

## 热管砂轮缓进给深切磨削钛合金试验\*

## Experiment of Creep Feed Deep Grinding Titanium Alloy With Heat Pipe Grinding Wheel

南京航空航天大学机电学院 陈琛 傅玉灿 赫青山 陈佳佳 张玮

[摘要] 分析了热管砂轮在磨削过程中的强化换热原理并研制出可用于磨削加工的热管砂轮,实现了对热管砂轮的抽真空检漏、精确注液以及真空封尾。最后,开展了热管砂轮缓进给深切磨削 TC4 钛合金的试验研究。试验结果表明,热管砂轮能将磨削弧区积聚的热量通过砂轮内部热管的换热作用快速疏导出去,从而有效降低磨削温度,避免工件烧伤。

关键词: 热管砂轮 缓进给深切磨削 钛合金 磨削温度 强化换热

[ABSTRACT] The heat transfer principle of heat pipe grinding wheel (HPGW) in the grinding process is illustrated and a new HPGW is developed for grinding. Three important processes of manufacturing the HPGW including vacuum pumping and its leak test, working fluid filling and vacuum sealing are achieved. Finally, creep feed deep grinding experiments are carried out for TC4 titanium alloy. Experimental results show that using the HPGW could lead the heat in the grinding zone to the inside heat pipe of the grinding wheel thus to be transferred to the circumstance, so that grinding temperature could be reduced and burnout of workpiece surface could be prevented effectively.

Keywords: Heat pipe grinding wheel Creep feed deep grinding Titanium alloy Grinding temperature Enhancing heat transfer

钛合金因具有较高的比强度和良好的热稳定性<sup>[1]</sup>等特点在航空航天等领域广泛应用,然而在磨削加工过程中,由于材料本身的导热性差,所消耗的能量大部分以热能的形式积聚在磨削弧区,如果不能及时将这些热量疏导出去,磨削弧区的温度会急速上升,过高的磨削温度会导致工件表面的烧伤,同时还存在加工效率低、砂轮磨损快的问题。有效抑制磨削烧伤和进一步提高磨削加工效率的关键是尽可能强化磨削弧区换热,最大限度地疏散积聚在弧区的磨削热。为此,国内外学者开

展了深入的研究,开发了众多磨削冷却技术与方法,核心思想是将磨削液更有效地引入磨削弧区进行换热<sup>[2-5]</sup>。但事实上,只要磨削热流密度超过临界值,磨削液就会进入成膜沸腾状态,这时由于覆盖在弧区工件表面的汽膜层的阻隔,本可由磨削液通过汽化带走的绝大部分磨削热将转而直接进入工件,从而导致工件急剧升温而突发烧伤<sup>[6]</sup>。因此,探索新的有效疏导弧区热量的方法已成为解决难加工材料高效磨削加工现存问题的当务之急。

热管是一种具有极高传热能力的元件,其传热原理是内部工作介质的相变传热,因此热管的内部热阻很小,能以较小的温差获得较大的传热效率。本文提出一种将热管植入砂轮内部,以快速疏导磨削弧区热量、有效降低磨削弧区温度的构想,通过借鉴热工领域中回转热管的结构与传热原理,设计并制备出一种可用于 TC4 钛合金高效磨削加工的热管砂轮,通过开展 TC4 钛合金磨削试验,研究热管砂轮对磨削弧区的强化换热能力,这种新的尝试对进一步提高 TC4 钛合金的磨削加工效率以及防止工件表面烧伤有着非常重要的意义,也为 TC4 钛合金的高效磨削加工拓展了一个方向。

## 1 热管砂轮的工作原理

为了减少热管与砂轮基体间的热阻,采取在砂轮基体内直接加工出环形热管工作腔的方法,热管砂轮在磨削过程中的工作原理如图 1 所示。

在磨削加工前,砂轮首先旋转,当砂轮旋转产生的离心加速度  $a$  满足  $a/g > 20$  ( $g$  为重力加速度)时<sup>[7]</sup>,其内部环形热管工作腔中的液态工质由于离心力作用在砂轮外圆内壁形成一层近似均匀的液膜。在砂轮磨削过程中,磨削弧区产生大量磨削热,这些热量通过砂轮外圆壁面进入热管蒸发端,管内液体工质吸收热量并迅速汽化,这些携带大量潜热的蒸汽在热管工作腔内气压差的驱动下沿着砂轮径向流动,并在热管的冷凝端通过壁面与外界环境进行热量交换释放潜热,然后冷凝成液体,在离心力作用下,这些冷凝的液体沿着热管内壁面迅速回流至热管蒸发端,如此循环往复,通过相变将热量从弧区带走,从而有效控制磨削弧区的温度。

\* 国家自然科学基金项目(51175254)资助。

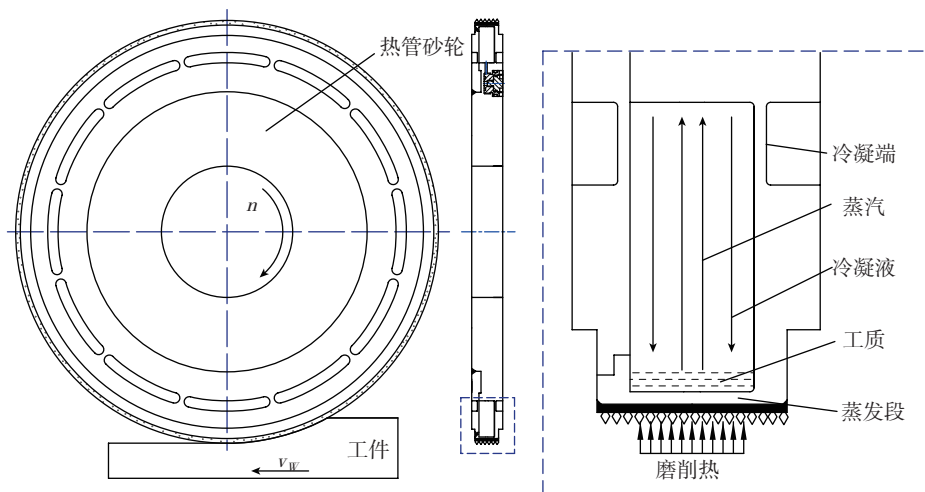


图1 热管砂轮磨削过程的工作原理

Fig.1 Working principle of heat pipe grinding wheel in the grinding process

## 2 热管砂轮的设计与制作

### 2.1 热管砂轮基体的结构设计

热管砂轮基体设计与制作的关键是如何实现将热管植入砂轮内部,并完成制备热管所需要的抽真空检漏、注液与真空封尾过程。根据上述思路,设计的热管砂轮的结构如图2所示。该热管砂轮采用焊接式结构,其主要零部件包括钢基体、端盖、真空封尾接头、堵头以及橡胶密封圈等,各零部件经装配、焊接后形成内部带有环形管腔的砂轮基体。真空封尾接头上带有密封圈径向和端面两种密封结构,主要作用是与热管砂轮制作装置进行连接以完成热管砂轮的抽真空检漏、注液以及真空封尾。带有密封圈径向密封的堵头是为了对真空封尾接头上的端面密封进行二次密封,同时还可以保证热管砂轮质量分布均匀。另外,从传热学角度分析,为了获得热管砂轮良好的启动性能和换热性能,减小热管砂轮在传热方向上的热阻是一种行之有效的方法,因此,在保证砂轮基体强度的前提下,热管砂轮蒸发端与冷凝端的壁厚应尽量小一些。经校核,两者尺寸为1.5~2mm时,砂轮在磨削加工时有足够的安全裕度。

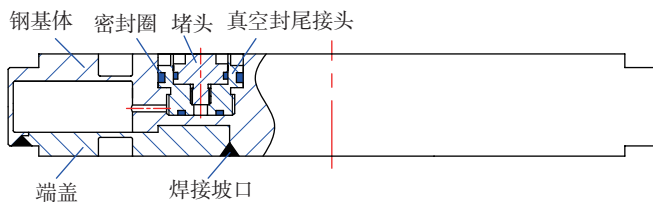


图2 热管砂轮基体结构示意图

Fig.2 Schematic of the structure of heat pipe grinding wheel

热管是依靠工质的相变来快速传递热量的,因此,工质应具有较大的汽化潜热,考虑到工质的经济性,选择蒸馏水作为热管的工质;同时,本着工质与砂轮基体

材料相容性原则,砂轮基体材料选择45钢,这种碳钢-水热管也是目前工业上大规模推广使用的一种热管<sup>[8]</sup>。

### 2.2 热管砂轮的制作

热管砂轮的制作工艺流程主要包括零部件机加工与化学清洗、砂轮装配与焊接、砂轮基体精加工、电镀磨料以及砂轮内部热管的制作,按照本文热管砂轮的结构设计,制作出的可用于磨削加工的热管砂轮实物如图3所示。

对砂轮内部热管的制作又包括真空检漏、高真空度的获得、注液以及真空封尾过程。图4是热管砂轮制作平台实物图。

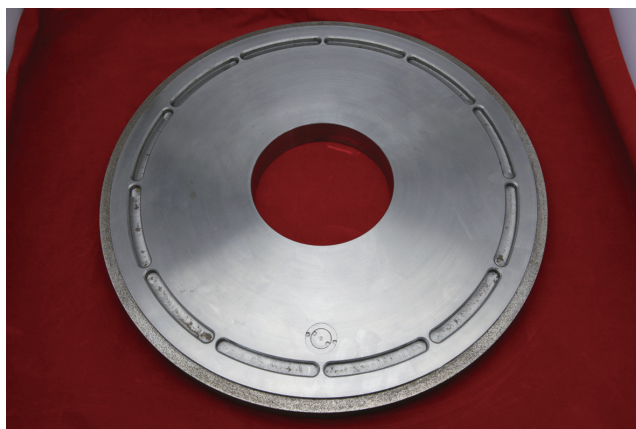


图3 热管砂轮照片

Fig.3 Picture of heat pipe grinding wheel



图4 热管砂轮制作平台

Fig.4 Manufacturing platform of heat pipe grinding wheel

热管砂轮抽真空检漏过程为:打开 Pfeiffer Vacuum 公司生产的 HiCube Eco80 涡轮分子泵,对热管砂轮抽

真空约 1h,当管路内的真空度值低于  $3.0 \times 10^{-2}$ Pa 时,关闭真空阀进行保压,使用薄膜电容真空计监测管路中气压回升速率,监测结果如图 5 所示。

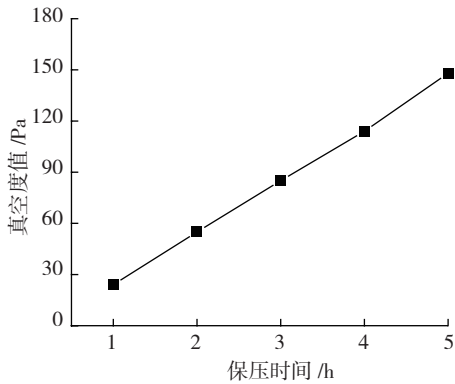


图5 热管砂轮真空密封性能监测

Fig.5 Vacuum sealing performance monitoring of heat pipe grinding wheel

从图中可以看出,热管砂轮内部管腔气压值随着保压时间的增加而升高,且呈线性增长趋势,漏气速率约为 30Pa/h。需要指出的是,由于热管砂轮制作平台中连接有两段硅胶软管,这无疑增加了监测平台中的漏气环节,因此,砂轮内部管腔的实际漏气速率应低于 30Pa/h,完全满足在一定时间内开展试验的要求。

注液量的大小对热管砂轮在磨削加工时的启动时间和换热能力有着重要的影响,为了降低工质液膜的热阻,注液量可按照砂轮旋转时工质形成液膜厚度(1~3mm)所对应的体积量进行注入。具体的注液过程为:先将砂轮内部管腔抽真空至  $3.0 \times 10^{-2}$ Pa 以下,然后关闭平台中的真空阀,切断砂轮与抽真空管路的联系,将砂轮向左倾斜一定的角度,随后缓慢打开注液管路中的卡钳,使工质在内外压差作用下流入到砂轮的内部管腔中。该注液系统能精确控制注液量,误差在 1mL 以内,满足试验要求。注入蒸馏水后砂轮内部管腔中的压力值可由薄膜电容真空计获得,在 20℃ 时测得真空度值为 2308Pa,这与蒸馏水在 20℃ 时 2339Pa 的饱和蒸汽压值非常接近,从而说明注液后砂轮内部管腔的不可凝结气体含量极少,这对提高其传热性能是有益的。

对砂轮内部管腔进行真空封尾是制作砂轮中热管的最后一道工序,本文采用 O 型密封圈机械式真空封尾方法。图 6 是热管砂轮真空封尾后的照片,结合图 2 所示的砂轮结构,真空封尾过程为:当对砂轮进行抽真空与注液操作时,真空封尾接头与热管砂轮制作平台中的管路相连,两者间的密封通过密封圈径向密封保证(此时真空封尾接头没有旋至底部,端面密封圈不起作用)。在对砂轮内部管腔进行真空封尾时,真空封尾接头沿着螺纹旋至底部,完成其底面的端面密封,随后再将与真

空封尾接口相连的管路取出并装上堵头,至此砂轮内部管腔的真空封尾操作结束。与此同时,可用于磨削加工的热管砂轮已制备完成。



图6 热管砂轮的真空封尾

Fig.6 Vacuum sealing of heat pipe grinding wheel

### 3 热管砂轮磨削 TC4 钛合金试验

#### 3.1 试验条件与方法

为了探索热管砂轮在钛合金高效磨削中的应用前景,本文使用制备完成的热管砂轮对 TC4 钛合金进行了初步的缓进给深切磨削试验。由于磨削温度是热能产生与传出的直接反映,因此可以通过测量磨削过程中的磨削温度来评价磨削弧区的换热效果。砂轮磨料采用具有高强度、高硬度和高化学惰性的“三高”优异特性的立方氮化硼(CBN),粒度为 80/100,浓度为 60%。试验过程中的磨削温度测量采用分块试样夹丝半人工热电偶法,工件表面温度的热电势信号通过 NI-6211 采集卡获得。试验完成后,将试验记录的热电势值通过 TC4-康铜标定曲线转换为温度值即可得到温度信号。采用 BLOHM Profimat MT408 磨床,具体的试验条件和工艺参数见表 1。

表1 试验条件和工艺参数

工艺参数	参数值
砂轮尺寸/mm	400 × 127 × 23
磨削方式	切入式顺磨
工件尺寸/mm	30 × 48 × 12
磨削工艺	缓进给深切磨削
砂轮线速度 $v_s/(m \cdot s^{-1})$	30
工件进给速度 $v_w/(mm \cdot min^{-1})$	60
磨削深度 $a_p/mm$	1;1.5;2
磨削液出口压力 $p_f/MPa$	0.5

#### 3.2 试验结果与分析

图 7 所示为砂轮线速度  $v_s=30m/s$ 、工件进给速度  $v_w=60mm/min$ 、磨削深度  $a_p=1mm$  的工艺参数条件下,采

用切入式顺磨 TC4 钛合金,测温系统采集的热电势原始信号图。磨削液采用乳化液,出口压力  $p_1$  为 0.5MPa。

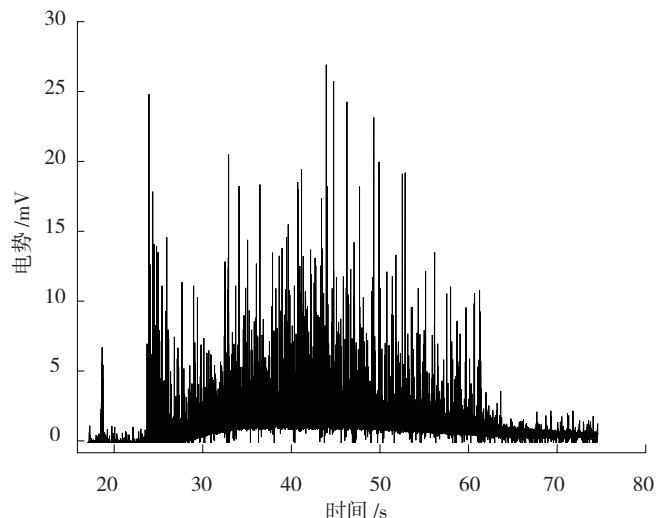


图7 热管砂轮磨削热电势原始信号

Fig.7 Original grinding thermoelectric potential signal of heat pipe grinding wheel

图中曲线的尖脉冲峰电势值代表单颗磨粒切过热电偶结点时的热电势,对应磨粒磨削点温度,而尖脉冲曲线谷底下包络线的电势值代表磨削区工件表面平均温度的热电势,对应磨削区温度。图中有几个时间点的尖脉冲峰电势值明显高出其他尖峰很多,这是由于本文研制的 CBN 砂轮属于单层电镀 CBN 砂轮,可能出现部分磨粒高出其他磨粒,而这些磨粒进入磨削弧区后,其单颗磨粒切厚相对其他磨粒偏大,造成其对应的磨粒磨削点温度很高。从图中曲线可以看出,此种工艺参数组合条件下,使用热管砂轮磨削 TC4 钛合金,工件表面的热电势信号是典型的缓磨热电势信号,即出现大量对应磨粒点热电势的尖脉冲,其对应工件表面热电势的这些脉冲的下包络线热电势值很低且非常平缓。

为了进一步探究热管砂轮在防止难加工材料 TC4 钛合金工件表面烧伤,提高材料去除率方面的潜力,将

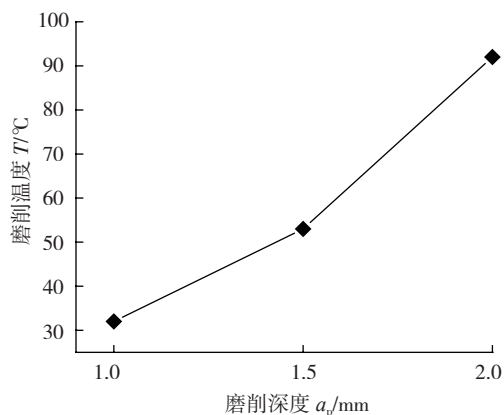


图8 磨削深度对磨削温度的影响

Fig.8 Influences of grinding depth on the grinding temperature

磨削深度从  $a_p=1\text{mm}$  开始,以 0.5mm 为步长逐次递增,直至  $a_p=2\text{mm}$ ,其他磨削工艺参数和冷却条件均与前文一致,得出的磨削温度见图 8。

从图中可以看出,磨削深度  $a_p$  对热管砂轮的磨削温度影响显著,热管砂轮的磨削温度从  $a_p=1\text{mm}$  时的约  $30^\circ\text{C}$  上升到  $a_p=2\text{mm}$  时的约  $90^\circ\text{C}$ 。磨削温度随磨削深度增大而上升是磨削过程中的一个正常现象,这是因为随着磨削深度的增加,材料去除体积也相应提高,切屑变形力和摩擦力均增大,从而引起弧区温升;另一方面,磨削弧长的增加也使磨削弧区的封闭性更高,弧区向周围环境散热变得更加困难,这造成了热量在弧区的大量积聚,温升更加剧烈。

为了检测热管砂轮在以  $v_s=30\text{m/s}$ ,  $v_w=60\text{mm/min}$ ,  $a_p=2\text{mm}$  的工艺参数条件下磨削 TC4 钛合金后,工件表面是否出现烧伤,通过金相分析方法进行评价。在磨削加工完的工件表面通过线切割获取试验样品,进行金相观察的表面为垂直于已加工表面并与进给方向平行的平面。因为此表面垂直于已加工表面,所以它可以显示加工表面层以下沿磨削深度方向上的金相组织情况;又因为这一平面平行于工件进给方向,即与磨粒在已加工表面上的运动方向相同,所以它显示了磨粒在运动过程中对工件材料表层的金相组织造成的影响。试样经镶嵌后对观察表面进行研磨、抛光和腐蚀。采用 2% 的 HF 与 4% 的  $\text{HNO}_3$  水溶液腐蚀 18s 后,在 KH-7700 三维视频显微镜放大倍数为 700 倍下进行观察,显微组织如图 9 所示。



图9 热管砂轮磨削TC4的显微组织

Fig.9 TC4 Microstructure after heat pipe grinding wheel milling

由图可以看出,热管砂轮磨削后的工件表层显微组织与基体的显微组织相比较,晶粒没有发生明显的变化,这说明工件没有变质层的产生,从而反映了热管砂轮磨削 TC4 钛合金的温度较低,工件没有发生烧伤。这

个现象可以用热管蒸发端换热面积增大,使热管砂轮的换热性能得到提升来解释。对热管砂轮而言,热管蒸发端与磨削弧区最直接的热量通道便是分布于磨削弧区的一个个磨粒,在其他条件都不变的前提下,磨削深度增加引起磨削弧区面积增大,这就使得弧区的磨粒个数大大增加,由于CBN磨粒本身具有优良的导热性,从而使磨削弧区的热量可以更多、更快地进入热管。这充分说明使用本文研制的热管砂轮在磨削过程中可以借助砂轮内部热管的换热作用,将更多积聚在磨削弧区的热量快速疏导出去,从而将弧区温度稳定控制在100℃以下。

#### 4 结论

(1)分析了热管砂轮在磨削过程中的强化换热原理,设计了一种焊接式热管砂轮,同时实现了对热管砂轮的抽真空、精确注液以及真空封尾,制备出可用于磨削加工的热管砂轮。

(2)开展了热管砂轮缓进给深切磨削TC4钛合金的试验研究,试验结果表明:使用热管砂轮能将磨削弧区积聚的热量通过砂轮内部热管的换热作用快速疏导出去,从而将弧区温度稳定控制在100℃以下。

(3)对磨削加工后工件的表层显微组织与基体的显微组织进行比较,发现晶粒没有发生明显的变化,没有变质层的产生,从而确证了使用热管砂轮在缓进给深切磨削TC4钛合金时能有效避免工件烧伤。

#### 参考文献

[1] 任敬心,康仁科,史兴宽.难加工材料的磨削.北京:国防工业出版社,1999.

[2] 孙方宏,陈明,徐鸿钧,等.磨削弧区采用径向射流冲击强化换热的试验研究.工具技术,1999,33(10):3-6.

[3] Ebbrell S, Woolley N H, Tridimas Y D, et al. The effects of cutting fluid application methods on the grinding process. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(2): 209-223.

[4] Irani R A, Bauer R J, Warkentin A. A review of cutting fluid application in the grinding process. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(15): 1696-1705.

[5] Morgan M N, Jackson A R, Wu H, et al. Optimisation of fluid application in grinding. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2008, 57(1): 363-366.

[6] 徐鸿钧,傅玉灿,孙方宏,等.高效磨削时弧区热作用机理与强化弧区换热的基础研究.中国科学,2002,32(3):296-307.

[7] Song F, Ewing D, Ching C Y. Experimental investigation on the heat transfer characteristics of axial rotating heat pipes. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(22): 4721-4731.

[8] 庄骏,张红.热管技术及其工程应用.北京:化学工业出版社,2000.

(责编 小城)

(上接第77页)

[2] Powrie H E G, McNicholas K. Gas path cognition monitoring during accelerated mission testing of a demonstrator engine. AIAA-1997-2904, 1997.

[3] Fisher C E, Ford C. Data and information fusion for gas path debris monitoring//Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Montana, USA: IEEE, 2001:3017-3022.

[4] Powrie H E G. Electrostatic charge generation associated with machinery component generation//Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Montana, USA, 2002:2927-2934.

[5] Novis A, Powrie H E G. PHM sensor implementation in the real world—a status report. IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2006:1-9.

[6] Powrie H E G, Novis A. Gas path debris monitoring for F-35 joint strike fighter propulsion system PHM//IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2006:1-8.

[7] Lapini G L, Zippo M, Trione G. The use of electrostatic charge measurements as an early warning of distress in heavy-duty gas turbines. ASME Turbo Expo Proceedings, 2001:711-716.

[8] Wilcox M, Ransom D. Engine distress detection in gas turbines with electrostatic sensors//Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air, Glasgow, 2010:14-18.

[9] 文振华,左洪福,李耀华.气路颗粒静电监测技术及实验.航空动力学报,2008,23(12):2321-2326.

[10] 李耀华,左洪福,文振华.航空发动机气路颗粒静电监测技术模拟实验.航空学报,2009,30(4):604-608.

[11] 李耀华,左洪福,刘鹏鹏.某型航空涡轮轴发动机机尾气静电监测探索性实验.航空学报,2010,31(11):2174-2181.

[12] 孙见忠,左洪福,詹志娟,等.涡轴发动机机尾气静电监测信号影响因素分析.航空学报,2012(3):37-45.

[13] Sorokin A, Arnold F. Electrically charged small soot particles in the exhaust of an aircraft gas-turbine engine combustor: comparison of model and experiment. Atmospheric Environment, 2004,38(17):2611-2618.

[14] Chen C, Sun C, Zhang Y, et al. Fault diagnosis for largescale wind turbine rolling bearing using stress wave and wavelet analysis. Electrical Machines and Systems, 2005(3): 2239-2244.

[15] 牛培峰,张君.小波分析技术在汽轮机故障诊断中的应用.动力工程,2007,27(1):76-80.

[16] 师黎,王丽佳.小波变换在心电信号处理机特征提取中的应用.郑州大学学报(工学版),2006,27(2):65-69.

[17] Ivan W, Selesnick. Hilbert transform pairs of wavelet bases. IEEE Signal Processing Letters, 2001,8(6):170-173.

[18] Noo F, Clackdoyle R, Pack J D. A two-step hilbert transform method for 2D image reconstruction. Physics in Medicine and Biology, 2004(49):3903-3923.

[19] Puche P R, Pineda S M, Riera G, et al. Improved resolution of the MCSA method via hilbert transform, enabling the diagnosis of rotor asymmetries at very low slip. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009,24(1):52-59.

[20] 黄中华,谢雅.基于Hilbert变换的滚动轴承内环和外环故障诊断.中南大学学报(自然科学版),2011,42(7):1992-1996.

(责编 深蓝)