第 44 卷 第 4 期
2023 年 4 月

仪 器 仪 表 学 报
Chinese Journal of Scientific Instrument

Vol. 44 No. 4
Apr. 2023

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210860

基于 STFT 的织构涂层硬质合金表面振动解析方法*

佟 欣,王守猛
(哈尔滨理工大学机械动力工程学院 哈尔滨 150080)

摘 要:针对织构涂层复合工艺对硬质合金表面改性时存在消极振动的问题,提出一种基于织构涂层表面摩擦振动行为的解析方法来探索织构涂层复合工艺改性效果。因此,搭建了微织构 AlSiTiN 涂层硬质合金-钛合金磨盘摩擦磨损试验平台,基于短时傅里叶变换(STFT)与灰度算法对摩擦振动变化规律性映射和振动行为平稳时段进行了获取,进而分析了微织构 AlSiTiN 涂层工艺参数对硬质合金的改性效果。试验研究得出了微织构及 AlSiTiN 涂层对硬质合金表面耐磨改性效果最为积极的时间段,即自接触摩擦起第 5~25 min 的稳定作用时期,得出微织构及 AlSiTiN 涂层参数对硬质合金表面改性的影响机理,优选该复合改性方法抑制硬质合金表面消极摩擦振动的工艺参数,为提升硬质合金表面性能研究提供新思路。

关键词: 织构涂层;硬质合金;摩擦振动;短时傅里叶变换;灰度算法
中图分类号: TH140.7 TH117 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460·50

STFT-based surface vibration analysis method for textured coated cemented carbide

Tong Xin, Wang Shoumeng
(*School of Mechanical Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China*)

Abstract: To address the problem of negative vibration in the surface modification of cemented carbide by textured coating composite process, an analytical method based on the friction vibration behavior of textured coating surface is proposed to explore the modification effect of textured coating composite process. Therefore, the friction and wear test platform of micro textured AlSiTiN coated cemented carbide-titanium alloy grinding disc is established. Based on the short-time Fourier transform (STFT) and the gray algorithm, the regular mapping of friction vibration change and the stable period of vibration behavior are obtained. Then, the modification effect of micro-texture AlSiTiN coating process parameters on cemented carbide is analyzed. Experimental results show that the micro texture and AlSiTiN coating have the most positive effect on the wear resistance of cemented carbide surface. During the stable period of 5~25 min from self-contact friction, the influence mechanism of micro-texture and AlSiTiN coating parameters on the surface modification of cemented carbide is obtained. The process parameters of the composite modification method to suppress the negative friction vibration of the cemented carbide surface provide a new idea for improving the surface performance of cemented carbide.

Keywords: textured coating; hard alloy; vibration; STFT; gray conversion

0 引 言

硬质合金的用途非常广泛,当用作刀具材料来加工难加工工件时,会产生严重的磨损,使切削力变大、切削温度变高,对工件表面质量产生严重影响。采用表面织构和涂层技术是解决刀具磨损问题的常用方法。一些学者尝试将两种技术相结合,提出了织构化表面涂层的新概念,为刀具表面改性提供了新的思路[1]。因此,研究表面织构涂层材料对该技术在刀具领域的应用具有积极意义。织构涂层材料发生磨损后会激起层面振动,而层面振动行为恰恰映射出了织构涂层材料的状态,因此振动可作为检测织构涂层材料性能的优良指标。

收稿日期:2022-12-11 Received Date: 2022-12-11
*基金项目:国家自然科学基金(52005140)项目资助

目前,在对材料表面微织构、涂层摩擦行为分析的研究较为广泛。曹腾等[2]通过流体润滑摩擦实验测试了表面织构的摩擦性能,得出了织构单元长度、长宽比、面积越大,摩擦系数越小的研究结果。王丽丽等[3]研究了不同织构形态对轴承摩擦副的耐磨性能和承载能力的影响,得出了复合微织构能够为轴承提供更高的耐磨性和承载力、振动更小的结论。刘铭倩等[4]则研究了制动盘表面不同角度微沟槽对界面摩擦行为和振动噪声特性的影响,得出了 45°分布的沟槽降噪效果最佳。Wang 等[5]通过分析沟槽织构表面摩擦的振动与噪声行为因素得出,织构材料表面的摩擦尖叫与沟槽形织构的长、宽尺寸有关。高峰等[6]为了优化整体叶盘的阻尼减振,对应变依赖性硬涂层进行了多目标优化设计,得出涂层参数对整体叶盘振动特性的影响是互相约束的结论。Qin 等[7]通过为 TC4 合金制作仿生涂层来提高其耐磨性能,分析其对振动行为的降低能力来得出最优涂层的配比。可见,当前学者对微织构和涂层单体作用的研究分析较为广泛,如微织构几何形貌与参数对材料表面耐磨减振特性的提升,涂层的润滑效果对材料表面消极振动、噪声的抑制,而对材料表面织构与涂层双重处理协同优化的研究分析有所欠缺,对材料表面织构与涂层协同抑制消极振动的研究更为缺乏。因此,通过振动行为解析表面织构涂层改性抑振的研究,对提升材料耐磨属性而言,意义重大。

因此,本文以表面微织构 AlSiTiN 涂层硬质合金为研究对象,搭建摩擦磨损试验平台,通过间接解析试验捕获振动行为中所包含的特征信息来表征不同织构参数、涂层厚度的硬质合金表面耐磨属性,揭示其演变规律与对表面的作用机理。解析后获得了振动最平稳的时段,并通过极差与响应曲面分析法,研究了微织构与 AlSiTiN 涂层材料对表面消极振动抑制作用机理,并优选了该复合工艺参数,为织构涂层硬质合金的研究提供了新颖的分析方法。

1　摩擦磨损试验

1.1　摩擦磨损试验材料选择

摩擦磨损试验中选择硬质合金材料为 YG8,主要成分是 WC 和粘结剂 Co。硬质合金 YG8 型号通常被作为刀具来加工钛合金材料,为探寻二者之间的工艺性,对磨金属选择钛合金,材料为 Ti6Al4V。研究表面织构涂层硬质合金-钛合金摩擦副的摩擦振动行为,对后续实现钛合金的高效加工处理具有积极意义。表 1 为试验材料的物理参数,试验材料基本尺寸图如图 1 所示,为配合摩擦磨损机工作将对磨工件设计为此形状。

表 1　试验材料物理参数

Table 1　Physical parameters of test materials

物理性能	Ti6Al4V	YG8
密度/(kg·m^{-3})	4 400	14 600
弹性模量/GPa	110	510
硬度/HRC	33	70.7
抗拉强度/MPa	539	1 500

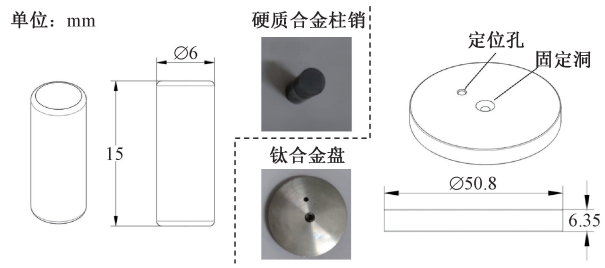


图 1　试验材料尺寸图

Fig. 1　Test material size diagram

1.2　摩擦磨损试验设计

摩擦磨损试验根据硬质合金表面微织构参数和涂层厚度的不同设计了六因素三水平正交试验,所有因素水平如表 2 所示,六因素分别为涂层厚度 h、激光功率 P、扫描速度 v、扫描次数 n、微织构直径 d、微织构间距 l。硬质合金表面采用先制备微织构后涂层的方式处理,根据学者们的研究,激光参数 P、v、n 涂层厚度 h 会与微织构直径 d 产生交互,多出 4 组交互作用列[8-9]。

因此,六因素三水平正交试验 4 组交互作用共计 27 组试验。

1.3　硬质合金表面微织构 AlSiTiN 涂层制备

硬质合金表面优先采用激光技术制备微织构,使用北京正天 ZTQ-50 型光纤激光打标机进行制备,利用高能激光束瞬间照射熔融出试验要求尺寸的微坑。

表 2　正交水平

Table 2　Orthogonal level table

因素	h/μm	P/W	v/(mm·s^{-1})	n/次	d/μm	$h\cdot d$	l/μm	$P\cdot d$	$v\cdot d$	$n\cdot d$
	2.7	35	1 500	6	40	1	130	1	1	1
水平	2.9	40	1 600	7	50	2	150	2	2	2
	3.1	45	1 700	8	60	3	170	3	3	3

摩擦磨损试验中涂层材料选用更为坚硬、抗磨的 AlSiTiN 四元涂层材料[10-11]。硬质合金表面涂层方式使用技术应用广泛的物理气相沉积法(physical vapor deposition,PVD)进行涂层制备与涂装。硬质合金表面织构涂层材料制备的基本过程如图 2 所示。

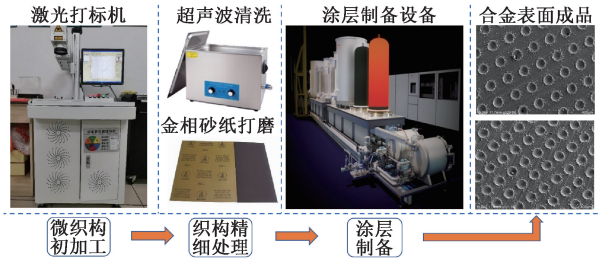


图 2 硬质合金表面加工过程

Fig. 2 Surface machining process of cemented carbide

1.4 摩擦磨损试验平台搭建

摩擦磨损试验环境为干摩擦,试验参数如下:摩擦相对转速为 100 r/min,工件接触面圆心摩擦距离为 18 mm,对磨时间为每件 30 min,每过 5 min 采集一次 60 s 的振动信号,施加力为 40 N[12]。摩擦磨损试验将硬质合金柱和钛合金盘固定装载到 CETR 多功能摩擦磨损测试机主平台上开展对磨试验,采用澄科 CT1010SLFP 三轴加速度传感器收集试验过程中产生的振动行为数据,试验前使用超景深显微镜观察制备表面,试验后使用 X 射线能谱分析仪与扫描电子显微镜来观察硬质合金磨损表面。试验整体装置如图 3 所示。

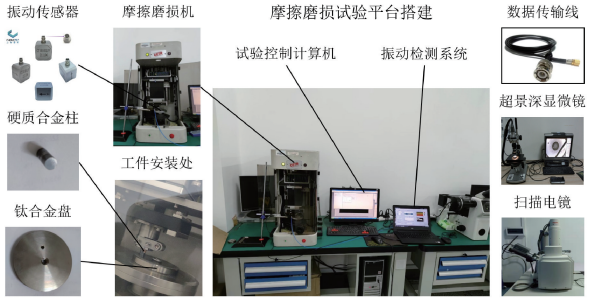


图 3 试验整体装置

Fig. 3 Test overall device

2 基于 STFT 的振动信号时频分析

2.1 摩擦磨损试验振动数据预处理

摩擦磨损试验采集到的振动信号采用短时傅里叶变换(short-time Fourier transform,STFT)变换进行时频分析处理[13-14]。振动信号基于小波变换方法进行去噪处理[15-16]。图 4 所示为信号数据预处理流程和降噪图像,降噪图像中,浅色部分为降噪前,深色部分为降噪后,保留了原信号良好的特征性。

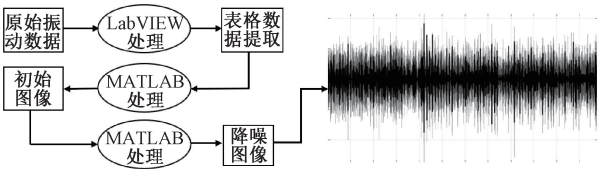


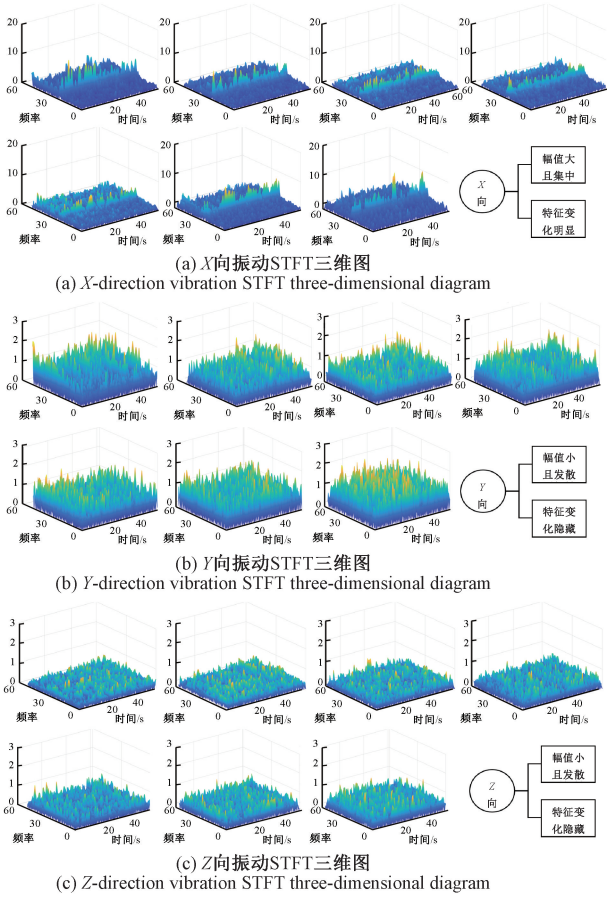
图 4 信号数据预处理

Fig. 4 Signal data preprocessing

2.2 振动行为三维时频图像特征初值提取分析

1)振动行为动向解析选择

试验过程中,振动传感器采集到 X、Y、Z 三坐标方向的振动行为,图 5 所示为例组的三向时频三维图,图 5(a)为 X 向激振三维时频图,其幅值规律随时间变化明显,幅值频率集中,解析时的特征映返效果好,图 5(b)、(c)中,Y、Z 向幅值虽有微弱的渐进变动,但幅值低,特征规律藏匿,后续解析提取困难。综合考虑,X



(a) X向振动STFT三维图

(a) X-direction vibration STFT three-dimensional diagram

(b) Y向振动STFT三维图

(b) Y-direction vibration STFT three-dimensional diagram

(c) Z向振动STFT三维图

(c) Z-direction vibration STFT three-dimensional diagram

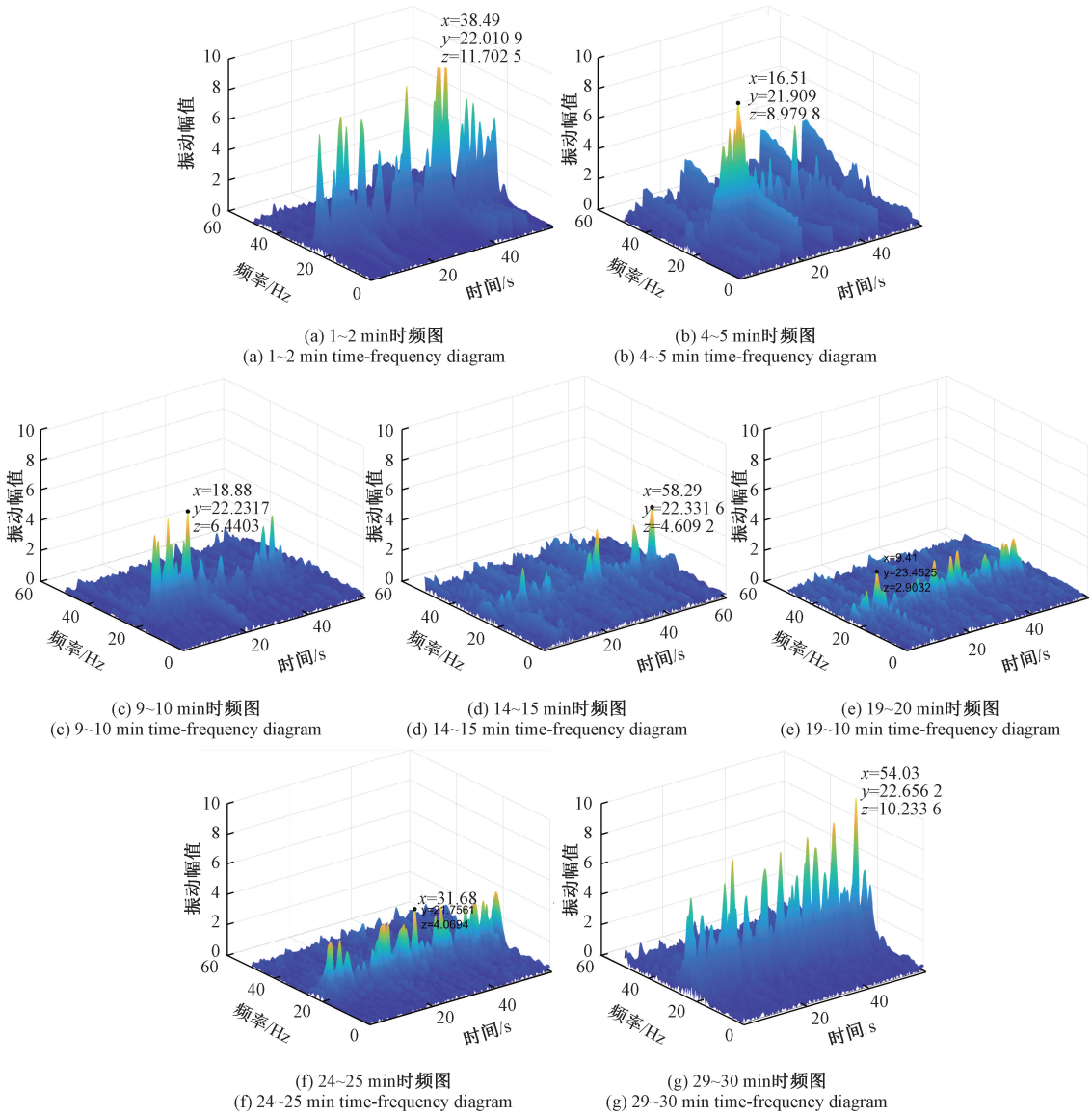
图 5 三向时频图

Fig. 5 Three-way time-frequency diagram

轴的振动行为解析效果最具代表性,后续则主要对 X 轴振动行为进行解析操作。

2)三维时频图像规律与极值特征

图 6 所示为一组 X 方向振动三维时频图,算出其极值与对应时间、频率坐标。计算得出,信号极峰均在 22 Hz 左右出现,频率集中,时间轴上幅值连续。故使用降噪信号极点幅值进行分析是较为可靠的初步解析方式。



(a) 1~2 min时频图
(a) 1~2 min time-frequency diagram

(b) 4~5 min时频图
(b) 4~5 min time-frequency diagram

(c) 9~10 min时频图
(c) 9~10 min time-frequency diagram

(d) 14~15 min时频图
(d) 14~15 min time-frequency diagram

(e) 19~20 min时频图
(e) 19~10 min time-frequency diagram

(f) 24~25 min时频图
(f) 24~25 min time-frequency diagram

(g) 29~30 min时频图
(g) 29~30 min time-frequency diagram

图 6　三维时频特征图

Fig. 6　Three-dimensional time-frequency characteristic diagram

3)三维时频特征曲线变化机理

降噪后的三维时频图像极点幅值具有良好的振动特征代表性,其值极易提取且大小反映了振动行为的激振极限,适合作为特征初值进行分析。图 7 所示为极点幅值规律曲线,从图 7(a)可大致分离出 3 种极点幅值变化,进行映射机理简述。

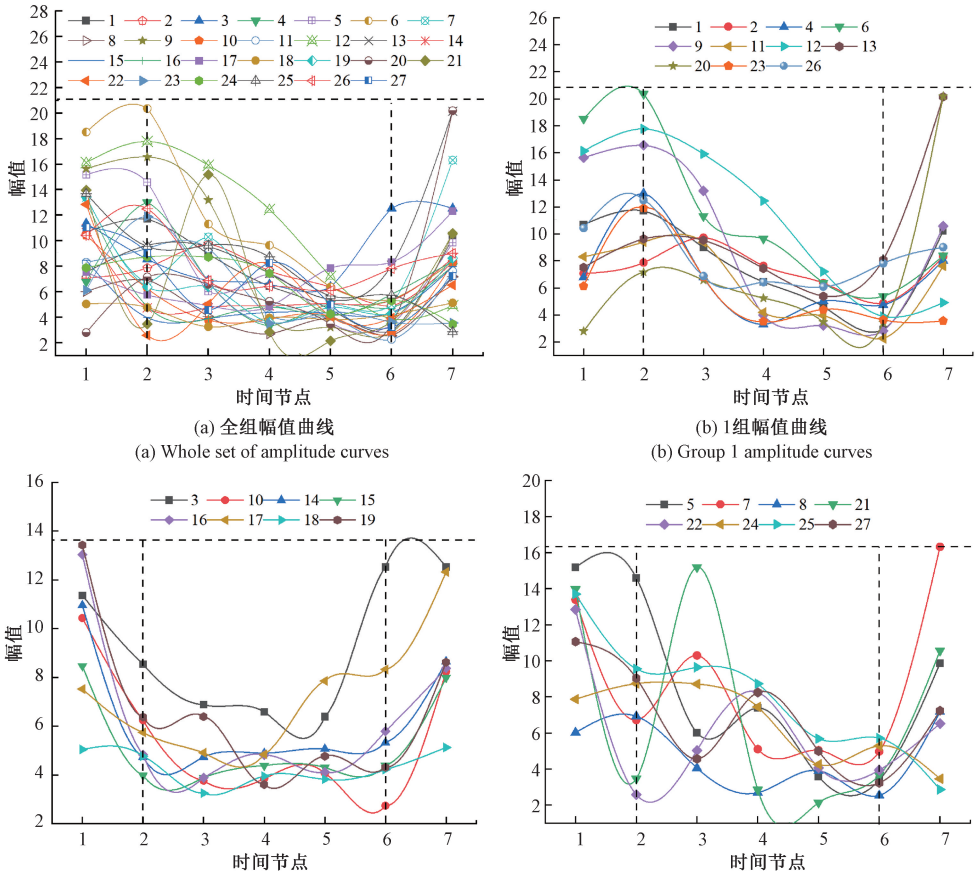
(1)硬质合金表面材料为复合工艺,材料与对磨基体初接触契合度低,产生点面接触摩擦,导致起始振动过激,振动信号幅值高,此振动变化映射在图 7(b) 1 组时间节点 1 和 2 之间,而图 7(c)2 组曲线缺失此变化规律,无磨合阶段表现,振动稳定时间长,但存在波动。

(2)时间节点 2 之后,磨合阶段结束,接触表面摩擦状况改善,织构涂层材料逐渐发挥其抗磨润滑、积屑作用,振动变化与 1 组时间节点 2~6、2 组节点 1~6 幅值规律相同,基本以 6 时间节点幅值为最小。

(3)时间节点 6 之后,织构涂层材料磨损殆尽,硬质合金表面摩擦况状恶化,表面织构涂层机能失效,摩擦产生激烈振动,振动幅值急速增大,出现 1、2 两组时间节点 6、7 的幅值趋势。

(4)图 7(d)中 3 组由于试验误差与单幅值分析片面性的叠加干扰,导致时间节点 5 之前的曲线处于无序状态,对曲线整体趋势造成干扰。起主要作用的极点幅值趋势曲线组只有 1、2 组两种。

使用三维时频极点幅值做映射分析,可得最初的振动映射理论,作为解析的基础框架,为后续映射机理深入剖析提供了预先估计和方向选择。



(a) 全组幅值曲线
(a) Whole set of amplitude curves

(b) 1组幅值曲线
(b) Group 1 amplitude curves

(c) 2组幅值曲线
(c) Group 2 amplitude curves

(d) 3组幅值曲线
(d) Group 3 amplitude curves

图 7 幅值走势曲线

Fig. 7 Amplitude trend curves

3 基于灰度算法的振动时频谱图特征研究

三维时频极点幅值分析得到了最初的映射理论,接下来采用一种对时频图谱进行灰度特征提取的方法平替平均幅值来映射振动行为[17-18]。图 8 所示为 STFT 时频图像灰度分析的基本流程,大致为 3 个过程。

图 8 灰度转化分析流程

Fig. 8 Flow of gray transform analysis

3.1 振动二维谱图时频特征继承及灰度转化

1)二维时频谱图

二维时频图将时频幅值信息转化为局部亮点储存在图中。图 9 所示是一组时间节点相邻的取样谱图与对应三维图。因谱图继承三维图峰值特征不同,使其亮度不同,极值峰与周围峰差大则图片越暗,反之越亮。

2)二维时频谱图继承特征灰度转化

图 10 所示为二维时频谱图灰度化对比,时频谱图颜色、亮度特征转化为了灰度值变量储存在了灰度图像中,便于进行数据提取[19-20]。

3)振动时频灰度特征值提取

灰度图像进行灰度值统计时,常用的特征参数有均值 μ、方差 σ^2,灰度均值反映各等级下灰度像素的平均程

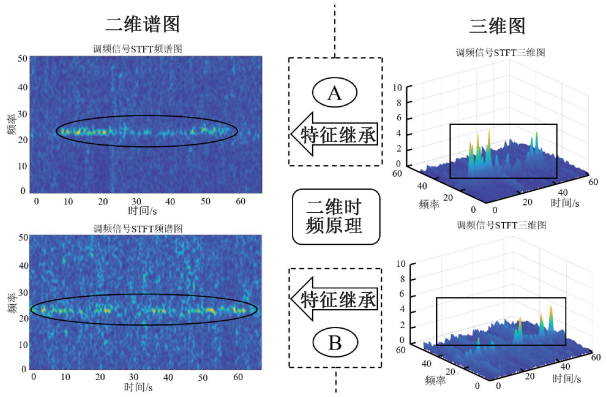


图 9　二维与三维谱图

Fig. 9　Two-dimensional and three-dimensional spectra

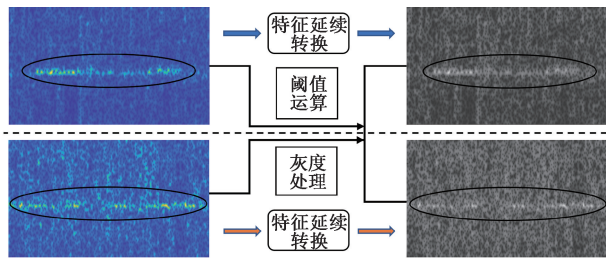


图 10　灰度化二维时频谱图

Fig. 10　Gray two-dimensional time-frequency spectrum

度,即灰度图像整体亮度,整张图越明亮,灰度均值越大,反之则小。灰度方差反映灰度图中各等级灰度像素的离散程度,离散程度越大,方差越大,反之则小。

3.2　时频灰度特征与振动行为映射

1)时频灰度特征值选择

灰度化处理时,人工操作机器截屏不能完全识别像素边界,导致图片存在截取误差,误差图像灰度化后会影响灰度像素统计值。取 3 幅近似原图和误差操作例图进行值获取模拟对比。经测试,二维时频图片缺少无特征影响的像素区块后得出,其误差性操作对均值的变化影响极小,误差不到 0.5%,对方差值的影响较大,误差高达 17%,最低误差值也远远高于均值误差,结果如表 3 所示。数据处理在有误差截图的影响下,采用灰度均值进行特征值分析,其准确度要远高于使用方差值。

图 11 所示为取样谱图的灰度像素统计直方图,图 11(b)高灰度等级下像素点数多于图 11(a),经计算,图 11(a)灰度均值为 85,图 11(b)灰度均值为 99,可得图 11(b)亮度高于图 11(a),与实际结论相符,该特征值提取方法可行。

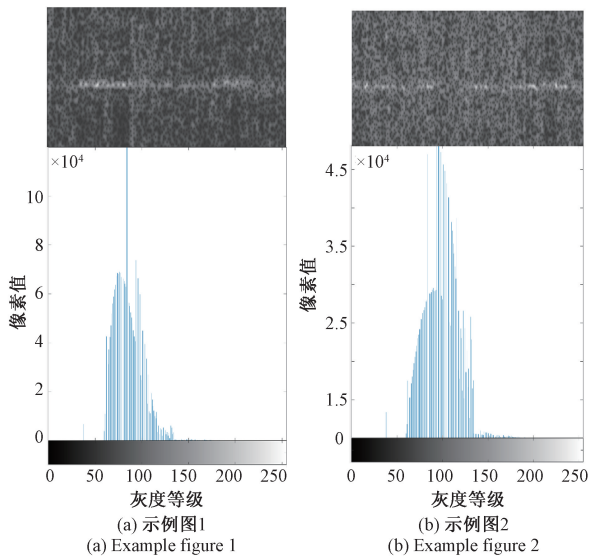
2)时频灰度均值规律

将 27 组数据以 3 组分条热图的方式进行统计如图 12(a)~(c)所示,并得平均灰度均值规律曲线如图 12(d)所示。

表 3　均值、方差误差

Table 3　Mean and variance error

参数	均值			方差		
近似原图	85.365 7	84.365 2	78.562 3	290.239 4	296.356 8	301.236 8
误差截图	85.459 8	84.236 5	78.236 5	299.464 8	245.369 7	263.214 5
绝对差值	0.094 1	0.128 7	0.325 8	9.225 4	50.987 1	38.022 3
误差/%	0.11	0.15	0.41	3.10	17.20	12.62



(a) 示例图1
(a) Example figure 1

(b) 示例图2
(b) Example figure 2

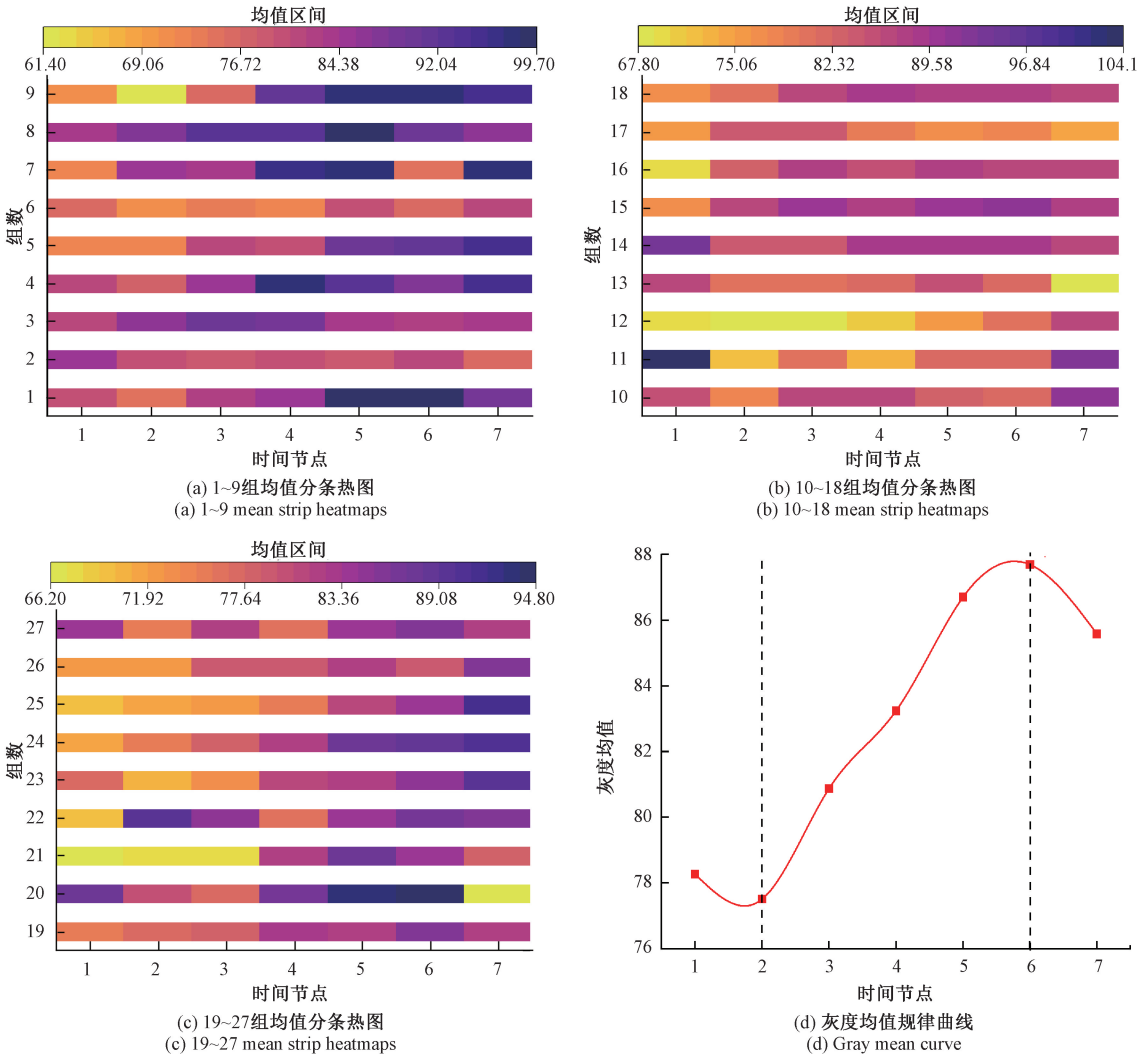
图 11　灰度直方图

Fig. 11　Gray histogram

3)时频灰度均值特征规律变化机理

因微织构坑与涂层材料的双重工艺加工,微凹坑四周易产生少量材料淤积,致使试验起始安装时硬质合金与钛合金盘表面接触不良,为点-面接触,需要进行短暂的磨合,磨合时产生的热量使点-面处材料受热软化,遭受粘连、剃除并滚入到织构坑内,在微织构坑一侧堆积,产生犁耕效应,破坏表面形貌,造成第 2 磨损振动,如图 13 所示。解析数据时发现,2、10、11、14 组起始时间以不正常方式出现较大灰度均值,与犁耕效应的形成密切相关。故起始时间节点 1 和 2 之间灰度均值有所减小,映射出振动较为激烈。

随着试验对磨推进,工件表面间变为面-面接触,微织构积屑改善摩擦接触状态,涂层材料柔化摩擦表面、抑制摩擦裂纹产生和扩散,此时间的摩擦表面温度恢复正常,表面软性材料磨损消失,余下坚硬部分抵抗磨损,犁耕效应消失,如图 14 所示。故时间节点 2~6 灰度均



(a) 1~9组均值分条热图
(a) 1~9 mean strip heatmaps

(b) 10~18组均值分条热图
(b) 10~18 mean strip heatmaps

(c) 19~27组均值分条热图
(c) 19~27 mean strip heatmaps

(d) 灰度均值规律曲线
(d) Gray mean curve

图 12 灰度均值统计特征图

Fig. 12 Statistical characteristics of gray mean

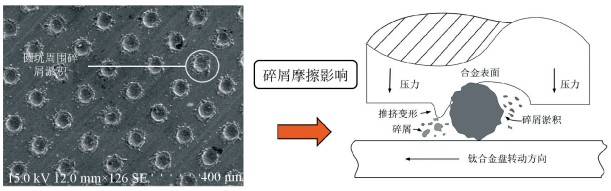


图 13 初始振动影响机理

Fig. 13 Influence mechanism of initial vibration

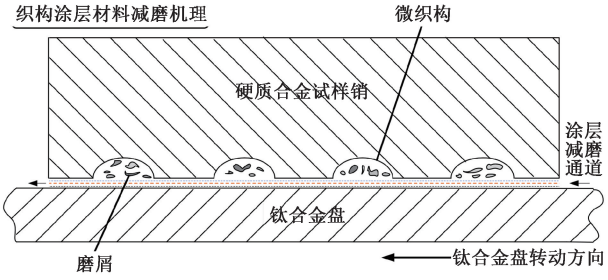


图 14 织构涂层材料作用机理

Fig. 14 Mechanism of texture coating material

值逐渐增大,映射出振动行为逐渐缓和,整体摩擦状态步入最佳。

随着对磨试验的进行,硬质合金表面织构涂层材料工作系统逐渐瓦解、崩溃,露出硬质合金基面,微织构坑积屑填平后随涂层一起被磨损殆尽,摩擦表面润滑状态恶化,摩擦温度再次上升,表面残余涂层材料软化出现粘连,摩擦推动堆积,二次形成犁耕效应。Al 元素受热与空气反应生成局部氧化膜,元素含量下降,分割磨损接触区域,Ti 元素含量上升,钛合金磨屑粘结在硬质合金表面,导致表面磨损不均匀,微织构 AlSiTiN 涂层材料-钛合金摩擦副完全失效,表面变化如图 15 所示。故时间节点 6 和 7 之间灰度均值快速减小,振动行为再次变激烈。

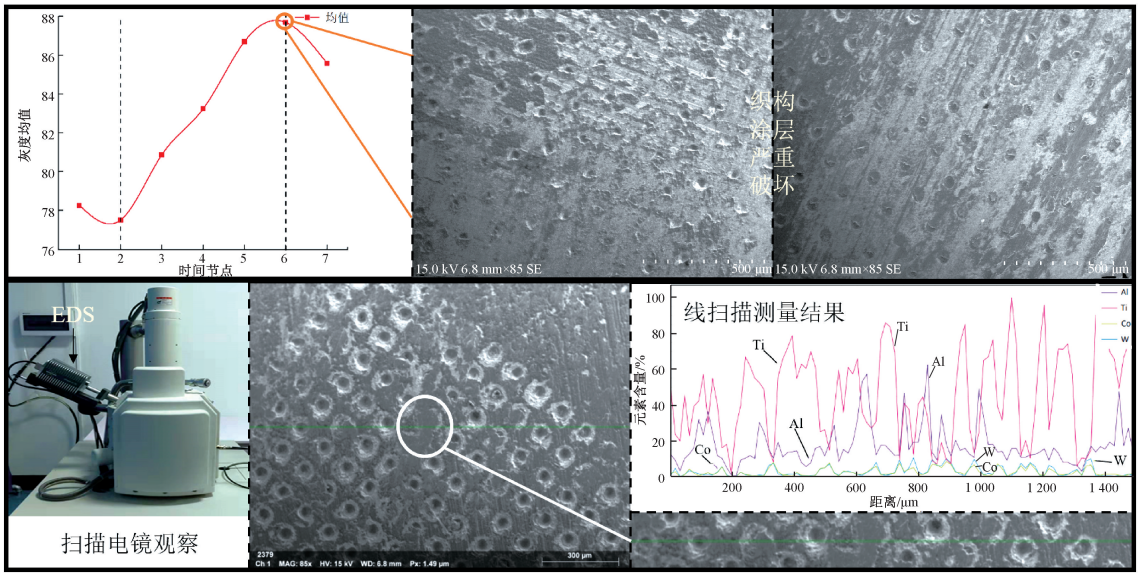
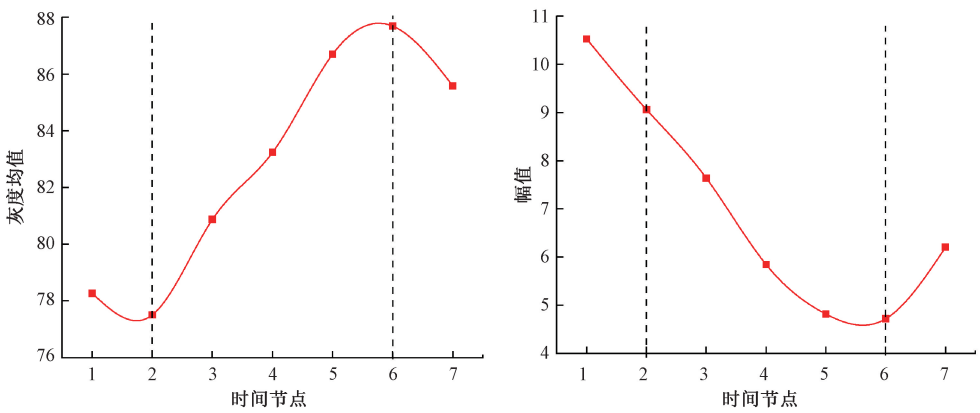


图 15　表面磨损图像

Fig. 15　Surface wear image

4)时频灰度均值与时频极点幅值振动映射比对

图 16 所示为时频极点幅值、平均灰度均值规律对比曲线。其中图 16(a)为灰度均值-振动映射趋势图,灰度均值走势严格跟随振动行为,映射的振动行为与实际相符,其均值走势也跟随硬质合金表面织构涂层材料磨损状况。图 16(b)为时频极点幅值-振动映射曲线走势,两者对振动行为的映射大致上是相同的,但幅值曲线时间节点 2 之前的映射规律较实际有所差异,少量无磨合阶段极点幅值曲线图像覆盖掉了原本规律,造成了特征藏匿。时频极点幅值在时间节点 2 之后映射振动行为规律与实际验证规律相符,映射可靠。二者相比,极点幅值获取简单但存在特征藏匿,灰度均值映射的振动行为更完善、更细致,后续深入解析则采用更可靠的灰度均值数据。



(a) 灰度均值-振动趋势
(a) Gray mean - vibration trend diagram

(b) 极点幅值-振动趋势
(b) Spectrum amplitude-vibration trend diagram

图 16　振动映射规律曲线

Fig. 16　Vibration mapping curves

4　基于响应曲面法的微织构 AlSiTiN 涂层参数敏感性研究

4.1　时频灰度特征与振动行为映射

1)极差分析

将每组灰度均值进行平均值求取,作为极差分析的试验数据,结果如表 4 所示,进行数据统计分析,得出各因素影响结果,进行最优材料参数选取。

2)极差分析织构涂层材料参数影响

极差分析得出对灰度均值影响较大的因素主要是涂层厚度 h、扫描速度 v 和 $P\cdot d$。

(1)涂层厚度 h 的影响最大,试验表明,随着涂层厚度的增加,基膜结合力会逐渐减弱,涂层在外力作用下容易剥落,易导致钛合金接触表面摩擦粘结,形成微观

表 4 极差分析

Table 4 Range analysis table

试验序号	h/μm	P/W	v/(mm·s^{-1})	n/次	d/μm	$h\cdot d$	l/μm	$P\cdot d$	$v\cdot d$	$n\cdot d$
K_{j1}	763.98	736.72	744.74	742.69	747.85	752.35	752.25	749.29	751.35	737.14
K_{j2}	748.02	748.76	729.21	739.03	746.29	740.45	740.45	748.66	736.45	741.83
K_{j3}	718.87	745.36	756.88	749.10	736.69	738.03	738.03	732.88	743.02	751.86
$\overline{K_{j1}}$	254.69	245.57	248.25	247.56	249.28	250.78	250.78	249.76	250.45	245.71
$\overline{K_{j2}}$	249.34	249.59	243.07	246.34	248.76	246.82	246.82	249.55	245.48	247.28
$\overline{K_{j3}}$	239.61	248.45	252.29	249.70	245.56	246.01	246.01	244.29	247.67	250.62
R_j	15.05	4.01	9.22	3.36	3.72	4.77	4.54	5.47	4.97	4.91
排序	1	8	2	10	9	6	7	3	4	5

缺陷,粘着磨损和氧化磨损进一步撕裂涂层,碎屑会迅速填满微织构凹坑,使其提前丧失积屑功能,摩擦状态恶化,摩擦温度上升,材料吸温变形。故涂层厚度 h 取较小值即可获得其表面抗磨、润滑效果。

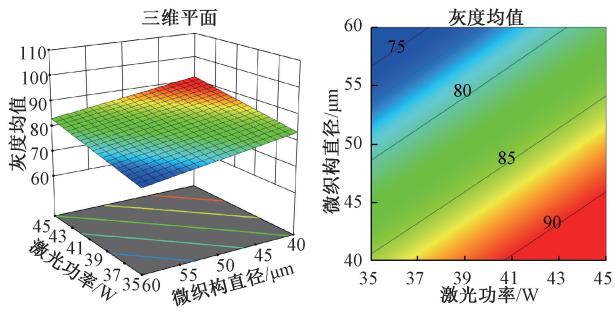
(2)扫描速度 v 对灰度均值的影响较为显著。扫描速度越慢,硬质合金基体表面正向吸收激光能量越多,熔融物烧蚀越彻底,提高了基体表面质量,增强抗磨能力,但过慢的扫描速度容易造成硬质合金基体过度烧蚀,导致表面质量又降低。扫描速度越快,激光作用硬质合金基体表面停留的时间越短,冲击能量越低,材料表面受热变形应力值减小,硬质合金基体抵抗恶劣磨损变形的能力越强,但不利于烧蚀表面杂质、提高基体表面质量。

(3)$P\cdot d$ 作用影响采用响应面法分析。如图 17 所示,两者几乎为线性关系交互变化,当微织构直径 d 为最小值 40 μm 时,激光功率 P 增大,灰度均值增大,振动行为抑制效果最佳,对抗磨性影响最积极。分析原因,微织构直径最小时,激光功率增大,单位时间内的激光热流密度增大,激光束光斑中心区硬质合金表面吸收更多的能量,加工微织构时覆盖表面更大,使内表面残屑彻底融化铺平,表面质量改善,微织构积屑能力提升、耐磨性更强。微织构直径最大、激光功率最小时,交互作用影响最弱,此时微织构内坑面积大,而低功率的激光能量不能将内表面所有残屑彻底融化,导致微织构表面质量较差,易被碎屑堆积磨损,容易提前丧失积屑作用。根据分析,优选参数 $P=45$ W,$d=40$ μm,此参数下的灰度均值最大,微织构 AlSiTiN 涂层材料耐磨性好,振动平稳。

4.2 基于响应曲面法的微织构 AlSiTiN 涂层参数优选

极差参数选优结果缺失交互干涉作用,参数优选当以交互作用响应面(图 18)分析为准。极差分析结合图 18 交互作用响应面有如下结果。

1)硬质合金表面材料制备先打织构后涂层,当涂层厚度 h 增大时,覆盖在微织构坑内的涂层材料增加,织构直径 d 相对意义上减小,积屑体积减小,产生涂层厚度与



(a) $P\cdot d$响应面
(a) $P\cdot d$ response surface

(b) $P\cdot d$响应面等高线图
(b) $P\cdot d$ response surface contour map

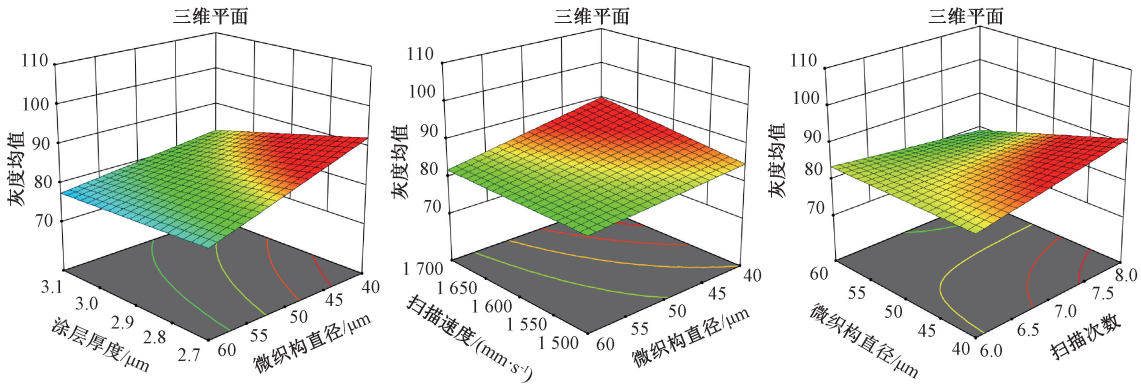
图 17 $P\cdot d$ 作用响应曲面

Fig. 17 $P\cdot d$ Response surface

织构直径交互作用。根据图 18(a)交互作用响应面结合上文涂层厚度分析,随着交互曲面红色区域上升,即涂层厚度越小、微织构直径越小时,对灰度均值的影响最积极,与极差分析得出涂层厚度参数选择相同,此参数更有利于抑制消极振动的产生。

2)不同扫描速度参数搭配微织构直径会影响微织构积屑功能,产生交互作用。经图 18(b)交互响应曲面分析,当扫描速度 v 取值最大、微织构直径 d 取值最小,此参数下的微织构表面积较小,激光扫描覆盖时间最佳,微织构表面质量最好、积屑能力最强,两者的交互作用对灰度均值的影响最积极,最有利于抑制消极摩擦振动的产生。

3)通过图 18(c)交互作用响应面可知,激光扫描次数少、微织构直径较大时,微织构内表面积增大,激光逐次叠加倾泻到硬质合金基体表面的总能量不足,微织构坑内存在残留杂质,表面质量差,涂层时的基膜结合力低,影响涂层润滑作用。当扫描次数取最多、微织构直径取最小值时,交互作用对灰度均值的影响最积极,此时微织构直径越小,微坑内表面积越小、残留杂质越少,激光扫描次数多,微织构表面吸收激光能量次数增多,累积



(a) $h \cdot d$响应面
(a) $h \cdot d$ response surface

(b) $v \cdot$d响应面
(b) $v \cdot$d response surface

(c) $n \cdot d$响应面
(c) $n \cdot d$ response surface

图 18　交互作用响应面

Fig. 18　Interaction response surface

能量增大,利于清理微织构表面残留杂质,使微织构表层基面更坚固,增强抗磨能力,利于抑制消极摩擦振动的产生。

综上交互作用响应面分析,结合极差分析结果,优选微织构与 AlSiTiN 涂层参数如表 5 所示,此参数下的振动时频灰度特征均值最高,硬质合金表面摩擦振动最为稳定,织构涂层材料有效工作持续时间最长。

由表 5 得出的最优参数方案为试验设计的第 8 组。根据摩擦磨损试验,得出了每组参数方案下的摩擦力值,第 8 组即优选参数方案的摩擦力值为 14.76 N,与试验设计中其他方案相比,微织构涂层硬质合金与钛合金盘接触表面的摩擦力最小,摩擦系数最小,因而此参数下的消极振动平均幅值更低,抑制消极振动的效果会更好。表 6 所示为优选第 8 组方案下摩擦力与其他组摩擦力数据。

表 5　因素选择

Table 5　Factor selection table

因素	h/μm	P/W	v/(mm·s^{-1})	n/次	d/μm	l/μm
参数	2.7	45	1 700	8	40	130

表 6　摩擦力数据

Table 6　Friction data table

	1 组	2 组	3 组	4 组	5 组	6 组	7 组	9 组	10 组	11 组	12 组	13 组	14 组
8 组 14.76 N	15.92 N	16.27 N	16.35 N	16.26 N	16.41 N	14.91 N	15.19 N	14.93 N	14.96 N	14.79 N	15.22 N	15.79 N	15.54 N
	15 组	16 组	17 组	18 组	19 组	20 组	21 组	22 组	23 组	24 组	25 组	26 组	27 组
	14.81 N	14.96 N	15.15 N	15.61 N	15.89 N	15.42 N	14.81 N	16.46 N	14.73 N	14.89 N	14.79 N	14.77 N	15.42 N

5　结　　论

本文使用时频极点幅值与 STFT 二维图谱灰度算法处理所得灰度均值对摩擦磨损试验振动行为规律进行了映射分析,得出后者的抗干扰能力更强、映射更精确。振动解析得出硬质合金表面微织构 AlSiTiN 涂层材料自接触摩擦 5 min 内为表面接触磨合阶段,5~25 min 为表面织构涂层材料稳定作用时期,对硬质合金表面耐磨改性效果最为显著,在 25 min 后表面织构涂层材料减磨作用基本消失。微织构 AlSiTiN 涂层参数影响分析得出对硬质合金表面改性效果影响最高的参数为涂层厚度 h、扫描速度 v 和激光功率 P 与微织构直径 d 的交互。其中,当涂层厚度 h 逐渐增大时,基膜结合力则逐渐减弱,导致涂层结合不牢,容易提前磨损失效。扫描速度 v 过慢能提高硬质合金基体表面质量但会导致过度烧蚀,过快能保证硬质合金基体表面不会承受过度能量冲击但容易使表面残留杂质。$P \cdot d$ 交互作用下,激光功率 P 与微织构直径 d 的不同搭配影响了微织构表面质量,从而影响摩擦振动的变化。通过振动行为-磨损映射结合因素响应曲面分析,优化出了微织构与 AlSiTiN 涂层材料参数:涂层厚度 h=2.7 μm、激光功率 P=45 W、扫描速度 v=1 700 mm/s、扫描次数 n=8、微织构直径 d=40 μm、微织构间距 l=130 μm,扩展了硬质合金材料耐磨领域的应用范围。

参考文献

[1] 邓建新,孟莹,张志慧,等. 织构化表面涂层的研究进展[J]. 航空制造技术, 2022,65 (7): 22-35.
DENG J X, MENG Y, ZHANG ZH H, et al. Research progress of textured surface coatings [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022,65 (7): 22-35.

[2] 曹腾,马文娟,袁静,等. 超声振动切削表面织构摩擦性能研究[J]. 工具技术, 2022, 56(8): 101-105.
CAO T, MA W J, YUAN J, et al. Study on friction properties of ultrasonic vibration cutting surface texture [J]. Tool Technology, 2022, 56 (8): 101-105.

[3] 王丽丽,张伟,葛雪,等. 复合微织构排列方式对轴承润滑性能的影响[J]. 中国表面工程,2023,36(1): 145-155.
WANG L L, ZHANG W, GE X, et al. Effect of composite micro-texture arrangement on bearing lubrication performance [J]. China Surface Engineering, 2023,36(1):145-155.

[4] 刘铭倩,王东伟,李建熹,等. 带沟槽表面的制动盘界面摩擦磨损及振动噪声特性[J]. 振动与冲击,2018, 37(1): 236-240.
LIU M Q, WANG D W, LI J X, et al. Friction and wear and vibration noise characteristics of brake disc interface with grooved surface [J]. Vibration and Impact, 2018, 37 (1): 236-240.

[5] WANG D W, MO J L, WANG Z G, et al. Numerical study of friction-induced vibration and noise on groove-textured surface[J]. Tribology International, 2013, 64: 1-7.

[6] 高峰,刘秀婷,俞斌. 非线性硬涂层整体叶盘振动参数的多目标优化设计[J]. 航空动力学报,2022, 37(1): 103-113.
GAO F, LIU X T, YU B. Multi-objective optimization design of vibration parameters of nonlinear hard-coating blisk [J]. Aerodynamics, 2022, 37 (1): 103-113.

[7] QIN S Q, SHI X L, XUE Y W, et al. Tribological behaviors and friction-induced vibration and noise performance of TC4 with bionic coating prepared by laser additive manufacturing [J]. Journal of Materials Engineering and Performance,2021, 30(6):1-15.

[8] 郑凯瑞,杨发展,姜芙林,等. 激光功率与扫描速度对微织构形貌影响试验研究[J]. 机床与液压,2022, 50(1): 61-65.
ZHENG K R, YANG F ZH, JIANG F L, et al. Experimental study on the influence of laser power and scanning speed on micro-texture morphology [J]. Machine and Hydraulic, 2022,50 (1): 61-65.

[9] TONG X, HAN P, YANG SH C. Study of the friction behavior of AlCrN coated micro-textured surfaces [J]. Tribology International, 2022, 177(1):107985.

[10] 范其香,林静,王铁钢. 刀具涂层材料的最新研究进展[J]. 表面技术,2022, 51(2): 1-19, 28.
FAN Q X, LIN J, WANG T G. The latest research progress of tool coating materials [J]. Surface Technology, 2022, 51 (2): 1-19, 28.

[11] 费加喜,赵升升,吴正涛,等. AlTiXN/AlTiN(X=Cr,Si)纳米多层涂层的制备及铣削性能研究[J]. 真空科学与技术学报,2018, 38(3): 199-207.
FEI J X, ZHAO SH SH, WU ZH T, et al. Preparation and milling performance of AlTiXN/AlTiN (X=Cr,Si) nano-multilayer coatings [J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2018, 38 (3): 199-207.

[12] YANG S C, SUN J K, GOU Y D, et al. Wear life prediction of cemented carbide microtextured surface[J]. Materials Science & Engineering B, 2020, 262 (1): 114685.

[13] 胡泰洋,邵晓浪,肖孟煊,等. 一种线性调频连续波探测抗雷达辐射源干扰方法[J]. 仪器仪表学报,2022, 43(8):253-260.
HU T Y, SHAO X L, XIAO M X, et al. A method of linear frequency modulated continuous wave detection against radar emitter interference [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43 (8): 253-260.

[14] 康守强,刘哲,王玉静,等. 基于改进 DQN 网络的滚动轴承故障诊断方法[J]. 仪器仪表学报,2021,42(3): 201-212.
KANG SH Q, LIU ZH, WANG Y J, et al. Rolling bearing fault diagnosis method based on improved DQN network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021,42 (3): 201-212.

[15] 吴叶丽,行鸿彦,李瑾,等. 改进阈值函数的小波去噪算法[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(4):9-16.
WU Y L, XING H Y, LI J, et al. Wavelet denoising algorithm based on improved threshold function [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022,36 (4): 9-16.

[16] 应铭,冯国胜,贾素梅,等. 基于 DSP 的柴油机振动信号小波降噪实时性研究[J]. 内燃机学报,2022,40(4):345-350.
YING M, FENG G SH, JIA S M, et al. Real-time research on wavelet de-noising of diesel engine vibration signal based on DSP [J]. Journal of Internal Combustion Engine, 2022,40 (4): 345-350.

[17] 黄朝明,于洪亮,关德林,等. 摩擦振动时频图像特征提取[J]. 振动与冲击,2012, 31(7): 46-49,62.
HUANG CH M, YU H L, GUAN D L, et al. Frictional vibration time-frequency image feature extraction [J]. Vibration and Shock, 2012, 31 (7): 46-49,62.

[18] 符凯. 基于 HHT 的非平稳信号特征提取方法及应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2015.
FU K. Research on feature extraction method and application of non-stationary signal based on HHT [D]. Chongqing:Chongqing University, 2015.

[19] 汪炜怡,徐青山,杨明翰. 基于光学灰度图像辨识的系统故障诊断方法[J]. 量子电子学报,2019,36(6):699-704.
WANG W Y, XU Q SH, YANG M H. System fault diagnosis method based on optical grayscale image identification [J]. Quantum Electronics Journal, 2019, 36 (6): 699-704.

[20] HAN H Y, YANG D SH, QIN J. Hidden features extraction and amplification based on eigenvalue imaging and gray-level grouping for bearing fault diagnosis [J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics,2022, DOI:10.1007/s13042-022-01612-9.

作者简介

佟欣,2013 年于哈尔滨理工大学获得学士学位,2016 年于哈尔滨理工大学获得硕士学位,2019 年于哈尔滨理工大学获得博士学位,现为哈尔滨理工大学副教授,主要研究方向为高速切削加工技术、切削理论、数控加工自动编程、机械制造技术。

E-mail: tongxin@hrbust.edu.cn

Tong Xin received her B. Sc. degree from Harbin University of Science and Technology in 2013, M. Sc. degree from Harbin University of Science and Technology in 2016, and Ph. D. degree from Harbin University of Science and Technology in 2019. She is currently an associate professor at Harbin University of Science and Technology. Her main research directions are high-speed cutting technology, cutting theory, CNC machining automatic programming, and mechanical manufacturing technology.

王守猛(通信作者),2022 年于聊城大学获得学士学位,现为哈尔滨理工大学硕士研究生,主要研究方向为高速切削加工技术、切削理论、数控加工自动编程、机械制造技术。

E-mail: 1090306998@qq.com

Wang Shoumeng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Liaocheng University in 2022. He is currently a M. Sc. candidate at Harbin University of Science and Technology. His main research interests include high-speed cutting technology, cutting theory, CNC machining automatic programming, and mechanical manufacturing technology.