

飞机钛合金蒙皮复合喷射润滑的气动钻削力试验研究^{*}黄登红¹,高 昆¹,黄浩然²,吕勤云¹,郁大照³

(1. 空军航空维修技术学院,长沙 410242;
2. 空军工程大学航空机务士官学校,信阳 464000;
3. 海军航空大学,烟台 264001)

[摘要] 为降低飞机钛合金蒙皮的止裂孔气动钻削轴向力,构建了气动钻削力试验测试系统,开展了钻削力正交试验和参数优选试验。试验表明,各因素对气动钻削轴向力从大到小的影响顺序为速度进给比值(v/f)、钻头形状和润滑条件。以材料为 W6Mo5Cr4V2Al 的 S 型钻头钻削 2mm 厚度钛合金 TC4 板材,可将马达切削转速调整至 445~865r/min 范围,并采用复合雾滴喷射润滑(CMJ),当润滑参数为雾化供气压力为 0.4MPa,用油量为 60~80mL/h,用水量为 80~120mL/h 时效果更佳。

关键词: 飞机结构修理;钛合金 TC4;气动钻削;钻削力;微量润滑

Study on Pneumatic Drilling Force Test of Compound Jet Lubrication Used in Titanium Alloy Thin-Walled Structure of Plane

HUANG Denghong¹, GAO Kun¹, HUANG Haoran², LÜ Qinyun¹, YU Dazhao³

(1. Airforce Aviation Repair Institute of Technology, Changsha 410242, China;
2. Aeronautical Service Sergeant School, Air Force Engineering University, Xinyang 464000, China;
3. Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

[ABSTRACT] In order to reduce the axial force of the pneumatic drilling on the aircraft titanium alloy skin crack hole, the pneumatic drilling force test system was constructed, and the orthogonal test and the parameter optimization test of drilling force were carried out. Experimental results show that the effect of the axial force on the pneumatic drilling is in the order of velocity feed ratio (v/f), drill bit shape and lubrication conditions. When the S-type drill of W6Mo5Cr4V2Al is used to drill the 2mm thickness titanium alloy TC4 sheet, the motor cutting speed can be adjusted to 445~865 r/min, and the composite droplet jet lubrication (CMJ) is used. The lubrication parameter is set to atomization gas pressure of 0.4MPa, oil consumption of 80~100mL/h, water consumption of 200~400mL/h better.

Keywords: Repair of aircraft structure; Titanium alloy TC4; Pneumatic drilling; Drilling force; Micro-lubrication

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.07.097

现代军机的蒙皮在飞行训练中承受交变载荷,而且战时常遭受打击,易产生疲劳裂纹和各种撕裂状破孔损伤^[1-2]。当损伤不超过容限时可采用气钻在裂纹末端钻直径 1.5~2mm 的止裂孔阻止裂纹扩展,否则就需再钻出直径 3~4mm 的铆钉孔进行铆接修复^[3-4]。随着钛合金在现代军机机体结构中的大量应用,给部队飞机结构修理带来困难:钛合金蒙皮钻削抗力大^[5],不仅使手工钻孔费时费力,还会引起钻孔质量差、钻头折断等现象。航空用钛合金 TC4 的轴向钻削力比 45 钢的大 62%^[6],

这是因为钛合金弹性模量低、回弹大,钻头主切削刃的前后刀面与切屑和已加工表面的挤压严重,且横刃的楔劈挤压也较为困难。另外,钻削排屑散热难、钛合金导热性差、切削区温度高,极易导致刀具过快磨损和加工表面冷作硬化^[5],进一步增大钻削力。研究表明,改变钻头形状和角度^[7]、合理选择切削用量^[6-7],并采用微量润滑^[7-9]可降低轴向钻削力。但是,在手工气动钻削止裂孔和铆钉孔时,由于钻头直径过小不易刃磨出合理形状,且气动马达的速度负载特性使切削转速难以稳定^[10],必然使气动钻削与机床条件下的钻削存在较大区别,而这方面的研究较少。因此,本文构建了气动钻削

^{*} 基金项目:国家自然科学基金项目(517489);军队装备维修科学研究与改革项目(WG2013HJ030002)。

试验系统,通过薄壁钛合金 TC4 气动钻削力正交试验,探寻了气动钻削力的影响因素,并进一步优选工艺参数,为提高飞机结构维修质量以及战伤抢修效率奠定了技术基础。

1 气动钻削力试验系统

如图 1 所示,气动钻削试验系统主要由本文开发的吸盘钻和复合雾滴喷射润滑(CMJ)^[11]箱以及切削力测试采集系统等所组成^[9]。钛合金蒙皮钻削工具——吸盘钻是钻削设备,吸盘钻的气动马达由空气压缩机提供的压缩空气驱动,转速通过调整进气流量调节;CMJ 发生器为润滑集成箱,用于将提供钻削过程的微量润滑,其所需气源来自于冷气瓶供气。

1.1 钻削力测试采集子系统

轴向钻削力采集子系统包括测力仪(Kistler 9272)、信号放大器(Kistler 5019)、采集仪(HIOKI, 8860-50)和数据处理计算机。Kistler 9272 测力仪采用压电晶体传感器,可同时测量 3 个方向的切削力,其中,Z 轴方向灵敏度为 3.7pC/Ncm。Kistler 5019 信号放大器可将测力仪输出的毫伏级信号放大、转换成标准电压信号,并输入到采集仪中。HIOKI 8860-50 数据采集仪为 5 个模拟通道 +5 个逻辑通道,精度为量程的 1%,可实时观察和记录试验数据,计算机用于将采集的试验数据进行图形处理。转速值测量采用特安斯 TASI-8740 手持非接触转速计。

1.2 试验器材

试验材料为航空用钛合金 TC4,其室温力学性能如表 1 所示^[5],厚度为 2mm,裁剪为 60mm × 60mm。试验钻头材料为 W6Mo5Cr4V2Al,直径为 φ 3mm,根据横刃形状可分为标准的 HHS 型、S 型和短横刃 3 种,如图 2 所示。

1.3 试验参数

由于本文试验中气动马达转速 n 大小决定于切削负载^[10],而且手工钻削操作的进给量 f 不能始终恒定,使得切削用量难以稳定,干扰了试验精度。为此,结合气动马达的工作特点如图 3 所示,本文控制和获得进给量 f 可依据公式(1)确定。

$$f = \frac{(L_1 + L_2) \times 60}{t \times n} \quad (1)$$

式中, f 为钻削进给量,mm/r; t 为钻头接触致完全钻出的时间,s; n 为钻头实际工作转速,r/min; L_1 为钻头主切削刃垂直高度,mm; L_2 为钛合金板材厚度,此处为 2mm。

由公式(1)可知,只要在钻削中采用非接触转速计测量出实际工作转速 n ,用秒表测量钻头钻削时间 t ,即

可获得进给量。本文采用保持钻削进给时间 t 恒定(即控制在 4~5s 内),通过调节马达进气量改变转速 n 的方法获得需要的每转进给量 f 。

润滑方式分别为无润滑的干切削、MQL(关闭供水回路)和 CMJ 润滑。润滑时,喷嘴轴线与主轴之间夹角为 45°,距离为 20mm,润滑油为不含任何极压添加剂的 20 号切削油,切削和润滑参数如表 2 所示。

1.4 试验方法

首先开展轴向钻削力的正交试验,确定影响因素排序;再以轴向钻削力评价标准进行单因素对比试验,优

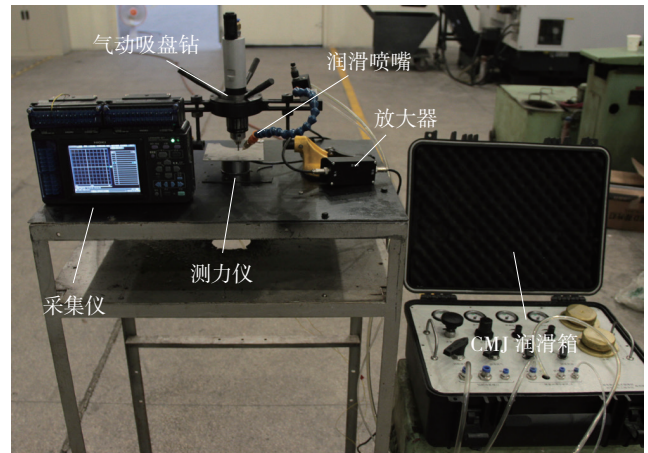


图1 钻削试验系统
Fig.1 Drilling test system

表1 试验用Ti6Al4V(TC4)的力学性能

屈服强度 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ /%	面缩率 Ψ /%	硬度 HBS
875	965	14	45	320~360

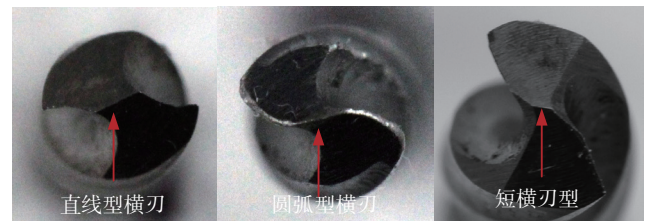


图2 试验用3种钻头
Fig.2 Three kinds of drill for testing

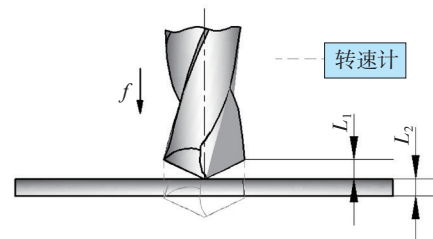


图3 进给量 f 控制和计算方法示意图
Fig.3 f control and calculation method

选薄壁钛合金钻削、润滑等参数,以期降低钛合金蒙皮止裂孔钻削抗力,提高维修效率。

2 钻削力正交试验

2.1 挑选因素确定水平设计表头

当钻孔直径一定的情况下,进给量 f 对钻削轴向力的影响最大,减少进给量 f 可有效降低钻削轴向力。然而,在使用气动马达钻削时,钻削力减少后马达转速 n 就会升高,进而导致每转进给量也相应减少,鉴于此,在气动钻削时,应研究切削速度和进给量综合影响情况。本文结合机床条件下的钻削力工艺手册及研究文献,挑选出速度进给比值(v/f)、钻头形状和钻削润滑条件等作为主要考察因素,各因素的水平也结合上述试验数据确定。采用 $L_{18}(2 \times 3^7)$ 方案,表头设计如表3所示。每次试验用一根新钻头连续钻削10个孔,所记录的轴向力取10次平均值。

2.2 试验结果

正交试验结果如表4所示,对轴向钻削力大小的影响主次顺序确定可以通过极差计算确定。影响钻削轴向力的因素主次顺序为钻削速度进给比值 v/f 、钻头形状、润滑条件。能获得最小钻削轴向力的最优方案转速为 800r/min ,进给在 $4\sim 5\text{s}$,采用S型横刃的钻头,CMJ润滑的用量 60mL/h ,用水量为 120mL/h ,即油水比值为 $1:2$ 。

2.3 试验与计算结果分析

v/f 比值最大的原因是进给量 f 的影响,这是因为钻削轴向力与单位时间的进给方向剪切做功量大小直接

表2 钻削试验的润滑和切削参数

试验	参数
CMJ 润滑	雾化气压: 0.4MPa ; 供油量: 40mL/h , 60mL/h , 80mL/h , 100mL/h , 120mL/h ; 供水量: $80\sim 240\text{mL/h}$
MQL 润滑	雾化气压: 0.4MPa ; 供油量: 40mL/h , 60mL/h , 80mL/h , 100mL/h , 120mL/h
转速 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	300, 400, 600, 800
速度 / ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	2.9, 4.2, 5.7, 8.2
进给量 / ($\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$)	0.04, 0.06, 0.09, 0.12

表3 钻头钻削力试验的因素水平表

水平	速度进给比值 $v/f(A)$	润滑条件(B)	钻头形状(C)
1	66 (0.086mm/r, 5.7m/min)	MQL, 油 60mL/h	S 型
2	137 (0.060mm/r, 8.2m/min)	CMJ, 油 60mL/h, 水 120mL/h	HHS 型
3	—	CMJ, 油 60mL/h, 水 240mL/h	短横刃型

表4 正交试验方案及计算结果

序号	速度进给比值 $v/f(A)$	润滑条件(B)	钻头形状(C)	钻削力 F/N
1	1	1	1	320
2	1	1	2	530
3	1	1	3	639
4	1	2	1	320
5	1	2	2	460
6	1	2	3	520
7	1	3	1	326
8	1	3	2	240
9	1	3	3	383
10	2	1	1	223
11	2	1	2	283
12	2	1	3	254
13	2	2	1	223
14	2	2	2	296
15	2	2	3	211
16	2	3	1	204
17	2	3	2	420
18	2	3	3	366
K_1	3738	2249	1616	—
K_2	2480	2030	2229	—
K_3	—	1939	2373	—
k_1	415.6	374.8	269.3	—
k_2	275.6	338.3	371.5	—
k_3	—	323.2	395.5	—
极差 R	1258	310	757	—
因素主次	$A-C-B$			
优选方案	A_2, C_1, B_3			

注: $K_1\sim K_3$ 为同一水平下对应试验结果之和; $k_1\sim k_3$ 为同一水平下对应试验结果之和的平均值。

关联,即在 v/f 不超过137时,减少 f 可大幅度减少剪切变形量从而减少轴向钻削力;钻头形状处于第2影响位置,这是因为来自横刃所引起的钻削轴向力占整个力的50%左右,横刃形状和角度不同能够改变楔劈挤压力从而降低轴向钻削力;CMJ润滑参数变化对切削力的影响最小,这是因为CMJ的润滑冷却作用较好,已经有效抑制了切削区的温度升高以及钛合金切削加工中的冷作硬化,减少了热因素对钻削力的影响,反而使其参数的变化不再敏感。从最佳用油、水比例为 $1:2$ 的CMJ与MQL用量具体数值比较差距不强烈看,CMJ的用量还有下降空间,CMJ具体参数应结合实际钻孔直径、钛合

金厚度需要进行适当调整,才能发挥出更佳效果。

3 工艺参数优选

3.1 马达转速优选

在固定进给量 $f=52\text{mm}/\text{min}$,通过进气路节流调速改变马达转速值进行钻孔试验,以考察直径为 3mm 的 S 型钻头的钻削力变化情况,见表 5。

试验结果如图 4 所示,可发现随着 v/f 的比值增大,钻削轴向力在下降,但在转速 $n=1230\text{r}/\text{min}$ 、 $v/f=276$ 后,钻削轴向力反而上升。这说明尽管切削速度对钻削力的影响不大,但是钻削速度较高而进给量过小时,如果不能抑制钻削区的切削温度上升,易使钛合金孔底出现较为明显的冷作硬化^[6],增大了材料硬度,反而会导致钻削轴向力上升。因此,采用气钻在飞机钛合金蒙皮表面钻孔时,应施加适当的垂直进给力以保持一定进给量,避免孔底出现冷作硬化增加钻削难度。结合图 4 可知,采用直径为 $\phi 3\text{mm}$ 的 S 型钻头干切削时,钻头转速应在 $445\sim 865\text{r}/\text{min}$ 之间,进给量参照 v/f 比值不应超过 137 进行选取。

3.2 微润滑参数优选

图 5 (a) 为相同润滑油使用量的 MQL 与 CMJ 润滑的切削力对比情况,随着用油量增加,轴向钻削力逐渐减少,但 CMJ 润滑的切削力始终比 MQL 的要小 24% 左右,到 $80\text{mL}/\text{h}$ 附近后,切削力变化不再显著。根据 CMJ 冷却润滑作用机理^[9,11],表明了复合雾滴的渗透性

表5 钻削速度和进给量综合因素的试验参数

序号	$n(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})/$ $v(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	$f_{\text{分}}(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})/$ $f_{\text{转}}(\text{mm}\cdot\text{r}^{-1})$	v/f
1	308/2.9	52/0.169	17
2	445/4.2	52/0.117	38
3	605/5.7	52/0.086	66
4	865/8.2	52/0.060	137
5	1230/11.59	52/0.042	276
6	1750/16.49	52/0.030	550

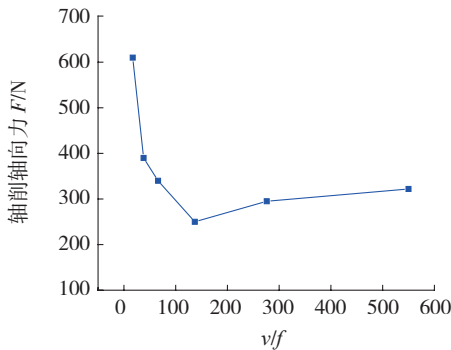


图4 v/f 对钻削轴向力的影响

Fig.4 Effect of v/f on axial force of drilling

与 MQL 液滴好,使钻孔的润滑状况得到了改善。同时,其优良的冷却效果保持了主切削刃的切削性能,缓解孔底表面的冷作硬化程度,进而降低轴向钻削力。图 5(b) 为用油量 $80\text{mL}/\text{h}$ 时,用水量对轴向钻削力的影响。当用水量超过 $120\text{mL}/\text{h}$ 后钻削力减少不明显,这说明在此用水量下已能充分抑制钛合金冷作硬化的程度。

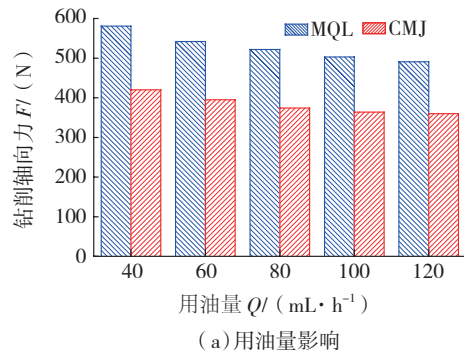
结合图 5,仅考虑钻削力的影响因素可知:在 2mm 厚度的钛合金板材上钻削直径 $\phi 3\text{mm}$ 孔时,CMJ 较为合适的润滑参数为:用油量为 $60\sim 80\text{mL}/\text{h}$,用水量为 $80\sim 120\text{mL}/\text{h}$ 。与文献 [7] 相比,数据偏高的原因可能是由于钻孔直径较小和钻削运动气流场等导致雾滴飞散所造成的。实际应用时,可在这一范围内结合蒙皮厚度、钻孔直径和切削区附近设备灵活选取。

4 结论

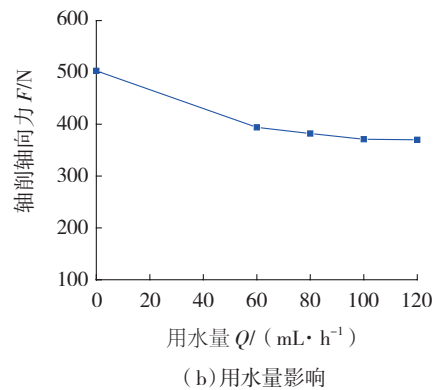
(1) 建立的气动钻削力试验测试系统,具有结构简单、容易获得准确试验参数等优点,可满足气动钻削试验要求。

(2) 钛合金 TC4 钻削时,对轴向钻削力影响从大到小的顺序为:速度进给比值 v/f 、钻头形状、润滑条件。其中 v/f 比值最大的原因是进给量 f 的影响。

(3) 采用材料为 W6Mo5Cr4V2Al 的 S 型钻头钻削 2mm 厚度的钛合金 TC4 板材,可将马达切削转速调整至 $445\sim 865\text{r}/\text{min}$ 。在雾化供气压力为 0.4MPa 时,较佳



(a) 用油量影响



(b) 用水量影响

图5 润滑参数对轴向钻削力影响

Fig.5 Influence of lubrication parameters on axial drilling force

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: zhaifl@bce.ac.cn. (责编 铃兰)