

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0047

层状结构冰球的高速撞击特性实验*

谭晓军, 冯晓伟, 胡艳辉, 谢若泽, 杨世全, 拜云山

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为研究冰雹在不同撞击速度下的破碎特性及致损能力, 通过空气炮加载技术, 开展了单一性状冰球和层状结构冰球高速撞击刚性靶实验, 利用测力杆记录了两种类型冰球在不同撞击速度下的撞击力时程曲线, 并结合高速摄影技术研究了两类冰球的高速撞击破碎特性。实验结果表明: 两类冰球高速撞击刚性靶的宏观破碎特性相似, 在碰撞初始阶段冰球已完全破碎, 形成微颗粒团簇体, 反向溅射角呈随撞击动能增大而增大的趋势; 与单一性状冰球撞击力曲线相比, 层状结构冰球撞击力曲线中出现二次上升信号, 推测是由于破碎界面在层间界面发生偏折, 小球未完全破碎再次撞击测力杆所导致; 高速撞击下层状结构冰球的撞击力高于单一性状冰球, 推测是由于层间结构的存在延缓了冰球的破碎进程, 提升了其在冲击方向传递动量的能力, 进而产生了更高的撞击力。研究结果有助于深化对冰雹在高速撞击下的破坏力学行为的认识, 同时可为飞行器结构防护、冰雹撞击安全设计研究等提供参考。

关键词: 层状结构冰球; 高速撞击; 撞击力; 动态破碎; 层间界面

中图分类号: O383 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Experimental investigation on characteristics of layered ice spheres under high-velocity impact

TAN Xiaojun, FENG Xiaowei, HU Yanhui, XIE Ruoze, YANG Shiquan, BAI Yunshan

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

Abstract: The hail impact has become a realistic threat for aerospace industries. Natural hail ice has a spherically-layered construction. In order to study the impact failure characteristics and damage ability of hail ice, spherically-layered ice spheres with two layers were created. A series of high-velocity impact experiments were conducted for the simulated hail ice spheres (both monolithic and spherically layered ice) through a smooth barrel gas gun. The dynamic failure properties of ice spheres were studied using high-speed video images during the impact event. Based on the experimental results, it is found that both the monolithic and layered ice spheres present the similar macroscopic crushing characteristics. The ice fragments are formed in the early impact stage. Fragments trajectories lie almost in the target plane. The angle between the fragment trajectories and the plane of the target increases with the increase of impact kinetic energy. A possible explanation for this phenomenon could be attributed to the release rate of projectile kinetic energy. The impact force histories of ice spheres under different velocities were recorded by a force measurement bar apparatus. The impact force curves of monolithic ice show a trend of a sudden increase of the force reaching a maximum, followed by a more gradually decreasing force versus time decay. However, the impact force curves of layered ice show a second rising signal at the last stage. The formation mechanism of the secondary rise signal is hypothesized that the internal small ball is not completely fragmented due to the deflection of failure front at the interlayer interface during impact process. The measured peak impact force is observed to increase with the increase of the projectile kinetic energy. The maximum peak force is reached at very early stage of the impact. Then the ice is actually

* 收稿日期: 2020-02-28; 修回日期: 2020-08-07

基金项目: 国家自然科学基金 (11502258)

第一作者: 谭晓军 (1988—), 男, 硕士, 工程师, 414tanxj@caep.cn

通信作者: 冯晓伟 (1984—), 男, 博士, 副研究员, 414fengxw@caep.cn

fragmented, which can not transfer more momentum in the impact direction. In addition, there is a suggestion of higher impact forces for layered ice. This result is expected that the fragmentation process of layered-ice spheres is delayed by the interlayer interface, which is able to transfer much more momentum in the direction of the impact. The achievements of the study are helpful to better understand the dynamic mechanical behaviors of ice under impact loading, and can also provide reference for the safe design of aircraft structure.

Keywords: layered ice sphere; high velocity impact; impact force; dynamic failure; internal layer

冰雹撞击具有来势猛、数量多、强度高等特征,正日益成为危及航空器飞行安全的主要隐患之一。因此对冰雹高速撞击致损能力的研究引起了学术界的广泛关注。目前,学者们已通过开展冰弹丸撞击刚性靶和可变形靶实验来研究弹丸的撞击力特性及对飞行器典型结构靶标的损伤效应。Pereira 等^[1]研究了不同类型柱状冰弹(实心弹丸、低密度空心弹丸)高速撞击刚性靶的压力历程,发现当撞击速度远高于冰弹破碎临界速度时,撞击力幅值主要受弹丸质量和形状控制。Guégan 等^[2]利用空气炮开展了冰球撞击刚性靶的碎裂化特性研究,重点分析了不同撞击工况下(尺寸、着角及撞击速度)冰球的反向溅射行为及撞击后冰碎片的速度演化特性。Combescuré 等^[3]研究了平头冰弹与锥形冰弹撞击刚性靶和变形体靶的破坏模式,并分析了冰弹破坏模式对变形体靶损伤效应的影响,指出弹丸的致损能力与其头部形状密切相关。Tippmann 等^[4]设计了压力测量杆装置来记录冰球撞击刚性靶的撞击力历程,并对冰球的初期破碎模式进行了探讨。Pernas-Sánchez 等^[5]探讨了冰球撞击力与撞击动能及冰球直径的关系,指出撞击力主要受动能影响,与冰球直径无关。Kim 等^[6-7]研究了单一性状冰球和平行层状冰球的撞击力特性及其对典型靶标的损伤效应,发现冰球撞击力与其撞击动能近似呈线性关系,层状冰球撞击力略高于单一性状冰球。其他学者^[8-12]也先后开展了冰弹丸对不同靶标的高速撞击损伤效应研究,得出了一系列规律性认识。同时,学者们还积极开展了冰雹致损效应的数值模拟研究。为准确模拟冰雹对目标的撞击损伤效应,开展了冰材料动力学性能研究^[13-19],并基于此构建了能够描述冰材料撞击破坏行为的力学模型及数值算法^[4, 6, 12, 20-24]。其他学者采用已有的数值模型,计算分析了典型靶标在冰弹丸撞击下的动态响应及损伤效应^[25-27],取得了一系列有价值的研究成果。

然而,值得注意的是,自然界中的冰雹为多层结冰体^[28],尤其大冰雹一般有 4 层或更多层,如图 1 所示。目前的研究多集中于单一性状冰的撞击力特性及其对典型靶标的损伤效应。尽管 Kim 等^[6-7]研究了平行层状冰(冰试件如图 2(b) 所示)的致损特性,但对符合实际情况的球形层状冰(如图 2(c) 所示)的撞击特性研究尚未见报道。已有研究表明,冰弹的形状结构将影响其高速撞击破坏模式,进而影响其对目标靶板的损伤程度^[1, 3]。层状结构冰球层间界面的存在势必会影响应力波在冰弹丸内的传播过程,并对其宏观破碎模式产生影响,进而影响其致损能力。因此,为准确评估冰雹的高速撞击致损能力,有必要开展层状冰球高速撞击特性研究。

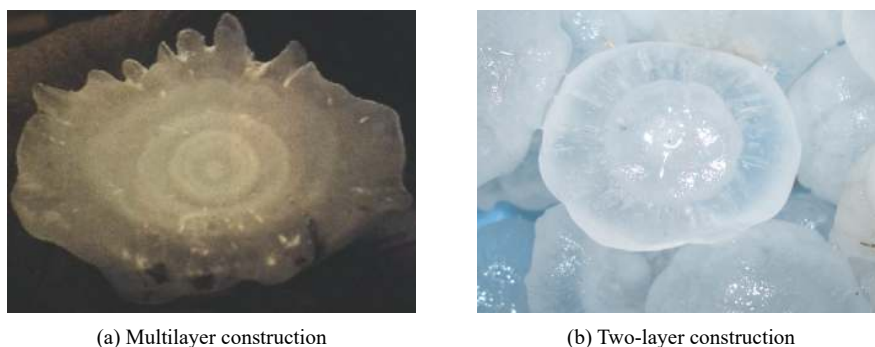
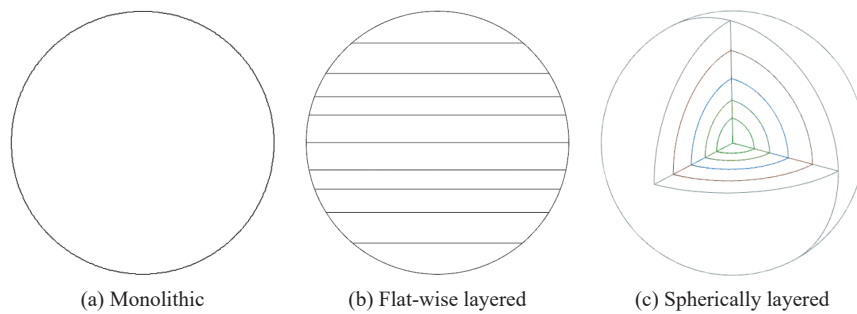


图 1 冰雹层状结构

Fig. 1 Spherically layered construction of hail

图 2 人工模拟冰雹(单一性状冰球和层状结构冰球)^[6]Fig. 2 Simulated hail ice constructions (monolithic and layered)^[6]

1 层状结构冰球高速撞击实验

1.1 层状冰球制备

以双层结构冰球作为研究对象, 根据水在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下发生相变转换为冰的物性特点, 设计了两种直径的冰球模具来制备层状结构冰球, 其中大、小冰球的直径分别为 60 和 30 mm 。冰球制备模具由两个铝合金半球模具组成, 在模具上下平面各开一个小孔, 主要用于注水和内部小球定位, 两个半球模具结合面通过密封胶进行密封, 并通过螺栓紧固。模具实物如图 3 所示。

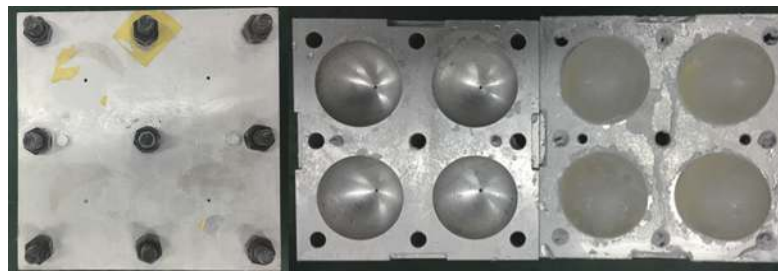


图 3 冰球制备模具

Fig. 3 A mold for production of ice spheres

首先完成小直径冰球制备, 并通过细线定位技术将其固定于大直径冰球模具的中心, 如图 4 所示。随后, 向大直径冰球模具中注水, 置于温度箱内冷冻形成层状结构冰球, 如图 5 所示。由图 5 可知, 通过该方法能够制备出明显分层的冰球, 内部小球通过定位细线保证其位于大球的中心。制备过程中内部小球未发生明显融化, 层间界面较清晰, 能够真实反映冰雹的分层结构特性。实验用水采用蒸馏水, 冷冻温度为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冷冻时间均超过 24 h 。冰球冷冻完成后, 将模具置于常温环境待冰球表面略有融化后脱模取出, 同时也可以在一定程度上释放冰球内的残余应力, 避免产生额外的内部裂纹。冰球脱模后放置于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷冻箱中密封冷藏至实验前。



图 4 小冰球在大冰球模具中的定位方法

Fig. 4 Location method of small ice spheres in the mold of big ice spheres

1.2 实验装置

本实验在口径 80 mm 的空气炮上进行,被撞击的金属杆为 LC4 铝杆,直径 80 mm,杆长 2 000 mm。为避免冰球被空气炮发射时的瞬时压力损伤,在冰球外部加装聚氨酯泡沫弹托,以保证冰球的正常发射并防止冰球与金属炮管直接接触导致快速升温融化。冰球与弹托如图 6 所示。

空气炮实验系统布置如图 7 所示。为实现弹托与冰球的有效分离,在炮口前部加装一个孔径为 70 mm 的阻挡板,使得冰球可以顺利通过而弹托被阻挡,在撞击杆一侧布置高速摄影机(分辨率 600×400,全画幅帧频 20 000 s⁻¹,曝光时间 30 μs)记录冰球的撞杆破碎过程。冰球的撞击速度由激光测速系统测定。此外,冰球和聚氨酯弹托从 -18 ℃ 低温环境中取出,置于常温环境下 3 min 内不会发生明显的融化和产生裂纹^[4]。因此,从取出冰球到完成发射的实验时间严格控制在 3 min 以内,以保证其性能在实验过程中始终稳定。在金属杆的中间位置对称粘贴两片应变片,应变片的敏感栅丝方向与杆的轴线方向一致,应变信号由应变片接收,通过动态应变仪完成信号放大后由示波器记录。动态应变仪为 DC-96A 型,频带宽为 5 MHz;采用拓普 POLAR 9300T 型数字存储示波器记录波形,频带宽为 500 MHz,系统频响可以满足测试要求。

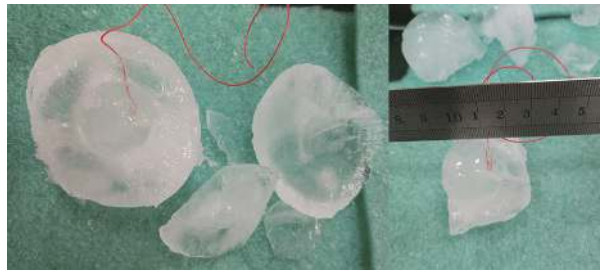


图 5 层状冰球剖视图

Fig. 5 Cutaway view of layered ice spheres



图 6 冰球放置于弹托

Fig. 6 Ice sphere with sabot

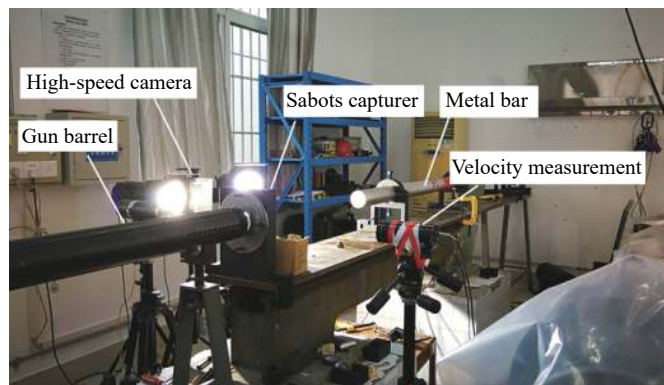


图 7 空气炮实验系统

Fig. 7 Gas gun apparatus used to project ice sphere

1.3 实验原理及方法

通过空气炮发射冰球,冰球撞击测力金属杆后,在金属杆中产生应力波,根据杆中应力波幅值来反推界面撞击力,从而获得撞击力时程曲线。尽管初始阶段杆中的应力波并非平面波,然而由于冰球直径(60 mm)与杆直径(80 mm)相近,且冰球在撞击过程中与杆的接触面积快速增大,应力波在杆中传播至杆中部的应变片位置时可认为已近似为平面波。根据一维应力波理论,冰球撞击杆端的撞击力可表示为:

$$F(t) = \varepsilon(t)E_b A_b \quad (1)$$

式中: $F(t)$ 为冰球撞击杆端时的撞击力, $\varepsilon(t)$ 为应变片测得的杆中的应变, E_b 为金属杆的弹性模量, A_b 为金属杆的横截面积。

2 冰球高速撞击特性分析

本文开展了 3 发层状结构冰球和 3 发单一性状冰球的高速撞击实验, 具体实验参数如表 1 所示。

表 1 冰球高速撞击实验参数

Table 1 High-velocity impact test parameters of ice spheres

序号	类型	弹丸质量/g	撞击速度/(m·s ⁻¹)
1-1	层状结构冰球	98.0	162
1-2	层状结构冰球	97.8	87
1-3	层状结构冰球	97.9	102
2-1	单一性状冰球	100.3	129
2-2	单一性状冰球	97.1	80
2-3	单一性状冰球	97.1	201

2.1 冰球高速撞击动态破碎特性

图 8 和图 9 分别给出了高速摄影机记录的单一性状冰球和层状结构冰球撞击测力杆的动态破碎过程。由图 8 和图 9 可知, 两类冰球高速撞击刚性靶的动态破碎模式相近, 并与已有研究中冰球撞击破碎特性有相似的特征^[2]: (1) 触靶前, 冰球保持完整, 表明发射过程未对冰球造成明显损伤。(2) 触靶初始阶段, 冰球前端触靶部位发生压溃, 后端大部分区域仍保持完整, 但冰球整体呈现白色, 是由于冰球内部产生高密度裂纹引起冰球折射率改变。从图像上可观测到冰球表面的纵向裂纹传播, 与已有的实验结果一致^[4]; (3) 碰撞初始阶段, 冰球前端发生压溃, 产生的碎片沿撞击面发生溅射, 形成一个低密度无序的碎片云区域, 随着撞击过程的进行, 剩余冰球发生崩溃式破碎, 产生一个高密度近似圆形的碎片云区域。

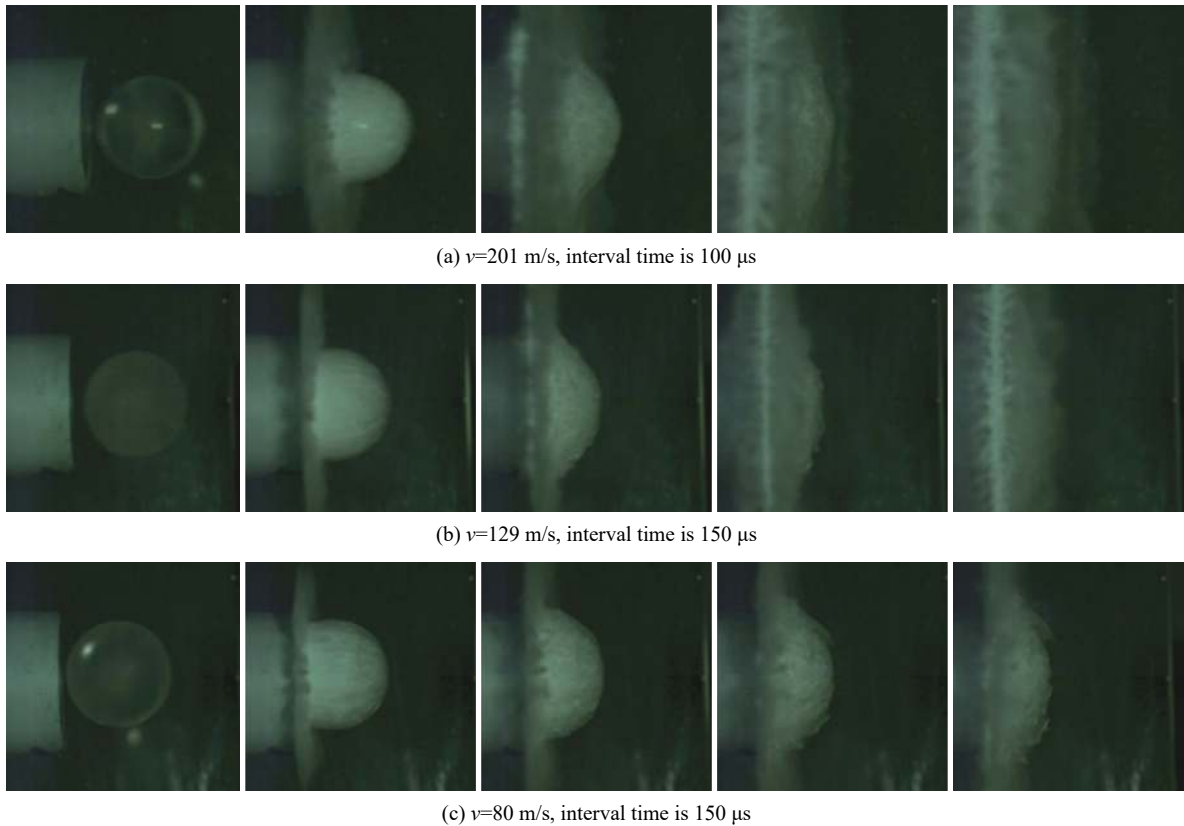


图 8 单一性状冰球高速撞击测力杆高速摄影图片

Fig. 8 High-speed videos of monolithic ice spheres impacting on force measurement bars

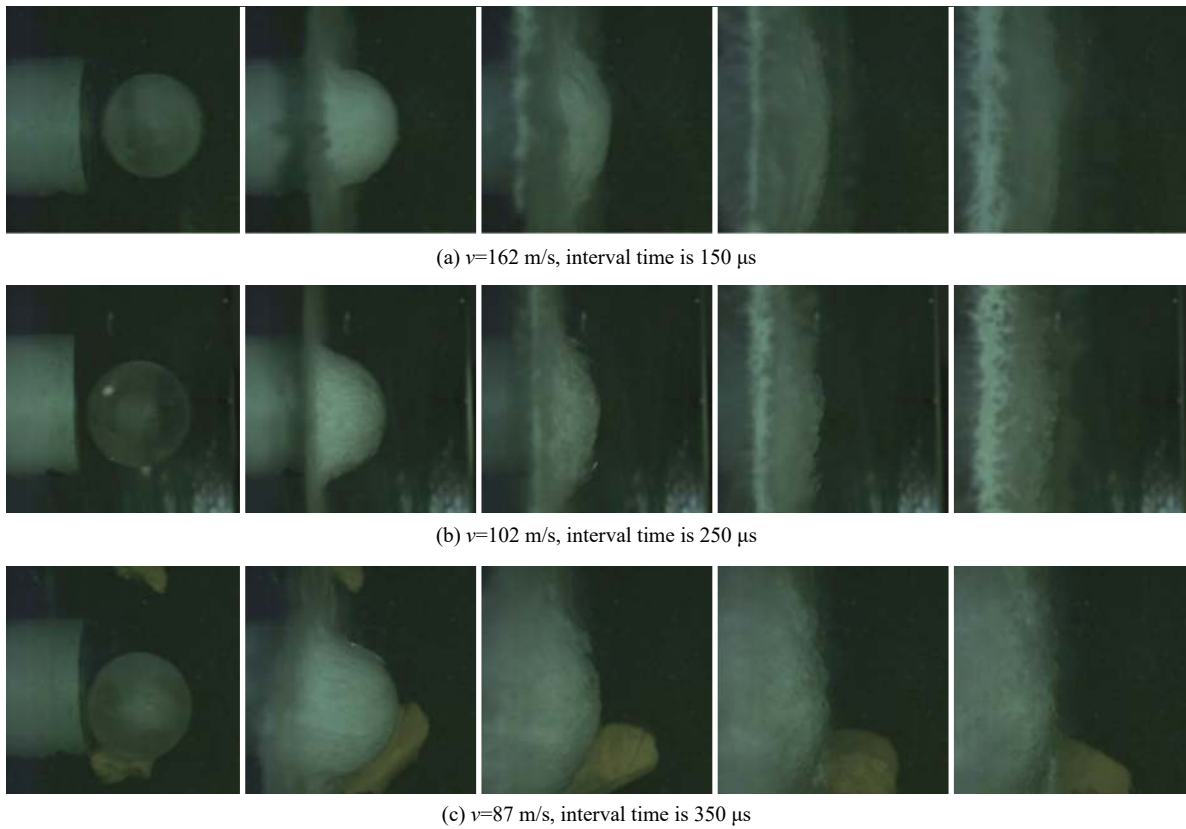


图 9 层状结构冰球高速撞击测力杆高速摄影图片

Fig. 9 High-speed videos of layered ice spheres impacting on force measurement bars

冰球撞击刚性靶破碎过程的典型特征是碎片几乎沿着撞击面运动, 未发生明显的反向溅射行为。Guégan 等^[2]研究了不同直径、不同着角和不同冲击速度下冰球碎片的反向溅射行为, 指出碎片反向溅射角度 γ 不受冰球直径、着角和冲击角度的影响, 均处于 $1^\circ \sim 2^\circ$ 之间。按照图 10 所示的碎片反向溅射角度的定义, 图 11 和图 12 分别给出了两类冰球撞击初始阶段时的碎片反向溅射角度。

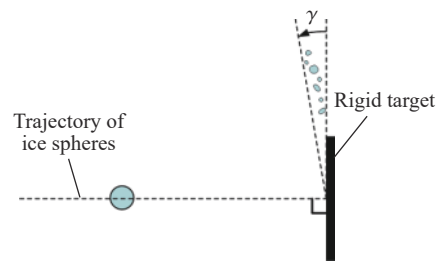


图 10 碎片撞击反向溅射角度示意图

Fig. 10 Definition of the post-impact angle

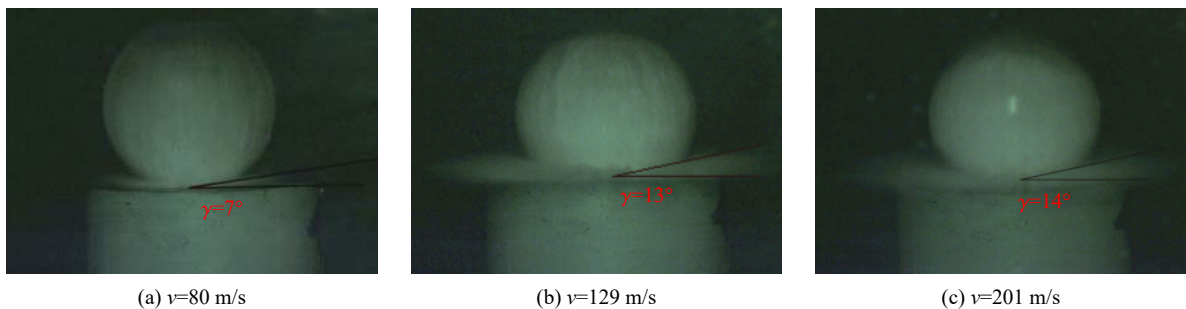


图 11 单一性状冰球高速撞击碎片反向溅射角度

Fig. 11 Fragmentation post-impact angles of monolithic-ice spheres

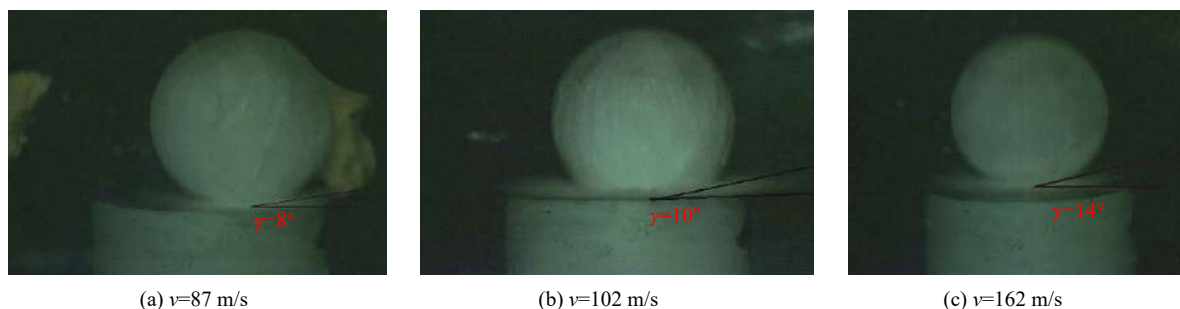


图 12 层状结构冰球高速撞击碎片反向溅射角度

Fig. 12 Fragmentation post-impact angles of layered-ice spheres

由图 11 和图 12 可以看出, 本实验中层状结构冰球的反向溅射角度在 $8^{\circ}\sim 14^{\circ}$ 之间, 单一性状冰球的反向溅射角度在 $7^{\circ}\sim 14^{\circ}$ 之间。尽管角度选取有一定的经验性, 存在一定误差。但整体上, 两类冰球的反向溅射角度均随撞击动能的增大而略有增大, 且均高于已有文献的结论。文献中的冰球撞击动能均小于 70 J, 而本实验中的冰球撞击动能远高于该动能, 最低为 310.7 J。由此推断, 随着撞击动能的增大, 冰球初始阶段发生破碎后的动能释放速率增大, 驱动碎片飞溅速度随之增大, 进而引起反向溅射角度增大。因此, 当冰球撞击动能增大时, 会在一定程度上影响冰球碎片的反向溅射角度。

2.2 层状冰球高速撞击力特性

图 13 和图 14 分别给出了单一性状冰球和层状结构冰球的撞击力时程曲线。由图 13 可以看出, 单一性状冰球的撞击力曲线主要由两个阶段组成, 即初始时刻近似线性的快速上升阶段与达到最大值后的快速下降阶段。以撞击速度 $v=201\text{ m/s}$ 工况为例, 最大撞击力出现在 $104\ \mu\text{s}$ 时刻, 结合 $100\ \mu\text{s}$ 时刻的高速摄影图片(图 8(a) 第 2 幅图)可知, 仅有一小部分冰球发生破碎; $200\ \mu\text{s}$ 时撞击力降低至最大幅值的一半, 对应的高速摄影图片(图 8(a) 第 3 幅图)显示仍有近一半冰球没有破碎。Pernas-Sánchez 等^[5]指出, 当冰球撞击刚性靶时, 在初始时刻已经发生破碎, 后续的弹丸已不是严格意义上的固体状态, 而是大量冰晶颗粒的团簇体, 失去了传递动量的能力。由图 13 还可以看出, 冰球撞击力峰值随冲击速度的增大而增大, 与已有实验结果吻合。撞击速度为 201 和 129 m/s 的冰球撞击力持续时间长达 $400\ \mu\text{s}$, 而速度为 80 m/s 的冰球撞击力持续时间不足 $100\ \mu\text{s}$ 。结合图 14 中层状结构冰球撞击力持续时间均大于 $400\ \mu\text{s}$ 的结果, 可以认为该现象是冰球中微裂纹等初始缺陷在低速撞击下演化产生宏观贯穿裂纹导致冰球提前破坏, 进而失去传递动量的能力所引起的。

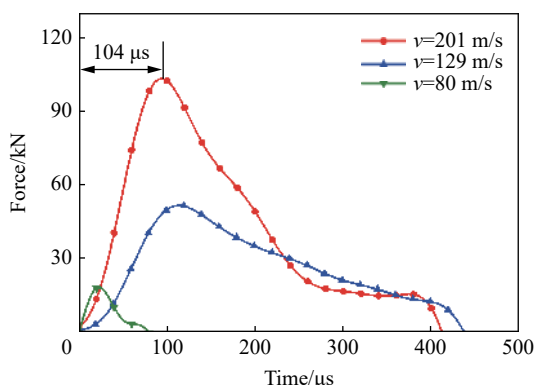


图 13 单一性状冰球撞击力时程曲线

Fig. 13 Force time history traces for monolithic-ice spheres

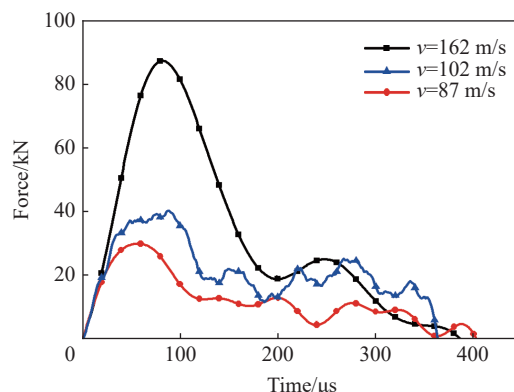


图 14 层状结构冰球撞击力时程曲线

Fig. 14 Force time history traces for layered-ice spheres

与单一性状冰球的撞击力时程曲线不同, 层状结构冰球的撞击力时程曲线在下降阶段有个反常的二次升高信号。该现象也存在于平行层状冰的撞击力曲线中^[7], 但未得到解释。由图 14 可以看出, 速度

为 162 m/s 的冰球撞击力曲线较光滑,有一个明显的下降再升高的信号。而速度为 102 和 87 m/s 时,冰球撞击力曲线则较复杂,呈现出不止一次的升高现象,推测是受冰球的破坏过程对应力波测试信号的影响导致。通过分析二次升高信号的出现时间(如图 14 中箭头所示),并结合内部小球碰撞测力杆的理论时间(如表 2 所示),认为该信号是由内部未完全破碎的小球再次撞击测力杆所引起。小球撞击刚性靶理论时刻的计算公式为 $t=L_0/v$, 式中 $L_0=30$ mm, 为内部小球中心距冰球外表面距离, v 为冰球撞击速度。在高速撞击下可忽略撞击过程中冰球的速度衰减,因此 v 可近似为冰球的初始撞击速度。小球在大球模具中冷冻初期,在水中会发生融化再结晶,产生一层低阻抗界面。冰球的破碎界面传播至该界面时将发生偏转,引起小球破碎进程的滞后。因此,小球再次撞击测力杆时尚未发生完全破碎,能够产生二次撞击力。表 2 中低速阶段的二次升高信号出现时间先于小球到达理论时间,与预期不符。Wu 等^[18] 通过 SPHB 动态压缩实验在冰材料应力应变曲线中发现了残余强度现象,推断其是由于冰材料在动态压缩下的融化再结晶导致。基于此观点,本文认为:由于破碎界面在层间界面发生偏转,在低速撞击下,阻碍了冰颗粒沿着撞击面的飞溅,残余冰颗粒在小球中心与撞击面之间产生了压实再结晶现象,形成了新的固体,导致信号提前出现。

表 2 层状结构冰球撞击力时程曲线二次升高信号时间

Table 2 Secondary rise signals in force-time histories of layered ice spheres

撞击速度/(m·s ⁻¹)	二次信号出现时刻/ms	小球撞击理论时刻/ms
162	197	185
102	201	294
87	243	345

冰雹的最大撞击力是其致损能力的主要指标之一,主要与冰雹的撞击动能相关。图 15 给出了层状结构冰球和单一性状冰球的最大撞击力与撞击动能的关系。由图 15 可以看出,这两类冰球的最大撞击力与其撞击动能近似呈线性关系。对实验结果进行线性拟合发现,层状结构冰球的撞击力要高于单一性状冰球。Kim 等^[7] 曾在平行层状冰球和单一性状冰球的撞击力对比中发现类似现象。因此,层状结构冰球在高速撞击过程中将产生更大的撞击力,意味着致损能力更强。根据动量定理,冰球撞击力的最大值与其完全破碎前的动量传递能力有关,可认为冰球的动量随着冰球的破碎一部分转化为撞击力,另一部分转化为微颗粒团簇体的动量。层间结构的存在能够使大球的破碎界面在传播过程中发生偏折,延缓冰球的整体破碎进程,因此能够在冰球撞击方向传递较多的动量,进而产生较高的撞击力。

3 结 论

本文通过设计不同直径的模具制备了双层结构冰球和单一性状冰球,采用空气炮加载技术开展了两种类型冰球的高速撞击实验,利用测力杆技术获得了两类冰球在不同撞击速度下的撞击力时程曲线,并利用高速摄影技术记录了相应的撞击破碎过程。通过分析实验结果,得到如下结论:

(1)冰球撞击刚性靶破碎过程中,碎片几乎沿着撞击面运动,未发生明显的反向溅射行为。单一性状冰球的反向溅射角为 7°~14°,层状结构冰球的反向溅射角为 8°~14°。结果显示,冰球撞击的反向溅

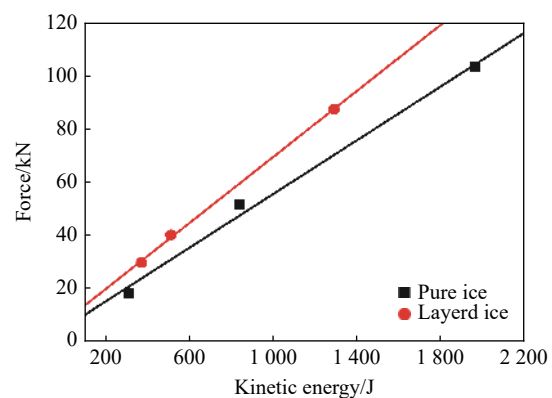


图 15 冰球峰值撞击力随撞击动能的变化

Fig. 15 Peak impact force against kinetic energy of ice spheres

射角随着撞击动能的增大而增大。

(2)冰球的撞击力时程曲线出现在初始撞靶阶段,此后冰球内部产生了高密度裂纹,形成冰颗粒团簇体,不再产生撞击力。

(3)层状结构冰球的撞击力时程曲线存在反常的二次升高现象。该现象是由于大冰球破碎界面在低阻抗层间界面发生偏折,延缓了内部小冰球的持续破碎过程,小冰球在未完全破碎前再次撞击测力杆导致的。

(4)层状结构冰球较单一性状冰球能产生更高的撞击力,致损能力更强。经分析认为,层间结构的存延延缓了冰球的整体破碎进程,使其在撞击方向传递的动量更多,因而产生的撞击力也就越高。

参考文献:

- [1] PEREIRA J, PADULA S, REVILOCK D, et al. Forces generated by high velocity impact of ice on a rigid structure: TM-2006-214263 [R]. NASA, 2006.
- [2] GUÉGAN P, OTHMAN R, LEBRETON D, et al. Experimental investigation of the kinematics of post-impact ice fragments [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(10): 786–795. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.05.003.
- [3] COMBESCURE A, CHUZEL-MARMOT Y, FABIS J. Experimental study of high-velocity impact and fracture of ice [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2011, 48(20): 2779–2790. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2011.05.028.
- [4] TIPPMANN J D, KIM H, RHYMER J D. Experimentally validated strain rate dependent material model for spherical ice impact simulation [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 57: 43–54. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.01.013.
- [5] PERNAS-SÁNCHEZ J, ARTERO-GUERRERO J A, VARAS D, et al. Analysis of ice impact process at high velocity [J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55: 1669–1679. DOI: 10.1007/s11340-015-0067-4.
- [6] KIM H, KEDWARD K T. Modeling hail ice and predicting impact damage initiation in composite structure [J]. *AIAA Journal*, 2000, 38(7): 1276–1286. DOI: 10.2514/2.1099.
- [7] KIM H, WELCH D, KEDWARD K T. Experimental investigation of high velocity ice impacts on woven carbon/epoxy composite panels [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2003, 34(1): 25–41. DOI: 10.1016/S1359-835X(02)00258-0.
- [8] PARK H, KIM H. Damage resistance of single lap adhesive composite joints by transverse ice impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(2): 177–184. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.08.005.
- [9] RHYMER J, KIM H. Prediction of delamination onset and critical force in carbon/epoxy panels impacted by ice spheres [J]. *Computers, Materials and Continua*, 2013, 35(2): 87–117. DOI: 10.1038/nmat3632.
- [10] DOLATI S, FERREDOON A, SABET A R. Experimental investigation into glass fiber/epoxy composite laminates subjected to single and repeated high-velocity impacts of ice [J]. *Iranian Polymer Journal*, 2014, 23: 477–486. DOI: 10.1007/s13726-014-0242-y.
- [11] PERNAS-SÁNCHEZ J, ARTERO-GUERRERO J A, VARAS D, et al. Experimental analysis of ice sphere impacts on unidirectional carbon/epoxy laminates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 96: 1–10. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.05.010.
- [12] SONG Z H, LE J, WHISLER D, et al. Skin-stringer interface failure investigation of stringer-stiffened curved composite panels under hail ice impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 122: 439–450. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.09.014.
- [13] JONES S J. High strain-rate compression tests on ice [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 1997, 101(32): 6099–6101. DOI: 10.1021/jp963162j.
- [14] DUTTA P K, COLE D M, SCHULSON E M, et al. A fracture study of ice under high strain rate loading [J]. *International Offshore and Polar Engineering*, 2004, 14: 182–188. DOI: 10.1109/TITS.2004.833767.
- [15] KIM H, KEUNE J N. Compressive strength of ice at impact strain rates [J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 42: 2802–2806. DOI: 10.1007/s10853-006-1376-x.
- [16] SHAZLY M, PRAKASH V, LERCH B A. High strain-rate behavior of ice under uniaxial compression [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2009, 46(6): 1499–1515. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2008.11.020.

- [17] 汪洋, 李玉龙, 刘传雄. 利用 SHPB 测定高应变率下冰的动态力学行为 [J]. *爆炸与冲击*, 2011, 31(2): 215–219. DOI: 10.11883/1001-1455(2011)02-0215-05.
WANG Y, LI Y L, LIU C X. Dynamic mechanical behaviors of ice at high strain rates [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(2): 215–219. DOI: 10.11883/1001-1455(2011)02-0215-05.
- [18] WU X Q, PRAKASH V. Dynamic strength of distill water and lake water ice at high strain rates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 76: 155–165. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.09.013.
- [19] 李尚昆, 冯晓伟, 谢若泽, 等. 高应变率下纯水冰和杂质冰的动态力学行为研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(9): 093103. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0270.
LI S K, FENG X W, XIE R Z, et al. Dynamic compression property of distill-water ice and impurity-water ice at high strain rates [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(9): 093103. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0270.
- [20] ANGHILERI M, INVEZZI F, MASCHERONI M. A survey of numerical models for hail impact analysis using explicit finite element codes [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31(8): 929–944. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2004.06.009.
- [21] CARNEY K S, BENSON D J, DUBOIS P, et al. A phenomenological high strain rate model with failure for ice [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2006, 43(25–26): 7820–7839. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2006.04.005.
- [22] SHERBUM J A, HORSTEMEYER M F. Hydrodynamic modeling of impact craters in ice [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(1): 27–36. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.07.001.
- [23] SAIN T, NARASIMHAN R. Constitutive modeling of ice in the high strain rate regime [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2011, 48(5): 817–827. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2010.11.016.
- [24] PERNAS-SÁNCHEZ J, PEDROCHE D A, VARAS D, et al. Numerical modeling of ice behavior under high velocity impacts [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2012, 49: 1919–1927. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2012.03.038.
- [25] 刘洋, 王富生, 岳珠峰. 冰雹冲击复合材料层合板失效模式分析与数值模拟 [J]. *振动与冲击*, 2011, 30(9): 150–154. DOI: 10.1631/jzus.A1000257.
LIU Y, WANG F S, YUE Z F. Failure model analysis and simulation of laminated composite plate under hailstone impacting [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(9): 150–154. DOI: 10.1631/jzus.A1000257.
- [26] TANG Z B, HANG C, SUO T, et al. Numerical and experimental investigation on hail impact on composite panels [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 105: 102–108. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.05.016.
- [27] 张永康, 李玉龙, 汤忠斌, 等. 冰雹撞击下泡沫铝夹芯板的动态效应 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(2): 373–380. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0232.
ZHANG Y K, LI Y L, TANG Z B, et al. Dynamic response of aluminum-foam-based sandwich panels under hailstone impact [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(2): 373–380. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0232.
- [28] 李光亮. 冰雹 [M]. 北京: 气象出版社, 2002.

(责任编辑 蔡国艳)