

基于声发射技术的金属烧伤监测

陈珍¹, 吴聘¹, 杨壮², 高哲瑜³

1. 中国电力工程顾问集团有限公司 北京 100029
2. 中电智慧储能科技(上海)有限公司 上海 200333
3. 西安工程大学机电工程学院 陕西西安 710048

摘要: 机床加工过程中因冷却液无法及时带走磨削热量而导致零部件表面产生金属烧伤, 会造成强度降低、残余应力增加等性能改变, 产生巨大安全隐患。声发射(AE)技术具有对微弱信号敏感、可监测高频信号等优势而广泛应用于机床磨削烧伤监测。由于磨削过程中存在金属颗粒剥落、摩擦等强干扰信号, 同时金属烧伤信号特征不明确, 因此磨削烧伤监测精度不理想。为提高烧伤信号识别准确率, 有必要单独对金属烧伤声发射信号的特性进行研究。为获取纯净金属烧伤信号, 设计并开展了激光试验模拟磨削烧伤过程。通过调整激光能量产生了4种程度的金属表面烧伤并获得相应的声发射信号。试验发现: 随着烧伤程度增加, 声发射信号频谱产生向高频跃迁现象。根据这一现象, 利用小波包变换(WPT)提取烧伤信号主导频带并进行特征提取。将提取出的特征向量输入主成分分析(PCA)算法, 对不同程度金属烧伤信号进行聚类与识别。

关键词: 磨削烧伤; 声发射信号; 小波包变换; 激光烧伤

Metal burn monitoring based on acoustic emission

CHEN Zhen¹, WU Pin¹, YANG Zhuang², GAO Zheyu³

1. China Power Engineering Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100029, China
2. CPECC Smart Energy Storage Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200333, China
3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, Shaanxi, China

Abstract: In the process of grinding processing, grinding heat results in metal surface burn on parts, leading to reduced strength, increased residual stress, and other performance changes with significant security risks. Acoustic Emission (AE) technology is widely employed for monitoring grinding burn in machine tools due to its sensitivity to weak signals and ability to detect high-frequency signals. However, the accuracy of grinding burn monitoring is not ideal due to strong interference signals such as metal particle spalling and friction during the grinding process. Meanwhile, the characteristics of metal burn signal is unknown. To improve the accuracy of burn signal recognition, it is necessary to investigate the characteristics of metal burn AE signals independently. Therefore, a laser experiment was designed and conducted to simulate the grinding burn process in order to obtain pure metal burn signals. By adjusting laser energy levels, four degrees of surface metal burns were generated. It was observed that as the metal burn degree increased, the spectrum of AE signals moved to higher frequency bandwidth. Based on this phenomenon, Wavelet packet transform (WPT) was utilized to extract dominant frequency bandwidths of metal burn signals. The extracted feature vectors were then input into Principal Component Analysis (PCA) algorithm for clustering and identification metal burn signals.

Keywords: grinding burn; acoustic emission; WPT; laser burn

基金项目: 中电工程公司重大科技专项(DG3-F01-2023); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2024JC-YBQN-0550)。

1 序言

机床加工磨削烧伤、轴承摩擦过热烧伤、高压电力设备烧蚀是机械装备和电力设备普遍存在的问题^[1-3]。机械零部件表面烧伤会造成金属表面的强度、硬度降低,增加残余应力,最终缩短使用寿命^[1, 2]。准确识别磨削烧伤对提高零部件抗疲劳性能、确保设备安全稳定运行有不可或缺的作用^[1]。因此,零部件烧伤监测对保证产品生产质量、保障设备健康运行、保护工人人身安全尤为重要。

零部件烧伤在线监测方法有振动、磨削力、摩擦力、温度、电涡流、巴克豪森法、超声波和声发射(AE)技术^[4]。振动信号对设备运行参数变化敏感。当磨削烧伤是由热量交换不及时导致时,振动信号变化不大,此时振动监测方法无法满足工程需求。力传感器和热电偶安装条件苛刻,不易在工业环境操作。电涡流、巴克豪森法受零部件自身磁性影响极大,同超声波方法一起均需要在停机静止状态下操作,因此不适用于在线监测^[5, 6]。相对于其他方法,AE对微弱损伤信号敏感,可精准捕捉磨削过热时金属金相变化产生的应力波信号,且易于安装操作,因此被广泛应用于零部件烧伤监测^[7]。

长期以来,学者们针对零部件烧伤监测开展了大量研究工作,明确金属烧伤机理是实现健康监测的基础。CHEN等^[8]通过单颗磨粒磨削试验发现,磨削功率和AE信号具有相同趋势,从机理角度证明了AE信号可以监测磨削区热性能变化。朱欢欢等^[9]研究了断续磨削烧伤机理,证实局部温度超过临界值时,将导致金属金相组织改变。因此,通过建立声发射信号和磨削区温度曲线对应关系即可监测表面烧伤发生。孔德群等^[10]结合金相分析、光谱分析和硬度检测研究了齿轮渗碳淬火后磨削烧伤问题。通过对磨削烧伤后的金相组织变化推测出磨削烧伤产生瞬时的温度场梯度。GAO等^[11]证实磨削烧伤产生的不同金相变化可对应不同的声发射信号。

在充分了解烧伤机理的基础上,学者们开展了大量信号识别与预测研究。YANG等^[12]采集机床磨削过程中电动机的电流、电压信号、振动信号和AE信号建立了磨削烧伤多参数预测模型。为提高磨削烧伤识别的精度和鲁棒性,WANG等^[13]将AE功率、均方根和峰值等参数输入神经网络算法监测磨削

烧伤信号。周光辉^[14]利用轴承钢表面显微硬度值、残余应力值、表面显微形貌对表面烧伤程度进行定义,搭建并训练Faster R-CNN、YOLOV3、SSD网络,实现了GCr15轴承钢磨削烧伤识别。

学者们研究发现,在设备运行过程中,金属烧伤信号总是与工件表面剥落、表面摩擦、滑移、断裂及冷却剂飞溅等声发射源混合在一起,导致烧伤信号特征难以提取,监测效果差^[15]。同时,金属烧伤声发射信号缺少样本信号,给信号特征识别与提取带来很大困难。为了获得纯净的金属烧伤声发射信号,LIU、MOHAMMED等^[16, 17]开展了激光烧伤试验,通过调整激光能量使金属表面产生相变来模拟磨削、摩擦过热烧伤过程。采集试验过程产生的纯净金属烧伤声发射信号,结合短时傅里叶变换和神经网络方法区分烧伤和未烧伤信号。YANG等^[18]开展表面激光烧伤试验,应用希尔伯特黄变换获得了表征金属烧伤的特征参数。GAO等^[11]开展激光烧伤试验,通过调整激光能量获得不同程度表面烧伤信号。采用变分模态分解算法提取AE信号特征,对不同烧伤程度信号进行分类。GAO等^[19]通过小波交叉相关、相干算法建立了激光烧伤与磨削烧伤声发射信号之间的关联性,成功地利用激光烧伤信号特征识别磨削烧伤。

然而不同材料烧伤产生的声发射信号频率分布不同,为了获得纯净的齿轮材料烧伤声发射信号,本文开展了齿轮表面激光烧伤试验。利用激光产生不同程度的烧伤并对AE信号进行采样。利用小波包变换(WPT)对纯净的声发射金属烧伤信号进行特征提取。采用主成分分析(PCA)方法对不同程度金属烧伤进行分类。

2 小波包变换理论

在小波分析中,信号被分解成近似分量和细节分量。它们分别代表信号低频和高频部分。近似分量进一步二分得到第二级近似分量和细节分量。当获得的近似分量对应频率带宽足够小时,二分过程停止^[20]。由此可知,在分解过程中细节分量会被忽略。为了解决这个问题,提出了WPT算法,将细节分量进一步二分至下一层^[20]。

WPT数学表达式为

$$\psi_{j,k}^i = 2^{-j/2} \psi^i(2^{-j}t - k) \quad (1)$$

式中 i ——调制参数, $i=1,2,\dots,2^n$, n 为小波包分解层数;

j ——尺度参数;

k ——平移参数。

小波包分解得到的近似分量和细节分量频带分别为 $\left[0, \frac{1}{2}f_s 2^{-j}\right]$ 和 $\left[\frac{1}{2}f_s 2^{-j}, \frac{1}{2}f_s 2^{-(j-1)}\right]$, 其中 f_s 为采样频率。

小波函数 ψ^i 由递归关系获得, 即

$$\psi^{2i}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) \psi^i\left(\frac{t}{2} - k\right) \quad (2)$$

$$\psi^{2i+1}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k) \psi^i\left(\frac{t}{2} - k\right) \quad (3)$$

式中 ψ^i ——母小波;

$h(k)$ 、 $g(k)$ ——分别对应于尺度函数相关的正交镜像滤波器和母小波函数。

小波包系数为

$$c_{j,k}^i = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{j,k}^i(t) dt \quad (4)$$

式中 $f(t)$ ——信号。

单个节点处信号的小波包分量为

$$f_j^i(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_{j,k}^i \psi_{j,k}^i(t) \Delta t \quad (5)$$

原始信号可表示为小波包节点信号的和, 即

$$f(t) = \sum_{i=1}^{2^j} f_j^i(t) \quad (6)$$

第 j 层分解得到每个节点信号能量记 $E_j^1 \cdots E_j^i$ 为, 其能量总和表达式为

$$E_j^i(t) = \sum_{\tau=t_0}^t [f_j^i(\tau)]^2 \quad (7)$$

小波包分解信号能量为各个分解层能量之和,

即

$$E_{\text{Total}}(t) = \sum_j E_j^i(t) \quad (8)$$

每个小波包分解频带能量和总能量比值为

$$P_j^i(t) = \frac{E_j^i(t)}{E_{\text{Total}}(t)} \quad (9)$$

式 (9) 中, $i=1 \cdots 2^j$ 。

3 试验装置和流程

本文利用激光产生不同程度的金属燃烧, 采集了金属烧伤过程产生的声发射信号。选择齿轮材料 20GeMnTi 钢作为试验对象。激光器提供 4 种电流参数: 100A、120A、160A、180A。激光类型为 YAG。4 种电流可产生不同程度的烧伤, 即无烧伤、轻微烧伤、中度烧伤和严重烧伤。相同能量

参数的激光脉冲重复 10 次, 保证试验可重复性。

发射信号采集系统采用 PAC-II 型, 传感器型号为 Nano30, 采样率为 2MHz, 放大倍数 40dB, 声发射阈值为 30dB。试验装置及 AE 系统分别如图 1、图 2 所示。

试验结果和文献[11]均证明烧伤程度可通过工件表面颜色做初步判断。相同能量的激光脉冲产生相似的烧伤表面。不同程度烧伤表面图像见表 1。未烧伤表面无变化, 从轻度至重度金属烧伤, 其金属表面颜色由浅黄变黑。



图1 试验装置



图2 AE系统

表1 不同程度的烧伤表面

激光能量	5ms、100A	5ms、120A	5ms、160A	5ms、180A
光学图像				
烧伤程度	未烧伤	轻微烧伤	中等烧伤	严重烧伤
表面颜色	无变化	微黄色	蓝黑色	黑色

4 试验结果分析与讨论

4.1 时域与频域信号分析

图3所示为金属烧伤过程中产生的声发射信号波形。由图3可知，未烧伤信号的幅值明显小于金属烧伤信号的幅值。图4所示为未烧伤到严重金属烧伤信号的频谱图。由图4可知，在200~400kHz带宽内，金属表面烧蚀越严重，信号峰值频率越向高频段偏移。此外，在400~500kHz的带宽内，频率幅值随金属烧伤程度的增加而增大。

时域和频域指标被广泛应用于声发射信号分析。本文比较了AE方差、峭度、峰度、峰峰值、均方根值（RMS）、质心频率（COF）及均方根频率等参数，发现RMS和COF可较好区别金属烧伤程

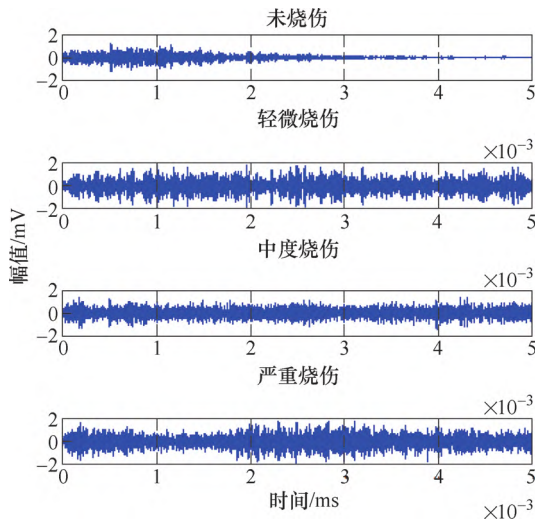


图3 不同烧伤信号的波形图

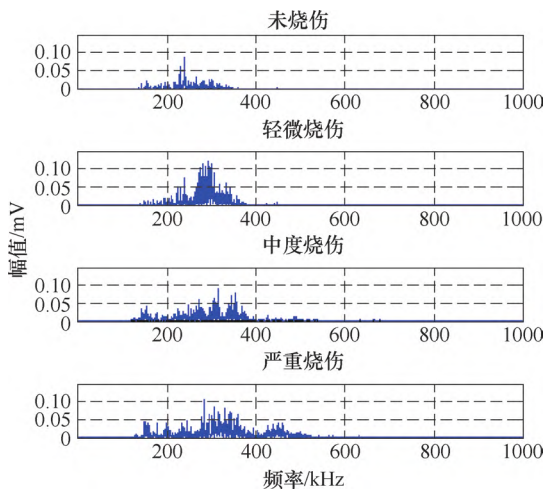


图4 不同烧伤信号频谱图

度。图5所示为金属不同烧伤信号的RMS。由图5可知，未烧伤信号的RMS较小。但轻度烧伤、中度烧伤和重度烧伤的数值相近。图6所示为金属不同烧伤信号的COF。由图6可知，该值可将金属中度、重度烧伤识别出来，但无法识别轻度烧伤。

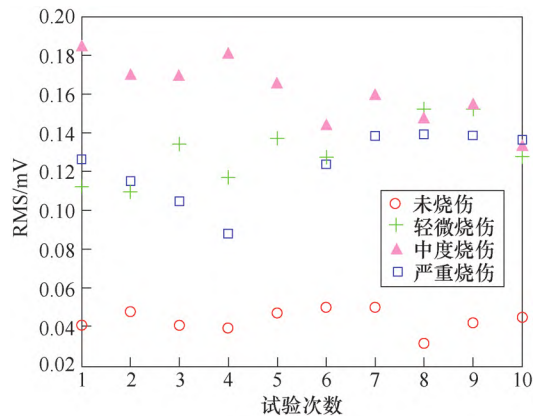


图5 不同烧伤信号的RMS

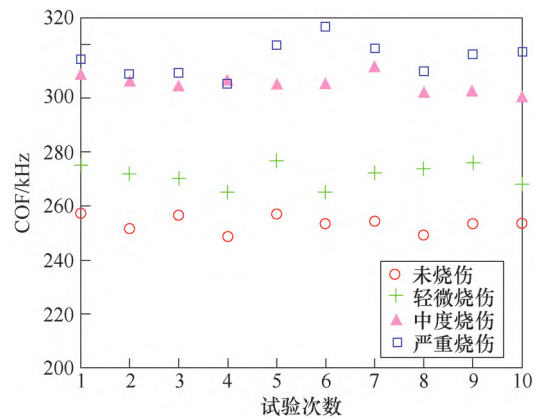
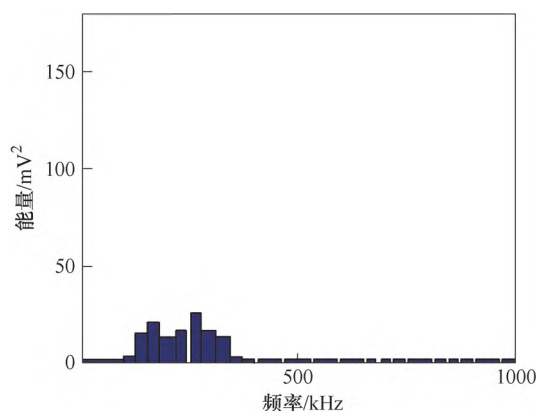


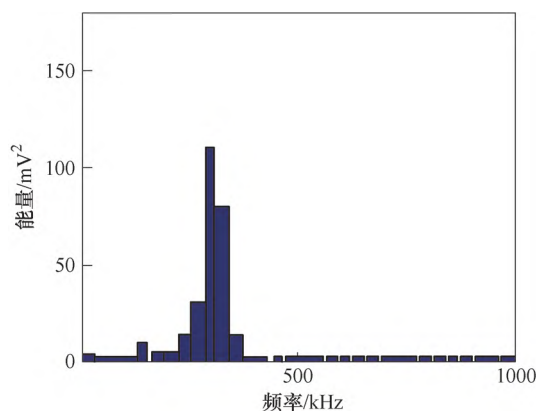
图6 不同烧伤信号的COF

4.2 小波包分析结果

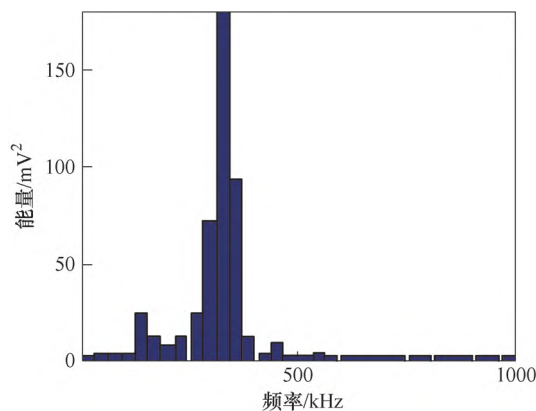
WPT将信号分解为正交等频率带宽的子带信号。本文使用WPT的子频带能量来区分不同的金属烧伤程度。选取与AE烧伤信号波形相似的Sym23小波作为WPT的主函数。WPT做5层分解将信号分解为32个子频带，通过计算各子频带的能量分布来确定主导频带。图7所示为4种金属烧伤信号的子频带能量分布，每个子频带带宽为31.25kHz。显然，无烧伤信号的整体能量比烧伤信号低。图8所示为4种金属烧伤信号在218~406kHz频段的能量分布。由图8可知，从未烧伤到中度烧伤，最大峰值能量逐渐增加并向高频跃迁，可将峰值所在频带作为主导频带，并提取特征参数来区分不同金属烧伤程度。



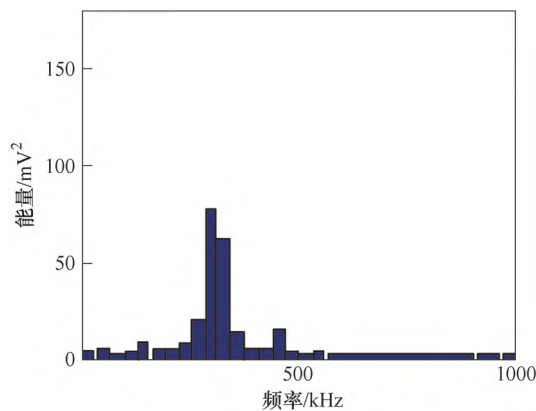
a) 未烧伤



b) 轻度烧伤



c) 中度烧伤



d) 严重烧伤

图7 不同烧伤信号的能量分布

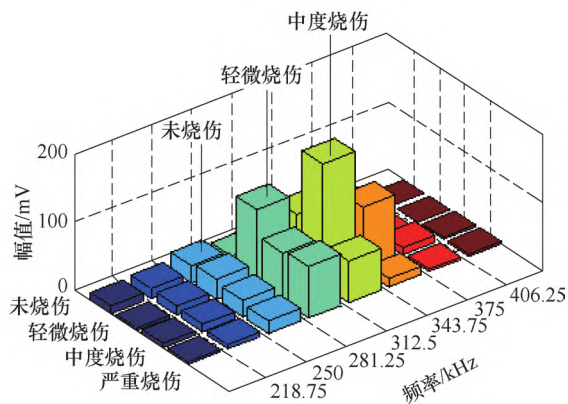


图8 不同烧伤信号小波包分解的频带能量

5 主成分分析结果

通过计算不同程度金属烧伤信号小波包分解后的主导频带特征参数，利用PCA方法对不同金属烧伤程度进行识别。PCA方法在不损失显著信息的前提下降低了信号特征维数。首先，提取不同烧伤程度声发射信号的时域和频域参数形成矩阵特征向量。通过PCA降维后保留第一到第三个主分量进行下一步分类。第一和第二主分量散点图如图9所示。由图9可知，仅利用时域和频域指标，中度烧伤集和重度烧伤集是相互混杂的；未烧伤和轻度烧伤可以区分，但区分度不高。

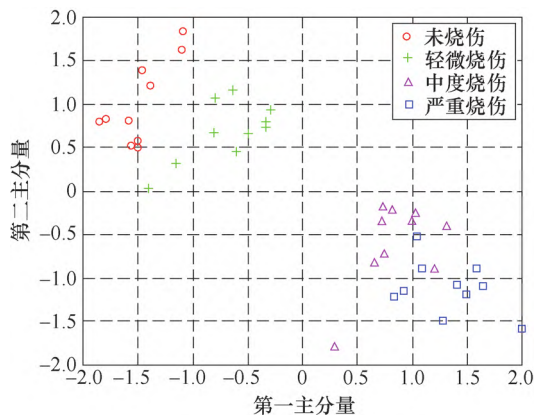


图9 第一和第二主分量散点图

将经过WPT分解的信号主导频带能量分布比值加入PCA矩阵特征向量。通过PCA降维后保留第一到第三主分量进行下一步分类。第二和第三主分量散点图如图10所示。由图10可知，采用WPT主导频带能量指标的PCA分类结果可正确分离出4种不同程度金属烧伤信号，并且未烧伤和轻度烧伤数据集具有较高辨识度。

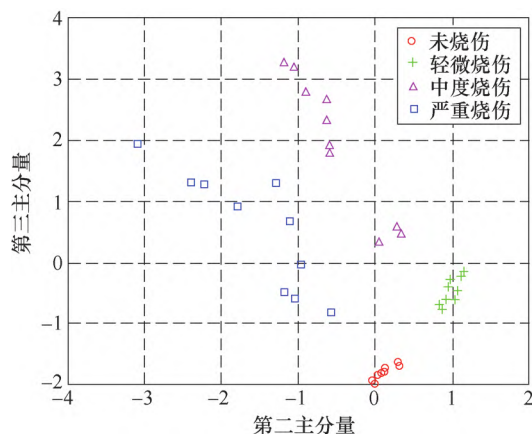


图10 第二和第三主分量散点图

6 结束语

本文研究了声发射技术在齿轮表面烧伤程度识别中的应用。通过激光试验模拟磨削烧伤过程，采集纯净的声发射金属烧伤信号；计算并分析了时域、频域指标识别齿轮表面烧伤声发射信号。采用WPT分解方法对不同程度金属烧伤声发射信号进行区分，利用PCA方法对4种金属烧伤信号进行了分类。通过试验和数据分析，可得出以下结论。

1) 时域和频域指标可以区分未烧伤和中度烧伤声发射信号，对轻度烧伤检测的准确率较低。

2) 信号经过WPT分解后的主导频段能量分布可以区分未烧伤、轻度烧伤和中度烧伤。

3) 小波包能量分布、时域和频域参数作为PCA特征向量，可区分不同程度金属烧伤信号。

本研究提高了齿轮表面烧伤声发射信号识别精确度，为后续基于声发射技术的齿轮磨削烧伤信号监测工作提供了理论基础。

参考文献:

- [1] 代金金, 丑洋洋. 解决曲轴圆角开档磨削烧伤及裂纹问题[J]. 金属加工 (冷加工), 2018 (8): 78-80.
- [2] 董晨, 屈伸, 李天夫, 等. 航空发动机轴承烧伤失效分析[J/OL]. 热加工工艺, 1-6[2024-08-20]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20222349>.
- [3] 高建, 张浩然, 张可, 等. 高压电缆缓冲层烧蚀缺陷超声检测实验[J]. 电力工程技术, 2024, 43 (1): 174-180.
- [4] HE B F, WEI C E, DING S Y, et al. A survey of methods for detecting metallic grinding burn[J].

Measurement, 2019, 134: 426-439.

- [5] LANZAGORTA J L, URGOITI L, VAZQUEZ P R, et al. Experimental approach for a grinding burn in-process inspection system based on Eddy Current[J]. Procedia CIRP, 2020, 87: 391-396.
 - [6] SACKMANN D, HEINZEL J, KARPUSCHEWSKI B. An approach for a reliable detection of grinding burn using the Barkhausen noise multi-parameter analysis[J]. Procedia CIRP, 2020, 87: 415-419.
 - [7] SUTOWSKI P, NADOLNY K. Monitoring of cylindrical grinding processes by use of a non-contact AE system[J]. Int. J. Precis. Eng. Manuf., 2012, 13 (10): 1737-1743.
 - [8] CHEN X, TAHSIN T. Effect of different parameters on grinding efficiency and its monitoring by acoustic emission[J]. Production & Manufacturing Research, 2016, 4 (1): 190-208.
 - [9] 朱欢欢, 迟玉伦, 闻章, 等. 断续磨削表面烧伤机理与在线监测方法研究[J]. 表面技术, 2021, 50: 379-388.
 - [10] 孔德群, 孔新建. 18CrNiMo7-6钢齿轮磨削烧伤裂纹分析[J]. 金属加工 (热加工), 2016 (19): 20-24.
 - [11] GAO Z Y, WANG X F, LIN J, et al. Online evaluation of metal burn degrees based on acoustic emission and variational mode decomposition[J]. Measurement, 2017, 103: 302-310.
 - [12] YANG Z S, YU Z H. Experimental study of burn classification and prediction using indirect method in surface grinding of AISI 1045 steel[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2013, 68: 2439-2449.
 - [13] WANG Z, WILLETT P, DEAGUIAR P R, et al. Neural network detection of grinding burn from acoustic emission[J]. Int. J. Mach. Tools Manuf., 2001, 41 (2): 283-309.
 - [14] 周光辉. 基于深度学习的 GCr15 轴承钢轴类零件磨削烧伤检测研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
 - [15] MARTINS C H R, AGUIAR P R, FRECH A, et al. Tool condition monitoring of single-point dresser using acoustic emission and neural networks models[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2019, 134: 426-439.
- (下转第24页)

管内表面粗糙度要求，同时焊接难度大，焊缝成形不良。

2) 通过高频脉冲弧焊法焊接工艺试验，由于其具有更低的稳定电流，更集中的能量，因此所焊产品结构变形小，管内无焊瘤及过熔现象。

3) 采用炉中钎焊焊接的喷嘴组件，因其钎焊温度可控，管内完全可以避免焊瘤产生，结构基本不产生变形，利用钎料的润湿性，批量生产效率较高。

试验结果证明，喷嘴组件采用高频脉冲弧焊法和炉中钎焊焊接后，结构外形尺寸和焊缝质量符合设计要求，可实现1mm以下薄壁铝合金的高质量焊接，试验取得成功。

4 加工方法对比分析

依据试验效果，并根据现有需求和条件，对4种加工方式进行了对比分析（见表1），确定了高频脉冲弧焊法作为滑梯喷嘴组件小批量焊接的加工工艺方法；将炉中钎焊作为滑梯喷嘴组件大批量焊接的加工工艺方法。随着金属3D打印技术的推广应用，并通过磨粒流技术，解决了金属3D打印喷嘴内壁表面粗糙度差的问题后，金属3D打印也可以作为该产品生产加工的备用方案。

5 结束语

通过对喷嘴组件进行焊接工艺研究，采用多种加工工艺进行试验，成功开发了高频脉冲弧焊和真空钎焊等多种加工方法，保证了喷嘴组件的焊接质量，解决了型号研制的瓶颈问题。随着我国大飞机投入商用，应急撤离滑梯应用前景广阔，应急撤离滑梯射引器喷嘴组件的成功研制，为后续应急撤离滑梯产品市场开拓提供了有力的技术支持，可以更快地抢占民用飞机市场，未来将获得较好的经济效益。

表1 多种加工方式对比

加工类别	加工方法	可加工性	优缺点	日产能	适用条件
增材制造	金属3D打印	良	无焊点，不存在焊瘤及焊漏等缺陷，但价格贵（5000元/件），管内粗糙度差，需要进行解决	8~10件/台（设备），可一次成形，省去单件加工时间	该技术逐渐成熟，可在磨粒流能解决内壁表面粗糙度差问题后使用
	普通TIG焊	一般	焊接后在管内易产生焊瘤（占比50%以上），效率低	4~6件/台（设备）	仅用于结构验证
焊接加工	高频脉冲弧焊	良	焊后在管内产生焊瘤概率比普通TIG焊减小，但效率低，可实现自行加工，成本不高（设备20万元）	6~8件/台（设备）	用于小批量生产，仅需购置设备即可自主加工生产
	炉中真空钎焊	好	焊后不会在管内产生焊瘤，效率高，但设备成本较高（200万元），每件焊接成本500元左右	40~60件/台（设备）	用于大批量生产，需采购设备或委托外部协作

同时，本研究工作为小直径超薄壁铝制管件的增材制造与焊接加工提供了新的思路和方法。

参考文献：

[1] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册（第2卷）：材料的焊接[M]. 2版. 北京：机械工业出版社，2001.

[2] 吴峰，吴超，樊健，等. 3D打印材料AlSi10Mg与5A06焊接工艺研究[J]. 金属加工（冷加工），2019（S2）：121-123.

MW 20240424

（上接第20页）

Measurement, 2014, 63（3）：667-679.

[16] LIU Q, CHEN X, GINDY N. Investigation of acoustic emission signals under a simulative environment of grinding burn[J]. Int. J. Mach. Tool Manu., 2006, 46: 284-292.

[17] MOHAMMED A, FOLKES J, CHEN X. Detection of grinding temperatures using laser irradiation and acoustic emission sensing technique[J]. Mater. Manuf. Process, 2012, 27（4）：395-400.

[18] YANG Z S, YU Z H, XIE C, et al. Application

of Hilbert-Huang Transform to acoustic emission signal for burn feature extraction in surface grinding process[J]. Measurement, 2014, 47: 14-21.

[19] GAO Z Y, LIN J, WANG X F, et al. Grinding burn detection based on cross wavelet and wavelet coherence analysis by acoustic emission signal[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32（4）：10.

[20] MALLAT S. 信号处理的小波导引：稀疏方法[M]. 3版. 戴道清，杨力华，译. 北京：机械工业出版社，2012.

MW 20240805