

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.12.025

减摩耐磨超高分子量聚乙烯改性研究进展^{*}

胡章润,毛宏萍,郑显才,何浩,钟圣韬,古良鸿,彭娅

(西华大学材料科学与工程学院,成都 610039)

摘要: 超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)优异的耐磨性使其在工程领域和生物领域得到广泛的应用。综述了减摩耐磨 PE-UHMW 改性的研究成果,重点阐述无机填料填充改性、接枝改性、辐照交联改性、表面沉积改性等方法对 PE-UHMW 摩擦磨损性能的改善,并对这些方法的优缺点进行了总结,最后展望了减摩耐磨 PE-UHMW 改性研究和应用的前景。

关键词: 超高分子量聚乙烯;减摩耐磨;进展

中图分类号: TQ340.644 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)12-0121-05

Research Progress on Modification of Anti-Friction and Wear-Resistance PE-UHMW

Hu Zhangrun, Mao Hongping, Zheng Xiancai, He Hao, Zhong Shengtao, Gu Lianghong, Peng Ya

(School of Materials and Engineering of Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract : Ultra-high molecular weight polyethylene (PE-UHMW) has been applied in engineering and biology fields because of its wear-resistant. The research results of the anti-friction and wear-resistance PE-UHMW modification were reviewed. It was mainly discussed that the modification methods such as inorganic filler filling, irradiation cross-linking, grafting, surface deposition etc. could improve the friction and wear properties of PE-UHMW. The advantages and disadvantages of these methods were summarized. Finally, the prospect of research and application of PE-UHMW modified friction and wear were mentioned.

Keywords : ultra-high molecular weight polyethylene; anti-friction and wear-resistance; progress

超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)是分子量巨大(10^6 以上)、具有线性长链结构的热塑性塑料,是目前工程塑料中综合性能最优异的聚合物^[1]。超高的分子量使 PE-UHMW 具有其他高分子材料无法比拟的抗拉压性能、耐冲击、耐化学腐蚀性,同时 PE-UHMW 也具有较好的耐磨性能,逐渐取代了部分金属作为新型耐磨材料,因此在纺织、化工、包装、建筑、军事等诸多领域均有应用^[2-3]。不仅如此,PE-UHMW 出色的生物相容性使其在生物医学方面同样有“用武之地”,常用来制作关节假体中的髓臼和衬垫^[4]。由于 PE-UHMW 表面硬度低,长期使用制得的人工关节,磨损就会产生大量小磨屑,诱发一系列不良反应导致骨溶解,最终因无菌松动而使关节失效^[5]。作为工程材料,人们在使用 PE-UHMW 过程中也逐渐发现了其不足之处,如耐磨粒磨损性能一般,容易发生疲劳磨损,还无法完全满足在多种摩擦条件下的使用要求。为了拓展 PE-UHMW 在工程材料和生物材料领域的应用,人们一直致力于寻找改善 PE-UHMW 摩擦磨损性能的方法。

近年来,PE-UHMW 在减摩耐磨改性的研究工作已到达一个新的高度,国内外学者在改善 PE-UHMW 摩擦学性能的研究也有大量文献进行了报道。笔者从无机填料填充改性、接枝改性、辐照交联改性、表面沉积改性和其他改性方

法对 PE-UHMW 摩擦磨损性能的影响进行逐一阐述。

1 无机填料填充改性

填充改性是目前研究最多的改善 PE-UHMW 摩擦磨损性能的方法,填料或增强材料的加入会引起 PE-UHMW 内部结构改变,从而使材料的摩擦学性能发生变化。一般认为磨损机理主要分为以下几种:一是填充粒子本身具有减摩作用,在材料的摩擦过程中起到良好的自润滑效果;二是由于刚性粒子的加入使 PE-UHMW 复合材料的刚性和硬度都得到提高,从而使其耐磨性提高;再者,填料填充 PE-UHMW 会使其耐热性提高,材料受到外界摩擦作用时其塑性变形、黏着磨损和蠕变程度会相应减少,优化了复合材料的摩擦磨损性能;除此之外,当有摩擦力作用于复合材料时,对于所承受的载荷,填充物能较好地传递,以减小外力对 PE-UHMW 基体的剪切作用,最终使 PE-UHMW 的磨损率减小,而且填料自身在磨损过程中会吸收部分摩擦功,对材料耐磨性提高有一定的辅助作用。由于填料的形貌、自身性质、粒径大小、填充量及其分布有所不同,使得 PE-UHMW 复合材料的磨

^{*} 四川省教育厅重点项目(12ZA15),教育部“春晖计划”科研项目(Z2010093)

联系人:彭娅,教授,主要从事高分子合成与改性研究

收稿日期:2017-10-03

损机理和摩擦规律存在差异。

Wang Qiufeng 等^[6]将几种不同的碳系填料——多壁碳纳米管(MCNTs)、氧化石墨烯(GO)、碳纤维(CF)、氟化石墨(CFx)和石墨(Gr)分别加入PE-UHMW中,发现复合材料的耐磨性提高顺序为:PE-UHMW < UPE-10% Gr < UPE-1% MCNTs < UPE-10% CF < UPE-1% GO < UPE-10% CFx,但它们独特的微观结构,使其对承载能力和摩擦性能有不同的作用。CF或MCNTs在微动磨损试验过程中提高了PE-UHMW的承载能力;具有自润滑特性的CFx在UPE-10% CFx复合材料有很好的减摩作用;PE-UHMW中良好分散的GO促进负载向分子网络转移,使复合体的抗磨损性能改善;Gr多层结构的破坏致使对PE-UHMW没有减摩效果。

Chang Boon Peng 等^[7]在实验中发现纯PE-UHMW表面凹凸不平、厚薄不匀,但随着滑石粉的添加,滑动过程中,滑石粉颗粒可以作为润滑剂在磨料表面形成光滑的、更均匀的转移膜,这有助于摩擦接触的减少,导致平均摩擦系数和磨损率的降低,滑石粉填充量为20%的复合材料出现了最小平均摩擦系数。

S. Sharma 等^[8]分别采用微米SiC和纳米SiC两种系列的硬质填料改性PE-UHMW,随着SiC含量的增加,两种系列改性材料的划痕硬度都增加。微米填料的用量在8%时,耐磨损性提高最多,而3.5%的纳米填料作用下可获得最低磨损率。扫描电子显微镜(SEM)研究表明,硬质填料主要降低了微切削机理的严重程度,从而得到具有更好耐磨损性能的复合材料。

牛永平等^[9]制备了不同含量的硫酸钙晶须(CSW)的PE-UHMW/CSW材料,与纯PE-UHMW相比,PE-UHMW/CSW的磨痕表面更加平整,而且塑性变形程度比较小;他们还发现随着体系中CSW添加量的增多,增大了PE-UHMW/CSW复合材料的硬度,提高了其耐磨性能,减小了其摩擦因数,复合材料的摩擦学性能最好的是PE-UHMW/20%CSW(质量分数)。

在单一填料填充的基础上,科研者们也对复配杂化填料填充PE-UHMW进行了探究,尝试利用不同填料的自身的特性,综合改善PE-UHMW的摩擦学性能,并且同样取得了很好的成效。而多种填料同时添加,其耐磨机理是多种因素共同决定。A. Golchin 等^[10]向PE-UHMW中掺入的碳基纳米填料(MCNTs和GO),对复合材料的摩擦学性能进行了研究。虽然MCNTs和GO被视为硬质填料,而在摩擦接触这些填料边界往往起到良好润滑作用。在磨损过程中,暴露的或者脱离基体的纳米填料可以作为固体润滑剂,防止与配合的表面产生直接接触,从而减少了接触表面之间的摩擦。

何剑雄等^[11]采用硅烷偶联剂对nano-SiO₂、玻璃微珠表

面改性,表面处理后的无机粒子与PE-UHMW基体之间黏结较好,当受到外力作用还能有效阻止复合材料发生屈服和塑性变形。由于nano-SiO₂存在纳米效应,当它与玻璃微珠复合填充时,能起到一定的协同效应,可以克服基体热变形温度低、硬度低和抗磨粒磨损性能差的缺陷,降低了复合材料的摩擦系数及磨损率。

无机填料填充PE-UHMW是改善其摩擦磨损性能十分有效的方法,工艺简单、操作方便是其最大特点。近几年来填充改性PE-UHMW耐磨材料的不断发展与成熟,不仅给工业领域带来了福音,而且打破了之前填料改性PE-UHMW在人工材料方面并不适用的说法^[12],有望在生物医用领域获得一席之地。但填充PE-UHMW同样存在一些问题,比如改性后复合材料强度、弹性模量很高,塑性性能差,对于材料的成型加工是极大的考验;另外,纳米粒子填充PE-UHMW在成型过程中难免会发生聚集,填料纳米效应的优势便会丧失,而目前在填充物的粒度和用量上,科学工作者还没有建立一个比较完善的理论体系,仍处于尝试和探究阶段。

2 接枝改性

通过溶液接枝或紫外接枝的方式在PE-UHMW基体上引入一定数量特殊亲水性物质,以改善接枝物表面润湿性。介质环境中存在水存在的情况下,接枝后PE-UHMW的摩擦学性能与其表面性质有关,表面亲水性越好越容易夺取介质中的水分子形成润滑层,通过接枝单体与介质之间产生润滑作用,降低聚合物表面摩擦系数,达到减摩效果。

Xiong Dangsheng 等^[13]对PE-UHMW接枝改性摩擦学性能有深入研究。通过紫外辐射和聚合反应,在PE-UHMW上成功接枝磷酸胆碱(PE-UHMW-g-MPC),接枝前后的聚合物水接触角由80°减小至15°,润湿性有较大改善。高度水合聚2-甲基丙烯酰氧基乙基磷酸胆碱(PMPC)层提供有效的润滑效果,减少了PE-UHMW的界面磨损。接枝样品在初始阶段的摩擦系数比未经处理的PE-UHMW低很多。然而,随着摩擦次数的增加,PMPC聚合物刷被剪断,最终导致亲水基团数量减少,使水分子数低于初始阶段的水平。

[3-(甲基丙烯酰氧)丙基]二甲基(3-磺丙基)氢氧化铵(MPDsAH)是亲水性化合物,它有与磷酸胆碱类似的结构,由MPDsAH聚合物链形成的刷状结构有类似于蛋白多糖的性质,能起到润滑天然软骨的重要作用。Deng Yangling 等^[14]通过紫外辐射的方式将MPDsAH大分子接枝到PE-UHMW上。改性的PE-UHMW在蒸馏水和生理盐水条件下滑动时,MPDsAH聚合物链通过水分子的渗透浸润会逐渐扩展,使得聚合物链与溶剂分子之间的接触面积增大。此外,复合材料表面形成的MPDsAH水润滑膜能阻止材料与摩擦副的直接接触,该膜在边界润滑中起着重要作用。滑

动循环次数的增加,位于 PE-UHMW 的表层的 PMPDSAH 聚合物链逐渐被切断而脱离,然而,次表层的大分子聚合物链将被暴露在摩擦副的界面提供润滑,所以在长时间含水润滑作用下,接枝 PE-UHMW 的摩擦系数仍能保持稳定。

为了改善人工关节的摩擦和磨损的问题,亲水性的丙烯酸(AA)在紫外光作用下接枝到 PE-UHMW 粉末表面^[15]。接枝物表面存在的亲水分子 AA 在润滑液中形成润滑膜,使摩擦副与基体不直接或难以直接摩擦,从而使磨损率大大降低。PE-UHMW-g-AA 的摩擦系数随着接枝率的增加而逐渐下降,接枝率为 5.5% 时摩擦系数最低;接枝率为 3.5% 的 PE-UHMW-g-AA 磨损率最低,仅是 PE-UHMW 试样的 1/4;在长期的滑动过程中,嵌合在块体材料中的亲水性 AA 聚合物刷提供了持续的润滑。

李东亮等^[16]将全氟烷基乙基甲基丙烯酸酯共聚物(PFAMAE)单体通过紫外光引发聚合的方式接枝到 PE-UHMW 上,制备出接枝共聚物 PE-UHMW-g-PFAMAE。结果表明,接枝改性对纯 PE-UHMW 的磨粒磨损和塑性变形有抑制作用,不仅减小了接枝产物的摩擦系数,还明显降低了其磨损率;将纳米级聚四氟乙烯(nano-PTFE)添加在接枝物中,进一步降低了复合材料摩擦系数和磨损率,得到较光滑的磨损表面和完整、致密的转移膜,PE-UHMW-g-PFAMAE/nano-PTFE 复合材料表现出轻微的疲劳磨损。

接枝改性 PE-UHMW 是近几年来发展起来改善其摩擦磨损性能的方法,国内外的研究都较少,仍处于实验阶段,并未得到大范围推广。接枝改性对聚合物本身力学性能影响不大,却能赋予材料更好的耐磨性,接枝改性后的 PE-UHMW 水润滑材料,有成为仿生材料的可能。但光接枝存在的不均匀性,接枝物与人体血液的相容性,仍然是实验中的不确定因素。因此选择润滑性更佳、生物相容性更好的接枝单体,寻找更合适的接枝方法,对改性材料进行动物体内植入实验和临床试验是下一步研究的重点。

3 辐照交联改性

交联改性 PE-UHMW 主要分为化学交联和辐照交联,但化学交联改性 PE-UHMW 的生产效率低,而且实验中加入的化学交联剂影响了产品的纯度,并不适合作为生物材料使用,因此 PE-UHMW 的化学交联研究热度有所降低,这几年学术界多采用 γ 射线辐照交联来提高 PE-UHMW 的耐磨性^[17]。辐照能切断 PE-UHMW 分子中部分主链而产生自由基,自由基活动性较强,容易发生交联反应而使 PE-UHMW 分子链运动能力降低,此外,在分子间作用力的影响下,分子链运动更加困难,使其在外力作用下,极大地阻碍了 PE-UHMW 分子链的滑移,使其材料耐磨性得以提高。

PE-UHMW 线性长链经辐照后转变为空间网络结构,

使其材料的显微抗力有了明显增强,较大的表面硬度可以使材料表面的承载能力提高。另外,经辐照交联后,PE-UHMW 表面润湿性发生变化,使之与摩擦副间的润滑条件得到改善,抗粘着能力有所提高。当辐照剂量 G 较低($G=120$ kGy) 时,PE-UHMW 具有较好的耐磨性和较低的磨损率。当剂量较高($G \geq 250$ kGy) 时,辐照改性后的 PE-UHMW 交联度无明显提高,大分子链被剪断,一部分残留的自由基在储存环境中易发生氧化反应,使 PE-UHMW 脆性增大,并且过高的剂量会大幅度降低 PE-UHMW 的抗磨粒磨损和粘着磨损能力,材料磨损率升高^[18]。

Lei Xiong 等^[19]发现耐磨性受照射 PE-UHMW 的交联度所决定。如果分子进行照射,交联分子垂直于关节的滑动方向也被连接,避免了分子的滑动,以减少 PE-UHMW 的磨损损失。他们通过膝关节运动模拟器的磨损试验发现,当照射剂量增加,模塑和挤出 PE-UHMW 的磨损率降低,分别在 100 kGy 辐照剂量/生理盐水润滑、150 kGy 辐照剂量/小牛血清润滑条件下降低最为显著。他们还指出,真空包装和重熔是去除 PE-UHMW 块体中氧气的有效方法。

Huang Yanfei 等^[20]采用辐射交联和重熔制备出兼有较好力学性能和耐磨性的 PE-UHMW,他们认为熔体注塑交联 PE-UHMW 的耐磨性归因于交联,一方面是交联使得分子链的塑性降低,滑移受到限制;另一方面,交联形成刚性结构,提高硬度,有助于提高耐磨性。而且高温过程中的熔体处理有助于辐射残余自由基的重组,氧化稳定性得到提高,这对于 PE-UHMW 用作全膝关节植入物是非常有利的。

黄传辉等^[21]对 PE-UHMW 材料表面采用了 γ 射线辐照处理,实验表明,随着 γ 射线辐照剂量 G 的增加,PE-UHMW 的结晶度及表面硬度变化规律相同且都呈现逐渐增大的趋势;与未辐照样品相比,辐照后的样品摩擦系数较高,但磨损率降低。

聚合物辐射交联是一门发展迅猛的高新技术,它具有产品无污染,交联速率大,生产效率高,适用于大生产等优点,并且高能射线还可以消灭 PE-UHMW 关节表面的微生物。尽管辐照交联能使 PE-UHMW 摩擦学性能明显提高,但辐照后存在的残余不稳定自由基容易与 O_2 或氧化性组分结合发生氧化反应而降解,对 PE-UHMW 的力学性能和耐磨性存在巨大的潜在威胁,因此辐照后对 PE-UHMW 进行适当处理无比重要。

4 表面沉积改性

PE-UHMW 表面沉积改性是改善 PE-UHMW 耐磨性能的一种表面增强技术,通常利用化学气相沉积或磁控溅射等手段在 PE-UHMW 表面沉积致密的涂层,这些薄膜涂层具有很高的硬度和优异的耐磨性能,因此提高 PE-UHMW

基材表面硬度的同时又极大地提高其耐磨性。

类金刚石(DLC)膜是一种生物相容性良好、硬度大、耐磨性好且具有金刚石结构的非晶碳膜。Shi Xingling等^[22]通过射频等离子体增强化学气相沉积技术,使PE-UHMW表面沉积了DLC膜,它可以使PE-UHMW的表面硬度得到有效提高,表面润湿性能得到改善。在25%牛血清润滑状态下,DLC膜使其摩擦系数有所升高,但磨损率下降比较明显。DLC膜修饰的PE-UHMW试样磨损后产生的碎屑是碳离子而非完全是PE-UHMW碎屑,因此通过DLC表面改性将大大提高PE-UHMW在人工关节置换方面的应用。

He Fengfei等^[23]采用闭合场非平衡磁控溅射,在等离子体处理后的PE-UHMW基体上沉积非晶碳(a-C)薄膜,来改善其摩擦学性能。沉积900 nm的a-C膜之后,PE-UHMW的纳米硬度从47 MPa升高至720 MPa,在小牛血清溶液中的磨损率从 $9.82 \times 10^{-15} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 减小至 $4.78 \times 10^{-15} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。此外,等离子处理和离子注入过程中形成的过渡层在增强PE-UHMW基体的垂直粘附中发挥了重要作用。

J. A. Puértolas等^[24]将氢化金刚石(DLCH)涂层涂覆在未处理和高度交联的PE-UHMW样品上,与未涂覆的PE-UHMW相比,磨损性能都有明显提高。摩擦学分析显示,700 nm厚的DLCH涂层显著提高了PE-UHMW的耐磨性,虽然在这种情况下,摩擦系数均高于未涂覆的样品。通过纳米硬度分析和表面形貌研究、扫描电子显微镜(SEM)和激光共聚焦显微镜进行确认,DLCH涂层具有良好的附着力。

李众利等^[25]在PE-UHMW基体上沉积了类石墨碳(GLC)薄膜,并用台阶轮廓仪、SEM考察材料表面粗糙度和薄膜形貌,用拉曼光谱分析沉积薄膜的结构。结果表明:磁控溅射法制备的GLC薄膜与基体结合力大于90 N,且对液面粗糙度没有影响;表面镀覆GLC薄膜的PE-UHMW体积磨损率,是未处理试样的1/19,为 $1.6 \times 10^{-17} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

表面沉积改性并没有牺牲基体材料自身特性,保留了PE-UHMW良好的综合性能,表面的薄膜涂层因为具有优异的摩擦特性,会极大扩展耐磨PE-UHMW材料的应用,如果在PE-UHMW表面沉积生物相容性良好的耐磨薄膜,必会使PE-UHMW在人工材料方面产生更大价值。但在薄膜制备过程中,出现电荷的累积,从而影响了到达基体的等离子体密度和能量,使其薄膜沉积质量差,膜基结合差,导致薄膜脱落承载过程中容易失效^[26]。因此提高涂层与基体的界面结合强度是制备高耐磨PE-UHMW的关键。

5 其它方法

除上述几种改性PE-UHMW摩擦学性能的方法以外,PE-UHMW耐磨改性也利用共混改性、自身选择性转移效应

和多孔结构来实现,并且也有所进展,通过这些改性方法,不仅得到了具有更好摩擦学性能的PE-UHMW材料,而且为PE-UHMW的减摩耐磨改性提供了新的思路。

为获得高耐磨性PE-UHMW基复合材料,宋宁等^[27]以PTFE为改性剂改善PE-UHMW的耐磨性。实验结果显示,在PTFE质量分数为5%时,复合材料的邵氏硬度最高,为67.08,耐磨性能达到最佳水平,与15CrMoV钢的摩擦系数为0.235,磨损率为0.0814%,负载为10.0 N、变形量为0.06 mm时,复合材料的热变形温度提高21%。共混改性是最为简便的改性方法,而且共混体系中其他组分的加入,有望在提高耐磨性的同时改善复合材料的其他性能,是获得具有更好综合性能材料一举多得的方法。

Li Wu^[28]用15%(质量分数)乙二醇缩苯甲醛 Schiff 碱 Cu(II)络合物(简称:EBS-Cu)加5%(质量分数)甘油-聚乙烯微胶囊(简称:G-EC)改性PE-UHMW,他们认为在干摩擦过程当中,复合材料中的G-EC会因高温熔化而释放出甘油介质,而材料中的EBS-Cu则会因为摩擦变形作用分解释放出 Cu^{2+} ,两者与钢对偶件共同构成选择性转移系统(STS),STS实现了自身选择性转移效应,而且不需要外加选择性转移介质润滑。此方法突破了原有传统聚合物摩擦学理论及减摩耐磨实践范围,在极其不利于塑料摩擦副的条件下(高速干摩擦),PE-UHMW获得优异的摩擦学特性可以通过本身选择性转移效应来实现。

王庆良等^[29]采用模板-滤取法制备了PE-UHMW多孔梯度板材料,发现与致密PE-UHMW材料相比,多孔结构的PE-UHMW材料的表面润湿性能明显得到改善,其中多孔梯度PE-UHMW材料降低了较多摩擦系数以及明显改善抗磨损性能,摩擦学性能最佳的是添加量为60% NaCl的多孔梯度PE-UHMW。多孔PE-UHMW的发展对关节替代材料的研究具有重要价值,为制备高性能人工关节提供了理论依据和技术指导,但多孔PE-UHMW因其孔隙结构的存在抗压强度会有所降低,外加载荷会造成多孔表面产生挤压变形,使多孔PE-UHMW材料润滑性能遭到破坏而导致摩擦系数增大,因此要保持孔隙率与摩擦性能的一个良好平衡。

6 结语

无论是对PE-UHMW整体改性,还是采用表面技术改性,PE-UHMW的耐摩擦磨损性能都有不同程度的提高,但这些方法在实施中仍然面临一些难以避免的问题。因此,只有不断发展和完善减摩耐磨改性技术,克服改性过程中的不利因素,同时还需综合利用改性方法,使多种技术手段取长补短、各尽其才,才能满足人们在各个行业尤其是生物人工关节领域对高耐磨PE-UHMW材料日益苛刻的使用要求。

参考文献

- [1] 王皓,等. 高科技纤维与应用,2015,40(1):19-23.
Wang Hao, et al. Hi-Tech Fiber & Application, 2015, 40(1):19-23.
- [2] Li Suiyi, et al. Materials Letters, 2014, 134(134):99-102.
- [3] 黄安平,等. 高分子通报,2012(4):127-132.
Huang Anping, et al. Polymer Bulletin, 2012(4):127-132.
- [4] 司庆宗,等. 中国组织工程研究,2013(3):496-500.
Si Qingzong, et al. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2013(3):496-500.
- [5] 佟刚,等. 中华医学杂志,2015,95(21):1 695-1 697.
Tong Gang, et al. National Medical Journal of China, 2015, 95(21):1 695-1 697.
- [6] Wang Qiufeng, et al. Tribology International, 2016, 93:390-398.
- [7] Chang Boon Peng, et al. Tribology International, 2015, 88:252-262.
- [8] Sharma S, et al. Wear, 2015, 332-333:863-871.
- [9] 牛永平,等. 润滑与密封,2010,35(2):11-14.
Niu Yongping, et al. Lubrication Engineering, 2010, 35(2):11-14.
- [10] Golchin A, et al. Tribology International, 2015, 95:156-161.
- [11] 何剑雄,等. 润滑与密封,2011,36(7):75-78.
He Jianxiong, et al. Lubrication Engineering, 2011, 36(7):75-78.
- [12] Wang Qinglian, et al. Journal of Bionic Engineering, 2009, 6(4):378-386.
- [13] Xiong Dangsheng, et al. Applied Surface Science, 2014, 298:56-61.
- [14] Deng Yangling, et al. Materials Science & Engineering C, 2013, 33(3):1 339-1 343.
- [15] Deng Yaling, et al. Journal of Materials Science Materials in Medicine, 2013, 24(9):2 085-2 091.
- [16] 李东亮,等. 塑料工业,2015,43(4):15-18.
Li Dongliang, et al. China Plastics Industry, 2015, 43(4):15-18.
- [17] 王娜. γ 射线辐照超高分子量聚乙烯的结构和摩擦磨损性能研究[D]. 南京:南京理工大学,2005.
Wang Na. Study on the structure and frictional wear properties of UHMWPE by γ -ray irradiation[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005.
- [18] 吴高峰,等. 润滑与密封,2010,35(11):53-57.
Wu Gaofeng, et al. Lubrication Engineering, 2010, 35(11):53-57.
- [19] Lei Xiong, et al. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2012, 9(9):73-82.
- [20] Huang Yangfei, et al. Polymer, 2016, 90:222-231.
- [21] 黄传辉,等. 徐州工程学院学报:自然科学版,2010,25(3):1-6.
Huang Chuanhui, et al. Journal of Xuzhou Institute of Technology: Natural Sciences Edition, 2010, 25(3):1-6.
- [22] Shi Xingling, et al. Applied Surface Science, 2009, 255(19):8 246-8 251.
- [23] He Fengfei, et al. Applied Surface Science, 2016, 364:280-287.
- [24] Puértolas J A, et al. Wear, 2010, 269:458-465.
- [25] 李众利,等. 摩擦学学报,2008,28(5):433-437.
Li Zhongli, et al. Tribology, 2008, 28(5):433-437.
- [26] 贺凤飞. 超高分子量聚乙烯(UHMWPE)的非晶碳基涂层改性及其摩擦学性能[D]. 杭州:浙江大学,2016.
He Fengfei. Surface modification of UHMWPE with a-C based film and its frictional properties[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [27] 宋宁,等. 工程塑料应用,2016,44(2):129-133.
Song Ning, et al. Engineering Plastics Application, 2016, 44(2):129-133.
- [28] Li Wu. Journal of Dispersion Science & Technology, 2011, 32(5):680-685.
- [29] 王庆良,等. 中国矿业大学学报,2010,39(6):918-923.
Wang Qingliang, et al. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(6):918-923.

(上接第120页)

- [3] Tar-Hwa Hsieh, Ko-Shan Ho. Thermal dehydrochlorination of poly(vinylidene chloride)[J]. Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 1999, 37(13):2 035-2 044.
- [4] 李永华,陈嗣强. 铅盐类稳定剂的毒性及环境影响[J]. 塑料助剂, 1999 (4):23-25.
Li Yonghua, Chen Sisao. The toxicity and environmental impact of the lead salt stabilizer[J]. Plastics Additives, 1999(4):23-25.
- [5] 张华集,沈永鑫,张雯,等. 钙锌复合稳定剂对PVDC热稳定性能的影响研究[J]. 塑料助剂,2011, (5):34-38.
Zhang Huaji, Shen Yongxin, Zhangwen, et al. Study on effect of calcium and zinc compound heat stabilizer on thermal stability of PVDC[J]. Plastics Additives, 2011, (5):34-38.
- [6] Vrandečić N S, Klarić I, Roje U. Effect of Ca / Zn stabiliser on thermal degradation of poly (vinyl chloride) / chlorinated polyethylene blends[J]. Polymer degradation and stability, 2001, 74(2):203-212.
- [7] 张军. 几种季戊四醇酯的合成及用作PVC辅助稳定剂的研究[D]. 淄博:山东理工大学,2015.
Zhang Jun. The synthesis of several pentaerythritol esters used as auxiliary thermal stabilizers for rigid poly(vinyl chloride)[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2015.
- [8] 徐家友,郭少云. 季戊四醇对PVC/钙锌稳定体系的热稳定化机理[J]. 高分子材料科学与工程,2005(3):149-151.
Xu Jiayou, Guo Shaoyun. Study on thermal stabilizing mechanisms of pentaerythritol for PVC / Ca-Zn stable system[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2005(3):149-151.