

纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体高应变率压缩吸能机理*

周晓松¹, 梅志远²

(1. 中国人民解放军军事科学院国防科技创新研究院, 北京 100071;

2. 海军工程大学舰船与海洋学院, 湖北 武汉 430033)

摘要:为研究纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体吸能元件在高应变率冲击压缩载荷作用下的变形损伤模式和能量吸收机理,采用 ABAQUS 商用有限元软件和分离式 Hopkinson 压杆装置开展数值模拟分析和试验验证研究。对比分析宏观力学响应规律和微观损伤破坏机理,可知吸能结构元件在高应变率压缩载荷下的力学响应具有典型的弹塑性特征,内部芯材主要产生压缩塑性损伤,而表层复合材料沿环向产生拉伸断裂破坏。研究表明,该吸能元件冲击压缩吸能特性优异,可满足水下结构平台的冲击防护和浮力储备要求。

关键词:复合材料;夹芯结构;高应变率;吸能机理

中图分类号:P751 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2020)05-074-07

Energy absorption mechanism of filament wound composite core cylinder under high strain rate compressive load

ZHOU Xiaosong¹, MEI Zhiyuan²

(1. National Innovation Institute of Defense Technology, Academy of Military Sciences PLA China, Beijing 100071, China;

2. College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to investigate the damage modes and energy absorption mechanism of the filament wound composite core cylinder under high strain rate impact compression load, the numerical simulation analysis and experimental test verification were carried out by using the ABAQUS finite element software and the Hopkinson bar testing machine. The analysis of the mechanical response characteristics and damage modes show that the energy absorbing element has typical elastic-plastic response characteristics under the high rate impact compression loading. The inner core material mainly produces compression plastic damage, while the surface composite material produces tensile fracture damage along the hoop direction. The study results show that this type of energy absorbing element has excellent compression and energy absorption characteristics, and can achieve the impact protection and buoyancy reserve requirements of the underwater structure platform.

Keywords: composite material; core structure; high strain rate; energy absorption mechanism

随着舰艇建造技术的不断进步,海上航行的舰艇数量日益增多,舰艇结构平台的安全性问题得到越来越多的关注^[1-2]。与水面舰艇相比,水下潜艇结构平台的冲击防护研究在环境载荷作用、结构形式设计以及功能性要求等方面存在较大差异^[3-5]。在服役周期过程中,水下结构平台随时面临着敌方鱼雷武器和深水炸弹的进攻,平台的完整性和系统功能的可用性受到严重的威胁^[6-7]。由于水下环境的特殊性和功能要求的针对性^[8-9],水下结构平台的冲击防护结构既需要优异的抗冲击吸能特性,还需要具备良好的环境适应性或其他特殊性能,如浮力储备性能。

此外,水下结构平台在服役周期过程中,单一材料体系设计的吸能元件在强冲击载荷作用下容

易导致结构的崩溃性破坏^[10-12],影响防护结构的吸能效率,因而对水下吸能元件的设计提出了更为严格的要求。目前,复合材料抗冲击吸能元件研究主要集中在航空航天和交通工程领域,较为常见有复合材料圆柱管/壳、方管、锥形管以及波纹管等方面^[10]。该类吸能元件的损伤破坏模式主要包括增强纤维和树脂基体的断裂损伤、局部屈曲以及层间裂纹的扩展等,能够比较平稳地吸收冲击能量,因而是一类性能优异的抗冲击吸能元件。然而,由于水下工作环境较为特殊,对元件的功能性要求也具有一定的针对性,因而开展系统和深入的设计研究较为困难,工程实践领域的应用案例也更为少见。

因此,本文结合水下结构平台的冲击防护和

* 收稿日期:2019-04-15

基金项目:国家自然科学基金面上基金资助项目(51479205)

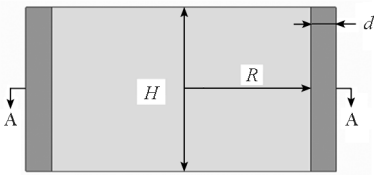
作者简介:周晓松(1990—),男,江苏连云港人,助理研究员,博士,E-mail:1251487779@qq.com

浮力储备需求,借鉴纤维缠绕复合材料约束增强轴压芯材的力学原理,提出并设计了一种新型的轻质浮力补偿型纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体吸能元件,采用分离式 Hopkinson 压杆和扫描电镜装置研究了纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体在高应变率冲击压缩载荷作用下的力学响应规律和能量耗散机制。该研究工作为水下结构平台的抗冲击防护设计提供了设计思路,具有重要的工程应用价值。

1 试验设计

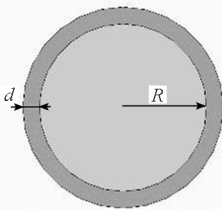
1.1 实验材料及制备方法

本文研究的吸能元件由复合材料表层和浮力芯材组成。复合材料的增强纤维为 E-玻璃纤维缠绕丝束,基体材料为环氧树脂基酯树脂。浮力芯材的主要成分包括空心玻璃微珠和乙烯基酯树脂。浮力芯材的密度为 $0.51 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,压缩屈服强度约为 18 MPa。复合材料表层厚度 $d = 1 \text{ mm}$;芯材半径 $R = 8 \text{ mm}$,高度 $H = 9 \text{ mm}$,如图 1 所示。



(a) 中纵剖面图

(a) Longitudinal section diagram



(b) A-A 剖面

(b) A-A profile

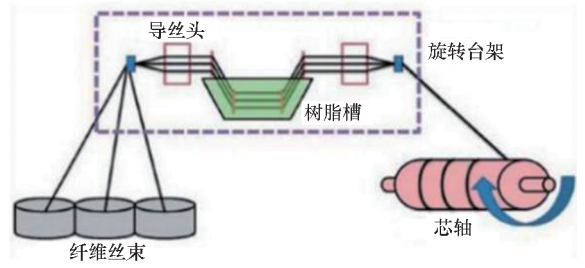
图 1 吸能元件主要设计参量

Fig. 1 Main design parameters of energy absorbing components

为保证吸能元件的加工质量,采用工艺稳定性较好的湿法缠绕成型方式,表层环向缠绕角度设计为 85° ,纤维、树脂质量比为 1:1,制作工艺和试件样品如图 2 所示。

1.2 试验测试方案

吸能元件的抗冲击力学性能试验在分离式 Hopkinson ($\Phi 20 \text{ mm}$) 压杆装置上进行,共进行 2 组代表性应变率条件下的抗冲击压缩试验,每组



(a) 湿法缠绕工艺

(a) Wet winding process



(b) 吸能元件实物图

(b) Physical map of energy absorbing element

图 2 吸能元件工艺流程

Fig. 2 Technological process of the energy absorbing element

代表性应变率的试验测试至少进行 5 次,应变信号采样频率为 1 MHz。装置杆件材料为合金钢,弹性模量 $E = 210 \text{ GPa}$,密度 $\rho = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,泊松比 $\nu = 0.33$,波速 $c = 5178 \text{ m/s}$ 。将吸能元件试件放置在入射杆和透射杆之间,试件与压杆之间的接触面涂抹少量凡士林润滑剂,以避免在压缩试验期间对试样产生较大的摩擦作用。采用空气压力系统进行冲击试验加载,使撞击杆以已知的冲击速度撞击入射杆,产生应力波脉冲并在压杆和试件中反复传播,冲击试验加载装置如图 3 所示。

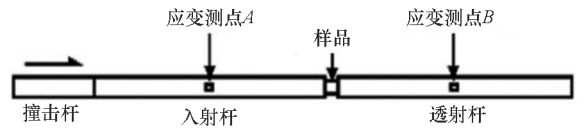


图 3 试验测试装置示意

Fig. 3 Schematic diagram of the testing device

1.3 数值分析模型

采用 ABAQUS/Explicit 建立纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体吸能元件在高应变率冲击压缩载荷作用下的数值分析模型,如图 4 所示。复合材料表层和浮力芯材分别采用 SC8R 壳单元和 C3D8R 实体单元进行模拟。表层复合材料是由 E-玻璃纤维丝束和环氧树脂基酯树脂复合而成,属于典型的层合薄壳结构,采用二维 Hashin 准则即可对其

损伤失效过程进行有效模拟。内部固体浮力芯材是由空心玻璃微珠和乙烯基酯树脂复合而成,具有塑性体积可压缩特点,因而选择 Crushing foam 本构模型作为损伤失效判据。表层和芯材的性能参数已在前期的试验研究和数值模拟中得到对比验证^[11-12]。试件与压杆之间采用通用接触算法,法向设置为硬接触,切向摩擦系数设为 0.1。

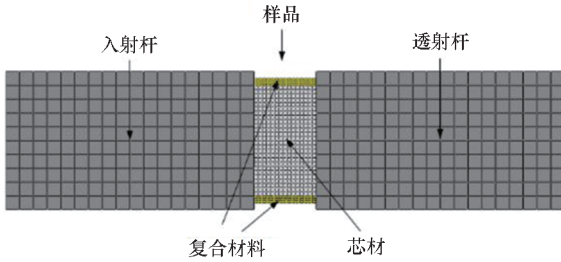


图 4 吸能元件数值分析模型

Fig. 4 Numerical analysis model of the energy absorbing element

2 试验结果分析

2.1 力学响应特征分析

本小节对吸能元件在两种典型加载条件下的力学响应特征进行分析,撞击杆速度分别为 10 m/s 和 25 m/s,应变-时间信号由入射杆和透射杆中心点应变片所测得。由于应变测试信号中的高频分量干扰较大,分析之前需要进行滤波处理。此外,吸能元件的冲击响应周期约为 0.8 ms,因而滤波截止频率定为 12 500 Hz,取 5 次试验曲线中重合度较好的 3 次曲线取平均值,进行处理后的应变-时间变化曲线如图 5 所示。

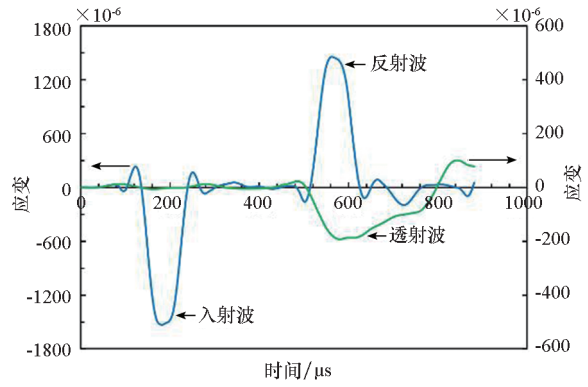
由图 5 分析可知,反射波应变-时间曲线呈现出典型的梯形特征,表明吸能元件在高应变率冲击压缩载荷作用下呈现典型的弹塑性力学行为。采用三波法对应变测试信号进行处理分析,得到试件的动态应力-应变关系,公式如下所示:

$$\sigma_s(t) = \frac{S_B E}{2S_s} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{c_0}{L_s} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] \quad (2)$$

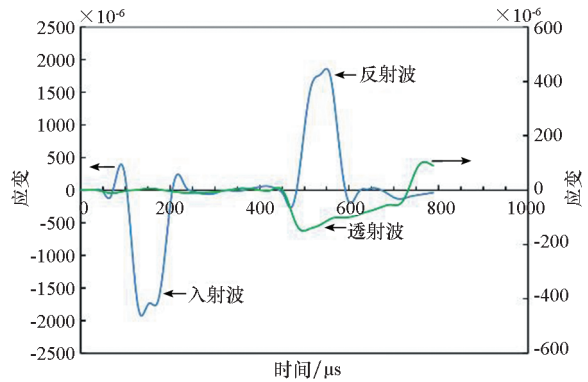
$$\varepsilon_s(t) = \frac{c_0}{L_s} \int_0^t [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] dt \quad (3)$$

其中: $\sigma_s(t)$, $\dot{\varepsilon}_s(t)$, $\varepsilon_s(t)$ 分别代表试件的应力、应变率和应变函数; E, c_0, S_B 分别为不锈钢压杆的弹性模量、弹性波波速和横截面积; L_s, S_s 分别代表试件的初始长度和横截面积; $\varepsilon_i(t), \varepsilon_r(t), \varepsilon_t(t)$ 分别为应变测点的入射、反射、透射应变信号。采用三波公式处理得到的应变-时间曲线和



(a) 撞击杆速度 10 m/s

(a) Collision velocity 10 m/s of strike bar



(b) 撞击杆速度 25 m/s

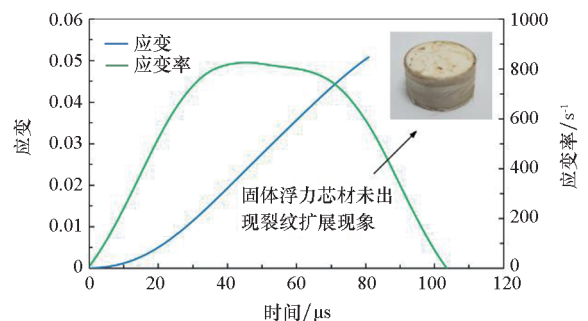
(b) Collision velocity 25 m/s of strike bar

图 5 Hopkinson 杆测点应变-时间信号

Fig. 5 Strain versus time signals of measuring point for Hopkinson bar

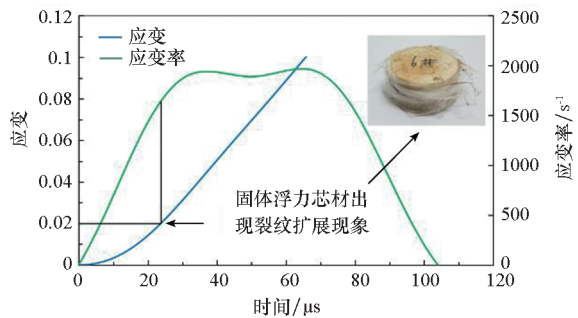
应变率-时间曲线,如图 6 所示。

对图 6(a) 进行分析可知,在撞击杆速度为 10 m/s 的加载条件下,吸能元件的平均加载应变率约为 800 s^{-1} ,压缩应变最大值约为 0.05,此时内部固体浮力芯材并未出现明显的冲击裂纹,表层纤维缠绕复合材料表面仅出现轻微的树脂基体发白现象。当撞击杆速度上升到 25 m/s 时,平均加载应变率约为 2000 s^{-1} ,压缩应变最大值为 0.1,如图 6(b) 所示。由于撞杆冲击速度和能量



(a) 撞击杆速度 10 m/s

(a) Collision velocity 10 m/s of strike bar



(b) 撞击杆速度 25 m/s

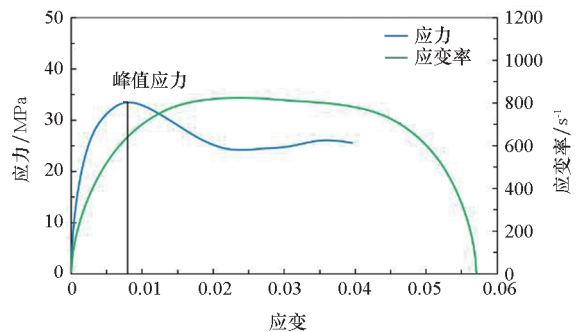
(b) Collision velocity 25 m/s of strike bar

图6 吸能元件力学响应时间特征曲线

Fig.6 Time characteristic curves of mechanical response for the energy absorbing element

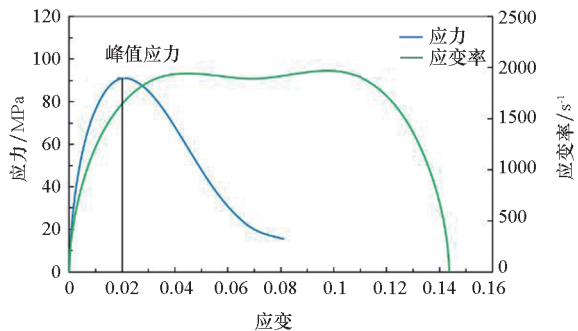
的大幅上升,当吸能元件的瞬态冲击应变达到0.02时,内部固体浮力芯材表面就出现了明显的冲击裂纹,而表层纤维缠绕复合材料则出现严重的拉伸断裂破坏,表层复合材料和内部固体浮力芯材之间的复合界面也出现了剥离现象,试件的力学本构曲线如图7所示。

由图7分析可知,两种典型冲击加载应变率条件下,应力-应变曲线在初始阶段均近似沿正斜率直线上升,表明吸能元件在起始阶段具有良



(a) 撞击杆速度 10 m/s

(a) Collision velocity 10 m/s of strike bar



(b) 撞击杆速度 25 m/s

(b) Collision velocity 25 m/s of strike bar

图7 吸能元件力学本构特征曲线

Fig.7 Constitutive characteristic curves of mechanical response for the energy absorbing element

好的线弹性特征。在加载应变率为 800 s^{-1} 的条件下,图7(a)中吸能元件起始阶段的应力-应变曲线近似呈直线变化,达到应力峰值点后开始出现小幅下降,进入较为稳定的塑形平台阶段。随着撞击杆冲击速度和冲击能量的提高,吸能元件的初始模量和屈服应力开始大幅度上升,出现与吸能元件断裂破坏相对应的应力峰值点 σ_y 即本构失稳标志。进一步分析可知,在较低应变率条件下,吸能元件的屈服应力 σ_y 小于其断裂应力 σ_b ,呈韧性破坏特征;而在高应变率加载条件下, $\sigma_y \geq \sigma_b$,吸能元件呈现出典型的脆性破坏特征。由此可见,吸能元件的加载应变率影响其抗冲击压缩性能,在加载应变率升高过程中,发生了韧性到脆性的转变。在高应变率冲击载荷作用下,固体浮力芯材试件沿加载方向并没有发生很大的变形就因裂纹扩展而破坏。

以 2000 s^{-1} 加载应变率条件下的试件为例,将其力学响应特征曲线的数值模拟与试验结果进行对比,如图8所示。分析可知,数值模拟与试验测试的应力-应变曲线一致性较好,验证了数值分析模型的有效性。

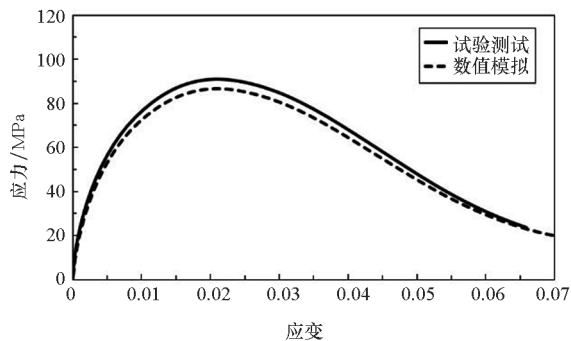


图8 高应变率下试件数值模拟与试验结果对比

Fig.8 Comparison of experiment and simulation results for specimens under high strain rate loading

2.2 能量耗散机制分析

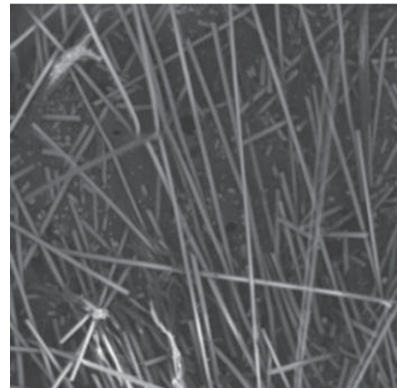
本小节对纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体吸能元件在不同加载应变率条件下的损伤破坏模式和能量耗散机制进行分析。

在加载应变率为 800 s^{-1} 的条件下,吸能元件的压缩应变较小,内部固体浮力芯材并未出现明显的冲击裂纹,横向膨胀效应较弱,因而表层的纤维缠绕复合材料仅出现轻微的树脂基体损伤,试验测试与数值模拟结果对比如图9所示。

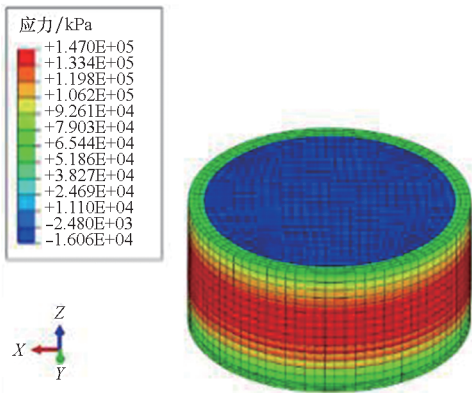
由于冲击能量较小,固体浮力芯材组分之一的空心玻璃微珠仅出现少量的压缩断裂破坏,而另一组树脂基体仍处于弹性应力状态,微观损伤破坏模式如图10(a)所示。由于内部固体浮力芯材的压缩膨胀效应较小,表层纤维缠绕复合材



(a) 试验测试结果
(a) Experimental results



(b) 300 μm 比例尺下复合材料微观损伤模式
(b) Microscopic damage of the composite under 300 μm scale



(b) 数值模拟结果
(b) Numerical simulation results

图 10 800 s⁻¹ 加载应变率下吸能元件破坏模式
Fig. 10 Damage modes of the energy absorbing element under 800 s⁻¹ strain rate loading

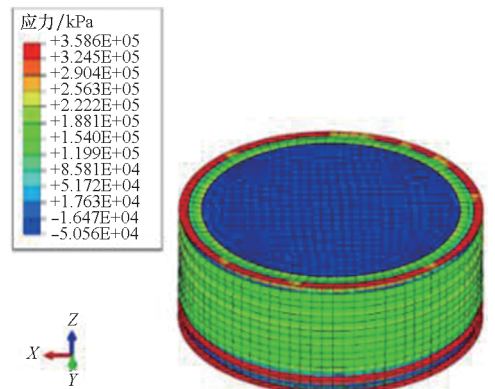
图 9 低应变率下吸能元件试验与仿真结果对比
Fig. 9 Comparison of experiment and simulation for the energy absorbing components under low strain rate loading



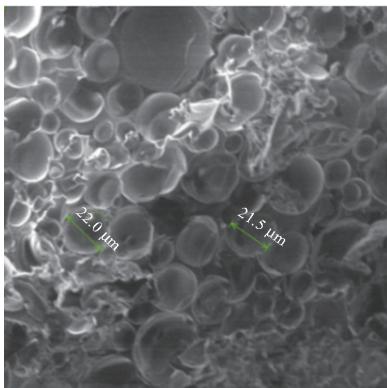
(a) 试验测试结果
(a) Experimental results

料仅出现较为显著的基体发白损伤,增强纤维的拉伸断裂破坏并不明显,如图 10(b) 所示。

随着撞击杆冲击速度和冲击能量的增加,在加载应变率为 2000 s⁻¹ 的条件下,吸能元件的压缩应变极限值大幅提高,内部固体浮力芯材在加载应变达到 0.02 时即出现了明显的冲击裂纹,压缩膨胀效应也更为明显,因而导致表层纤维缠绕复合材料出现严重的纤维拉伸断裂破坏,试验测试与数值模拟结果对比如图 11 所示。



(b) 数值模拟结果
(b) Numerical simulation results



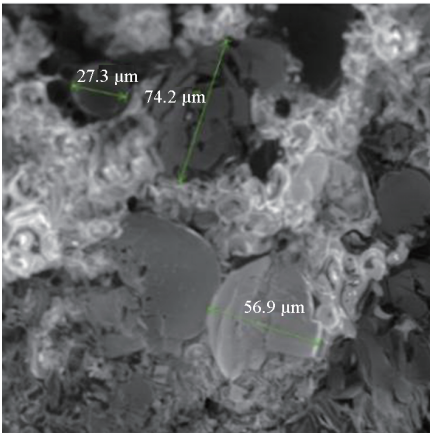
(a) 50 μm 比例尺下固体浮力芯材微观损伤模式
(a) Microscopic damage of the solid buoyant core under 50 μm scale

图 11 高应变率下吸能元件数值模拟与试验测试结果对比

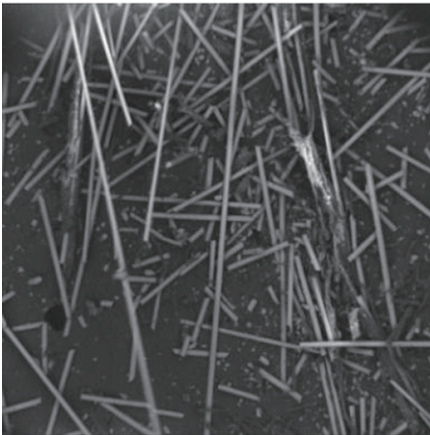
Fig. 11 Comparison of numerical simulation and experimental test for the energy absorbing components under high strain rate load

由于加载应变率较大,内部固体浮力芯材树脂基体内部的无规则线团和半伸展分子链来不及做更大程度的蜷缩调整,分子间次价键就发生了

断裂,同时大量的空心玻璃微珠在应力波快速作用下没有获得足够的应力水平,并未发生充分的压缩断裂破坏,而另一组分树脂基体已进入塑性应力状态。因此,吸能元件沿加载方向并没有发生很大的变形就会因裂纹扩展而破坏,断裂的结果使应力分布更加不均匀,分子链断裂过程加速,发展成微裂纹。当应力水平继续上升时,微裂纹扩展并与微珠基体间的缝隙汇合,形成较为明显的宏观裂纹,如图 12(a)所示。由于内部固体浮力芯材的压缩膨胀效应较为明显,表层纤维缠绕复合材料也出现了较为显著的纤维拉伸断裂破坏,如图 12(b)所示。



(a) 50 μm 比例尺下固体浮力芯材微观损伤模式
(a) Microscopic damage of the solid buoyant core under 50 μm scale



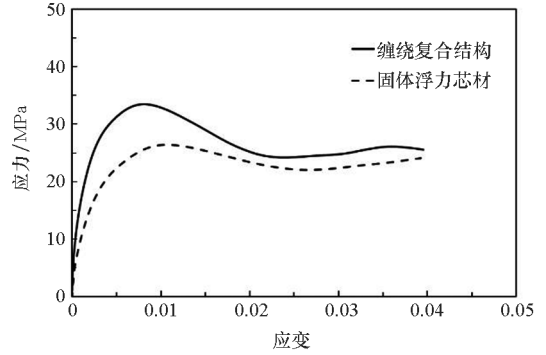
(b) 300 μm 比例尺下复合材料微观损伤模式
(b) Microscopic damage of the composite under 300 μm scale

图 12 2000 s^{-1} 加载应变率下吸能元件破坏模式
Fig. 12 Damage modes of the energy absorbing element under 2000 s^{-1} strain rate loading

2.3 冲击吸能效率分析

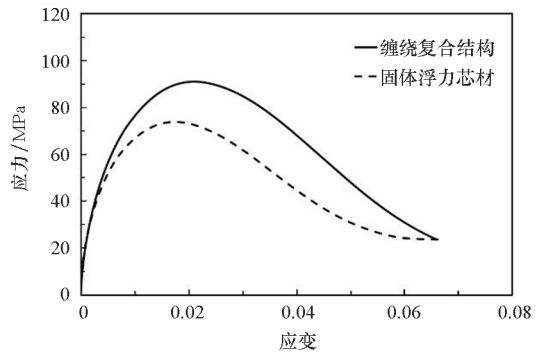
本小节对冲击压缩载荷下纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体试件的吸能效率进行分析,进一步评

估该型吸能元件在水下抗冲击防护领域的工程应用价值。为了更加直观表现纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体结构设计的合理性和能量吸收特性的优越性,本文对缠绕复合结构和未缠绕固体浮力芯材在相同加载应变率条件下的应力-应变曲线进行对比分析,如图 13 所示。



(a) 800 s^{-1} 加载应变率

(a) Load strain rate of 800 s^{-1}



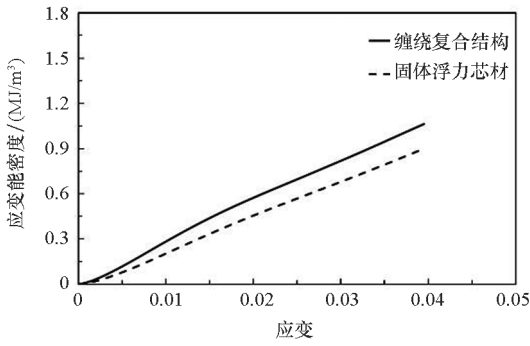
(b) 2000 s^{-1} 加载应变率

(b) Load strain rate of 2000 s^{-1}

图 13 缠绕复合结构与固体浮力芯材应力-应变曲线对比

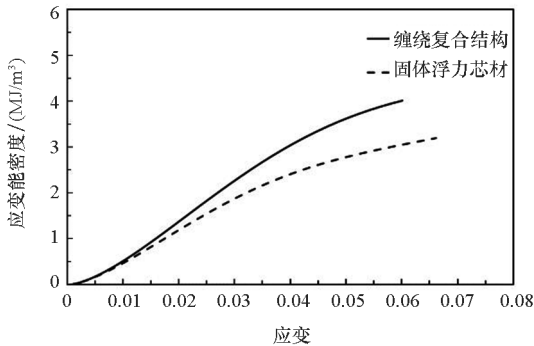
Fig. 13 Comparison of stress-strain curves for the winding structure and the buoyant core

由图 13 分析可知,随着冲击加载应变率的上升,无纤维缠绕复合材料表层的固体浮力芯材呈现出较强的应变率效应,动态屈服应力峰值出现大幅度提高。此外,由于纤维缠绕复合材料表层的环向约束效应,缠绕复合结构试件的屈服应力峰值在相同加载应变率条件下也得到提高,能量吸收效率也进一步提升。缠绕复合结构和未缠绕固体浮力芯材在相同加载应变率条件下的应变能密度-应变曲线对比如图 14 所示。从能量吸收密度角度评估认为,纤维缠绕复合材料夹芯圆柱吸能元件在水下高应变率冲击载荷环境下不仅具有较好的冲击吸能效率,而且具有较好的环境适应性和浮力补偿特性,因而是很好的水下抗冲击吸能元件。



(a) 800 s⁻¹加载应变率

(a) Load strain rate of 800 s⁻¹



(b) 2000 s⁻¹加载应变率

(b) Load strain rate of 2000 s⁻¹

图 14 缠绕复合结构与固体浮力芯材应变能密度 - 应变曲线对比

Fig. 14 Comparison of strain energy density - strain curves for the winding structure and the buoyant core

3 结论

1) 纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体吸能元件在高应变率冲击载荷作用下的力学响应呈现典型的弹塑性特征, 表层复合材料和内部固体浮力芯材相互约束的塑性损伤阶段是吸能元件能量吸收的主要阶段。

2) 在高应变率加载条件下, 纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体吸能元件的屈服应力、屈服应变和能量吸收密度均随着加载应变率的提高呈现上升的趋势。

参考文献 (References)

[1] 卢天健, 何德坪, 陈常青, 等. 超轻多孔金属材料的多功能特性及应用[J]. 力学进展, 2006, 36(4): 517 - 535.
 LU Tianjian, HE Deping, CHEN Changqing, et al. The multi-functionality of ultra-light porous metals and their applications[J]. Advances in Mechanics, 2006, 36(4): 517 - 535. (in Chinese)

[2] 范华林, 杨卫. 轻质高弱点阵材料及其力学性能研究进展[J]. 力学进展, 2007, 37(1): 99 - 112.
 FAN Hualin, YANG Wei. Development of lattice materials with high specific stiffness and strength [J]. Advances in Mechanics, 2007, 37(1): 99 - 112. (in Chinese)

[3] 赵效东. 海洋工程结构物碰撞失效准则研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
 ZHAO Xiaodong. Research of failure criterion of offshore structural collision [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010. (in Chinese)

[4] Huang Z Q, Yu S R, Liu J A, et al. Microstructure and mechanical properties of in situ Mg₂Si/AZ91D composites through incorporating fly ash cenospheres [J]. Materials & Design, 2011, 32(10): 4714 - 4719.

[5] Alizadeh M, Mirzaei-Aliabadi M. Compressive properties and energy absorption behavior of Al - Al₂O₃ composite foam synthesized by space-holder technique [J]. Materials & Design, 2012, 35: 419 - 424.

[6] Kumar P, Shukla A. Dynamic response of glass panels subjected to shock loading [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2011, 357(24): 3917 - 3923.

[7] Chen X D, Wu S X, Zhou J K. Experimental and modeling study of dynamic mechanical properties of cement paste, mortar and concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 419 - 430.

[8] Lim J Y, Bart-Smith H. Theoretical approach on the dynamic global buckling response of metallic corrugated core sandwich columns[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2014, 65: 14 - 31.

[9] Yan L L, Yu B, Han B, et al. Compressive strength and energy absorption of sandwich panels with aluminum foam-filled corrugated cores [J]. Composites Science and Technology, 2013, 86: 142 - 148.

[10] Takano A. Buckling of thin and moderately thick anisotropic cylinders under combined torsion and axial compression[J]. Thin-Walled Structures, 2011, 49(2): 304 - 316.

[11] 周晓松, 梅志远, 吴梵. 纤维缠绕复合材料夹芯圆柱体准静态压缩吸能机制[J]. 复合材料学报, 2017, 34(8): 1764 - 1771.
 ZHOU Xiaosong, MEI Zhiyuan, WU Fan. Energy absorption mechanism of filament wound composite sandwich cylinder under quasi-static compression loading [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(8): 1764 - 1771. (in Chinese)

[12] 梅志远, 周晓松, 吴梵. 不同高径比固体浮力材料的单轴压缩变形机制及能量耗散特征[J]. 材料研究学报, 2018, 32(8): 591 - 598.
 MEI Zhiyuan, ZHOU Xiaosong, WU Fan. Deformation mechanism and energy dissipation of solid buoyant material with different ratio of height to diameter under uniaxial compression loading [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2018, 32(8): 591 - 598. (in Chinese)