

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.04.028

超高分子量聚乙烯耐热性改性研究进展

许睿¹, 薛平¹, 马海霞², 杜悦²

(1. 北京化工大学塑料机械及塑料工程研究所, 北京 100029; 2. 北京燕山石化高科技技术有限责任公司, 北京 102500)

摘要: 综述了近年来对超高分子量聚乙烯 (PE-UHMW) 的耐热性改性研究进展, 介绍了物理改性 (与无机物、有机物、纳米材料共混)、化学改性 (过氧化物、偶联剂、辐射交联改性) 和聚合填充复合改性在 PE-UHMW 的耐热性改性方面的应用, 讨论了不同 PE-UHMW 的耐热性改性方法的改性效果及改性机理, 并对 PE-UHMW 的耐热性改性的发展趋势做了展望。

关键词: 超高分子量聚乙烯; 耐热性; 改性; 研究进展

中图分类号: TQ325.1+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)04-0135-05

Research Progress in Heat Resistance Modification of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene

Xu Rui¹, Xue Ping¹, Ma Haixia², Du Yue²

(1. Institute of Plastic Machinery and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. Beijing Yanshan Petrochemical High-Tech Company Limited, Beijing 102500, China)

Abstract: The progress in heat resistance modification of ultrahigh molecular weight polyethylene (PE-UHMW) in recent years was reviewed. The modification was divided into three categories: modifying heat resistance of PE-UHMW through physical blending modification with inorganic substance, organic polymer and nanometer material, chemical crosslinking modification with peroxide, coupling agent and radiation and polymer filled composite modification. The effect and mechanism of different modification methods were discussed. The development trend of heat resistance modification of PE-UHMW was also prospected.

Keywords: PE-UHMW; heat resistance; modification; research progress

通常黏均分子量大于 150 万的聚乙烯被称为超高分子量聚乙烯 (PE-UHMW)。PE-UHMW 是具有线型结构的热塑性工程塑料, 同普通聚乙烯相比, PE-UHMW 具有很多优异的性能, 其耐磨性、耐冲击、耐化学腐蚀、自润滑性、低吸水率、卫生无毒等特性是其他工程材料所无法比拟的, 被广泛应用在机械、化工、体育、建筑、医疗、造纸、军事等领域^[1]。

PE-UHMW 虽然拥有优异的综合性能, 但是大分子量导致其具有很长的分子链, 且分子链相互缠结, 这种异于其他工程塑料的结构, 使 PE-UHMW 具有很大的熔体黏度, 熔融加工难度大, 同时也存在表面硬度低、耐热性差、弯曲弹性模量低与抗蠕变性差等缺点, 制约了 PE-UHMW 在某些特定工作环境下的应用^[2]。

目前, 为了能够改善 PE-UHMW 的不足, 使其能够在高要求的工作环境下应用, 拓宽其应用范围, 国内外的学者做了大量的针对 PE-UHMW 改性^[3-5] 方面的研究。笔者主要从物理改性、化学改性和聚合填充复合改性三个方面对 PE-UHMW 的耐热性改性研究进展做了详细的介绍。

1 物理改性

物理改性是将树脂基体与其他一种或多种物料通过机

械的方式共混, 在不改变分子结构的同时, 使树脂获得新的特性。常用的填料有无机物、纳米材料及高性能聚合物。

1.1 无机物填料改性

无机物作为填料改性 PE-UHMW 的耐热性原理是将适量的无机物添加到 PE-UHMW 基体中, 使 PE-UHMW 分子链网络变得密集, 缠结度增加, 限制分子链的热运动, 起到物理交联点的作用以增强 PE-UHMW 的耐热性能。常用的无机物填料有非单质、金属及非金属单质填料等。

(1) 非单质类填料。

非单质类填料包括无机化合物及混合物, 通常有碳酸钙、二氧化钛、玻璃微珠、高岭土、硅藻土等, 主要成分多为耐热的小分子化合物, 作为填料添加到 PE-UHMW 中可以分散到大分子链中, 阻碍分子链热运动, 提高体系的耐热性。

彭学成^[6] 分别研究了玻璃微珠、硅藻土、高岭土对 PE-UHMW 的耐热性的影响。将三种填料分别添加到 PE-UHMW 中, 通过模压成型制成样品, 实验证明三种填料均能提高 PE-UHMW 的耐热性能。玻璃微珠、硅藻土、高岭土含

联系人: 薛平, 主要研究方向为高聚物加工改性

收稿日期: 2017-01-12

量分别为 50%, 30%, 30% (质量分数, 下同) 时, PE-UHMW 的热变形温度 (载荷 0.46 MPa 同) 提高了近 30℃, 耐热性改善效果达到最佳。

马赟喆等^[7]研究了中空玻璃微珠作为填料对 PE-UHMW 耐热性的影响。预先对经过混合均匀后的中空玻璃微珠与 PE-UHMW 进行造粒, 再通过注塑机直接注射成样条。对样条进行维卡软化点测试 (A50 法)。结果表明, 随着中空玻璃微珠含量的增加, PE-UHMWPE/ 中空玻璃微珠复合材料的维卡软化点呈现出上升趋势。中空玻璃微珠的最佳含量为 5%, 此时复合材料的维卡软化温度达到了 131℃, 比纯 PE-UHMW 提高了 11℃。

陈涛^[8]以四针状氧化锌 (ZnO) 晶须为填料, 研究了其对于 PE-UHMW 耐热性的影响。实验证明, 在填料含量为 2%, 6%, 8% 时, PE-UHMW/ZnO 晶须复合材料的热变形温度分别提高 14, 26, 33℃。说明填料四针状 ZnO 晶须能够增强 PE-UHMW 的耐热性。

秦建华等^[9]经过无水乙醇处理后向 PE-UHMW 中添加了不同含量的碳酸钙, 通过模压制成厚度为 2 mm 和 4 mm 的片状样品。经过测试, 发现碳酸钙含量达到 30% 时, B 法 (B120 法) 测定的 PE-UHMW 的维卡软化温度提升的最多, 提高了 35℃。

郝绘坤^[10]使用碳酸钙、二氧化钛、玻璃微珠及高岭土分别作为填料, 每种填料都以 10%, 20%, 30%, 40% 四种比例添加到 PE-UHMW 中, 以模压成型的方式制成样品, 与 PE-UHMW 纯料进行比较, 研究了填料对 PE-UHMW 维卡软化温度的影响。当四种填料添加量为 10% 时, 维卡软化温度全部都达到 100℃ 以上, 比纯料提高了 20℃; 四种填料添加量为 30% 时, 维卡软化温度全部都达到 110℃ 以上, 并且随着填料的增加, 维卡软化温度上升趋势减缓, 同时, 高岭土与 PE-UHMW 的共混物维卡软化温度最高。说明无机填充材料对 PE-UHMW 进行填充改性, 可以使其维卡软化温度提高, 改善耐热性。

(2) 单质类填料。

由于单质的成分单一, 针对性强, 在基体中能够更充分分散, 可以有效阻碍分子链的运动; 同时, 常用的单质主要是碳的同素异形体或金属单质, 如炭黑、石墨、铜粉等, 本身的导热性良好, 在高温下能够将热量传递散发, 提高了共混物的热性能。

张迪^[11]以石墨作为改性填料, 研究了石墨对于 PE-UHMW 耐热性的影响。与添加玻璃纤维相同, 石墨作为填料也能够提高 PE-UHMW 的热变形温度, 经相同含量的炭黑改性后的 PE-UHMW 热变形温度提高了 7℃。

Wang X 等^[12]选用了 R, V, Y, L 四种不同的炭黑分别

作改性剂, 研究了炭黑对于 PE-UHMW 耐热性的影响。发现四种炭黑都能够增加 PE-UHMW 的热变形温度, 随着填料的增加, PE-UHMW/V 炭黑共混物的热变形温度提高幅度最大, 当 V 炭黑含量为 6.5% 时, 热变形温度提高了 26℃。

A. Atanasov^[13]等使用碳纤维 (直径 7.5 μm, 线密度 0.8 dtex, 抗拉伸强度 3900 MPa) 作为填料, 研究了碳纤维对于 PE-UHMW 耐热性的影响。其中碳纤维的含量范围是 0~12%, 通过 Reich 法来测定不同含量碳纤维的复合材料的热分解活化能。实验证明, 纯料的热分解活化能为 160.9 kJ/mol, 随着碳纤维含量增加至 3%, 活化能增加至 177.6 kJ/mol, 而当碳纤维含量进一步增加时, 活化能开始下降, 在碳纤维含量增加到 12% 时, 活化能降至 104.5 kJ/mol。说明添加适量的碳纤维可以提高 PE-UHMW 的耐热性。

童铭康等^[14]向 PE-UHMW 中添加了不同体积分数的铜粉, 随着铜粉含量的增加, 共混物的热变形温度明显增加, 当铜粉体积分数达到 80% 时, 热变形温度提高了 50℃, 说明铜粉能够有效改善 PE-UHMW 的耐热性。

1.2 纳米材料改性

纳米材料是指在三维空间中至少有一维处于纳米尺寸 (0.1~100 nm) 或由它们作为基本单元构成的材料。目前常用的增强 PE-UHMW 耐热性的纳米材料有纳米氧化物、纳米碳材料等。纳米尺寸使得纳米材料具有一般常用材料所不具备的优异性能, 作为纳米材料如能实现较好的分散, 与基体的结合更加紧密, 改性效果明显。

谢晓芳等^[15]研究了 PE-UHMW/ 纳米 SiO₂ 复合材料的性能, 向 PE-UHMW 中添加不同含量的纳米 SiO₂, 通过测试发现随着填料的增加, A 法测定的维卡软化温度呈先上升后下降的趋势, 5% 为填料的最佳用量。同时又与 PE-UHMW/ 玻璃微珠复合材料的耐热性作为对比, 发现经过纳米材料改性后, 复合材料的维卡软化温度要比用玻璃微珠改性的高 10℃, 说明纳米材料改性的效果更好。

黄丽^[16]等研究了纳米 SiO₂ 填充改性 PE-UHMW 塑料的耐热性, 经过超声波振荡分散处理后, 将纳米 SiO₂ 按不同的比例与 PE-UHMW 粉料混合, 经模压成型制成样品。发现随着填料增加, A 法测定共混物的维卡软化温度明显升高, 且填料质量分数为 3% 时维卡软化温度提高了 10℃。

赵文静等^[17]将 MWCNT 与 PE-UHMW 结合, 制备了复合纤维。MWCNT 的直径小于 8 nm, 长 0.5~2 μm, 且纳米粒子含量为 0.5%, 3.0%, 1.0%, 1.5%, 2.0% 的复合纤维的热失重依次降低, 说明其耐热性依次升高。

M. E. Babiker 等^[18]研究了纳米蒙脱土对 PE-UHMW 耐热性的影响。通过压力感应流动的方法制备了 PE-UHMW/ 纳米蒙脱土凝胶纳米材料。纳米蒙脱土添加的含

量为5%,10%,20%。实验证明,三种含量的复合材料的起始热分解温度(T_s)分别提高了17,30,14℃;而最高热分解温度的改变并不明显。通过DSC测试得到复合材料的熔点,与纯PE-UHMW相比,分别提高7,9,8℃。

1.3 聚合物共混改性

近年来,聚合物共混改性在增强PE-UHMW性能方面应用较多,在耐热性方面主要是应用本身具有良好耐热性的聚合物与PE-UHMW共混。

宋宁等^[19]将PE-UHMW与聚四氟乙烯(PTFE)共混,研究了PTFE对PE-UHMW耐热性的影响。结果表明,当变形量相同且低于0.06 mm时,随着PTFE含量的增加,复合材料的热变形温度逐渐升高;当变形量为0.06,0.08 mm时,复合材料的热变形温度在PTFE含量为5%时达到最大值,提高了20℃。

刘婷等^[20]通过添加全氟聚醚(PFPE)对PE-UHMW进行改性。PFPE添加量为1%,2%,3%,4%,改性后的复合材料的 T_s 分别为441.19,442.75,443.89,442.65℃;最高热分解温度(T_{max})分别为482.41,484.81,483.30,484.45℃。均高于纯PE-UHMW的相应温度,说明复合材料的熔融性能有所提升,耐热性得到了改善。

He S等^[21]研究发现,添加聚乙二醇(PEG)能够使B法测定PE-UHMW的维卡软化温度由80℃提高至81℃,同时还发现在上述共混物中添加适量的马来酸酐接枝聚乙烯能够使PE-UHMW的维卡软化温度从80℃提高到85.7℃。

张洒洒^[22]将聚丙烯(PP)添加到PE-UHMW中,以模压成型的方式制成样品。发现随着PP含量的增高,A法测定PE-UHMW/PP材料的维卡软化温度与热变形温度明显升高,添加量分别为30%,50%时,材料的维卡软化温度分别提升3,9℃;热变形温度分别提升22,39℃,有效地改善了PE-UHMW的耐热性。Li Y M等^[23]通过添加均聚PP来改善PE-UHMW的耐热性,当PP含量为70%时,A法测定的维卡软化温度提升了19℃。说明均聚PP的改性效果更明显。

2 化学改性

在耐热性方面化学改性通常采用化学交联改性,利用化学手段改变分子的结构或形态以获得新的性能。常用的交联手段有过氧化物交联、偶联剂交联、辐射交联。

2.1 过氧化物交联

过氧化物交联是将PE-UHMW与过氧化物混合,在加工的过程中,过氧化物分解产生的自由基夺取PE-UHMW中的氢,形成交联结构,从而形成交联网状结构,改善PE-UHMW的性能。常用的过氧化物有二叔丁基过氧化己烷、过氧化二异丙苯等。但过氧化物交联改性,不能够达到完全交联,会在微观结构中产生缺陷,影响共混物性能。

胡平等^[24]选用不同含量的过氧化二异丙苯(DCP)作为交联剂对PE-UHMW进行改性。用无水乙醇稀释过的DCP均匀喷洒在PE-UHMW的粉末上,然后将物料冷压3 min,再热压成型制成样品。通过对热变形温度的测试,发现交联剂用量在0~2%范围内,热变形温度随着DCP含量的增加而升高,在DCP用量为2%时达到87℃,提高了约10℃,说明DCP的添加能够提高材料的热变形温度。

2.2 偶联剂交联

目前用于PE-UHMW改性的偶联剂主要是硅烷偶联剂。硅烷偶联剂在交联过程中,需要过氧化物引发剂来引发,由乙烯基和可水解的基团组成硅烷化合物接枝到PE-UHMW分子链中。与过氧化物交联相比,用硅烷偶联剂交联的条件简单,更容易操作控制。

刘颖等^[25]先将过氧化物溶解在乙烯基三甲氧基硅烷中,再将二月桂酸二丁基锡加入作为偶联剂制备了硅烷接枝PE-UHMW样品。并与过氧化物交联PE-UHMW样品进行性能对比,研究了化学交联对于UHMWPE性能的影响。发现A法测定硅烷交联样品的维卡软化温度比纯料提高了4℃,过氧化物交联样品的维卡软化温度降低了18℃,硅烷偶联剂交联可以增强PE-UHMW的耐热性,过氧化物不能够增强PE-UHMW的耐热性。

2.3 辐射交联

辐射交联是指利用各种辐射引发聚合物高分子长链之间的交联反应的技术手段,对于PE-UHMW性能的改进有着非常广泛的应用,目前常用X射线、 γ 射线等射线对PE-UHMW进行辐照,从而改进PE-UHMW的性能。

郭子贤等^[26]提出了一种制备耐热抗切割的PE-UHMW纤维的方法。以过氧化物作为引发剂,添加适量的抗氧剂(2,6-二特丁基苯酚等)及无机纳米颗粒材料,在X射线的辐射交联作用下制成产品。这种复合纤维在115℃烘箱空气环境中经过100 h老化后的强度保持率为97%,同条件下未经辐射交联的纤维,强度保持率为60%,说明辐射交联可以有效的提高PE-UHMW复合纤维的耐热性。

陈茹^[27]在 γ 射线辐照的作用下制备了PE-UHMW/镀镍碳纤维复合材料。通过DSC分析,得到辐照剂量与样品熔点的关系曲线。辐照剂量为100 kGy的样品熔点为136.3℃,与未经辐照的样品相比,熔点有所提升,而后开始降低,当辐照剂量为500 kGy时,熔点又有所增大。何振强^[28]也研究了 γ 射线辐照对PE-UHMW耐热性的影响,随着辐照剂量的增加,在辐照剂量达到150 kGy时,材料的热变形温度提升了37℃;但随着辐照剂量的进一步增加,材料的热变形温度开始下降。表明适量的 γ 射线辐照,能够提高PE-UHMW的耐热性。

3 聚合填充复合改性

聚合填充复合改性是指对填料预先进行处理,然后与树脂基体共混或直接将偶联剂、填料及基体共混,以改善树脂的性能。通常是以偶联剂作为连接填料与基体树脂的桥梁,使二者在共混时能够产生更紧密的结合,所以聚合填充复合改性是即有物理改性过程也有化学改性过程的复合改性,也是目前 PE-UHMW 改性常用的手段之一。

Shi G J 等^[29]选用硅烷偶联剂的丙酮溶液预先处理玻璃微珠,对玻璃微珠增强 PE-UHMW 的耐热性进行了研究。通过 B 法测定填料改性样品的维卡软化温度,发现随着玻璃微珠含量的增加,复合材料的维卡软化温度有明显的增加,并且其含量越高,提高的越明显;当填料含量为 40% 时,维卡软化温度增加至 125.4℃,提高了 1.25%。

魏海荣^[30]使用钛酸酯偶联剂处理的玻璃微珠作为填料,制备 PE-UHMW 复合材料,发现改性后,经 B 法测定的维卡软化温度最高提升至 113.2℃,提高了 28℃。

魏星^[31]制备了 PE-UHMW/马来酸酐接枝 PE-HD(PE-HD-g-MAH)/聚碳酸酯(PC)合金,通过 A 法测试,复合材料的维卡软化温度提高到 135.8℃,提高了约 10℃,表明 PE-HD-g-MAH 作为增容剂,将 PC 与 PE-UHMW 很好地结合起来,增强了界面粘合力,提高了 PE-UHMW 的耐热性。

Huang A^[32]研究了 PE-UHMW/纳米 SiC 复合材料的耐热性能。经过大分子偶联剂处理的样品,热变形温度提升了 21.4℃。该课题组又使用相同含量的小分子偶联剂处理纳米 SiC,发现经硅烷偶联剂处理的复合材料与经硅酮粉处理的复合材料相比,热变形温度提升的幅度小,提升了 17℃^[33]。说明经偶联剂处理的纳米 SiC 能够增强 PE-UHMW 的耐热性,且大分子偶联剂效果要更好。

P. S. Sreekanth 等^[34]在 γ 射线辐照作用下,使用经过偶联剂表面处理的不同含量的 MWCNT 作为填料,研究了辐照剂量及填料含量对 PE-UHMW 耐热性的影响。实验证明,未经辐照与辐照剂量为 100 kGy 的纯 PE-UHMW 的起始分解温度分别为 393℃与 416℃。当辐照剂量不变, MWCNT 的含量为 2% 时,改性效果最佳,此时,未经辐照与辐照剂量 100 kGy 的复合材料起始热分解温度分别为 446℃与 462℃,说明 γ 射线辐照与 MWCNT 填料均可以增强 PE-UHMW 的耐热性,二者共同作用下,改性效果更加明显。

偶联剂虽然可以增强填料与 PE-UHMW 之间的作用,进一步改善材料的耐热性;但是过多的偶联剂则会降低 PE-UHMW 的综合性能,且偶联剂的种类也会影响最终的改性效果,所以偶联剂的用量及种类的选择是聚合填充复合改性 PE-UHMW 耐热性的关键^[35-37]。

4 结语

近年来,国内外学者对于 PE-UHMW 耐热性改性的研究已经取得了一些成果。虽然物理改性、化学改性、聚合填充复合改性都能够有效增强 PE-UHMW 的耐热性,但大多数研究是基于实验室条件下模压成型制备样品,模压设备与模压工艺也不尽合理,导致研究结论不完全一致甚至相反。存在的主要问题有物理改性的填料在共混后并不能够完全分散在 PE-UHMW 基体中,导致填料团聚或与基体结合不够紧密,影响改性效果;化学改性的条件苛刻,过氧化物含量、偶联剂含量、辐射剂量在化学改性中如果过量,则会使 PE-UHMW 的综合性能下降;偶联剂的用量与种类的选择也是影响聚合填充复合改性的重要因素。所以应选择工业实际应用的挤出加工方法针对具体制品对 PE-UHMW 耐热性改性方法做进一步的研究,结合原料成本、加工工艺等方面确定目前市场需求的相关产品耐热改性最有效的方法。

参考文献

- [1] 周晓谦. 齐鲁石油化工, 2004, 32(4): 289-293.
Zhou Xiaolian. Qilu Petrochemical Technology, 2004, 32(4): 289-293.
- [2] 何小芳, 等. 中国塑料, 2013(3): 19-24.
He Xiaofang, et al. China Plastics, 2013(3): 19-24.
- [3] Martínez-Morlanes M J, et al. Composites Science and Technology, 2011, 71(3): 282-288.
- [4] Kevin Plumlee, et al. Wear, 2009, 267(5-8): 710-717.
- [5] 张恒, 等. 材料导报, 2016, 30(5): 33-39.
Zhang Heng, et al. Materials Review, 2016, 30(5): 33-39.
- [6] 彭学成. 填充改性超高分子量聚乙烯复合材料及加工研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2006: 38-39.
Peng Xuecheng. Study on modification and properties of ultra high molecular weight polyethylene composites filled with filler [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2006: 38-39.
- [7] 马赞喆, 等. 北京化工大学学报, 2010, 37(2): 49-53.
Ma Yunzhe, et al. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2010, 37(2): 49-53.
- [8] 陈涛. UHMWPE 耐热降磨改性研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005: 24-26.
Chen Tao. Study on modification of UHMWPE heat and wear resistance [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005: 24-26.
- [9] 秦建华, 等. 武汉工程大学学报, 2014, 36(6): 25-27.
Qin Jianhua, et al. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2014, 36(6): 25-27.
- [10] 郝绘坤. 超高分子量聚乙烯耐高温改性研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2014: 33-36.
Hao Huikun. Study on high temperature modification of ultra high molecular weight polyethylene [D]. Wuhan: Wuhan University of

- Technology, 2014:33-36.
- [11] 张迪. 超高分子量聚乙烯复合材料的成分组织与性能研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2010:45-47.
- Zhang Di. Study on microstructure and properties of ultra high molecular weight polyethylene composites[D]. Changchun:Changchun University of Science and Technology, 2010:45-47.
- [12] Wang X, et al. Modern Chemical Industry, 2001(6):28-32.
- [13] Atanasov A, et al. Polymers and Polymer Composites, 2006, 14(4):413-420.
- [14] 童铭康, 等. 铜粉填充 UHMWPE 材料导热性能的研究 [C]// 第十一届中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集. 泰安: 工程塑料应用杂志社, 2010:73-75.
- Tong Mingkang, et al. Study on thermal conductivity of UHMWPE filled with copper powder[C]//Proceedings of the eleventh China engineering plastics composites technology conference. Taian:The Magazine House of Engineering Plastics Application, 2010:73-75.
- [15] 谢晓芳, 等. 塑料, 2003, 32(6):20-22.
- Xie Xiaofang, et al. Plastics, 2003, 32(6):20-22.
- [16] 黄丽, 等. 北京化工大学学报, 2005, 32(3):38-41.
- Huang Li, et al. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2005, 32(3):38-41.
- [17] 赵文静, 等. 工程塑料应用, 2014(5):99-104.
- Zhao Wenjing, et al. Engineering Plastics Application, 2014(5):99-104.
- [18] Babiker M E, et al. Arabian Journal for Science and Engineering, 2013, 38(3):479-490.
- [19] 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.
- [20] 刘婷, 等. 中国塑料, 2015(4):30-35.
- Liu Ting, et al. China Plastics, 2015(4):30-35.
- [21] He S, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(43):39-45.
- [22] 张洒洒. 超高分子量聚乙烯耐热改性研究及耐温型薄壁管材的制备研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2012:63-64.
- Zhang Sasa. Study on heat resistance modification of ultra high molecular weight polyethylene and preparation of temperature resistant of thin wall pipe[D]. Qingdao:Shandong University of Science and Technology, 2012:63-64.
- [23] Li Y M, et al. Advanced Materials Research, 2012, 476-478:974-978.
- [24] 胡平, 等. 塑料, 1989(5):17-20.
- Hu Ping, et al. Plastics, 1989(5):17-20.
- [25] 刘颖, 等. 塑料, 2004, 33(1):1-4.
- Liu Ying, et al. Plastics, 2004, 33(1):1-4.
- [26] 郭子贤, 等. 耐热抗切割超高分子量聚乙烯纤维及其制备方法: 中国, 201510096511.2[P]. 2015-06-10.
- Guo Zixian, et al. Preparation method of heat-and cut-resisting ultra high molecular weight polyethylene fiber:China, 201510096511.2[P]. 2015-06-10.
- [27] 陈茹. 超高分子量聚乙烯基导电复合材料的电 / 热性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011:39-41.
- Chen Ru. Electrical / thermal properties of ultra high molecular weight polyethylene based conductive composites[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2011:39-41.
- [28] 何振强. 超高分子量聚乙烯增强改性及加工研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2012:34-36.
- He Zhenqiang. Study on the modification and processing of ultra high molecular weight polyethylene[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2012:34-36.
- [29] Shi G J, et al. Tribology, 2015, 35(6):714-723.
- [30] 魏海荣. 玻璃微珠填充 UHMWPE 性能研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2012:41-42.
- Wei Hairong. Study on properties of UHMWPE filled with glass bead[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2012:41-42.
- [31] 魏星. UHMWPE 合金性能研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2010:41-42.
- Wei Xing. Study on properties of UHMWPE alloy[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2010:41-42.
- [32] Huang A, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2013, 129(3):1218-1222.
- [33] 苏荣锦. 高性能超高分子量聚乙烯复合材料的制备与性能研究 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2012:55-57.
- Su Rongjin. Study on preparation and properties of high performance ultra high molecular weight polyethylene composites[D]. Zhuzhou:Hunan University of Technology, 2012:55-57.
- [34] Sreekanth P S R, et al. Bulletin of Materials Science, 2014, 37(2):347-356.
- [35] 吴向阳, 等. 一种超高分子量聚乙烯材料及其制备方法: 中国, 200710172538.0[P]. 2009-06-24.
- Wu Xiangyang, et al. A preparation method of ultra high molecular weight polyethylene material:China, 200710172538.0[P]. 2009-06-24.
- [36] 张永冰. 有机硅氧烷交联改性超高分子量聚乙烯 [D]. 北京: 北京化工大学, 2011:47-49.
- Zhang Yongbing. Crosslinking modified ultra high molecular weight polyethylene with organo siloxane[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2011:47-49.
- [37] 叶素娟. 改性 PTW / UHMWPE 复合材料的结构与性能 [C]// 第八届全国摩擦学大会论文集. 广州: [出版者不详], 2007:96-100.
- Ye Sujuan. Structure and properties of modified PTW / UHMWPE Composites[C]//Proceedings of the eighth national conference on tribology.Guangzhou:[S.n.], 2007:96-100.