玻璃面积在幕墙面积中所占比例较大（60%~70%），玻璃的保温性能对幕墙的传热量影响十分可观。因此，改善幕墙保温性能的一个重要途径就是合理选用玻璃。

建筑玻璃幕墙的保温节能功效逊于传统的围护结构，要达到保温节能的目的，就要降低幕墙整体的传热系数。而传热系数由玻璃、型材以及中空玻璃边缘线性传热系数 Y 值三部分组成，即在结构设计中主要考虑采用断热型材和中空玻璃。由于幕墙玻璃在幕墙面积中占较大的比例，在整个围护结构中，通过玻璃传递的热量远高于其他围护结构，文章仅就幕墙玻璃来讨论。

玻璃的热工性能是通过两个参数来表征的，即传热系数和遮阳系数。传热系数是围护结构通用参数，其传热系数越低，越有利于建筑节能。遮阳系数是玻璃作为围护结构的特殊参量，遮阳系数越小，阻挡阳光直接辐射的性能越好。

玻璃的导热系数为 1W/(m·K)，而空气的导热系数为 0.024 W/(m·K)，氩气的导热系数为 0.016 W/(m·K)，可以通过表 1~3 进行比较。

普通单片浮法玻璃的传热系数为 5.2~6.0W/(m²·K)，普通中空玻璃的传热系数降至 2.5~3.2W/(m²·K)。可见，由两片或多片玻璃和空气层组成的中空玻璃的传热系数降低了很多。充氩气后，中空玻璃的传热系数一般可再降 0.2~0.3 W/(m²·K)，显而易见，中空玻璃的节能效果远比单层玻璃好。

热的传递有三个途径：热辐射、热对流和热传导，对于玻璃而言热辐射是最大的。因此，提高中空玻璃的节能效果，首先必须减低玻璃的热辐射率，即采用低辐射玻璃，其次才考虑充惰性气体和暖边间隔条。

根据建筑效果的需要，可选用普通透明玻璃、着色玻璃、热反射镀膜玻璃、Low-E 玻璃、夹层玻璃等作为中空玻璃的基片。中空玻璃内的密封空气在铝框内灌注的高效分子筛吸附剂作用下，成为导热系数很低的干燥空气，从而构成一道隔热、隔音屏障。玻璃的热传导率是空气的 27 倍，只要中空玻璃是密封的，就可达到最佳的隔热效果状态。若在中空层中充入惰性气体，还可进一步提高隔热、隔音性能。

要想获得更低的传热系数，就要采用 Low-E 中空玻璃。Low-E 玻璃与普通浮法玻璃相比，其主要特征是对远红外线不是高吸收而是高反射，因此可阻止环境热量通过玻璃进行传递。Low-E 中空玻璃的传热系数一般为 1.5~2.1W/(m²·K)，特别是双银 Low-E 中空玻璃，不但其传热系数低，保温性能优良，而且其遮阳系数也可降至 0.30~0.60，隔热性能非常好。因此，除一些裙楼大堂高跨度全玻璃幕墙不得不采用单片玻璃外，通常都采用中空玻璃，这是幕墙保温节能的最低要求。表 4 是某幕墙工程玻璃选型时的性能对比表，可以看出双银 Low-E 阳光控制性能（SC）比单银 Low-E 效果更理想。

外装饰幕墙采用中空玻璃的隔热效果是毋庸置疑的，即使是（3+12A+3）mm 的中空玻璃，其隔热能力也不亚于 100mm 厚的混凝土墙，而低辐射玻璃乃至充惰性气体的中空玻璃对玻璃幕墙的保温性能会有更明显提高。就上海、江苏等夏热冬冷地区的建筑而言，根据《公共建筑节能设计标准》（GB50189-2005）规定，普通中空玻璃的遮阳系数和传热系数都不能满足规范要求，只有采用 Low-E 中空玻璃才能满足。因此，从节能的角度考虑，Low-E 中空玻璃是建筑幕墙面材的不二之选，同时要根据建筑的朝向、使用功能、结构形式选择高透型玻璃或遮阳型玻璃，其次可以考虑中空玻璃的暖边系统，进一步提高其隔热性能。

表1 透明浮法玻璃的光学及热学性能参数

厚度 (mm)	太阳能总透射比 (g值)	遮阳系数 (S.C)	传热系数U值 W/(m²·k)	
			夏季	冬季
6	0.83	0.95	5.24	5.81
8	0.81	0.93	5.19	5.74
10	0.79	0.91	5.13	5.67
12	0.77	0.89	5.07	5.61
15	0.74	0.85	4.99	5.51

表2 普通中空玻璃常用配置性能参数

厚度 (mm)	太阳能总透射比 (g值)	遮阳系 (S.C)	传热系数U值 W/(m²·k)	
			夏季	冬季
6+12A+6	0.72	0.84	2.84	2.70
6+16A+6	0.72	0.80	2.81	2.67
6+12Ar+6	0.72	0.84	2.70	2.53

表3 低辐射中空玻璃性能参数

厚度 (mm)	太阳能总透射比(g值)	遮阳系数 (S.C)	传热系数U值 W/(m²·k)	
			夏季	冬季
6+12A+6YLE0182(高透型)	0.60	0.71	1.82	1.82
6YME0152+12A+6(遮阳型)	0.39	0.46	1.80	1.80
6YDE25-2M+12Ar+6(双银)	0.28	0.33	1.62	1.67

表4 单银Low-E中空玻璃与双银Low-E中空玻璃性能参数及节能差异

玻璃规格	玻璃品种	基本颜色	反射颜色	用途	U值 W/(m²·k)				遮阳系数SC	相对增热 (W/m²)
					冬季夜间	冬季夜间	夏季白天	夏季白天		
					空气	氩气	空气	氩气		
单银	6CEB22-60F+12A+6C	浅绿色	浅绿色	遮阳型	1.78	1.48	1.76	1.44	0.40	210
	6CEB11-70S+12A+6C	透明	无色	高透型	1.86	1.57	1.86	1.56	0.55	363
双银	6CEB12-68S+12A+6C	透明	无色	透明型	1.74	1.44	1.71	1.37	0.38	251
	6CEB23-58F+12A+6C	绿色	浅蓝绿	遮阳型	1.70	1.39	1.66	1.31	0.28	192

2 隔声性能

一般建筑的幕墙空气声隔声等级为 3 级（ $35 \leq R_w < 40\text{dB}$ ），全玻璃幕墙采用 10~19mm 单片玻璃和普通的中空玻璃都能够达到要求，如果要求空气声隔声等级达到 4 级（ $40 \leq R_w < 45\text{dB}$ ），普通配置的中空玻璃恐怕就难以满足要求了，表 5 对不同配置的玻璃做了一个简单的比较。

中空玻璃的隔声性能与玻璃的厚度、间隔层中气体的成分、间隔层的数量和厚度有关。但是中空玻璃间的空气层间隔有限，隔音作用不大。由表 5 也可以看到，空气层由 12mm 增加到 16mm，其隔音性能并没有提高。

表5 隔声性能对比

玻璃配置	厚度配置（mm）	记权隔音（dB）
单片玻璃	10	35
	12	36
	15	38
	19	40
中空玻璃	6+12A+6	35
	6+16A+6	35
夹层玻璃	6+0.76PVB+6	38
	6+1.52PVB+6	39

普通玻璃的隔音性能一般在 10dB 以下，所以当人们关上窗户时会感觉声音有变化，但感觉不到安静；中空玻璃的隔音性能在 25dB 左右，也就是说使用中空玻璃后，室外噪音可下降 25dB。我们知道声音通过振动波的形式传播，因此要想提高中空玻璃的隔声性能，必须在中空玻璃的构造上想办法，具体如下。

（1）采用软连接，避免声桥现象。中空玻璃中间的隔条通常由铝合金制成，铝合金为刚性材料，振动能量会由刚性连接传到另一层，这一“声桥”作用就使中空玻璃的隔声性能降低。我们在设计过程中可以建议采用暖边密封系统的中空玻璃，如现在较多建筑采用实唯高（Swiggle）暖边密封系统，其采用了柔性的密封材料，能够缓冲声波的传递，使中空玻璃的隔声性能比铝隔条提高 1~2dB。北京的国贸大厦、沈阳的玫瑰大酒店都采用了实唯高暖边系统，虽然暖边系统是针对中空玻璃的隔热性能开发的，但其对隔声性能的提高也起到了相当大的作用。

（2）增加玻璃的阻尼。通常的玻璃具有很小的内在阻尼，在玻璃间加入 PVB 胶片制作成夹层玻璃。PVB 胶片对声波具有一定阻碍作用，从而有效阻挡声音的传播。如果用夹层玻璃合成中空玻璃结构，其增加玻璃阻尼的作用会更大。中空玻璃间层中若充入惰性气体可在原有基础上再降低 5dB 左右，隔音效果会更加理想。江苏省移动公司办公楼采用了 6（T）+0.76PVB+6（T）镀膜+12A+8（T）Low-E 阳光镀膜夹胶中空 Low-E 玻璃，不仅提高了隔声效果，也获得了极佳的外视效果。

（3）采用非对称玻璃。由于玻璃材质、尺寸、厚度及边界约束条件相同，各层玻璃具有相同的固有频率，容易产生共振，从而激发玻璃本身低频振动而产生二次噪声辐射。因此，我们可以采取非对称配置，即内外两层玻璃厚度不同，如 8mm+12A+6mm，可避免产生共振。

3 安全性能

玻璃受到温度影响或者遇到外力冲击极易破碎，钢化玻璃同样如此。

在《建筑玻璃应用技术规程》（JGJ113-2003）中定义的安全玻璃指破坏时安全破坏，即应用和破坏时给人的伤害达到最小的玻璃，包括符合国家标准 GB9962 规定的夹层玻璃、符合国家标准 GB9963 规定的钢化玻璃和符合国家标准 GB15763.1 规定的防火玻璃以及由它们构成的复合产品。

现有建筑幕墙几乎都采用钢化玻璃，而幕墙的情况纷繁复杂，千变万化，笼统地规定幕墙一定要用钢化玻璃不一定就恰当。自 2009 年至今，各地发生了多起幕墙玻璃坠落造成人身伤亡和财产损失事件。经分析发现这些自爆坠落的幕墙玻璃无一不是钢化玻璃，很值得幕墙设计者反思。

记得上世纪 90 年代初幕墙施工都采用浮法玻璃，极少有自爆发生。后来随着建筑高度的不断增高，规范的逐渐形成和完善，在施工设计时按照建筑高度分层设计，底部用普通浮法玻璃，中部用半钢化玻璃，顶部用钢化玻璃，使用十余年，也很少出现自爆现象。在《建筑安全玻璃管理规定》中，单片半钢化玻璃（热增强玻璃）、单片夹丝玻璃不属于安全玻璃，钢化玻璃属于安全玻璃。然而近年来钢化玻璃事故频发，却无情地否定了“钢化就是安全”的观点。

自爆是钢化玻璃的固有特性，不可避免。为了降低自爆率，只能对玻璃原片精磨边和进行二次热处理，即热浸处理。即使如此，1‰的自爆率也已经是极限了。一旦玻璃自爆，在高层和超高层建筑上更换玻璃的成本远远高于玻璃本身的成本，而且更换施工的危险性极高。

半钢化玻璃热处理类似于钢化玻璃，但钢化程度低，其表面应力不大于 69N/mm²，因此半钢化玻璃不属于目前定义的“安全玻璃”。正因为半钢化玻璃表面应力低，所以不存在自爆的危险，不受外界影响时，它绝不会自行爆炸，从这个意义来说，它比钢化玻璃要安全。即使在外力作用下破碎了，由于周边有扣板、槽口或者硅酮结构胶，放射形的裂缝所形成的碎块也不会轻易坠落，可以有时间进行拆除、更换。

基于上述原因，在设计建筑幕墙时就要根据实际情况合理选用“安全玻璃”。建议在底层可以采用钢化中空玻璃，上部则采用夹胶中空玻璃或半钢化夹胶中空玻璃，在计算通过的前提下优先选用夹胶玻璃。底层用钢化中空玻璃是因为高度低，即使因温度和地震作用破碎也不会因坠落砸伤幕墙附近的人员和物体，又不会因玻璃锐利的碎片对人员造成伤害。高层、超高层建筑幕墙若采用钢化玻璃，一旦破碎，飞落的玻璃碎块会因重力而加速下落。同时，破碎的玻璃瞬间脱离框架，站在玻璃附近的人同样是极不安全的。为此，高层建筑幕墙要采用夹胶中空玻璃——外层夹胶，内层钢化，外层玻璃即使受到冲击破碎也不会脱落，内层钢化玻璃受冲击破碎也不会伤人。

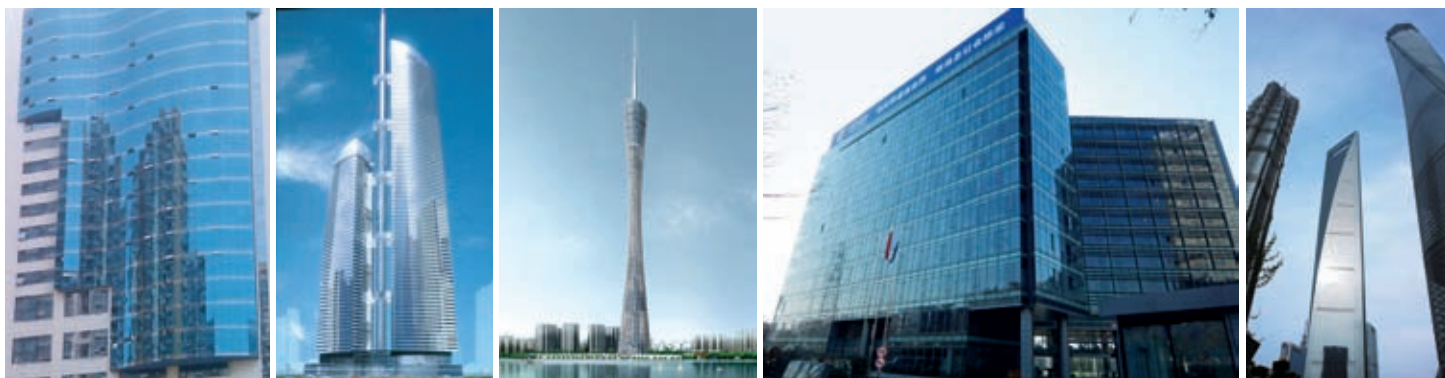
目前，在实际幕墙设计中，推广使用夹胶中空玻璃有一定的难度，一方面是有人认为夹胶玻璃不钢化，不是安全玻璃，甚至有些建筑设计师也这样认为，这就是对安全玻璃的定义没有很好地理解。另一方面是经济方面的原因，建设方认为使用夹胶中空玻璃增加造价而拒绝使用。笔者认为，幕墙行业内人士应该达成共识，在高层、超高层建筑幕墙的设计、施工中，应推荐使用夹胶玻璃或半钢化夹胶玻璃，在计算能够通过的前提下优先选用夹胶玻璃，并应将其纳入规范，从根本上杜绝自爆的产生。2012



夹胶玻璃破碎坠落



钢化玻璃自爆



钢化玻璃的影像扭曲现象

俄罗斯联邦大厦

广州电视塔

江苏省移动公司

上海环球金融中心

年,上海市发布了上海市人民政府令第77号《上海市建筑玻璃幕墙管理办法》,颁布实施了上海市地方标准《建筑幕墙工程技术规范》DGJ08-56-2012,将高层幕墙采用夹胶玻璃纳入了规范,并实行幕墙结构安全性评审,这在全国是首例。随后江浙等地也颁布了相关法规,在幕墙安全性方面迈出了喜人的一大步。

在采用夹胶玻璃的同时还要考虑到一点,就是不能因为夹胶玻璃而使幕墙成为火灾的牢笼,在适当的地方要设计钢化玻璃,并设置明显的标识,以备在火灾发生时逃生。另外在设计框架式玻璃幕墙时,要尽量采用密封胶粘接密封。因PVB胶片刚度不足,为避免在破碎后坍塌脱落,使用密封胶在框边对玻璃形成一定拉力。同时考虑加大槽口的深度,以免玻璃脱离槽口坠落。

4 外视效果

玻璃幕墙是建筑的外围护结构,也是建筑的外衣,建筑师利用其丰富的色彩与艺术的造型表达设计理念,创造出多彩的艺术效果。然而,纵观国内的幕墙,远近各处不同的建筑在幕墙玻璃上的映像都是扭曲的,丝毫也感觉不出美感,反而形成了光反射之外的另一种炫目。究其原因,就是钢化玻璃惹的祸。

钢化 and 热强化玻璃由于受热会形成纹波,在某些特殊的自然光条件下观察钢化(或半钢化)玻璃的反射光时,能够看见其表面存在明暗相间的条纹,这种亮度不一致的条纹称为应力斑。目前国际上最先进的技术也不能完全消除应力斑,可以说影像扭曲变形是钢化玻璃给玻璃幕墙带来的副产品,使玻璃幕墙的外视效果大打折扣。要想改变这种效果,可以采取以下作法。

(1) 选用化学钢化玻璃。化学钢化玻璃(或称离子交换增强玻璃)是根据离子的扩散机理来改变玻璃表面组成,即玻璃表层的金属离子被熔盐中不同的金属离子所置换,使玻璃表面形成压应力层的一种处理工艺。

化学钢化玻璃强度高、热稳定性好,处理后的玻璃表面不损失平滑性,不变形,而且能够切割,无自爆现象,克服了风钢化技术的缺点,在提高玻璃强度的同时,丝毫不影响光学性能,是现有钢化玻璃的最佳替代品。但是,不菲的价格也许会阻碍其广泛的应用。

(2) 选用夹胶玻璃或半钢化夹胶玻璃。夹胶玻璃因无需钢化,所以表面依然保持浮法玻璃的平滑性,无变形与光学畸变,对周围物体的映像不会扭曲变形,从而保证幕墙的完美外视效果。半钢化玻璃变形小,表面比较平整,反射外界景物畸变小,比较美观。我们一直强调的“在计算通过的前提下优先采用夹胶玻璃”就是基于这个目的。

我们看到国外很多建筑幕墙玻璃平滑如镜,对周围环境的映像没有丝毫的变形,其实正是采用了夹胶玻璃或半钢化夹胶玻璃,而非钢化夹胶。目前,我国幕墙企业在一些超高层建筑的幕墙设计施工中也采用了此种玻璃。

莫斯科俄罗斯联邦大厦玻璃幕墙工程高度达341m,为欧洲的最

高建筑。考虑到工程位于万里之外,一旦玻璃自爆,其更换、维修成本将极其昂贵,因此工程全部采用半钢化玻璃:透光部分为夹层中空(6mm+1.14PVB+6mm)+16Ar+8mm,三片玻璃均为半钢化;不透光部分为8mm蓝天白云彩釉印花单片半钢化玻璃。

广州电视塔为目前世界最高的独立塔,总高度620m,幕墙高度430m,幕墙总面积3.2万m²,由超5000块的三角形板块组成,采用双夹层中空玻璃:(8mm+1.52SGP+8mmLow-E)+12A+(8mm+1.52SGP+8mm)。塔身外形为双曲抛物面。考虑到玻璃类型多,高空更换玻璃极为困难,全部采用半钢化玻璃。

江苏省移动公司办公楼也采用了夹胶中空玻璃(6mm+0.76PVB+6mm镀膜+12A+8mmLow-E),表面平整,影像完美,既保证了安全度,降低了更换几率,提高了隔声性能,同时又取得了理想的外视效果。

上海环球金融中心高度495m,101层,幕墙玻璃采用夹胶中空玻璃(8mm+1.52SGP+8mm+12A+8mmLow-E),三片玻璃均为半钢化玻璃。

上世纪90年代,国内也有许多建筑采用半钢化玻璃幕墙,如1997年建成的广东公安指挥中心幕墙采用8mm厚银灰色半钢化玻璃。1999年建成的广东省建行大厦高度达180m,采用蓝灰色镀膜半钢化玻璃。南京金丝利大厦、西安西北电讯大楼都采用半钢化玻璃,北京东安市场采用半钢化夹胶玻璃做采光顶,至今未发生自爆现象。

大量的工程实践充分反映了一个客观事实:不分场合地一概强制规定幕墙不得采用半钢化玻璃是不妥的,在《玻璃幕墙工程技术规范》(102-2003)中也没有不准采用半钢化玻璃的硬性规定。

5 结语

综上所述,没有绝对意义的安全玻璃,只要使用玻璃就会有一定的危险。而建筑幕墙既要有艺术的吸引力,又要能够给使用者提供最高的安全保障,这就要求幕墙设计人员通过各种方法来提高幕墙在受到诸如温度变化、地震作用以及冲击时的安全性能。由于夹层玻璃中有柔性的PVB胶膜将玻璃粘合在一起,破碎时不会形成小颗粒或锐利的碎片,从而显著降低了玻璃的飞溅和高空坠落等危险。相对来说,夹层玻璃为避免这些类型的破坏提供了一个可行的技术条件,同时又能够保证建筑师对幕墙美学的要求。

建筑幕墙的安全性是最优先考虑的因素,除改进幕墙框架构件的结构外,还必须通过合理选用玻璃类型,采取恰当的设计和施工措施,来最大限度地实现幕墙玻璃的使用安全。通过对幕墙荷载、冲击力的分析,对幕墙结构的科学设计以及合理选用玻璃配置,才能达到理想的效果。

参考文献

- [1] JGJ102-2003 玻璃幕墙工程技术规范[S].
- [2] GB50189-2005 公共建筑节能设计标准[S].
- [3] 刘志海,李超.低辐射玻璃及其应用[M].