

当前位置: 首页 » 技术交流 » 平板玻璃 » 平板玻璃 »

单片防火玻璃耐火机理分析之：玻璃热炸裂



"扫描二维码，关注
协会动态"

1、引言

玻璃是人们日常生活中随处可见的一种材料，因其透明、美观、高强度等优点被广泛应用于现代建筑中，近年来我国玻璃相关行产玻璃产量、加工量和使用量也逐年增长。玻璃在门窗、幕墙等领域的应用使其成为建筑最主要的外墙材料之一，作为建筑物中构件的一部分以及服役环境下的安全特性尤其受到关注，防火玻璃的概念和应用由此而生。在火灾发生时，玻璃虽不是可燃物，但是相比于混凝土和性能较为脆弱，在热载荷作用下非常容易发生破裂和脱落，因此有关防火玻璃的材料、性能和结构研究非常重要，也从未间断。防火玻璃和耐火机理分析更是有助于指导防火玻璃的生产和使用，对提高建筑物防火安全设计的系统性具有特别的参考意义。

2、单片防火的概念和种类

国家标准 GB15763.1《建筑用安全玻璃—防火玻璃》将防火玻璃按照结构分为单片防火玻璃（DFB）和复合防火玻璃（FFE）。分为隔热型防火玻璃（A类）和非隔热型防火玻璃（C类）。单片防火玻璃本质是用特殊材质或工艺进行强化的玻璃，其优点是透光性好、耐候性好、易于加工安装，在耐火性能上属于C类非隔热型防火玻璃，满足耐火完整性的要求。随着建筑安全及火灾防范意识的提高，我国建筑设计防火规范和消防验收检查制度也逐步完善，防火玻璃的产品体系和设计使用目前正在与发达国家同步接轨。近几年，国内防火玻璃标准不断修改完善，产品不断更新换代，市场对高品质、高稳定性的防火玻璃呼声越来越高，以硼硅酸盐单片玻璃和硅酸钾基复合防火玻璃为代表的技术和产品，有效降低了传统低端防火玻璃的不确定性，提升安全系数和耐火稳定性。

国标中约定的防火玻璃原片可以是镀膜或非镀膜的浮法玻璃、钢化玻璃，复合防火玻璃原片，还可选用单片防火玻璃。可见这个定义和范围是非常宽泛和笼统的，即原片玻璃和加工玻璃都可以作为防火玻璃的材料，理论上，任何达到耐火要求的玻璃材料或透明产品均可作为防火玻璃。实际上，直接从窑炉经成型退火得到的玻璃原片或玻璃材料是很少直接应用在生产生活中，所以单片防火玻璃作为加工玻璃产品，尤其是建筑用安全玻璃的一种，除了满足耐火性能要求外，还应满足建筑玻璃相应国家标准和规范，例如外观质量、钢化安全性、冲击安全性等。

本文为了更清晰的梳理和介绍目前市场上常见的单片防火玻璃产品，仍坚持以玻璃材料的成分体系进行划分，再结合加工工艺进行细分，这也是不同防火玻璃产品差异化的根本所在。

（1）钠钙硅系统玻璃

市场上俗称的“高强度防火玻璃”、“高应力防火玻璃”、“铯钾防火玻璃”、“化学钢化玻璃”等等，均为钠钙硅原片玻璃（最常见的浮法玻璃）通过物理增强或化学增强引入表面压应力的强化玻璃（Tempcred glass / Reinforced glass）。此类玻璃是通过在玻璃表面施加预应力层，进而提高其抵抗火灾环境下的热变形和热炸裂能力，但受到加工程度、加工水平和尺寸厚度的影响，该类玻璃性能差异较大，具有很大的性能离散度和耐火随机性。由于国标并未对此类玻璃作为防火玻璃使用时的边界条件进行明确的定义和性能约定，更多是市场和企业行为进行产品指标和质量的把控，因此也成为目前国内应用最多、最为混乱的单片防火玻璃种类，给建筑设计和用户安全带来很多困扰。

（2）硼硅酸盐系统玻璃

硼硅酸盐玻璃是以碱硼硅系统经浮法或压延工艺生产出的原片玻璃，和普通的钠钙硅系统玻璃相比，其膨胀系数低（ $\approx 4 \times 10^{-6} / \text{K} (20 \sim 300^{\circ}\text{C})$ ）、软化点高（ $\approx 800^{\circ}\text{C}$ ）、耐冷热冲击性能好，可应用于器皿玻璃、仪器玻璃和防火玻璃。目前市场上的硼硅单片防火玻璃是采用硼硅酸盐原片玻璃经钢化加工而成，被公认为是一种理想的高稳定性的单片防火玻璃，在欧洲已经得到了多年的推广应用。随着防火玻璃需求旺盛，国内硼硅玻璃生产技术和产品突飞猛进，逐渐打破国外技术壁垒，目前有四家企业实现批量化生产，部分产品的质量和规格也达到世界领先水平。该类型单片防火玻璃应用于高层建筑、公共场所等的防火隔断，具有透光率高和寿命长的优势，且随着国内产能的不断扩充，当未来价格逐步达到市场普遍接受的程度时，有望成为国内单片防火玻璃的主流产品。

（3）其他特种玻璃体系

耐热微晶玻璃，主要是指锂铝硅系统透明微晶玻璃，通过控制玻璃成分和晶体析出，可以得到低膨胀或者零膨胀的玻璃材料，使其具有很高的耐热震性，目前主要用于特种光电材料和基板材料，民用领域用于制作明火上加热的炊具和餐具，例如生活中可见的电磁炉、电陶炉面板、建筑真火壁炉玻璃、耐火观察窗等。目前该类型玻璃主要采用压延、磨抛工艺生产，成本高，用作建筑单片防火玻璃较少。

石英玻璃是二氧化硅单一成分的玻璃，具有相当高的均匀性和透明度，机械强度高、耐热性好，膨胀系数很小，化学稳定性高，因价格昂贵和加工困难，只在一些特殊的耐火窗口中得到应用。

其他特种耐火安全玻璃，根据特殊需要采用其他体系的玻璃材料，通过安全化处理和应用场景匹配性设计，多为定制化应用。

3、单片防火玻璃的耐火机理

3.1 玻璃的断裂力学特性

玻璃的本征力学性能直接决定着其在火灾受热时的承受能力。理论上，玻璃的抗压和抗弯强度均是较高的，但是由于实际生产和加工过程中玻璃表面及边缘大量的细微裂纹，其实际测量值要低得多，在实际工程应用中，出于安全方面的考虑，一般会采用30~50MPa作为普通玻璃和钢化玻璃的设计抗张强度。这种力学现象在众多研究中都可以由Griffith建立的传统的脆性材料裂纹扩展理论来解释，即玻璃强度受到尺寸效应尤其是裂纹尺寸效应的影响，且裂纹在持续外力作用下表现为快速扩展。在实际测试中，玻璃的抗弯强度很大程度上受到表面状态、边部加工质量、钢化应力三者综合因素的影响，实验结果显示，利用HF酸表面边缘腐蚀抛光、机械抛光、砂轮磨边等不同加工后，抗弯强度从98MPa、78MPa降低到56MPa。另外有研究指出，当裂纹尺寸大于500μm时，玻璃断裂应力满足经典断裂力学，裂纹尺寸小于 200μm时，玻璃断裂特性介于经典力学向强度平稳状态的收敛阶段，但玻璃断裂强度与裂纹的数量和尺寸有密切关系，随着裂纹个数增加和裂纹尺寸加大，强度逐渐减小，衰减可达15%以上。进一步，建筑玻璃在使用过程中的持久应力作用、环境中水分及活性介质与玻璃表面反应也会引起疲劳破坏，玻璃表面磨伤和风沙对玻璃表面的磨损均会造成玻璃强度下降。

在玻璃表面预加压应力是有效提高抗弯强度的方法，因此目前常用的钠钙硅单片防火玻璃均采用了高表面应力的设计，表面压应力甚至远大于目前钢化玻璃标准约定的表面应力大于90MPa 。研究结果也显示，钢化应力与抗弯强度测试值有密切关系，在相同玻璃材质和加工条件下，玻璃抗弯强度与钢化应力符合一次线性方程关系，即随着钢化应力提高，抗弯强度增大，对于厚度6~15mm 范围内玻璃大量离散型数据分析，可得到了极限抗弯强度的包络线公式：

$\sigma - 0.826\sigma_{\text{钢化}} + 37.826$

但是玻璃的断裂强度离散性大，抗弯强度的测定与测试条件如加载方式、加载速率、持续时间等密切相关。很多国家往往采用统计分析方法推断出玻璃的实际应用强度，通常大量玻璃破坏的试验结果进行统计处理，给出设计安全系数与玻璃失效关系规律。玻璃作为建筑安全玻璃尤其作为防火玻璃应用时，必须考虑综合载荷影响因素下玻璃强度的安全系数，除应考虑玻璃强度本身离散安全系数K1外，还应考虑在火灾受热情况下各种环境载荷作用下的安全系数K2，在玻璃幕墙工程技术规范中约定了玻璃幕墙失效概率为0.1% ，其强度离散安全系数K1未2.5。防火玻璃在火灾环境受热失效考核时着火后气压变化、燃烧热点随机性等因素，如果简单按照风压载荷安全系数考虑，防火玻璃的临界强度设计可参照下表设计。

表1 综合载荷作用下玻璃临界强度的安全系数设计

玻璃类型	加载速率和时间	测试抗弯强度	综合安全系数	设计抗弯强度
	Nmm ⁻² s ⁻¹ /s	MPa	K=K1*K2	MPa
钢化玻璃	2/60	150	2.75	54.55
平板玻璃	2/30	98	3.475	28.2

综上所述，玻璃的断裂力学特性已经有较为成熟的研究和共同的认知结论，玻璃材料的组成结构加工决定了其固有的力学特性和力学参数。因此，不同类型、不同厚度的单片防火玻璃所承受的耐火临界破裂应力是确定的，在钠钙硅玻璃基础上，通过借用物理、化学强化手段提高玻璃的表面压应力，通过精细加工改善玻璃表面和边缘微观裂纹，提高其在一定尺度范围和耐火条件下的临界破坏强度，是可行的。

3.2 玻璃受热破裂的机理分析

1985 年，世界火灾学之父，哈佛大学的Emmons教授在第一届国际火灾大会上首先提出了“玻璃破裂是火灾研究中重要的结构问题”。许多研究人员通过实验、理论、数值模拟机理和预测模型法来探究玻璃在火灾中的破裂机理和预测模型，并且发现由温差形成的内部热应力是玻璃受热破裂的主要原因。玻璃在制作和加工过程中，内部热应力及表面张力变化产生的微小裂纹（瑕疵）随机分布在玻璃内部，导致裂纹起裂具有很强的随机性，而且一旦起裂，裂纹的扩展速度往往大于2000m/s，其形成“孤岛”并且脱落速度很快，最终玻璃完全破裂失效。火灾中玻璃的破裂主要分为两个阶段，第一个是火源和热烟气向玻璃的传热过程，另一个是玻璃温度不均匀产生热应力导致其破裂和脱落的过程。当然火灾中的玻璃还可能不存在第三阶段，即玻璃在软化温度之前有效抵抗了热变形而未破裂，而是随着火灾持续升温直至高温下软化流失失效的过程（涉及玻璃高温耐火极限的问题，本文暂不讨论）。

第一个阶段的玻璃传热是非常复杂的过程，涉及到一维、二维和厚度方向上三维的温度分布，主要是辐射造成的分布和对流传到的双重影响，还有玻璃材质、玻璃结构的影响。张毅等人论文指出，发生火灾时，玻璃暴露表面受到火源和烟气的热辐射、热传导和热对流作用，到达较高温度。而玻璃被边框遮蔽的表面不能直接受到火源和烟气的热辐射、热传导和热对流作用，导致遮蔽表面温度较暴露表面温度低。由于玻璃是热的不良导体，暴露表面的温度并不会很快传递到遮蔽表面和玻璃背火面。随着火源热释放速率的不断提高，玻璃暴露表面与遮蔽表面、玻璃向火面与背火面之间的温度差不断增大，当温度差产生的热应力达到玻璃表面所能承受的临界应力时，玻璃表面就会产生裂纹。一般来说火灾场景下玻璃的首次破裂发生在玻璃的边缘部分，不少研究者通过实验找出玻璃破裂的基本温差，Keski-Rahkonen研究认为普通钠钙硅玻璃破裂临界温差为80℃，Skelly研究普通玻璃在火灾中的破裂行为，其实验测量到的温差为90℃，Xie做了钢化玻璃的破裂温差的研究，发现6mm厚钢化玻璃破裂温差为330~380℃，10mm厚钢化玻璃的破裂温差为470~590℃等。

目前所有研究者的实验结果都统一地认为玻璃表面温差是玻璃破裂的内在机理，即当温差产生的热应力应力大于玻璃的极限抗拉应力时，玻璃就会发生破裂。因此实际应用中分析研究玻璃的热炸裂问题，主要是分析玻璃温度分布的规律和影响因素，对于防火玻璃的应用场景而言，需要考虑火源特征、热传导模式、四周遮蔽框式安装、环境风压等综合因素的影响。首先火灾环境下热辐射往往占到很大比例，火焰和高温烟气的辐射在穿透玻璃时被部分吸收，研究数据表明对于6mm的玻璃，63%的辐射被1mm的厚度所吸收，因此厚度方向上存在辐射温度梯度。此外，不论是厚度方向还是平面方向上，玻璃的温度梯度会受到热辐射和对流、传导三种因素的影响，尤其是双层或多层玻璃时，产生温度差异的关联因素将更加复杂。此外，在建筑外墙防火玻璃遭遇火灾时，由于玻璃遮蔽位置和遮蔽面积的不同造成热载荷分布差异显得更为重要，玻璃的遮蔽区域由于没有受到火源的辐射载荷作用，其温度升高主要来源于非遮蔽区域的热传导，因此遮蔽区域的温度相比较非遮蔽区域温度明显较低，形成的温差热应力的主要来源，对于有框遮蔽的玻璃结构，最大应力总是产生在玻璃板卜遮蔽与非遮蔽区域的交界处，可认为是裂纹起裂最为危险的区从同样有研究表明，火源位置对玻璃的受热破裂行为影响显著，裂纹更容易从高温区（火源位置）起裂，随着火源和玻璃距离的增加，玻璃的临界破裂时间也相应增加。研究者通过调整火源位置改变玻璃表面温差，进

行玻璃的临界破裂条件和破裂危险期分析，通过大量统计实验表明在火场中玻璃的破裂和脱落往往发生在火势的稳定发展期，该阶段火焰和烟气容易发生蔓延，从而在火灾演化中造成非常严重的后果，因此可以说玻璃的破裂或火灾蔓延是相互动态影响的。

3.3 玻璃热炸裂的其他影响因素

如上所述，玻璃本身的力学性能和火灾中的热应力产生共同决定了玻璃的破裂，但实际的玻璃应用场景是非常复杂的，不同的厚度、尺寸、长宽比、加工质量、安装条件都会带来很大的随机性隐患。例如，玻璃厚度是玻璃的一个基本参数，建筑中为了满足不同的需求，往往会采用不同厚度的玻璃。谢启源等人发现6mm钢化玻璃所能承受的最大温度差为330~380℃，10mm厚度的玻璃所能承受的温度差为470~590℃。上述提及的边框安装、遮蔽条件对于玻璃破裂的影响十分显著，随着遮蔽宽度的增加，首次破裂时间呈先减小后增大的趋势，研究表明铝框玻璃窗要比木框玻璃窗能承受更长时间的热载荷。外界条件对其防火玻璃的破裂同样有重要影响，其中火灾场景下的水幕（水喷淋）是影响玻璃破裂最主要的外界因素之一，在火灾初期玻璃温度较低时，水幕具有很好的保护作用，但是当玻璃温度超过临界值再施加水幕，会对玻璃的破裂和脱落具有一定的促进作用，验结果表明250℃为临界温度，即当玻璃表面温度在此之上施加水喷淋，反而会加速玻璃的破裂和脱落。不可避免地，在实际火灾环境下，火源爆燃所产生的热振效应、烟气冲击、建筑物变形等都可能对防火玻璃的有效性、安全性带来致命影响。

综上，如此之多的玻璃破裂影响因素，针对单片防火玻璃的使用，就要求设计单位到产品生产、工程应用企业，必须充分考虑应用场景风险和玻璃性能安全系数，提出可靠的安全设计使用范围。

4、单片防火玻璃受热状态下的数值模拟

4.1 玻璃破裂的随机性和确定性

如上所述，玻璃在机械载荷和热冲击作用下非常容易发生断裂破坏，其强度远低于理论强度的主要原因就是生产及加工过程中产生的随机分布的微裂纹，在火灾场景中，玻璃破裂所达到的断裂应力实际上就是其极限拉应力，而正是由于微裂纹的随机分布，导致即便是同一批次生产的玻璃都会有不同的断裂应力，即产生了玻璃破裂的随机性和不确定性。关于这种随机性和不确定性，国内外进行了大量的统计性研究，常见的是采用weibull函数进行可靠性分析。例如，对大量的玻璃断裂力学测试结果进行weibull函数分析后得到普通玻璃的断裂应力为40MPa；日本建筑研究院分析玻璃破裂和脱落概率与高斯函数的关系，利用指数分布函数对结果进行随机分析，得到4mm和6mm厚度的玻璃脱落临界热流分别为20KW/m²和28KW/m²；中国火灾研究实验室利用自行设计的均匀辐射封闭箱体实验装置对浮法玻璃和Low-E玻璃进行实验，发现相同工况下玻璃破裂时刻的中心温度、温度差及热应力也呈weibull函数随机分布，并得到玻璃破裂关键参数的生存概率函数、故障概率函数及概率密度函数。

与随机性对应的是确定性结论，即玻璃的破裂是可以计算和确定的，同时也是可以避免的，玻璃破裂的确定性分析主要体现在应力分布计算和破裂时间预测两个方面。根据玻璃破裂边缘热应变和胡克定律可以推断0.07%的热膨胀就能够使玻璃在火灾下发生破裂，在热应变的基础上，进一步分析玻璃内部的传热和应力分布，可得出玻璃破裂的温度场模型，目前多种理论模型都可以预测玻璃破裂所需的临界条件，例如边框遮蔽区和火焰暴露区的温度差为80℃。在玻璃破裂时间预测方面，研究从一维、二维传热分析，逐渐过渡到三维模型的建立，更为准确的分析最大主应力并以此为判据判断玻璃的破裂，这种研究与真实的玻璃时间和火灾情况具有较好的一致性。

4.2 玻璃受热状态下的数值模拟

实验直接研究玻璃破裂现象是最为直接和有效的方法，但是玻璃在火灾下的破裂行为具有很强的随机性，加之火灾场景的复杂多变，这给火灾情况下玻璃的破裂行为研究带来了很大麻烦。研究人员通过数值计算和计算机模拟的方法进行过破裂行为的分析研究也是非常有意义的。

目前的计算机模拟火灾场景中玻璃的热力学行为是一个相对比较滞后的领域，比如常见的FDS、CFAST等火灾科学模拟软件，难以满足真实场景中玻璃破裂脱落的模拟需求，致使准确预测火灾场景中火势蔓延扩散有一定的误差。首先，单片（防火）玻璃作为典型的脆性断裂材料为研究对象时，应在系统分析玻璃强度离散性基础上，结合实际玻璃破坏的临界应力统计，这样才能正确地评价玻璃实际工况下的服役行为。接下来，玻璃火灾受热情况下的数值模拟将开展三方面的内容：（1）热学模拟是以传热方程为核心，将火源特性和玻璃热物理、传热机理相结合，尽可能真实的获取传热模型和玻璃温度场动态参数。（2）力学模拟多是基于有限元法，利用Hooke定律（玻璃为脆性材料阶段）结合玻璃材料本征物理特征参数，计算不同载荷作用下的玻璃三维应力分布特征和裂纹动态扩展过程。（3）应用场景模拟就是通过热力耦合分析，建立完整产品工况模型，精确求解玻璃的玻璃动态热力学参数以及临界破裂失效条件。

基于热力耦合分析算法，目前已有大量的玻璃火灾破裂预测模型和相关结论，通过一些主流成熟商用软件开展玻璃热学、力学模拟得到了很多有意义的数据。陈昊东等人采用有限元法，求解玻璃的一维热传导方程，选取了三种典型热荷载作用下的玻璃破裂实验（热辐射，城乡交界火灾和室内火灾），并利用温差准则对玻璃首次破裂时间进行了预测研究，将模拟结果与前人的计算和实验结果比较，验证了模型的适用性和代码的可靠性。刘永军等人开展了耐火窗用防火玻璃数值模拟，其使用ANSYS软件分析预定火灾场景下防火玻璃内的温度场，计算防火玻璃在四种不同的力学边界约束下的应力分布和单元失效过程，结果防火玻璃温度场出现“边框现象”，基于模拟结果提出了四点固定防火玻璃是一种较为合理的安装方式。王禹实验研究结果显示，玻璃火灾破裂脱落和安装约束方式有很大的关系，通过应力模拟得到四点支撑幕墙玻璃破裂时内部的最大拉应力为37.0MPa，接近于实验所使用玻璃的抗拉强度，玻璃最终的破裂原因是内部产生的拉应力超过了玻璃的抗拉强度，对比框式安装玻璃的应力分析，框式安装玻璃的应力最大区域往往在遮蔽区域的交界处，点式安装玻璃的应力最大区域是在固定点周围。其采用有限元计算的方法通过计算应力分布有效预测不同玻璃安装形式的起裂位置和临界破裂温差（约150℃），且根据热流与温差数值关系明确指出了玻璃的破裂往往发生在火源稳定燃烧阶段。陆伟等研究风载荷作用下火灾中玻璃首次破裂时间和应力分布模拟预测，同样指出玻璃暴露区域热膨胀使得遮蔽区域受到拉应力直至发生破裂。综上，国内外学者对玻璃在火灾中响应规律及破裂机理进行了大量研究，均得出边缘遮蔽区域是发生破裂概率最大的位置，一致认为对于四周遮蔽的玻璃遮蔽区域和非遮蔽区域的表面温度差所导致的热应力即为玻璃破裂的根本原因。

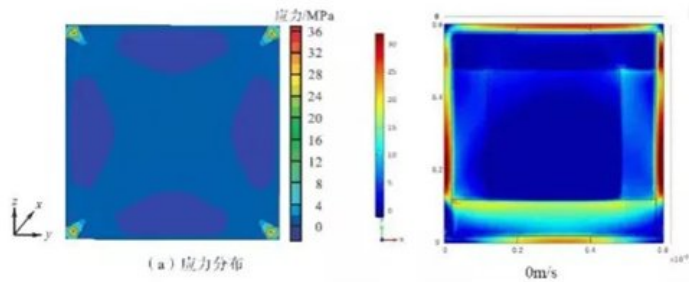


图 1 不同安装形式下玻璃火灾受热后的应力分布

上图为不同点安装无遮蔽玻璃和遮蔽安装玻璃的受热应力分布图，二者有较大的差异，以常见的遮蔽安装右图为例，可以看出玻璃边缘遮蔽区域受到拉应力作用，玻璃中心区域受到压应力作用，且第一主应力在破裂时刻之前最大值分别为 31.21MPa、32.04MPa、31.98MPa 和 30.94MPa，这与陈昊东等人模拟 3mm 玻璃破裂应力为 40MPa 以及传统玻璃的临界破裂应力允许值基本对应，这个数据是基本接近真实情况的。因此，在充分考虑着火环境条件和模拟计算参数的情况下，研究者很好的实现了玻璃火灾环境下数值计算代码的可靠性和模型的适用性，对复杂综合条件下玻璃的动态反应做出了很好的判断。例如 Harada、Pagni、陈昊东等人通过不同的数值模型预测求解玻璃首次破裂时间，经过结果分析和实际实验数值对比都呈现出了很好的吻合一致性，且准确地呈现了玻璃在火灾中的破裂规律。

5、结论

综上所述，目前关于玻璃的本征力学性能和火灾场景下玻璃热炸裂的理论数据是非常丰富的，玻璃在遇火灾时的破裂失效机理也是非常清晰的，已有的温差判据、临界应力判据仍是判定玻璃破裂的有效依据。由于受到玻璃本身破裂随机性的影响，不同的玻璃种类、加工方式、应用场景的综合条件下，使得目前单片防火玻璃临界破裂的可预测性难度大大增加，单片防火玻璃火灾破裂失效的随机性风险不可避免。

从科学研究角度，有必要针对不同类别的新型玻璃材料进行火灾场景下的热力学特性和破裂机理进一步研究，通过实验测试和数值模拟计算相结合的方法，建立集合玻璃微观尺度缺陷、边缘条件、宏观尺寸和应用场景参数的多维度参数模型或数据库，充分体现材料特性、加工细节和应用场景的影响权重因子，使得单片防火玻璃的生产应用更加有据可依。

从工程应用角度，在满足建筑防火设计规范和消防验收的前提下，单片防火玻璃也不能被一般性的对待，仅仅依靠单次试验或者有限范围的测试报告是不够的，应根据工程性质和安全等级需要进行着重考虑。当出现例如超大尺寸、超长耐火时间需求时，工程各方应开展多种形式的技术论证，使用更加稳健的技术产品，使得设计具有本质上的可靠性和重复性，彻底解决风险的可能性和火灾中存在的不确定性。

本文根据已有数据资料概述了单片防火玻璃在火灾初期（玻璃为脆弹性范围内）的热炸裂行为和相关机理，实际上单片防火玻璃的耐火极限也取决于长时间高温下其粘弹性和粘流的特性，这方面的研究是非常欠缺的，作者将在后续研究中进行讨论分析。

参考文献：

- [1] GB15763.1-2009建筑用安全玻璃_第1部分：防火玻璃
- [2] 赵恩录，张文玲，黄俏. 防火玻璃研究进展及在建筑领域中的应用，建设科技，2018，35，47-50
- [3] 丁敏. 防火玻璃在当前建筑工程应用中存在的问题分析，科技创新导报，建筑科学，2019，17，145-148
- [4] 祖利荣. 浅谈单片防火玻璃的生产技术，玻璃，2005，3，57-59
- [5] 王振，索涛，李玉龙，等. 退火及化学钢化硅酸盐玻璃的动态弯曲力学行为研究，北京理工大学学报，2019，39，1006-1011
- [6] 消防新技术新产品介绍硼硅防火玻璃，消防技术与产品信息，2015，5，77-78
- [7] 鲍弋海，袁勇，谢丽美，等. 钢化玻璃抗弯强度的试验研究，建筑技术开发，2002，29，
- [8] 宋显辉，潘素琪. 玻璃弯曲强度的裂纹影响，玻璃与搪瓷，1994，22，1-4
- [9] 刘小根，刘正权，包亦望，等. 玻璃弯曲强度的厚度效应及超薄玻璃弯曲强度测试技术，硅酸盐学报，2016，11，1641-1645
- [10] 马晋荣，黎晓瑞，金宗哲. 玻璃的弯曲强度与Weibull模数，建筑材料科学研究院院刊，1987，03，21-26
- [11] 刘小根，包亦望，王秀芳，等. 安全型真空玻璃构件功能一体化优化设计，硅酸盐学报，2010，38，1310-1317
- [12] 刘永军，樊黎明，王雪. 防火玻璃窗耐火性能数值模拟，沈阳建筑大学学报(自然科学版)，2016，32，1054-1061
- [13] 王禹，王青松，黄柯，等. 点式安装玻璃幕墙在火灾中的破裂行为，燃烧科学与技术，2015，21，241-247
- [14] 陆伟，陈昊东，王青松. 风载荷作用下火灾中玻璃首次破裂时间和应力分布模拟预测，第26届全国结构工程学术会议论文集，2017，10，486-490
- [15] 张毅，王青松，黄新杰，等. 火灾场景中玻璃破裂行为研究综述，灾害学，2010，25，140-145
- [16] 陈昊东，王青松，孙金华. 火灾环境下玻璃首次破裂时间的模拟预测，工程力学，2017，34，210-213
- [17] 张毅，王青松，朱晓斌，等. 热荷载作用下玻璃破裂影响因素的显著性研究，建筑材料学报，2012，15，
- [18] 苏燕飞，王青松，赵寒，等. 中空玻璃受热破裂行为规律研究，火灾科学，2015，24，1-8

(作者：中国建筑材料科学研究总院，国家玻璃深加工工程技术中心：李要辉，杨磊，徐磊，徐志伟，张凡，王晋珍，穆元春)

