

超高分子质量聚乙烯纤维的性能及生产状况

李建利, 张新元, 贾哲昆, 赵领航, 王建新
(陕西省纺织科学研究所, 陕西 西安 710038)

摘要:简述了超高分子质量聚乙烯纤维的性能,并将其与其他高性能纤维进行比较;对超高分子质量聚乙烯纤维的生产工艺进行介绍,重点为干、湿法工艺路线;对超高分子质量聚乙烯纤维在国内外的产能状况作了概述,分析了国内外的技术差距。
关键词:超高分子质量聚乙烯纤维;性能;工艺;产能
中图分类号:TQ 342.61 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2016)01-0009-07

Performance and Industrial Status of Uhmwpe Fiber

LI Jianli, ZHANG Xinyuan, JIA Zhekun, ZHAO Linghang, WANG Jianxin
(Shaanxi Textile Science Institute, Xi'an 710038, China)

Abstract: The current paper introduced the performance of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fiber and the comparison with other high performance fibres. It introduces the production technology of ultra-high molecular weight polyethylene fiber, with the emphasis on the dry and wet process route. And an overview has been made on the ultra-high molecular weight polyethylene fiber production status at home and abroad. Finally, the technology gap at home and abroad has been analyzed.
Key words: UHMWPE fiber, performance, technology, capacity

超高分子质量聚乙烯(UHMWPE)纤维,又称高强高模聚乙烯纤维,是目前世界上比强度和比模量最高的纤维,是其分子质量在100万~500万的聚乙烯所纺出的纤维。它与芳纶(对位芳纶PPTA、间位芳纶PMIA)、碳纤维(CF)并称为当今“世界三大高科技纤维”。由于UHMWPE纤维具有众多的优异特性,它在高性能纤维市场上,包括从海上油田的系泊绳到高性能轻质复合材料方面均显示出极大的优势,在现代化战争和航空、航天、海域防御装备等领域发挥着举足轻重的作用。

文中分析了UHMWPE纤维的优越性能,并与其他高性能纤维进行性能比较,介绍了UHMWPE纤维的国际先进生产工艺及我国的主要工艺路线,并通过简述国内外UHMWPE纤维的产能状况,分析我国的技术差距。UHMWPE纤维是我国唯一具有国际竞争力的高性能纤维,加大国产化工艺技术的开发和研究,对打破国外对我国相关产业的技术

垄断,及对促进和引导我国纺织产业结构调整、提高产品附加值有着重要意义。

1 UHMWPE 纤维与其他高性能纤维的比较

1.1 性能

UHMWPE纤维一个突出优点是质轻,密度 0.97 g/cm^3 ,在所有高性能纤维中密度最小,是唯一能够漂浮在水面上的高科技纤维^[1]。

UHMWPE纤维的优越性在于其具有亚甲基相连($-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$)的超分子链结构,没有侧基,结构对称、规整,单键内旋转位垒低,柔性好^[2]。相关研究表明,即使在 $-150\text{ }^\circ\text{C}$ 的环境,仍保持良好的耐挠曲性,无脆化点^[3]。由于UHMWPE纤维大分子链结构规整,纤维沿轴向高度取向,结晶度高,因此赋予其优良的力学性能(见表1)。UHMWPE纤维

模量很高,具有突出的抗冲击性和抗切割性能,抗拉强度是同等线密度钢丝的 15 倍,比芳纶还高 40%,是普通纤维和优质钢纤维的 10 倍,仅次于特级碳纤维。由于 UHMWPE 纤维分子结构“ - CH₂ - CH₂ - ”不含易与接触物质发生反应的羟基、芳香环等基团,因此具有化学和光学惰性^[4]。强酸、强碱及有机溶剂均对 UHMWPE 纤维强度没有任何影响,化学稳定性极好^[5];而且,在经 1 500 h 日晒后,纤维强度仍高达 80%,耐候性、耐紫外性能特别优越^[6]。此外,UHMWPE 纤维还有良好的耐磨性与生物共存性。

UHMWPE 纤维由于其独特的优异性能,在安全

防护、航空航天、国防装备、造船业等领域发挥着举足轻重的作用,其纤维长丝可直接用做防弹、绳缆、高压容器材料,其纤维增强复合材料可用于船舶及飞机骨架结构、运动器械、人造关节等材料^[7]。

当然,由于 UHMWPE 纤维分子链结构单一的特征,也使得该纤维耐蠕变性能差,在受到长时间外力作用时,分子链之间易滑移,产生蠕变。另外,该纤维还具有表面加工困难,不易染色,不易与其他材料粘接等缺点^[8]。

1.2 与其他纤维性能比较

UHMWPE 纤维与其他几种高性能纤维的主要性能指标如表 1 所示。

表 1 几种高性能纤维的主要性能指标

Tab. 1 Main performance index of several high performance fibers

性能指标	UHMWPE	CF	PPTA	PMIA	E-玻璃纤维
密度/(g/cm ³)	0.97	1.80	1.44	1.38	2.54
强度/GPa	2.6 ~ 3.8	3.5 ~ 7.0	2.7 ~ 3.3	0.55 ~ 0.66	3.45
模量/GPa	87 ~ 172	230 ~ 460	70 ~ 120	13.8 ~ 16.6	73
伸长率/%	3.5	0.5 ~ 1.4	2.4	20 ~ 22	4.5
分解温度/℃	140	3 700	570	430	-
使用温度/℃	< 90	2 000	250	204	-

从表 1 可以看出,UHMWPE 纤维具有很高的强度和模量,在高性能纤维中强度、模量仅次于碳纤维^[9]。断裂伸长率比碳纤维、芳纶都要高,柔韧性好,在高应变率和低温下力学性能仍然良好,抗冲击能力优于碳纤维、芳纶及一般玻璃纤维,是一种非常理想的防弹、防刺安全防护材料。其复合材料比冲击总吸收能量分别是碳纤维的 1.8 倍,是芳纶的 2.6 倍,是 E 玻璃纤维的 3 倍。其复合材料的防弹能力是芳纶装甲结构的 3.6 倍,防弹头盔是效果相同的芳纶纤维头盔质量的 2/3。

当然,UHMWPE 纤维也存在很明显的缺点:不耐高温,这是由于 UHMWPE 纤维分子链无侧基,分子链间作用力以范德华力为主,流动活化能小,熔点低,小于 160 ℃。另外,抗压缩和抗蠕变性能也较差,并且树脂浸润性较差,有较高的可燃性,这就限制了 UHMWPE 纤维的使用范围。

2 UHMWPE 纤维生产工艺

自 20 世纪 70 年代起,国外许多企业、研究机构经历数十年的研究,探索出了生产 UHMWPE 纤维多种技术路线,有熔融纺丝—高倍热拉伸法、凝胶纺丝—高倍热拉伸法、表面结晶生长法、Porter 固体挤出法等^[10-11]。研究表明,制备 UHMWPE 纤维的

关键是提高拉伸倍数,这样有助于提高纤维的结晶度与取向度,使呈折叠链状的片晶结构向伸直链结构转化,从而极大地改善纤维强度和模量。目前,熔融纺丝和凝胶纺丝(又称冻胶纺丝法)是世界上工业化生产的主要方法。20 世纪 80 年代后期,美国 Hoechst-Celanese 公司成功取得 UHMWPE 纤维熔融纺丝—高倍热拉伸技术,商品定名“Certran”;随后意大利的 Snia 公司也开发了类似纤维。缺点是熔融纺丝法制得的纤维性能低于凝胶纺丝法的纤维性能,因此未能得到更大发展^[12]。目前世界上最成功的 UHMWPE 纤维工业化生产方法是凝胶纺丝—高倍热拉伸工艺,世界上 UHMWPE 纤维的主要生产商荷兰 DSM、美国 Honeywell、日本 Mitsui 和我国均采用凝胶纺丝工艺。

凝胶纺丝法,近些年来国外和国内各公司分别从改变溶剂和萃取剂、改进溶胀工艺、改进萃取工艺等多方面进行了改良,形成具有各自知识产权的生产工艺。

UHMWPE 凝胶纺丝工艺主要有两大类:一类是干法工艺路线,即高挥发性溶剂干法凝胶纺丝工艺路线;另一类是湿法工艺路线,即低挥发性溶剂湿法凝胶纺丝工艺路线^[13]。干、湿法冻胶纺丝工艺对比如表 2 所示。

表 2 干、湿法冻胶纺丝工艺对比

Tab. 2 Comparison of dry and wet spinning process

纺丝类型	干 法	湿 法
溶剂	十氢萘(易挥发,安全性低)	矿物油(不易挥发,安全性高)
去溶剂	加热挥发	萃取
主工艺	较复杂,技术难度大	复杂
纺丝速度	快	慢
流程	短	长
回收方式	直接回收	间接回收
回收系统	密闭要求高,运行效率要求高	庞大,复杂
代表产品	帝斯曼(DSM), Dyneema	霍尼韦尔(Honeywell), Spectra

采用的溶剂和后续工艺是这两种工艺路线的最大区别^[14-15],由于两类溶剂特性区别大,从而后续溶剂脱除工艺也完全不同,各有优势。

干法路线:以荷兰帝斯曼(DSM)公司为代表,使用高挥发性的十氢萘作溶剂,形成稀溶液或悬浮液(质量分数<10%),通过喷丝板挤出长丝后经烟道冷却,溶剂十氢萘被气化,得到干态的凝胶原丝,再经过高倍拉伸得到 UHMWPE 纤维。该方法不仅溶剂十氢萘对聚乙烯溶解效果好、易挥发,而且纺丝过程不需要连续的多级萃取和热空气干燥过程,生产效率高,操作条件温和,溶剂十氢萘能直接回收,易达到环保要求。

湿法路线:以美国霍尼韦尔(Honeywell)公司为代表,将 UHMWPE 树脂先在矿物油类低挥发性溶剂中溶解或溶胀,再通过双螺杆挤出机混炼、脱泡,然后经计量泵挤出,进入水浴(或水与乙二醇等混合浴)凝固得到含低挥发性溶剂的湿态凝胶原丝,再利用高挥发性的萃取剂连续多级萃取,置换出原丝中的低挥发性溶剂,得到的干态凝胶原丝经过高倍拉伸从而制得高性能 UHMWPE 纤维。该路线过程需要收集萃取剂、溶剂和水等混合物,通过精馏装置分离回收。溶剂矿物油一般采用高沸点的白油、石蜡油、煤油等,溶剂来源多、价格低。萃取剂采用低沸点物,如氟利昂、二甲苯、汽油、丙酮、三氯三氟乙烷等。该工艺存在耗用大量的萃取剂,经历多道的萃取、干燥及大量混合试剂的精馏分离过程,耗能多,流程较长,成本较高。而且目前挥发性和萃取性最好的萃取剂是氟里昂,不符合环保要求,发展受限。

两种路线相比较,干法路线除了纺丝速度可远远高于湿法路线,纺丝流程相对简单,过程较为稳定外,还具有产品强力高、抗蠕变性能好、产品中溶剂含量少等优点,产品多用于高端产品,也因此干法冻胶纺丝工艺成为 UHMWPE 纤维主要的生产技术。

国内以石蜡油为溶剂的湿法路线目前较为成熟,而且国际上有关石蜡油为溶剂的工艺专利已过期,以十氢萘为溶剂的工艺仍涉及到侵权问题。而以石蜡油为溶剂的工艺又有工艺实施方式和设备配置的区分,因此设备投资差距也较大。

常熟绣珀纤维有限公司将凝胶原丝依次经萃取、干燥及热拉伸过程,生产的 UHMWPE 纤维纤度低,抗断裂强度高,生产成本低,于 2010 年获得国家专利^[16]。

东华大学^[17]开发了高浓度原液纺丝技术,将聚乙烯原料和溶剂与抗氧剂混合加热形成凝胶块,经粉碎、去溶剂得到聚乙烯的纺丝原料,再经过螺杆熔融后挤出纺丝,预拉伸卷绕,再通过萃取、干燥和热超倍拉伸工艺制得 UHMWPE 纤维产品,并建成了单线年产 250 t 的生产线。该工艺不仅对纺丝过程严重降低相对分子质量和螺杆效率低的问题得到改善,又弥补了现有技术毒性与污染大和生产成本高的不足。

宁波大成新材料科技有限公司(以下简称宁波大成)发明了混合溶剂的凝胶纺丝技术,以分子质量高达 400 万以上的聚乙烯为原料,制备高浓度纺丝原液,采用双螺杆挤压均化技术,多辊多组超倍牵伸技术,确保了 UHMWPE 纤维拉伸倍数超过 45 倍、直径偏差率低于 5%。宁波大成的 UHMWPE 纤维制成的防弹衣指标已达到国际先进水平。

2009 年 11 月,仪征化纤、南化集团及中国纺织科学研究院联合开发了产能 300 t/a 的 UHMWPE 纤维的干法纺丝成套技术,填补了国内 UHMWPE 纤维干法生产工艺的空白。但与荷兰 DSM 公司等世界先进的 UHMWPE 纤维厂商技术比较,我国的干法纺丝技术和产品质量还存在一定差距,表现在单线产能、产品强度和均匀性等方面有待改进。

3 国内外产能状况

UHMWPE 纤维全球产能分布高度集中,世界上

工业化生产 UHMWPE 纤维的企业主要是荷兰的 DSM、美国 Honeywell 和日本 Toyobo 三大公司^[18-19]。随着我国自主知识产权的取得,如今我国的 UHMWPE 纤维生产技术也得到快速提升。2011 年,全世界的 UHMWPE 纤维总产能 29 200 t/a,其中荷兰的 DSM 与美国 Honeywell 公司占 42%;中国的产能近 17 000 t/a,占总产能的 58%。目前,世界 UHMWPE 纤维总生产能力为 34 800 t/a 左右,其中荷兰生产能力约为 6 000 t/a,美国生产能力约为 3 000 t/a,日本生产能力约为 3 200 t/a,中国的生产能力约为 21 600 t/a,已经占世界 UHMWPE 纤维总产能的 62%。

3.1 国外产能

1979 年荷兰 DSM 公司取得凝胶纺丝方法制取商品名为“Dyneema”的 UHMWPE 纤维的成功,申请专利后,在荷兰 Heerlern 地区建成 UHMWPE 纤维的 5 条生产线和 1 条单向预浸料 UD 生产线,成为世界上首家工业化规模生产 UHMWPE 纤维的企业^[20]。2004 年 5 月,该公司在美国北卡罗莱纳州的格林维尔(Greenville)新建 1 条 Dyneema 纤维生产线及 2 条 UD 防弹材料生产线^[21],纤维生产能力扩大 40%,达到 4 500 t/a,UD 材料生产能力翻了一番,达 2 000 t/a。2006 年 4 月,DSM 公司第 3 次扩产 Dyneema 纤维生产线,该公司生产线总数达到 9 条,其中 4 条位于 Greenville,DSM 在全球 Dyneema 纤维生产量提高了 18%,达 4 700 t/a,UD 材料生产量提

高 25%,达 2 500 t/a。2006 年 9 月,DSM 公司再次投资 Greenville 工厂,2008 年投产,目前该公司 Dyneema 纤维生产线总数达到 10 条^[22],成为世界上生产迪尼玛(Dyneema)品牌 UHMWPE 纤维的最大厂商,产能达到 6 000 t/a。

美国霍尼威尔(Honeywell)公司购买 DSM 公司专利后^[23],经过技术改进,在新泽西州莫里斯建立 590 t/a 品名“Spectra”的 UHMWPE 纤维生产线,产品特色是模量极高。随后又在弗吉尼亚扩能,到 2009 年,Honeywell 公司的 UHMWPE 纤维生产能力为 1 000 t/a,2010 年达到 3 000 t/a。

1984 年,日本东洋纺公司(Toyobo)与 DSM 公司合资建成 600 t/a 商品名为“Dyneema SK-60”的 UHMWPE 纤维中试装置^[24-26]。2008 年 1 月,该公司将 UHMWPE 纤维的生产能力扩大至 1 600 t/a,由于市场需求仍持续强劲增长,产品供不应求。2008 年 7 月再次扩产,在日本福井市的工厂内又新增 2 条 Dyneema 纤维生产线,2010 年正式投产,使合资公司的 Dyneema 总产能翻番,达到 3 200 t/a。日本另外 2 家 UHMWPE 纤维生产企业产能情况分别为三井石化(Mitsui)企业商品名“Tekmilon”的 UHMWPE 纤维约为 2 500 t/a,帝人(TEIJIN)企业商品名“Endumax”的 UHMWPE 纤维约 1 000 t/a。

目前,国外 UHMWPE 纤维总生产能力约为 12 200 t/a,主要企业部分商品情况如表 3 所示。

表 3 国外 UHMWPE 纤维主要生产企业部分商品情况
Tab.3 Polyethylene fiber main production enterprise part of the goods

厂 商	商品牌号	物理性能			合计	生产 路线	产品去向	备 注
		拉伸强 度/GPa	拉伸模 量/GPa	断裂伸 长率/%				
荷兰 DSM	Dyneema SK-66	3.0	95	3.7	12.2	干法	美国、西欧	荷兰海伦 5 条 Dyneema 线,美国北卡罗莱纳州 Greenville 4 条 Dyneema 线和 1 条 Dyneema Purity 线。
	Dyneema SK-77	3.7	132	3.8				
美国 Honeywell	Spectra 1000	3.0	116	2.9		湿法	美国国内	美国新泽西州莫里斯 1 条 590 t/a 线,其余产能在弗吉尼亚。
	Spectra 2000	3.0	119	2.9				
日本 Toyobo	Dyneema SK-60	-	-	-	3 200	干法	日本国内	日本滋贺县大津市 1 条 500 t/a 线,福井县敦贺市 4 条线(最大 800 t/a 条)。

3.2 国内产能

由于国外的技术垄断,国内研发进程缓慢。1985 年,东华大学率先研究 UHMWPE 纤维^[27]。1999 年突破关键性技术,年底与湖南中泰特种装备有限公司建成 1 条 100 t/a 生产线,2000 年扩产为 200 t/a,2010 年又扩产为 5 000 t/a。近年来得到突

飞猛进发展,2006 年国内总产量约为 1 000 t,2008 年国内总产量约为 4 200 t(产能约 6 000 t)。2010 年据不完全统计,我国 UHMWPE 纤维生产厂家已发展至 20 家左右,总生产能力达到 17 000 t/a。目前国内 UHMWPE 纤维生产企业发展至 30 余家^[28],总产能约为 21 600 t/a。生产主要有山东爱地高分

子材料有限公司(以下简称山东爱地)、上海斯瑞聚合体科技有限公司、仪征化纤、湖南中泰特种装备有限公司、宁波大成等^[29-30]。宁波大成是我国最早采用湿法路线生产 UHMWPE 纤维的企业,生产能力约为 1 800 t/a;山东爱地截至目前已经建成 8 条 UHMWPE 纤维生产线,总产能达到 5 000 t/a,仅次于荷兰 DSM 公司,为世界第二大 UHMWPE 纤维生产企业。目前,我国 UHMWPE 纤维厂商情况如表 4 所示。

表 4 2015 年国内主要的 UHMWPE 纤维厂商产能估计

Tab. 4 Major domestic UHMWPE fiber manufacturer capacity estimation in 2015

厂 商	产能/(t/a)	产量/(t/a)	生产路线	备 注
北京同益中	—	800	湿法	北京工厂以 800D 以下细旦为主,无锡工厂以粗旦为主
湖南中泰	2 000	800	湿法	2000 年,填补我国连续式宽幅 UD 材料空白;2010 年扩产至 5 000 t/a
宁波大成	1 800	1 200	湿法	—
山东爱地	5 000	800	湿法	8 条生产线,未满足负荷生产
上海斯瑞	3 000	600	—	以防弹材料为主,未满足负荷生产
石化仪征	1 000	600	干法	2011 年 1 000 t/a 干法线投产,另 2 000 t/a 项目在建
北京威亚	—	300	湿法	—
南化集团	3 000	—	干法	—
青岛信泰	600	—	—	—
浙江翔盛	800	500	—	手套用纤维为主
剑乔科技江苏	3 200	—	—	10 条生产线
山东翔宇	—	300	—	—
常熟秀珀	—	300	—	—
连云港奥神	—	300	—	—
淮安高鸿	—	100	—	—
宁波荣溢	2 000	—	湿法	—
湖州高盛	600	—	湿法	—
浙江金昊	600	300	湿法	—
其它	—	1 200	—	—
合计	23 600	8 100	—	—

我国 UHMWPE 纤维除了生产能力上的进步,生产技术上也在不断突破。中国石化仪征化纤、南化集团与中国纺织科学研究院联合开发的 300 t/a UHMWPE 纤维干法纺丝工业化成套技术,填补了我国干法纺的技术空白,产品质量已接近荷兰 DSM 公司 SK75 产品的水平。据称未来将建成 3 000 t/a 的碳纳米管增强的 UHMWPE 纤维,在一定程度上改进了原纤维的耐热性、抗蠕变性和界面性能。

尽管我国 UHMWPE 纤维生产技术与产能逐年提升,但与国外发达国家生产企业仍存在一定差距,国内外 UHMWPE 纤维生产企业特点对比如表 5 所示。

国内产能在 1 000 t/a 以下的企业居多,30 多家生产企业中年产千吨级企业仅为 8 家,国内总产能 23 600 t/a,但年产量不足 10 000 t/a。

然而,国内近年来 UHMWPE 纤维需求量却持续增长。2006 年、2010 年、2013 年的需求依次约为 8 000 t、15 000 t、18 000 t,2015 年预计达 20 000 t。未来 10 年,UHMWPE 纤维的年需求量将达 60 000 t 左右,市场缺口巨大。显然,国内生产供不应求,国内需要的高端产品依然需要依赖进口。

4 结 语

UHMWPE 纤维是我国唯一具有国际竞争力的高性能纤维,加大国产化工艺技术开发和研究,对打破国外对我国相关产业的技术垄断,以及对促进和引导我国纺织工业结构调整,提高产品附加值有着重要意义。关于应用,国内在安全防护和绳索领域的应用技术相对较为成熟,随着 UHMWPE 纤维复合材料应用技术的提升,应加大在量大面广的民用领域的应用研发投入,提高产品质量,促进国内市场的消化能力,避免低价竞争。

表 5 国内外 UHMWPE 纤维生产企业特点对比

Tab.5 Characteristics of UHMWPE fibre production enterprises at home and abroad

生产企业特点	
国外	生产高度集中:专利保护,扩产只限原有企业,利于国家支持及企业良性发展,避免无序竞争。 技术实力雄厚:均是跨国大公司,重视研发,近 10 年产品强度提高 50%,产品应用开发进步很大,防弹防割产品国内外档次差异明显。
国内	发展迅猛,有些盲目:2007 年前,仅 3 家企业,产能 1 000,2007 年后,近 30 家企业,产能近 21 000 t/a;个别企业盲目上马,因质量低、竞争大导致停产。 质量提升快,参差不齐:2008 年后,产品性能接近 DSMSK75 水平;投资企业分散,生产实力和管理水平差异大,质量差异大,不稳定,竞争力低。 产能较低,开工不足:满负荷生产企业少,产 1 000 以上企业少,小企业众多,市场混乱;从 2012 年产能和实际市场投放量看,实际开工率不足 60%,产能浪费大。 应用开发水平较低,投入不足:小企业没能力进行应用开发,应用也是局限于绳缆、防割、防弹领域;需根据应用领域对专用料细分开发,针对性提高性能。

参考文献:

[1] 王磊,闵明华,石建高,等. UHMWPE 纤维研发与生产现状[J]. 材料科学,2013,3(5):4-15.
WANG Lei, MIN Minghua, SHI Jiangao, et al. Research progress and production status of itra-high molecular weight polyethylene fiber[J]. Meterial Sciences, 2013, 3(5):4-15. (in Chinese)

[2] 任意. 超高分子量聚乙烯纤维性能及应用概述[J]. 广州化工,2010,38(8):87-88.
REN Yi. The properties and applications of ultra-high molecular weight polyethylene fibre [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2010, 38(8):87-88. (in Chinese)

[3] 张艳. 超高分子量聚乙烯纤维在防弹和防刺材料方面的应用 [J]. 产业用纺织品,2010(10):32-39.
ZHANG Yan. The application of ultra high molecular weight polyethylene fiber on bulletproof and stab-resistant materials[J]. Industrial Textiles, 2010(10): 32-39. (in Chinese)

[4] 张灿灿. 高强高模聚乙烯纤维在建筑墙体上的应用分析[J]. 山东纺织经济,2010(8):43- 45.
ZHANG Cancan. High strength and high modulus polyethylene fiber applications in the construction of the wall[J]. Shandong Textile Economy, 2010 (8): 43- 45. (in Chinese)

[5] 张洪亭. 高强高模聚乙烯纤维在墙体上的应用研究 [J]. 上海纺织科技,2011,39(9):40- 42.
ZHANG Hongting. Application of high strength and high modulus polyethylene fiber in wall construction [J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2011, 39(9): 40- 42. (in Chinese)

[6] 亓秀斌,方刚. 浅析高性能聚乙烯纤维及其复合材料发展与应用[J]. 硅谷,2011(5):153.
OI Xiubin, FANG Gang. Shallow of high-performance polyethylene fiber and its composite materials development and application [J]. Silicon Valley, 2011 (5): 153. (in Chinese)

[7] 赵保方. 我国超高分子量聚乙烯纤维的检测手段及发展现状[J]. 北京服装学院学报,2013,33(2):7-11.
ZHAO Baofang. Testing method and development of ultra high molecular weight polyethylene fiber in China [J]. Journal of Beijing Institute of Fashion Technology, 2013, 33(2):7-11. (in Chinese)

[8] 达巍峰. 超高分子量聚乙烯纤维产业现状与发展[J]. 新材料产业,2011(9):17-20.
DA Weifeng. Ultra-high molecular weight polyethylene fiber industry present situation and the development[J]. Advanced Materials Industry, 2011 (9): 17-20. (in Chinese)

[9] 花银祥. 高强高模聚乙烯纤维(UHMWPE)综述[J]. 轻纺工业与技术,2013(5):92-95.
HUA Yinxiang. With high strength and high modulus polyethylene fibers were reviewed [J]. Textile Industry and Technology, 2013(5):92-95. (in Chinese)

[10] 董建东. 超高分子量聚乙烯纤维制造及应用探讨[J]. 玻璃钢,2014(1):1- 6.
DONG Jiandong. Ultra-high molecular weight polyethylene fiber manufacturing and application[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(1): 1- 6. (in Chinese)

[11] 大田康雄. 超高强度聚乙烯纤维 Dyneema[J]. 国外化纤技术,2011,40(12):43- 47.
DATIAN Kangxiong. Ultra high strength polyethylene fibers Dyneema[J]. Chemical Fiber Technology Abroad, 2011, 40(12):43- 47. (in Chinese)

[12] 尹文梅,黄安平,贾军纪,等. 超高相对分子量聚乙烯纤维的生产应用现状[J]. 合成纤维,2013,42(4):7-10.
YIN Wenmei, HUANG Anping, JIA Junji, et al. Present situation of production and application of UHMWPE fiber

- [J]. Synthetic Fiber in China, 2013, 42 (4): 7-10. (in Chinese)
- [13] 汪家铭. 高强高模聚乙烯纤维发展概况与应用前景[J]. 济南纺织化纤科技, 2009(2): 25-33.
WANG Jiaming. With high strength and high modulus polyethylene fiber development situation and application prospect[J]. Jinan Textile Science and Technology, 2009 (2): 25-33. (in Chinese)
- [14] 郝杰. 攻克世界最强纤维我国高性能聚乙烯纤维成套技术达到世界水平[J]. 纺织服装周刊, 2013(40): 28-29.
HAO Jie. To conquer the world's strongest fiber high-performance polyethylene fiber technology reach the world level in our country[J]. Textile and Apparel Magazine, 2013(40): 28-29. (in Chinese)
- [15] 余黎明. 我国超高分子量聚乙烯行业发展现状及前景[J]. 化学工业, 2012, 30(9): 1-5.
YU Liming. Development status and prospect of UHMWPE industry in China[J]. Chemical, 2012, 30(9): 1-5. (in Chinese)
- [16] 许海霞, 胡盼盼, 刘兆峰. 一种超高分子量聚乙烯纤维的制备方法[P]. 中国专利: CN201010124405. 8, 2010-07-07.
- [17] 陈成泗. 超高分子量聚乙烯纤维及其复合材料的现状和发展[J]. 国外塑料, 2008, 26(2): 56-60.
CHENG Chensi. Ultra-high molecular weight polyethylene fibers and its status quo and development of composite materials[J]. Foreign Plastic, 2008, 26(2): 56-60. (in Chinese)
- [18] 汤明, 马海霞. 超高相对分子质量聚乙烯开发和应用进展[J]. 石化技术, 2012, 19(4): 51-56.
TANG Ming, MA Haixia. The development of application in ultra high molecular weight polyethylene[J]. Petrochemical Technology, 2012, 19(4): 51-56. (in Chinese)
- [19] 于春江, 王健, 刘志刚. 高强高模聚乙烯纤维的技术进展及应用[J]. 合成纤维工业, 2012, 35(6): 47-49.
YU Chunjiang, WANG Jian, LIU Zhigang. Technological progress and application of high-strength high-modulus polyethylene fiber[J]. Synthetic Fiber Industry, 2012, 35(6): 47-49. (in Chinese)
- [20] 顾超英, 赵永霞. 国内外超高分子量聚乙烯纤维的生产与应用[J]. 纺织导报, 2010(4): 52-55.
GU Chaoying. The production and application of ultra-high molecular weight polyethylene fiber at home and abroad[J]. China Textile Herald, 2010(4): 52-55. (in Chinese)
- [21] 付廷明, 来庆发. 超高分子量聚乙烯纤维的发展与应用现状浅析[J]. 硅谷, 2011(5): 184.
FU Tingming, LAI Qingfa. The development and application of ultra-high molecular weight polyethylene fiber current situation analyses[J]. Silicon Valley, 2011(5): 184. (in Chinese)
- [22] 钱伯章. 超高强度聚乙烯纤维的开发应用进展[J]. 国外塑料, 2010, 28(4): 62-64.
QIAN Bozhang. The development and application of ultra-high strength polyethylene fibers are reviewed[J]. Foreign Plastic, 2010, 28(4): 62-64. (in Chinese)
- [23] 肖长发. 超高相对分子质量聚乙烯纤维[J]. 高分子通报, 2004(4): 11.
XIAO Changfa. Ultra-high molecular weight polyethylene fiber[J]. Polymer Bulletin, 2004(4): 11. (in Chinese)
- [24] 章倩. 高强度聚乙烯纤维全球市场趋势[J]. 国际纺织导报, 2010(6): 8.
ZHANG Qian. High strength polyethylene fiber global market trends[J]. International Textile Guides, 2010(6): 8. (in Chinese)
- [25] 郭益理. 高强聚乙烯纤维及其应用展望[J]. 非织造布, 2010, 18(5): 34-36.
GUO Yili. High tenacity polyethylene fiber and its application expectation[J]. Nonwoven Fabric, 2010, 18(5): 34-36. (in Chinese)
- [26] 杨正国. 国内外超高分子量聚乙烯纤维产业化及开发应用进展[J]. 合成技术及应用, 2014, 29(1): 34-37.
YANG Zhengguo. Ultra-high molecular weight polyethylene fiber industrialization and the development and application at home and abroad are reviewed[J]. Synthesis Technology and Application, 2014, 29(1): 34-37. (in Chinese)
- [27] 宋长华, 肖慧敏, 徐家凯, 等. 国内超高分子量聚乙烯纤维生产现状及市场分析[J]. 弹性体, 2014, 24(4): 87-92.
SONG Changhua, XIAO Huimin, XU Jiakai, et al. Ultra-high molecular weight polyethylene fiber domestic production situation and market analysis[J]. Elastomer, 2014, 24(4): 87-92. (in Chinese)
- [28] 钱伯章. 国内外超高强度聚乙烯纤维研发和生产现状[J]. 橡塑资源利用, 2011(4): 34-38.
QIAN Bozhang. Ultra high strength polyethylene fiber research and development and production status at home and abroad[J]. Xiangsu Resource Utilization, 2011(4): 34-38. (in Chinese)
- [29] 汪家铭. 超高分子量聚乙烯纤维产业现状与市场前景[J]. 乙醛醋酸化工, 2014(12): 19-24.
WANG Jiaming. Ultra-high molecular weight polyethylene fiber industry status and market prospect[J]. Acetaldehyde Acetate Chemical, 2014(12): 19-24. (in Chinese)
- [30] 洪桂香. 超高相对分子质量聚乙烯纤维市场现状与展望[J]. 化学工业, 2015, 33(Z1): 62-65.
HONG Guixiang. Ultra-high molecular weight polyethylene fiber market present situation and prospect[J]. Chemical, 2015, 33(Z1): 62-65. (in Chinese)