

高速列车脱落冰块冲击力特性试验研究^{*}

宋小林^{1†} 刘悦¹ 赵博¹ 肖定军² 马钲凯¹ 傅炫然¹ 殷雄峰¹

(1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室,成都 610031)

(2. 西南科技大学 环境与资源学院,绵阳 621010)

摘要 由于高速列车脱落冰块质量大、速度高,巨大的冲击力可能会造成轨道结构损伤,因此掌握高速列车脱落冰块冲击力特性是研究轨道损伤破坏的前提和基础.本文利用轻气炮驱动预制的圆柱形冰块,垂直冲击力传感器直接获取冲击力,研究冲击速度对冲击力特性的影响规律,同时运用高速摄像机研究冰块的冲击破碎特征.试验结果表明:在相同加载气压下,完整冰块的冲击力波形基本一致,冲击速度、峰值力和上升沿时间的最大偏差不超过 7.6%,冲击力试验系统可靠稳定;速度在 150 km/h 到 350 km/h 范围内,冲击力波形基本一致,冰块破坏模式和破碎状态基本相同,随着冲击速度的增加,冲击作用时间越短,冲击力峰值随速度的增加而线性增大,总冲量随动能的增加而线性增加,而上升沿时间则变化不大,在 32~40 μ s 内波动;冲击力峰值随冰块动能与总冲量的增加而线性增加,最大线性偏离度基本在 10% 以内.

关键词 高速列车, 冰块, 冲击力, 破碎特征, 轨道, 冲量

中图分类号:U211.2

文献标志码:A

Experimental Study on Impact Force Behaviors Subjected to Ice-Block Detached from High-Speed Train^{*}

Song Xiaolin^{1†} Liu Yue¹ Zhao Bo¹ Xiao Dingjun² Ma Zhengkai¹ Fu Xuanran¹ Yin Xiongfeng¹

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

(2. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract As the ice-block detached from a high-speed train has a large mass and high speed, the great impact may cause damage to the track structure. It is the premise and foundation of track damage research to investigate the impact force behaviors subjected by the ice-block. The impact force history of a cylindrical ice-block projected by a light-gas gun was directly recorded through an annular force measurement transducer during an impact event, and the influence of impact velocity on impact force behaviors was analyzed. The impacting fragmentation characteristics of the ice were observed by a high-speed video during the impact event. The experimental results demonstrated that under the same projection pressure, the same impact force histories were obtained. The maximum deviation of the impact velocity, the peak forces, and their corresponding times are less than 7.6%, which indicated the impact force experimental system is reliable and stable. The impact force curves, the failure mode, and the fragmentation characteristics of the ice-block at the speed of 150 km/h to 350 km/h are all basically the same. With the increase of the impact velocity, the impact time becomes short, while the peak force and the total im-

2023-02-25 收到第 1 稿,2023-04-06 收到修改稿.

^{*} 国家自然科学基金资助项目(52078433, 11790283),四川省国际合作重点项目(2020YFH0007)和国家重点实验室自主课题(2019TPL-T05), National Natural Science Foundation of China (52078433, 11790283), International Cooperation Key Project of Sichuan Province (2020YFH0007) and Independent Project of State Key Laboratory(2019TPL-T05).

[†] 通信作者 E-mail: xlsong@swjtu.edu.cn

pulse increase linearly. The initial landing time has little change, fluctuating within $32\sim 40\mu\text{s}$. The peak force increases linearly with the increase of kinetic energy and total impulse of the ice-block, and the maximum linearity deviation is basically within 10%.

Key words high-speed train, ice-block, impact force, fragmentation characteristics, track, impulse

引言

高速列车在冬季雨雪天气运行时,车体周围的负压极易吸附四周的雨雪,在寒冷的车体表面凝结成冰^[1-4].国内外高铁设计研发部门一直致力于防积雪结冰的转向架、动车组的研发、制造,但尚无办法和技术从根源上避免列车结冰,只能通过融冰和降速等措施来减轻危害^[5,6].即便如此,我国高速列车结冰并非高纬度、高寒地区独有现象,西安、郑州和武汉铁路局内列车结冰也比较普遍、严重.随着温度的升高和车体振动的加剧,部分附着在车体的冰块可能脱落,并以极高的速度冲击轨道,引起轨道结构损伤破坏,严重时甚至降低轨道使用寿命,而掌握高速列车脱落冰块冲击力特性则是研究轨道损伤破坏的前提和基础.

目前,国内外学者针对不同场景和不同冲击条件下冰块冲击力开展了大量卓有成效的研究,如冰雹高速冲击航空器^[7-11],海冰、河冰撞击船舶、桥梁和大坝等^[12,13].前者冰块质量小、相对冲击速度高,后者冰块质量大、相对冲击速度低,两者质量和速度都相差几个量级,而高速列车脱落冰块的质量和冲击速度均介于两者之间,上述研究结果难以直接运用于本问题.因此,亟待开展高速列车脱落冰块的冲击力特性研究.

根据研究方法,冰块冲击力的测试研究主要有试验研究和数值模拟两种.冰块冲击力的常用测试方法有两种,一种是利用力传感器直接获得冲击力^[7-10,12-14],另一种是通过分离式霍普金森压杆(SHPB)上固定点处的应变来间接计算冲击力^[11].在冰雹高速冲击试验方面,Kim等^[7,8]最早通过力传感器获得冰雹高速冲击力,研究了单一性冰球和分层状冰球的冲击力特性,认为冲击力与冰球直径无关,而与冲击动能成正比;Sun等^[9]测量分析了冰雹高速冲击所产生的冲击力,发现冲击力峰值与冰雹动能呈线性关系;Pereira等^[10]利用力传感器测量了固体透明冰和低密度合成圆柱形冰雹在单晶、多晶和缺陷多晶三种形式下冲击刚性靶所产生

的冲击力,发现当速度明显大于在冰中产生裂缝所需的速度时,冲击力由弹丸的形状和质量决定;Tippmann等^[11]用SHPB测量了冰球冲击力,探明了冲击力峰值与冰球撞击动能的关系.在冰撞击船舶方面,Timco等^[12]在室内用力传感器开展了两种淡水冰冲击试验,揭示了最大冲击荷载与加载速率的关系;Gammon等^[13]利用力传感器方法测量半球形冲击体冲击冰面的冲击力,发现加载速率与峰值力成正相关.数值模拟主要运用有限元方法,在冰雹冲击方面,Carney等^[14]建立了与试验相匹配的冰块失效有限元模型,并与Pereira等^[10]的冲击力试验结果吻合较好;Pernas-Sánchez等^[15]建立了冰在高应变率下的本构关系及对应数值积分算法,并与Pereira等^[10]和Carney等^[14]的结果吻合较好;Rhymer^[16]利用有限元模拟了冰雹撞击对层合板的分层损伤,认为冲击力峰值与冰雹直径无关.在冰撞击船舶方面,Myhre^[17]运用有限元软件MSC-PATRAN和LS-DYNA模拟了LNG船和冰山的碰撞过程,提出了船舶抵抗碰撞的有利区域;王健伟等^[18]分析了冰层厚度与船舶速度对破冰船碰撞力及船首结构的变形损伤等特性的影响.

综上所述,由于高速冲击问题非线性强,通过数值模拟得到冲击力的可靠性难以保证,往往要结合试验结果开展分析.用力传感器直接测量冲击力,可以较为准确反映冲击体自身材料特性对冲击力的影响和接触细节,但由于冲击过程中的惯性效应,导致传感器测得力偏小;而SHPB方法虽克服了惯性效应,但对接触细节的敏感性较低,因此选用力传感器直接测量冰块冲击力的研究和成果较多.同时由于高速列车冰块脱落时刻和脱落位置具有很强的随机性,难以通过现场试验获得其冲击力,所以本文拟参考文献[8],在室内利用轻气炮驱动冰块直接冲击力传感器,研究冰块冲击力特性.

1 冰块冲击力试验概述

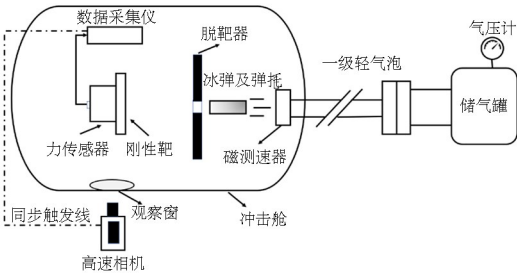
1.1 试验设计

若在冰块与轨道板之间安装力传感器或将力

传感器提前预制在轨道板内部,均会改变两者间的接触状态,无法测量得到冰块对轨道板的真实接触力. 所以相关文献均采用力传感器直接测量冰块冲击力^[8-10,12-14],因此本文参考文献[8],拟用轻气炮驱动预制的冰块高速冲击环形力传感器,直接获得冲击力特性,同时用高速摄像机记录冰块的冲击破碎特征,试验系统如图 1 所示. 冲击试验在西南科技大学爆破与冲击动力学实验室一级轻气炮(内径 76 mm)上开展,通过调整轻气炮气压来控制冰块的冲击速度,进而分析冲击速度对冲击力特性的影响规律.



(a) 试验系统照片



(b) 试验系统示意图

图 1 试验系统图

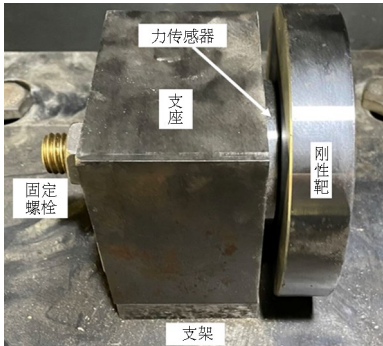
Fig. 1 The diagram of experiment system

力传感器选用扬州科动 KD30500 型动态拉压力传感器,外径 70mm,内径和厚度均为 20mm,量程 500kN,灵敏度 2pC/N. 为避免冰块直接冲击传感器造成其损坏,同时提供面积更大、更平整的冲击面,在力传感器前端布置一个直径 150mm、厚度 20mm 的靶板. 若靶板材料选择混凝土材料,测量得到的冲击力仍非冰块对轨道板的真实接触力,且冲击过程中冲击力的传递可能会因靶板和力传感器之间材料不同而受到影响,导致得到的冲击力结果异常. 同时每次冲击后混凝土材料的力学性能会发生变化,需要及时更换,加工和使用均较为麻烦. 因此靶板材料参考文献[8],选择与力传感器相同的高强度钢,其对冲击力传递影响较小,且机加工方便,便于更换. 为了防止冲击过程中力传感器发

生振荡与靶板失去接触^[8],将力传感器嵌入在固定支座上,嵌入深度 10mm. 通过螺栓将力传感器固定在靶板和支座之间,支座通过螺栓固定在下部支架上,力传感器实物及安装如图 2 所示. 试验中传感器采样频率设置为 1MHz,触发方式为自动触发,触发值 5kN.



(a) 力传感器图



(b) 力传感器安装图

图 2 力传感器及安装图

Fig. 2 The diagram of force transducer and installation

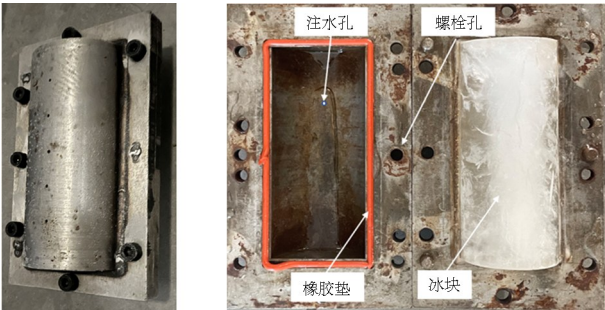
高速摄像机型号为 Phantom V2012 CMOS,像素大小为 28 微米,位深度为 12 位. 相机布置在冲击舱的观察窗外[如图 1(a)所示]. 分辨率设置为 512×384 pixel,拍摄帧率 89kfps,曝光时间设置为 10μs.

1.2 冰块制备

经调研,高速列车脱落冰块形状不规则,重量差异很大,最大重量可超过 2kg. 将冰块预制为圆柱形以便轻气炮驱动. 为了尽可能提高冰块质量,冰块直径定为 60mm,略小于轻气炮内径 76mm. 冰块长径比按文献[19]给出的推荐长径比 2.33,据此确定冰块长度为 140mm,质量约为 340g. 试验前须准确称重,并对尾部进行打磨以控制质量统一.

由于水结冰过程中的冻胀力很大,制冰模具选用钢材制作,对半分成上下两部分以便脱模,使用螺栓紧固,顶部设有注水孔,在模具拼合处安装橡胶圈以保证密封效果. 模具内可放置圆盘来改变冰

块长度,通过内嵌不同形状模块来改变冰块头形.制冰模具及预制冰块如图3所示.由于高速列车上自然冻结的冰块多为杂质冰且内部存在气泡,因此试验所用冰块并未使用蒸馏水浇注,而是使用自来水,浇注后放入冰箱于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰冻48小时后取出.



(a) 模具闭合 (b) 模具打开
图3 冰块制备模具
Fig. 3 Preparation mold of ice-block

冰块浇注完成后对其进行抗压强度测试,试验温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$,共抽取4个冰块样品进行抗压强度测试,抗压荷载曲线如图4所示.

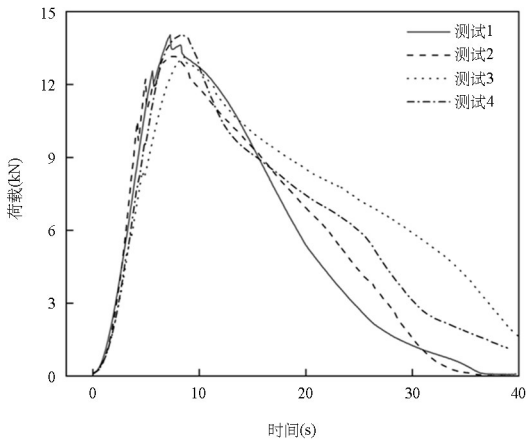


图4 抗压荷载曲线
Fig. 4 The curve of compressive load

冰块抗压强度平均值约为 4.70MPa ,各测试下的冰块强度的最大差距仅为 7.5% ,表明本文浇注的冰块强度较为稳定,变化不大.制备出的冰块材料参数为:密度约 900kg/m^3 ,弹性模量为 9.31GPa ,泊松比为 0.33 .

虽然冰块脱落时水平速度基本等同于车速,垂直向速度分量较小,但是冰块仍可能以接近垂直的角度冲击承轨台等部位.参考高速铁路列车运营速度 $250\sim 350\text{km/h}$ 及《冰雪天气动车组列车限速暂行规定》中规定动车组在雨雪天气限速 160km/h 以下,按最不利工况考虑,本文将冰块垂直冲击速度定

为 150km/h 、 250km/h 、 300km/h 及 350km/h 共4种.为了保证试验结果稳定可靠,每种速度下的冲击试验至少2次.通过改变冲击速度研究冰块的冲击力特性,暂不考虑冰块的形状及质量对冲击力特性的影响.

2 试验系统可靠性验证

2.1 重复性分析

为了验证冲击试验系统的可靠性,首先对比了3次相同加载气压(0.16MPa)下的冰块冲击力,冲击力时程曲线如图5所示.

从图5可以看出,冲击力时程曲线与文献[12]实测波形基本一致.在相同的加载气压下,3次冲击力时程曲线基本一致,冰块冲击速度分别为 305.6km/h 、 316.4km/h 和 322.9km/h ,最大偏差为 7.6% ;冲击力峰值分别为 97kN 、 106kN 和 96kN ,最大误差为 6.3% ,上升沿时间分别为 $32\mu\text{s}$ 、 $34\mu\text{s}$ 和 $33\mu\text{s}$,最大误差为 3% ,表明试验系统可靠性较高、重复性较好.

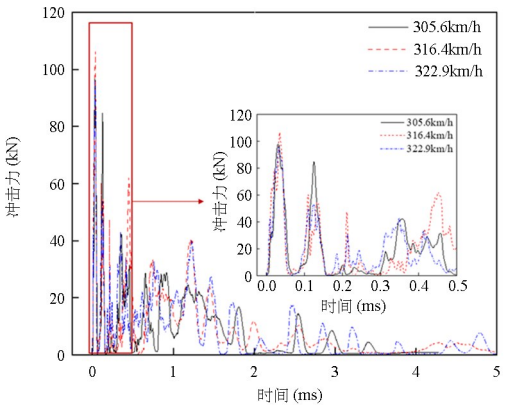


图5 相同气压下3次冲击力时程曲线对比
Fig. 5 Comparison of three impact force time history curves under the same air pressure

2.2 冰块发射完整性影响分析

为避免冰块在轻气炮炮管内高速运动时损伤管壁,需用聚乙烯(PE)弹托装载冰块.在试验中发现,弹托撞击脱靶器脱靶时的大变形,可能会使冰块断裂,而大部分则会保持完整无破损状态,如图6所示.

图7给出了速度相近工况下冰块完整和断裂状态的冲击力时程曲线.可以看出,冰块完整性对冲击力曲线影响较大^[10],冰块断裂会使冲击力异常,幅值明显偏小,上升沿时间过大.图5中重复性

好的 3 种工况,冰块均完整无断裂. 因此,本文所有试验均要求冰块脱靶后完整,如果冰块断裂,则试验无效.

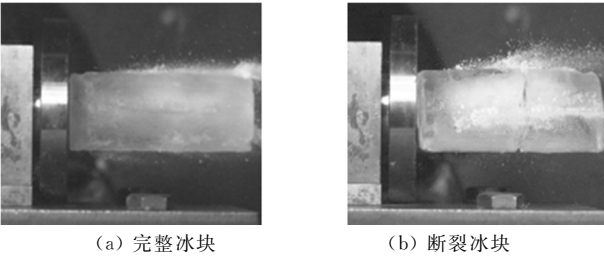


图 6 冰块完整性
Fig. 6 Integrity of ice-block

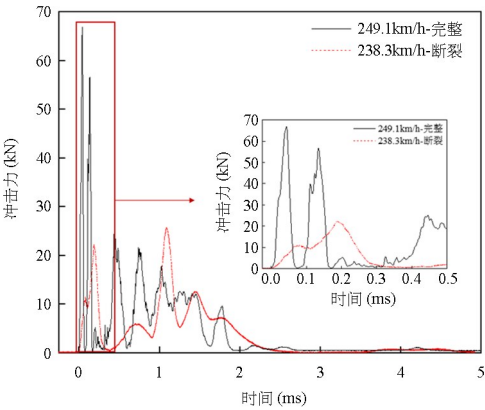


图 7 冰块完整性状态对冲击力影响
Fig. 7 Effect of ice-block integrity on impact force

2.3 脱靶对冲击速度影响分析

为避免试验过程中弹丸的反射而造成磁测速器损伤,轻气炮系统将磁测速器安装在靶前而非靶后,因此在冰块脱靶时可能会发生能量损失从而对触靶速度产生影响,因此本文利用高速相机拍摄照片计算了各速度级下的冰块脱靶前(发射初速)与接触速度(到达靶标速度),并与磁测速结果进行了对比,结果如表 1 所示.

表 1 磁测速测量速度与高速相机计算速度对比
Table 1 Comparison of magnetic velocimetry measurement speed and high-speed camera calculation speed

速度级 (km/h)	磁测速 器发射 初速 (km/h)	高速相 机发射 初速 (km/h)	高速相 机接触 速度 (km/h)	脱靶前 速度偏 差率	接触 速度 变化率
150	169.2	169.6	168.9	2.4%	1.8%
	149.0	146.5	145.0	1.7%	2.7%
250	234.7	228.2	227.0	2.8%	3.3%
	235.1	234.0	231.4	0.5%	1.6%
300	312.5	295.7	289.4	5.3%	7.4%
	316.4	301.6	299.5	4.7%	5.3%
350	363.6	343.1	340.3	5.6%	6.4%
	369.4	348.7	345.6	5.6%	6.4%

从表 1 中可以看出磁测速器实测的脱靶前速度与高速相机计算的发射初速度最大偏差仅为 5.6%,说明两种方法得到的速度均具有较高可靠性. 从表 1 中还可以看出,利用高速相机计算得到的接触速度与磁测速实测发射初速度之间的速度变化率多数小于 5%,最大仅为 7.4%,可以认为冰块脱靶前后速度变化很小. 因试验中磁测速的测量精度较高,本文将磁测速器的实测速度作为冰块的冲击速度.

3 冰块冲击力试验结果与分析

3.1 冰块冲击力特性和破碎状态分析

众所周知,冰块冲击力随冲击速度的增加而增大,本节以速度 345.6km/h 的冰块为例,研究其冲击力特性和破碎特征,冲击力时程曲线和冰块破碎状态分别如图 8 和图 9 所示.

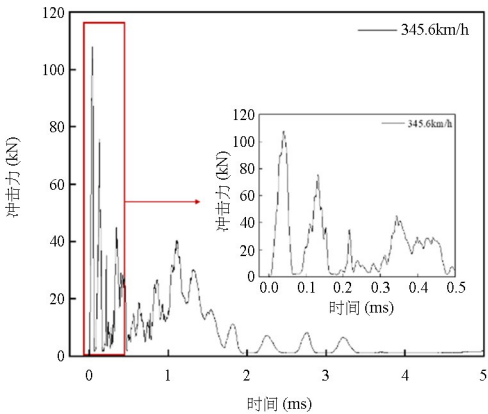


图 8 冰块冲击力时程曲线(速度 345.6km/h)
Fig. 8 Time-history curve of impact force for ice-block at speed of 345.6km/h

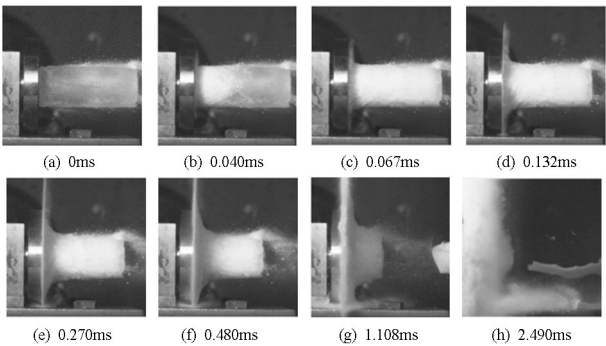


图 9 不同时刻冰块的破碎状态(速度 345.6km/h)
Fig. 9 Fragmentation of ice-block at different times at speed of 345.6km/h

从图 8 和图 9 可见, $t=0$ 时冰块刚接触靶板,冰块完整,整体呈透明状,如图 9(a)所示;然后冰块冲击传感器靶板时,冰块被靶板挤压发生局部破

碎并开始产生碎片,沿靶板表面迅速沿径向向四周扩散形成碎片云,冲击力迅速增大,在 $t=0.040\text{ms}$ 时冲击力达到第一个峰值 107kN ,也是其幅值,此时冰块破裂部分呈白色,未破裂部分仍为透明,碎片云直径为 115.9mm ,如图9(b)所示; $t=0.067\text{ms}$ 时冲击力衰减至0附近,此时冰块裂纹到达尾部而整体呈白色,冰块内部全部破裂,如图9(c)所示;接着冰块持续冲击靶板,在 $t=0.132\text{ms}$ 时冲击力达到第二峰值 78kN ,约为幅值的 72.8% ,碎片云直径增加到 158.7mm ,随后冲击力在低位震荡,不及幅值的 30% .触靶区域的冰块碎片沿靶板表面迅速向四周扩散,而且几乎没有明显的反向溅射现象,如图9(d)~图9(g)所示; $t=2.490\text{ms}$ 时冰块发生崩溃式破碎,冰柱基本消失,产生的碎片显著增多,同时有明显反向溅射现象,冲击力在低位震荡并缓慢衰减至0,如图9(h).

利用高速相机拍摄的冰块破碎特征,计算得到冰块在触靶过程中速度随时间的变化规律,如图10所示.可以看出,冰块在冲击过程中触靶速度以近似对数的趋势降低,约 2.2ms 左右衰减至0.

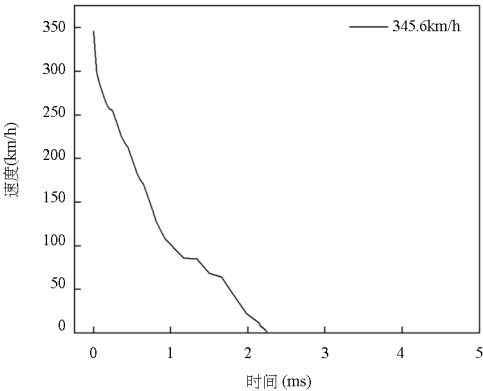


图10 冰块触靶速度随时间变化规律(速度 345.6km/h)
Fig. 10 Contact velocity of ice-block with time at speed of 345.6km/h

3.2 冲击速度对冲击力特性的影响分析

3.2.1 不同速度下冲击力特征分析

图11分别给出了 150km/h 、 250km/h 、 300km/h 及 350km/h 等4种速度级下的冲击力时程曲线和冰块破碎状态,每级速度均包含2次试验,由于速度靠轻气炮气压控制,速度值存在一定的误差.

从图11中可以看出,在相同速度级下的冲击速度相差不大,且冲击力波形基本一致,进一步验证了试验系统的稳定性.同时各速度级下的冲击力

波形变化规律相似,都表现出如图7所示的相似特征,但数值变化较大.冲击力峰值随着冲击速度的增加而增加,其变化规律如图12所示.

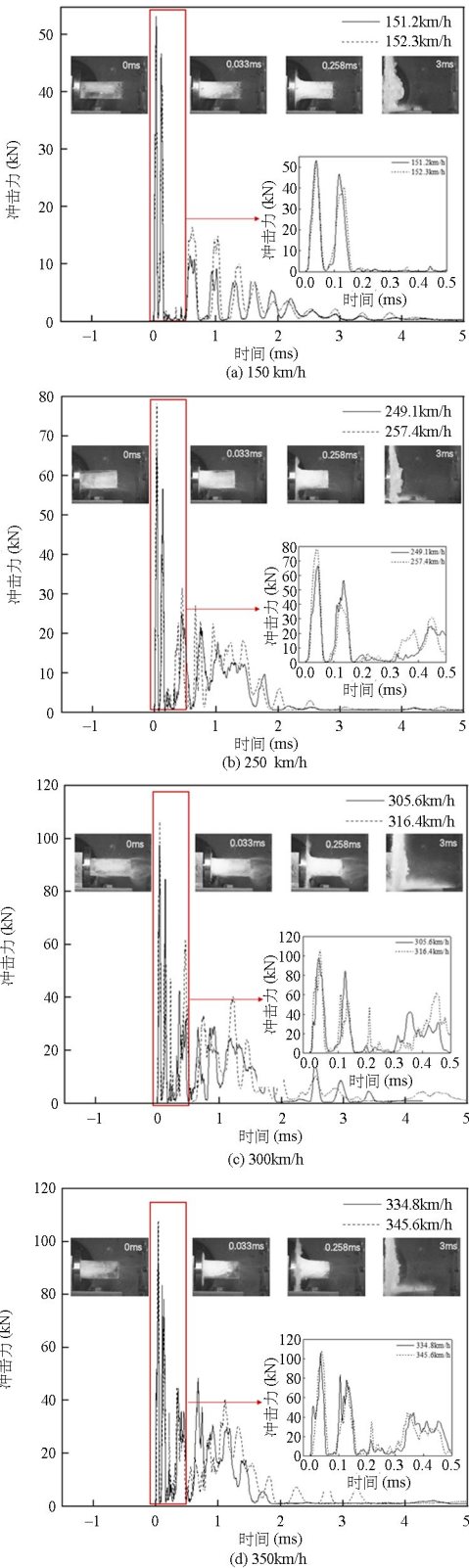


图11 不同速度下的冲击力时程曲线和破碎特征图
Fig. 11 Time history curve of impact force and fragmentation characteristic of ice-block at different speed

从图 12 中可以看到,当速度从 151.2km/h 增加到 345.6km/h,冲击力峰值以近似线性的规律从 52kN 增加到 107kN,而冲击力上升沿时间则在 32~40 μ s 的范围内窄幅波动,最大线性偏离度分别为 14.68%和 12.73%.

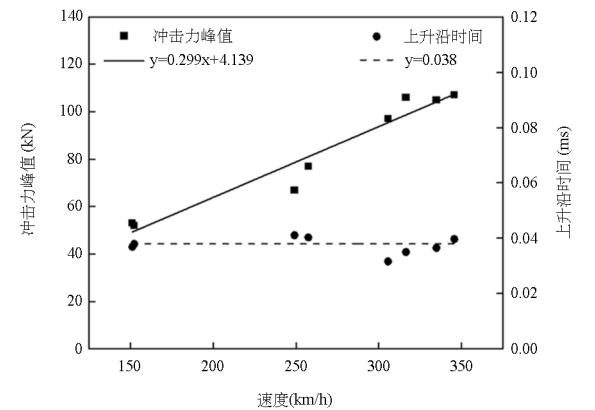


图 12 冲击力峰值和上升沿时间随冲击速度的变化规律
Fig. 12 The peak force and initial landing time with change of impact velocity

3.2.2 不同速度下冰块破碎特征分析

图 11 给出了不同速度下冰块在 0、0.0336ms、0.258ms 及 3ms 时刻的破碎状态.速度在 151.2~345.6km/h 范围内,冰块破坏模式相似皆为局部破碎;随着冲击速度的增加,破碎产生的碎片逐渐从颗粒状变为粉末状,同时刻下的碎片云直径逐渐增大.

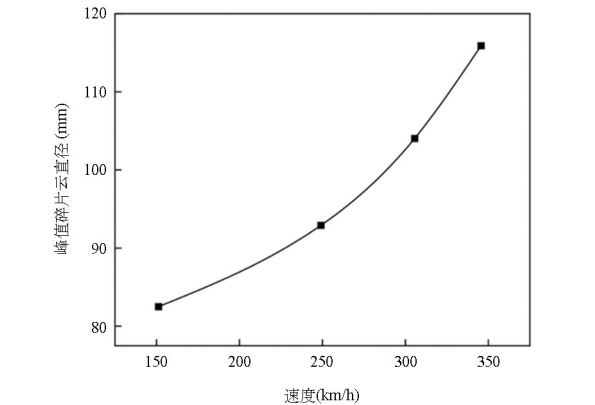


图 13 碎片云直径随冲击速度的变化曲线
Fig. 13 Curve of debris cloud diameter with change of impact velocity

从 3.2.1 节可知,冲击力上升沿时间在 32~40 μ s 范围内波动,由于相机拍摄时间间隔限制,本文将 33.6 μ s 时刻下的照片认为是冲击力峰值时刻对应的照片,并将该时刻冰块破碎产生的碎片云直径定义为冰块峰值碎片云直径.碎片云直径通过测量高速相机照片中碎片云两端的距离,再通过比例尺换算而得.其随冲击速度的变化曲线如图 13 所

示,不同速度下冰块触靶速度随时间的变化规律如图 14 所示.

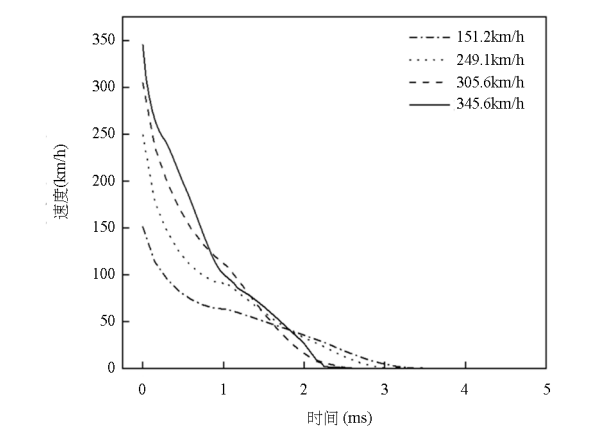


图 14 不同速度下的冰块速度随时间变化曲线
Fig. 14 Curve of ice-block velocity with change of time at different speed

从图 13 和图 14 可看出,当冲击速度从 151.2km/h 增加到 345.6km/h,峰值碎片云直径呈近似指数规律从 82.5mm 迅速增加到 115.9mm,冲击持续时间则由 3.30ms 减少为 2.3ms.冲击速度越高,冰块触靶速度衰减越快,冲击过程越快,冲击历时越短,峰值碎片云直径也越大.

3.2.3 不同速度下冰块冲量分析

将冰块冲击力对时间积分,得到冲量曲线,如图 15 所示.可以看出,各种速度条件下,冲量曲线变化规律相似,冲量曲线波动较小,在冰块碰撞初期(0~0.161ms 内),冲量快速增长,随着时间的推移,增速逐渐降低,在 1.661ms 后冲量增长非常缓慢趋于定值.冰块冲击速度越高,冲量增加得越快,即冰块动能释放越快,产生的冲击作用越大.

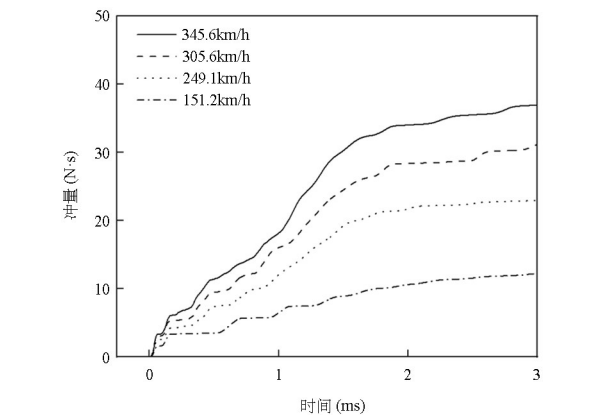


图 15 不同速度下冰块冲量时程曲线
Fig. 15 Time history curve of ice-block impulse at different speed

根据冲击力变化情况,将 3ms 时的冲量定义为冰块总冲量,其随冲击速度的变化规律如图 16

所示. 冰块速度在 150km/h 至 350km/h 范围内, 总冲量与动能之间近似呈线性关系, 最大线性偏离度为 5.9%, 从 11.5N·s 增加到 36.9N·s, 增加 2.2 倍.

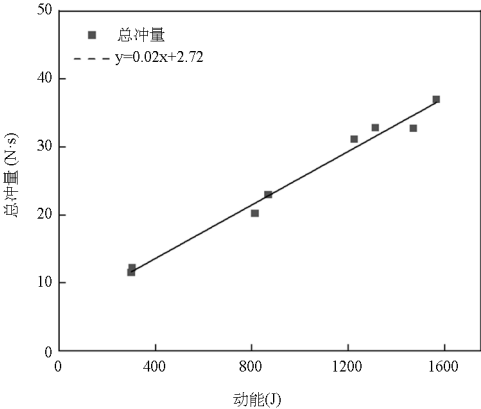


图 16 冰块总冲量随动能变化曲线

Fig. 16 Curve of ice-block impulse with change of kinetic energy

3.2.4 冲击力峰值随总冲量变化规律分析

冲击力峰值随总冲量的变化曲线如图 17 所示.

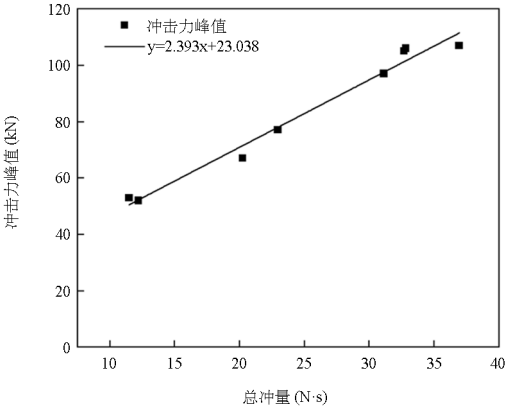


图 17 冲击力峰值随冰块总冲量的变化曲线

Fig. 17 Curve of peak force with change of total impulse of ice-block

从图 17 可以看出, 冲击力峰值随着总冲量的增加而线性增加, 最大线性偏离度为 9.31%.

4 结论

本文利用轻气炮驱动预制的圆柱形冰块冲击力传感器直接获得冲击力, 研究冲击速度对冲击力特性和冰块破碎特征的影响规律, 主要结论如下:

(1)冲击力试验系统可靠稳定. 在相同加载气压下, 完整冰块的冲击力波形基本一致, 冲击速度、峰值力和上升沿时间的最大偏差不超过 7.6%;

(2)冲击速度从 151.2km/h 增加到 345.6km/h, 冲击力波形变化规律相似, 冰块破坏模式皆为局

部破碎. 随着冲击速度的增加, 冲击时间越短, 冲击力峰值(从 52kN 增加到 107kN)随速度的增加而线性增大, 总冲量(从 11.5N·s 增加到 36.9 N·s)随动能的增加而线性增加, 上升沿时间则变化不大, 在 32~40μs 内波动;

(3)冰块触靶后迅速破碎, 并沿靶板表面迅速向四周扩散形成碎片云, 随着冲击的增加, 碎片逐渐从颗粒状变为粉末状, 碎片云直径指数增大;

(4)冲击力峰值随总冲量的增加而线性增加, 最大线性偏离度基本在 10%以内.

参考文献

[1] WANG J B, ZHANG J, XIE F, et al. A study of snow accumulating on the bogie and the effects of deflectors on the de-icing performance in the bogie region of a high-speed train [J], Cold Regions Science and Technology, 2018, 148(2): 121–130.

[2] 冯军, 梁爽. 高寒动车组走行部融冰除雪防冻结技术研究[J]. 铁道机车与动车, 2019(2): 23–25

FENG J, LIANG S. Research on ice-melting snow-removing and anti-freezing technology of running section of alpine EMU [J]. Railway Locomotive and EMU, 2019(2): 23–25. (in Chinese)

[3] 钱耀东, 刘护宪. 关于动车组冬季融冰除雪的分析与对策[J]. 铁道机车车辆, 2016, 36(6): 79–82.

QIAN Y D, LIU H X. Analysis and countermeasures of ice melting and snow removal for EMUs in winter [J]. Railway Rolling Stocks, 2016, 36(6): 79–82. (in Chinese)

[4] 蔡路, 张继业, 李田. 高速列车转向架区域雪粒运动特性分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(12): 1593–1602

CAI L, ZHANG J Y, LI T. Analysis on the motion characteristics of snow particles in the bogie area of high-speed trains [J]. China Science: Technological Science, 2019, 49(12): 1593–1602. (in Chinese)

[5] 林建, 井国庆, 黄红梅. 严寒地区高速铁路冰雪飞溅与防治[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(1): 28–33

LIN J, JING G Q, HUANG H M. Prevention and control of ice and snow splashing on high-speed railway in cold region [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(1): 28–33. (in Chinese)

[6] 井国庆, 丁东. 严寒地区高速铁路冰雪飞溅特性及

- 防治研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(9): 29—34
- JING G Q, DING D. Study on characteristics and prevention of snow and ice splashing on high-speed railway in cold region [J]. Journal of Railway Engineering, 2017, 34(9): 29—34. (in Chinese)
- [7] KIM H, KEDWARD K T. Modeling hail ice and predicting impact damage initiation in composite structure [J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 2000, 38(7): 1276—1286.
- [8] 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.
- [9] SUN J, LAN N, ZHANG L, et al. Contact forces generated by hailstone impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 84: 145—158.
- [10] PEREIRA J M, PADULA S A, REVILOCK D M, et al. Forces generated by high velocity impact of ice on a rigid structure [J]. Tech. Rep. NASA/TM-2006-214263.
- [11] 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.
- [12] TIMCO G W, FREDERKING R. Laboratory impact tests on freshwater ice [J]. Cold Regions Science and Technology, 1993, 22(1): 77—97.
- [13] GAMMON P H, GAGNON R E. Impact experiments on iceberg ice [J]. Journal of Glaciology, 1997, 43(145): 569—582.
- [14] 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): 7820—7839.
- [15] PERNAS-SÁNCHEZ J, PEDROCHE D, VARAS D, et al. Numerical modeling of ice behavior under high velocity impacts [J]. International Journal of Solids and Structures, 2012, 49(14): 1919—1927.
- [16] RHYMER J D. Force criterion prediction of damage for carbon/epoxy composite panels impacted by high velocity ice [D]. San Diego, California: University of California, 2012.
- [17] MYHRE S A. Analysis of accidental iceberg impacts with membrane tank LNG carriers [D]. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2010.
- [18] 王健伟, 邹早建. 基于非线性有限元法的船舶—冰层碰撞结构响应研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(23): 125—130
- WANG J W, ZOU Z J. Study on structural response of ship-ice collision based on nonlinear finite element method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(23): 125—130. (in Chinese)
- [19] 王金贵. 气体炮原理及技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- WANG J G. Principle and technology of gas gun [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001. (in Chinese)