

碳纤维增强铝基复合材料动态力学性能

汪胜陆, 向岑阳, 孔宸, 程鑫

安徽理工大学机电工程学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2024年7月15日; 录用日期: 2024年8月19日; 发布日期: 2024年8月28日

摘要

本文通过搅拌铸造法制备了碳纤维/6061铝基复合材料, 采用电子万能试验机和霍普金森压杆实验装置进行准静态与动态压缩性能。采用二波法处理动态压缩实验数据得到材料的应力应变曲线。实验结果表明, 对金属铝进行合金化处理能够有效的提高其动态力学性能, 同一冲击气压下未添加碳纤维的6061铝合金材料的最大应力低于碳纤维/6061铝合金复合材料, 且在一定情况下随碳纤维的含量成正比变化。

关键词

铝合金, 碳纤维, 动态冲击, 力学性能

Dynamic Mechanical Properties of Carbon Fibers Reinforced Aluminum Matrix Composites

Shenglu Wang, Cenyang Xiang, Chen Kong, Xin Cheng

School of Mechatronics Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Jul. 15th, 2024; accepted: Aug. 19th, 2024; published: Aug. 28th, 2024

Abstract

In this paper, carbon fibers/6061 aluminum matrix composite was prepared by stirring casting method. The quasi-static and dynamic compression properties were studied by electronic universal testing machine and Hopkinson pressure bar test device. The stress-strain curve of the material was obtained by using two-wave method to process the experimental data of dynamic compression. The experimental results show that alloying can effectively improve the dynamic mechanical properties of aluminum. Under the same impact pressure, the maximum stress of 6061 aluminum alloy without adding carbon fiber is lower than that of carbon fibers/6061 aluminum matrix composites, and it is proportional to the content of carbon fiber under certain circumstances.

Keywords

Aluminum Alloy, Carbon Fibers, Dynamic Impact, Mechanical Properties

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着科学技术的高速发展, 铝基复合材料由于具有质轻、强度高、耐腐蚀性好、容易加工、可热处理等优点在车辆、航空航天等工程机械的轻量化领域得到快速的应用, 迄今研究最多的金属基复合材料之一[1] [2]。根据增强体的不同, 铝基复合材料主要分为纤维增强和颗粒增强复合材料, 其中颗粒增强复合材料比普通合金具有更高的耐磨性和硬度, 日本用铝基复合材料制备了汽车发动机活塞、活塞环等零部件, 后又制备了汽车连杆及其他零件, 这使汽车更轻便且耐用[3]。美国 Duralcan 公司研制出的 SiC 颗粒/铝基复合材料被用于制造的汽车刹车盘、齿轮箱等, 也获得了良好的性能[4]。在汽车领域, 本田公司使用碳纤维增强铝基复合材料取代了常用的铸铁杆套, 不仅使质量减轻, 还大幅度提高了汽缸和活塞的耐磨性能。在军用装备领域被广泛应用于坦克及装甲车履带, 军用直升机壳体等[5]。在建筑领域, 其密度小于钢, 因此能够更好的减轻建筑自身重量, 且一些特种碳纤维/铝基复合材料的性能丝毫不弱与结构钢[6]。随着铝合金及其复合材料在汽车应用等领域的扩大, 实现碳纤维增强铝基复合材料在汽车结构件上的应用仍有许多基础性的问题亟待解决, 当结构件遭受冲击损伤的时候, 基体铝合金的韧性及与之相关的复合材料的抗冲击损伤性能, 就成为决定复合材料能否继续使用的最重要指标, 因此碳纤维增强铝基复合材料在高速冲击条件下的力学响应和失效机理的研究尤为重要。

本文选取 6061 铝合金为复合材料的基体材料, 碳纤维作为增强改性材料, 通过设计完整的制备工艺, 制备综合力学性能优良的碳纤维增强 6061 铝基复合材料。并采用电子万能试验机和霍普金森压杆实验装置进行准静态与动态压缩性能。研究结果对于评定复合材料的抗冲击损伤性能, 复合材料结构的损伤容限验证、分析以及确定复合材料结构的设计许用值, 保证结构的安全性, 具有非常实际的意义。

2. 试样制备及试验方法

2.1. 碳纤维表面金属化

本文采取碳纤维表面镀镍处理, 首先用去离子水对去胶碳纤维反复清洗, 然后将清洗过的碳纤维置于 80℃ 恒温干燥箱中, 干燥后待用。将适量去胶碳纤维和铁粒, 加入镀镍溶液中, 利用电磁搅拌器搅拌 120 min; 利用去离子水清洗反应后的碳纤维并置于 80℃ 的真空干燥箱中干燥, 取出后得到镀镍碳纤维。镀镍溶液配置比例如表 1 所示; 图 1 所示为碳纤维镀镍流程。

Table 1. Nickel plating solution configuration

表 1. 镀镍溶液配置

试剂	去离子水	六水合硫酸镍	次亚磷酸钠	氯化铵	柠檬酸钠	试剂
含量(g·L ⁻¹)	适量	20	30	28	30	适量

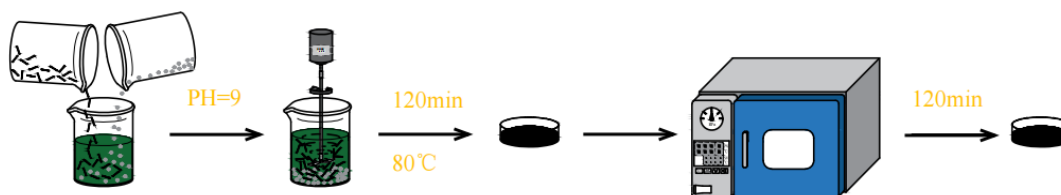


Figure 1. Diagram of nickel plating process for carbon fibers
图 1. 碳纤维镀镍流程图

2.2. 纤维增强铝基复合材料的制备

通过浇铸成型工艺制得碳纤维/6061Al 复合材料。首先对镀镍碳纤维进行抗氧化处理，采用浓度为 1% 硼酸溶液浸泡镀镍碳纤维，烘干后待用。高温炉装置进行预热后，将 6061 铝合金置入高温炉内熔炼，去渣处理，将准备好的碳纤维倒入高温炉内，用铁棒进行搅拌，待搅拌均匀后将熔炼得到的复合材料倒入砂模中，冷却，脱模，即得到碳纤维/6061 铝合金复合材料坯料。

2.3. 实验方法

采用电子万能试验机和霍普金森压杆实验装置分别考察了碳纤维/6061Al 复合材料的准静态和动态压缩力学性能研究。准静态压缩实验样品的直径为 10 mm、高为 10 mm 的圆柱体，实验压缩速率为 1 mm/min。动态压缩实验采用直径为 10 mm、高为 8 mm 的圆柱体，实验的冲击气压设置为 0.2 MPa、0.3 MPa、0.4 MPa、0.5 MPa 和 0.6 MPa。通过 SHPB 实验得到的时程波曲线，对其进行处理得到时间 - 应变率、应力 - 应变曲线。研究了在不同冲击气压的作用下，通过对比分析其性能参数、应变硬化、应变率敏感性和绝热软化等方面。

3. 分析与讨论

3.1. 准静态压缩实验宏观变形

图 2 为准静态压缩下的应力 - 应变曲线图，从图中可以看出，纯铝试样的屈服应力较低，6061 铝合金试样的屈服应力是纯铝试样的 3.3 倍，0.5 wt.%CF/6061Al 复合材料的屈服应力相较于 6061Al 基体提高了 14%，1.0 wt.%CF/6061Al 复合材料相较于 6061Al 基体和 0.5 wt.%CF/6061Al 复合材料分别提高了 20.1%、7.1%。所有材料应力应变曲线均可分为弹性变形阶段和塑性变形阶段，在弹性变形阶段，应力随应变的增加而迅速增大，在塑性变形阶段，材料随着载荷的增加，逐渐失去抵抗变形的能力[7]。

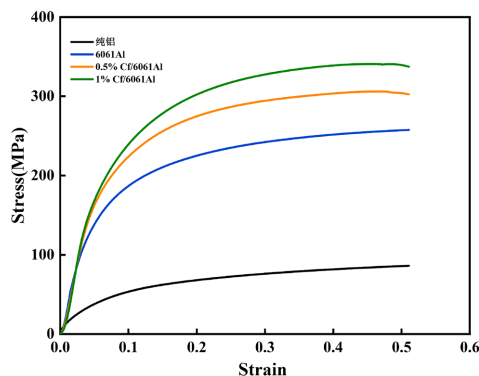


Figure 2. Stress-strain curves of Aluminum based composites
图 2. 铝基复合材料的应力 - 应变曲线

3.2. 纯铝的动态压缩性能

图 3 为纯铝样品的应力 - 时间曲线、应变 - 时间曲线、应变率 - 时间曲线以及应力应变曲线。根据图 3(a), 材料的最大应力值出现在 0.45~0.5 ms 之间, 随后开始降低, 这是由于动态压缩实验中, 应力波持续的时间非常短, 材料中的应力在短时间内急剧增大, 随后开始卸载。根据图 3(b)可知, 材料的应变在 0.4~0.55 ms 之间急剧增大, 在 0.55~0.6 ms 之间达到材料的屈服极限。根据图 3(c)可知材料的应变率随着冲击气压的增大而增大。取应力 - 应变曲线的最大应力, 其中, 在 0.6 MPa 的冲击气压下, 试样的最大应力接近于 0.5 MPa 冲击气压下的实验所获得的最大应力, 这是由于高冲击气压的作用下材料发生了较大的形变, 因此材料内部发生了绝热软化效应, 导致材料性能降低[8] [9]。

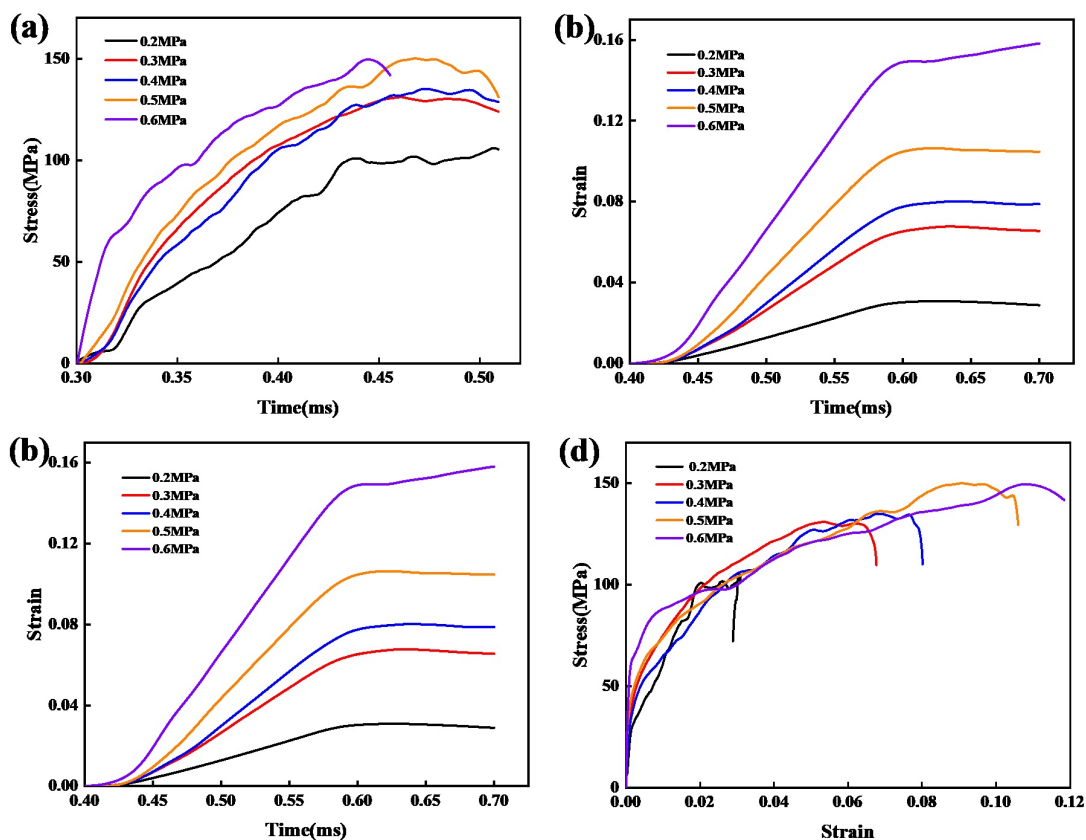


Figure 3. Dynamic compression curves of pure aluminum under different impact pressures (a) Stress-time; (b) Strain-time, (c) strain rate-time; (d) Stress-Strain

图 3. 不同冲击气压下纯铝动态压缩曲线图(a) 应力 - 时间; (b) 应变 - 时间, (c) 应变率 - 时间; (d) 应力 - 应变

3.3. 6061Al 基体的动态压缩实验

图 4 为 6061Al 基体试样的时间 - 应力曲线、时间 - 应变曲线、时间 - 应变率曲线以及应力应变曲线。可见, 材料的最大应力值出现在 0.45~0.5 ms 之间(图 4(a)), 材料在 0.6 ms 附近达到材料的屈服极限(图 4(b))。样品的平均应变率在 0.4~0.45 ms 之间随时间的增大而增大, 在 0.45~0.57 ms 之间, 由于材料内能量处于相对均衡状态, 其平均应变率开始为起伏阶段, 在 0.57 ms 之后, 材料中的能量开始卸载(图 4(c))。由图 4(d)可知, 材料无明显的屈服阶段, 在冲击气压为 0.2 MPa 时, 材料的最大应力为 217.6 MPa。冲击气压在 0.3 MPa 时, 材料的最大应力为 294.2 MPa, 相比于 0.2 MPa 的最大应力增加了 26%。冲击气压在

0.4 MPa 时, 材料的最大应力为 310.1 MPa, 相比于 0.2 MPa、0.3 MPa 下的最大应力分别增加了 29.8%、5.1%。冲击气压在 0.5 MPa 时, 其最大应力为 334.2 MPa, 相比 0.2 MPa、0.3 MPa、0.4 MPa 的最大应力分别增加了 34.8%、11.9%、7.2%。冲击气压在 0.6 MPa 时, 其最大应力为 324.9 MPa, 相比 0.2 MPa、0.3 MPa 和 0.4 MPa 的最大应力分别增加了 33%、9.4% 和 4.5%。试样的应力应变曲线表现为三个阶段, 第一阶段为弹性阶段, 该阶段试样内部流动应力急剧增加, 第二阶段为屈服阶段, 该阶段试样内部流动应力增加较慢, 该应力应变曲线无明显的屈服阶段, 这是由于 6061 铝合金具有良好的塑性性能, 最后为冲击卸载阶段, 该阶段表现为试样内部流动应力达到上屈服点, 试样形变结束, 其内部流动应力随之急剧下降。

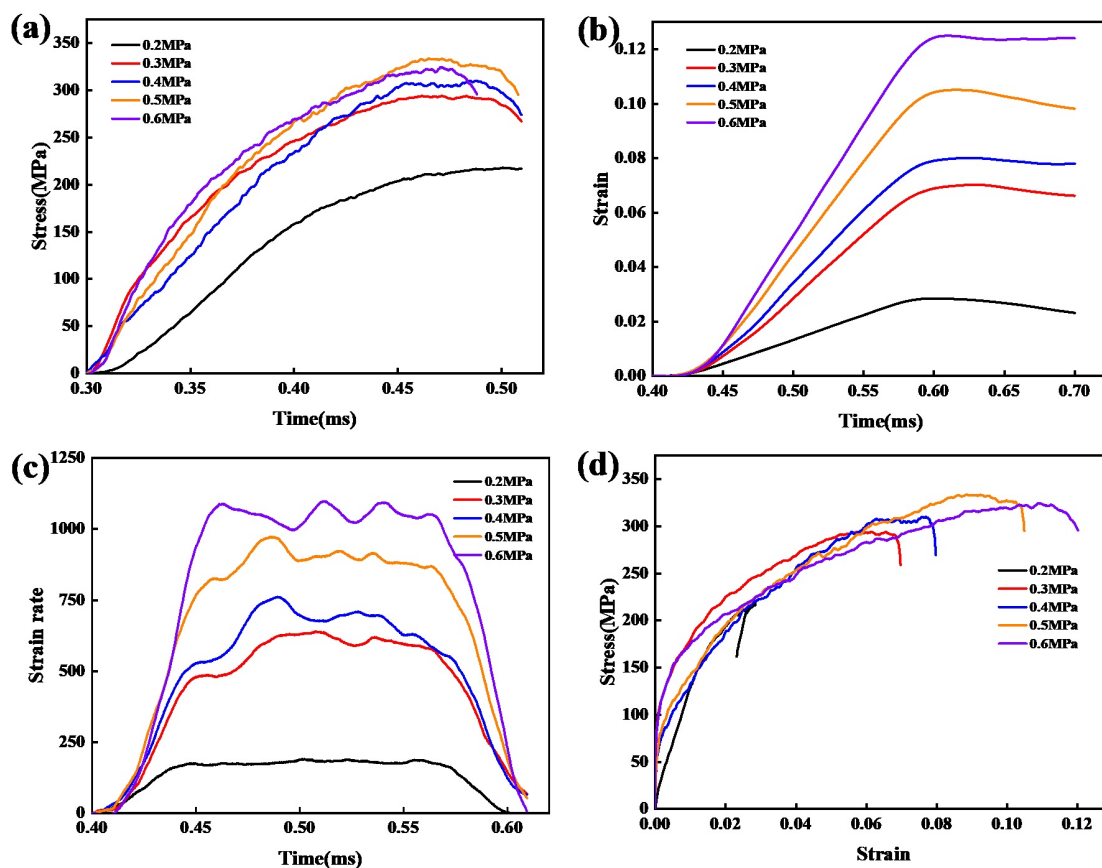


Figure 4. Dynamic compression curves of 6061 aluminum alloy under different impact pressures (a) Stress-time; (b) Strain-time, (c) strain rate-time; (d) Stress-Strain

图 4. 不同冲击气压下 6061 铝合金动态压缩曲线图(a) 应力 - 时间; (b) 应变 - 时间, (c) 应变率 - 时间; (d) 应力 - 应变

3.4. 0.5 wt.%CF/6061Al 复合材料的动态压缩实验

图 5 为 0.5 wt.%CF/6061Al 复合材料的应力 - 时间、应变 - 时间、应变率 - 时间和应力 - 应变曲线。由图 5(a)可知, 试样在不同冲击气压的作用下, 都在 0.45~0.50 ms 之间达到其应力的最大值。根据图 5(b)、(c)所示, 在 0.4~0.45 ms 之间, 试样的应变随时间变化较缓, 应变率随时间变化急剧增加, 在 0.45~0.57 ms 之间, 试样的塑性应变随时间的增加急剧增大, 其对应的应变率与时间呈非线性关系, 其变化曲线先急剧攀升后迅速下降再趋于较为稳定状态, 这是由于复合材料中的增强相使其内部受力不均匀导致的。从

图 5(d)中可以看出, 流动应力随塑性应变的增大而增大, 这是因为在承受动态载荷下, 材料内部应力经过 6061 铝合金基体 - 镀镍碳纤维 - 6061 铝合金基体传递, 铝晶粒发生位错运动, 碳纤维会阻碍其位错运动, 导致铝基复合材料内部残余应力增大, 承受能力增强, 表现出应变硬化现象。冲击气压在 0.6 MPa 时, 最大应力达到了 397.9 MPa, 相比冲击气压在 0.2 MPa、0.3 MPa、0.4 MPa 和 0.5 MPa 下的最大应力分别增加了 37.9%、20.1%、12.7% 和 2.7%。这表明 0.5 wt.% 碳纤维/6061 铝合金复合材料具有明显的应变率敏感性。

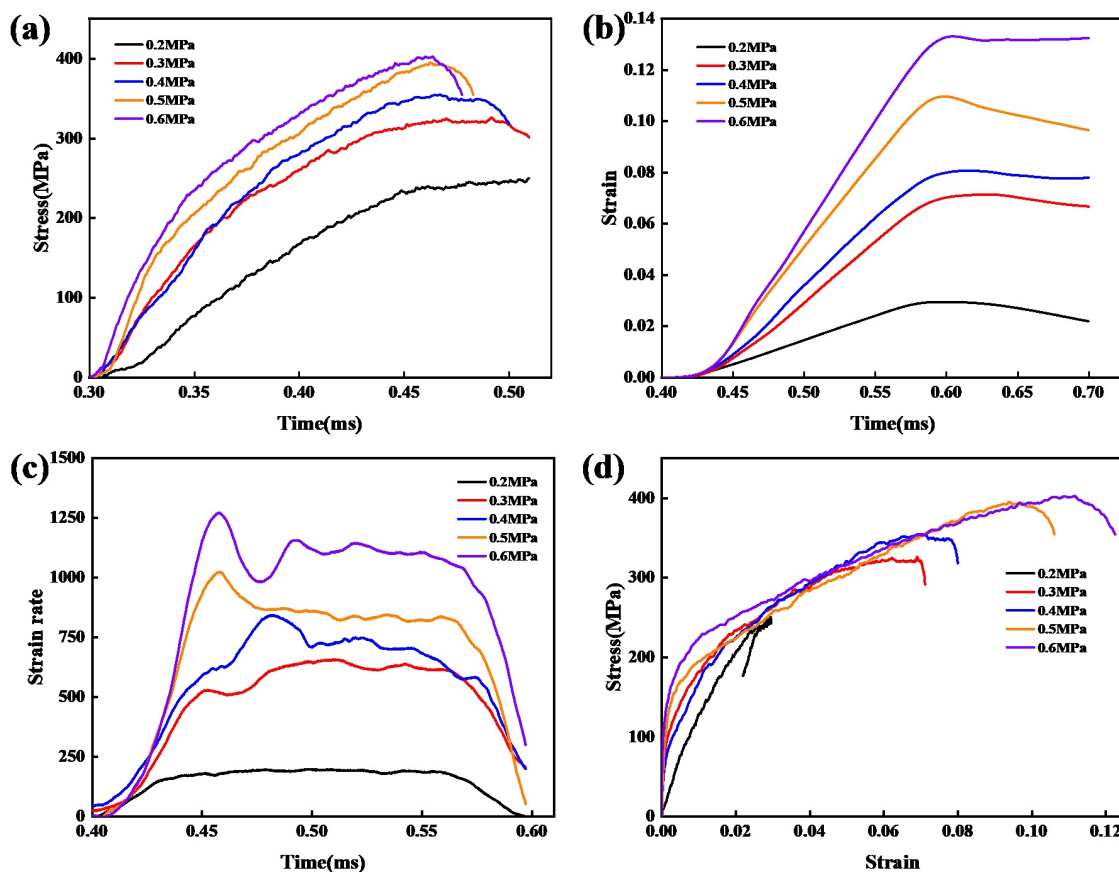


Figure 5. Dynamic compression curve of 0.5 wt.%CF/6061Al composites under different impact pressures (a) Stress-time; (b) Strain-time, (c) Strain rate-time; (d) Stress-strain

图 5. 0.5 wt.%CF/6061Al 复合材料动态压缩曲线图(a) 应力 - 时间; (b) 应变 - 时间, (c) 应变率 - 时间; (d) 应力 - 应变

3.5. 1.0 wt.%CF/6061Al 复合材料的动态压缩实验

图 6 为 1% CF/6061Al 复合材料的应力 - 时间、应变 - 时间、应变率 - 时间以及应力 - 应变曲线。可见, 不同冲击气压下的最大流动应力均分布于 0.45~0.5 ms 之间, 材料经动态压缩试验后得到的应力 - 应变曲线可以分为弹性变形阶段和塑性变形阶段。材料处于弹性变形阶段时, 材料的流动应力随塑性应变呈正比变化, 材料处于塑性变形阶段时, 其流动应力随塑性应变的增加变缓, 值得注意的是, 0.5 MPa 的应力在 0.4 ms 之后大于 0.6 MPa, 这是因为在 0.6 MPa 的冲击气压下, 材料发生了绝热软化效应, 且相对于 0.5 MPa 下更为明显, 由于复合材料中碳纤维质量分数的增高, 而碳纤维导热性能相比于铝合金较差, 无法在短时间内将更多的热量传导出去, 其塑性阶段的流动应力的增加相对较慢, 因此复合材料在 0.6

MPa 的冲击实验下的最大应力小于 0.5 MPa 下的最大应力。

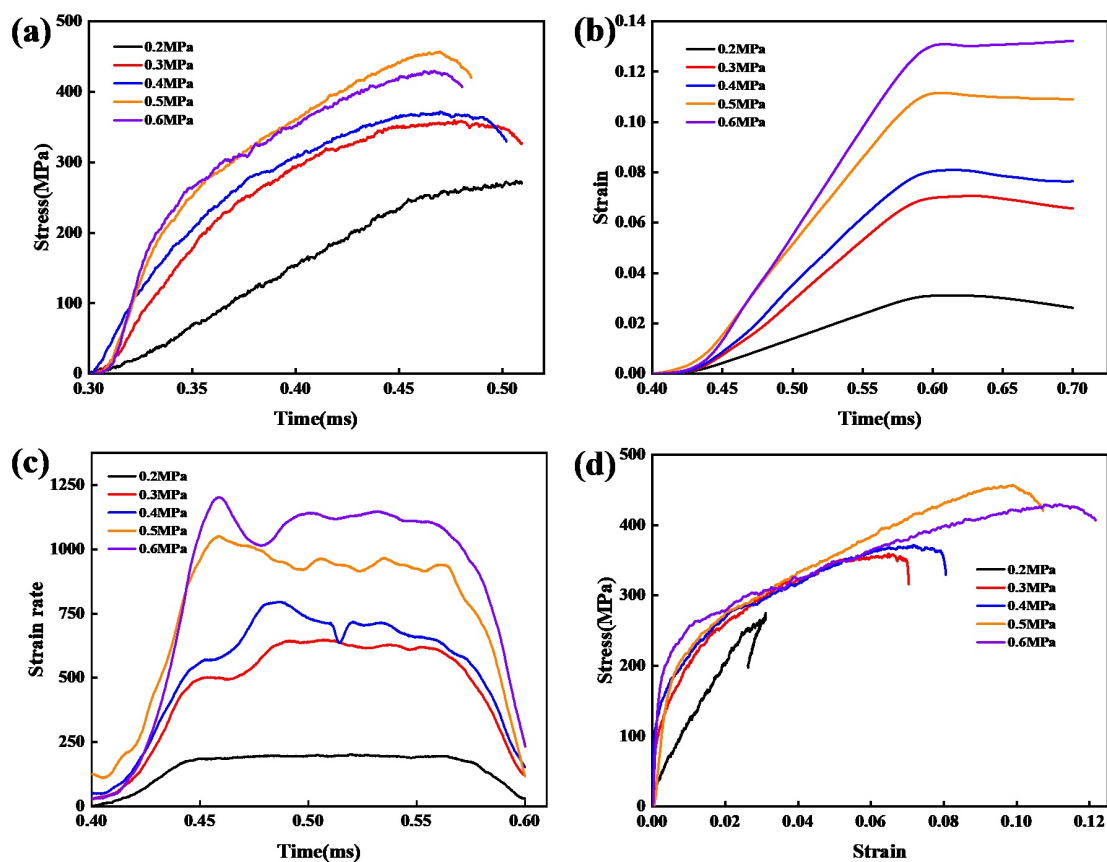


Figure 6. Dynamic compression curve of 1.0 wt.%CF/6061Al composite material under different impact pressures (a) Stress-time; (b) Strain-time, (c) Strain rate-time; (d) Stress-strain

图 6. 1.0 wt.%CF/6061Al 复合材料动态压缩曲线图(a) 应力 - 时间; (b) 应变 - 时间, (c) 应变率 - 时间; (d) 应力 - 应变

4. 结论

本文考察了碳纤维表面镀镍情况和纯铝、6061 铝合金、碳纤维/6061Al 铝基复合材料的动态力学性能。准静态压缩实验结果表明碳纤维可显著提高 6061Al 基复合材料的抗压强度, 1 wt.%CF/6061Al 复合材料相较于 6061Al 基体和 0.5 wt.%CF/6061Al 复合材料分别提高了 11.7%、2.7%。动态压缩试验结果表明, 碳纤维能够有效的提高 6061Al 基复合材料的动态力学性能, 相同冲击气压下碳纤维/6061 铝基复合材料的最大压应力显著高于 6061 铝合金材料, 碳纤维质量分数为 1 wt.%时复合材料的最大抗压应力最高。

项目基金

淮南市科技计划项目(2023A3113)。

参考文献

- [1] Podgornik, B., Kosec, T., Kocijan, A. and Donik, Č. (2015) Tribological Behaviour and Lubrication Performance of Hexagonal Boron Nitride (h-Bn) as a Replacement for Graphite in Aluminium Forming. *Tribology International*, **81**, 267-275. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.09.011>

-
- [2] Turan, M.E. and Aydin, F. (2020) Improved Elevated Temperature Mechanical Properties of Graphene-Reinforced Pure Aluminium Matrix Composites. *Materials Science and Technology*, **36**, 1092-1103. <https://doi.org/10.1080/02670836.2020.1753933>
- [3] Koli, D.K., Agnihotri, G. and Purohit, R. (2015) Advanced Aluminium Matrix Composites: The Critical Need of Automotive and Aerospace Engineering Fields. *Materials Today: Proceedings*, **2**, 3032-3041. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.290>
- [4] 樊建中, 桑吉梅, 石力开. 颗粒增强铝基复合材料的研制、应用与发展[J]. 材料导报, 2001, 15(10): 55-57, 49.
- [5] 乔文明, 李颖. 铝基复合材料的制备及应用[J]. 热加工工艺, 2013, 42(4): 126-128, 130.
- [6] Dokšanović, T., Džeba, I. and Markulak, D. (2017) Applications of Aluminium Alloys in Civil Engineering. *Tehnički Vjesnik*, **24**, 1609-1618.
- [7] Hu, H. and Zhang, S. (2024) Mechanical and Tribological Properties of Silicon Carbide/Carbon Fiber/Epoxy Resin Based Composites. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, **19**, 1-13. <https://doi.org/10.1177/15589250231214229>
- [8] 朱德智, 陈维平, 李元元, 等. 铝基复合材料的绝热剪切失效机理分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(S2): 56-59.
- [9] Ling, Z., Luo, L. and Dodd, B. (1994) Experimental Study on the Formation of Shear Bands and Effect of Microstructure in Al-2124/SiC_p Composites under Dynamic Compression. *Le Journal de Physique IV*, **04**, C8-453-C8-458. <https://doi.org/10.1051/jp4:1994870>