

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.09.025

PE-UHMW 纤维研究进展及市场现状

杨璐,孟迎,李振虎,潘蓉,琚裕波,许凯

(华阳集团碳基合成材料研发中心,太原 030032)

摘要:简述了目前国内外超高分子量聚乙烯纤维(PE-UHMW)的主要制备技术,包括干法纺丝工艺、湿法纺丝工艺和熔融纺丝工艺。介绍了近年来 PE-UHMW 纤维表面的改性方法,主要有电晕放电改性、辐射接枝改性、等离子体处理改性、化学氧化改性和涂层改性。简介了 PE-UHMW 纤维在军事装备、安全防护、海洋渔业等领域的应用,简要分析了 PE-UHMW 纤维的国内外产能、市场情况及目前发展现状和存在的问题,并对我国 PE-UHMW 纤维未来发展方向进行展望。

关键词:超高分子量聚乙烯纤维;制备技术;改性;市场现状

中图分类号:TQ342+.61 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2022)09-0144-06

Research Progress and Market Status of PE-UHMW Fibers

Yang Lu, Meng Ying, Li Zhenhu, Pan Rong, Ju Yubo, Xu Kai

(Huayang Group Carbon-based Synthetic Materials R & D Center, Taiyuan 030032, China)

Abstract : The main preparation technologies of ultra-high molecular weight polyethylene (PE-UHMW) fibers at home and abroad were briefly introduced, including dry spinning process, wet spinning process and melt spinning process. The surface modification methods of PE-UHMW fibers in recent years were introduced, including corona discharge modification, radiation grafting modification, plasma treatment modification, chemical oxidation modification and coating modification. The application of PE-UHMW fibers in military equipment, safety protection, marine fishery and other fields was briefly introduced, and the domestic and foreign production capacity, market situation, current development status and existing problems of PE-UHMW fibers were briefly analyzed. The future development direction of PE-UHMW fibers was prospected.

Keywords : ultra-high molecular weight polyethylene fiber ; preparation technology ; modification ; market status

超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)纤维是由分子量 100 万以上的 PE-UHMW 树脂通过纺丝工艺制成的具有高结晶度和取向性的线型长链聚合物。PE-UHMW 纤维与其它三种高性能纤维的性能对比见表 1,可以看出, PE-UHMW 纤维的密度最低,拉伸强度和拉伸弹性模量最高分别可达 3.8 GPa 和 172 GPa,仅次于碳纤维。自 20 世纪 70 年代问世以来,PE-UHMW 纤维凭借着比强度高、耐磨损、耐化学腐蚀、耐冲击、耐低温及良好的生物相容性等优异性能,被广泛应用于国防军事装备、海洋渔业、医疗、建筑、体育器材等领域。

目前,凝胶纺丝工艺是制备 PE-UHMW 纤维的主要方法,市售的 PE-UHMW 纤维产品几乎全部由该法制得,其它工艺也有报道,但目前还未达到大规模工业化生产的条件。

表 1 PE-UHMW 纤维与其它三种高性能纤维的性能对比^[1]

项目	PE-UHMW 纤维	碳纤维	对位芳纶	间位芳纶
密度/(g·cm ⁻³)	0.97	1.8	1.44	1.38
拉伸强度/GPa	2.6~3.8	3.5~7.0	2.7~3.3	0.55~0.66
拉伸弹性模量/GPa	87~172	230~460	70~120	13.8~16.6
断裂伸长率/%	3.5	0.5~1.4	2.44	20~22
分解温度/℃	140	3 700	570	430
使用温度/℃	< 90	2 000	250	204

PE-UHMW 纤维下游应用可概括为两个方向,一是制成无纬布或绳、网类制品,二是与树脂等基体制成性能优异的复合材料。然而 PE-UHMW 纤维分子链上的无极性基团在赋予纤维产品良好的力学性能的同时也造成其表面惰性大、粘结性能差、不易与树脂基体结合等缺陷。为解决上述问题,研究人员通过电晕放电、辐射接枝、等离子体处理等方法对

通信作者:杨璐,硕士,化工工程师,研究方向为化工新材料

收稿日期:2022-06-20

引用格式:杨璐,孟迎,李振虎,等. PE-UHMW 纤维研究进展及市场现状 [J]. 工程塑料应用,2022,50(9):144-149.

Yang Lu, Meng Ying, Li Zhenhu, et al. Research progress and market status of PE-UHMW fibers[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(9):144-149.

PE-UHMW 纤维表面改性以改善其界面性能。笔者简要介绍了几种 PE-UHMW 纤维的生产工艺,综述了近些年 PE-UHMW 纤维表面改性的研究进展和 PE-UHMW 纤维产品的市场现状。

1 PE-UHMW 生产工艺

目前 PE-UHMW 纤维生产工艺主要有凝胶纺丝工艺和熔融纺丝工艺,工业化规模生产多采用前者,根据溶剂使用类型和脱除方式的不同,凝胶纺丝工艺有干法和湿法之分。

1.1 干法纺丝工艺

干法纺丝工艺由荷兰帝斯曼公司开发,具体流程如下:首先将 PE-UHMW 树脂与高挥发性溶剂十氢萘混合,通过挤出机高温混炼挤出,吹扫冷却脱除溶剂后形成无取向的凝胶原丝,再经过多次的超倍拉伸就可得到高取向的超强 PE-UHMW 纤维成品^[2]。于斌等^[3]利用干法纺丝工艺,制备了黑色 PE-UHMW 纤维,并考察了双螺杆挤出工艺、预拉伸温度、后拉伸工艺参数等对纤维生产的影响。孙勇飞等^[4]以 PE-UHMW 纤维专用树脂为原料,采用干法纺丝工艺制备出高性能纤维产品,并发现随着拉伸倍率的增加,纤维的力学性能增大,但纤维光滑度和平整度下降。

干法纺丝工艺具有流程短、纺丝速度快、过程稳定、经济性好的优势,纤维产品结晶度高、密度大、质地柔软。但该工艺使用的溶剂十氢萘价格昂贵且易挥发,对纺丝和溶剂回收等流程的设备要求较高,这也是目前制约干法纺丝工艺发展的重要原因之一。长期以来,干法纺丝工艺被荷兰帝斯曼公司和日本东洋纺公司垄断,我国于 1985 年由中国纺织科学研究院领衔开始进行干法纺丝技术的攻关,20 世纪末取得突破,并于 2007 年在中国石化仪征化纤公司实现工业化生产。近年来,上海化工研究院有限公司通过自主研发,在进料、拉伸、溶剂回收等环节进行技术创新,并完成干法纺丝工艺的中试线建设,得到强度高达 38 cN/dtex 以上的纤维产品^[5]。

1.2 湿法纺丝工艺

湿法纺丝工艺流程与干法纺丝工艺基本一致,区别是将干法纺丝工艺使用的易挥发溶剂替换为白油、煤油等不易挥发的高沸点溶剂,溶剂脱除则采用萃取的方式,萃取剂通常为二甲苯、二氯甲烷等^[7]。Jian 等^[6]探究了湿法纺丝工艺过程中的纺丝温度和凝胶溶液浓度对 PE-UHMW 纤维性能的影响,发现在最佳浓度下,当纺丝温度达到 150℃时,制备的初生纤维的临界拉伸比接近最大值。孙勇飞等^[7]考察了湿法纺丝工艺制备时纺丝温度、溶胀温度、螺杆转速对于 PE-UHMW 纤维强度的影响,通过设计正交试验,得到最佳的纺丝工艺参数为溶胀温度 110℃,纺丝温度 300℃,螺杆转速 60 r/min。王萍等^[8]对比了湿法纺丝工艺和干法纺丝工

艺制得的 PE-UHMW 纤维产品的结构和性能方面的不同,结果表明,干法工艺制备的 PE-UHMW 纤维表面更为光滑、平整,且力学性能更好。由于采用高沸点纺丝溶剂,湿法纺丝工艺的纺丝加工温度具有更大的操作弹性,但同时由于萃取剂的使用,使湿法工艺面临较大的环保压力,两种工艺的详细对比见表 2。湿法纺丝技术同样来源于帝斯曼公司,1985 年该技术出售给美国霍尼韦尔公司,目前国内外 PE-UHMW 纤维的生产大多采用该技术,如日本三井化学公司、北京同益中新材料科技股份有限公司(简称北京同益中公司)、江苏九九久科技有限公司(简称江苏九九久公司)、湖南中泰特种装备有限责任公司(简称湖南中泰公司)等。

表 2 PE-UHMW 纤维干、湿纺丝工艺对比

项目	湿法	干法
流程	长	短
纺丝速度	慢	快
溶剂	矿物油 (不易挥发、安全性高)	十氢萘 (易挥发、安全性低)
去溶剂	萃取	加热挥发
回收方式	间接回收	直接回收
回收系统	庞大、复杂	密闭性好、运行效率高
代表企业	美国霍尼韦尔公司、 北京同益中公司	荷兰帝斯曼公司

我国湿法纺丝工艺的研发工作起步于 20 世纪 80 年代,由东华大学牵头,中国石化和上海市科委等部门协助,20 世纪 90 年代初实现技术突破,1996 年进行中试开发,21 世纪初实现工业化生产。但我国以该工艺生产的 PE-UHMW 纤维存在价格竞争激烈、产品多为中低端的问题。

1.3 熔融纺丝工艺

熔融纺丝工艺流程如下:将 PE-UHMW 原料加热熔融,熔体通过喷丝板挤出得到初生丝,再进行多级高倍拉伸,即可得到高强度的 PE-UHMW 纤维产品。熔融纺丝法工艺无需添加溶剂,也无相应的萃取操作,因此具有流程短、工艺简单、生产环保及成本低的优势,受到广大研究人员的关注。张强等^[9]以高流动性 PE-UHMW 树脂颗粒为原料,采用熔融纺丝法制备出了拉伸强度为 1.6 GPa 的 PE-UHMW 纤维。袁雯等^[10]将 PE-UHMW 切片进行熔融纺丝,得到了高线密度的 PE-UHMW 纤维产品。日本东洋纺公司于 2008 年实现了熔融纺丝 PE-UHMW 纤维的工业化生产,目前共有 3 条生产线,合计产能为 1 500 t/a。随后美国霍尼韦尔公司、上海化工研究院有限公司、中国石化集团公司等相继报道了 PE-UHMW 熔融纺丝技术,但目前国内尚无 PE-UHMW 熔融纺丝工业化装置的报道。

尽管熔融纺丝工艺具有诸多优点,但由于 PE-UHMW 树脂极长的分子链相互缠绕产生大量的网状结构,熔体黏度大,不利于喷丝操作,初生丝存在结构缺陷,拉伸操作时有效拉伸倍率低,导致无法获得高强度的 PE-UHMW 纤维产品。

Kakiage等^[11]通过扩大喷丝孔直径,将PE-UHMW初生丝在高于熔融温度的油浴中拉伸,该法有效降低了初生丝的缺陷度,但同时二次热拉伸也降低了PE-UHMW纤维的分子取向性。王非等^[12-14]在PE-UHMW原料中加入一定比例的高密度聚乙烯(PE-HD),制备了拉伸强度为1.13 GPa的共混纤维,原料的共混提高了纤维的结晶度、取向度和力学性能。Liu等^[15-16]在PE-UHMW/PE-HD原料共混的基础上加入适量的纳米SiO₂,减缓了PE-UHMW/PE-HD共混物的溶胀效应,降低了弹性特性,提高了可纺性。

2 PE-UHMW纤维表面改性

虽然PE-UHMW纤维具有高强度、低密度、耐磨等优异性能,但分子中大量的亚甲基结构导致表面化学惰性,粘结性差,不易与树脂基体形成良好的界面结合,降低了PE-UHMW纤维增强复合材料的性能,限制了复合材料的使用范围^[17-19]。研究人员通过在PE-UHMW纤维表面引入极性基团可有效改善上述问题,目前常用的改性方法主要有电晕放电改性、辐射接枝改性、等离子体处理改性、化学氧化改性、涂层改性等^[20-22]。

2.1 电晕放电改性

电晕放电改性是将待改性的PE-UHMW纤维置于高频放电的电极之间,强电场将电极周围的气体局部击穿形成电晕,产生电子、离子、自由基及激发态分子基团,通过电晕放电使这些粒子轰击纤维表面,从而引入羟基、羧基、羰基等活性基团,降低表面化学惰性,同时也提高了纤维的表面粗糙度。电晕放电改性可连续处理,且效果明显,用时短,效率高,但引入基团有限,并影响PE-UHMW纤维的性能。Bahramian等^[23]针对PE-UHMW纤维与树脂基体之间的界面附着力差的缺点,通过电晕放电处理PE-UHMW纤维表面,考察了放电时间对纤维表面特性的影响,发现当放电时间为5 s时,PE-UHMW纤维的力学性能和表面粗糙度增加。电晕放电处理将含氧官能团引入了纤维表面,改善了增强复合材料的力学性能和树脂与纤维之间的附着力。张嘉煜等^[24]利用电晕放电处理PE-UHMW纤维机织布以解决其表面浸润性差、与基体粘结性低的问题,实验结果表明,当处理时间为4 s时,随着电流强度的增加,机织布表面的浸润性增强,表面粗糙度明显增大,表面引入的羟基、羧基等含氧基团数量增加。Han等^[25]先将PE-UHMW纤维在硫酸和聚乙烯醇溶液中浸泡0.5 h,再在戊二醛溶液中浸泡0.5 h,样品干燥后在电压为100 V、电流2.4 A的条件下电晕处理1 min。改性后的PE-UHMW表面含氧量高达25% (质量分数),表面极性大大增强。经上述方法处理后的复合材料的剥离强度、极限内聚力、拉伸强度和弯曲强度较未改性样品分别提高了262.8%,166.9%,139.7%和200.6%。

2.2 辐射接枝改性

辐射接枝改性是利用电子束、紫外光、 γ 射线等高能射线辐射,在纤维表面引发单体接枝聚合,使PE-UHMW纤维表面产生羰基、羧基、腈基等基团。辐射接枝改性工艺简单,成本低,可实现规模化生产,但影响辐射改性的因素多,辐射时间过长会产生均聚物,并损伤纤维结构。Gao等^[26]通过同步辐射将聚甲基丙烯酸酞氧丙基三甲氧基硅烷接枝到PE-UHMW织物表面,然后与N-氨乙基- γ -氨丙基三乙氧基硅烷共水解,成功在PE-UHMW织物表面形成一层有机-无机杂化涂层,为后续应用奠定了基础。高乾宏^[27]充分利用辐射接枝法在PE-UHMW纤维表面引入功能化官能团,通过共辐射接枝和预辐射接枝将丙烯酸甲酯和甲基丙烯酸缩水甘油酯接枝到PE-UHMW纤维上,并通过功能化制备出含有脲基胺和季铵盐官能团的高分子吸附材料及力学性能优异和耐洗涤的金属化柔性导电纤维。Li等^[28]利用连续紫外光诱导接枝工艺将甲基丙烯酸和丙烯酰胺功能性单体逐步接枝到PE-UHMW纤维表面,功能性基团通过化学键结合在一起,改性纤维的界面剪切力测试显示,界面粘结性能得到很大改善,纤维表面的活性基团有效地促进了纤维与树脂基体之间的结合。

2.3 等离子体处理改性

等离子体处理改性是利用气体离子与PE-UHMW纤维表面发生碰撞,改变纤维表面形貌的同时诱导引入活性基团,从而提升纤维表面性能。等离子体改性处理时间短,适用性广,生产过程环保,但设备稳定性差,处理不均匀。吴孟锦^[29]利用氧等离子体改性PE-UHMW纤维,并探究了等离子体气体流速、处理时间和放电功率对PE-UHMW纤维性能的影响,发现改性后纤维的表面粗糙度和润湿性得到改善,并且引入大量含氧官能团和分子间氢键。Wu等^[30]揭示了氧等离子体处理对PE-UHMW纤维增强聚合物基复合材料界面性能和冲击性能的协同增强作用。在输入功率为150~180 W,时间为120~150 s、气体流量为8 mL/min的条件下,复合材料的拉伸强度提高了10.67%,冲击损伤投影面积和压痕深度分别降低了51.93%和24%。改性后的复合材料最大限度地发挥了纤维的增强效应,提高了冲击性能。Elabid等^[31]将PE-UHMW纤维进行氧/氩等离子体处理,结果表明,在未改变整体性能的前提下,增加了PE-UHMW纤维比表面粗糙度,提高了润湿性,且处理后的PE-UHMW纤维获得了较好的整体染色性能。

2.4 化学氧化改性

化学氧化改性是利用高氯酸、铬酸、浓硫酸、双氧水、臭氧等强氧化剂改性活化PE-UHMW纤维表面,使纤维表面增加含氧活性基团,改善粘结性。化学试剂改性机理明确,

效果突出,所使用的试剂选择性广,但该法会削弱纤维的力学性能,反应条件严苛,环保压力大。Li 等^[32]将质量分数 36%~38% 的乙酸溶液、75% 的硫酸溶液和水按质量比 20:25:2 混合,对 PE-UHMW 纤维进行改性处理,并考察了改性时间对复合材料性能的影响,改性后纤维表面的化学成分和形态发生显著变化。在纤维含量相同的情况下,处理时间为 9 min 的复合材料比强度、比模量和弯曲载荷分别比未处理样品提高 16.7%、82.9% 和 55.3%。乔石^[33]采用高锰酸钾-硝酸、高锰酸钾-硫酸、铬酸-硫酸、双氧水-硝酸分别改性 PE-UHMW 纤维,发现铬酸-硫酸组合的综合改性效果最优,最优工艺为铬酸、水和硫酸的质量比为 7:12:82,在 63℃处理 10 min,改性后纤维的表面粗糙度和比表面积增大,出现了新的含氧官能团,与树脂之间的粘接强度提高了 60%。Zhang 等^[34]采用 NaClO 对 PE-UHMW 纤维进行氯化,然后通过原子转移自由基聚合将甲基丙烯酸-2-羟基乙酯接枝在 PE-UHMW 纤维表面。改性后的纤维表面张力随着 NaClO 浓度、反应时间和反应温度增加而增大,最大表面张力达到 49.5 mN/m,而且功能化改性未对纤维表面产生破坏,功能化改性纤维复合材料的冲击强度和弯曲强度比未改性时分别提高了 46.7% 和 36.5%。

2.5 涂层改性

涂层改性是将一些具有粘结性的聚合物沉积在纤维表面,形成一层均匀厚度的涂层,以改善 PE-UHMW 纤维表面化学活性的方法。纤维表面增加的涂层,不仅改变了纤维表面形貌,增加了表面粗糙度,而且引入了活性基团,改善了纤维与基体的兼容性,增强了复合材料的界面强度。Sa 等^[35]受贻贝中的粘附蛋白的启发,利用多巴胺自聚反应在 PE-UHMW 纤维表面沉积一层连续、均匀、致密的聚多巴胺涂层,改性后的 PE-UHMW 纤维展现出优异的粘合性能,并具有良好的耐热老化性和耐疲劳性。Wang 等^[36]在 PE-UHMW 纤维表面涂覆单宁酸涂层,改善纤维的表面粗糙度、浸润性和附着力,从而改善 PE-UHMW 纤维与树脂的界面性能。改性后的 PE-UHMW 纤维表现出优异的力学性能和亲水性,并且随着涂覆时间的延长,纤维表面单宁酸含量增加。与未涂覆的 PE-UHMW 纤维相比,改性后的复合材料的界面剪切强度,拉伸强度和拉伸弹性模量分别提高了 43.3%、28% 和 49.4%。Li 等^[37]通过化学沉积法在 PE-UHMW 纤维表面涂覆一层氧化铜,纤维表面的铜离子和氧离子与聚氨酯基体中的氧和氢反应形成化学键,因此改性 PE-UHMW 纤维增强硬质聚氨酯复合材料的强度和韧性得到了显著增强,拉伸强度、拉伸弹性模量、弯曲强度和冲击强度分别提高了 20.4%、39.7%、11.0% 和 15.8%,界面剪切强度增加了 14.9%。

3 国内外市场现状

近几年,随着 PE-UHMW 纤维制品在军事装备、海洋渔业、航空航天、安全防护等领域的推广应用,全球 PE-UHMW 纤维的需求量逐年攀升。图 1 为 2015~2021 年全球 PE-UHMW 纤维产量和理论需求量,可以看出,2021 年全球 PE-UHMW 纤维产量和理论需求量分别达到 7.0 万 t 和 10.0 万 t,与 2015 年相比接近翻倍;受全球疫情持续影响,2020 年和 2021 年全球 PE-UHMW 纤维产量和理论需求量增速放缓,但市场依然存在较大的供应缺口。

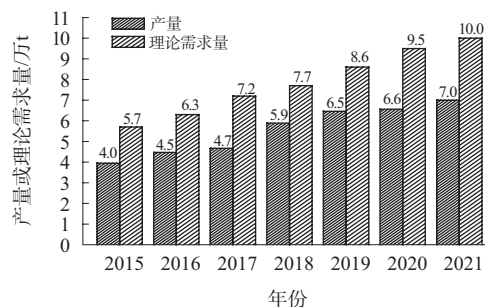


图1 2015~2021 年全球 PE-UHMW 纤维产量和理论需求量

全球 PE-UHMW 纤维的年消费结构如图 2 所示。可以看出,防弹衣和武器装备是全球 PE-UHMW 纤维年消耗量最大的下游应用领域,年消耗量高达 65%;绳、渔网类是仅次于防弹衣和武器装备的另一重要下游应用领域,年消耗量占 25%;此外,劳动防护领域的年消耗量占 5%。

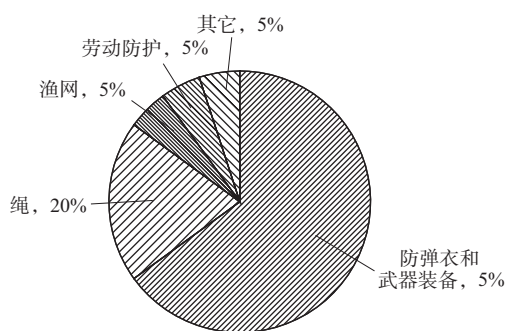


图2 全球 PE-UHMW 纤维的年消费结构

表 3 是 PE-UHMW 纤维下游应用市场情况,可以地看出,PE-UHMW 纤维的下游应用产品种类繁多,遍及军用、民用领域,包括军事装备、航空航天、海洋渔业、安全防护、生物医疗、通讯、建筑等各行各业。

2020 年全球主要 PE-UHMW 纤维企业生产产能见表 4,可以看出,全球 PE-UHMW 纤维生产厂商主要有荷兰帝斯曼公司、美国霍尼韦尔公司、日本东洋纺公司、江苏九九久公司、山东爱地高分子材料有限公司(简称山东爱地高分子公司)、中国石化仪征化纤股份有限公司(简称仪征化纤公司)、湖南中泰公司等,产品多以 PE-UHMW 纤维和无纬布为主,其中荷兰帝斯曼公司和江苏九九久公司 2020 年产能最高,分别达到 17 400 t 和 10 000 t。

表3 PE-UHMW 纤维下游应用市场领域

应用行业	产品
军事装备	海上布雷网、降落伞、伪装网、轻质防弹衣、坦克装甲板、防弹头盔等
海洋产业	系泊缆、捕鱼拖网、深海养殖网箱、轻便船体及构件、海上挡油堤等
安全防护	安全绳索、吊装带、防割手套、防割服、防弹盾牌等
航空航天	雷达保护罩、飞机舱内结构件、驾驶舱安全防护门等
体育器材	登山绳索、钓鱼线、球拍网线、帆船、击剑服、钓鱼竿、滑雪橇等
生物医药	X射线室屏蔽工作台、医疗安全包装、手术防割套、缝线等
建筑业	安全帽、特种围栏、货物吊绳、吊网、防护网等
通讯	无线发生整流罩、光缆加强芯、防割填充物等
防洪	轻型救生潜艇、抗冲击围栏、耐水浸包装袋、填石网兜等

表4 2020年全球主要PE-UHMW纤维企业生产产能

公司简称	主要产品	产能/t
荷兰帝斯曼公司	PE-UHMW 纤维及无纬布	17 400
美国霍尼韦尔公司	PE-UHMW 纤维	3 000
日本东洋纺公司	PE-UHMW 纤维	3 200
江苏九九久公司	PE-UHMW 纤维及其制品	10 000
山东爱地高分子公司	PE-UHMW 纤维	5 000
仪征化纤公司	PE-UHMW 纤维及其制品	3 300
湖南中泰公司	PE-UHMW 纤维、无纬布及防弹制品	3 000
浙江千禧龙纤特种纤维股份有限公司	PE-UHMW 纤维、无纬布及防护产品	2 611
江苏锦尼玛新材料股份有限公司	PE-UHMW 纤维及其制品	2 500
北京同益中公司	PE-UHMW 纤维及其制品	2 370

2019年,我国PE-UHMW纤维产能达到4.1万t,约占全球产能的63%,但我国PE-UHMW纤维产业发展处于初级阶段,有效供给不足,特别是高端产品市场供不应求,仍需进口以满足需求。PE-UHMW纤维行业高生产技术壁垒导致我国能够规模化生产PE-UHMW纤维的企业相对较少,产业集中度较高,图3为2020年我国主要PE-UHMW纤维企业市场份额分布图,可以看出,江苏九九久是我国PE-UHMW纤维产能最大的企业,2020年产能占比接近国内总产能的40%。

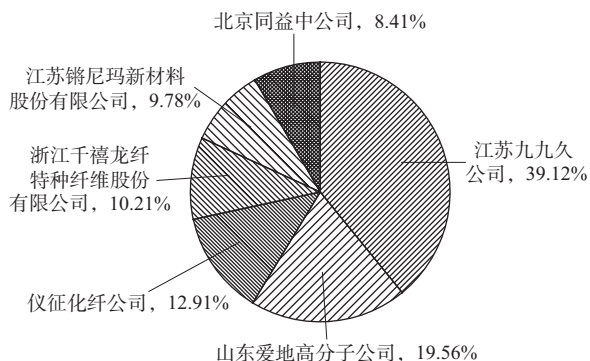


图3 2020年我国主要PE-UHMW纤维企业市场份额分布图

4 结语

PE-UHMW纤维作为一种高性能纤维,具有良好的应用前景,同时也是我国技术创新和国家发展的重点材料之一,

我国企业经过多年技术攻关和产业化布局取得了令人欣喜的成绩,但在PE-UHMW纤维研发和应用领域较国际巨头仍存在一定差距,比如,我国PE-UHMW产品的抗蠕变性能还有待进一步加强,断裂强度等参数与海外巨头企业相比仍有较大提升空间,生产成本较高,产品应用偏低端等,这些问题亟待解决。未来我国相关企业、高校和科研院所要继续加大研发投入力度,注重生产设备的升级改造,持续提升PE-UHMW纤维产品的核心性能指标,丰富纤维产品种类,扩大应用范围,拓展应用场景,既要保证国家国防战略需要,又要满足海洋渔业、体育产业、安全防护等民用领域需求,锚定高附加值应用市场,提升产品国际竞争力。

参考文献

- [1] 甄万清. 熔体纺丝法制备超高分子量聚乙烯纤维 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2011.
Zhen Wanqing. The preparation of UHMWPE fiber by melt spinning process [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2011.
- [2] 王新威, 等. 化工进展, 2020, 39(9): 3 403-3 420.
Wang Xinwei, et al. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(9): 3 403-3 420.
- [3] 于斌, 等. 合成技术及应用, 2020, 35(4): 43-46.
Yu Bin, et al. Synthesis Technology and Application, 2020, 35(4): 43-46.
- [4] 孙勇飞, 等. 工程塑料应用, 2016, 44(11): 58-61.
Sun Yongfei, et al. Engineering Plastics Application, 2016, 44(11): 58-61.
- [5] 孔维嘉. 超高分子量聚乙烯纤维的结构与性能研究 [D]. 西安: 西安工程大学, 2015.
Kong Weijia. Study on structure and properties of ultra high molecular weight polyethylene fiber [D]. Xi'an: Xi'an Engineering University, 2015.
- [6] Jian T, et al. Polym Eng Sci, 2003, 43(11): 1 765-1 777.
- [7] 孙勇飞, 等. 上海塑料, 2021, 49(1): 42-45.
Sun Yongfei, et al. Shanghai Plastics, 2021, 49(1): 42-45.
- [8] 王萍, 等. 合成纤维工业, 2014, 37(4): 67-70.
Wang Ping, et al. China Synthetic Fiber Industry, 2014, 37(4): 67-70.
- [9] 张强, 等. 高分子材料科学与工程, 2014, 30(3): 80-84.
Zhang Qiang, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2014, 30(3): 80-84.
- [10] 袁雯, 等. 合成纤维工业, 2013, 36(4): 42-44.
Yuan Wen, et al. China Synthetic Fiber Industry, 2013, 36(4): 42-44.
- [11] Kakiage M, et al. Materials Today Communications, 2020, 23.
DOI:10.1016/j.mtcomm.2019.100864.
- [12] 王非, 等. 中国塑料, 2022, 36(1): 47-52.
Wang Fei, et al. China Plastics, 2022, 36(1): 47-52.

- [13] Wang F, et al. Journal of Industrial Textiles, 2020, 49(8):1 011–1 035.
- [14] Wang F, et al. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2018, 13(3). DOI:10.1177/155892501801300304.
- [15] Liu L C, et al. Rheologica Acta, 2019, 58(3):183–192.
- [16] Liu L C, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(26). DOI:10.1002/app.47713.
- [17] Zhang X K, et al. Polymer Bulletin, 2011, 67(3):527–540.
- [18] Wang S C, et al. Polymer Composites, 2020, 41(4):1 614–1 623.
- [19] Zhang X K, et al. Polymer Bulletin, 2011, 67(3):527–540.
- [20] 李露露, 等. 功能材料, 2022, 53(4):4 088–4 096.
Li Lulu, et al. Journal of Functional Materials, 2022, 53(4):4 088–4 096.
- [21] 尚晴, 等. 高分子通报, 2020(4):22–29.
Shang Qing, et al. Polymer Bulletin, 2020(4):22–29.
- [22] 宋俊. 超高分子量聚乙烯纤维表面改性及其复合材料研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2007.
Song Jun. Study on surface modifying of UHMWPE fibers and their composites[D]. Tianjin:Tianjin Polytechnic University, 2007.
- [23] Bahramian N, et al. Dental Materials, 2015, 31(9):1 022–1 029.
- [24] 张嘉煜, 等. 北京服装学院学报: 自然科学版, 2020, 40(2):30–33, 52.
Zhang Jiayu, et al. Journal of Beijing Institute of Fashion Technology:Natural Science Edition, 2020, 40(2):30–33, 52.
- [25] Han L, et al. Polymers, 2020, 12(3). DOI:10.3390/polym12030521.
- [26] Gao Q H, et al. Royal Society of Chemistry Advances, 2020, 10(26):15 139–15 147.
- [27] 高乾宏. 超高分子量聚乙烯纤维及织物的辐射接枝改性 with 功能化研究 [D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2016.
Gao Qianhong. Study on radiation graft modification and functionalization of ultra-high molecular weight polyethylene fiber and fabric[D]. Shanghai:Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [28] Li Z, et al. Applied Surface Science, 2011, 257(17):7 600–7 608.
- [29] 吴孟锦. 氧等离子体改性 UHMWPE 复合材料的界面及力学性能研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2021.
Wu Mengjin. Interfacial and mechanical properties of oxygen plasma-modified UHMWPE reinforced composites[D]. Shijiazhuang:Hebei University of Science and Technology, 2021.
- [30] Wu M J, et al. Composite Structures, 2022, 292. DOI:10. 1016/j.compstruct.2022.115663.
- [31] Elabid A E A, et al. Gezira Journal of Engineering and Applied Sciences, 2019, 14(2):53–63.
- [32] Li C Y, et al. e-Polymers, 2019, 19(1):40–49.
- [33] 乔石. UHMWPE 纤维针织增强体复合材料的研究与开发 [D]. 西安: 西安工程大学, 2016.
Qiao Shi. Study and development of UHMWPE fiber knitted fabric composites[D]. Xi'an:Xi'an Engineering University, 2016.
- [34] Zhang Z H, et al. Applied Surface Science, 2018, 427:410–415.
- [35] Sa R, et al. Composites Science and Technology, 2015, 113:54–62.
- [36] Wang S C, et al. Polymer Composites, 2020, 41(4):1 614–1 623.
- [37] Li W W, et al. Fibers and Polymers, 2021, 22(7):1 883–1 888.