

# CFRP 在钻削加工中的声发射特性

黄文亮 李鹏南 邱新义 许磊 牛秋林

(湖南科技大学机电工程学院,湘潭 411201)

**文 摘** 根据 CFRP 钻削过程中缺陷的产生机理,用声发射传感器采集钻削过程中的声发射信号有效值电压(RMS)。分析了在不同钻削参数下的 RMS,对孔的入口处撕裂与出口处撕裂对应的 RMS 进行识别。结果表明:在钻削过程中,入口处和出口处撕裂会引起 RMS 的突变,能够有效的进行识别;主轴转速一定时,RMS 随着进给量的增大而增大;进给量一定时,RMS 随着主轴转速的增大而增大。

**关键词** CFRP,声发射,钻削

中图分类号: TG52

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2017.06.009

## Acoustic Emission Characteristics of CFRP During Drilling

HUANG Wenliang LI Pengnan QIU Xinyi XU Lei NIU Qiulin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

**Abstract** According to the mechanism of defects in CFRP drilling process, the acoustic emission signal rms value during drilling is collected by acoustic emission sensor. The RMS under different drilling parameters are analyzed, and the RMS corresponding to the tear at the entrance and the exit of the hole are identified. The experimental results show that the tear at the entrance and the exit can cause the mutation of the RMS during the drilling process, and can be effectively identified. When the spindle speed is constant, the RMS increases with the increase of the feed rate. When the amount is constant, RMS increases with the increase of spindle speed.

**Key words** CFRP, Acoustic emission, Drilling

### 0 引言

近年来,CFRP 广泛应用于航空航天、汽车和体育用品等领域<sup>[1]</sup>。钻削加工是 CFRP 的主要切削加工形式之一,由于 CFRP 的加工机理不同于普通的均匀材料或各向同性的金属材料,钻削形成的损伤(如基体开裂、分层和纤维断裂)使得钻削后材料的强度和抗疲劳性大幅降低<sup>[2-3]</sup>,因此 CFRP 的传统钻削一直是个难题。声发射(Acoustic Emission)通过接收和分析材料的声发射信号,评定材料性能和结构完整性,因此利用声发射技术可以有效地检测出 CFRP 的内部缺陷及损伤类型<sup>[4]</sup>。针对声发射技术在检测 CFRP 损伤方面,国内外学者做了大量的实验研究。王新刚、阳能军等<sup>[5]</sup>应用声发射技术对 T700 环氧树脂基复合材料拉伸损伤过程进行监测,结果表明,材

料加载初期的破坏主要是基体与界面损伤,后期主要是碳纤维损伤,且拉伸过程中声发射信号重复性很强,存在峰值和“平静期”。王兵等<sup>[6]</sup>利用声发射技术对典型的碳/环氧 CFRP 的 I/II 混合模式分层行为和层间断裂韧性进行实验研究,结果表明,碳纤维铺层在损伤与断裂不同阶段所释放的声发射信号特征不同。陶进等<sup>[7]</sup>对碳纤维复合芯损伤进行了声发射信号研究。结果表明,不同应力损伤与声发射信号功率谱频率之间有一定的对应关系,而树脂基体断裂和碳纤维断裂两种不同缺陷的声发射信号有明显的区别。N.Z.Karimi 等<sup>[8]</sup>对 CFRP 钻削进行了声发射信号研究,提出了一种识别不同损伤机制所发出的信号的方法。结果表明,把钻削过程分为三个主要阶段,即钻入阶段、钻削阶段和钻出阶段,通过非监督

收稿日期:2017-05-05;修回日期:2017-06-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51275168,51605161);湖南省自然科学基金项目(2015JJ5028);湖南省研究生科研创新项目(CX2016B602)

第一作者简介:黄文亮,1992 年出生,硕士研究生,主要从事碳纤维复合材料制孔技术研究工作。E-mail:huangwenliang555@163.com

的模式识别分析可以识别每个阶段最活跃的损伤机制。T.H.Loutas 和 DeGroot 等<sup>[9]</sup> 研究学者应用快速傅里叶变换和小波对复合材料拉伸断裂过程中产生的声发射信号进行分析,得到每个频段上信号的能量分布以及各种损伤类型所对应信号的频谱分布。目前声发射技术在 CFRP 钻削过程中损伤检测的应用还处于起步阶段,本文根据 CFRP 钻削过程中的缺陷产生机理,分析了普通麻花钻在不同钻削参数下的声发射信号,并通过分析对比不同参数下的声发射信号,对入口处撕裂和出口处撕裂的声发射信号进行了有效的识别,最后分析了钻削参数对声发射信号的影响。

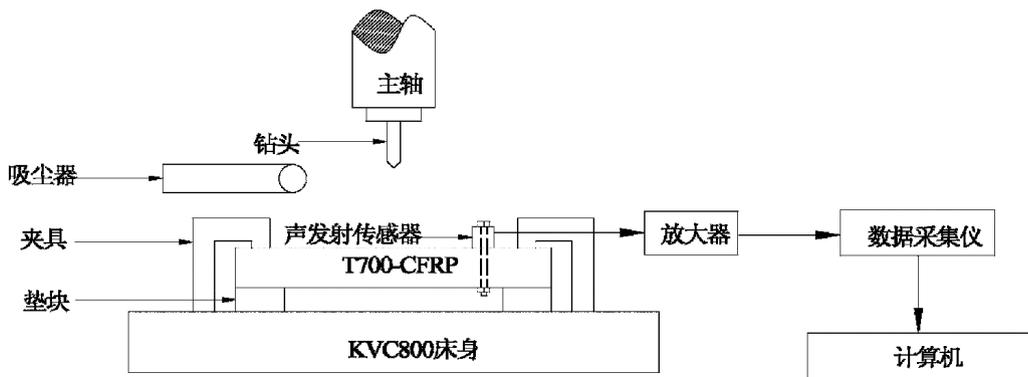


图1 声发射信号采集系统

Fig.1 Acoustic emission signal acquisition system

T700 碳纤维/LT-03A 环氧复合材料层合板(300 mm×200 mm×5 mm),无锡威盛新材料科技有限公司,铺层形式为:40 层[0/45/90/-45/0/45/90/-45/0/45/90/-45]s;YG6X 麻花钻,特莱隆刀具厂生产,直径为 6 mm,横刃长度为 0.6 mm,螺旋角为 30°,顶角为 118°。

## 1.2 方法

钻削实验采用全因素实验,主轴转速为  $n = 1\ 500、2\ 500、3\ 500、4\ 500\ \text{r/min}$ ,进给量为  $f = 0.05、0.10、0.15、0.20\ \text{mm/r}$ ;每组参数进行两次,结果取两次实验的平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 声发射信号分析

由声发射传感器等硬件装置采集得到了两路信号,即滤波后的声发射信号和声发射信号的有效值电压(RMS),主要讨论各个加工参数与声发射信号 RMS 的关系(图 2)。主要分析主轴转速恒为  $n = 1\ 500\ \text{r/min}$  的声发射信号 RMS。钻削过程的声发射信号 RMS 响应可以分为钻入、钻削及钻出时 3 个阶段。从图 2 可以看出噪声与实验信号有明显区别。钻入阶段为横刃开始接触材料直至钻尖完全钻入材料,此阶段内声 RMS 响应曲线开始爬升;在钻削阶段内信

## 1 实验

### 1.1 材料及设备

钻削实验在四川长征机床集团生产的四轴三联动立式加工中心 KVC800 上进行,实验采用 Kistler 公司生产的 8152B221、8152B121 压电声发射传感器、5125B 放大器、GL1100 数据采集仪。如图 1 所示声发射传感器用螺栓安装在 CFRP 的待加工表面上,选择采样频率为 1 MHz。实验还采用超景深三维显微系统(KEYENCE VHX-500FE)对孔形貌进行观察,放大倍率为 20~5 000 倍,能够观察和准确测量孔出入口处的撕裂情况。

号相对比较平稳;钻出阶段为钻尖位于材料下部直至钻尖完全钻出。在钻削阶段和钻出阶段信号有明显的突变,这种现象可能是由于层间损伤引起的。

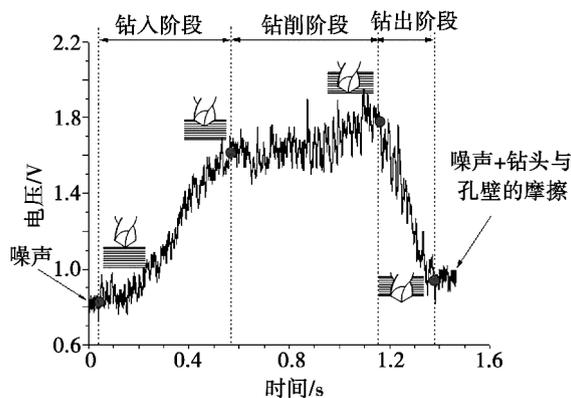
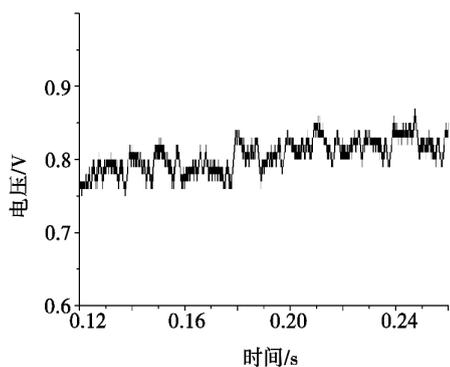


图2  $n = 1\ 500\ \text{r/min}, f = 0.2\ \text{mm/r}$  的 RMS

Fig.2 Acoustic emission signal( $n = 1500\ \text{r/min}, f = 0.2\ \text{mm/r}$ )

图 3 为进给量为 0.1 mm/r 的钻削声发射信号,图 2 与图 3 对比可以发现进给量为 0.2 mm/r 时钻入阶段起始处( $t = 0.04\ \text{s}$  处)有明显的信号突变,信号峰值明显增大。图 4 将两组参数下钻入阶段起始处的 RMS 响应曲线放大,可以发现突变更为明显。由图 4(a)可以看出进给量为 0.1 mm/r 的钻削 RMS 峰值为 0.85 V,信号比较平稳。由图 4(b)可以看出进给量为 0.2 mm/r 的钻削正常信号的 RMS 峰值也为

0.85 V,但是突变信号最大值达到了 0.98 V,增大了 16.5%,经分析判断这一突变是由于入口撕裂引起的。对进给量为 0.1 和 0.2 mm/r 的孔进行观察,入口处撕裂情况如图 5 所示,由图 5(a)可以看出进给量为 0.1 mm/r 的孔无入口撕裂,入口质量好。由图 5(b)可以看出进给量为 0.2 mm/r 的孔有两处入口撕裂,撕裂因子为 1.51,正好对应着进给量为 0.1 mm/r 的钻入阶段起始处声发射信号无突变,进给量为 0.2 mm/r 的钻入阶段起始处声发射信号有明显突变,说明当钻削 CFRP 时,入口发生撕裂,则相对应的声发射信号将产生突变。



(a)  $f=0.1 \text{ mm/r}$

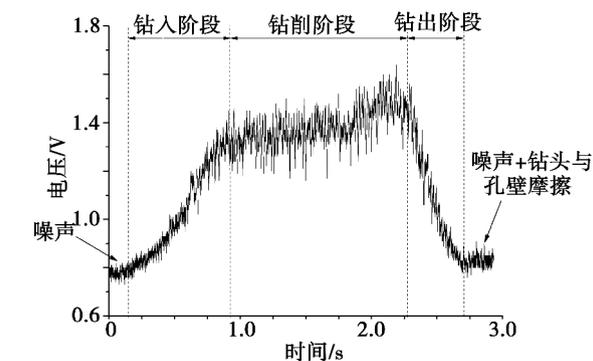
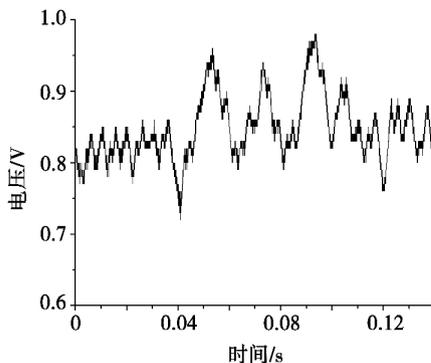


图 3  $n=1500 \text{ r/min}, f=0.1 \text{ mm/r}$  的声发射信号

Fig.3 Acoustic emission signal ( $n=1500 \text{ r/min}, f=0.1 \text{ mm/r}$ )



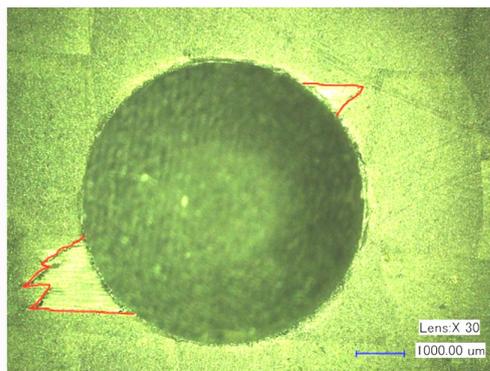
(b)  $f=0.2 \text{ mm/r}$

图 4  $n=1500 \text{ r/min}$  的钻入阶段起始处 RMS

Fig.4 Acoustic emission signal of the entrance at the initial stage ( $n=1500 \text{ r/min}$ )



(a)  $f=0.1 \text{ mm/r}$



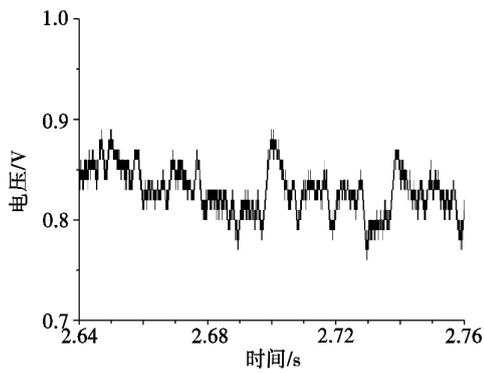
(b)  $f=0.2 \text{ mm/r}$

图 5  $n=1500 \text{ r/min}$  孔的入口形貌 30x

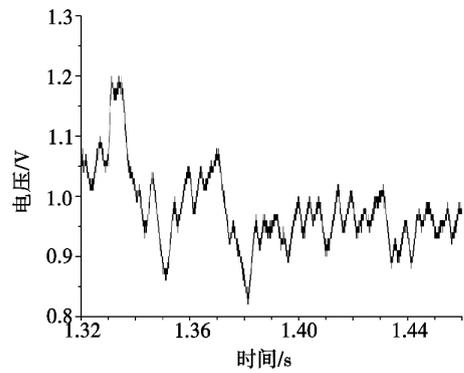
Fig.5 Entrance morphology of hole under  $n=1500 \text{ r/min}$

同样,经对比可以发现进给量为 0.2 mm/r 是钻出阶段末尾处 ( $t=1.33 \text{ s}$  处) 有明显的信号突变,信号峰值明显增大。图 6 将声发射信号 RMS 响应曲线放大,可以发现突变更为明显。由图 6(a)可以看出进给量为 0.1 mm/r 的钻削声发射信号峰值为 0.90 V,信号比较平稳。由图 6(b)可以看出进给量为 0.2 mm/r 的钻削声发射信号正常信号的 RMS 值为 1.00 V,而突变信号最大值达到了 1.20 V,增大了 20%,经分析判断这一突变是由于出口撕裂引起的。观察出口处撕裂情况如图 7 所示,由图 7(a)可以看出进给

量为 0.1 mm/r 的孔无出口撕裂,出口质量好。由图 7(b)可以看出进给量为 0.2 mm/r 的孔有一处出口撕裂,还有少量毛刺和啃边,撕裂因子为 1.18,正好对应着进给量为 0.1 mm/r 的钻出阶段末尾处声发射信号无突变,进给量为 0.2 mm/r 的钻出阶段末尾处声发射信号有明显突变,说明当钻削 CFRP 时,出口发生撕裂,则相对应的声发射信号将产生突变。因此,在钻削过程中,入口处和出口处撕裂会引起声发射信号的突变,通过分析声发射信号能够对撕裂信号进行有效的识别。



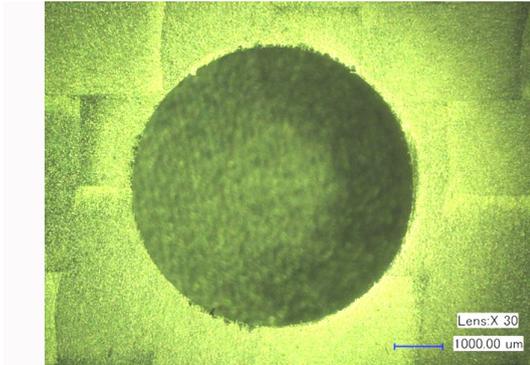
(a)  $f=0.1 \text{ mm/r}$



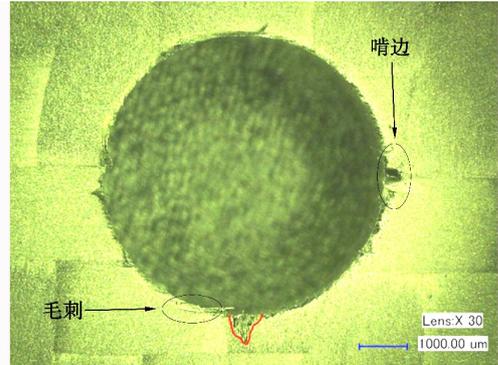
(b)  $f=0.2 \text{ mm/r}$

图6  $n=1500 \text{ r/min}$  的钻出阶段末尾处声发射信号

Fig.6 Acoustic emission signal of the exit at the end ( $n=1500\text{r/min}$ )



(a)  $f=0.1 \text{ mm/r}$



(b)  $f=0.2 \text{ mm/r}$

图7  $n=1500 \text{ r/min}$  孔的出口形貌 30×

Fig.7 Exit morphology of hole under  $n=1500\text{r/min}$

## 2.2 钻削参数对声发射信号的影响

在钻削过程中,碳纤维在刀具切削刃的作用下发生的断裂、基体的开裂、分层损伤以及钻头与孔壁的摩擦都会释放的声发射能量。因而影响声发射信号的因素有很多,包括钻削参数、工件材料特性及刀具磨损等。因此,研究钻削参数(主轴转速、进给量)对声发射信号的影响,能够揭示钻削过程声发射信号的规律,以及钻削参数与声发射信号的关系。研究钻削参数对声发射信号的影响时,取钻削阶段的声发射信号有效值电压(RMS)的平均值作为分析对象(图8)。

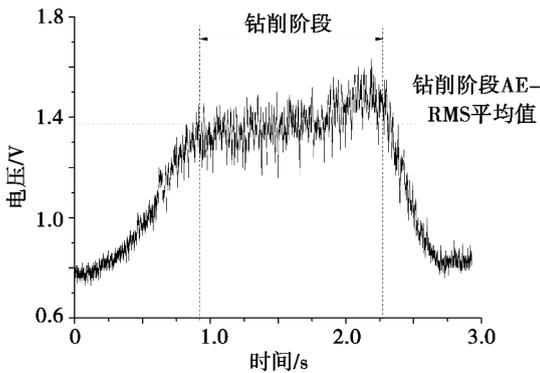


图8  $n=1500 \text{ r/min}, f=0.1 \text{ mm/r}$  的声发射信号

Fig.8 Acoustic emission signal ( $n=1500\text{r/min}, f=0.1\text{mm/r}$ )

图9为在不同主轴转速下,AE-RMS随进给量的变化而变化的曲线图,可知AE-RMS的大小与进给量成正比。随着进给量的增大,AE-RMS也随之增大。另外,随着进给量的增大,钻削轴向力也越来越大,层间损伤也增加,因而声发射信号也表现为增大的趋势。同样,进给量一定时,随着转速的增大,单位时间材料去除量也随之增大,即碳纤维在刀具切削刃的作用下发生的断裂也增多。另外,虽然随

量和主轴转速有着很好的对应关系。

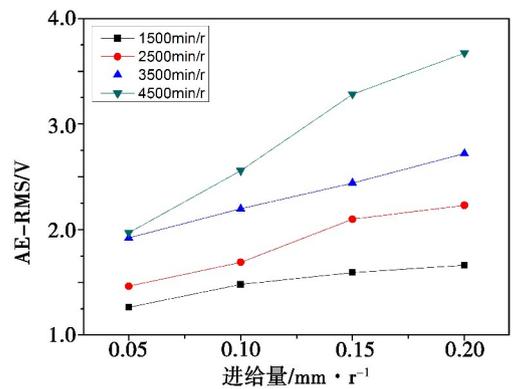


图9 主轴转速、进给量与钻削阶段 AE-RMS 平均值的关系

Fig.9 Relationship between rotating speed, feed and AE-RMS mean at the drilling stage

在钻削过程中,相同主轴转速下,AE-RMS随着进给量的增大而增大。这是由于在钻削过程中,转速一定时,随着进给量的增大,单位时间材料切除量也随之增大,即碳纤维在刀具切削刃的作用下发生的断裂也增多。另外,随着进给量的增大,钻削轴向力也越来越大,层间损伤也增加,因而声发射信号也表现为增大的趋势。同样,进给量一定时,随着转速的增大,单位时间材料去除量也随之增大,即碳纤维在刀具切削刃的作用下发生的断裂也增多。另外,虽然随

着转速的增大, 钻削轴向力越来越小, 层间损伤减少, 但是钻头与孔壁的摩擦加剧, 因而 RMS 表现为增大的趋势。因此, 当主轴转速一定时, RMS 随着进给量的增大而增大; 当进给量一定时, RMS 也随着主轴转速的增大而增大。

### 3 结论

在不同加工参数下进行麻花钻钻削 CFRP 的实验, 同时利用声发射传感器对钻削过程的声发射信号进行采集。通过分析普通麻花钻在不同钻削参数下钻削 CFRP 的 RMS, 观察孔的入口处与出口处形貌, 和进一步分析钻削参数对 RMS 的影响, 得出了以下结论。

(1) 当钻削 CFRP 时, 刀具钻入阶段 RMS 响应曲线开始爬升; 刀具钻削阶段, 声发射信号相对比较平稳; 刀具钻出阶段, RMS 响应曲线开始下降。入口处或出口处发生撕裂, 相对应的声发射信号将产生突变, 通过分析声发射信号能够对撕裂信号进行有效的识别。

(2) 钻削过程中 RMS 的大小受进给量和主轴转速的影响。当主轴转速一定时, RMS 随着进给量的增大而增大; 当进给量一定时, RMS 也随着主轴转速的增大而增大。

### 参考文献

[1] 张厚江, 陈五一. 高速钻削 CFRP 钻削力的研究[J]. 航空制造技术, 2006(12): 76-77.

[2] LIU D, TANG Y, CONG W L. A review of mechanical

drilling for composite laminates [J]. Composite Structures, 2012, 94:1265-1279.

[3] KAVAD B V, PANDEY A B, TADAVI M V, et al. A review paper on effects of drilling on glass fiber reinforced plastic [J]. Procedia Technology, 2014, 14:457-464.

[4] 杨玉娥, 张文习. CFRP 的无损检测综述[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2015(6): 471-476.

[5] 王新刚, 阳能军, 龙宪海, 等. T700/环氧树脂复合材料拉伸损伤机理声发射实验研究[J]. 无损探伤, 2011, 35(6): 22-25.

[6] 王兵, 刘延雷, 李伟忠, 等. CFRP 弯曲损伤的声发射试验研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013(6): 30-31.

[7] 陶进, 邬冠华, 吴伟. ACCC 导线碳纤维复合芯损伤声发射信号研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(14): 3978-3982.

[8] KARIMI N Z. Analysis of damage mechanisms in drilling of composite materials by acoustic emission [J]. Composite Structures, 2015, 131: 107-114.

[9] LOU T H. Damage evolution in center-holed glass/polyester composites under quasi-static loading using time/frequency analysis of acoustic emission monitored waveform [J]. Composites Science and Technology, 2006(2): 137-142.

[10] 张厚江, 陈五一, 陈鼎昌. CFRP 钻孔孔分层缺陷的研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(22): 1978-1980.

[11] 刘洋, 李鹏南, 陈明, 等. 双锋角钻头钻削碳纤维增强树脂基复合材料钻孔缺陷的研究[J]. 宇航材料工艺, 2016, 46(5): 54-61.



## 欢迎订阅 2018 年《宇航材料工艺》

《宇航材料工艺》(双月刊)创刊于 1971 年, 是经国家科委和国家新闻出版署批准出版的国家级技术类期刊, 中国科技论文统计用刊, 中国中文核心期刊, 已被国际宇航文摘《IAA》、美国化学文摘《CA》、金属文摘《METADDEX》、《中国期刊网》、万方数据资源系统(ChinaInfo)数字化期刊群、《中国学术期刊(光盘版)》、《中国学术期刊综合评价数据库》、《中国科学引文数据库》等多种文摘和数据库收录。2002 年在第二届国家期刊奖评比活动中, 《宇航材料工艺》获百种重点期刊奖。

《宇航材料工艺》主要报道我国材料及工艺的科技进展、科研成果和工程实践, 内容丰富, 信息量大。除大量刊登学术类技术论文、研究报告、综述和专论外, 还刊登新材料、新工艺、新产品及技术改造、技术革新、生产经验、国外科技、科技见闻、成果简介及会议信息等。

刊号  $\frac{\text{ISSN1007-2330}}{\text{CN11-1824/V}}$  双月刊, 全年 6 期, 共 120 元/年 国外订价: 120 美元/年

帐户名称: 航天材料及工艺研究所 请注明: 订阅《宇航材料工艺》  
开户银行: 工行东高地支行  
帐号: 0200006509008800374 税号: 121000004000053103

邮汇: 北京 9200 信箱 73 分箱《宇航材料工艺》编辑部。邮编: 100076, 电话: 010-68383269

开发票需要以 word 文档提供以下信息: (1) 地址(具体物业地址, 不能是信箱) (2) 电话(财务) (3) 开户银行 (4) 账户名称 (5) 账号 (6) 税号 (7) 单位税务登记证原件照片。

以上开票信息、邮寄邮编地址请发至邮箱, E-mail: rtao703@163.com。按本所财务规定信息不全者无法开具发票, 财务部门每年 12 月 10 号至次年 3 月封账, 不能开具发票, 开账后可以补开。