

冰雹冲击下温室玻璃破损情景数值模拟

丁敏, 施旭栋, 周蕊, 邓小环, 蒋秀根*

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 为研究温室玻璃的抗冰雹冲击性能, 该文采用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立了温室玻璃和随机冰雹的有限元模型。考虑冰雹的随机性, 模拟了冰雹冲击温室玻璃的全过程; 得到了不同粒径冰雹对温室玻璃的破损效果; 研究了冰雹对不同厚度、不同平面尺寸、不同支撑情况的温室玻璃的破损效果; 同时, 对温室玻璃的抗雹性能进行了评估。结果表明: 玻璃板受冰雹群冲击时的破损效果不等于单个冰雹冲击时的简单叠加; 4 mm 厚的玻璃板基本可以满足大部分玻璃温室的抗雹要求; 温室玻璃板长宽比取值建议在 1.5 左右; 通过控制玻璃板支撑条件来提高温室玻璃板的抗冲击性能并不可靠; 保证冰雹冲击时玻璃板的整体稳定性, 使主体结构不出现大跨度裂纹而形成较大碎片, 应是玻璃温室抗雹设计的主要目标。该研究可为温室抗冰雹设计提供参考。

关键词: 玻璃, 冲击试验, 破损容限, 抗雹性能, 数值模拟

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.01.036

中图分类号: TU261

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-01-0202-06

丁敏, 施旭栋, 周蕊, 等. 冰雹冲击下温室玻璃破损情景数值模拟[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 202-207.
Ding Min, Shi Xudong, Zhou Rui, et al. Numerical simulation on damage behavior of greenhouse glass under hail impact[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 202-207. (in Chinese with English abstract)

0 引言

近年来强对流天气的频繁发生给玻璃温室提出了极大挑战: 北京绝大部分地区冰雹年发生概率在 70% 以上, 主要分布在北部、东部和西部地区, 其中冰雹发生概率最大的是西北部地区, 高达 90% 以上^[1-3]。冰雹来袭之时, 玻璃温室覆盖玻璃一旦发生破碎, 便会造成巨大的经济损失, 因而在现有条件下, 系统研究玻璃温室覆盖玻璃抗雹性能并给出其合理评价具有重要意义。

目前国内玻璃温室所承受的荷载基本分为两大类: 恒载和活载。在结构方案确定以后, 恒载随即确定。玻璃温室在荷载计算时考虑的活荷载主要有雪荷载、风荷载、附加风荷载、作物吊重荷载、地震荷载以及施工活荷载等^[4], 而对于冰雹这种特殊活荷载, 在我国《建筑结构荷载规范》^[5]及《温室结构设计荷载》中均未提及, 因此在实践中, 很难给出实际的方法进行破坏模拟, 从而不易提出一些确实有效的措施来提高玻璃温室覆盖玻璃抗雹性和温室结构的安全性。

近年来, 国内外许多涉及玻璃温室结构的安全性问题, 如温室结构可靠度设计、温室结构抗风性能设计^[4-8]等都已得到较好解决, 但关于玻璃温室结构抗雹性能的研究至今尚未见文献报道, 也未见有可行的解决方法。

本文采用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立有限元模型, 模拟冰雹冲击温室玻璃过程, 通过控制冰雹的粒径和速度观察冰雹对温室玻璃破坏模式的影响, 评估温室玻璃的抗雹性能, 并为今后温室玻璃抗雹设计标准的制定提供参考。

1 有限元模型

1.1 尺寸参数

冰雹直径一般为 5 mm 到 50 mm, 有时可达到 100 mm 以上, 小雹块的破坏力有限, 本模型主要考虑大雹块事件对温室玻璃的影响, 参考《中华人民共和国国家标准冰雹的等级(征求意见稿)》, 最终拟选的冰雹直径分别为 30、50、100 mm。冰雹落地速度与冰雹尺寸之间的关系相对固定, 冰雹虽由于重力而落下, 但是气流会对其产生阻力, 一般空气阻力与冰雹速度 v 的平方及冰雹截面积 $A=\pi r^2$ 成正比, 空气阻力和重力可表示如下

空气阻力

$$F_r = C \times \rho_{\text{空气}} \times \pi r^2 \times v^2 \quad (1)$$

重力

$$F_g = \rho_{\text{冰雹}} \times \frac{4}{3} \pi r^3 \times g \quad (2)$$

式中, F_r 为空气阻力, N; F_g 为重力, N; C 为空气阻力系数, 常数; $\rho_{\text{空气}}$ 为空气密度, kg/m^3 ; r 为单个冰雹半径, m; v 为物体与空气的相对运动速度, m/s; $\rho_{\text{冰雹}}$ 为冰雹密

收稿日期: 2011-01-20 修订日期: 2011-08-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50979108); 国家大学生创新性实验计划项目(091001950); 新世纪优秀人才计划(NCET-08-0542); 教育部中央高校基本科研业务费专项资金项目(2011JJS126); 科技部“十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAD4B03); 高等学校博士学科点专项科研基金(20110008120017)。

作者简介: 丁敏(1980-), 女, 山东曲阜人, 讲师, 博士, 主要从事结构工程方面的研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。

Email: dingmin@cau.edu.cn

*通信作者: 蒋秀根(1966-), 男, 江苏大丰人, 教授, 主要从事结构工程方面的研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。

Email: jiangxiugen@tsinghua.org.cn

度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 。

最后当阻力等于重力时, 也就是合力为零时, 便可估算出冰雹尺寸与下落速度间的关系, 通过比较分析, 本文主要模拟如表 1 所示的冰雹冲击对温室玻璃的影响, 冰雹尺寸与落速的计算值如表 1。

表 1 冰雹尺寸与落速的计算值^[9]

分类	直径 D/mm	速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	破坏力
小冰雹	30	25	较大
中冰雹	50	35	很大
大冰雹	100	45	严重

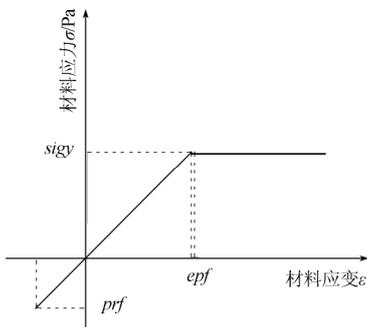
实际工程中, 玻璃温室常用玻璃厚度一般为 4 和 5 mm; 玻璃平面尺寸一般为 1.5 m×1.0 m、1.5 m×0.8 m、1.0 m×1.0 m。本文计算中玻璃厚度和玻璃平面尺寸分别以 4 mm 和 1.5 m×1.0 m 为基准尺寸, 玻璃厚度还包括 5、6、8、10、12 mm, 玻璃平面尺寸还包括 1.5 m×0.8 m、1.0 m×1.0 m。

1.2 单元类型与建模方法

冰雹与玻璃均采用 solid164 单元。运用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 中的三维显式动力分析模型建模^[10,11]。考虑到冰雹是错落砸向玻璃, 建模过程中赋予冰雹到玻璃板随机高度。冰雹的粒子密度具有随机性, 没有固定标准, 本文参考某次冰雹灾害, 拟采用的冰雹粒子密度为 26 个/ m^2 ^[12]。

1.3 材料模型

材料按弹性各向同性体考虑。由于材料破坏均为脆性破坏, 不考虑材料塑性, 塑性段弹性模量为零 ($etan=0$)。取受压屈服强度等于抗压强度, 材料受压达到屈服进入塑性时, 塑性失效应变亦设置为零 ($epf=0$), 即一产生塑性应变就破坏。材料受拉达到抗拉强度时, 材料即破坏^[13]。因此定义了材料抗拉抗压强度不相等的破坏准则。



注: ϵ 表示材料应变, 无单位; σ 表示材料应力, Pa; $sigy$ 表示材料的抗压强度, Pa; prf 表示材料的抗拉强度, Pa, 材料强度达到抗压或抗拉极限时材料即破坏; epf 表示材料的塑性失效应变, 无单位, 不考虑材料塑性段, 取 $epf=0$ 即材料产生塑性应变时材料即破坏。

图 1 材料应力-应变关系曲线

Fig.1 Stress-strain curve of material

应力-应变关系曲线为直线 (如图 1), 用抗拉强度控制材料的受拉破坏, 用塑性应变控制材料的受压破坏, 材料参数如表 2 所示。

表 2 冰雹和玻璃板材料参数^[14-18]

	弹性模量 E/MPa	柏松比 μ	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	抗拉强度 prf/MPa	抗压强度 $sigy/\text{MPa}$
冰雹	53	0.33	900	1.43	2.90
玻璃板	70	0.25	2400	58.8	500

1.4 网格划分

为保证计算精度, 模型整体网格划分比较严密^[19]。冰雹采用楔形单元, 网格由程序自动生成。玻璃板用规则的六面体单元划分, 厚度方向上 2 等分, 长度方向上 300 等分, 宽度方向 300 等分。模型总计单元 232 808 个, 其中冰雹群楔形单元 52 808 个, 玻璃板六面体单元 180 000 个。

1.5 接触与边界条件

使冰雹群以规定的速度砸向玻璃板, 为了保证开始接触的单元失效后, 其后的单元能继续接触, 接触类型选择面面侵蚀接触, 接触面间的摩擦系数取 0.15^[20]。玻璃板四周边缘节点固支即约束住各节点的位移和转动。

2 结果与分析

2.1 冰雹错落与同时齐落砸向温室玻璃的区别

实际情况中, 冰雹是一颗颗先后落向地面的, 只考虑冰雹整齐下落是不充分的。本文首先以直径为 30 mm 的小冰雹为例, 取玻璃厚度为 4 mm、玻璃板平面尺寸为 1.5 m×1.0 m、玻璃板边界条件为四边固支, 分别对齐落和错落的情况进行模拟, 说明按冰雹错落进行数值模拟的必要性。玻璃板上最大拉应力与时间关系如图 2 所示。

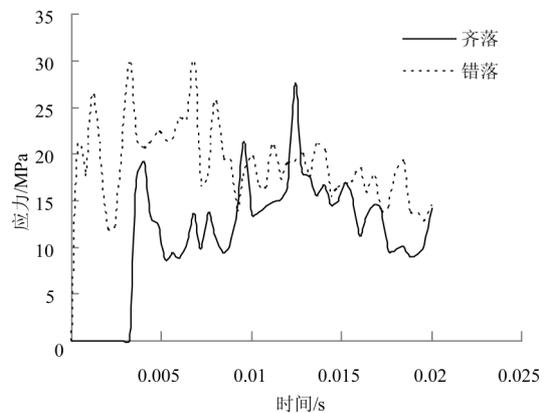


图 2 冰雹齐落与错落时玻璃板中最大拉应力与时间关系曲线

Fig.2 Maximum normal stress-time curve of glass plate under impact of hail falling at same and at random

由图 2 可见, 当冰雹错落时玻璃板上承受的最大拉应力整体要高于齐落时。当冰雹错落撞击时, 由于时间差的存在, 应力波的叠加效果更加多样和复杂, 对温室玻璃造成的破损效果也有所增强。可见, 研究温室玻璃的抗雹性能仅研究单个冰雹间的简单叠加已显不足, 冰雹群撞击温室覆盖玻璃的冲击效果不等于单个冰雹冲击的简单叠加, 而是一个需要考虑应力波相互传播叠加的复杂过程。因此, 为更接近实际情况, 本文在模拟过程中均按冰雹错落进行。

2.2 不同粒径冰雹对温室玻璃的破损效果

取玻璃厚度为 4 mm、玻璃平面尺寸为 1.5 m×1.0 m、玻璃板边界条件为四边固支，分别对表 1 中的小冰雹、中冰雹和大冰雹错落砸向温室玻璃进行数值模拟，以研究不同粒径冰雹对温室玻璃的破损效果。

2.2.1 小冰雹，直径为 30 mm，落速为 25 m/s

在直径为 30 mm 的小冰雹冲击下，4 mm 厚的玻璃板完好无损，冰雹与玻璃板接触瞬间冰雹即破碎，单元退出工作，冰雹残余部分反弹，玻璃板应力及破损效果如图 3a 所示。从数据上分析，玻璃板所受的最大拉应力为 19.28 MPa，最大压应力为 9.13 MPa，整个过程中玻璃板所受的最大拉应力不超过 31.00 MPa，没有达到玻璃板的抗拉强度。

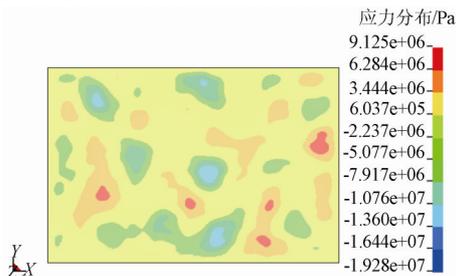
2.2.2 中冰雹，直径为 50 mm，落速为 35 m/s

在直径为 50 mm 的中冰雹冲击下，玻璃板在第 8.4×10^{-4} s 时板底面拉应力达到 58.8 MPa，板底面出现受拉破坏，随着时间的增长，玻璃板上出现若干小裂缝。从第 2.8×10^{-3} s 时，一处裂缝在 2 个时间步长 (4×10^{-5} s) 内，裂缝扩展至约原长的 10 倍，随后各小裂缝均出现相似现象，在 0.01 s 内裂缝扩展至连通，玻璃板整体塌落。玻璃板应力及破损效果如图 3b 所示，图中玻璃板所受的最大拉应力为 58.7 MPa，最大压应力为 76.9 MPa，整个过程中玻璃板一直处于极限受拉状态，虽然其受到的压应力比拉应力要大，但玻璃的抗拉强度比抗压强度小得多，玻璃板的破坏以受拉破坏为主。

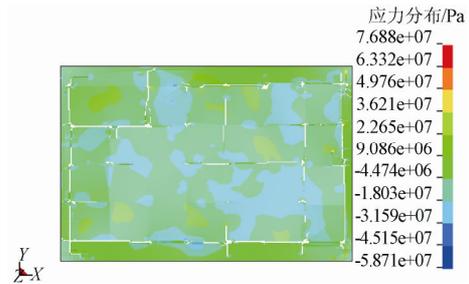
从模拟过程中可以看出，最先撞击玻璃板的冰雹并不能对玻璃板造成破坏，但在玻璃板中留下了应力波，应力波在玻璃板中传播与随后撞击的冰雹产生的效果相互叠加，随着冰雹下落数的增加，各个应力波相互作用导致玻璃板产生裂纹，裂纹在脆性玻璃板中快速扩展，玻璃板出现大面积破坏。

2.2.3 大冰雹，直径为 100 mm，落速为 45 m/s

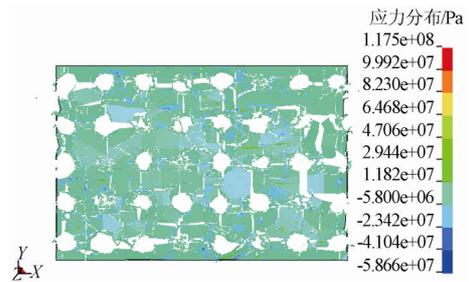
在直径为 100 mm 冰雹冲击下，玻璃板整个过程中受到的最大压应力达到了约 220 MPa，仍不足抗压强度的 50%，玻璃板的破坏仍以受拉破坏为主。与直径为 50 mm 的冰雹冲击时相比，单个冰雹足以对玻璃板造成破坏。单个冰雹撞击玻璃板时，在玻璃板上产生破洞和裂纹，裂纹没有大规模扩展，仅在小范围内扩展，随着砸向玻璃板的冰雹数增加，各个裂纹扩展到相互连通，玻璃板完全破坏。玻璃板应力及破损效果如图 3c 所示，图中时刻板所受的最大拉应力和压应力分别为 58.7，117.5 MPa。



注：用户输入时间为 0.01 s；压力云图在 97616 号单元出现最大拉应力，大小为 1.92787×10^7 Pa；在 209439 号单元出现最大压应力，大小为 9.12467×10^6 Pa。
a. 小冰雹冲击玻璃板



注：用户输入时间为 0.01 s；压力云图在 107804 号单元出现最大拉应力，大小为 5.87122×10^7 Pa；在 118495 号单元出现最大压应力，大小为 7.68842×10^7 Pa。
b. 中等粒径冰雹冲击玻璃板



注：用户输入时间为 0.01 s；压力云图在 95443 号单元出现最大拉应力，大小为 5.8658×10^7 Pa；在 135249 号单元出现最大压应力，大小为 1.17537×10^8 Pa。
c. 大冰雹冲击玻璃板

图 3 玻璃板受不同粒径冰雹冲击时应力分布

Fig.3 Stress distribution of glass plate under impact of hail with different diameter

2.3 冰雹对不同厚度温室玻璃的破损效果

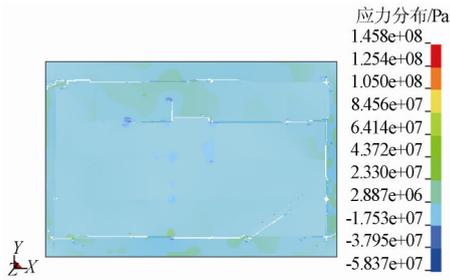
从 2.2 节数值模拟的结果可知，直径为 30 mm 的小冰雹不足以对 4 mm 厚的玻璃板造成破坏，此处不再开展其对厚度为 4 mm 以上玻璃板破损情况的研究。取玻璃板平面尺寸为 1.5 m×1.0 m、玻璃板边界条件为四边固支，分别对 4、5、6、8、10、12 mm 厚的玻璃受直径为 50 mm 的中冰雹和直径为 100 mm 的大冰雹冲击时进行数值模拟，以研究冰雹对不同厚度温室玻璃的破损效果。

2.3.1 中冰雹，直径为 50 mm，玻璃厚 4、5 和 6 mm

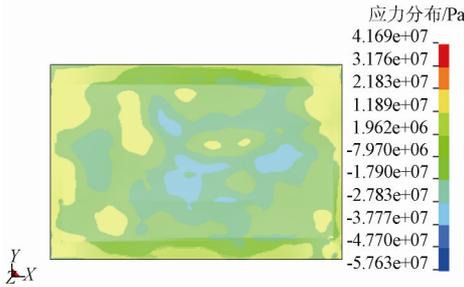
玻璃厚 4 mm 时，温室玻璃板的破损情况如图 3b 所示，玻璃厚 5 和 6 mm 时，温室玻璃板的破损情况如图 4a 和图 4b 所示。

由图 4a 可见，玻璃板破损效果与图 3b 类似，玻璃板上出现大跨度的裂纹且裂纹产生和扩展在一瞬间，具有突然性，玻璃板大面积垮塌。由图 4b 可见，6 mm 厚玻璃板承受住了中冰雹的冲击。从数据上分析，图中 5 mm 厚玻璃板所受的最大压应力和最大拉应力分别为 145.8 和 58.3 MPa，6 mm 厚玻璃板所受的最大压应力和最大拉应力分别为 41.6 和 57.6 MPa。显然，6 mm 厚的玻璃板由于刚度得到了很大的提高，冲击力得到了更好的传播，玻璃板整体受力更加均匀，应力集中相应减少。

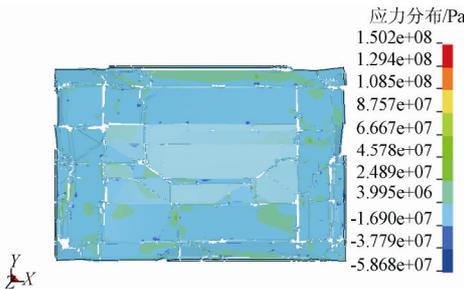
需要说明的是，6 mm 厚玻璃板已能够抗击直径为 50 mm 的中冰雹的冲击，因此 8 及 8 mm 以上厚度的玻璃板受中冰雹冲击破损效果的数值模拟便不再展开。



注：用户输入时间为 0.01 s；压力云图在 140213 号单元出现最大拉应力，大小为 5.83661e+07 Pa；在 155490 号单元出现最大压应力，大小为 1.45811e+08 Pa。
a. 5 mm 厚玻璃板受中等粒径冰雹冲击



注：用户输入时间为 0.01 s；压力云图在 147516 号单元出现最大拉应力，大小为 5.76302e+07 Pa；在 66883 号单元出现最大压应力，大小为 4.16909e+07 Pa。
b. 6 mm 厚玻璃板受中等粒径冰雹冲击



注：用户输入时间为 0.01 s；压力云图在 122773 号单元出现最大拉应力，大小为 5.86835e+07 Pa；在 128409 号单元出现最大压应力，大小为 1.50246e+08 Pa。
c. 12 mm 厚玻璃板受大冰雹冲击

图 4 不同厚度玻璃板受冰雹冲击时应力分布

Fig.4 Stress distribution of glass plate with different thickness under impact of hail

2.3.2 大冰雹，直径为 100 mm，玻璃厚 8、10 和 12 mm
首先对 12 mm 厚玻璃板受大冰雹冲击时进行数值模拟，其破损效果如图 4c 所示。

由图 4c 可见，大冰雹的破坏力极强，12 mm 厚的温室玻璃也不能承受住其冲击。温室玻璃厚度增加，其刚度亦增加，产生的裂纹以及裂纹扩展的程度则有所减轻，而且主要破坏区域集中在四周边缘，相对于图 3c，中间区域的破坏则有所减轻，并没有出现穿孔式破坏。由于此种情况的冰雹出现几率几乎为零，设防成本过高，不宜作为玻璃温室抗雹设防的对象。

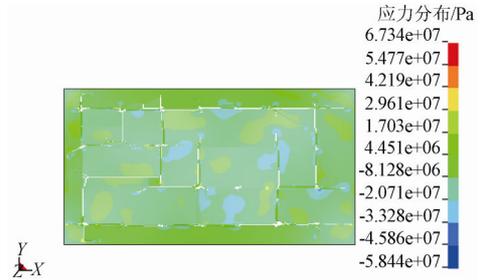
需要说明的是，12 mm 厚的玻璃板已不能够抗击大冰雹的冲击，因此 12 mm 以下厚度的玻璃板受冲击大冰雹冲击破损效果的数值模拟便不再展开。

2.4 冰雹对不同平面尺寸温室玻璃的破损效果

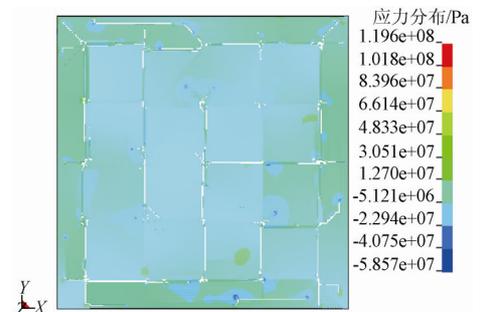
取玻璃厚度为 4 mm 玻璃板边界条件为四边固支，分别开展直径为 50 mm 的中冰雹冲击平面尺寸为

1.5 m×1.0 m、1.5 m×0.8 m、1.0 m×1.0 m 的玻璃板时的数值模拟，以研究冰雹对不同平面尺寸温室玻璃的破损效果。

平面尺寸为 1.5 m×1.0 m 的玻璃板受冲击时的破损效果如图 3b 所示，平面尺寸为 1.5 m×0.8 m 和 1.0 m×1.0 m 的玻璃板受冲击时的破损效果如图 5 所示。



注：用户输入时间为 0.01 s；压力云图在 130651 号单元出现最大拉应力，大小为 5.84421e+07 Pa；在 87686 号单元出现最大压应力，大小为 6.73443e+07 Pa。
a. 平面尺寸为 1.5 m×0.8 m 的玻璃板

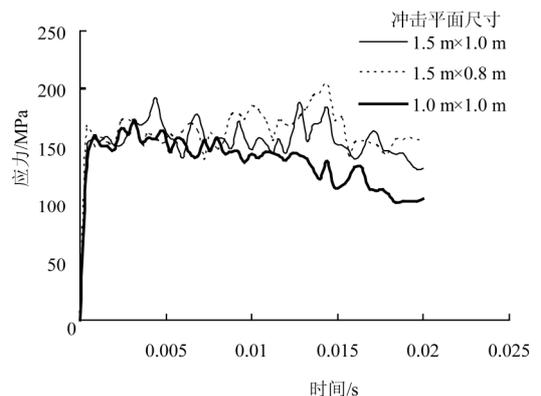


注：用户输入时间为 0.01 s；压力云图在 180863 号单元出现最大拉应力，大小为 5.85691e+07 Pa；在 87760 号单元出现最大压应力，大小为 1.19591e+08 Pa。
b. 平面尺寸为 1.0 m×1.0 m 的玻璃板

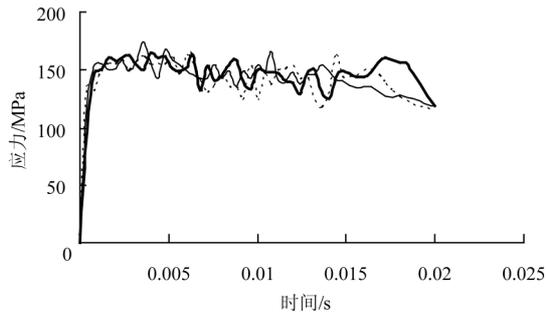
图 5 不同平面尺寸玻璃板受冰雹冲击时应力分布

Fig.5 Stress distribution of glass plate with different plane size under impact of hail

由图 3b、图 5a 和图 5b 可见，相同冰雹冲击不同平面尺寸玻璃板时的破坏效果类似，玻璃板无法承受直径为 50 mm 的中冰雹的冲击，几乎整个过程玻璃板上的最大拉应力都处在极限状态。仅从效果图上无法看出玻璃板平面尺寸对其抗冲击性能的影响，为了便于观察，做出了玻璃板中各时刻长、短跨方向最大正应力与时间的关系曲线，分别如图 6a、6b 所示，进而可直观地看到玻璃板在整个过程中的受力情况。



a. 长跨方向



b. 短跨方向

图 6 不同平面尺寸玻璃板的最大正应力与时间的关系

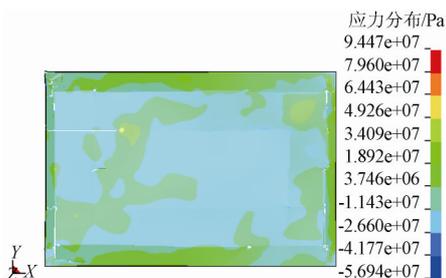
Fig.6 Maximum normal stress-time curve of glass plate with different plane size

由图 6 可知,图 6a 中在整体上 $1.5\text{ m}\times 0.8\text{ m}$ 玻璃板的长跨方向正应力较大,而图 6b 中在整体上 $1.0\text{ m}\times 1.0\text{ m}$ 玻璃板的短跨方向正应力较大。玻璃板的长宽比越大,则长跨方向的应力越大;玻璃板的长宽比越小,则短跨方向的应力越大。3 种平面尺寸玻璃板中,长跨方向最大正应力相差约 50 MPa ,短跨方向最大正应力相差在 10 MPa 以内,平面尺寸为 $1.5\text{ m}\times 1.0\text{ m}$ 玻璃板的长跨和短跨方向上的正应力相当。从整体效果来看,尺寸上的变化对玻璃板抗冲击性能的影响有限,但抗震设计中长宽比过大或过小都可能导致玻璃板中一个方向上的应力过大,从而降低玻璃板的抗震性能。研究表明,玻璃板长宽比在 1.5 左右是比较理想数值范围。

2.5 支撑情况不同时温室玻璃的破坏效果

前面所有算例中,温室玻璃板的约束均为四边固支,为了研究玻璃板支撑条件对其抗冲击性能的影响,分别对温室玻璃板的几种可能的约束形式进行数值模拟。由 2.3 节可知,中冰雹作用下 6 mm 厚的玻璃板无明显损伤,本节为可直观看出改变支撑条件对玻璃板抗冰雹冲击性能的改善效果,故取玻璃厚度为 5 mm 进行计算。玻璃板平面尺寸为 $1.5\text{ m}\times 1.0\text{ m}$ 、冰雹直径为 50 mm ,支撑情况包括:四边简支、四边固支、两对边简支和两对边固支、两邻边简支和两邻边固支、一边固支和三边简支、一边简支和三边固支。

结果表明,各种支撑情况下玻璃板的破坏效果类似,如图 7 所示,均出现了大跨度的裂纹,且大部分都出现在短跨方向。由于不能直接看出改变支撑条件对玻璃板



注:用户输入时间为 0.01 s ;压力云图在 155108 号单元出现最大拉应力,大小为 $5.69399\text{e}+07\text{ Pa}$;在 219685 号单元出现最大压应力,大小为 $9.47743\text{e}+07\text{ Pa}$ 。

图 7 冰雹冲击四边简支玻璃板时应力分布

Fig.7 Stress distribution of glass plate with simply supported on four sides under impact of hail

抗冲击性能的增减,因此做出了各种支撑情况下玻璃板在长跨方向的最大正应力与时间的关系曲线,如图 8 所示。从图 8 可以看到四边简支时玻璃板中的正应力变化最大,板中出现的最大正应力的差值达到了约 200 MPa ,其它支撑情况下最大正应力的差值相当,均维持在 100 MPa 左右,但四边简支时玻璃板的弹性应变相对变大,更多的动能转化为应变能,虽然局部应力变大,但在整体的破坏效果上并没有太大的差距。

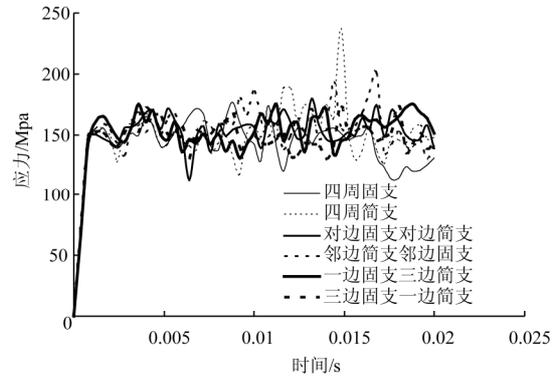


图 8 不同支撑情况下玻璃板的最大正应力与时间的关系

Fig.8 Maximum normal stress-time curve of glass plate with different support

3 结论和讨论

3.1 结论

1) 玻璃板受冰雹群冲击时,应力波在玻璃板中相互叠加,会加重破坏效果。由于冰雹下落具有随机性,前后冰雹下落的时间差亦会影响应力波的叠加效果。

2) 中冰雹冲击玻璃板时,从裂纹出现到裂纹扩展至破坏经历的时间极短,且玻璃碎片较大;大冰雹冲击玻璃板时,裂纹在破坏处局部扩展,玻璃碎片较小且较均匀,破坏没有突然性,而且该冰雹发生的概率极低,设防成本较大。保证冰雹冲击过程中玻璃的整体稳定性,使主体结构不至于出现大跨度裂纹而形成较大的碎片,甚至出现整体塌落,这应是温室玻璃抗雹设计的主要目标。

3) 提高玻璃板厚度可以大幅提高玻璃板刚度,有利于应力波的传播,从而使玻璃板内应力分布均匀。研究表明,考虑到玻璃板成本和冰雹发生概率,目前 4 mm 厚的玻璃板已能满足大部分温室的抗雹要求。 6 mm 厚玻璃板可以承受直径为 50 mm 的中冰雹的冲击,但实用性、经济性不高。

4) 玻璃板的长宽比虽然不能对其抗冰雹冲击能力产生关键性影响,但适当控制长宽比,保证长短跨方向应力尽量接近,有利于避免出现玻璃板中单个方向上应力过大的问题。建议温室玻璃板长宽比取 1.5 左右。

5) 玻璃板简支约束与固支约束相比,对玻璃板抗冲击性能的影响难比轻重,且实际安装中,很难实现完全的简支或固支,因此从控制玻璃板支撑条件来提高温室玻璃板的抗冲击性能并不可靠。

3.2 讨论

本文建立的冰雹群模型满足了冰雹冲击玻璃板时间差的随机性,但冰雹位置以及冰雹间的相对大小仍是固定的,在真实情况下,冰雹下落的地点随机,大小不一。

优化冰雹群模型的方法值得进一步探讨。

[参 考 文 献]

- [1] 翟志宏, 姜会飞, 叶彩华, 等. 基于概率分布模型的北京地区冰雹灾害风险区划[J]. 中国农业大学学报, 2008, 13(6): 49—53.
Zhai Zhihong, Jiang Huifei, Ye Caihua, et al. Hail risk distribution based on probability density model in Beijing region[J]. Journal of China Agricultural University, 2008, 13(6): 49—53. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李娜, 刘焕军, 黄文江, 等. 基于 HJ-1A/1B CCD 数据的雹灾监测与评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 237—243.
Li Na, Liu Huanjun, Huang Wenjiang, et al. Hail monitoring and evaluation by remote sensing based on HJ-1A/1B CCD[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 237—243. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张亚红, 陈青云. 中国温室气候区划及评价[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 197—202.
Zhang Yahong, Chen Qingyun. Greenhouse climatic zoning and its commentary in China[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 197—202. (in Chinese with English abstract)
- [4] GB/T 18622-2002, 温室荷载设计规范[S].
- [5] GB50009-2001, 建筑结构荷载规范[S].
- [6] 王东霞, 蒋秀根, 杨洪良. 基于统一保证概率的温室结构风雪荷载标准值取值研究[M]. 上海: 第二届全国土木工程研究生学术论坛, 2004: 539—543.
- [7] 丁小明. 温室屋面玻璃极限强度计算[J]. 农业工程技术·温室园艺, 2008(6): 20—21.
Ding Xiaoming. Study on ultimate strength of greenhouse glass[J]. Agricultural Engineering · Greenhouse Gardening, 2008(6): 20—21. (in Chinese with English abstract)
- [8] 谭静芳, 赵立新, 刘成勋, 等. 全玻璃钢玻璃温室设计荷载分析[J]. 农业装备技术, 2004(2): 42—43.
Tan Jingfang, Zhao Lixin, Liu Chenxuan, et al. Analysis of loading capacity on glass fiber reinforced plastic greenhouses[J]. Agricultural Equipment and Technology, 2004(2): 42—43. (in Chinese with English abstract)
- [9] 资源网>国土资源部信息中心>科普园地>灾害科普>了解降水 [EB/OL]. http://www.lm.cn/science/201007/t20100726_726311.htm
- [10] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [11] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [12] 台风论坛>天气聚焦>过程追击 [EB/OL].
- [13] <http://bbs.typhoon.gov.cn/read.php?tid=6113.html>
- [14] Carney KS, Benson DJ, Bols PD. A high strain rate model with failure for ice in LS-DYNA[C]// 9th International LS-DYNA Users Conference, 2006, 15: 1—15, 16.
- [15] 尤志芳. 冰雹撞击试验系统的开发与研究[D]. 南京: 东南大学机械工程学院, 2007.
- [16] 宁建国, 朱志武. 含损伤的冻土本构模型及耦合问题数值分析[J]. 力学学报, 2007, 39(1): 70—76.
Ning Jianguo, Zhu Zhiwu. Constitutive model of frozen soil with damage and numerical simulation of the coupled problem[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2007, 39(1): 70—76. (in Chinese with English abstract)
- [17] 百度知道[EB/OL]. <http://zhidao.baidu.com/question/44101881>
- [18] 张招祥, 余群. 冻土冲击贯入力学特性分析[J]. 农业工程学报, 1994, 10(1): 22—28.
Zhang Zhaoxiang, Yu Qun. Investigation on mechanics of impacting penetration into frozen soil[J]. Transactions of the CSAE, 1994, 10(1): 22—28. (in Chinese with English abstract)
- [19] 马保国, 刘军. 建筑功能材料[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2004: 238—240.
- [20] 侯海量, 朱锡, 谷美邦, 等. 破片模拟弹侵彻钢板的有限元分析[J]. 海军工程大学学报, 2006, 18(3): 78—88.
Hou Hailiang, Zhu Xi, Gu Meibang et al. Investigation on penetration of steel plate by fragment simulated projectile using finite element method[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2006, 18(3): 78—88. (in Chinese with English abstract)
- [21] 亓文果, 金先龙, 张晓云. 冲击-接触问题有限元仿真的并行计算[J]. 振动与冲击, 25(34): 68—72.

Numerical simulation on damage behavior of greenhouse glass under hail impact

Ding Min, Shi Xudong, Zhou Rui, Deng Xiaohuan, Jiang Xiugen^{*}

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to analyze hail resistant behavior of greenhouse glass, the numerical simulation on the overall process of random hail impacting greenhouse glass were carried out by using finite element analysis software ANSYS/LS-DYNA with consideration of hail randomness. The failure modes of greenhouse glass under the impact of hail with different diameter were obtained. And also the failure modes of greenhouse glass with different thickness, different plane size and different constraints under the impact of hail were discussed respectively. At the same time, hail resistant behavior of greenhouse glass was evaluated. The results showed that the effects due to hail flock impacting glass plate was not equal to that due to single hail impacting glass plate. Glass plate 4 mm in thickness could nearly meet the hail resistant requirements of most glass greenhouse. It's suggested that ratio of glass plate length to its width were about 1.5. It was not reliable to improve the hail resistant behavior of greenhouse glass by regulating glass plate constraints. It should be the main aim of hail resistant design of glass greenhouse to ensure the global stability of glass plate under the impact of hail and no large cracks or debris. The fruits were useful to the hail resistant design of greenhouse.

Key words: glass, impact testing, damage tolerance, hail resistant behavior, numerical simulation