

文章编号: 1007 - 4252(2021)01 - 0001 - 046

人工关节材料摩擦性能研究进展

洪如辰, 任瑛*, 李龙飞, 郭力源, 黄洋林, 洪董凤, 王仕通

(河南工业大学 材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 人工关节在使用过程中产生的大量磨屑进入关节周围组织中, 促使骨溶解和假体松动, 是限制假体使用寿命, 致使病人痛苦的主要原因。因此降低骨溶解和假体松动发生概率对提高人工关节寿命, 减轻病人痛苦具有十分重大的意义。磨损是关节材料失效的主要原因, 进一步防止磨损的发生需要提高关节材料摩擦磨损性能。因此众多研究者在此领域针对人造关节材料表面摩擦性能进行了大量的研究。我们针对提高人工关节材料的摩擦性能的研究成果进行了总结, 分类介绍了各种人工关节材料及其性能优缺点, 并围绕材料本身或经过改进技术后的人工关节材料的摩擦磨损性能展开综述。近年来通过对各种关节材质表面进行改性成为了研究热点, 比如 TiAlN 涂层作用在钛合金表面后能使钛合金磨损率能降低 80%, 激光处理能让 PEEK 磨损率降低 90%。另外新型的材料也不断问世, 例如继超高分子聚乙烯后性能优异的新型高密度聚乙烯材料 ULWPE。同时, 作为减磨耐磨且具有优异的生物相容性的碳类材料也引起了研究者的注意, 逐渐成为焦点。在此综述近几年关节材料摩擦性能发展成果, 为未来研究提供方向, 最后也提出了对人工关节发展的展望。

关键词: 人工关节; 磨损; 聚醚醚酮; 类金刚石薄膜; 超高分子量聚乙烯

中图分类号: TG174.44; R318.08

文献标志码: A

Research progress on tribological properties of artificial joint materials

HONG Ru-chen, REN Ying*, LI Long-fei, GUO Li-yuan, HUANG Yang-lin, HONG Dong-feng, WANG Shi-tong

(School of Material Science and Engineering, Henan University of Technology, Henan, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Practice has found that the main reason for limiting the service life of the prosthesis and causing the patient's pain is that a large amount of wear debris generated during the use of the artificial joint enters the tissues around the joint, which promotes osteolysis and loosening of the prosthesis. Therefore, reducing the probability of osteolysis and prosthesis loosening is of great significance to increase the life of

收稿日期: 2021-01-13; 修订日期: 2021-02-07

基金项目: 河南省科技厅自然科学项目(192102210036)。

作者简介: 洪如辰(2000-), 男, 本科, 主要研究方向为纳米涂层材料(E-mail: ruchenhong@163.com)。

通信作者: 任瑛(1982-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向类金刚石薄膜材料(E-mail: ying_ren@haut.edu.cn)。

artificial joints and alleviate patient suffering. Wear is the main reason for the failure of joint materials. In order to prevent the occurrence of wear, it is necessary to improve the friction and wear performance of joint materials. Therefore, many researchers have conducted a large number of tests and improvement studies on the friction properties of artificial joint materials. We summarize the research results of improving the friction performance of artificial joint materials in recent years, introduces various artificial joint materials and their performance advantages and disadvantages, and summarizes the friction and wear performance of the materials themselves or materials after improved technology. In recent years, the research on surface modification of various joint materials has become a hot spot. For example, TiAlN coating can reduce the wear rate of titanium alloy by 80% after acting on the surface of titanium alloy, and laser treatment can reduce the wear rate of PEEK by 90%. In addition, new materials are also coming out, such as ULWPE, a new high-density polyethylene material with excellent performance after ultra-high molecular polyethylene. At the same time, as a carbon material with excellent biocompatibility and friction reduction, it has also attracted the attention of researchers and has gradually become the focus. At there review the development results of the friction properties of joint materials in recent years and provide directions for future research. Finally, it also puts forward the prospects for the development of artificial joints.

Key words: Artificial joint wear; Titanium alloy; Polyetheretherketone; Diamond-like carbon; Ultra-high molecular polyethylene

0 引言

现今社会越来越多的人发生关节损伤,已有越来越多的人需要进行人工关节置换术。人工关节的需求量很大,且逐年递增。虽然人工关节置换术发展了上百年,但是目前使用的人工关节的寿命还不尽人意,大约15-20年。人本身关节的工作条件是恶劣的,常在低速重载且偶尔受冲击载荷的环境下工作,而人工关节在此环境下服役寿命较短,导致患者常常需要更换人工关节,这种现状难免给患者带来二次置换的痛苦。因此提高现有人工关节的使用寿命是必要的且急迫的。

人工关节的摩擦磨损性能是评价其使用寿命的一个重要标准。人类的原生关节摩擦系数极小,几乎没有磨损,但是人工关节的摩擦系数却高很多。人工关节承载表面活动时,在与界面摩擦过程中产生磨屑而导致关节磨损,从而发生失效并且常伴有其他症状,如假体无菌性松动^[1],假体断裂^[2]等。改善现有关节材料摩擦性能是解决目前人工关节材料寿命不足的主要研究方向之一。急需摩擦系数和磨损量极低,且综合性能很好的关节材料。

1 人工关节应用发展史

人工关节的研究可以追溯到19世纪末Gluck使用象牙制作关节。20世纪30年代316L不锈钢开始被应用于骨科治疗,Wiles在1938年进行了世界第1例全髋置换手术,使用的便是不锈钢材料^[3],其成为最先被大量应用于人工关节材料。随着人工髋关节置换手术的进行,人工关节材料应用方向迎来了爆发式增长。同年,钴铬钼合金因生物惰性较强,在人体内生物相容性好等优点开始作为金属杯走进人工关节领域用以治疗关节疾病。往后的二十年间,有学者首次将钛植入动物股骨中,极佳的生物相容性让其走进医用材料领域,钛及其合金作为人工关节材料在医学上被应用。1962年超高分子聚乙烯首次与金属组合作为假体材料使用,到了六十年代末,锻造钴铬钼合金开始作为金属植入材料大量应用^[4]。随后陶瓷类人造关节开始应用,1972年氧化铝陶瓷首次作为人体髋关节在临幊上使用,1988年Christel首次报道了氧化锆陶瓷可为股骨头替代材料,迄今为止临幊使用氧化锆股骨头假体做置换手术已经超过30万例,术后假体破损率低于氧化铝假体^[5]。同时期,科学家们开始考虑用聚醚醚酮(PEEK)作为人工关节材料使用,之后的几十年里PEEK作为新兴植人物广泛应用于椎间融合、人

工关节置换以及创伤植入术^[6]。到了 20 世纪末,人们研发出了高强度,低模量的医用钛合金,钛合金关节迎来了快速发展期。同时超高分子聚乙烯开始单独临床应用,至今大量临床结果显示用此类材料做人工关节置换效果良好。新兴的碳材料近 15 年在医学领域备受关注,当前主要把类金刚石(DLC)用作其他主流人工关节材料的镀层材料使用并且取得了很多改善效果。下文将对三大主流材料金属,陶瓷,有机高分子和使用广泛的新兴碳材料进行应用研究及摩擦性能的介绍。

2 金属材料

2.1 不锈钢摩擦性能介绍

由于钢中的 Cr 含量高(大于 12 wt%),不锈钢材料对广泛的腐蚀环境具有更强的抵抗力,它可以形成粘附性强,具有自愈和耐腐蚀的氧化物涂层 Cr₂O₃。不锈钢材料加工性能优良且价格低廉,此类优点让其早期得以大量应用。然而后期应用发现其缺点也很明显:假体常在体内发生腐蚀行为以及各种失效形式,并且因磨损释放有毒离子,综合摩擦学性能较差。在研究医学常用的 316 L 不锈钢材料摩擦性能时发现,316 L 不锈钢与超高分子量聚乙烯 UHMWPE 对磨的摩擦因数会比 316 L 不锈钢纯摩擦情况下的摩擦因数大,316 L 不锈钢材料会在被腐蚀后与摩擦协同作用,界面的破坏程度比纯摩擦的情况还要严重^[7]。对比不锈钢与钴铬钼合金分别对磨超高分子聚乙烯,316 L 不锈钢 / UHMWPE 在模拟体液润滑条件下的摩擦系数最小,但是 CoCrMo / UHMWPE 的抗腐蚀性和磨损量却要能优于 316 L 不锈钢 / UHMWPE^[8]。也有专门关于 316 L 不锈钢材料摩擦腐蚀行为的研究,结果证实 20%~30% 的不锈钢材料磨损量是由腐蚀造成的,因腐蚀作用的存在,摩擦性能变得更差,表面破坏更严重^[9~10]。总体来说不锈钢的耐蚀性与摩擦磨损性能较差,在体内环境影响下易发生腐蚀而降低摩擦磨损性能。

2.2 钴铬钼合金摩擦性能介绍

钴铬钼合金性能优于不锈钢,主要体现在其拥有更好的耐腐蚀性和耐磨性^[11]。铬钴钼合金表面

会形成钝性氧化层从而保护内部材料^[12]。钴铬钼合金对应力性腐蚀环境也不敏感,过去常应用于金属髋关节假体关节置换的材料^[13]。但是其同样也有缺点:由于这类合金长期处于人体体液的侵蚀环境中,又要承受负重和反复的摩擦,对人体有害的钴、铬、钼等元素往往不可避免向人体释放,从而造成中毒^[14],且此类材料韧性较差,弹性模量远远大于人体骨骼。国外有学者通过对 3D 打印 SLM 成型的钴铬钼合金在牙齿咀嚼环境的摩擦性能与硬度进行研究,结果表明 SLM 钴铬钼合金具有较高的硬度和出色的耐磨性能^[15]。在小牛血清条件下用 SLM 成型 CoCrMo 与超高分子聚乙烯对磨的摩擦系数很小,为 0.03 左右且稳定^[16]。

有研究通过不同处理技术增强其摩擦性能,例如对等离子氮化 CoCrMo 进行摩擦性能研究发现与未处理的合金相比,经过等离子渗氮处理后的 CoCrMo 合金的磨损率更低,磨痕宽度较窄^[17]。另有研究从微观结构上分析了铬钴钼合金的摩擦性能,研究发现细化晶粒的铬钴钼合金易发生马氏体相变,从而拥有很好的耐磨性^[18]。各种研究表明钴铬钼合金经过各种处理后有优良的耐磨性,仅从材料性能角度看,铬钴钼合金较于不锈钢更适合作为人工关节材料。总体来讲摩擦性能较不锈钢更优秀,但出于安全考虑,此类合金材料的各项性能还需进一步改进。

2.3 钛合金摩擦性能及改性研究

钛耐腐蚀,强度高且韧性好,对比其他金属材料具有足够好的生物相容性,是作为人工关节植入体的较好选择^[19]。但后期随访研究发现钛合金耐磨性相对一般,少数患者对其有过敏现象^[20]。有研究分别对比了不锈钢和钛合金在海水条件下与氧化铝摩擦的实验,发现在复杂环境下钛合金的摩擦性能比不锈钢材料更好,摩擦系数远低于不锈钢材料,316 L 不锈钢在此条件下摩擦系数约为 0.4~0.6,而钛合金材料摩擦系数为 0.2~0.3^[21]。但钛合金材料与不锈钢材料一样存在着腐蚀与摩擦协同作用的现象,而且钛合金材料表现得更严重,实验中因腐蚀摩擦损失的体积量比不锈钢材料的更多,不过通过表面处理技术可改善钛合金的摩擦磨损性能,使其耐磨性增强、摩擦因数降低。

有关于钛合金表面电镀 Ni-P 镀层的研究发

现,未处理的钛表面摩擦系数在0.6左右且波动大,电镀Ni-P镀层后摩擦系数基本稳定在0.45^[22]。另外采用磁控溅射在钛合金表面沉积TiAlN涂层效果明显。TiAlN涂层试样的磨损量只有钛合金基体磨损量的20%^[23]。也有国内学者研究发现Al₂O₃/TiO₂复合纳米涂层的耐磨性能较好^[24]。此外,钛合金也有其他缺点:钛合金因为表面的硬度不够高,表面氧化物的保护作用差且力学性能差,从而摩擦磨损性能一般^[25-26]。好在钛合金的研究较多,近几年新型β钛合金问世,这类钛合金的弹性模量更低,生物相容性更好^[27-28],总的发展趋势向好。钛合金作为人工关节材料市场很大,研究的进展可观,摩擦磨损性能还有进步空间。

3 陶瓷

3.1 氧化铝陶瓷摩擦性能介绍

氧化铝陶瓷因具有高硬度、好的耐磨性、优良的物理化学稳定性和生物兼容性,成为制备生物人工关节材料的首选之一^[29-30]。学者们在控制添加剂、烧结温度和物料颗粒三种因素下进行氧化铝陶瓷摩擦性能的研究,证明了氧化铝陶瓷摩擦性能的优越性^[31]。另有实验研究了氧化铝陶瓷在水、油、干摩擦条件下的摩擦性能,其中干摩擦条件的摩擦系数为0.52,水环境下为0.19,油环境下的磨损量也极小,磨粒磨损表现轻微^[32],佐证这种材料本身摩擦性能较好。另外陶瓷材料有极低的磨损率以及较好的生物相容性,所以用陶瓷作为人工关节摩擦界面时能降低骨溶解与无菌性松动发生的概率^[33]。

对于提升氧化铝摩擦性能的方法,近年有学者发现制作氧化铝陶瓷时添加一定量的稀土氧化物可以提升陶瓷的耐磨性,结论表明稀土氧化物添加量为0.5%时陶瓷的耐磨性能提升最明显^[34]。但是氧化铝陶瓷也有明显的缺点,氧化铝陶瓷脆性较大,韧性较差,且弹性模量远高于人骨,作为关节承受活动时危险性高于其他材料,早期使用中常常发生假体脆性破坏和骨损伤的状况,造成陶瓷假体破坏或碎裂的原因主要是术中假体位置的不适,在人体活动时受到压力分布不均,局部受压过强^[35]。利用改性技术提高氧化铝陶瓷较差的摩擦性能和力学性能成为了主要的研究方向^[36-37]。无可否认氧化铝陶瓷

耐磨性能优越,氧化铝关节材料的应用前景广阔。

3.2 氧化锆陶瓷摩擦性能介绍

ZrO₂陶瓷拥有很好的属性,强度、韧性等方面均比Al₂O₃陶瓷高,耐磨性也比Al₂O₃陶瓷好,使用寿命较长。氧化锆陶瓷被认为是未来人工关节植入假体的主流材料^[38]。氧化锆陶瓷在生物相容性、耐蚀性、骨溶解、亲水性、抗疲劳性方面,表现也很好^[39-40]。就摩擦性能方面而言,陶瓷材料的磨损率是最低的,虽然界面磨损率低,但是假体碎裂和发生异响的概率是远超其他材料的,这是由陶瓷材料本身脆性高,抗弯能力差决定的。在单独的研究材料摩擦性能研究中有以下结论:在水润滑环境,摩擦系数几乎不变,氧化锆陶瓷和金属对磨时会形成粘附膜,高负载时还会产生少量马氏体相变,能有效减少材料磨损^[41]。还有实验做过模拟人体关节超高分子量聚乙烯/氧化锆陶瓷耐磨损性研究,结果表明相同条件下对磨,氧化锆陶瓷的摩擦因数比45钢减少了37.3%,只有0.084,40 h后陶瓷磨损量仅为45钢的0.76%,在模拟体液环境下超高分子聚乙烯对磨氧化锆陶瓷的磨损率只有和对磨钴铬钼合金骨头时的磨损量的61.5%,多方面证明了氧化锆陶瓷具有良好的耐磨性能^[42]。然而,人工关节领域关于氧化锆的研究相对偏少,临幊上选择使用氧化锆陶瓷的病例也不多,但就摩擦性能上讲,此类材料优于目前使用的金属材料。

4 高分子材料

4.1 超高分子量聚乙烯摩擦性能及改性研究

超高分子量聚乙烯(UHMWPE)有着极高的分子量,拥有较高的耐磨性和总体较好的生物相容性。但要求更高的耐用度上还达不到要求,主要原因是其摩擦后残留的自由基氧化会降低耐磨性,导致磨屑形成^[43-44],产生的磨屑会引起机体免疫反应,对骨组织产生破坏从而造成骨溶解,因此单独用此作为人工关节材料,寿命往往不长久^[45-46]。不过长久以来对UHMWPE的改性研究非常多,尤其是提高人工关节耐磨性上,已经有很多技术方法。

辐射交联就是其中一种,有关于辐射强度对UHMWPE的摩擦性能的研究显示UHMWPE摩擦

学性能随辐射强度增大呈先增后减趋势,当辐射强度较大时,摩擦性能比不进行辐射的 UHMWPE 更好^[47]。辐射交联的作用是让材料中自由基被消除,耐磨性提高,磨损产生的磨屑减少,增长使用寿命。表面接枝也是改性研究方向之一,利用紫外光引发聚合把全氟烷基乙基甲基丙烯酸酯共聚物(PFAMAE)单体接枝到 UHMWPE 上,枝改性后的 UHMWPE 摩擦因数下降了 0.05,磨损率也相应降低^[48]。也有研究发现离子注入能改善 UHMWPE 耐磨性。熊党生^[49]研究了离子 N 注入 UHMWPE 对其耐磨性的影响,实验发现注入 N⁺离子后在血浆条件下摩擦系数更小,磨损率也随之减少,N⁺离子注入能改善材料表面交联程度和硬度。除此之外离子注入的离子种类还有 O⁺,C⁺等^[50]。另外还有加入改性添加剂的研究,傅晶等对超高分子聚乙烯添加剂研究发现,5%纳米乙二胺缩水杨醛西佛碱铜配合物的改性 UHMWPE 减摩效果好,性能优异^[51]。

目前对超高分子量聚乙烯的研究很多,人们致力于进一步提高 UHMWPE 的耐磨性能甚至还新研发了新型高密度聚乙烯材料 ULWPE^[52],高分子类材料作为理想的人工关节材料潜力很大。

4.2 聚醚醚酮摩擦性能及改性研究

聚醚醚酮(PEEK)是一种热塑性特种工程塑料,优良的生物力学和生物摩擦学性能使其成为人工关节材料研究领域方向之一。PEEK 材料属于自润滑材料,摩擦性能甚至优于超高分子聚乙烯,当其单独作为假体材料时性能较差,然而表面改性后的聚醚醚酮材料或者由各种聚醚醚酮组成的复合材料的摩擦磨损性能明显得到改善。碳纤维增强技术是研究最多且效果较好的手段之一,外国有学者通过纳米压痕试验研究了碳纤维作用在 PEEK 复合材料后其在应用上的摩擦性能变化,发现碳纤维具有增强作用,主要体现在能够提高 PEEK 的纳米硬度和弹性模量,让 PEEK 材料的摩擦系数和磨损率都得到降低降^[53]。国内也有学者研究了碳纤维与 PEEK 纤维编织时发现三维编织的碳纤维可极大地降低 PEEK 的摩擦系数,尤其碳纤维含量为体积分数 54% 时的效果最好,碳纤维增强聚醚醚酮 CF3D / PEEK 复合物的摩擦系数能从 0.195 降低到 0.173^[54]。在碳纤维增强的基础上再经过氮氧离子处理,表面的摩擦磨损性能还更好,有研究结果表明经

过氮氧离子处理的 CF / PEEK 复合材料具有更好的摩擦磨损性能,处理后的 CF / PEEK 复合材料的摩擦系数下降到了 0.21,磨损率也从 $1.4 \times 10^{-15} \text{ m}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 下降到了 $1 \times 10^{-15} \text{ m}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ ^[55]。

在 PEEK 里添加其他材料形成的复合材料也会改善 PEEK 的性能。有研究在 400 °C 下制备 PEEK、纳米 SiO₂ 和碳短纤维复合材料,摩擦力学测试结果发现 n-SiO₂ 的加入能显著降低摩擦系数,表明添加 n-SiO₂ 复合材料的耐磨性能比纯 PEEK 材料耐磨性更好^[56]。在 PEEK 基体中添加六钛酸钾晶须以改善 PEEK 复合材料的摩擦学性能,当添加 15% 的六钛酸钾晶须时,复合材料的摩擦学性能提升最好,其摩擦因数和磨损量与纯 PEEK 相比分别降低了 54% 和 68%^[57]。另外在 PEEK 中添加聚四氟乙烯 PTFE 和锌基合金 ZA8 的研究,发现当添加 10% 的 PTFE 和 30% 的 ZA8 能明显改善 PEEK 的摩擦学性能,其摩擦因数能在 PTFE 复合材料基础上进一步得到降低磨损量也明显降低,与纯 PEEK 相比摩擦因数和磨损量分别降低了 50.9% 和 66.1%^[58]。

处理 PEEK 表面除了碳纤维增强还有表面镀层和激光改性等研究。比如在 PEEK 表面镀上纳米氧化锆涂层,能够改善 PEEK 表面在 25% 牛血清中的润湿性,质量百分比五的 ZrO₂ 填充的 PEEK 复合涂层具有最好的摩擦学性能^[59]。S. Hammouti 等^[60]研究了采用激光改性处理 PEEK 表面的摩擦性能。通过激光改性后的 PEEK 表面将产生凹坑,凹坑深度为 3.5~12 μm 时尽管表面会产生磨粒磨损,却有效减少了磨损率,处理后的表面磨损率比未处理表面磨损率的低 90%。

近年来对 PEEK 摩擦性能的研究报告很多,通过填充改性、纤维增强、表面改性等多种方法已经实现让 PEEK 材料摩擦因数和磨损量的大幅度降低。但是作为新型材料,在人工关节应用上的研究较少,有关 PEEK/髌骨软骨组和 CoCrMo/髌骨软骨组的摩擦性能的研究报告中,发现在小牛血清条件下,PEEK/髌骨软骨组的软骨表面磨损轻微,CoCrMo/髌骨软骨组的软骨表面损伤严重,证明 PEEK 相对钴铬钼合金作为人工关节材料时摩擦性能更好^[61]。另外有文献表示用 PEEK 复合材料制作的种植体符合疲劳强度的要求,其弹性模量接近骨的弹性模量^[62]。如此看来改性 PEEK 作为人工关节材料有

着很大优势,期待更多的临床研究报告。

5 碳类材料

5.1 类金刚石摩擦性能与应用

类金刚石(DLC)有着其他材料无法比拟的生物相容性,目前主要将其作为镀层来增强其他关节材料的耐磨性和其他性能。就其材料本身的研究发现厚度与sp³键含量越高其降磨性能越好,特别是无氢的含80%sp³键的a-C薄膜沉积钛合金表面能让其磨损率降低30~600倍^[61]。

DLC作为钴铬钼合金镀层时在小牛血清蛋白溶液润滑作用下的磨损表面存在吸附蛋白层,这能避免配副直接接触摩擦,证明DLC膜对摩擦配副有明显减摩效果^[64]。具体的研究数据表明经过DLC薄膜处理后的CoCrMo合金的摩擦系数从0.578下降到了0.2以下,磨损率也降低了两个量级,证明了DLC薄膜对钴铬钼合金的摩擦磨损性能的增强作用^[65]。另外钛合金材料上也能应用DLC薄膜,DLC薄膜改性Ti₆Al₄V合金球窝表面后比未处理的Ti₆Al₄V合金的界面摩擦力下降了77.6%,磨损量降低了11.2%,但是DLC薄膜的附着性较差^[66]。

除金属外DLC同样也应用到了UHMWPE材料上,国外J. A. Puertolas等的研究小组^[67]利用DLC处理后的UHMWPE材料与Al₂O₃球在小牛血清润滑条件进行对磨发现DLC工艺不影响DLC膜提升UHMWPE磨损性能,各种实验组的UHMWPE摩擦性能均得到增强。国内有在对沉积DLC膜后的UHMWPE摩擦性能的研究时发现,在25%牛血清溶液润滑条件下,虽然沉积DLC膜后的UHMWPE的摩擦因数会因为粗糙反而增大,但是磨损率却明显低于未处理的UHMWPE,说明表面沉积DLC膜后能提高UHMWPE的抗磨性能^[68]。

利用体外常规方法研究已经证明DLC膜用作其他材料表面镀层能显著改善基底材料的耐磨损性,不过模拟人体实际工作环境的研究依旧需要大力开展实验,不仅是DLC膜,开发新的碳类材料作为镀层也可以作为方向进一步探索。DLC作为表面镀膜将在人工关节领域得到更广泛应用。期待碳类材料在人工关节领域会有更多应用。

6 结语与展望

摩擦磨损性能是评价人工关节使用寿命重要的

指标。就摩擦磨损性能而言,各目前主流的材料的摩擦性能尚不足以达到满意的要求,金属耐磨损性能相对不足,单独的金属材料作为人工关节难以满足需要;陶瓷虽然是目前最耐磨的材料,然而脆性较大易发生断裂也严重影响了关节使用寿命;高分子材料的研究最多,摩擦性能也在不断提升,性能越来越好的高分子材料也在不断试验。碳材料研究起步较晚,摩擦性能还有很大研究空间。

参考文献:

- [1] 张晓非, 吕震, 王小泉等. 人工关节假体周围无菌性松动的发生机制[J]. 天津医药, 2020, (6): 572-576.
- [2] 吴建锋, 徐晓虹, 孙淑珍等. ZrO₂-Al₂O₃系增韧陶瓷人工关节的研究[J]. 硅酸盐通报, 2000, (4): 23-26.
- [3] Havelin L, Engesaeter L B, Espehaug B, et al. The Norwegian Arthroplasty Register: 11 years and 73 000 arthroplasties[J]. Acta Orthop Scand, 2000, 71 (4): 337-353.
- [4] 崔文, 张鑫, 王庆良. 316 L不锈钢关节材料的摩擦腐蚀行为[J]. 润滑与密封, 2016, (8): 34-38.
- [5] De H R, Pattyn C, Gill H S, et al. Correlation between inclination of the acetabular component and metal ion levels in metal-on-metal hip resurfacing replacement[J]. J bone joint surg Br, 2008, 90 (10): 1291-1297.
- [6] Morita, Yusuke, Nakata, et al. Wear properties of alumina/zirconia composite ceramics for joint prostheses measured with an end-face apparatus. 2004, 14 (3): 263-270.
- [7] Song J, Shi H Y, Liao Z H, et al. Study on the Nanomechanical and Nanotribological Behaviors of PEEK and CFR-PEEK for Biomedical Applications[J]. Polymers, 2018, 10 (2).
- [8] 朱玉苹. 不同人工关节材料配副的滑动摩擦腐蚀及磨损颗粒研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2015.
- [9] Yan Y, Neville A, Dowson D. Biotribocorrosion: an appraisal of the time dependence of wear and corrosion interactions: the role of corrosion[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39 (15): 3200-3205.
- [10] Yan Y, Neville A, Dowson D. Biotribocorrosion: an appraisal of the time dependence of wear and corrosion interactions: surface analysis[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39 (15): 3206-3212.
- [11] 吴晓, 何本祥, 檀亚军. 髋关节假体材料的分类及应用进展[J]. 中国骨伤, 2016, (3): 283-288.
- [12] Thomas G E, Simpson D J, Mehmood S, et al. The seven-year wear of highly crosslinked polyethylene in total hip arthroplasty: a double-blind, randomized controlled trial u-

- sing radio stereometric analysis [J]. *J Bone Joint Surg Am* , 2011 , 93 (8) : 716-722.
- [13] 陆芸. 手及腕关节假体的发展与现状 [J]. 中华关节外科杂志: 电子版. 2016 , (1) : 1-4.
- [14] Schwindling F S , Seubert M , Rues S , et al. Two-body wear of CoCr fabricated by selective laser melting compared with different dental alloys [J]. *Tribology Letters* , 2015 , 60 (2) : 1-8.
- [15] 林辉, 杨永强, 张国庆等. 激光选区熔化医用钴铬钼合金的摩擦性能 [J]. 光学学报. 2016 , (11) : 158-168.
- [16] 徐林, 巴德纯, 王庆等. 医用锻造 CoCrMo 合金等离子氮化微观结构及摩擦性能(英文) [J]. 稀有金属材料与工程. 2017 , (1) : 51-56.
- [17] Akihiko C , Kazushige K , Naoyuki N , Satoru M. Pin-on-disk wear behavior in a like-on-like configuration in a biological environment of high carbon cast and low carbon forged Co₂₉Cr₆Mo alloys [J]. *Acta Materialia* , 2006 , 55 (4) .
- [18] 陈文远, 林鹏, 李朝健等. 假肢常用材料与人体皮肤摩擦学及其生物相容性 [J]. 中国组织工程研究与临床康复杂志. 2011 , (34) : 6416-6419.
- [19] 徐在强, 许超, 詹建东等. 骨折术后对钛合金钢板内固定植入物过敏的相关研究进展 [J]. 甘肃中医学院学报. 2015 , (1) : 64-66.
- [20] 陈君, 张清, 李全安等. AISI 316 不锈钢和 Ti6Al4V 合金在海水环境中的腐蚀与腐蚀磨损行为(英文) [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* , 2014 , (4) : 1022-1031.
- [21] 孙文峰. TC4 钛合金电镀 Ni-P 镀层工艺及性能研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学 2017.
- [22] 潘晓龙, 刘啸锋, 王少鹏. TC4 钛合金表面磁控溅射 TiAlN 涂层的组织与性能 [J]. 钛工业进展. 2013 , (5) : 31-34.
- [23] 邱英浩, 张建新, 阎殿然等. 等离子喷涂纳米 Al₂O₃ / TiO₂ 涂层耐磨性的研究 [J]. 金属热处理. 2005 , (5) : 4-7.
- [24] Yerramareddy S , Bahadur S. The effect of laser surface treatments on the tribological behavior of Ti₆Al₄V [J]. Elsevier , 1992 , 157 (2) : 245-262.
- [25] Bong J C , IL-Young K , Young-Ze L , et al. Microstructure and friction / wear behavior of (TiB+TiC) particulate-reinforced titanium matrix composites [J]. *Wear* , 2014 , 318 (1-2) .
- [26] 段永刚, 丁英奇, 张龙等. 新型 β 钛合金 Ti₍₃₅₎Nb₃Zr₂Ta 在人工关节假体应用中的生物相容性 [J]. 中国组织工程研究. 2015 , (34) : 5536-5540.
- [27] 程萌旗, 郭永园, 陈德胜等. 新型人工关节假体材料 β 钛合金 Ti₃₅Nb₃Zr₂Ta 的生物相容性研究 [J]. 中国矫形外科杂志. 2013 , (10) : 1017-1024.
- [28] Mohamed N. R , Aihua Y B , Sonny B , et al. Ceramics for Prosthetic Hip and Knee Joint Replacement [J]. *Journal of the American Ceramic Society* , 2007 , 90 (7) : 1965-1988.
- [29] Zeng. Biocompatible alumina ceramic for total hip replacements [J]. *Materials Science and Technology* , 2008 , 24 (5) : 109-120.
- [30] 黄家尤. 氧化铝陶瓷物理性能及耐磨性的试验研究 [J]. 低碳世界. 2017 , (14) : 259-260.
- [31] 杨尚余, 邢学刚, 张娇娇等. 稀土氧化物掺杂对氧化铝陶瓷力学性能和摩擦磨损性能的影响 [J]. 功能材料. 2018 , (6) : 6190-6195.
- [32] Rajpura A , Kendoff D , Board T N. The current state of bearing surfaces in total hip replacement [J]. *The bone & joint journal* , 2014 , 96-B (2) : 147-156.
- [33] 范磊, 陈华辉, 宫学源等. 不同润滑条件下氧化铝陶瓷衬板的磨损机制 [J]. 润滑与密封 , 2012 , 37 (1) : 62-66.
- [34] Jeffers J R T , Walter W L. Ceramic-on-ceramic bearings in hip arthroplasty: state of the art and the future [J]. *The Journal of bone and joint surgery. British volume* , 2012 , 94 (6) : 735-745.
- [35] 唐志阳. 稀土元素在陶瓷中的应用 [J]. 陶瓷. 2008 , (4) : 37-39.
- [36] 白军信, 李宏杰, 张志旭等. 添加剂对氧化铝陶瓷性能的影响 [C]. 中国硅酸盐学会陶瓷分会. 中国硅酸盐学会陶瓷分会 2014 学术年会暨全国陶瓷新技术、新材料、新装备论坛论文集. 中国硅酸盐学会陶瓷分会: 中国硅酸盐学会 , 2014: 17-25.
- [37] 张晓南, 徐瑞泽, 吴刚, 白希壮. 不同生物材料假体在人工关节置换中的应用现状 [J]. 中国组织工程研究 , 2012 , 16 (47) : 8869-8874.
- [38] Ki S C , Kim B H , Ryu J H , et al. Squeaking sound in total hip arthroplasty using ceramic-on-ceramic bearing surfaces [J]. *Journal of orthopedic science: official journal of the Japanese Orthopedic Association* , 2011 , 16 (1) : 21-25.
- [39] Wang W , Ouyang Y , Poh C K. Orthopedic implant technology: biomaterials from past to future [J]. *Annals of the Academy of Medicine, Singapore* , 2011 , 40 (5) : 237-244.
- [40] 孙兴伟, 李包顺, 黄莉萍. 氧化锆陶瓷的摩擦磨损性能 [J]. 硅酸盐学报. 1996 , (2) .
- [41] 齐梦佳, 王晨, 董利民. 超高分子量聚乙烯/氧化锆陶瓷

- 耐磨性研究 [J]. 稀有金属材料与工程. 2015, (S1): 381–383.
- [42] Park D Y, Min B H, Kim D W, et al. Polyethylene wear particles play a role in development of osteoarthritis via detrimental effects on cartilage, meniscus, and synovium [J]. Osteoarthritis and cartilage, 2013, 21 (12): 2021–2029.
- [43] Kurtz S M, Austin M S, Azzam K, et al. Mechanical properties, oxidation, and clinical performance of retrieved highly cross-linked Crossfire liners after intermediate-term implantation [J]. The Journal of arthroplasty, 2010, 25 (4): 614–623.
- [44] Choy W S, Kim K J, Lee S K, et al. Ceramic-on-ceramic total hip arthroplasty: minimum of six-year follow-up study [J]. Clinics in orthopedic surgery, 2013, 5 (3): 174–179.
- [45] Del B V, Graci C, Spinelli M S, et al. Histological and ultrastructural reaction to different materials for orthopedic application [J]. International journal of immunopathology and pharmacology, 2011, 24 (1 Suppl 2).
- [46] Tcherdynsev V V, Kaloshkin S D, Lunkova A A, et al. Structure, mechanical and tribological properties of radiation cross-linked ultrahigh molecular weight polyethylene and composite materials based on it [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 586: S443–S442.
- [47] 李东亮, 魏刚, 黄亚等. UHMWPE 的接枝改性及其与 Nano-PTFE 复合材料的摩擦学性能 [J]. 塑料工业, 2015, A3 (4): 15–18.
- [48] 熊党生, 张彦华, 徐嘉东. 氮离子注入超高分子量聚乙烯的生物摩擦学性能 [J]. 中国生物医学工程学报, 2001, (4): 380–383.
- [49] 熊党生. 离子注入超高分子量聚乙烯的摩擦磨损性能研究 [J]. 摩擦学学报, 2004, (3): 244–248.
- [50] 傅晶, 左波, 吴莉. 新型人工关节材料 UHMWPE 中添加剂结构的研究 [J]. 武汉工程大学学报, 2018, (2): 165–168.
- [51] 曾泓凯. 人工关节用超低磨损聚乙烯耐磨性能研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [52] Williams D. New horizons for thermoplastic polymers [J]. Med Device Technol, 2001, 12 (4): 8–9.
- [53] 赵春丽, 邱文, 单小红. 三维编织纤维增强聚醚醚酮材料的性能 [J]. 轻纺工业与技术, 2012.
- [54] Mohit S, Jayashree B, Peter M. Wear performance of PEEK–carbon fabric composites with strengthened fiber–matrix interface [J]. Wear, 2010, 271 (9): 2061–2068.
- [55] Mohit S, Jayashree B, Peter M. Abrasive wear studies on composites of PEEK and PES with modified surface of carbon fabric [J]. Tribology International, 2010, 44 (2): 81–91.
- [56] Molazemhosseini A, Tourani H, Khavandi A, Eftekhari Y B. Tribological performance of PEEK based hybrid composites reinforced with short carbon fibers and nano-silica [J]. Wear, 2013, 303 (1–2).
- [57] 华漫煜. 六钛酸钾晶须/聚醚醚酮复合材料力学、摩擦学性能及界面结合机理研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [58] 彭鑫, 龙春光, 彭鹰. PEEK / ZA8 复合材料的制备及力学与摩擦学性能研究 [J]. 中国塑料, 2020, (5): 26–31.
- [59] Song J, Liu Y H, Liao Z H, et al. Wear studies on ZrO₂–filled PEEK as coating bearing materials for artificial cervical discs of Ti₆Al₄V [J]. Materials science & engineering. C, Materials for biological applications, 2016, (69): 984–994.
- [60] Hammouti S, Pascale–Hamri A, Faure N, et al. Wear rate control of peek surfaces modified by femtosecond laser [J]. Applied Surface Science, 2015, 357.
- [61] 张欣悦, 张德坤, 陈凯等. 聚醚醚酮与髌骨软骨间的生物摩擦学特性 [J]. 材料工程, 2019, (2): 129–137.
- [62] Lee W T, Koak J Y, Lim Y J, et al. Stress shielding and fatigue limits of poly–ether–ether–ketone dental implants [J]. Journal of biomedical materials research. Part B, Applied biomaterials, 2012, 100 (4): 1044–1052.
- [63] 任瑛, 王仁杰, 许志高. 类金刚石薄膜在人工关节摩擦副表面改性进展 [J]. 精细化工, 2020, (7): 1313–1319.
- [64] 郭飞飞, 胥光申, 任明基等. 类金刚石膜对 CoCrMo 合金摩擦性能的影响 [J]. 表面技术, 2020, (2): 172–177.
- [65] 谭笛, 代明江, 林松盛等. 表面掺金属类金刚石薄膜大幅度提高 CoCrMo 合金的摩擦磨损性能 [J]. 表面工程资讯, 2014, 14 (02): 10.
- [66] 许林敏. DLC 薄膜改性钛合金的生物摩擦学研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2016.
- [67] Puértolas J A, Martínez–Nogués V, Martínez–Morlanes M J, et al. Improved wear performance of ultra–high molecular weight polyethylene coated with hydrogenated diamond like carbon [J]. Wear, 2010, 269 (5).
- [68] 沈涵, 王庆良, 孙彦敏. UHMWPE 表面沉积 DLC 膜的摩擦磨损性能研究 [C]. 中国机械工程学会摩擦学分会青年工作委员会. 2011 年全国青年摩擦学与表面工程学术会议论文集. 中国机械工程学会摩擦学分会青年工作委员会: 中国机械工程学会, 2011: 469–473.