

变截面涡旋齿三维形貌分析与功率谱密度表征*

刘 涛¹, 李银萍², 孙永吉³

(1. 兰州理工大学机电工程学院 兰州, 730050) (2. 金川集团股份有限公司 金昌, 737103)

(3. 兰州工业学院创新创业学院 兰州, 730050)

摘要 为了量化表征变截面涡旋齿形貌的变化规律并提取特征信息,以 45#钢和硬铝 7075 材料进行了 3 段基圆渐开线变截面涡旋铣削加工实验,用 Talysurf CLI 1000 形貌仪测量了涡旋齿三维形貌和表面粗糙度,对形貌图像进行了分析和比较,运用一维和二维功率谱密度方法量化表征了涡旋齿形貌的频率-空间分布信息。形貌分析表明:45#钢试样涡旋齿形貌变化趋势接近走刀痕迹,呈现较强的规律性;45#钢涡旋齿试样表面形貌变化高度大于硬铝 7075,且形貌的变化与型线位置无明显联系。二维功率谱密度分析表明,涡旋齿形貌呈各向异性特征, x 方向空间频率 $0\sim 0.02\ \mu\text{m}^{-1}$ 是影响涡旋齿形貌的主导频率,涡旋齿主要缺陷存在于空间波长 $50\ \mu\text{m}$ 内。一维功率谱密度表征解析了涡旋齿试样粗糙度相近、但表面形貌和粗糙度差异性明显的现象。实现了涡旋齿形貌不同层次特征的定量表征和信息提取。

关键词 变截面涡旋齿; 三维形貌; 功率谱密度; 表面粗糙度

中图分类号 TH455; TH161⁺.1

引 言

涡旋盘是涡旋式压缩机^[1]、热泵^[2]及膨胀机^[3]等流体机械的关键部件。不同于传统齿轮类零件,涡旋盘以其上涡旋齿的侧壁作为啮合表面。由于变截面涡旋盘具有深槽薄壁特性,加上型面构成复杂、刀具磨损和机床振动等因素,致使其铣削过程不平稳,影响涡旋盘加工质量。涡旋齿的侧壁面遗传了铣削过程的加工痕迹,形成特殊的微观形貌结构,与涡旋盘加工质量、服役期、耐磨性和可靠性等性能呈强关联性^[4-6],因此有必要量化表征变截面涡旋齿形貌的变化规律并提取特征信息。

目前,对零件加工表面质量的衡量大都采用传统的二维粗糙度评价方法^[7-8],然而对于变截面涡旋盘这类复杂型面的薄壁深腔零件,单一的二维粗糙度指标虽然能够宏观地评价其加工表面质量,但不能量化表征和提取涡旋盘侧壁面微观形貌的全部特征信息,也容易受到测量仪器分辨率和采样长度的影响。功率谱密度(power spectral density,简称 PSD)法^[9-12]是一种从频域角度展开的谱分析方法,可以通过图像直观体现表面微观形貌的数值特性和频率分布情况,有效地描述结构细节特征,从而定量

化表征零部件加工表面质量。笔者基于该算法的优势,针对变截面涡旋盘自身的结构特性,在测量变截面涡旋齿微观形貌基础上,采用一维和二维功率谱密度分析法精确地表征并分析变截面涡旋盘侧壁面形貌的空间频率分布信息,克服了表面粗糙度表征加工质量的局限性,实现了涡旋盘侧壁面形貌不同层次特征的有效描述和定量表征,对形貌变化规律进行了全面刻画。

1 侧壁面形貌表征方法及评价参数

1.1 功率谱密度算法

在欧氏坐标系中,用函数 $z(x, y)$ 来表示三维粗糙表面上点 (x, y) 处对应的高度值,其二维傅里叶变换可用式(1)求得

$$Z(f_x, f_y) = \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} z(x, y) e^{-i2\pi(xf_x + yf_y)} dx dy \quad (1)$$

一般而言,借助形貌测量仪可获取到的表面特征信息数据是离散的,而对表面形貌的表征也是基于这些离散点数据进行的,则在计算功率谱密度时需要将式(1)离散化处理,即:将表面高度函数 $z(x, y)$ 离散化,认为采样表面可由 $M \times N$ 个离散的

* 国家自然科学基金资助项目(51265027, 51665035)

收稿日期:2020-01-01;修回日期:2020-03-24

采样点来表示,离散序列表示为 $z(m, n)$,其中: $0 \leq m \leq M-1; 0 \leq n \leq N-1$ 。若设 x 和 y 方向上的采样间隔为 Δx 和 Δy , x 和 y 两个方向的采样长度与采样间隔存在关系: $L_x = (M-1)\Delta x, L_y = (N-1)\Delta y$, 对应的空间频率分别被离散为 $f_l = l/M\Delta x (l = 0, 1, \dots, M-1), f_k = k/N\Delta y (k = 0, 1, \dots, N-1)$ 。故离散的二维傅里叶变换为

$$Z(f_l, f_k) = \Delta x \Delta y \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} z(m, n) e^{-i2\pi(m\Delta x f_l + n\Delta y f_k)} \quad (2)$$

二维功率谱密度计算公式可以表示为

$$\text{PSD}(f_l, f_k) = \frac{\Delta x \Delta y}{MN} \left| \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} z(m, n) e^{-i2\pi(ml/M + nk/N)} \right|^2 \quad (3)$$

当频谱只在其中一个方向上变化时,一维功率谱密度可由二维功率谱密度计算得到

$$\text{PSD}(f_l) = \sum_{m=0}^{M-1} \text{PSD}(f_l, f_k) \Delta f_k \quad (4)$$

根据上述计算公式可知,功率谱密度函数描述的是信号能量与频率分布的关系,因此可客观地用来评价涡旋盘表面微观形貌特性。

1.2 三维粗糙度评价参数

三维粗糙度参数相较于二维粗糙度参数能够更精确地描述表面微观形貌,其中以幅值参数的应用最为普遍,选取其中算术平均偏差和均方根粗糙度进行表征,其计算公式如下。

三维算术平均偏差为

$$S_a = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |z(x_i, y_j)| \quad (5)$$

三维均方根粗糙度为

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |z(x_i, y_j)|^2} \quad (6)$$

其中: M 和 N 分别为采样面域内 x 向与 y 向采样点数; $z(x_i, y_j)$ 为表面高度值。

1.3 功率谱密度与粗糙度的关系

功率谱密度的数学内涵实质上表达的是粗糙度的谱密度分布,具有幅值特性,按照 Parseval 定理,某一段频率区间上的均方根粗糙度可以由该频带上功率谱密度的积分计算得到。其中,二维均方根粗糙度与一维功率谱密度的关系为

$$R_q = \sqrt{\sum_{f_1}^{f_2} \text{PSD}(f_l) \Delta f_l} \quad (7)$$

三维均方根粗糙度与二维功率谱密度的关系为

$$S_q = \sqrt{\sum_{f_{m1}}^{f_{m2}} \sum_{f_{n1}}^{f_{n2}} \text{PSD}(f_m, f_n) \Delta f_m \Delta f_n} \quad (8)$$

从式(9)、式(10)可知,在明确空间频率积分上、下限的条件下才能够计算对应的均方根粗糙度。

2 涡旋盘侧壁面形貌测量与分析

2.1 变截面涡旋盘几何模型

笔者选用的变截面涡旋齿型线为 3 段不同基圆半径的渐开线首尾相接光滑连接而成,如图 1 所示,其中:红色表示首段基圆渐开线;绿色表示中段基圆渐开线;蓝色表示末段基圆渐开线。

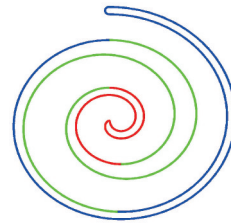


图 1 变截面涡旋盘的型线图

Fig.1 Profile diagram of non-uniform scroll

2.2 铣削实验与形貌测量

本研究中涡旋盘的加工实验在数控铣床 XK714 上进行,工件材料分别选用 45# 钢和硬铝 7075,毛坯尺寸为 $130 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$ 。经过粗、精铣削加工过程,使其达到精度要求,铣削加工参数如表 1 所示。粗加工时选用强度较高、抗冲击能力较强的两刃硬质合金键槽刀,材料为 YG8;精加工时选用的刀具为四刃平底立铣刀,材料为 PCBN,刀具直径 $d = 10 \text{ mm}$ 。

表 1 涡旋盘铣削加工参数

Tab.1 Milling parameters of scroll

铣削参数	粗加工	精加工
铣削速度 / (m · min ⁻¹)	100	125
进给量 / (mm · z ⁻¹)	0.25	0.05
铣削深度 / mm	2	0.5

涡旋盘表面微观形貌的测量设备采用 Talysurf CLI 1000 型表面形貌仪,设定其采样点阵为 101×101 ,采样面积为 $1\,000 \mu\text{m} \times 1\,000 \mu\text{m}$,放大倍数为 10 倍。

由于型线构成曲线不同使得涡旋齿各处壁厚不等,故在每段型线(首段、中段和末段)对应的外侧壁

面内分别取样进行表面形貌的测量,如图2所示,相应试样分别编号为 G_1, G_2, G_3 (G 代表45#钢)和 L_1, L_2, L_3 (L 代表硬铝7075),对测得的形貌数据进行筛选后绘制其三维表面形貌图。

2.3 侧壁面形貌分析

三维形貌图像直观地反映涡旋盘侧壁面高度起伏变化及缺陷状况。图2显示了45#钢和硬铝7075试样表面微观形貌三维图像。其中:红色部分数值较大,表示“峰”形态;蓝色部分数值较小,表示“谷”形态;中间部分其他色彩形成的是“沟”、“槽”类形态。这些形态的大小和深度反映表面质量的优劣,也与涡旋盘工作性能存在关联。“峰”、“谷”的值越大,加工表面越粗糙,造成变截面涡旋盘工作过程中耐磨性能变差;“沟”的值越大,表明犁耕现象出现,切削厚度不均匀,从而影响涡旋盘的密封性,致使工作过程中出现气体泄漏的现象。

2.3.1 相同型线段不同材料侧壁面形貌特点

如图2(a,d)所示,涡旋盘首段型线的表面形貌图中,45#钢试样在接近 $500\mu\text{m}$ 处“谷”形态的出现使得原本以“沟”形态居多的测量面呈凹陷状;硬铝7075试样则呈现阶梯状形态;45#钢试样形貌变化

高度大于硬铝7075试样。如图2(b,e)所示,涡旋盘中段型线的表面形貌图中,45#钢试样表面形态相对平整,变化趋势接近走刀痕迹,呈现较强的规律性;硬铝7075试样表面出现较多毛刺状形态,形貌高度变化不大;45#钢试样形貌变化高度大于硬铝7075试样。如图2(c,f)所示,在涡旋盘末段型线的表面形貌图中,45#钢试样表面波动幅度较大,最大高度差达到 $7.542\mu\text{m}$,而硬铝7075试样仍以阶梯状形态呈现,峰值形态和毛刺现象较少,同时也发现45#钢试样形貌变化高度大于硬铝7075试样。

2.3.2 相同材料不同型线段处的侧壁面形貌特点

在45#钢加工的涡旋盘试样中,如图2(a,b,c)所示,表面形貌中均存在显著的“谷”形态,但是其出现位置不同,表面形貌高度差以末段型线(G_3)处最大,而中段型线(G_2)次之,首段型线(G_1)最小;在硬铝7075涡旋盘试样中,如图2(d,e,f)所示,表面形貌中高度变化均较小,除中段型线(L_2)外,首段型线(L_1)和末段型线(L_3)处形貌均呈现规律的阶梯形。可见,涡旋盘表面形貌的不同与型线位置无明显联系。

以上形貌特点产生的原因与涡旋盘铣削加工过程关系密切。一方面由于变截面涡旋盘零件具有深

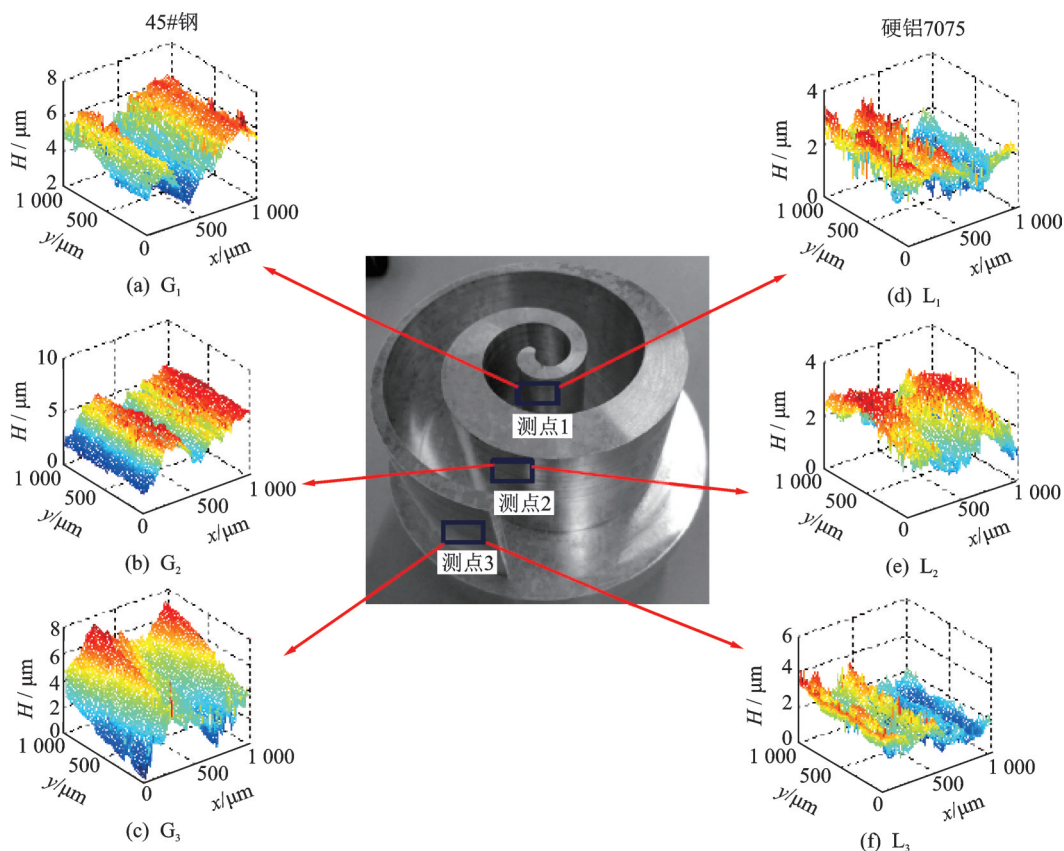


图2 涡旋盘的测试面及三维形貌

Fig.2 Measuring surface of scroll vane three-dimensional surface morphology

槽结构,若铣削时产生的切屑和残渣清除不及时,会导致侧壁面表面损伤;另一方面,刀具发生磨损后,其表面形成硬质点或沟槽,这些细微缺陷也会被复制到蜗旋盘壁面上,导致出现划痕、刮伤等破坏性特征,而其破坏程度则影响到加工表面质量,并反映在三维形貌中。综合材料特性和蜗旋盘铣削特点,硬铝 7075 试样的表面加工质量高于 45#钢试样。

2.4 表面粗糙度评价

根据表面形貌仪测量得到三维表面粗糙度,如表 2 所示。对比两种材料不同部位试样的表面粗糙度,45#钢蜗旋盘侧壁面粗糙度均大于硬铝 7075,表明 45#钢蜗旋盘的表面粗糙状况高于硬铝材料的蜗旋盘,相应的表面质量较差。

对于同种材料的试样, G_1 试样的 S_a 为 $0.641 \mu\text{m}$

(S_q 为 $0.658 \mu\text{m}$), G_2 试样的 S_a 为 $0.634 \mu\text{m}$ (S_q 为 $0.653 \mu\text{m}$),它们的数值大小较为近似,但是其对应的表面微观形貌却差别很大;试样 L_1 的 S_a 为 $0.545 \mu\text{m}$ (S_q 为 $0.581 \mu\text{m}$), L_3 的 S_a 为 $0.562 \mu\text{m}$ (S_q 为 $0.596 \mu\text{m}$),它们的粗糙度数值差别较大,但微观形貌变化规律却很相似。这说明仅用粗糙度评价表面微观形貌时,其结果有一定的片面性和局域性。因此,引入功率谱密度算法,由于其描述的是一种空间频率与空间信号能量的关系,正好可以从横向和纵向两个方向的频率分布情况结合高度信息量化表征变截面蜗旋盘侧壁面表面微观形貌特性,更加丰富和全面地分析侧壁面形貌分布特征规律。

3 侧壁面形貌的功率谱密度表征

3.1 二维功率谱密度表征

图 3 为根据 Matlab 编程得到的蜗旋盘侧壁面形貌二维功率谱图。由图 3(a~f)可知,变截面蜗旋盘的二维功率谱密度值分布在 x 方向上占据的空间频率范围均明显大于 y 方向且尖峰值较大,其中 x 方向既是铣削进给方向,也与形貌纹理方向一致,说明变截面蜗旋盘铣削加工侧壁面为各向异性表面,且加工过程中各加工参数等因素对 x 方向的影响较大,相应的频率段为主导频率。

表 2 蜗旋盘三维粗糙度测量结果

Tab.2 Measurement results of 3D roughness of scroll

试样	材料	$S_a/\mu\text{m}$	$S_q/\mu\text{m}$
G_1	45#钢	0.641	0.658
G_2	45#钢	0.634	0.653
G_3	45#钢	0.729	0.767
L_1	硬铝 7075	0.545	0.581
L_2	硬铝 7075	0.616	0.632
L_3	硬铝 7075	0.562	0.596

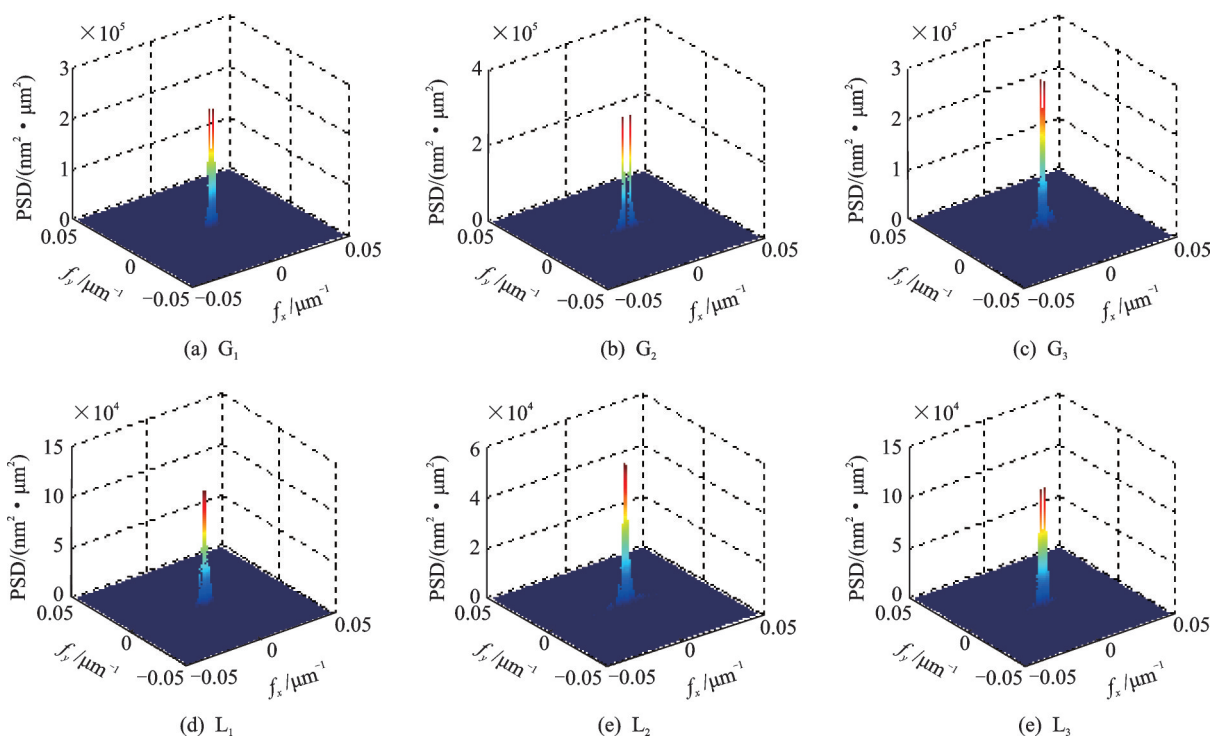


图 3 蜗旋盘二维功率谱密度

Fig.3 Two-dimensional power spectral density of scroll

以试样 G_2 和 L_2 为例,分别观察试样 G_2 和 L_2 在 x 向与 y 向二维功率谱密度分布情况,如图 4 所示,可得出功率谱密度集中分布的频率区间及峰值大小。分析图 4(a,b) 并计算可知, G_2 试样功率谱密度集中分布在 $0 \sim 0.02 \mu\text{m}^{-1}$ 频率范围内,对应的空间波长

为 $50 \mu\text{m}$,这说明变截面涡旋盘侧壁面凹槽和凸起等微观缺陷存在于波长 $50 \mu\text{m}$ 内,而其余部分表面纹理较为细腻。结合图 4(c,d) 和表 3 计算结果可知,试样 L_2 的功率谱密度曲线分布同样集中在进给方向约 $0 \sim 0.02 \mu\text{m}^{-1}$ 频率范围附近。

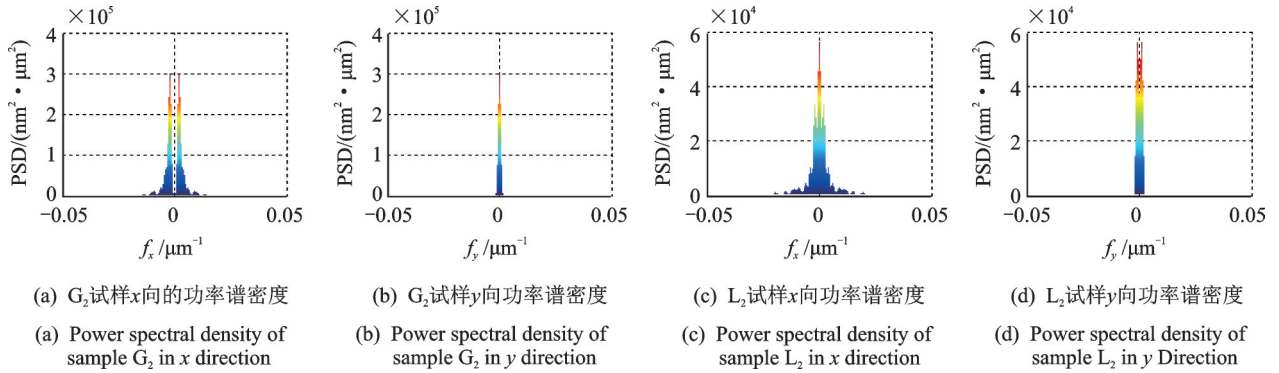


图 4 x 向与 y 向的二维功率谱密度

Fig.4 Two-dimensional power spectral density in x and y directions

通过 Matlab 编程求解得到所有试样的二维功率谱密度分布情况如表 3 所示,可知空间频率范围约 $0 \sim 0.02 \mu\text{m}^{-1}$ 均是影响涡旋盘表面微观形貌的频

段,在不考虑铣削实验中切削参数变化影响的情况下,造成涡旋盘出现缺陷状况的原因应是铣削过程中的振动因素。

表 3 二维功率谱密度分布

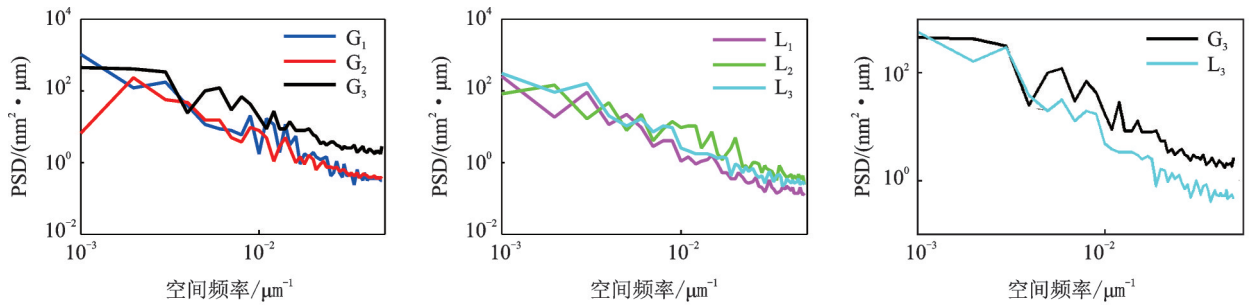
Tab.3 Distribution of two-dimensional power spectral density

试样	峰值点对应频率坐标(f_x, f_y)/ μm^{-1}	功率谱密度峰值/ ($\text{nm}^2 \cdot \mu\text{m}^2$)	功率谱密度集中频率段/ μm^{-1}	
			x 方向	y 方向
G_1	(0.000 989 8, 6.939×10^{-18})	2.355×10^5	$0 \sim 0.019 80$	$0 \sim 0.003 959$
G_2	(0.000 989 8, 6.939×10^{-18})	0.563×10^5	$0 \sim 0.028 70$	$0 \sim 0.003 959$
G_3	(0.000 989 8, 6.939×10^{-18})	2.922×10^5	$0 \sim 0.025 73$	$0 \sim 0.016 830$
L_1	(0.000 989 8, 6.939×10^{-18})	1.139×10^5	$0 \sim 0.015 84$	$0 \sim 0.004 949$
L_2	(0.001 98, 6.939×10^{-18})	3.006×10^5	$0 \sim 0.027 71$	$0 \sim 0.002 969$
L_3	(0.000 989 8, 6.939×10^{-18})	1.169×10^5	$0 \sim 0.018 81$	$0 \sim 0.001 987$

3.2 一维功率谱密度表征

通过二维功率谱密度的分析发现, x 方向空间

频率为主导频率,故取 x 方向一维功率谱密度曲线进行分析,图 5(a,b) 所示分别为 45#钢和硬铝 7075 涡旋盘的一维功率谱密度曲线。通过一维功率谱密



(a) 45#钢试样一维功率谱密度 (a) One dimensional power spectral density of steel 45 sample
 (b) 硬铝7075试样一维功率谱密度 (b) One dimensional power spectral density of duralumin 7075 sample
 (c) G_3 与 L_3 的一维功率谱密度曲线 (c) One dimensional power spectral density of G_3 and L_3 samples

图 5 涡旋盘一维功率谱密度曲线

Fig.5 One-dimensional power spectral density curve of scroll disk

度曲线与二维均方根粗糙度的关系(式(8))可量化表征涡旋盘表面微观形貌。通过形貌分析发现:粗糙度相近试样的表面形貌差异明显,表面形貌相似的试样粗糙度值不同,同一型线段不同试样的粗糙度与表面形貌均存在显著差异,故单一的粗糙度评价方法存在不足。下面通过直观的一维功率谱密度曲线联系二维均方根粗糙度进行量化分析。

在图5(a,b)中,一维功率谱密度的曲线波动数值大小间接反映涡旋盘 x 方向轮廓粗糙度的大小。以差异性最大但为涡旋齿同一型线段的试样 G_3 和 L_3 的曲线为例进行比较,如图5(c)所示,两条曲线存在3个交点 A 、 B 和 C ,其频率点分别为 1.072×10^{-3} 、 3.444×10^{-3} 和 $4.133 \times 10^{-3} \mu\text{m}^{-1}$ 。

根据式(8)判断: A 点之前 L_3 的均方根粗糙度 R_q 略大于 G_3 试样的 R_q ; AB 段内 G_3 的 R_q 大于 L_3 试样的 R_q ; BC 段内 L_3 的 R_q 大于 G_3 的 R_q ;在 C 点后,两条曲线一上一下彼此分开,此段内 G_3 的 R_q 远远大于 L_3 的,则综合取平均后 G_3 试样的 R_q 明显要比 L_3 的大。可见,一维功率谱密度方法可弥补粗糙度参数评价方法的不足,且量化表征涡旋盘表面形貌。

4 结 论

1) 基于铣削实验完成变截面涡旋盘侧壁面三维形貌的表征,得到侧壁面微观形貌的频率-空间分布信息,准确全面地获取了变截面3段基圆渐开线涡旋齿各型线段的形貌分布规律。

2) 变截面涡旋盘侧壁面二维功率谱密度分析表明,侧壁面形貌呈现各向异性特征, x 方向空间频率 $0 \sim 0.02 \mu\text{m}^{-1}$ 是影响涡旋盘侧壁面形貌的主导频率,涡旋盘侧壁面主要缺陷存在于空间波长 $50 \mu\text{m}$ 内。

3) 通过涡旋盘侧壁面一维功率谱密度分析,量化解析了不同试样相近粗糙度、不同表面微观形貌及粗糙度差异性明显的现象,对粗糙度参数评价方法进行了验证和补充。

参 考 文 献

- [1] WANG H L, TIAN J R, DU Y H, et al. Numerical simulation of CO2 scroll compressor in transcritical compression cycle[J]. Heat and Mass Transfer, 2018, 54: 1395-1403.
- [2] KIM D, JEON Y, JANG D, et al. Performance comparison among two-phase, liquid, and vapor injection heat pumps with a scroll compressor using R410A [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 137: 193-202.
- [3] CARLOS M, LEMOFOUET S, SCHIFFMANN J. Two-phase and oil-free co-rotating scroll compressor/expander [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 148: 173-187.
- [4] 刘涛, 张文超, 张文帅. 变截面涡旋齿齿面粗糙度的双

预测模型[J]. 表面技术, 2019, 48(8): 323-329.

- LIU Tao, ZHANG Wenchao, ZHANG Wenshui. Double-predictive model of tooth surface roughness of variable-section scroll [J]. Surface Technology, 2019, 48(8): 323-329. (in Chinese)
- [5] SHI Z Y, LIU L N, LIU Z Q. Influence of dynamic effects on surface roughness for face milling process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80: 1823-1831.
- [6] ZUPERL U, CUS F. Surface roughness fuzzy inference system within the control simulation of end milling [J]. Precision Engineering, 2016, 43: 530-543.
- [7] XING E H, LI S B, ZHANG L, et al. The experimental research of the relationship between rock surface roughness and PDC bit wear [J]. Advances in Petroleum Exploration and Development, 2015, 10(2): 19-24.
- [8] 袁美霞, 刘少楠, 高振莉, 等. 微细铣削不锈钢310S表面完整性试验研究[J]. 表面技术, 2017, 46(7): 240-244.
YUAN Meixia, LIU Shaonan, GAO Zhenli, et al. Experimental research on surface integrity of micro milling stainless steel 310S [J]. Surface Technology, 2017, 46(7): 240-244. (in Chinese)
- [9] 严鲁涛, 杨志鹏, 高飞, 等. 振动试验中削波信号功率谱密度补偿[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(4): 690-696.
YAN Lutao, YANG Zhipeng, GAO Fei, et al. Power spectral density compensation algorithm for signal clipping in vibration test [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(4): 690-696. (in Chinese)
- [10] BAYAT M, AHMADI H, MAHDAVI N. Application of power spectral density function for damage diagnosis of bridge piers [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2019, 1(1): 57-63.
- [11] MARROCCO V, MODICA F, FASSI I. Analysis of discharge pulses in micro-EDM milling of Si3N4-TiN composite work piece by means of power spectral density (PSD) [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 43: 112-118.
- [12] 王鹏, 王西彬, 颜培, 等. 切削刃数量对球墨铸铁铣削性能及表面形貌特征的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(12): 314-320.
WANG Peng, WANG Xibin, YAN Pei, et al. Effect of number cutting edges on cutting performance and surface morphology in face milling of nodular cast iron [J]. Surface Technology, 2018, 47(12): 314-320. (in Chinese)



第一作者简介:刘涛,女,1971年7月生,教授、博士生导师。主要研究方向为机械设计制造及其自动化、机械工程测试技术等。曾发表《基于信息熵的涡旋压缩机振动信号分析》(《振动、测试与诊断》2014年第34卷第1期)等论文。

E-mail: cathyliu1999@126.com