

平纹芳纶织物 / 环氧树脂复合材料抗冲击性能研究*

刘晓宇, 李 哲, 翟奋楼

(北京市计算中心, “互联网+”智能装备云服务技术北京市工程实验室, 北京 100094)

[摘要] 采用试验和数值的方法对 30 层芳纶织物复合材料的抗冲击性能进行了研究。首先对 30 层芳纶织物复合材料进行了子弹打靶冲击试验, 得到芳纶复合材料在子弹冲击下的鼓包、穿透、纤维断裂等信息; 其次, 建立复合材料冲击有限元模型, 并基于 Hashin 断裂准则模拟了织物在冲击载荷作用下的失效和断裂行为, 采用 Cohesive 单元模拟材料的变形和层间开裂失效, 得到了材料在冲击作用下的位移场、应变场、界面分层、纤维断裂以及子弹的冲击速度变化等信息。最后, 对试验测量和有限元分析结果进行对比, 分析了复合材料在冲击载荷作用下的能量吸收、能量耗散等抗冲击性能, 为材料的工程应用提供参考。

关键词: 芳纶织物复合材料; Hashin 准则; Cohesive 单元; 层间开裂; 断裂失效; 抗冲击性

Ballistic Performance of Aramid Fabric/Epoxy Resin Composite

LIU Xiaoyu, LI Zhe, ZHAI Fenlou

(Beijing Computing Center, Beijing Engineering Laboratory on Cloud Computing Service of Internet Plus Intelligent Equipment, Beijing 100094, China)

[ABSTRACT] Experimental and numerical method were employed to determine impact resistance of the 30 layer-aramid fabric composite. Firstly, the multi-layer fabric composite was fabricated and specimens were prepared according to the experiment requirement. Secondly, the bullet impact experiment was implemented to obtain mechanical performance of the composite, such as interface delaminate, fiber fracture. Thirdly, the FEM model was set up in Abaqus, and Hashin criterion and Cohesive element were adapted to simulate behavior of composite failure and interface delamination. The information of displacement, strain field, velocity of the bullet were obtained. Finally, FEM simulation result was compared with experiment result, ballistic performance of the composite under impact load was analyzed, which contributed to engineer application.

Keywords: Aramid fabric composite; Hashin criterion; Cohesive element; Delaminate; Failure and fracture; Impact resistance

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.07.089

芳纶纤维具有密度低、强度高、韧性好、耐高温、易于加工成型等优点, 广泛应用于军事和民生领域。芳纶织物复合材料作为轻型防护材料, 其在冲击载荷作用下的变形、损伤和断裂一直是该领域的研究热点。

目前对芳纶织物复合材料的研究集中在低速冲击条件下的力学响应和断裂损伤分析。魏伯荣等^[1]对芳纶复合材料在低速(2~5m/s)冲击条件下的抗穿透性能进行了试验研究; 王东宁等^[2]采用数值方法研究了弹丸冲击下单层芳纶织物复合材料的动态响应, 得到了单层织物的弹道极限速率; 史春旭等^[3-5]采用对含裂纹的碳纤维复合材料梁的冲击损伤与断裂行为进行了试验

研究, 得到了材料动态损伤断裂有关的载荷、位移以及裂纹尖端的应变演化历史等信息。

在复合材料低速冲击试验方面的研究, 采用的主要方法包括动态焦散线、数字相关 DIC 等力学测试技术, 如姚学锋等^[6-9]采用焦散线、电阻应变技术得到了落锤冲击条件下复合材料的变形、裂纹尖端应力强度因子与能量释放率等信息, 为复合材料非线性断裂机理的研究提供了方法。

本文以 30 层芳纶织物复合材料为研究对象, 通过多次弹道试验, 获得复合材料的极限速度以及子弹冲击后试样表面变形损伤、破口形貌、层间开裂等信息; 验证有限元分析模型的可靠性, 为芳纶织物复合材料的抗冲击性能评价、结构优化设计提供参考。

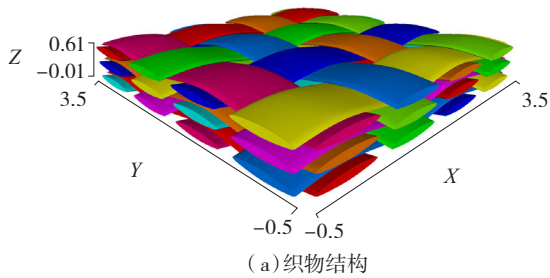
* 基金项目: 北京市科技计划项目(京冀汽车模具协同设计云服务平台建设)。

1 材料制备及冲击试验

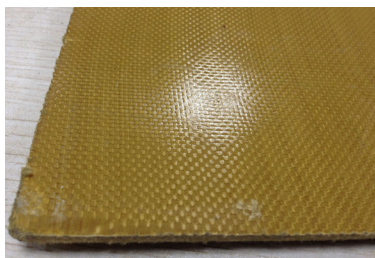
采用层压工艺制备芳纶织物复合材料,30层平纹织布在XY平面内沿Z向叠放,形成层状织物预制件,把预制件浸入环氧树脂胶体溶液中,经过热压、脱模等流程制备板状复合材料,如图1所示。芳纶复合材料制备中的芳纶织物采用的是 Kevlar 49 纤维,基体材料为环氧树脂,型号为 E51,压力为 1.3MPa,温度为 140℃。

依据《防弹材料及产品 v50 试验方法》开展芳纶织物复合材料冲击性能试验,弹道试验方案如图2所示。试样四周固定于图2所示的夹具中,试样有效尺寸为 400mm × 400mm,厚度为 5.99mm。发射弹体为 1.1g 柱状楔形破片,材料为 45 号钢,硬度为 30HRC,表面光滑无破损。发射弹体的冲击速度通过测速靶来测量,测速靶起始触发屏与枪口距离为 3m,两测速靶触发屏距离为 2m,测速两触发屏平行且垂直射击弹道。

根据弹道极限评定方法,开展了 10 次打靶试验,得到子弹穿透 30 层芳纶织物的临界速度 $\bar{v}=400\text{m/s}$ 。



(a) 织物结构



(b) 试样

图1 芳纶织物复合材料

Fig.1 Aramid textile composite

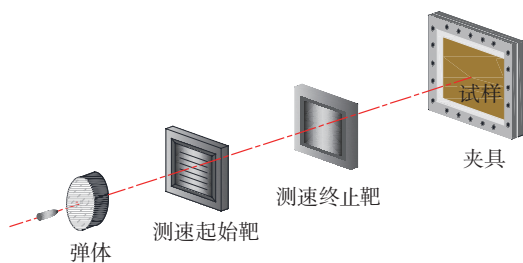


图2 弹道试验装置和试样夹紧装置示意图

Fig.2 Illustration of ballistic test experiment and clamping system

2 有限元分析模型

依据材料的制备方法及其冲击试验方法,在 Abaqus 中建立芳纶织物复合材料冲击分析有限元模型(图3)。

复合材料由 30 层芳纶织物和 29 层树脂构成,单层织物厚度为 0.19mm,织物层间为树脂层(界面层),厚度为 0.01mm,尺寸为 400mm × 400mm。

芳纶纤维为横观各向同性材料,平纹芳纶织物在 X、Y 两个方向具有相同的力学性能。在模型中假设单层芳纶织物为均质,采用 8 节点连续壳单元 SC8R 划分芳纶织物层网格,单层织物网格单元数 33866。

依据 Kevlar 49 纤维和基体材料的基本力学性能,织物材料参数设置如表 1^[10]所示,其中, E_1 、 E_2 、 E_3 分别为沿 x、y 和 z 方向的弹性模量, G_{12} 、 G_{13} 、 G_{23} 分别为各个正交方向的剪切模量, ν_{12} 、 ν_{13} 、 ν_{23} 则分别表示泊松比, ρ 为材料的密度。

采用 Hashin 准则模拟织物在冲击过程中的变形及损伤断裂过程,其表达式为:

$$F_{ft} = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^T}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\hat{\sigma}_{12}}{S^L}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

$$F_{fc} = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^C}\right)^2 = 1 \quad (2)$$

$$F_{mt} = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^T}\right)^2 + \left(\frac{\hat{\sigma}_{12}}{S^L}\right)^2 = 1 \quad (3)$$

$$F_{mc} = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{2S^T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y^C}{2S^T}\right)^2 - 1\right] \frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^C} + \left(\frac{\hat{\sigma}_{12}}{S^L}\right)^2 = 1 \quad (4)$$

F_{ft} 和 F_{fc} 分别表示纤维等效拉伸应力和压缩应力失效标志; F_{mt} 和 F_{mc} 则分别表示基体材料等效拉伸应力和压缩应力失效标志。 X^T 、 X^C 分别为纵向拉伸、压缩强度, Y^T 、 Y^C 分别为横向拉伸、压缩强度, S^L 、 S^T 分别为纵向、横向剪切强度, α 为剪切应力系数。 $\bar{\sigma}_{11}$ 、 $\bar{\sigma}_{12}$ 、 $\bar{\sigma}_{22}$ 分

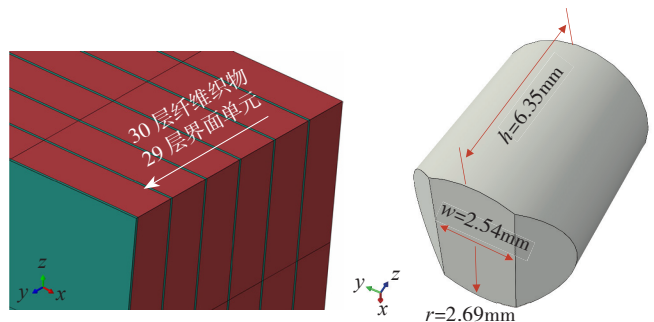


图3 有限元分析模型及材料结构

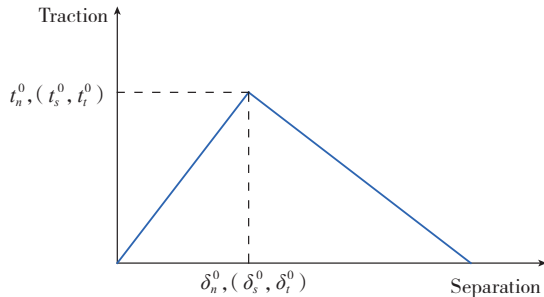
Fig.3 Structure of composite in FEM

表1 芳纶织物基本性能

$E_1 /$ GPa	$E_2 /$ GPa	$E_3 /$ GPa	$G_{12} /$ GPa	$G_{13} /$ GPa	$G_{23} /$ GPa	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	$\rho /$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
50	50	1	5.2	8.6	8.6	0.3	0.3	0.3	1.44

表2 Hashin失效准则中织物的强度参数 MPa

X^T	X^C	Y^T	Y^C	S^L	S^T
2000	240	2000	240	80	80

图4 典型的内聚力单元双线性Traction-Separation响应过程
Fig.4 Typical bi-linear Traction-Separation response

别为有效的应力分量。依据材料基本力学性能和相关文献,本文中织物3个方向的断裂强度及损伤演化参数设置如表2^[1,2,11]所示。

采用 Cohesive 单元模拟芳纶织物的层间开裂,每层界面单元数 33866。内聚力单元遵循 Traction-Separation 开裂准则,其双线性失效过程如图4所示。图4中, t_n, t_s, t_t 代表了3法向应力分量,相应的3个分离量为 $\delta_n, \delta_s, \delta_t$; 而 t_n^0, t_s^0, t_t^0 为名义应力临界值。

界面开裂采用二次应力失效准则,其表达式为:

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\langle t_t \rangle}{t_t^0} \right\}^2 = 1 \quad (5)$$

其中, t_n^0, t_s^0, t_t^0 分别为 50MPa, 30MPa 和 30MPa^[1]。采用断裂能来控制单元的退化,单位面积的断裂能为 $0.5N \cdot m$ 。模型中子弹为 3D 弹性变形体,单元类型为 C3D8R,杨氏模量 $E=210GPa$,泊松比 $\nu=0.3$,密度 $\rho=7.8g/cm^3$ 。

依据试验条件固定复合材料试样四周,子弹沿 Z 向打击试样中心,初始速度 $V=400m/s$,假设子弹在穿透材料过程中始终保持直线运动。相对于复合材料,子弹的刚度较大,因此子弹与织物的接触采用罚函数接触算法。在穿透过程中,子弹与织物间的摩擦系数 μ 设置为 0.1 ^[3]。

3 结果与讨论

通过有限元计算得到整个冲击过程中子弹的速度变化、不同织物层的断裂损伤及层间的开裂情况等信息。

图5给出了冲击过程中子弹的速度变化和动能变化曲线,在冲击过程中,由于纤维材料的变形断裂、界面分层以及弹体与材料间的摩擦作用,吸收了子弹的冲击能量,子弹速度总体在不断下降,由于二次回波的作用,子弹速度在小范围内波动。在计算结束时,子弹速度从初始的 $400m/s$ 降为 0 ,系统的动能从初始动能 $88J$ 降为

0 左右,与试验结果相吻合。

图6给出了弹道试验结束后试样表面状况。从材料表面可以看到子弹嵌入区域纤维完全断裂,断口较为整齐;从材料背面可以看到,子弹未能穿透,仅有部分表层纤维断裂,破口区域较小且不规整;同时,从表面层可以看到试样内部的分层开裂,由于夹具的限制和层间相互影响,分层区域呈放射状分布,尺寸约为 $35mm$ 。

图7给出了代表性的织物层(第7层 T_7 、第19层 T_{19} 、第29层 T_{29} 和第30层 T_{30})在冲击结束后的变形和应力分布,不同织物层的损伤破坏情况各不相同。在冲击过程中,材料表面最先受到子弹的冲击, $T_1 \sim T_6$ 层织物发生破坏;随着子弹速度下降, $T_7 \sim T_{19}$ 层织物弹孔周围部分纤维断裂;织物的断裂及界面的开裂吸收了大部分的冲击能量,材料中间层($T_{20} \sim T_{29}$ 层织物)发生较大变

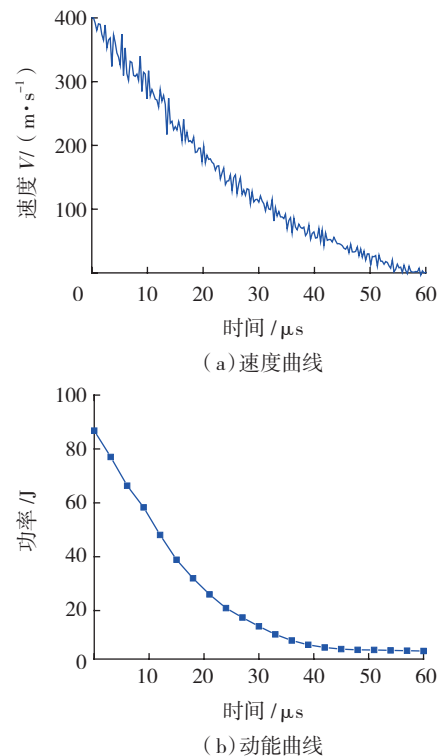
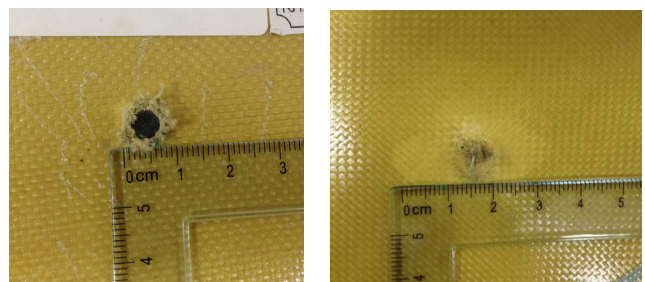


图5 冲击过程子弹速度变化及动能变化

Fig.5 Velocity and kinetic energy loss of the model in impact process



(a)正面 (b)背面

图6 冲击试验结束后的试样表面

Fig.6 Surface of the specimen after ballistic tests

形但未断裂；由于二次回波的作用，材料中靠近背面的纤维织物层发生断裂，第30层（即背面）织物部分断裂，弹孔较小。与材料表层相比，中间层的变形较大，背面织物层断裂破坏区域较大，与图6所反映的织物损伤破坏规律一致。

图8给出了第1层(R_1)、第11层(R_{11})、第27层(R_{27})、第28层(R_{28})的树脂层在冲击结束后的变形和应力分布。可以看到：最先接触子弹的界面层 R_1 开裂区域近似为圆形，尺寸为9mm左右；而越靠近试样背面，开裂面积越大，破坏区域的形状近似呈放射状，与试验测试结果图6吻合，不同界面层的开裂区域及开裂形状有较大差异。

4 结论

本文采用试验与有限元相结合的方法对30层芳

纶织物复合材料在冲击载荷作用下的变形、断裂、分层破坏的过程进行了研究。可以得到：

(1) 对于30层芳纶织物复合材料，子弹冲击速度为400m/s时(冲击能量为88J)，未能完全穿透材料。不同织物层的损伤破坏形式差别较大，表面和背面的织物层会发生断裂失效，中间织物层变形较大但未断裂，材料背面的位移约为6.65mm。

(2) 在子弹和织物的双重作用下，界面层的开裂形状和面积均不相同，靠近表面的界面层开裂区域较小，而靠近背面的界面层开裂区域较大，材料背面开裂形状与试验结果较为吻合。织物的变形断裂以及界面开裂吸收部分冲击能量。

(3) 采用基于Hashin准则和Cohesive单元的有限元方法能够较好地分析芳纶织物复合材料的抗冲击性能以及层间开裂情况，分析结果与试验结果吻合较好。

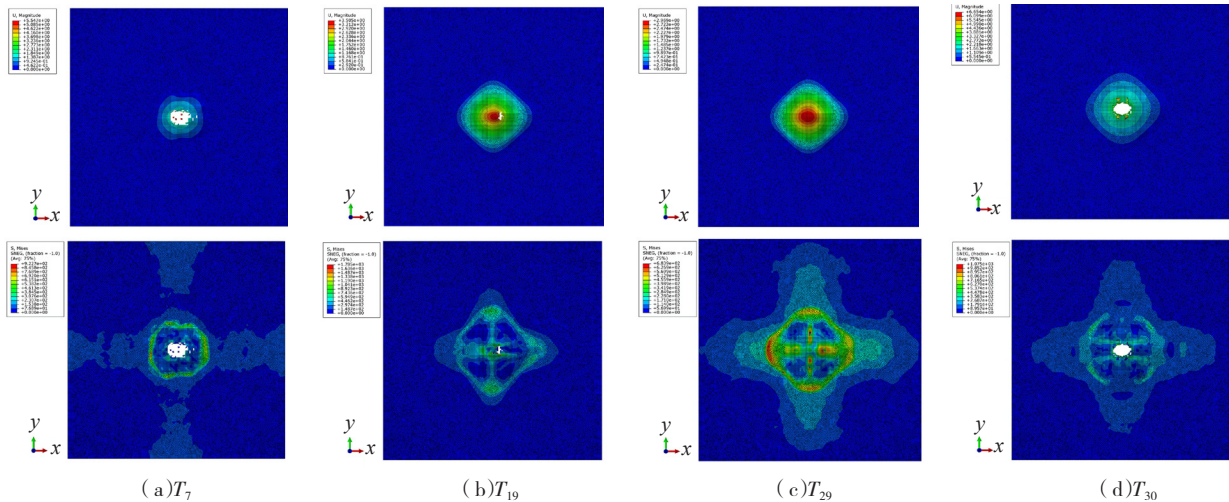


图7 冲击后不同织物层的变形及应力分布（区域尺寸为100mm×100mm）

Fig.7 Deformation, stress distribution and fracture of different textile after projectile impact

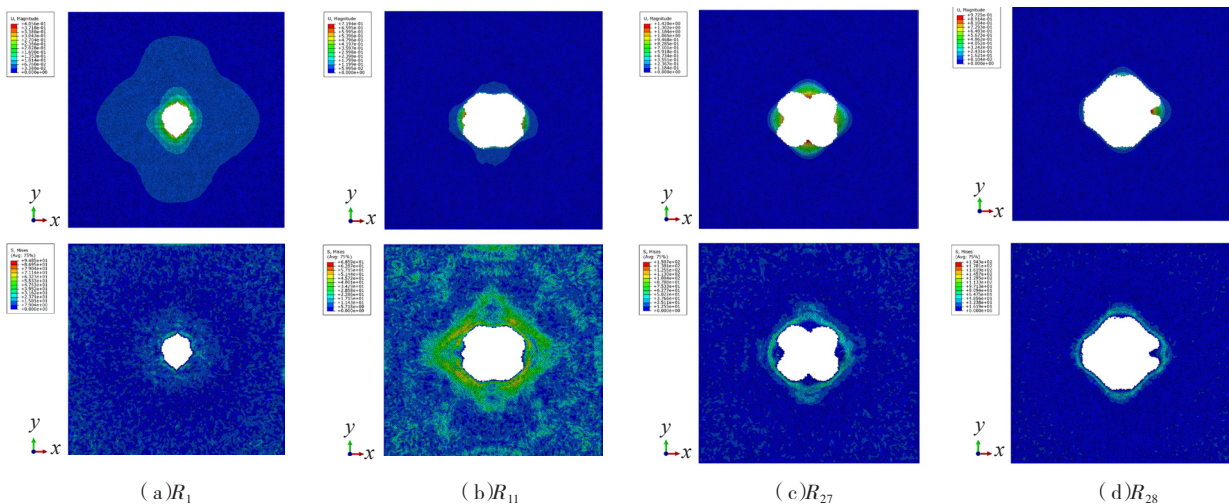


图8 冲击结束后不同界面层的变形及应力分布（区域尺寸为100mm×100mm）

Fig.8 Deformation, stress distribution and delamination of different interface after projectile impact （下转第101页）

的CMJ润滑参数是: 油量为60~80mL/h, 用水量为80~120mL/h。

参考文献

- [1] 张建华. 飞机结构战伤抢修[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- ZHANG Jianhua. Aircraft battle damage repair[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [2] 姚武文, 蔡开龙, 周平, 等. 飞机战斗损伤基本形式研究[J]. 新技术新工艺, 2012(4): 47-49.
- YAO Wuwen, CAI Kailong, ZHOU Ping, et al. Research on the basic mode of aircraft battle damage[J]. New Technology & New Process, 2012(4): 47-49.
- [3] BAKER A. Bonded repair of aircraft structures[M]. Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2012.
- [4] 李曙林, 侯满义, 刘加丛, 等. 飞机结构战伤评估与修理决策支持系统中模型库的构建[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2006, 7(2): 1-3.
- LI Shulin, HOU Manyi, LIU Jiacong, et al. Building of the model base in ASBDARDSS[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2006, 7(2): 1-3.
- [5] EZUGWU E O, BONNEY J, YAMANE Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 134(2): 233-253.
- [6] CANTERO J L, TARDÍO M M, CANTELI J A, et al. Dry drilling of alloy Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(11): 1246-1255.
- [7] RAHIM E A, SASAHARA H. A study of the effect of palm oil as MQL lubricant on high speed drilling of titanium alloys[J]. Tribology International, 2011, 44(3): 309-317.
- [8] HEINEMANN R, HINDUJA S, BARROW G, et al. Effect of MQL on the tool life of small twist drills in deep-hole drilling[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(1): 1-6.
- [9] 高昆, 齐乐华, 郁大照. 基于复合油雾喷射润滑的飞机钛合金蒙皮原位钻削技术研究[J]. 机械工程学报, 2005, 51(15): 198-204.
- GAO Kun, QI Lehua, YU Dazhao. Study on the in situ drilling technology used in titanium alloy thin-walled structure of plane base on combined mist-jet[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(15): 198-204.
- [10] 赵新泽, 徐开卓, 曾虎彪. 叶片式气动马达转速响应特性分析[J]. 起重运输机械, 2009(3): 53-56.
- ZHAO Xinze, XU Kaizhuo, ZENG Hubiao. The speed response characteristic analysis of vane type pneumatic motor[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2009(3): 53-56.
- [11] 王爱玲, 魏源迁, 祝锡晶, 等. 油膜水滴加工液的磨削性能[J]. 机械工程学报, 2005, 41(1): 208-211.
- WANG Ailing, WEI Yuanqian, ZHU Xijing, et al. Grinding performances of the machining fluids of oils on water[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(1): 208-211.

通讯作者: 高昆, 博士、讲师, 主要研究方向为航空修理、机械制造及其自动化, E-mail: gaokun5258@qq.com. (责编 铃兰)

(上接第92页)

参考文献

- [1] 魏伯荣, 蒋海滨, 金冰, 等. 芳纶复合材料抗锥体冲击特性研究[J]. 航空材料学报, 2001, 21(4): 42-45.
- WEI Borong, JIANG Haibin, JIN Bing, et al. Study on speciality of anti-circular cone impact for Kevlar composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2001, 21(4): 42-45.
- [2] 王东宁, 李嘉禄, 焦亚男. 平纹织物三维细观几何模型和织物防弹实验的有限元模拟[J]. 材料工程, 2013(9): 69-74.
- WANG Dongning, LI Jialu, JIAO Yanan. 3D Meso-geometrical model of plain weave fabric and finite element modeling under ballistic impact[J]. Journal of Materials Engineering, 2013(9): 69-74.
- [3] 史春旭, 段一平, 任家骏. 界面摩擦对KEVLAR织物吸收冲击能量能力的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(9): 57-63.
- SHI Chunxu, DUAN Yiping, REN Jiajun. Effect of interfacial friction on impact energy absorption capacity of kevlar fabric[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2015(9): 57-63.
- [4] 刘宁, 姚学锋, 陈俊达, 等. 编织复合材料的冲击损伤与断裂行为研究[J]. 实验力学, 2002, 17(2): 184-190.
- LIU Ning, YAO Xuefeng, CHEN Junda, et al. Research on the impact damage and fracture behavior of braided composites[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2002, 17(2): 184-190.
- [5] 姚学锋, 刘宁, 简龙辉. 编织复合材料的横向冲击力学行为研究[J]. 高科技纤维与应用, 2001, 26(5): 29-34.
- YAO Xuefeng, LIU Ning, JIAN Longhui. Bulletproof clothes and bulletproof compound materials[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2001, 26(5): 29-34.
- [6] 姚学锋, 林碧森, 张志勇, 等. 编织复合材料的裂纹损伤与增长行为研究[J]. 工程力学, 2002, 19(5): 118-122.
- YAO Xuefeng, LIN Bisen, ZHANG Zhiyong, et al. Crack damage and growth behavior of braided composite[J]. Engineering Mechanics, 2002, 19(5): 118-122.
- [7] CHEN L J, YAO X F, CEN S, et al. Normal impact behaviour of C/SiC rigid-felt titanium alloy three-layered plate[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2016, 39(3): 357-371.
- [8] YAO X F, XU W, JIN G C, et al. Low velocity impact study of laminate composites with mode I crack using dynamic optical caustics[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2004, 23(17): 1833-1844.
- [9] YAO X F, LIU N, XU W, et al. Dynamic deformation measurement of woven composite with edge cracks[J]. Advanced Engineering Materials, 2003, 5(4): 222-226.
- [10] 时起珍. Kevlar 织物在冲击条件下的数值仿真方法研究与应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- SHI Qizhen. Research and application on numerical simulation method of kevlar woven fabric subjected to impact[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [11] SAHU N P, KHANDE D K, PATEL G C. Study on aramid fibre and comparison with other composite materials[J]. International Journal for Innovative Research in Science & Technology, 2014, 1(7): 303-306.

通讯作者: 翟奋楼, 硕士、高级工程师, 研究方向为故障诊断, E-mail: zhailf@bce.ac.cn. (责编 铃兰)