

DOI: 10.7652/xjtuxb201512018

碳纤维复合材料丝束带剪断状态快速检测方法

陶祎春, 贾书海, 段玉岗, 张小辉, 陈花玲

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为解决在狭小空间内无法准确有效识别碳纤维丝束带剪断状态的问题,提出了一种基于电信号的碳纤维丝束带剪断状态的检测方法,并设计了相应的剪断状态监测硬件及软件系统。该检测方法首先通过简单的检测电路以及数据采集卡,实现对碳纤维丝束带剪断过程中的电信号实时采集,然后对采集得到的信号进行低通滤波处理,获取电压信号的峰值,将峰值与设定的检测阈值相比较,可以有效识别出碳纤维丝束带的剪断情况。实验结果表明,在进行剪断操作时,未完全剪断的碳纤维丝束带电阻为 $10 \sim 500 \Omega$,而完全剪断的丝束带电阻为无穷大,将丝束带与检测电路连接,电阻的变化即可反映到两电极间的电压变化。实验中,完全剪断时,丝束带两端电压从 0 V 大幅跃升到 $4.377\ 03 \text{ V}$,大于设定的阈值,而未完全剪断时,丝束带两端电压从 0 V 小幅跃升到 $0.067\ 97 \text{ V}$,小于设定的阈值 1 V ,均可有效识别剪断状态,证明该方法检测结果较为准确。该方法可以在铺丝头内部的狭小空间进行检测,同时能够快速识别出碳纤维丝束带的剪断状态。

关键词: 复合材料;纤维铺放;剪断检测;信号处理

中图分类号: TN911.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)12-0112-05

Rapid Cut State Detection for Carbon Fiber Composite Tow

TAO Yichun, JIA Shuhai, DUAN Yugang, ZHANG Xiaohui, CHEN Hualing

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: It is difficult to identify the cut state of fiber tow in a small space. A rapid cut state detection strategy for carbon fiber composite tow is proposed following the electrical signal measurement, and the corresponding cut state detection system is constructed. The electrical signals generating during the process of cutting are collected by a simple circuit and DAQ card, then filtered by low-pass filter to obtain the peak value of the signal. The peak value is compared with the rated threshold of 1 V to identify whether the fiber tow is completely cut off or not. In the experiment, the resistance of fiber tow which is not completely cut off gets 10 to 500Ω , while the resistance of fiber tow which is completely cut off reaches infinity. Connecting the fiber tow with the electrodes in the circuit, the changed resistance value directly affects the voltage value between both electrodes. When the fiber tow is completely cut off, the voltage increases from 0 to $4.377\ 03 \text{ V}$, higher than the threshold. When the fiber tow is not completely cut off, the voltage increases from 0 to $0.067\ 97 \text{ V}$, lower than the threshold. Both of the cut states can be identified effectively and quickly. This detection can be realized in a very small space, even inside the AFP robot head.

Keywords: composite material; fiber placement; cutting detection; signal processing

收稿日期: 2015-05-06。 作者简介: 陶祎春(1991—),男,硕士生;贾书海(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2014ZX04001091);陕西省工业攻关计划资助项目(2014K07-02)。

网络出版时间: 2015-09-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150913.1827.008.html>

碳纤维复合材料具有轻质、高强度、抗疲劳、耐腐蚀、导电导热以及膨胀系数小等一系列优点,广泛应用于航空航天制造领域^[1]。随着复合材料使用的日益广泛,出现了多种高效率低成本的制造方法,如纤维铺放成型技术(FP)、树脂传递塑模技术(RTM)、自动缠绕技术等^[2-7]。其中,自动纤维丝束铺放技术(AFP)是一种最重要的先进树脂基复合材料自动化成型技术,具有自动化程度高、能成型形状复杂的曲面结构件等优势,应用广泛^[8]。其简要制作过程是将复合纤维丝束带一层一层地铺放在芯模表面,经过若干层的铺放,构件达到一定厚度,再经过热压处理即可得到复合材料零件^[9],Electro Impact、Ingersoll、MAG Cincinnati 等公司已经制造出自动纤维铺放机床^[10-11]。但是,目前国内针对自动铺丝机的研究尚处于起步阶段,主要的研究方向集中在铺放工艺以及机床结构设计方面,如南京航空航天大学 and 哈尔滨工业大学已经建立了试验用的自动纤维铺放的原型机^[12-14],而针对铺丝过程检测的研究还不够充分。

在碳纤维丝束带铺放过程中,每一个铺放行程完成后或者在丝束铺放过程中出现问题时,都需要对碳纤维丝束带进行剪断操作,然后才能开始下一个行程的铺放。随着在碳纤维丝束带铺放过程中剪断刀具磨损的增加,以及在剪断过程中纤维丝束带状态、位置等因素的随机波动,都可能造成碳纤维丝束带剪断不彻底的情况(类似于藕断丝连),这样会使铺丝机的铺丝头强行拉断残余的碳纤维丝束,从而导致设备故障,甚至不得不打开铺丝头,停机进行维护,严重影响铺放效率和质量。因此,碳纤维丝束带的剪断检测对铺放成型设备的正常运行至关重要,需要在每次执行剪断操作时同步进行剪断检测,如若发现剪断不彻底的情况,则需要再次驱动剪断机构对丝束带进行剪切。在碳纤维丝束带剪断过程中,需要同时剪断 1~2 万条碳纤维丝,而操作结束后没有剪断的碳纤维丝往往只有几根(甚至只有一根),直径只有数微米,采用计算机视觉或光探测等常规检测的方法很难发现没有被完全剪断的碳纤维丝。同时,在铺丝头的内部,其结构空间十分狭小,尺寸稍大的探测设备均无法应用。因此,需要针对碳纤维丝束带的剪断状态检测开发出一种新的方法。

为了解决极细的碳纤维无法被识别的情况,本文提出了一种通过电信号检测碳纤维剪断状态的方法。由于碳纤维丝束带具有良好的导电性,可以在丝束带两端的导轮处连接检测电路,通过测量待剪

断丝束带间的电压幅值变化,从而识别碳纤维丝束带是否完全剪断。

1 丝束带剪断状态检测方法

1.1 检测装置设计

在执行剪断操作之前,需要将两个带电导轮的导轮与待剪断碳纤维丝束带相接触,将其两端压紧,然后执行剪断操作,剪断刀具位于两个导轮之间,剪断检测的装置中包括检测电路以及数据采集卡,检测装置的简图如图 1 所示。在执行剪断检测的过程中,只需要将连接检测电路以及数据采集卡的导线接入铺丝头结构,就可以实现在狭小空间内的检测。

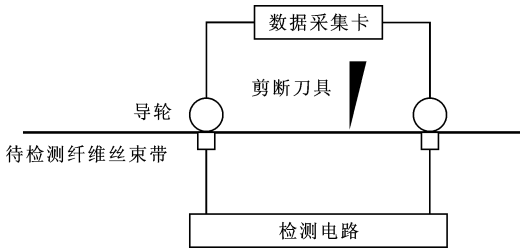


图 1 检测装置原理图

1.2 检测电路设计

碳纤维丝束带可以等效为一个可变电阻 R ,通过实验测量,当丝束带完整连接时,每 200 mm 长度的电阻值约为 $10\ \Omega$,当丝束带仅剩一丝连接时,其电阻变为 $500\ \Omega$ 。进行剪断操作时,首先通过导轮压紧碳纤维丝束带,将两端固定,然后驱动剪断刀具进行剪断操作。在剪断过程中将两导轮作为电极,将丝束带与检测电路相连,检测电路包括 1 个 12 V 稳压电源、3 个分压电阻以及 2 个限流电阻,分压电阻以及分流电阻的作用是降低可能产生在铺丝头结构中的电压电流,具体的检测电路如图 2 所示。通过数据采集卡获取碳纤维丝束带两端的电压值,从而判断碳纤维丝束带是否完全剪断。

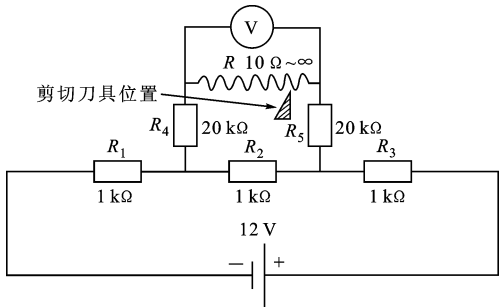


图 2 碳纤维丝束带剪断检测电路

碳纤维丝束带可以等效为 $10\ \Omega$ 到无穷大的可变电阻 R ,两端的电压 U_c 与电流 I_c 为

$$U_C = RR_2U/(R(R_1 + R_2 + R_3) + R_2(R_1 + R_3) + (R_4 + R_5)(R_1 + R_2 + R_3)) \quad (1)$$

$$I_C = R_2U/(R(R_1 + R_2 + R_3) + R_2(R_1 + R_3) + (R_4 + R_5)(R_1 + R_2 + R_3)) \quad (2)$$

在图1电路中,3个分压电阻均为1 k Ω ,2个限流电阻为20 k Ω ,代入 $R_1 \sim R_5$,当碳纤维丝束带电阻 R 在10~500 Ω 变化时,其两端的理论电压 U_C 以及电流 I_C 变化如图3所示。

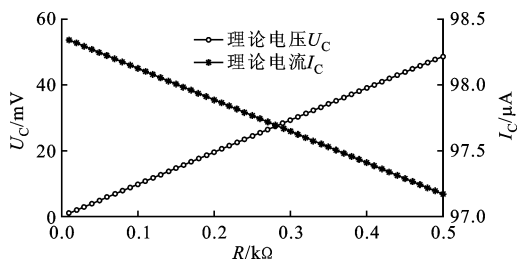


图3 碳纤维丝束带电压、电流与电阻的理论关系

在图3中,当电阻 R 在10~500 Ω 范围内变化时,其两端电压逐渐增加,通过的电流逐渐减小。当碳纤维丝束带完全连接时,其两端电压为0.9834 mV,通过碳纤维丝束带的电流为98.34 μ A;当丝束带仅剩一丝连接时,其电阻为500 Ω ,其两端电压为48.58 mV,通过碳纤维丝束带的电流为97.17 μ A;当碳纤维丝束带完全剪断时,其等效电阻为无穷大,根据式(1)、式(2)可得其两端电压为4 V,相对于48.58 mV的电压有明显增加,通过碳纤维丝束带的电流为0 A。无论碳纤维丝束带通断,电路中的电流都很小,因此不会对铺丝头产生不良影响。

2 电压信号的采集与处理

2.1 电压信号的采集

在铺丝头进行剪断操作期间,通过数据采集卡采集待剪断碳纤维丝束带两端电压信号,设置采样数为1 000,采集时间为1 s。当碳纤维丝束带完全被剪断时,采集得到的信号如图4所示,当碳纤维丝束带未被完全剪断,仅剩一丝连接时,采集得到的信号如图5所示。

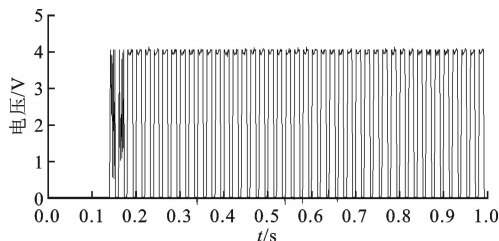


图4 完全剪断时数采卡采集的电压信号

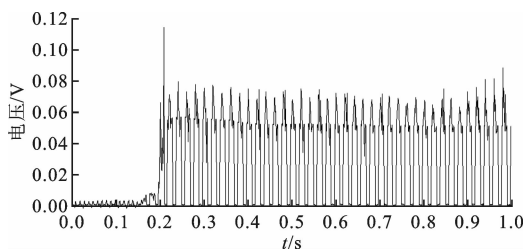


图5 未完全剪断仅剩一丝时数采卡采集的电压信号

2.2 电压信号的处理

当碳纤维丝束带完全剪断时,获得的信号如图4所示。从采集的信号中可以看出,在大约0.14 s时进行剪断操作,此时碳纤维丝束带两端电压有一个明显的跃升,此后两端电压幅值保持在4 V不变。当碳纤维丝束带未被完全剪断时,获得的信号如图5所示,在大约0.2 s时进行剪断操作,此时碳纤维丝束带两端电压有小幅变化,与完全剪断时的幅值相比,其幅值的变化很小。

为了识别出碳纤维丝束带是否被完全剪断,需要分析采集到的电压信号幅值,但是在图4和图5中,获取的信号中会存在一些干扰的噪声,因此需要对信号进行去噪处理。首先分析两个电信号的傅里叶变换FFT频谱,如图6和图7所示,从频谱中可以发现,电压信号的峰值频率为0、50 Hz 以及其倍频100、150和200 Hz,主要的信号为0 Hz的直流信号以及50 Hz的交流信号。为了滤除噪声的干扰,可以对电压信号进行低通滤波,其截止频率设置为60 Hz,然后测量滤波后信号的幅值,由于测量中

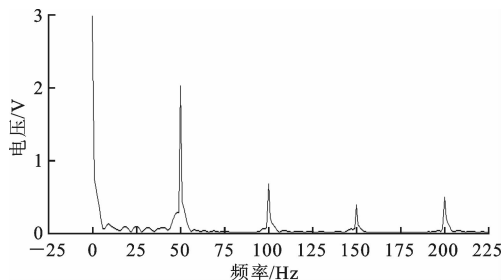


图6 完全剪断时获取信号的FFT频谱

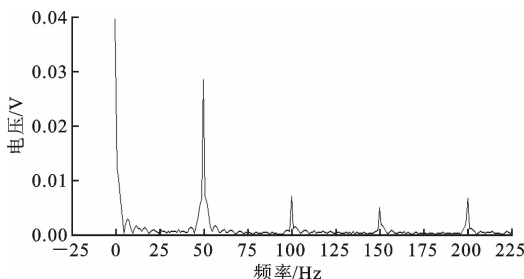


图7 未完全剪断时获取信号的FFT频谱

会存在一些干扰和误差等不确定因素,因此设置判断电压阈值为 1 V,即当测量电压大于 1 V 时认为碳纤维丝束带被完全剪断。

当丝速带完全剪断时,采集的电压信号经过低通滤波后得到的结果如图 8 所示,丝束带未完全剪断的处理结果如图 9 所示。在图 8 的情况中,采集得到的电压为 4.377 V,大于设置的阈值 1 V,认定此时丝束带完全剪断,与实际情况相符。在图 9 的情况中,采集得到的电压为 0.067 97 V,小于设置的阈值 1 V,认定此时丝束带未被完全剪断,与实际情况相符,此时丝束带未剪断部分为 0.2 mm。

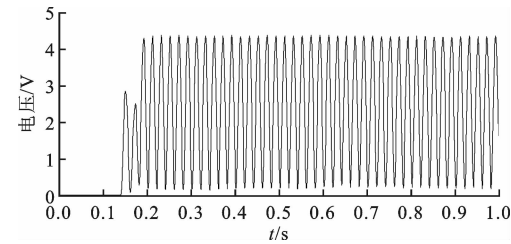


图 8 完全剪断时低通滤波后的信号

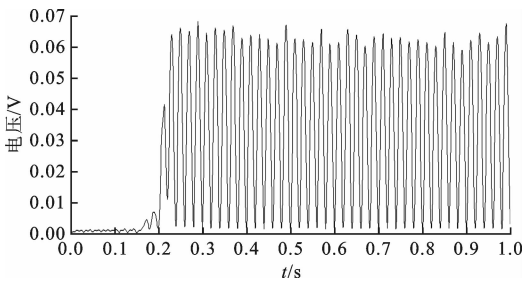


图 9 未完全剪断时低通滤波后的信号

3 检测结果校核

为了验证碳纤维丝束带剪断检测方法的准确性,需要对该方法的检测结果进行校核。对 10 条丝束带分别进行剪断操作,使其分别剩余 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5 和 7.0 mm(完整丝束带),在剪断过程中测量电压信号的峰值。测量剪断后碳纤维丝束带电阻,将其代入式(1)计算对应的理论电压,测量结果如表 1 和图 10 所示。

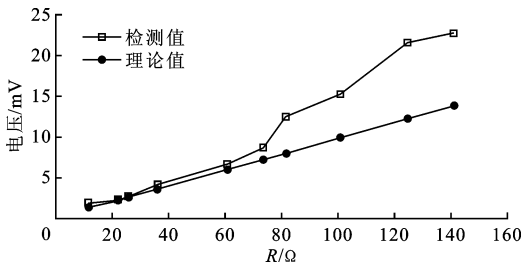


图 10 检测结果与理论结果对比

表 1 丝束带剩余量与电阻对比表

丝束带剩 余量/mm	电阻/ Ω	检测电 压/mV	理论电 压/mV
0.5	140.98	22.742	13.819
1.0	124.68	21.548	12.226
1.5	100.86	15.248	9.896
2.0	81.48	12.516	7.998
2.5	73.52	8.648	7.218
3.0	60.88	6.656	5.979
3.5	36.22	4.164	3.559
4.0	25.54	2.572	2.511
4.5	22.02	2.294	2.165
7.0	11.48	1.852	1.129

从对比结果可以看出,当丝束带剪断剩余量较少时,误差较大,但最大绝对误差仍小于 10 mV,说明检测结果较为准确。

4 结 论

本文为解决极细的纤维丝束无法准确识别是否完全剪断的问题,提出了一种基于电信号检测的方法。根据碳纤维丝束带具有良好的导电特性,在执行剪断操作过程中,采集、识别碳纤维丝束带两端的电压信号,进而可以判断碳纤维丝束带是否被完全剪断,这种电信号检测方法可以实现在狭小空间内的精确测量,具有简单可靠的优点。实验结果表明,本文方法能快速有效地识别出碳纤维丝束带的剪断情况,可以很好地满足实际工程应用需要。

参考文献:

[1] PARLEVLIT P P, BERSEE H E N, BEUKERS A. Residual stresses in thermoplastic composites; a study of the literature: part I Formation of residual stresses [J]. Composites; Part A Applied Science and Manufacturing, 2006, 37(11): 1847-1857.

[2] LAMONTIA M A, FUNCK S B, GRUBER M B, et al. Manufacturing flat and cylindrical laminates and built up structure using automated thermoplastic tape laying, fiber placement, and filament winding [J]. SAMPE Journal, 2003, 39(2): 30-43.

[3] TAYLORSVILLE U T. Filament winding vs. fiber placement manufacturing technologies [J]. SAMPE Journal, 2008, 44(2): 54.

[4] AMICO S, LEKAKOU C. An experimental study of the permeability and capillary pressure in resin-transfer

- moulding [J]. *Composites Science and Technology*, 2001, 61(13): 1945-1959.
- [5] LAWRENCE J M, HSIAO K T, DON R C, et al. An approach to couple mold design and on-line control to manufacture complex composite parts by resin transfer molding [J]. *Composites: Part A Applied Science and Manufacturing*, 2002, 33(7): 981-990.
- [6] ABDALLA F H, MUTASHER S A, KHALID Y A, et al. Design and fabrication of low cost filament winding machine [J]. *Materials & Design*, 2007, 28(1): 234-239.
- [7] COHEN D. Influence of filament winding parameters on composite vessel quality and strength [J]. *Composites: Part A Applied Science and Manufacturing*, 1997, 28(12): 1035-1047.
- [8] AIZED T, SHIRINZADEH B. Robotic fiber placement process analysis and optimization using response surface method [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 55(1/2/3/4): 393-404.
- [9] KHAN S. Thermal control system design for automated fiber placement process [D]. Quebec, Canada: Concordia University Montreal, 2011.
- [10] MARSH G. Automating aerospace composites production with fibre placement [J]. *Reinforced Plastics*, 2011, 55(3): 32-37.
- [11] SHIRINZADEH B, ALICI G, FOONG C W, et al. Fabrication process of open surfaces by robotic fibre placement [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2004, 20(1): 17-28.
- [12] 肖军, 李勇, 文立伟, 等. 树脂基复合材料自动铺放技术进展 [J]. *中国材料进展*, 2009(6): 28-32.
- XIAO Jun, LI Yong, WEN Liwei, et al. Process of automated placement technology for polymer composites [J]. *Materials China*, 2009(6): 28-32.
- [13] 李勇, 肖军. 复合材料纤维铺放技术及其应用 [J]. *纤维复合材料*, 2002(3): 39-41.
- LI Yong, XIAO Jun. The technology and application of fiber placement [J]. *Fiber Composites*, 2002(3): 39-41.
- [14] 邵忠喜. 纤维铺放装置及其铺放关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- 方文振, 粘权鑫, 张虎, 等. 气凝胶及其纤维复合材料等效导热系数预测 [J]. 2015, 49(7): 25-29. [doi: 10. 7652/xjtuxb201507005]
- 张小辉, 段玉岗, 李超, 等. 超声压紧对低能电子束分层固化复合材料质量的影响 [J]. 2015, 49(4): 134-139. [doi: 10. 7652/xjtuxb201504022]
- 赵新明, 段玉岗, 张静静, 等. 辐射剂量分布对低能电子束分层固化复合材料层间剪切强度的影响 [J]. 2014, 48(10): 84-89. [doi: 10. 7652/xjtuxb201410013]
- 刘小勇, 郑琨. 光纤缺陷实时检测与分类方法研究 [J]. 2014, 48(9): 1-5. [doi: 10. 7652/xjtuxb201409001]
- 吕涛, 刘志刚, 邓忠文, 等. 一种光纤组量程扩增的激光频率扫描干涉绝对测距系统 [J]. 2013, 47(9): 77-82. [doi: 10. 7652/xjtuxb201309013]
- 周磊, 汪楚清, 孙清, 等. 玻璃纤维增强复合材料输电塔节点承载力试验研究及有限元分析 [J]. 2013, 47(9): 112. [doi: 10. 7652/xjtuxb201309019]
- 周磊, 汪楚清, 孙清, 等. 玻璃纤维增强复合材料输电塔节点承载力试验研究及有限元分析 [J]. 2013, 47(9): 112. [doi: 10. 7652/xjtuxb201309019]
- 张平, 张小栋, 刘春翔. 双圈同轴式光纤位移传感器的输出特性 [J]. *西安交通大学学报*, 2012, 46(3): 27-30. [doi: 10. 7652/xjtuxb201203005]
- 薛勇, 刘卫华, 高秀峰, 等. 机载惰化系统中空纤维膜分离性能的实验研究 [J]. 2011, 45(3): 107-111. [doi: 10. 7652/xjtuxb201103020]
- 谭宏斌, 杨建锋. 溶胶凝胶法制备莫来石纤维及莫来石晶化的动力学研究 [J]. 2009, 43(11): 43-46. [doi: 10. 7652/xjtuxb200911009]
- 张晶, 于德梅, 陈炜. 有机包覆对磁性聚乳酸复合材料力学和介电性能的影响 [J]. 2009, 43(12): 120-124. [doi: 10. 7652/xjtuxb200912025]
- 张波, 陈天宁, 冯凯, 等. 烧结金属纤维多孔材料的高温吸声性能 [J]. 2008, 42(11): 1327-1331. [doi: 10. 7652/xjtuxb200811003]
- 刘晔, 陈江波, 束秀梅, 等. 光源调制全光纤电流互感器的研究 [J]. 2008, 42(4): 436-439. [doi: 10. 7652/xjtuxb200804012]
- 潘亿文, 杨冬, 刘红林. 化学液相沉积法制备碳/碳复合材料时的温度场研究 [J]. 2008, 42(3): 309-312. [doi: 10. 7652/xjtuxb200803012]
- 于灵敏, 朱长纯. 丝网印刷 ZnO 纳米锥的浆料制备及场发射特性研究 [J]. 2007, 41(8): 974-977. [doi: 10. 7652/xjtuxb200708021]
- 关宇, 裴爱霞, 郭烈锦. 超临界水中半纤维素气化制氢的影响因素分析 [J]. 2007, 41(1): 9-13. [doi: 10. 7652/xjtuxb200701003]

[本刊相关文献链接]

裴世源, 徐华. 非均质复合材料力学性能的确定性多尺度计算方法 [J]. 2015, 49(10): 8-13. [doi: 10. 7652/xjtuxb201510002]

(编辑 杜秀杰)