

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.09.021

弹道侵彻下透明复合装甲动态变形参数的测量分析

张彬,彭刚,冯家臣,王绪财,王伟,陈春晓,高波,卢振宇

(山东非金属材料研究所,济南 250031)

摘要:基于弹道试验系统和全光纤位移干涉测速系统(AFDISAR),对聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)/聚碳酸酯(PC)、玻璃/PC两种结构的透明装甲样品开展弹道侵彻下变形速度、变形位移、应变、应变率等参数的测量试验。结果表明,样品在弹击形貌上均表现出以弹着点为中心向外扩展的破坏,在AFDISAR有效测量的数据区间内,样品测点的变形速度均呈先增大后减小的趋势,且沿中心测点径向递减,测点的变形位移、应变均呈现逐渐增大趋势;样品测点附近应变率整体呈增大趋势,PMMA/PC结构样品的应变率曲线存在两极点,玻璃/PC结构样品的应变率曲线存在波动,极点或波动出现的时刻均与测点变形速度达到最大值的时刻相关,与样品主要抗弹机理发生转变的时刻相关。与玻璃/PC结构样品的试验结果相比,PMMA/PC结构样品测点的最大变形速度高、最大静态变形位移大,PMMA/PC结构样品在相同应变下的应变率高,此外,两样品相应测点达到最大变形速度的时间相近。相关测试方法和测试数据对透明复合装甲的研发及防护结构的设计、仿真、性能评估等具有支撑作用。

关键词:弹道侵彻;全光纤位移干涉测速系统;动态变形;应变率;抗弹机理

中图分类号: TM21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)09-0121-05

Measurement and Analysis of Dynamic Deformation Parameters of Transparent Composite Armor under Ballistic Penetration

Zhang Bin, Peng Gang, Feng Jiachen, Wang Xucai, Wang Wei, Chen Chunxiao, Gao Bo, Lu Zhenyu
(Shandong Institute of Non-metallic Materials, Jinan 250031, China)

Abstract : Based on the ballistic test system and all fiber displacement interferometer system for any reflector (AFDISAR), the deformation velocity, deformation displacement, strain and strain rate of transparent armor samples with polymethylmethacrylate (PMMA)/polycarbonate (PC) or glass/PC structures under ballistic penetration were measured. The results show that the damage extend outward with the impact point as the center on the impact morphology and in the effective measurement data range of AFDISAR, the deformation velocity of the sample increases first and then decreases and shows radial decrease along the central measuring point. The overall deformation displacement and the strain of the measuring points show a gradual increase trend. The strain rate increases overall. There are two poles in the strain rate curve of PMMA/PC sample and there are fluctuations in the strain rate curve of glass/PC sample. The time of their occurrence are related to the time when the deformation velocity of the measuring point reaches the maximum value and the time when the main anti ballistic mechanism of the samples changes. Compared with the glass/PC sample under test conditions, the measuring points of the PMMA/PC sample has higher maximum deformation velocity, larger maximum static deformation displacement and higher strain rate under the same strain, besides, the time when the measuring points to reach the maximum deformation velocity of the two sample is similar. This test methods and data can support the research and development of transparent composite armor and the design, simulation and performance evaluation of protective structures.

Keywords : ballistic penetration ; all fiber displacement interferometer system for any reflector ; dynamic deformation ; strain rate ; ballistic mechanism

由聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、玻璃、聚碳酸酯(PC)及聚氨酯(PUR)、聚乙烯醇缩丁醛酯(PVB)等

材料复合而成的透明复合装甲能够有效抵御弹丸的侵彻与毁伤,广泛用于防护领域,如用作人体防护面

通信作者: 张彬,副研究员,硕士,主要从事材料抗弹性能测试技术研究

收稿日期: 2022-07-29

引用格式: 张彬,彭刚,冯家臣,等. 弹道侵彻下透明复合装甲动态变形参数的测量分析[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(9):121-125, 131.

Zhang Bin, Peng Gang, Feng Jiachen, et al. Measurement and analysis of dynamic deformation parameters of transparent composite armor under ballistic penetration[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(9):121-125, 131.

罩、装甲车辆观察窗等。弹道侵彻下透明复合装甲的冲击变形参数包括变形速度、变形位移、应变及应变率等。如何实时、可靠地测定这些参数,对透明复合装甲的设计、防护能力的评估十分重要。

现有的动态变形参数的测试技术主要有数字图像相关测量技术、全光纤位移干涉测速技术等。数字图像相关测量技术通过跟踪或匹配物体表面变形前后两幅散斑图像中同一像素点的位置来获得该像素点的变形参数,应用于弹靶侵彻下样品变形参数的测量时,存在对高速相机的性能和算法处理能力的要求高,相机、照明光源等设备难以有效防护等问题^[1]。

全光纤位移干涉测速技术基于多普勒效应及光学混频技术,可测量物体表面的瞬时运动速度,具有结构简单、测速范围广、精度高、非接触式测量等优势,能够满足测试要求。笔者基于全光纤位移干涉测速系统(AFDISAR)的瞬间动态测量技术,通过优化测量技术手段开展了透明复合装甲动态变形参数的测量试验,分析了弹道冲击下材料的力学响应情况,为透明防护结构的设计、仿真、性能评估等提供支撑。

1 实验部分

1.1 主要原材料

有机透明复合装甲样品(1[#]样品):主要构成材料为PMMA,PC,结构为3 mm厚PC+13 mm厚PMMA+5 mm厚PMMA+3 mm厚PC,粘接层为PUR,自制;

防弹玻璃样品(2[#]样品):主要构成材料为玻璃、PC,结构为6 mm厚玻璃+8 mm厚玻璃+10 mm厚玻璃+5 mm厚PC,玻璃之间粘接层为PVB,玻璃与PC之间粘接层为PUR,自制。

1.2 主要设备与仪器

光幕靶:XGK-2002型,西安工业大学;

计时仪:HG2002-III型,南京理工大学;

AFDISAR:AFDISAR-02型,中国工程物理研究院。

1.3 试验方法

测试系统由弹道试验系统和AFDISAR组成。弹道试验系统由弹道枪、子弹、光幕靶、计时仪和靶架等组成,其中,光幕靶和计时仪用于完成子弹速度测量。AFDISAR由激光器、探测器、光纤探头和数据处理系统等组成。测试系统构成示意图如图1所示。

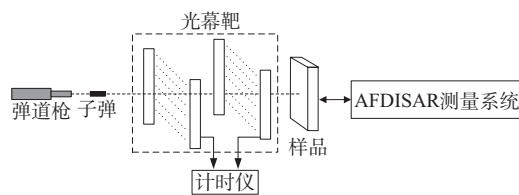


图1 测试系统构成示意图

AFDISAR基于多普勒效应进行物体运动速度的测量,原理如图2所示。激光器发出波长为 λ 、频率为 f_0 的激光束被分为两束,其中一束作为参考光,另一束经光纤探头照射在待测物体表面并形成反射光,参考光与反射光均被探测器接收。当物体表面以变形速度 $v(t)$ 向光纤探头方向运动时,反射光的频率增加为 $f_0+f_d(t)$,其中 $f_d(t)$ 为多普勒频移^[2-3]。

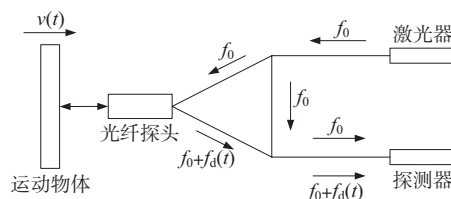


图2 全光纤位移干涉测速原理图

AFDISAR将参考光与反射光光学混频后得到 $f_d(t)$, $v(t)$ 根据式(1)计算:

$$v(t) = \frac{\lambda}{2} f_d(t) \quad (1)$$

针对透明复合装甲动态变形参数测量,试验中使用两个光纤探头。探头1的测量位置为弹着点位置a(中心测点,变形后的位置为a'),探头2的测量位置为弹着点邻近变形位置b(区域测点,变形后的位置为b'),两光纤探头距离样品背面均为50 mm,两测点之间的距离为20 mm。光纤探头布置示意图如图3所示^[4]。

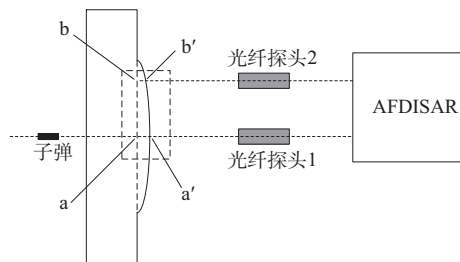


图3 光纤探头布置示意图

对 $0 \rightarrow t$ 时刻的 $v(t)$ 测量数据进行积分得到a处和b处的变形位移,如式(2)、式(3)所示:

$$L_{aa'} = \int_0^t v_a(t) dt \quad (2)$$

$$L_{bb'} = \int_0^t v_b(t) dt \quad (3)$$

式中: $v_a(t)$ ——a 处变形速度;

$v_b(t)$ ——b 处变形速度;

$L_{aa'}$ ——a 处变形位移;

$L_{bb'}$ ——b 处变形位移。

背板变形区域较小, a' 和 b' 之间近似为线性, 变形区内的应变 $[\epsilon(t)]$ 计算如式 (4) 所示:

$$\epsilon(t) = \frac{L_{a'b'} - L_{ab}}{L_{ab}} = \frac{\sqrt{L_{ab}^2 + (L_{aa'} - L_{bb'})^2} - L_{ab}}{L_{ab}} \quad (4)$$

式中: L_{ab} ——a, b 两处变形前的距离;

$L_{a'b'}$ ——a, b 两处变形后的距离。

样品背面变形应变率 $[\dot{\epsilon}(t)]$ 的计算如式 (5) 所示:

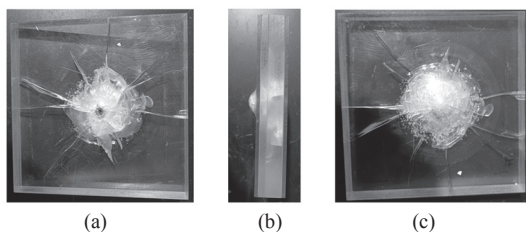
$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{d\epsilon(t)}{dt} \quad (5)$$

为确保弹靶作用时样品不被穿透且背面有明显的变形, 参照 NIJ 0101.06-2008, 使用 9 mm 全金属被甲弹对 1[#] 样品进行射击试验, 参照 GJB 3030-1997, 使用 56 式 7.62 mm 普通钢芯弹对 2[#] 样品进行射击试验。

2 结果与分析

2.1 样品弹道试验损伤形貌

1[#] 样品试验用 9 mm 全金属被甲弹的弹速为 450 m/s, 弹击后形貌如图 4 所示。

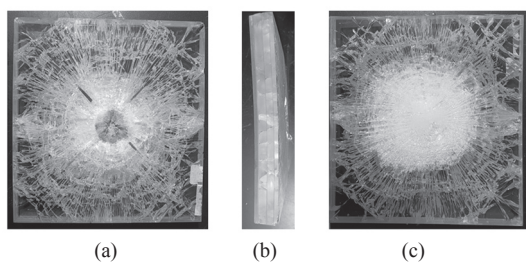


a—迎弹面; b—侧面; c—背面

图 4 1[#] 样品弹击后形貌

由图 4 可以看出, 样品在弹击试验后未穿透, 背面鼓包光滑、无飞溅, 鼓包高度为 14 mm, 背部可视变形区域直径约 110 mm, 弹着点附近透光率降低, PMMA 中有多条自弹着点扩展开的明显长裂纹。

2[#] 样品试验用普通钢芯弹的弹速为 719 m/s, 弹击后形貌如图 5 所示。



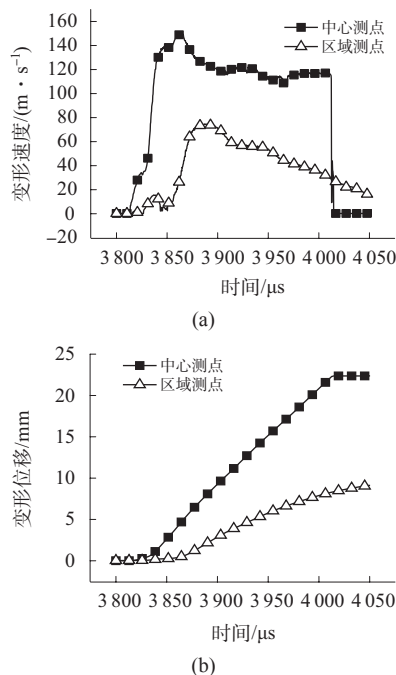
a—迎弹面; b—侧面; c—背面

图 5 2[#] 样品弹击后形貌

由图 5 可以看出, 样品在弹击试验后未穿透, 背面凸起光滑、无飞溅, 凸起高度为 2 mm, 弹着点附近玻璃破碎, 各层玻璃均产生以弹着点为中心向周围辐射状扩散的蛛网状裂纹且离弹着点越近裂纹越密集。

2.2 变形速度及变形位移测量结果

不同时间下 1[#] 样品背面中心测点和区域测点的变形速度和变形位移曲线如图 6 所示。



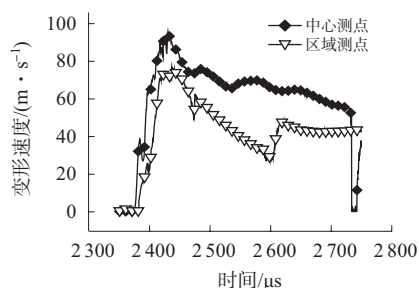
a—变形速度; b—变形位移

图 6 不同时间下 1[#] 样品背面中心测点和区域测点的变形速度和变形位移曲线

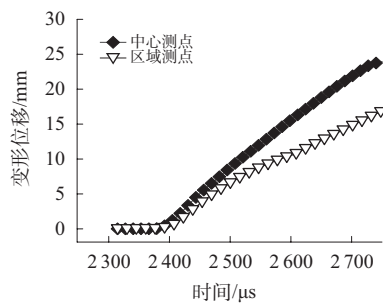
由图 6 可以看出, 在测得的有效数据范围内, 1[#] 样品两测点的变形速度曲线呈现先增大后减小的趋势且沿中心测点径向递减, 中心测点自 3812 μs 开始产生变形, 经 48 μs 变形速度达到最大值 149 m/s; 区域测点自 3825 μs 开始产生变形, 经 62 μs 变形速度达到最大值 75 m/s。中心测点、区域测点的最大瞬间变形位移分别为 22 mm 和 9 mm。与中心测点相比, 区域测点延迟 13 μs 开始运动, 冲击应力波沿此样品背面引起变形的传播速度约为 1538 m/s。

不同时间下 2[#] 样品背面中心测点和区域测点的变形速度和变形位移曲线如图 7 所示。

由图 7 可以看出, 在测得的有效数据范围内, 2[#] 样品两测点的变形速度曲线变化趋势与 1[#] 样品相近, 中心测点自 2380 μs 开始产生变形, 经 52 μs 变形速度达到最大值 95 m/s; 区域测点自 2386 μs



(a)



(b)

a—变形速度; b—变形位移

图7 不同时间下2#样品背面中心测点和区域测点的

变形速度和变形位移曲线

开始产生变形,经55 μs 变形速度达到最大值77 m/s,此后变形速度曲线在逐渐减小的整体趋势下震荡变化,中心测点、区域测点的最大瞬间变形位移分别为24 mm和17 mm。与中心测点相比,区域测点延迟6 μs 开始运动,冲击应力波沿此样品背面内引起变形的传播速度约为3333 m/s。

2.3 应变、应变率测量结果与分析

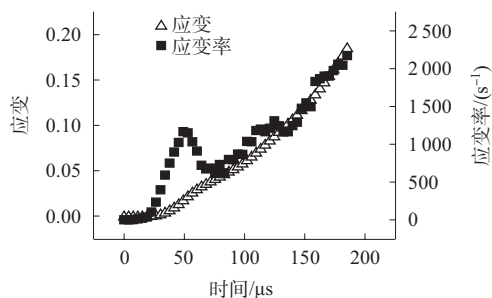
(1) 测量结果。

样品背板变形区的应变和应变率曲线如图8所示。

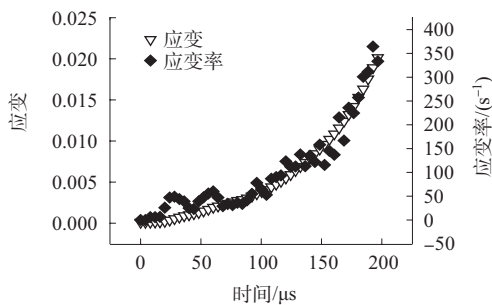
由图8可以看出,1#样品的应变曲线一直处于上升趋势,最大应变为0.19,应变率曲线在开始阶段上升较快,此后出现趋势变化的两极点,对应的时间分别为50 μs 和72 μs ,后期保持上升趋势,上升速度低于弹靶作用前期时的速度,最大应变率约为2300 s^{-1} 。2#样品的应变曲线一直处于上升趋势,最大应变为0.022,应变率整体呈上升趋势,在50 μs 左右出现波动,最大应变率约为350 s^{-1} 。

(2) 结果分析。

1#样品弹靶作用时迎弹层PC与中间层PMMA依靠其硬度使铅弹发生墩粗等破坏变形,能够增加着靶面积、消耗弹丸动能并降低压缩应力。PMMA在初期通过变形吸收弹丸能量,进一步依靠脆性破坏吸收弹丸能量;粘接层PUR的低强度使得PMMA起承载作用的时间滞后、失效应变增加^[5-9],



(a)



(b)

a—1#样品; b—2#样品

图8 样品的应变和应变率曲线

提高了PMMA通过变形吸能的效果,同时,粘合作用使裂纹扩展阻力增大,增加了PMMA破碎所需的表面能,提高了对弹丸能量的吸收效果,能够显著提高透明复合装甲样品的动态失效应变。背弹层的PC具有黏弹性、高强度的特征,在屈服后随着变形量的逐渐增大先后表现出应变软化、硬化特征,吸收弹丸的剩余能量并产生塑性变形^[10-13]。应变率曲线中极大值点出现的时刻与中心测点变形速度达到最大值的时刻基本一致,与弹靶作用时PMMA在PUR的影响下由依靠黏弹性特征下的变形吸能至依靠破碎与裂纹扩展吸能的抗弹机理变化相对应,极小值点出现的时刻略滞后于区域测点变形速度到达最大值的时刻,与PMMA已碎裂、PC层通过变形吸收弹体剩余能量的抗弹机理变化对应。

2#样品玻璃的硬度大、动态压缩强度高、动态失效应变小^[14-15]。高硬度使2#样品具有更好的墩粗、破碎弹体的能力。动态压缩强度高与玻璃抗弹时破坏波的传播有关,具体为:玻璃内的细观缺陷形成细观尺度的局部应力集中,在冲击压缩下应力集中超过材料的破坏应力阈值时,微裂纹开始成核、扩展并激发相邻区域消耗弹体的能量^[16-18],这与试验结果中玻璃产生粉碎性破坏并以弹着点为中心向四周辐射的形貌结果一致。动态失效应变小与试验结果中测点的最大动态变形、样品最终的背突变形小一致。两样品中胶层、PC等其它材料在弹靶作

用期间所起到的作用相近。应变率曲线出现的波动时刻与两测点变形速度达到最大值的时刻相关,与样品由通过变形吸能至玻璃开始破碎吸能的时间相关。

3 结论

(1) 弹道试验损伤形貌结果和和变形速度、变形位移、应变、应变率等动态变形参数的测量结果表明,两种不同结构、材料的样品在弹击形貌上均表现出以弹着点为中心向外扩展的破坏,在AFDISAR有效测量的数据区间内,样品测点的变形速度曲线均呈先增大后减小的趋势,且沿中心测点径向递减。样品测点的变形位移、应变曲线均呈逐渐增大趋势,样品测点附近应变率曲线整体呈增大趋势。测得PMMA/PC结构样品(1[#]样品)的应变率曲线存在两极点,玻璃/PC结构样品(2[#]样品)应变率曲线存在波动,极点或波动出现的时刻均与测点变形速度达到最大值的时刻相关,与样品主要抗弹机理发生转变的时刻相关。

(2) 在试验条件下,比较PMMA/PC结构样品与玻璃/PC结构样品的试验结果可知,两者达到最大变形速度的时间相近,PMMA/PC样品(1[#]样品)测点的最大变形速度高,最大静态变形位移大,这与PMMA对弹体墩粗、破碎的能力低,变形吸能的能力高的特性一致,与材料的硬度、压缩强度及失效应变等力学特性的表现一致。

(3) 试验基于弹道侵彻条件测得样品变形速度、变形位移、应变和应变率数据及其变化情况,试验结果有助于科研、工程人员直观认识高应变率下材料的力学行为,测试方法和测试数据对透明复合装甲的研发、相关防护结构的设计、仿真、性能评估形成支撑和参考。

参考文献

- [1] 但西佐. 数字图像相关测量关键技术研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
Dan Xizuo. Research on the key technology of digital image correlation[D]. Hefei:Hefei University of Technology, 2019.
- [2] 翁继东, 李英雷, 陈宏, 等. 全光纤位移干涉技术在 SHPB 实验测量中的应用 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(1):91-96.
Weng Jidong, Li Yinglei, Chen Hong, et al. Application of an all-fiber displacement interferometer on SHPB experiment measurements[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(1):91-96.
- [3] 万印. 冲击载荷下钕铁硼破坏特性研究 [D]. 宁波: 宁波大学, 2019.
Wan Yin. Study on fracture characteristics of Nd-Fe-B under Impact loading[D]. Ningbo:Ningbo University, 2019.
- [4] 彭刚, 王绪财, 冯家臣, 等. 一种弹道冲击条件下靶板背面变形应变率的测试方法 :CN202110032504.1[P]. 2021-01-12.
Peng Gang, Wang Xucai, Feng Jiachen, et al. A test method of deformation strain rate on the back of target plate under ballistic impact:CN202110032504.1[P]. 2021-01-12.
- [5] 谢中秋, 张蓬蓬. PMMA 材料的动态压缩力学特性及应变率相关本构模型研究 [J]. 实验力学, 2013, 28(2):220-226.
Xie Zhongqiu, Zhang Pengpeng. On the dynamic compressive mechanical properties and strain rate related constitutive model of PMMA material[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(2):220-226.
- [6] 臧孟炎, 雷周, 尾田十八. 汽车玻璃的静力学特性和冲击破坏现象 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(2):268-272.
Zang Mengyan, Lei Zhou, Oda Juhachi. Static characteristic and impact fracture behavior of automobile glass[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2):268-272.
- [7] 杨杰, 邱日祥, 胡志昂. 防弹玻璃动态力学响应规律及抗弹性能研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36(3):60-62, 63.
yang jie, Qiu rixiang, hu Zhi'ang. Dynamic mechanical response and anti-bullet property of bulletproof glass[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2013, 36(3):60-62, 63.
- [8] 胡文军, 张方举, 田常津, 等. 聚碳酸酯的动态应力应变响应和屈服行为 [J]. 材料研究学报, 2007, 21(4):439-443.
Hu Wenjun, Zhang Fangju, Tian Changjin, et al. Dynamic stress-strain response and yield behavior of polycarbonate[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2007, 21(4):439-443.
- [9] 黄湘林. 聚合物-铝合金复合板在高速撞击下的抗弹特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
Huang Xianglin. Experimental investigation on the ballistic resistance of polymer-aluminum laminated plates[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2017.
- [10] 刘正. 不同聚碳酸酯(PC)层合结构对防弹玻璃性能影响的研究 [J]. 玻璃与搪瓷, 2016, 44(1):14-19, 36.
Liu Zheng. Effects of polycarbonate laminated structure on the performance of bulletproof glass[J]. Glass & Enamel, 2016, 44(1):14-19, 36.
- [11] 高华, 熊超, 殷军辉, 等. 多层异质复合结构的动力学响应及抗侵彻性能 [J]. 复合材料学报, 2019, 36(5):1 284-1 294.
Gao Hua, Xiong Chao, Yin Junhui, et al. Dynamic response and anti-penetration performance of multi-layered heterogeneous composite structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(5):1 284-1 294.
- [12] 刘琥, 王玺, 项大林, 等. 防弹玻璃在子弹冲击下的数值模拟研究 [J]. 导弹与航天运载技术, 2015(5):97-102.
Liu Hu, Wang Xi, Xiang Dalin, et al. Numerical simulation of bulletproof glass subjected to bullet impact loading[J]. Missiles and Space Vehicles, 2015(5):97-102.

- Liang Yaowen, Zhang Jun. Research on the application of 365mfc/245fa/cyclopentane ternary blending system foaming technology in galanz refrigerator[J]. Electrical Appliances, 2015(2):46-51.
- [11] 毕戈华,李新超,魏伟,等. 新型聚氨酯化学发泡剂研究及应用进展[J]. 山东理工大学学报:自然科学版,2017,31(5):1-5.
- Bi Gehua, Li Xinchao, Wei Wei, et al. Research on the properties of novel chemical foaming agent CFA8 in rigid PU foam field[J]. Journal of Shandong University of Technology:Natural Science Edition, 2017, 31(5):1-5.
- [12] 毕玉遂,毕戈华. 碳酸有机胺盐类化合物及其作为发泡剂的用途:CN107089910A[P]. 2017-08-25.
- Bi Yusui, Bi Gehua. Carbonic acid organic amine salt compounds and their use as foaming agents:CN107089910A[P]. 2017-08-25.
- [13] 李新超,毕戈华,魏伟,等. 化学发泡剂 CFA8125 替代 HCFC-141b 在喷涂聚氨酯硬泡中的应用研究[J]. 聚氨酯工业,2017, 32(5):60-62.
- Li Xinchao, Bi Gehua, Wei Wei, et al. Application research of chemical blowing agent CFA8125 replace HCFC-141b in spray rigid polyurethane foams[J]. Polyurethane Industry, 2017, 32(5): 60-62.
- [14] 余美丹,王洪庆,毕戈华,等. 羟丙基化乙二胺碳酸盐聚氨酯硬泡发泡剂的研究[J]. 聚氨酯工业,2021,36(3):31-33.
- Yu Meidan, Wang Hongqing, Bi Gehua, et al. Study on hydroxy-propylated ethylenediammonium carbonate as co-blowing agents in rigid polyurethane foam[J]. Polyurethane Industry, 2021, 36(3):31-33.
- [15] 赵巧光. 硬质聚氨酯泡沫塑料尺寸稳定性的影响因素及控制方法[J]. 科技创新与应用,2015(23):152.
- Zhao Qiaoguang. Influencing factors and control methods of dimensional stability of rigid polyurethane foam[J]. Technology Innovation and Application, 2015(23):152.
- [16] Wei Gaosheng, Liu Yusong, Du Xiaozhe, et al. Gaseous conductivity study on silica aerogel and its composite insulation materials[J]. Journal of Heat Transfer, 2012, 134(4). DOI:10.1115/1.4004170.
- [17] Brandreth D A, Ingersoll H G. Accelerated aging of rigid polyurethane foam[J]. Journal of Cellular Plastics, 1980, 16(4):235-238.
- ~~~~~
- (上接第 125 页)
- [13] 陈宇宏,厉蕾. 轻型防弹玻璃的结构研究[J]. 材料工程,2002(6): 7-9,36.
- Chen Yuhong, Li Lei. Study on the structure of light weight bullet-proof glass[J]. Journal of Materials Engineering, 2002(6):7-9, 36.
- [14] 张晓颖,李胜杰,李志强. 爆炸载荷作用下夹层玻璃动态响应的数值模拟[J]. 兵工学报,2018,39(7):1 379-1 388.
- Zhang Xiaoying, Li Shengjie, Li Zhiqiang. Numerical simulation of dynamic response of laminated glass subjected to blast load[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(7):1 379-1 388.
- [15] 马棋棋,熊迅,郑宇轩,等. 无机玻璃动态压缩破坏的离散元模拟[J]. 高压物理学报,2019,33(4):61-71.
- Ma Qiqi, Xiong Xun, Zheng Yuxuan, et al. Discrete element simulation of dynamic compression failure of inorganic glass[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(4):61-71.
- [16] 冯晓伟,刘占芳,陈刚,等. 受冲击玻璃破坏波传播过程分析[J]. 振动与冲击,2013,32(9):183-186.
- Feng Xiaowei, Liu Zhanfang, Chen Gang, et al. Simulation of failure waves in glasses under shock compression[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(9):183-186.
- [17] 郑志嘉. 冲击加载下脆性材料中失效波的形成机理研究[D]. 北京:北京理工大学,2015.
- Zheng Zhijia. Study on the mechanism of failure wave in brittle materials under dynamic impact loading[D]. Beijing:Beijing Institute of Technology, 2015.
- [18] 韩丹. 镁铝尖晶石透明陶瓷的制备与性能研究[D]. 上海:中国科学院上海硅酸盐研究所,2018.
- Han Dan. Preparation and properties of transparent spinel ceramics[D]. Shanghai:Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, 2018.