

人工关节磨损颗粒的分形表征及分类特征分析

陆兴华¹, 王庆良², 崔文²

(1. 徐州工程学院 机电工程学院, 江苏 徐州 221111; 2. 中国矿业大学 材料科学与工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:目的 研究膝关节模拟实验条件下超高分子量聚乙烯(UHMWPE)磨损颗粒的形态及分形表征,对磨损颗粒进行分类特征分析,探讨分形维数与磨损状态的相关性。**方法** 采用膝关节模拟器以实现模拟膝关节磨损运动,股骨、衬垫分别选用医用锻造 CoCrMo 合金和 UHMWPE。磨损颗粒提取依据标准 ISO 17853 进行,利用磨粒轮廓自动提取与分形识别系统对磨损颗粒进行分形分析,采用网格划分、聚类分析和遗传模拟退火算法 3 种模型对磨粒进行分类识别。**结果** UHMWPE 单体磨粒的分形特征明显,尺寸较大的条形磨屑过渡到尺寸较小的类球形磨粒时,雷达分形维数不断减小,球状磨粒的分形维数 D 接近 0。遗传模拟退火算法模型磨粒群体分类划分的分形维数内加权误差平方和最小,聚类特征明显。当磨损运行周期较低时,分形维数较大的条状、针叶状和纤维状磨粒占比较大,磨损以犁沟和剥落磨损为主;随磨损周期的延长,大分形维数磨粒占比下降,低分形维数的片状、块状和类球形磨粒占比上升,磨损向疲劳磨损和黏着磨损转变,磨损状态过渡到复合磨损期。当进入稳定磨损期后,各类形态磨粒的占比例变化不大。由于小尺寸磨粒的数量增加,群体分形维数有所减小。**结论** 以改进雷达图分形方法为基础的磨粒轮廓自动提取与分形识别系统,可用于人工关节磨损颗粒的形态轮廓提取、分形维数计算和参数统计,为人工关节磨粒的识别和诊断提供新的数字化分析工具。

关键词:人工膝关节; 超高分子量聚乙烯; 磨损颗粒; 分形特征; 磨损机制

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2018.05.005

Fractal Characterization and Classification Characteristics of the Artificial Joint Wear Particles

LU Xinghua¹, WANG Qingliang², CUI Wen²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221111, Jiangsu, China; 2. School of Material Science and Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: Objective To study the morphology and fractal characterization of UHMWPE wear particles by simulation experiment on knee joint, analyze the classification characteristics of wear particles and discuss the correlation between fractal dimension and wear state. **Methods** The knee joint simulator was used to realize the knee joint wear motion. The forged CoCrMo alloy and UHMWPE were selected as artificial joint prosthesis materials. The wear particle extraction was based on ISO 17853. The automatic extraction and fractal identification system of wear particles were used to investigate fractal characteristics of wear particles. Three kinds of models were established to classify and recognize wear particles, by using the meshing method, cluster analysis and genetic simulated annealing algorithm, respectively. **Results** The fractal characteristics of UHMWPE single wear parti-

cles was very obvious. The fractal dimension calculated by radar fractal method decreased, during the transition from the larger size of strip debris to the smaller size of roundness debris, and the fractal dimension D of spherical debris was close to zero. The weighted sum of squared error values of fractal dimension for wear particle population classification was the smallest by the model of genetic simulated annealing algorithm, and the clustering feature was very obvious. When the wear cycles were low, the large fractal dimension of strip, needle and fibrous abrasive debris with larger fractal dimension had the largest proportion, and the main abrasion modes were the ploughing and spalling wears. With the extension of wear period, the proportion of wear particles with large fractal dimension decreased, and the proportion of flaky, blocky and near-spherical wear particles with low fractal dimension increased clearly. The wear mechanism changed to the fatigue and adhesive wear, and the wear state transitioned to the composite wear period. During the stable wear period, the proportion of all kinds of abrasive grains changed little. Due to the increase in the number of small particles, the fractal dimension decreased in stable wear state. **Conclusions** Based on the improved radar graph method, the fractal dimension of wear particles with different profiles could be obtained by automatic extraction and fractal identification system of wear particles. The research findings can be used in shape extraction, fractal dimension calculation and parameter statistics, as well as providing a new digital analysis tool for identification and diagnosis for wear particles of artificial prosthesis.

Key words: artificial knee joint; ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE); wear particles; fractal characteristics; wear mechanism

磨粒形成于材料磨损表面。在油液磨粒颗粒的检测中,可根据磨粒形貌的变化判断机器的磨损状态。人工关节作为典型的摩擦运动副,因材料磨损而形成大量的磨损颗粒,已成为临床所谓“磨粒病”的直接诱因^[1-4]。前期的研究表明,不同形状磨粒的形貌及尺寸等不仅包含大量磨损信息,而且具有典型的分形特征,如磨粒边缘参差不齐、粗糙而不光滑、轮廓曲线虽然连续但是每一点处都不可导^[5-6]。虽然摩擦副的磨损状态复杂多变且具有不确定性,但产生的磨粒都具有相似的分形特征,并呈现出一定的规律性,其分形维数计算和表征对于揭示摩擦副不同磨损状态下的磨损机制具有重要研究意义^[7-8]。

传统的磨粒表征方法一般基于统计学原理和欧氏几何,常用磨粒的面积、体积、周长、形状因子、表面因子和长短轴尺寸等进行统计和表征。由于磨粒的形状变化不一和轮廓特征的复杂性,几何方法的解析尺度对计算结果有很大影响,往往导致计算结果不具有唯一性^[9-11]。常用磨粒轮廓算法包括尺码法、盒维数法、方差法、协方差加权法等^[11-13]。在计算磨粒轮廓分形维数时,尺码法计算的磨屑轮廓分形维数存在不确定的问题,即对于一定的边界轮廓,所计算的分形维数值可能不是唯一的,因为该方法除受图像因素的影响外,还受计算方法本身

因素的影响,如沿磨屑边缘“行走”测量时的起始点选择方式、步长的确定方法等。其他如盒维数法、方差法属于结构函数法,由于受最小尺度选择和尺度区间的影响,计算出的分形维数偏差较大,稳定性也差,不仅使分形维数的计算结果没有足够的客观性,而且无法估算分形维数的计算精度。葛世荣等^[13-14]用协方差加权法计算分形维数,计算出的结果偏差很小。刘洪涛等^[15]采用雷达图对磨粒的分形维数进行计算和表征,提出一种简单而且有效的分形维数计算方法。本文基于改进的雷达图分形法,利用磨粒轮廓自动提取与分形识别系统对磨损颗粒进行分形表征,采用网格划分(meshing classification, MESH)、模糊 C-均值(fuzzy C-means, FCM)聚类分析和遗传模拟退火算法(genetic simulated annealing algorithm, SAGA)模型对磨粒进行分类识别,并分析分形维数与磨损状态的相关性。研究结果可为人工关节磨损颗粒的形态识别和数字化分析奠定初步的理论和技術基础。

1 实验材料及方法

膝关节配副磨损实验在膝关节模拟试验机(DFKS-009, Simulation Solutions 公司,英国)上进行,股骨选用医用 CoCrMo 合金,衬垫选用超高分子量聚乙烯(UHMWPE),材料符合相关标准

(CoCrMo:ISO 5832, UHMWPE:ISO 5834)。实验选取的摆动角 15° , 转动角 3° , 载荷 1.8 kN, 实验频率 1 Hz, 实验转数分别为 10^5 、 2×10^5 、 3×10^5 转, CoCrMo 合金外加腐蚀电位 $0.5 \text{ V}^{[16]}$ 。腐蚀介质采用模拟体液, 根据文献[17]中的方案配制, 该溶液的离子成分与人体体液基本相同, 二次蒸馏水配置模拟体液, 溶液 pH 值控制在 7.42 ± 0.01 , 实验温度控制 (36 ± 1) $^\circ\text{C}$ 。为避免模拟体液变质, 加入少量叠氮钠防腐剂。磨粒的提取参考 ISO 17853:2010 标准, 获得

分析所需磨损颗粒, 利用扫描电镜 (S3000N, Hitachi 公司, 日本) 分析磨粒的形貌特征。

2 磨粒的雷达图分形表征

UHMWPE 磨损颗粒的形态特征可归结为 6 大类典型形态, 分别为条状、针叶状、片状、块状、类球形和球形磨粒。利用“磨粒轮廓自动提取与分形识别系统”, 对 6 种典型磨粒进行分形分析。图 1 所示为 6 类典型形态磨粒和边缘识别轮廓图。

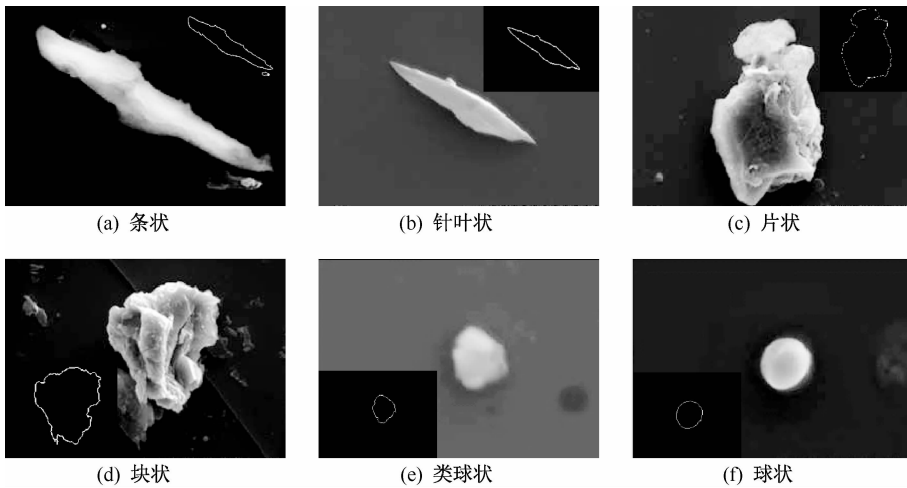


图 1 6 类典型形态磨粒和轮廓边缘识别图

Fig. 1 Six typical shapes of wear particles and contour edges (a) Strip wear debris, (b) Needle wear debris, (c) Flaky wear debris, (d) Blocky wear debris, (e) Near-spherical wear debris, (f) Spherical wear debris

将各轮廓坐标与最长轴中点 O 的距离 L 和排列序列数值 N 取对数, 利用改进雷达图分形方法, 得到不同形态磨粒轮廓分形曲线 (见图 2)。分析可知, L 的对数值与 N 的对数值有较好的线性关系, 分形特征明显。利用最小二乘法对 6 种典型磨损颗粒的雷达分形曲线进行拟合, 回归直线的斜率为 α , 则磨损颗粒的雷达图分形维数 $D = \alpha$ 。由此得到条状、针叶状、片状、块状、类球形和球形磨粒的分形维数分别为 0.63、0.54、0.32、0.20、0.16 和 0.038。当磨粒形态从尺寸较大的条形磨粒过渡到尺寸较小的类球形磨粒时, 分形维数值不断减小, 球状磨粒的分形维数 D 接近于 0 (磨损颗粒为理想球形时, 按照雷达图的表征方式, $D = 0$)。由此可见, 不同形态磨粒的雷达分形维数变化规律性非常明显, 磨粒的轮廓曲线具有尺寸独立性, 能够适应磨损颗粒的多

尺度测量要求, 可用作磨损颗粒外形轮廓的主要描述参数。

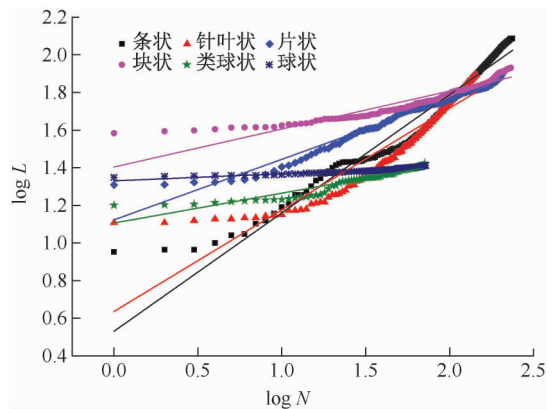


图 2 不同形态磨粒雷达图表征的双对数坐标

Fig. 2 Double-logarithm curves of radar graph fractal description for UHMWPE wear particles with different shapes

3 磨粒分类的划分模型

采用网格划分、模糊 C-均值和遗传模拟退火3种聚类算法模型,对磨粒分类划分进行数据处理。剔除个别最长轴尺寸 $>200 \mu\text{m}$ 或 $D > 1$ 的磨粒,以磨粒最长轴尺寸 $200 \mu\text{m}$ 为单位对磨粒尺寸进行数据归一化处理,降低纵横坐标尺度相差过大对计算结果造成的误差。数据处理以模拟器 10^5 转实验条件获取的磨粒为样本,优化磨粒分类算法模型。以此为基础,对各类磨粒所占比例随运转周期变化进行分析。

3.1 网格划分(MESH)算法

MESH 算法将对象空间分为有限的网格结构,所有聚类操作仅仅为单个或多个网格空间上点总数的统计。根据磨粒分形维数与粒径尺寸的分析,绝大多数磨粒的最长轴尺寸集中于 0.25 (即 $50 \mu\text{m}$) 以下,将磨粒分形维数划分为 3 段区域范围: $0 \sim 0.3$ 、 $0.3 \sim 0.6$ 和 $0.6 \sim 1$,分别对应球状/类球状磨粒(I)、片状/块状磨粒(II)和条状/针叶状(含纤维状)磨粒形态(III),同时以 0.25 的尺寸阈值将磨粒分为大颗粒及小颗粒两类(分别以不同颜色标出)。以此为基础,对磨粒的分形维数和尺寸进行网格化划分。由图 3 MESH 算法的分类统计结果可知,模拟器运转 10^5 转周期时, I 类小尺寸球状和类球状磨粒 145 个, II 类片状和块状磨粒 444 个, III 类条状和针叶状等磨粒 392 个, II、III 类磨粒占总数的 42.9% 和 37.9% 。此方法得到的磨粒分类结果主要是依据经验对磨粒进行划分,人为因素将分形维数和磨料尺寸生硬地切分开,在数值统计上存在较大的误差。

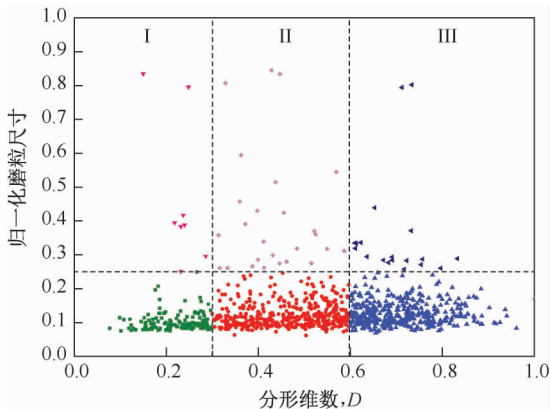


图 3 MESH 算法磨粒分类结果

Fig. 3 Wear particle classification by MESH method

3.2 模糊 C-均值(FCM)聚类算法

FCM 算法是寻找一种最佳的分类,使该分类产生最小的函数值 J_b 。FCM 的核心是反复修改聚类中心数据隶属度和进行分类、迭代调整 (U, v) ,使得目标函数最小。当算法收敛时,得到聚类的各类中心和各个样本对于各子类的隶属度,完成模糊聚类划分^[18-21]。设 n 个磨粒构成的数据样本集为 X , $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,其中每个元素包含分形维数 (D) 及尺寸两个属性; $C (2 < C < n)$ 是样本聚类的分类数目; $A = \{A_1, A_2, \dots, A_c\}$ 表示相应的 C 个类别, U 是对应的相似分类矩阵。 $v = \{v_1, v_2, \dots, v_c\}$ 为各类的聚类中心, $\mu_k(x_i)$ 是样本 x_i 对于类 A_k 的隶属度,用 μ_{ik} 表示,则目标函数 J_b 可表示为:

$$J_b(U, v) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^c (\mu_{ik})^b (d_{ik})^2$$

式中: b 为模糊加权参数; $d_{ik} = \|x_k - v_i\| = \sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij} - v_{kj})^2}$ 为第 i 个样本点 x_i 与 k 类中心点 v_k 的欧氏距离; m 为样本特征数, $m = 2$; $\mu_{ik} = \left[\sum_{j=1}^c (d_{ik}/d_{jk})^{2/(b-1)} \right]^{-1}$ 是样本 x_i 对于 A_k 类的隶属度,要求 1 个样本对各个聚类的隶属度值总和等于 1,即 $\sum_{j=1}^c \mu_{ij} = 1 (i = 1, 2, \dots, n)$;

$$v_{ij} = \left[\sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^b x_{kj} \right] / \left[\sum_{k=1}^n (\mu_{ik})^b \right]$$

为对应的 C 个聚类中心。对于所有的 $\{v_i\}$, $\mu_{ik} = 0$ 。图 4 给出了 FCM 算法对模拟器 10^5 转周期磨粒的分类划分结果。第 I 类球状、类球状磨粒分形维数取值区间 $0 \sim 0.29$, 144 个磨粒;第 II、III 类片状及块状磨粒分形维数取值区间 $0.30 \sim 0.54$, 364 个磨粒;第 IV 类针叶状、V 类条状和 VI 类纤维状等磨粒分形维数取值区间 $0.54 \sim 1$, 526 个磨粒。计算得到 $J_b = 0.6618$ 。

3.3 遗传模拟退火算法(SAGA)

SAGA 的设置分类数为 6,目标函数是算出每个个体的聚类值 J_b 。 J_b 值越小,个体的适应度就越高。图 5 所示为 10^5 转运行周期样本的 SAGA 分类结果^[22-25]。第 I 类球状、类球状磨粒分形维数取值区间 $0 \sim 0.28$, 137 个磨粒;第 II、III 类片状及块状磨粒分形维数取值区间 $0.28 \sim 0.53$, 363 个磨粒;第

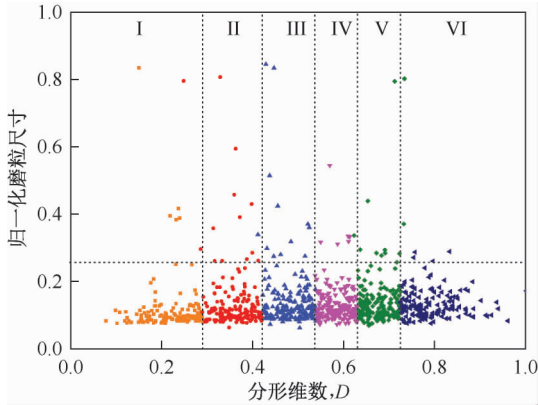


图4 FCM 聚类算法磨粒分类结果

Fig.4 Wear particle classification by FCM clustering method

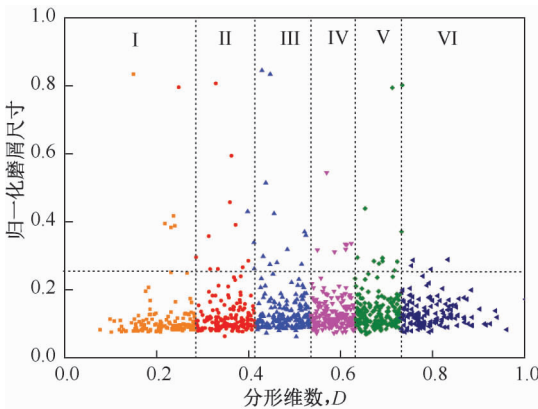


图5 SAGA 算法磨粒分类结果

Fig.5 Wear particle classification by SAGA method

IV、V及VI类针叶状、条状和纤维状磨粒分形维数取值区间 0.53 ~ 1, 534 个磨粒; $J_b = 0.6609$, 多次运行结果均一致。可见 SAGA 和 FCM 都得到最优目标函数值, SAGA 比 FCM 得到的目标函数值更低, 精确度提高。当数据量更大时, SAGA 的优越性将更加明显。

4 分析与讨论

表1所示为采用3种分类模型的磨粒分类分形维数区间划分结果。可以发现, MESH对I、III类磨粒分类区间过长, FCM及SAGA得出的磨粒分类结果相近, 但SAGA的类内加权误差平方和 J_b 值较FCM更小, 聚类特征更加明显。

由图6所示各类磨粒所占比例随运转周期变化可知, 随实验周期的增加, 磨粒群体的分形维数 D

表1 不同聚类模型磨粒分形维数区间划分

Tab.1 Fractal dimension partition of wear particles in different clustering models

分类算法	球状、类球状/%	片状、块状/%	针叶状、条状和纤维状/%
MESH	0 ~ 0.30	0.30 ~ 0.60	0.60 ~ 1
FCM	0 ~ 0.29	0.29 ~ 0.54	0.54 ~ 1
SAGA	0 ~ 0.28	0.28 ~ 0.53	0.53 ~ 1

向低值方向移动, 低分形维数的磨粒有增加趋势。磨粒分形维数的变化反映了磨粒形态特征的变化, 进一步可推断磨损机制的转化趋势。磨损周期低于 10^5 转时, 分形维数较大的针叶状、条状及纤维状磨粒等所占比重较大, 此时摩擦副运动处于磨损跑合期, 犁沟切削和循环塑变所导致的剥落磨损为主。当实验周期增加到 2×10^5 转时, 条状等大分形维数磨粒比例下降约 20%, 片状和块状磨粒的比重有明显上升, 球状、类球状磨粒的比重也有所提高, 同时大于 $50 \mu\text{m}$ 的磨粒比重均有上升, 说明此磨损阶段的犁沟磨损已趋于减弱, 磨损机制向疲劳剥落磨损和粘着磨损转变, 摩擦副逐步过渡到复合磨损期。当实验周期达到 3×10^5 转时, 由于疲劳磨损及多次碾压破断产生的小尺寸片状及块状磨粒比例

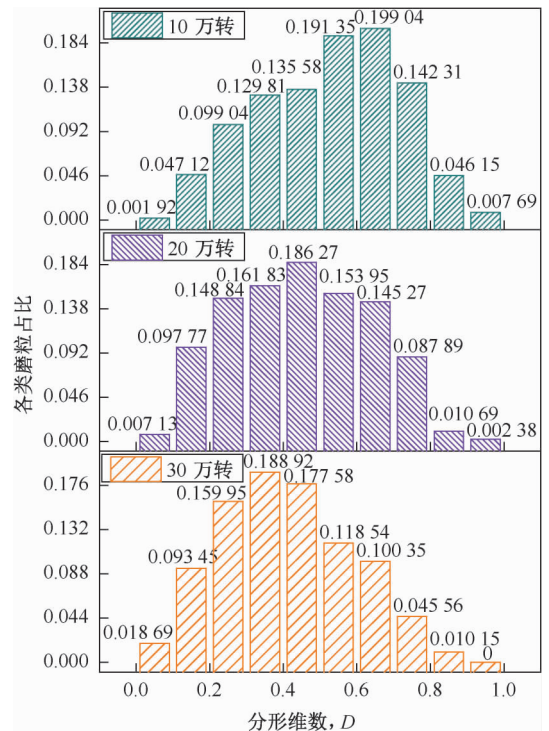


图6 各类磨粒比重随运转周期的变化图

Fig.6 Wear particle frequency varied with the operating cycle

有继续增加趋势,但增加量已趋于减弱,摩擦副已逐步进入到稳定磨损阶段。此时,大部分小尺寸磨粒的出现是大尺寸磨粒在循环应力作用下碾压碎裂形成,同时大尺寸条状、针叶状和纤维类磨粒占比则大量减少。

5 结论

(1) 以改进雷达图分形方法为基础的磨粒轮廓自动提取与分形识别系统,可用于人工关节磨损颗粒的形态轮廓提取和分形维数计算,为磨粒的识别和诊断提供新的数字化分析工具。

(2) UHMWPE 单体磨粒的分形特征明显,当从尺寸较大的条形磨粒过渡到尺寸较小的类球形磨粒时,雷达分形维数不断减小,球状磨粒的分形维数 D 接近 0。SAGA 模型磨粒群体分类划分的分形维数内加权误差平方和 J_b 值最小,聚类特征明显。

(3) UHMWPE 磨粒群体的分形特征和分类划分结果,反映了磨损的演变过程。磨损周期较低时,分形维数较大的针叶状、条状及纤维状类磨粒占比最大,磨损以犁沟和剥落磨损为主,对应于摩擦副的跑和阶段。随磨损周期的延长,大分形维数磨粒占比下降,低分形维数的片状、块状和类球状磨粒占比上升,磨损损伤向疲劳磨损和黏着磨损转变,磨损状态过渡到复合磨损期。当进入稳定磨损期后,各类形态磨粒的占比例变化不大,但由于小尺寸磨粒的数量增加,群体分形维数有所减小。

参考文献:

[1] PURDUE PE, KOULOUVARIS P, POTTER HG, et al. The cellular and molecular biology of periprosthetic osteolysis [J]. Clin Orthop Relat Res, 2007, 454: 251-261

[2] 王成焘, 黄嘉华, 戴魁戎. 人工关节失效的统计分析及其在技术发展中的重要作用[J]. 医用生物力学, 2012, 27(1): 1-6.

WANG CT, HUANG JH, DAI KR. Statistical analysis on artificial joint failure and its role in technology development [J]. J Med Biomech, 2012, 27(1): 1-6.

[3] 王成焘. 天然与人工关节中的摩擦学问题[J]. 医用生物力学, 2009, 24(5): 317-325.

WANG CT. Tribology problems in natural and artificial joint [J]. J Med Biomech, 2009, 24(5): 317-325.

[4] 葛世荣, 王庆良. 人工关节改性材料的生物摩擦学研究[J]. 医用生物力学, 2009, 24(5): 326-332.

GE SR, WANG QL. Investigation on the biotribology of the

modified artificial joint materials [J]. J Med Biomech, 2009, 24(5): 326-332.

[5] 宋剑, 廖振华, 王松, 等. 人工关节材料磨屑分离与表征的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(3): 388-396

[6] MINODA Y, KOBAYASHI A, IWAKI H, et al. Characteristics of polyethylene wear particles isolated from synovial fluid after mobile-bearing and posterior-stabilized total knee arthroplasties [J]. J Biomed Mater Res B Appl Biomater, 2004, 71B(1): 1-6.

[7] 葛世荣, 王成焘. 人体生物摩擦学的研究现状与展望 [J]. 摩擦学学报, 2005, 25(2): 186-191.

[8] LIU HT, GE SR, LUO Y. Multiple fractal of fragmentizing process and distribution of wear particles [J]. J China Univ Min Tech, 2007, 36(2): 182-187.

[9] PLUMLEE K, SCHWARTZ CJ. Investigating UHMWPE wear mechanisms by decomposing wear debris distributions [J]. Wear, 2011, 271 (9-10): 2208-2212

[10] MCMULLIN BT, LEUNG MY, SHANBHAG AS, et al. Correlating subjective and objective descriptors of ultra high molecular weight wear particles from total joint prostheses [J]. Biomaterials, 2006, 27(5): 752-757.

[11] LIU HT, GE SR, CAO SF, et al. Comparison of wear debris generated from ultra high molecular weight polyethylene *in vivo* and in artificial joint simulator [J]. Wear, 2011, 271(5-6): 647-652

[12] ZHU H, GE SR. Comparison of fractal characterization effects of structure function and mean square root [J]. J China Univ Min Tech, 2004, 33(4): 396-399.

[13] 葛世荣, 索双富. 表面轮廓分形维数计算方法的研究[J]. 摩擦学学报, 1997, 17(4): 354-362

[14] 陈国安, 葛世荣. 分形理论在摩擦学研究中的应用[J]. 摩擦学学报, 1998, 18(2): 179-184

[15] LIU HT, GE SR. Description to wear debris boundaries by radar graph fractal method [J]. Chinese Sci Bull, 2007, 52(16): 2285-2290.

[16] 王庆良, 王斐, 董红莉, 等. 锻造 CoCrMo 合金关节材料的摩擦腐蚀行为[J]. 摩擦学报, 2015, 35(3): 301-307.

[17] KOKUBO T, TAKADAMA H. How useful is SBF in predicting *in vivo* bone bioactivity? [J]. Biomaterials, 2006, 27(15): 2907-2915.

[18] YI W, TANGH, CHEN Y. An object-oriented semantic clustering algorithm for high-resolution remote sensing images using the aspect model [J]. IEEE Geosci Remote S, 2011, 8(3): 522-526.

[19] SZIRANYI T, SHADAYDEH M. Segmentation of remote sensing images using similarity-measure-based fusion-MRF mode I [J]. IEEE Geosci Remote S, 2014, 11(9): 1544-1548.

[20] FERREIRA JR, OLIVEIRA MC, FREITAS AL. Perform-

- ance evaluation of medical image similarity analysis in a heterogeneous architecture [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Computer-based Medical Systems. New York: IEEE, 2014: 159-164.
- [21] REN P, HU S, ZHU H, *et al.* Application of improved fuzzy C-means clustering in cell image segmentation [C]//Proceedings of International Conference on Bioinformatics & Biomedical Engineering. Wuhan: IEEE, 2011: 1-4.
- [22] 刘秋菊, 王仲英, 刘素华. 基于遗传模拟退火算法的模糊聚类方法[J]. 微计算机信息, 2006, 22(2): 270-272.
- [23] 韩冰青, 高建华. 基于模拟退火遗传算法的软件可靠性分配及研究[J]. 计算机工程, 2003, 29(4): 67-69.
- [24] BANDYOPADHYAY S, MAULIK U. Genetic clustering for automatic evolution of clusters and application to image classification [J]. Pattern Recogn, 2002, 35 (6): 1197-1208.
- [25] KAMRANI A, WANG R, GONZALEZ R. A genetic algorithm methodology for data mining and intelligent knowledge acquisition [J]. Comput Ind Eng, 2001, 40 (4): 361-377.

· 致读者 ·

关于论著文稿中中、英文摘要的书写要求

文摘是以提供文献内容梗概为目的,不加评价和解释,简明确切地记述文献重要内容的短文。摘要应具有自明性和独立性,并拥有与一次文献同等量的主要信息。即不阅读全文就能获得必要的信息。它的详简程度取决于文献的内容,通常中文文摘以不超过400字为宜。应以第三人称的语气书写。不要使用“本人”、“作者”、“我们”等作为陈述的主语。

摘要的内容应包括四个要素,即目的、方法、结果、结论。(1)目的:指研究的前提和缘起,即为什么要作此项研究,可以有简单的背景材料。(2)方法:指研究所用的原理、对象、观察和实验的具体方法等。(3)结果:指研究的结果、效果、数据等,着重反映创新性的、切实可行的成果,包括本组研究中的重要数据。(4)结论:指对结果进行综合分析,逻辑推理得出的判断。有的可指出实用价值和推广价值;如有特殊例外的发现或难以解决的问题,可以提出留待今后深入探讨。英文摘要的内容与中文摘要的内容要求大体一致。

英文摘要要求做到语法正确,用词准确,与中文摘要对应,方法、结果可略详于中文摘要。

本刊编辑部