



基于力信号的砂轮磨削状态在线监测研究

王龙 杨理钧 汪刘应 唐修检 刘顾

An online grinding process monitoring method of grinding wheel based on force signals

WANG Long, YANG Lijun, WANG Liuying, TANG Xiujian, LIU Gu

引用本文:

王龙, 杨理钧, 汪刘应, 唐修检, 刘顾. 基于力信号的砂轮磨削状态在线监测研究[J]. 北科大: 工程科学学报, 2024, 46(12): 2289–2296. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.03.09.003

WANG Long, YANG Lijun, WANG Liuying, TANG Xiujian, LIU Gu. An online grinding process monitoring method of grinding wheel based on force signals[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, 46(12): 2289–2296. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.03.09.003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.03.09.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于智能磨矿介质及CNN和优化SVM模型的球磨机负荷识别方法

Ball mill load status identification method based on the convolutional neural network, optimized support vector machine model, and intelligent grinding media

工程科学学报. 2022, 44(11): 1821 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.03.06.001>

一种基于鲁棒随机向量函数链接网络的磨矿粒度集成建模方法

Grinding process particle size modeling method using robust RVFLN-based ensemble learning

工程科学学报. 2019, 41(1): 67 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.01.007>

离散元法在磨矿设备及参数优化研究中的应用现状

Application status of discrete element method in grinding equipment research and parameter optimization

工程科学学报. 2022, 44(3): 319 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.11.05.004>

基于ECG信号的高精度血糖监测

High accuracy blood glucose monitoring based on ECG signals

工程科学学报. 2021, 43(9): 1215 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.01.12.009>

基于机器学习的产品质量在线智能监控方法

Online intelligent product quality monitoring method based on machine learning

工程科学学报. 2022, 44(4): 730 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.06.22.001>

磨矿和浮选过程中黄铁矿电化学行为的研究进展

Research progress in the electrochemical behavior of pyrite during grinding and flotation

工程科学学报. 2021, 43(1): 58 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.06.29.001>

基于力信号的砂轮磨削状态在线监测研究

王 龙¹⁾, 杨理钧^{1)✉}, 汪刘应¹⁾, 唐修检²⁾, 刘 顾¹⁾

1) 火箭军工程大学智剑实验室, 西安 710000 2) 陆军装甲兵学院装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072

✉通信作者, E-mail: return_li@163.com

摘 要 磨削过程监控是实现磨削加工智能化与保证制造质量的关键。磨削力是磨削加工过程中一个重要的伴随信号特征, 它直接跟砂轮磨损程度、磨削热、砂轮与工件接触状态等事件之间有着密切联系。为了提升微晶刚玉砂轮磨削齿轮工艺的精密化、自动化与智能化水平, 开展砂轮磨削状态在线监测与砂轮磨损机制研究, 建立磨削力时频两域信号与砂轮-工件接触状态、砂轮磨损程度事件之间的内在关联, 提出一种基于实时力信号的砂轮磨削状态的在线监测新方法。同时, 采用激光共聚焦显微镜与扫描电镜表征分析了微晶刚玉砂轮形貌蕴含的磨损机理。研究表明, 磨削力时域波谱的峭度、波形指标、峰值指标、脉冲指标等波形特征指标分布规律呈现为变切深磨削状态>显著磨损砂轮的稳态磨削状态>轻度磨损砂轮的稳态磨削状态>未接触状态的鲜明态势。然而, 磨削力幅频谱的峭度、脉冲指标两项波形特征值在不同磨削状态下的变化规律却与时域信号截然相反。砂轮工作表面三维粗糙度随磨损演变呈现出先略微减小后增大的变化规律, 而微晶刚玉磨粒的聚微晶结构使其拥有沿微晶界面呈现逐层解理剥落的更新自锐能力。

关键词 微晶刚玉砂轮; 磨削状态; 在线监测; 磨削力; 磨损机理

分类号 TG142.71

An online grinding process monitoring method of grinding wheel based on force signals

WANG Long¹⁾, YANG Lijun^{1)✉}, WANG Liuying¹⁾, TANG Xiujian²⁾, LIU Gu¹⁾

1) Zhijian Laboratory, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710000, China

2) National Defense Key Laboratory for Remanufacturing Technology, Academy of Army Armored Forces, Beijing 100072, China

✉Corresponding author, E-mail: return_li@163.com

ABSTRACT Grinding process monitoring is key to assessing the intelligence of grinding processing and ensuring manufacturing quality of the intended product. The grinding force in the grinding process is an important characteristic, and the grinding force signal has a close relationship with the degree of wheel wear, grinding heat, grinding wheel and workpiece contact state, and other entities. Therefore, the analysis of the grinding force signal using the time domain and frequency domain analysis methods can effectively reveal the grinding characteristics and wheel wear evolution mechanism in the gear grinding process. In this study, the microcrystalline corundum grinding wheel was used to conduct the profile grinding test on 20CrMnTi steel gears installed in vertical machining centers. A high-performance general-purpose dynamometer was used to collect the discrete time series data of the grinding force in real time; a confocal laser microscope and scanning electron microscope were used to observe the wear characteristics of the microcrystalline wheel surface; finally, a micrometer was used to measure the thickness of the wheel's end-top surface to assess the degree of wheel wear in a quick and simple way. To improve the precision, automation, and intelligence level of the gear grinding process considering the microcrystalline corundum grinding wheel, online monitoring of the grinding process and wear mechanism of the grinding wheel was performed. The intrinsic correlation between the time-frequency domain signals of the grinding force, the contact status of the grinding wheel and workpiece, and the wear degree of the grinding wheel was established. Thus, in this study, a new online monitoring method

收稿日期: 2024-03-09

基金项目: 陕西省自然科学基金研究计划面上项目 (2024JC-YBMS-291)

for monitoring the grinding process of the grinding wheel was proposed based on real-time force signals. Meanwhile, the wear mechanism underlying the morphology of microcrystalline corundum grinding wheels was characterized and analyzed using laser confocal microscopy and scanning electron microscopy. The results showed that the distribution pattern of waveform characteristic indicators such as kurtosis, waveform index, peak index, and pulse index in the time domain spectrum of the grinding force showed a distinct trend of varying cutting depth grinding state $\geq$ steady-state grinding state of a significantly worn grinding wheel $\geq$ steady-state grinding state of a lightly worn grinding wheel $>$ noncontact state. However, the variation of the two waveform characteristic values of the grinding force, amplitude spectrum and pulse indicator under different grinding states is completely opposite to that of the time domain signals. After assessing the three-dimensional roughness of the working surface of the grinding wheel, it is observed that there is a slight decrease and a subsequent rapid increase in the roughness of the working surface of the wheel with the evolution of wheel wear. The polycrystalline structure of the microcrystalline corundum abrasive particles gives them the ability to update and sharpen along the microcrystalline interface, showing layer-by-layer cleavage peeling.

KEY WORDS microcrystalline corundum grinding wheel; grinding status; online monitoring; grinding force; wear mechanism

齿轮作为机械传动中最重要的基础零部件,被广泛应用在汽车船舶、航天航空、机床设备、电力冶金、起重运输和军事装备等重要领域^[1-4]. 齿轮市场需求规模巨大,且趋向于高精度、高传动效率、低噪音和高寿命等高端化产品方向发展. 微晶刚玉磨料^[5-6]采用溶胶-凝胶与低温烧结可控工艺保证了高纯度微粒显微组织的均匀性,导致其韧性是普通刚玉磨料的 2 倍以上,且砂轮耐用度可达普通刚玉砂轮的 5~10 倍. 因此,微晶刚玉砂轮高效精密磨削齿轮技术获得快速发展与应用. 尽管国内外学者对于普通磨料砂轮的磨削特性与磨损机制研究成果较多^[7-10],但针对陶瓷结合剂微晶刚玉砂轮的磨削机制研究却有待深度剖析. 南京航空航天大学丁文锋课题组^[11-12]开展了镍基合金构件的高质高效磨削砂轮自锐技术研究,研发高性能砂轮确保长时稳定的高锋利度,有助于航空发动机核心零部件的高质高效加工. Wang 等^[13-14]开展了新型国产微晶刚玉砂轮高效精密磨削汽车齿轮技术研究,对其力热特性、砂轮特性、磨齿性能与工艺优化展开了较全面研究,为提升齿轮加工质量提供重要的技术支撑.

随着传感器、信息网络和数智化控制等技术融合发展,实时监测振动、功率、温度、力、声发射 (Acoustic emission) 等过程伴随信号,实现磨齿机床的误差自动补偿、在线精密检测、砂轮在线自动修整、在线诊断和远程控制等功能,使得磨齿机床趋向于高效率、高速度、高精度、全数控、高柔性等特征发展,进一步提高了齿轮磨削工艺的可靠性、精密化、灵活性和安全性^[15-17]. 王起硕^[18]开展了基于激光测微仪、多分量测力仪、声发射传感器和功率计等多传感器融合的微晶刚玉砂轮磨削性能在线检测系统的研究,对智能磨削工艺

具有重要的指导价值. Shen 等^[19]指出机器学习和声发射技术在砂轮磨损在线监测领域具有重要的应用潜力,并分析了声发射信号的分析窗口长度、特征类型与传感器带宽对砂轮磨损检测性能的影响. Xiao 等^[20]提出了一种基于动态力模型的非圆柱形砂轮磨损在线监测新方法,用于齿轮磨削,建立了一个考虑更多砂轮参数和更复杂、更真实形状的动态磨削力理论模型,基于该模型提出了砂轮磨损的在线监测方法. Krishnan 和 Rameshkumar^[21]通过实验研究了在自动进给表面磨削过程中,利用声发射特征和离散隐马尔可夫模型 (HMM) 来预测砂轮状态. 建立了 AE 特征与工具条件之间的相关性,并结合聚类算法创建了 HMM 模型,发现算法模型能够以较高的准确度预测砂轮条件,为开发实时砂轮状态监测系统提供了有价值的经验和数据. 总体而言,当前对磨削过程状态的监测与控制依旧缺乏非常有效的实时表征技术手段,急需发展高可靠性的在线实时监测新方法,助力精密齿轮生产的高品质与低成本的发展. 磨削过程监控是实现磨削加工智能化与保证制造质量的关键. 磨削力是磨削加工过程中一个重要的伴随信号特征,它直接跟砂轮磨损程度、磨削热、砂轮与工件接触状态等事件之间有着密切联系. 另外,时域与频域分析方法已经为机械振动信号及其故障检测诊断提供了重要技术方法,但在机械加工监测过程的磨削力信号分析领域却涉及较少. 基于时域波形的统计指标及概率分布可有效揭示振动信号特性,而傅里叶频谱、功率谱、倒频谱等典型频域分析方法也可实现从振动信号“谱”中获取特征量. 综上,鉴于时域与频域分析方法能够较好地适应非平稳非线性信号分析,通过将磨削力在线监测与实时信号处理融合而提出一种对砂轮-工

件接触状态、砂轮磨损状况的在线监测新方法,具备易于实现可编程与数智化的监测优势。同时,研究微晶刚玉砂轮磨损形貌的宏微观多尺度特征,利于揭示其在齿轮磨削加工过程的磨削特性与磨损演化机制。

1 研究方法

齿轮成形磨削加工过程的磨削力测量试验系统如图 1 所示。在北京机电研究院生产的 BV-75 立式加工中心上采用微晶刚玉成形砂轮对 20CrMnTi 钢齿轮开展成形磨齿试验。国机精工有限公司自主研制的微晶砂轮尺寸规格为外径 200 mm、内径 32 mm 和厚度 20 mm,且其微晶刚玉磨料粒度为 60 μm 。齿轮试件的模数、压力角分别为 4 mm 与 20°。在磨齿过程中,采用 KISTLER 94272 型号高性能应变片式车铣钻磨通用测力仪实时采集磨削力离散时间序列。事先将测力仪传感器进行清零与标定,使零位漂移量 ≤ 2 ,且将采集频率设置为 1000 Hz。此外,采用 OLYMPUS OLS4000 激光共聚焦显微镜与 Nova NanoSEM50 超高分辨扫描电镜观察微晶砂轮表面磨损形貌特征。

为了能在磨齿试验中快速简易评定砂轮磨损程度,如图 2 所示,可采用千分尺测量砂轮端面厚度。若 B_0 为砂轮端顶面的初始厚度, B' 为每次磨削结束后实时测量的顶端面厚度,则砂轮端顶面的磨损量 ΔB 为:

$$\Delta B = B_0 - B' \tag{1}$$

为了保持砂轮的锋利,砂轮表面轻度磨损量 ΔB 应当少于 0.2 mm。当砂轮表面上的磨损量 ΔB 介于 0.2 ~ 0.5 mm 时,砂轮处于存在显著磨损状态。若砂轮表面的磨损量 $\Delta B > 0.5$ mm 时已达磨钝标

准,应及时更换。砂轮磨损直接影响其与工件接触的平稳性,进而使得磨削力时域信号的冲击振动干扰成分增强。因此,分别对轻度磨损砂轮 ($\Delta B < 0.2$ mm) 与显著磨损砂轮 ($\Delta B = 0.2 \sim 0.5$ mm) 的磨削状态展开研究。

2 磨削力信号时频特征分析

2.1 时域信号特征

当磨削速度 v_s 为 45 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 径向进给量 a_p 为 0.1 mm, 轴向进给速度 v_w 为 3500 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,采用轻度磨损砂轮开展单齿磨削过程的法向磨削力绝对值 $|F_{ni}|$ 变化规律如图 3 所示。显然,可将砂轮与工件之间的磨削状态分为未接触状态、变切深磨削状态、稳态磨削状态。在 0 ~ 90 ms 与 820 ~ 1000 ms 两个时间段均为未接触状态。在未接触状态下,砂轮与工件之间存在间隙。此时,磨削力信号平稳,只存在可忽略不计的零位漂移量波动。在 90 ~ 280 ms 与 770 ~ 820 ms 两个时间段均为变切深磨削状态。在 90 ~ 280 ms 时,这是砂轮开始逐渐切入工件的接触过程,磨削深度不断增大,使得磨削力信号剧增。在 770 ~ 820 ms 时,这是砂轮与工件开始逐渐离开接触过程,磨削深度不断减小,使得磨削力信号剧减。在 280 ~ 770 ms 时处于稳态磨削状态,砂轮与工件之间的磨削深度基本不变化,使得磨削力随时间的推移存在规则性波动。为了排除变切深磨削状态的突变型振动信号的干扰,选择采用磨削力时域信号曲线波形变化较稳定、较规则的稳态磨削阶段开展轻度磨损砂轮与显著磨损砂轮的对比试验分析。

提取法向磨削力信号样本集的峭度 X_q 、波形指标 K 、峰值指标 C 、脉冲指标 I 共 4 个波形特征

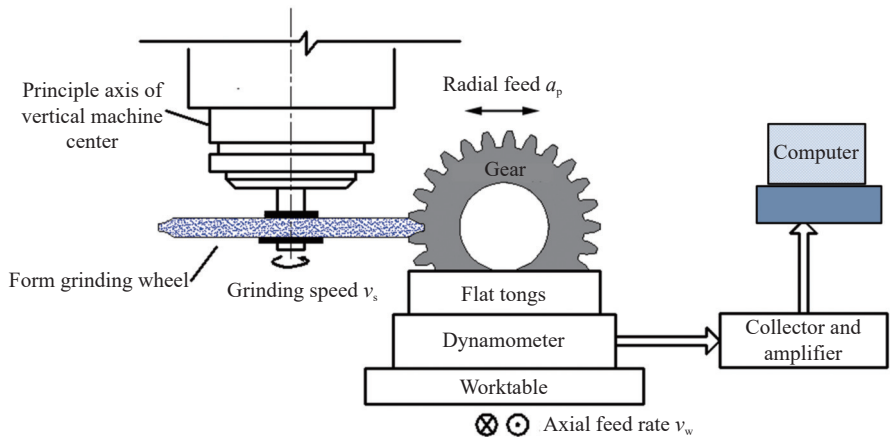


图 1 磨削力测量示意图

Fig.1 Schematic of the grinding force measurement



图 2 砂轮顶端面厚度测量

Fig.2 Measurement of the top surface thickness of the grinding wheel

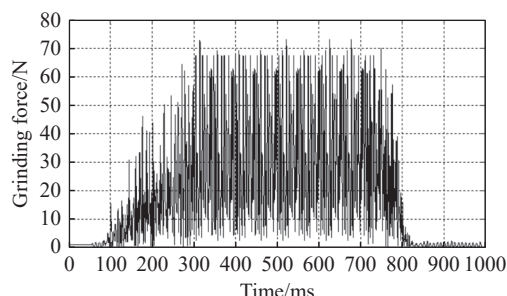


图 3 磨削力绝对值随时间的变化规律

Fig.3 Variation of the absolute value of the grinding force with time

指标,用于描述磨削力信号曲线的冲击性或突发性振动强弱,进而监控砂轮-工件接触状态与砂轮磨损程度.每间隔 0.2 s 逐步连续选取 200 个磨削力的离散时间序列数据 $x_i (i=0,1,\dots,199)$,组成磨削力信号样本集.若 N 为集合的元素数量,各项无量纲统计特征值的计算公式分别为^[22]

$$\text{峭度: } X_q = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{x_i^4}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i^2 \right)^2} - 3 \quad (2)$$

$$\text{波形指标: } K = \frac{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i^2 \right)^{1/2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} |x_i|} \quad (3)$$

$$\text{峰值指标: } C = \frac{\max |x_i|}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i^2 \right)^{1/2}} \quad (4)$$

$$\text{脉冲指标: } I = \frac{\max |x_i|}{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} |x_i|} \quad (5)$$

采用不同磨损程度的砂轮开展齿轮成形磨削试验研究,磨削速度介于 $45 \sim 63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,径向进给量介于 $0.03 \sim 0.35 \text{ mm}$,齿向进给速度为 $1500 \sim 9000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.遴选分析了 96 组法向磨削力信号曲线的峭度 X_q 、波形指标 K 、峰值指标 C 、脉冲指标 I 四项波形特征参数的统计分布规则如图 4 所示.当砂轮与工件处于未接触状态,磨削力信号曲线变化漂移量较小且规则,并没有突发性振动干

扰,会使得四项波形特征指标处于最小值.此时,峭度 X_q 介于 $1.0 \sim 1.5$,波形指标 K 介于 $1.0 \sim 1.1$,脉冲指标 I 介于 $1.0 \sim 1.5$,峰值指标 C 介于 $1.0 \sim 1.5$.在砂轮与工件的变切深磨削状态时,由于法向磨削力信号振幅的骤然增大或减小,导致法向磨削力时域信号变化存在剧烈的突变性振动干扰,使得四项波形特征指标处于最高值.此时,峭度 $X_q \geq 6$,波形指标 K 介于 $1.5 \sim 3.0$,脉冲指标 I 介于 $5 \sim 40$,峰值指标 C 介于 $4 \sim 11$.当采用轻度磨损砂轮进行稳态磨削时,因砂轮磨损均匀且微弱,磨削力信号呈现周期性的弱冲击振动,四项波形特征指标值相对较小.此时,峭度 X_q 介于 $1.0 \sim 2.8$,波形指标 K 介于 $1.0 \sim 1.3$,脉冲指标 I 介于 $1.0 \sim 3.5$,峰值指标 C 介于 $1 \sim 3$.然而,随着砂轮磨损程度的增大,砂轮与工件之间接触越不平稳,使得磨削力时域信号的冲击性振动干扰成分逐渐显著增强,使得时域信号波形越不规则,导致稳态磨削状态的四项波形特征指标值均会明显增大.当采用显著磨损砂轮进行稳态磨削时,峭度 X_q 介于 $2.8 \sim 6.0$,波形指标 K 介于 $1.3 \sim 1.5$,脉冲指标 I 介于 $3.5 \sim 5.5$,峰值指标 C 介于 $3 \sim 4$.在实际加工中,可以依据工件加工精度要求,设定砂轮磨钝标准时的各项波形特征指标阈值,便于及时进行砂轮修整.综上,变切深磨削状态、显著磨损砂轮的稳态磨削状态、轻度磨损砂轮的稳态磨削状态、未接触状态的四项磨削力时域信号波形特征值均会依次减小,这说明磨削力时域信号曲线的冲击性或突发性振动依次减弱.同时,通过分析四项波形特征指标的分布范围,可以清晰的表征区分开砂轮-工件接触状态与砂轮磨损程度.

2.2 频域信号特征

频谱分析是现代信号处理技术的常用方法.频域分析借助离散傅里叶变换(DFT)将离散时域信号转换到频域中,然后根据信号的频域分布特征和变化趋势来判断砂轮-工件磨削接触状态,以及稳定磨削阶段的砂轮磨损程度^[23-24].对于磨削力离散时间序列 $x_i (i=0, 1, \dots, 199)$,若 N 为样本数, $n=0, 2, 3, \dots, N-1$; k 为谱线号,则 k 取值为 $0, 1, \dots, (N-2)/2$.可根据式(6)进行离散傅里叶变换,且其实部与虚部分别如式(7)、(8)所示.

$$X(k) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \left[\cos\left(\frac{2\pi}{N} kn\right) - j \sin\left(\frac{2\pi}{N} kn\right) \right] \quad (6)$$

$$\text{实部: } X_R(k) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos\left(\frac{2\pi}{N} kn\right) \quad (7)$$

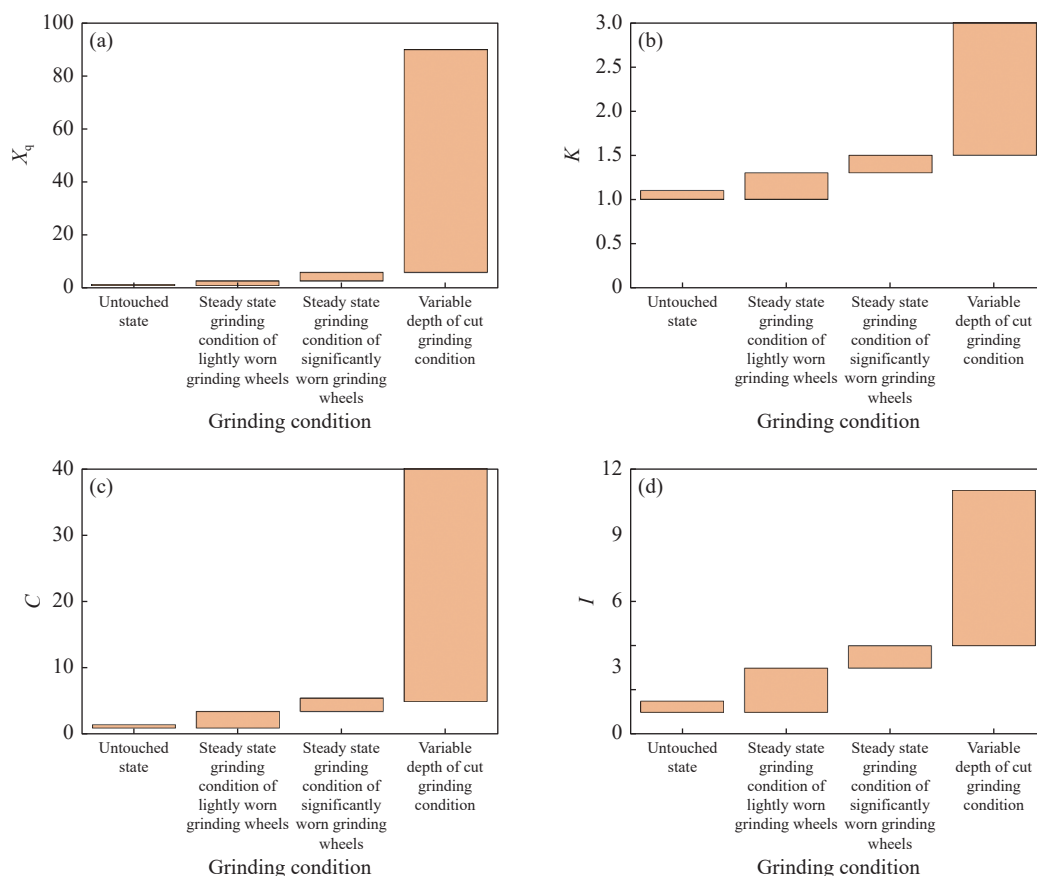


图4 磨削力时域信号的波形特征分布。(a) 峭度; (b) 波形指标; (c) 脉冲指标; (d) 峰值指标

Fig.4 Distribution of waveform characteristics of the time domain signal of the grinding force: (a) steepness; (b) waveform indicator; (c) pulse indicator; (d) peak indicator

$$\text{虚部: } X_I(k) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \sin\left(\frac{2\pi}{N} kn\right) \quad (8)$$

在磨削力信号频域特征提取研究中, 主要分析明显含有的简谐成分与固有的周期性主频率成分。简谐成分主要是由砂轮磨损或者变切深磨削状态时, 磨削力时域信号存在冲击性或突变性振动导致的调制现象, 从而在幅频谱上主频率两侧出现较宽的调制频带。图5分别是砂轮在轻度磨损(图5(a))与显著磨损(图5(b))时的稳态磨削状态幅频谱图例。当砂轮磨损时, 会使得砂轮-工件之间存在不平稳接触, 使磨削力时域信号波形存在周期性的冲击振动, 在频谱上出现更显著的调制频带现象, 削弱了频率的固有主频率的脉冲特性。

提取幅频谱的峭度 X_{Fq} 与脉冲指标 I_F 两项量纲一的特征指标描述幅频谱的波峰形态与脉冲特征。在不同磨削状态时, 幅频谱波形特征指标的统计分布规律如图6所示。在未接触状态时, 幅频谱的峭度与脉冲指标值为最大值, 峭度 X_{Fq} 介于55~100, 脉冲指标 I_F 介于60~95。这是因为磨削力时域信号以较小漂移量规则性的波动变化, 其频谱

图像在固有的主要频率处以脉冲波形存在, 几乎不存在调制频带。在变切深磨削状态时, 峭度与脉冲指标以较小值存在, 峭度 X_{Fq} 介于2~10, 脉冲指标 I_F 介于2~8。这是因为在变切深磨削状态时, 磨削力时域信号存在较强突变性振动信号, 使得频谱图像出现了显著的简谐成分, 甚至呈现出连接成片的调制频带, 削弱了频谱图波形的突变性脉冲波形的存在。采用轻度磨损砂轮的稳态磨削状态中, 峭度 X_{Fq} 介于35~55; 脉冲指标 I_F 介于18~40。在稳态磨削状态时, 因为砂轮存在磨粒磨损、结合剂磨损等损耗现象存在, 使得磨削力信号中存在较弱的周期性简谐成分, 导致频谱图像中存在较窄小的调制频带, 因此其频谱图波形的峭度与脉冲指标均会远比未接触状态时小, 但会比变切深磨削状态时大。然而, 随着磨损程度越大, 脉冲振动越明显, 频谱图中的干扰谐波成份越多, 峭度值 X_{Fq} 和脉冲指标 I_F 越小, 因此显著磨损砂轮的稳态磨削阶段的脉冲指标 I_F 介于8~18且峭度值 X_{Fq} 介于10~35。综上, 磨削力幅频谱信号的峭度、脉冲指标两项波形特征值在不同磨削状态下的变

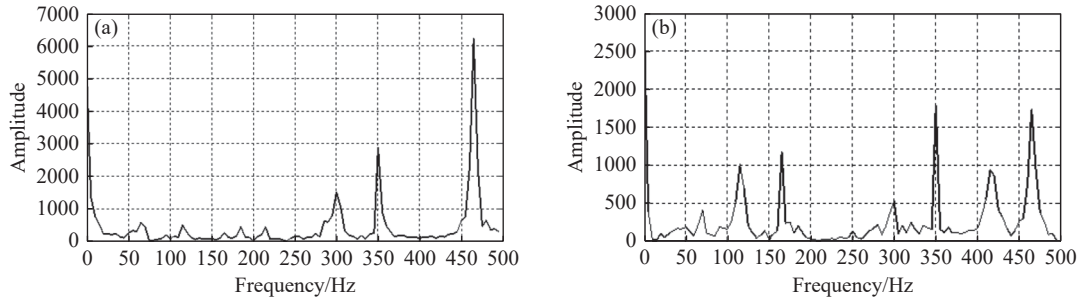


图 5 幅频谱图例. (a) 轻度磨损的砂轮状态; (b) 显著磨损的砂轮状态

Fig.5 Legend of the amplitude spectrum: (a) lightly worn grinding wheel condition; (b) significantly worn grinding wheel condition

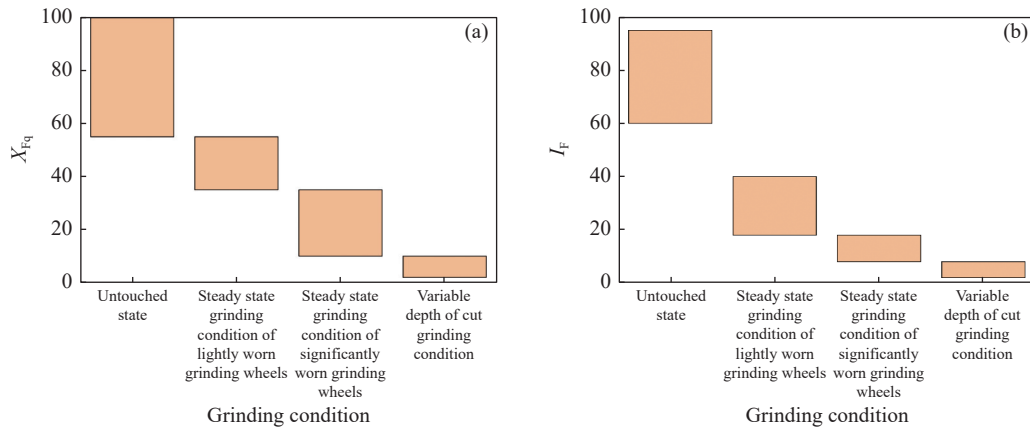


图 6 磨削力幅频谱的波形特征分布. (a) 峭度; (b) 脉冲指标

Fig.6 Waveform characteristic distribution of the amplitude spectrum of the grinding force: (a) steepness; (b) pulse indicator

化规律与时域信号截然相反. 变切深磨削状态、显著磨损砂轮的稳态磨削状态、轻度磨损砂轮的稳态磨削状态、未接触状态的磨削力幅频谱波形特征值依次增大, 这说明幅频谱中不规则振动导致的简谐成份依次减少. 同样, 通过分析幅频谱波形特征指标的分布范围, 也能较好的表征区分开砂轮-工件接触状态与砂轮磨损程度.

3 砂轮磨损形貌分析

图 7 为微晶刚玉砂轮工作表面形貌的不同磨损阶段状况. 如图 7(a) 所示, 初始形貌中磨粒露出结合剂较高的高度, 且磨粒之间有较大的气孔隙, 此时砂轮工作表面三维粗糙度较小. 当砂轮发生轻度磨损程度时, 如图 7(b) 所示, 砂轮工作表面因少量磨粒脱落、磨粒磨耗磨损、结合剂轻微磨损等原因^[25], 使得工作表面形貌的变化起伏减弱, 因此砂轮表面三维粗糙度有所降低. 如图 7(c) 所示, 当砂轮磨损显著时, 砂轮工作面磨粒与结合剂的大量破碎、脱落, 因磨耗程度较大导致宏观形貌沿接触弧面呈内陷状, 使得砂轮表面三维粗糙度增大.

图 8 为扫描电镜观察的微晶刚玉砂轮表面磨损形貌. 砂轮磨损表面很少出现磨粒直接脱落的

迹象, 这说明陶瓷结合剂玻璃化后与微晶刚玉磨料之间形成了牢固结合. 砂轮磨损方式以磨粒和结合剂的磨耗磨损为主, 磨粒磨耗磨损以机械磨损与微破碎形式表现且以微破碎形式为主. 结合剂在砂轮与工件的相互滑擦过程中, 以摩擦磨损的微破碎形式逐渐被剥落, 进而促成了周边低矮磨粒或者埋藏的磨粒切削刃重新露出, 有利于砂轮的自锐. 图 9 为砂轮表面黏附磨损的显微形貌. 磨粒表面及包裹磨粒的结合剂均被金属磨屑黏附在它们顶端表面, 且可以发现黏附物表面的滑擦痕迹和贴附的细带状磨屑. 此外, 还可以发现金属黏附物是由细带状磨屑及金属熔化物累计叠加形成. 这是因为磨削高温使得磨粒与结合剂发生热软化, 齿轮材料更易粘附在磨粒与结合剂上进而降低砂轮的切削加工性能. 20CrMnTi 钢中的 Cr、Ti 合金元素氧化物的点阵参数与氧化铝非常相近, 从而导致微晶刚玉磨粒与工件表层的该类氧化物接触时造成粘附现象. 黏附物脱落通常会将部分结合剂剥离砂轮表面, 从而造成结合剂磨损. 然而, 砂轮磨损局部表面气孔内部却无磨屑堵塞, 这主要是由于切削液能更好地进入气孔清除磨屑, 减少气孔堵塞.

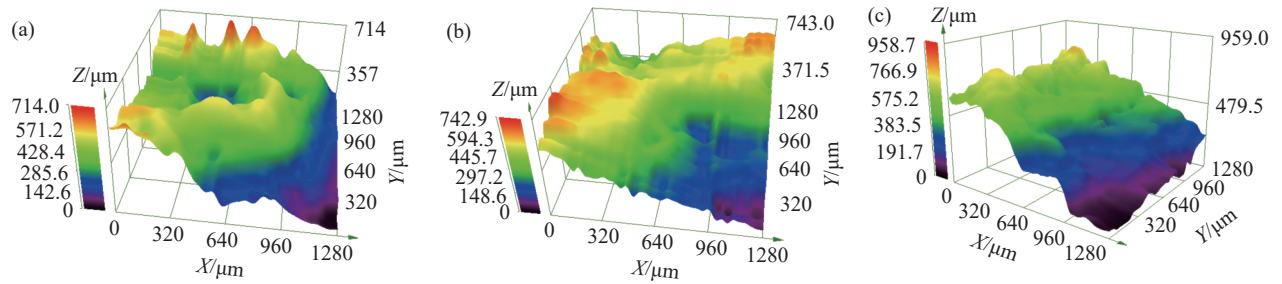


图 7 砂轮工作表面的形貌. (a) 初始形貌表面粗糙度 $S_a=6.7\ \mu\text{m}$; (b) 轻度磨损 $S_a=6.4\ \mu\text{m}$; (c) 显著磨损 $S_a=8.9\ \mu\text{m}$

Fig.7 Morphology of the working surface of the grinding wheel: (a) initial appearance $S_a = 6.7\ \mu\text{m}$; (b) light wear $S_a = 6.4\ \mu\text{m}$; (c) significant wear $S_a = 8.9\ \mu\text{m}$

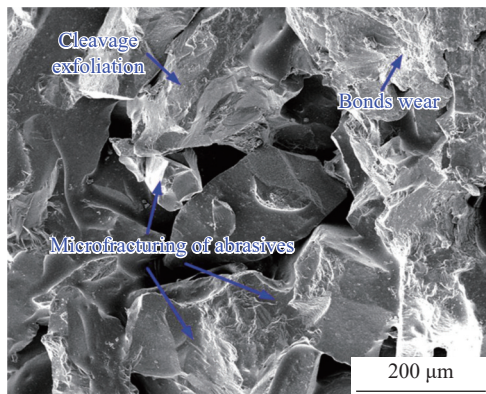


图 8 砂轮磨损微观形貌

Fig.8 Microscopic morphology of the grinding wheel wear

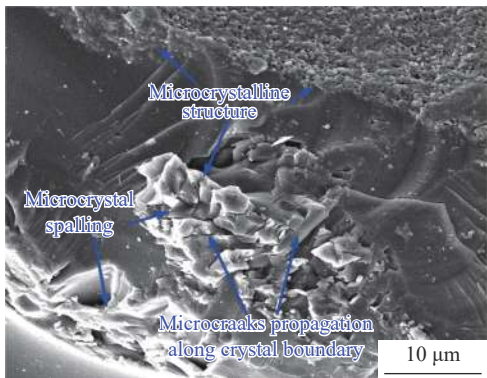


图 10 微晶刚玉磨粒表面的解理剥落形貌

Fig.10 Cleavage and spalling morphology of the microcrystalline corundum abrasive grain surface

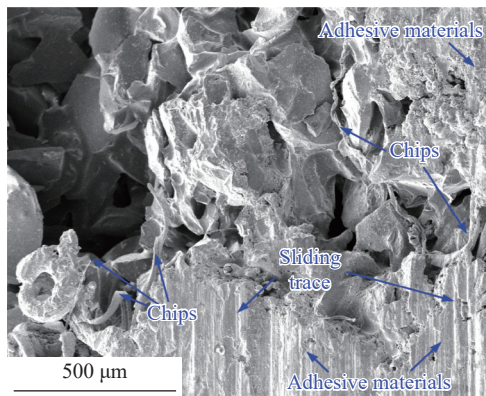


图 9 砂轮表面黏附磨损

Fig.9 Adhesive wear on the grinding wheel surface

在微晶刚玉磨粒磨耗过程中,如图 10 所示,微破碎经常发生在磨粒凸出端处,且大多以逐层解理剥落形式为主,该自修整机制促进切削刃的持续更新.微晶刚玉磨粒具有明显的聚微晶结构,其晶粒尺寸通常小于 $1\ \mu\text{m}$.特殊的微晶结构使得磨粒在外力作用下并不是整体破裂而仅是表层微晶剥落,呈现为沿微晶界面的微观破碎,磨粒损失较少,自锐性好.此外,由于微晶刚玉磨料具有比普通白刚玉磨料更大的韧性,使得其有更强的抵抗脆性裂纹扩展而断裂的能力.

4 结论

(1) 分析了不同磨削接触状态与砂轮磨损程度对磨削力时频两域波谱曲线的峭度、波形指标、峰值指标、脉冲指标的影响规律,建立了磨削力时频两域信号的波形特征与不同磨削状态之间的内在关系,提出了一种基于磨削力时频两域信号特征的磨削接触状态与砂轮磨损程度在线实时监测新方法.

(2) 变切深磨削状态、显著磨损砂轮的稳态磨削状态、轻度磨损砂轮的稳态磨削状态、未接触状态的磨削力时域信号波形特征值(峭度、波形指标、峰值指标、脉冲指标)依次减小,而幅频谱信号的峭度、脉冲指标两项波形特征值变化规律却与时域信号截然相反而呈现依次增大.这充分说明磨削力时域信号曲线的不规则振动程度依次减弱,进而导致幅频谱的简谐干扰成份依次减少.

(3) 微晶刚玉砂轮具备强结合力、锋利性、自锐性等优点,适用于高效精密磨削.砂轮磨损形式以磨粒微破碎磨损与结合剂磨损为主,伴随轻度黏附现象.微晶刚玉磨料的聚微晶结构使得磨粒微破碎以微晶解理剥落为主,磨粒损失较少且能有效持续更新自锐.

参 考 文 献

- [1] Li Y, Liu Y H, Tian Y B, et al. Application of improved fireworks algorithm in grinding surface roughness online monitoring. *J Manuf Processes*, 2022, 74: 400
- [2] Wen J, Zhou W, Tang J, et al. Residual stress evolution for tooth double-flank by gear form grinding. *J Manuf Processes*, 2022, 77: 754
- [3] Liu H J, Zhang B Y, Zhu C C, et al. State of art of gear contact fatigue theories. *J Mech Eng*, 2022, 58(3): 95
(刘怀举, 张博宇, 朱才朝, 等. 齿轮接触疲劳理论研究进展. *机械工程学报*, 2022, 58(3): 95)
- [4] He H F, Liu H J, Zhu C C, et al. Quantitative effect of residual stress on gear bending fatigue. *J Mech Eng*, 2023, 59(4): 53
(何海风, 刘怀举, 朱才朝, 等. 残余应力对齿轮弯曲疲劳的量化影响研究. *机械工程学报*, 2023, 59(4): 53)
- [5] Li X L, Li Z H, Zhu Y M. Effect of CoO–NiO additives on the microstructure and mechanical properties of microcrystalline corundum abrasives with *in situ* formed needle-shaped LaAl₁₁O₁₈. *Ceram Int*, 2022, 48(22): 33794
- [6] Kminikowska K, Herman D, Pander A. Effect of Al₄B₂O₉ and Al₁₈B₄O₃₃ whiskers synthesized *in situ* on the evolution of microstructure and mechanical properties of white fused alumina and Cubitron glass–ceramic composites. *J Eur Ceram Soc*, 2023, 43(6): 2564
- [7] Wang S, Sun G Y, Zhao Q L, et al. Evaluation of grinding characteristics for sapphire ultra-precision grinding using small grit sizes wheels based on AE signals. *J Manuf Processes*, 2023, 90: 94
- [8] Wang T, Zou L, Li H, et al. A prediction model of residual stress for belt-grinding blade based on geometrical characteristic and progressive wear of abrasive grains. *Int J Numer Methods Eng*, 2022, 123(12): 2814
- [9] Zhang Z Y, Wu J, Song K F, et al. Study on grinding force and machined surface quality in ultra-fine micro grinding of titanium alloy. *J Mech Eng*, 2022, 58(15): 75
(张振宇, 吴俊, 宋克峰, 等. 钛合金超微细磨削中磨削力和加工表面质量的研究. *机械工程学报*, 2022, 58(15): 75)
- [10] Tian X L, Wang L, Liu Q, et al. Construction and analysis of grinding force model of 20CrMnTi steel tooth surface. *J Mech Eng*, 2018, 54(3): 227
(田欣利, 王龙, 刘谦, 等. 20CrMnTi 钢齿面磨削力模型构建与分析. *机械工程学报*, 2018, 54(3): 227)
- [11] Dai C W, Yin Z, Ding W F, et al. Grinding force and energy modeling of textured monolayer CBN wheels considering undeformed chip thickness nonuniformity. *Int J Mech Sci*, 2019, 157–158: 221
- [12] Ding W F, Miao Q, Li B K, et al. Review on grinding technology of nickel-based superalloys used for aero-engine. *J Mech Eng*, 2019, 55(1): 189
(丁文锋, 苗倩, 李本凯, 等. 面向航空发动机的镍基合金磨削技术研究进展. *机械工程学报*, 2019, 55(1): 189)
- [13] Wang L, Tang X J, Wang L Y, et al. Mechanism of grinding-induced burns and cracks in 20CrMnTi steel gear. *Mater Manuf Processes*, 2019, 34(10): 1143
- [14] Wang L, Tian X L, Liu Q, et al. Grinding burn evaluation for 20CrMnTi steel based on binary images and neural network. *Int J Adv Manuf Technol*, 2017, 93: 4033
- [15] Li Y, Liu Y H, Wang J L, et al. Real-time monitoring of silica ceramic composites grinding surface roughness based on signal spectrum analysis. *Ceram Int*, 2022, 48(5): 7204
- [16] Wang S, Sun G Y, Zhao Q L, et al. Monitoring of ductile–brittle transition mechanisms in sapphire ultra-precision grinding used small grit size grinding wheel through force and acoustic emission signals. *Measurement*, 2023, 210: 112557
- [17] Ding S, Chen Z W, Zhang H, et al. Gear evaluation deviations-based crucial geometric error identification of five-axis CNC gear form grinding process. *J Manuf Processes*, 2023, 99: 663
- [18] Wang Q S. *Online Detection System of Grinding Performance of Microcrystalline Corundum Grinding Wheel Based on Multi-Sensor Fusion* [Dissertation]. Jinan: Shandong University, 2017
(王起硕. 基于多传感器融合的微晶刚玉砂轮磨削性能在线检测系统的研究[学位论文]. 济南: 山东大学, 2017)
- [19] Shen C H. Acoustic emission based grinding wheel wear monitoring: Signal processing and feature extraction. *Appl Acoust*, 2022, 196: 108863
- [20] Xiao Y L, Wang S L, Dong J P, et al. Online monitoring method of non-cylindrical wheel wear for gear grinding based on dynamic force model. *Mech Syst Signal Process*, 2024, 206: 110915
- [21] Sachin Krishnan P, Rameshkumar K. Grinding wheel condition prediction with discrete hidden Markov model using acoustic emission signature. *Mater Today Proc*, 2021, 46: 9168
- [22] Zhang P T. *Algorithm Study on Denoising and Feature Extraction of Gearbox Fault Vibration Signal* [Dissertation]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014
(张澎涛. 齿轮箱故障振动信号去噪及特征提取算法研究[学位论文]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014)
- [23] Bi G, Liu S, Su S B, et al. Diamond grinding wheel condition monitoring based on acoustic emission signals. *Sensors*, 2021, 21(4): 1054
- [24] Bi G, Zheng S, Zhou L. Online monitoring of diamond grinding wheel wear based on linear discriminant analysis. *Int J Adv Manuf Technol*, 2021, 115: 2111
- [25] Pan S, Ma L J, Yu X S, et al. Study on the influence of vibration characteristics on surface roughness in quick-point grinding and prediction model. *Int J Adv Manuf Technol*, 2023, 129: 2385