

陶瓷人工关节的跑合和摩擦性能研究

周 银 生

(浙江大学机械系 杭州 310027)

摘要 研究 3 种生物陶瓷材料(氧化铝, 氮化硅和碳化硅)在水中的跑合及其摩擦特性。结果表明: 跑合前, 氮化硅-氮化硅摩擦副的起始摩擦因数和稳态摩擦因数最高, 碳化硅-碳化硅摩擦副的起始摩擦因数和稳态摩擦因数最低; 跑合后, 氧化铝-氧化铝摩擦副的稳态摩擦因数最高, 碳化硅-碳化硅摩擦副的起始摩擦因数和稳态摩擦因数仍然最低。当摩擦副表面均加工到超光洁状态(表面粗糙度 R_a 为纳米数量级)时, 碳化硅-碳化硅摩擦副的摩擦性能最佳, 氧化铝-氧化铝摩擦副的摩擦性能最差。从摩擦学角度来看, 碳化硅-碳化硅与氮化硅-氮化硅摩擦副有望作为合用的人工关节材料得以应用。

关键词 摩擦特性 陶瓷 人工关节 氧化铝 氮化硅 碳化硅

分类号 R318.17

陶瓷-陶瓷人工关节具有优良的摩擦学特性和生物相容性。自Boutin 于 1970 年实现了首例陶瓷-陶瓷人工关节的临床使用^[1]之后, 关于陶瓷-陶瓷人工关节的研究与应用获得了很大发展。值得注意的是, 目前, 在临床上广泛应用的陶瓷-陶瓷人工关节大多为氧化铝-氧化铝组合。虽然氧化铝-氧化铝组合有许多优点, 但它也有自身的缺陷, 比如, 氧化铝-氧化铝组合摩擦副的摩擦与磨损在陶瓷-陶瓷组合摩擦副中相对较高^[2]等。因此, 为了进一步提高陶瓷-陶瓷人工关节的使用寿命, 有必要开发性能更好的陶瓷-陶瓷人工关节材料。许多学者研究发现, 陶瓷自组合摩擦副在水中相对运动时产生摩擦化学抛光现象^[3,4]。这就说明通过充分的跑合有可能明显改善陶瓷摩擦副的摩擦磨损性能。为此, 本文对比研究了 3 种生物陶瓷材料(氧化铝 Al_2O_3 , 氮化硅 Si_3N_4 和碳化硅 SiC)自组合摩擦副的跑合和摩擦特性, 为开发性能更好的人工关节材料提供了实验依据。

1 试验部分

采用自行设计制造的盘-销摩擦试验机研究往复运动中陶瓷摩擦副的摩擦特性。试验机的工作原理见图 1。由于髌关节的接触形式可近似等效为球面和平面接触, 为了模拟髌关节的运动和受力情况, 图 1 中的试销设计为半径 1 000 mm 的球面, 试盘为光滑平面。试销的外形尺寸为 $\phi_{30} \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 试盘的外形尺寸为 $\phi_{100} \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。试盘由一计算机控制的电机驱动。为了研究陶瓷摩擦副的跑合及其摩擦性能, 特编制了一套电机驱动程序软件, 该软件可控制试盘作正反转, 同时还可控制试盘的静止时间(T_r), 加速时间(T_a), 减速时间(T_d), 稳态速度保持时间(T_k), 稳态转速及正反转运行次数等。图 2 给出了试盘的运行速度

1997-05-16 收到初稿, 1998-04-20 收到修改稿/本文通讯联系人周银生

周银生 男, 34 岁, 博士, 副教授, 目前主要从事生物摩擦学和润滑与密封机理的研究, 发表论文 40 余篇

曲线 表1所列3种生物陶瓷的物理与力学特性 研究3组生物陶瓷自组合摩擦副的跑合特性,再对比3组摩擦副在跑合前后的起始摩擦和稳态摩擦特性 摩擦磨损试验条件见表2所示,采用蒸馏水作为润滑剂 试验前先用丙酮超声清洗试销和试盘,然后再用蒸馏水清洗

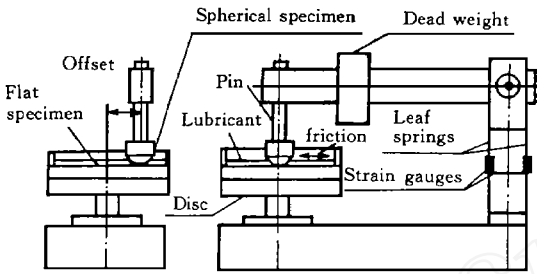


Fig 1 Schematic diagram of the pin-on-disc machine

图 1 盘-销摩擦试验机的工作原理

2 试验结果与分析

2.1 3组生物陶瓷自组合摩擦副的跑合特性

研究表明,在一定的试验条件下,氮化硅自组合和碳化硅自组合摩擦副的摩擦因数随滑动距离的延长而降低,经过一定的滑动距离后,氮化硅自组合和碳化硅自组合摩擦副的摩擦因数降低到约0.001.这种摩擦因数的急剧降低是跑合过程中摩擦化学磨损使陶瓷摩擦副接触表面充分抛光的结果 与此相反,在相同的试验条件下,氧化铝自组合摩擦副的

表 1 3种生物陶瓷的物理与力学特性

Table 1 Physical and mechanical properties of the ceramic materials

Material	Bulk density /g · cm ⁻³	Young's modulus /GPa	Poisson's ratio	HV	Thermal conductivity J/m · s · °C
Al ₂ O ₃	3.97	400	0.23	1900	33.47
SiC	3.20	440	0.16	2400	62.76
Si ₃ N ₄	3.25	300	0.28	1450	29.28

摩擦因数却随滑动距离的增加而升高 这是因为在跑合过程中氧化铝摩擦副接触表面粗糙度增大所致 表3列出了跑合前后3种生物陶瓷材料的表面粗糙度 另一方面,当稳态滑动速度太低或其保持时间太短时,摩擦化学抛光现象将难以发生 而发生摩擦化学抛光所需的最小稳态滑动速度及其保持时间随原始表面粗糙度和接触压力的不同而变化

2.2 3组生物陶瓷自组合摩擦副的摩擦特性

在本文中,“跑合前的摩擦特性”是指原始试样在很短的滑动距离(约0.5m)内所测得的摩擦因数;“跑合后的摩擦特性”是指原始试样经过很长的滑动距离(约2.0km)后所测得的摩擦因数

图3所示为3组生物陶瓷自组合摩擦副的摩擦因数随时间的变化曲线 可以看出,跑合前3种陶瓷的稳态摩擦因数(试盘稳定运转时的摩擦因

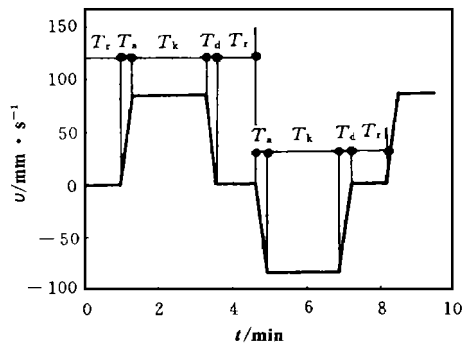


Fig 2 Sliding velocity vs time

图 2 试盘的运行速度曲线

数)均随时间变化,而且数值较大,说明摩擦副处于混合或边界润滑状态 跑合后氮化硅和碳化硅的稳态摩擦因数极小且不随时间变化,摩擦副处于全膜流体润滑状态 跑合前后3组生

物陶瓷自组合摩擦副的起始摩擦因数(试盘起动时的最大摩擦因数)随试盘静止时间的变化曲线如图 4 所示 可见,起始摩擦因数随试盘静止时间的延长而增加 这是因为随着试盘静止时间的增加,接触表面间的液膜会逐渐被挤出 图5所示为跑合前后3组生物陶瓷

表 2 盘-销摩擦磨损试验条件

Table 2 Test conditions for pin-on-disc testing								
Lubricant	Temperature /°C	Load /N	Relative humidity /%	Sliding velocity at constant speed rotation /mm · s ⁻¹	T _a /s	T _d /s	T _k /s	T _r /s
distilled water	23	40, 60, 80 100, 120	75	84	0.3	0.3	300	3, 30, 120, 300

表 3 试销与试盘的表面粗糙度

Table 3 Surface roughness of the pins and discs							
Pins	Material	Original surface roughness R _a /nm	Surface roughness after running-in R _a /nm	Discs	Material	Original surface roughness R _a /nm	Surface roughness after running-in R _a /nm
1	Al ₂ O ₃	10	20	1	Al ₂ O ₃	4	-
2	SiC	40	5	2	SiC	8	-
3	Si ₃ N ₄	40	3	3	Si ₃ N ₄	43	-

自组合摩擦副的稳态摩擦因数随试盘静止时间的变化曲线 可知试盘静止时间对稳态摩擦因数没有影响 图6和图7给出了跑合前后3组生物陶瓷自组合摩擦副的起始摩擦因数和

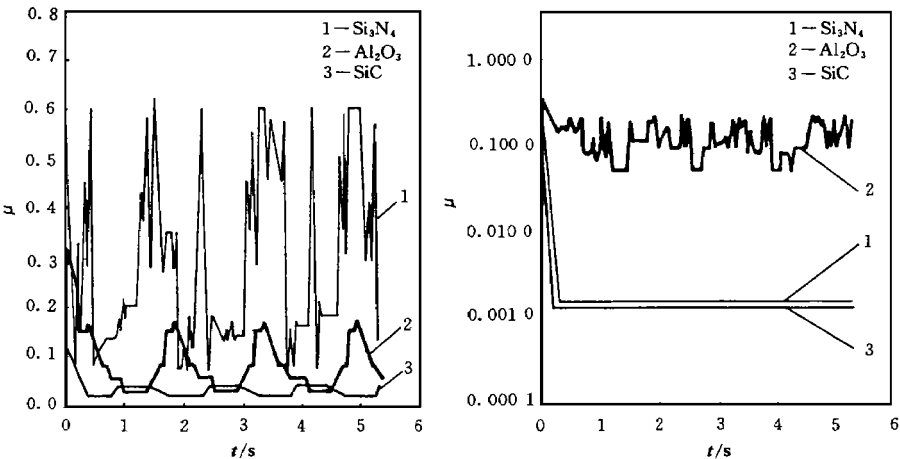


Fig 3 Friction factor vs time in a clockwise rotation period
图 3 3 组生物陶瓷自组合摩擦副的摩擦因数随时间的变化曲线

稳态摩擦因数随载荷的变化曲线 可以看出,氮化硅自组合摩擦副的起始摩擦因数随载荷增大而降低;而载荷对另外 2 种陶瓷自组合摩擦副的起始摩擦因数则无明显影响 跑合后,氮化硅自组合和碳化硅自组合摩擦副的稳态摩擦因数变得极低(约 0.001),而且随着载荷的

增大而降低 按照 Stribeck 轴承摩擦特性曲线,表明此时处于全膜流体动压润滑状态 当氧化铝、氮化硅和碳化硅表面均加工到超光洁状态(表面粗糙度 R_a 为纳米数量级)时,氮化硅

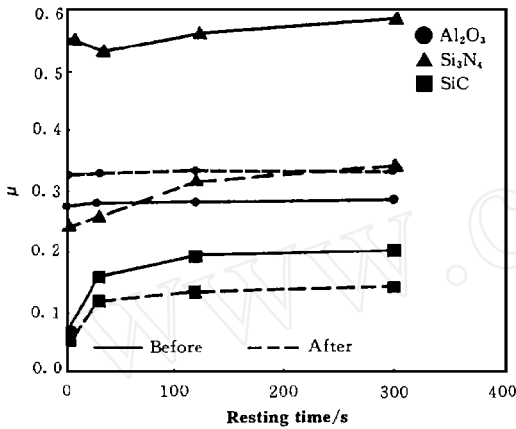


Fig 4 Start up friction factor of three ceramic materials vs resting time

图 4 跑合前后 3 组生物陶瓷自组合摩擦副的起始摩擦因数随试盘静止时间的变化曲线

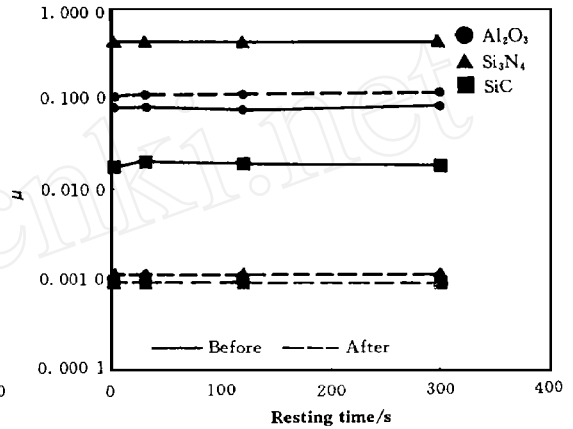


Fig 5 Steady state friction factor of three ceramic materials vs resting time

图 5 跑合前后 3 组生物陶瓷自组合摩擦副的稳态摩擦因数随试盘静止时间的变化曲线

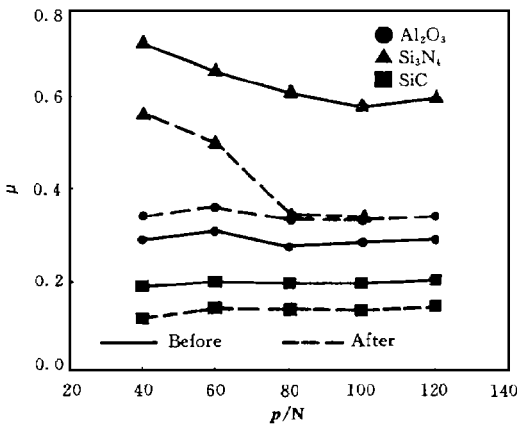


Fig 6 Start up friction factor of three ceramic materials vs load

图 6 跑合前后 3 组生物陶瓷自组合摩擦副的起始摩擦因数随载荷的变化曲线

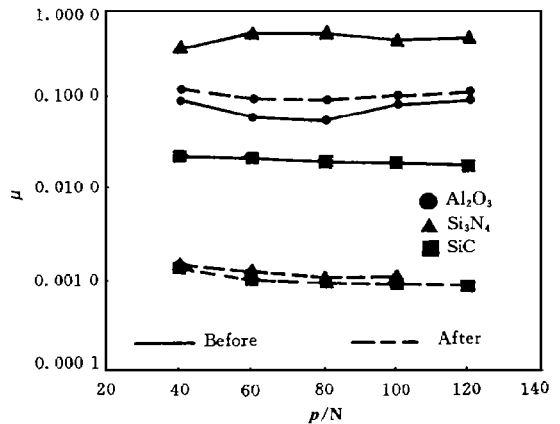


Fig 7 Steady state friction factor of three ceramic materials vs load

图 7 跑合前后 3 组生物陶瓷自组合摩擦副的稳态摩擦因数随载荷的变化曲线

自组合和碳化硅自组合摩擦副的摩擦性能将优于氧化铝自组合摩擦副 因此从摩擦学角度来看,碳化硅-碳化硅与氮化硅-氮化硅摩擦副有望作为合用的人工髋关节材料得以应用

3 结论

a 跑合前, 氮化硅-氮化硅摩擦副的起始摩擦因数和稳态摩擦因数最高, 碳化硅-碳化硅摩擦副的起始摩擦因数和稳态摩擦因数最低 跑合后, 氧化铝-氧化铝摩擦副的稳态摩擦因数最高, 碳化硅-碳化硅摩擦副的起始摩擦因数和稳态摩擦因数最低

b 当摩擦副表面均加工到超光洁状态(表面粗糙度 R_a 为纳米数量级)时, 碳化硅-碳化硅摩擦副的摩擦性能最佳, 氧化铝-氧化铝摩擦副的摩擦性能最差 从摩擦学角度来看, 碳化硅-碳化硅与氮化硅-氮化硅摩擦副有望作为合用的人工髋关节材料得以应用

参 考 文 献

- 1 Boutin P. Arthroplastie de la hanche par prothèse en alumine frittée Etude expérimentale et premières applications cliniques Rev Chir Orthop, 1972, 58: 229~246
- 2 Zhou Yinsheng, Ikeuchi K, Ohashi M. Comparison of the friction properties of four ceramic materials for joint replacements Wear, 1997, 210: 171~177
- 3 Tomizawa H, Fischer T E. Friction and wear of silicon nitride and silicon carbide in water: Hydrodynamic lubrication at low sliding speed obtained by tribochemical wear ASLE Transactions, 1987, 30(1): 41~46
- 4 Akazawa M, Kato K. Wear properties of Si_3N_4 in rolling-sliding contact Wear, 1988, 124: 123~132

Investigation on the Running-in and Friction Properties of Ceramic-Ceramic Prostheses

Zhou Yinsheng

(Department of Mechanical Engineering Zhejiang University Hangzhou 310027 China)

Abstract In this paper, the author investigated the running-in and friction properties of three ceramic materials in distilled water (including alumina, silicon nitride, and silicon carbide). The experimental results indicate that before running-in, the start up and steady state friction factors of silicon nitride are the highest, that of silicon carbide are the lowest among the three ceramic materials. After running-in, the steady state friction factor of alumina is the highest, that of silicon carbide is still the lowest among the three ceramic materials. When the surfaces of alumina, silicon nitride, and silicon carbide were polished to be ultra smooth (the surface roughness is a few nanometers), the friction property of silicon carbide in water is the best and that of alumina is the worst. From the tribological point of view, it is likely that silicon nitride-silicon nitride and silicon carbide-silicon carbide combinations are promising combinations for the total joint replacements.

Key words friction ceramic artificial joint alumina silicon nitride silicon carbide

Classifying number R318.17