



超高分子量聚乙烯纤维的表面改性

赵晓琳¹⁾ 杜建华²⁾ 杨宏伟²⁾ 贾成厂^{1)*} 吕莹莹¹⁾

1)(北京科技大学材料科学与工程学院,北京 100083)

2)(装甲兵工程学院科研部,北京 100072)

摘要: 超高分子量聚乙烯纤维(UHMWPE)是一种新型高性能纤维,但是由于纤维高取向度、表面惰性,造成纤维与树脂之间的界面粘结强度低,限制了纤维的应用。因此,必须对纤维表面进行改性。本文详细介绍了超高分子量聚乙烯纤维表面改性常用的几种方法。有化学试剂处理、等离子体处理、电晕放电处理、辐射引发表面接枝处理、化学交联处理等。由于方法单独使用均存在不足之处,所以最好是几种方法联合使用,各取所长,取利避害,以提高纤维及其复合产物的综合性能。

关键词: 关键字:超高分子量聚乙烯纤维;表面改性;粘结强度

Study on adhesive property of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Fiber

Zhao Xiaolin¹⁾, Du Jianhua²⁾, Yang Hongwei²⁾, Jia Chengchang¹⁾, Lv Yingying¹⁾

1)(School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

2)(Department of Science Research, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fiber is a new kind of high performance fibers. However, due to its high fiber orientation degree, inert surface, the low adhesive strength of fiber-matrix interface, the application of the fiber is restricted. Therefore, surface of fiber must be modified. The main methods of surface modification of ultra-high molecular weight polyethylene fiber are introduced.

Key words: UHMWPE fiber; Surface modification; Adhesive strength

由于纤维及其复合材料的优异性能,从其诞生之日起,就进行了广泛研究(力学性能、微观形貌、模拟等领域),并且其应用也日渐成熟。继对传统的碳纤维及芳纶纤维进行深入研究之后,人们又对另一种高强度、高模量的高性能纤维产生了浓厚的兴趣,这种纤维称为超高分子量聚乙烯纤维,又称高强高模聚乙烯纤维或者直链聚乙烯纤维,英文全称 Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Fiber(简称 UHMWPE)。该纤维在上个世纪 70 年代被荷兰 DSM 公司研制成功^[1-2],并且在 80 年代进入了产业化生产^[3]。该纤维是由分子量在 100~600 万的聚乙烯粉、抗氧剂等原料,通过冻胶纺丝和超拉伸等

技术,拉丝纺制而成。纤维原料简单易得,制备工艺简单,生产成本低,并且生产过程中产生的产品都可以进行回收,对环境无污染^[4]。

上述三种新型高能纤维中^[5]:碳纤维是有机高性能纤维,由有机高分子聚合物前驱碳化制成;芳纶纤维是有机高聚物高性能纤维,并且分子链是刚性链;而 UHMWPE 纤维是具有伸直长链的高性能纤维。正是由于 UHMWPE 纤维具有特殊的结构组成,才赋予不同于其他两种纤维的特殊性能^[6-8]:低密度,密度仅有 0.97 g/m³,只有芳纶纤维的三分之一,高模碳纤维的二分之一;高比强度和比模量,比强度一般在 24 cN/dtex 以上,是芳纶纤维的 1.9 倍、

* 通信作者:贾成厂(1949-),男,博士,教授,博士生导师。E-mail:jcc@ustb.edu.cn

收稿日期:2014-11-06

碳纤维的 1.8 倍、钢的 15 倍;优异的抗化学腐蚀性能和抗湿性,在水等多种其他介质中稳定性良好;良好的耐磨性和弯曲性能,用 UHMWPE 纤维制成的绳子的断裂循环数是 Kevlar 纤维的 8 倍,并且纤维具有可编制性;优异的能量吸收特性,能量吸收能力是 Kevlar 纤维的 2.6 倍、E 玻璃纤维的 3 倍、碳纤维的 1.8 倍;耐光性能,暴晒 37 天,无强度损失;优越的电性能和声性能,对雷达波反射率很小,声音传播速度快,轴向是横向的 5~6 倍;抗低温性能,即使在 -150 °C 时也不发生脆化;生物性能,制造人造器官。由于 UHMWPE 纤维独特的性能,使得其广泛应用于医用材料、水上用品、航空、航天和军事工业等领域^[9]。

1 超高分子量聚乙烯纤维表面改性

由于 UHMWPE 纤维分子链呈线性结构,具有高取向度、高结晶度,并且分子链由惰性的亚甲基基团组成,表面缺乏苯环等活性基团,造成表面光滑、表面能低,不易被树脂浸润,与树脂基体的粘接性很差(例如,未处理的 UHMWPE 纤维与环氧的单丝拉拔强度只有 0.5 MPa^[10]),从而影响其复合材料的力学性能,限制 UHMWPE 纤维复合材料在结构材料方面的推广与应用^[11]。因此,为了提高纤维与树脂的粘结性能,各国学者采用了各种方法对 UHMWPE 纤维进行表面改性。主要的改性方法有:化学试剂处理、等离子体处理、电晕放电处理、辐射引发表面接枝处理、化学交联处理法等^[7,9,12-15]。下面对这几种方法作简要介绍。

1.1 化学试剂处理

化学试剂处理由于简单易行,而被广泛研究。其根本目的就是消除或弱化 UHMWPE 纤维表面的在生产过程中形成的较弱的界面层,并且本身分子呈惰性。化学试剂处理就是用强氧化剂本身的氧化作用破坏纤维的界面层并且在纤维表面产生化学刻蚀,使得纤维表面变得凹凸不平,粗糙度提高,从而提高了纤维表面的比表面积,增加其与树脂的接触面积,也有利用与树脂发生机械啮合;同时,化学试剂的另一个作用,就是在纤维表面引入活性基团,例如 C-O, COH, COOH 等含氧官能团^[14],改善纤维的润湿性^[16]。并且有利于与树脂发生化学键结合,这些作用都有助于提高其与树脂的粘结性能。化学试剂处理的影响原因有:配比、时间、温度等,如果处理

不当,则可能大幅度降低纤维强度。常用的化学试剂有:氯磺酸、铬酸溶液、重铬酸钾溶液、高锰酸钾溶液、王水和双氧水等强氧化剂^[17]。其中,处理效果较好的是铬酸。化学试剂处理虽然能有效改善粘结性能,但是造成纤维强度下降,并且存在氧化程度难以控制,污染严重,操作复杂等缺陷,难以实现工业化生产^[5]。

Hsieh 等^[18]采用 CrO₃ 和 K₂Cr₂O₇ 两种试剂处理 UHMWPE 纤维,并且分别在碱性环境和酸性环境中使用,结果发现:在碱性的情况下,纤维性能没有很大变化,纤维浸润性没有增加;在酸性的情况下,最佳处理条件时间为 1 min,温度为 25 °C,纤维的拉伸性能不会下降并且浸润性明显提高。

Silverstein 等^[19]用各种试剂处理 UHMWPE 纤维,发现铬酸的处理效果最好,对纤维表层进行刻蚀,增加粗糙度,并且生成含氧活性基团,从而提高纤维与树脂的粘结性。

吴越等^[20]用浓 HNO₃、KMnO₄ 溶液、铬酸等处理 UHMWPE 纤维,得出铬酸的效果最好,纤维复合材料的 ILSS 随处理时间增大,纤维的润湿性也随时间提高,当处理时间超过 8 d 时,均趋于稳定状态,不再变化。

金军等^[21]采用超声下铬酸溶液处理 UHMWPE 纤维表面,在处理温度 60 °C 时得到的纤维粘结强度是未处理纤维的 2 倍以上,并且研究了不同参数(温度、频率、时间等)下处理对纤维性能的影响,结果表明:温度的影响最大,时间次之,溶液配比影响较小;温度低于 60 °C 时,对纤维主要起刻蚀作用,没有氧化作用;当处理温度达到 60 °C,纤维同时受刻蚀和氧化作用的影响,表面产生羟基、羰基、羧基等含氧极性基团,粘结性明显提高。

向媛^[22]将 UHMWPE 纤维浸入 H₂SO₄-KMnO₄ 溶液 2 min 后,纤维与水的接触角明显降低了,从 63 ± 4° 变为 42 ± 3°,与环氧的粘结强度从 3.1 ± 0.9 MPa 提高到 7.8 ± 1.2 MPa。经过红外光谱测试检测,发现纤维表面产生了新的官能团羰基,极性基团的产生是提高纤维与树脂粘结强度的主要原因。

1.2 等离子体处理

与其他纤维表面处理方法相比,等离子体处理对纤维的伤害程度较低,深度仅仅为一个或者几个分子距离,因此,处理后纤维的力学性能下降很少,几乎没有影响。等离子体按照处理方式可分为低压

处理(压力小于 130 Pa)和高压处理,低压效果较好并且对纤维的力学性能损伤小,但是需要较高的真空度,工业化生产较难^[9,14]。按照处理的性质,又分为表面生成化合物和表面不形成化合物,而且主要区别在于一个是接枝作用另一个是刻蚀作用。在 O₂、N₂、H₂、Ar、NH₃ 等气体处理时,纤维表面不形成化合物,而在烯丙胺等有机气体或者蒸汽处理时,纤维表面出现了接枝物,起到纤维与树脂的过渡层作用,提高二者的粘结性。按照处理温度,又可分为低温处理和高温处理,低温温度略高于室温,而高温则相当高,低温等离子体是常用方法。

Tissington、Bettge、Moon 等^[23-25]分别采用氧等离子体处理纤维,发现处理后纤维表面出现凹槽,便于其与基体之间产生机械啮合,提高了纤维与乙烯基酯树脂的粘结性,提高其复合材料层间剪切强度,但是其它力学性能基本保持不变,并且复合材料的能量吸收能力降低,甚至纤维本身的拉伸性能下降 40%。

袁超廷、肖干、洪剑寒等^[26-28]也采用氧气作为处理气体,在真空度较高下,采取不同的处理时间、反应功率等处理条件,发现纤维的粘结强度均提高,并且表面由于刻蚀作用而变得粗糙,与环氧树脂的粘结强度从 0.44 MPa,提高到 2.4 MPa,但是纤维的断裂强度降低,断裂伸长率提高。

吴越等^[29-30]将 UHMWPE 纤维在空气等离子体法处理 5 min,接触角最小达 18.2°,得到纤维与环氧树脂复合材料的层间剪切强度(ILSS)从未处理的 5.98 MPa 提高到了 18.1 MPa,提高了 3 倍以上。

王良等^[31]利用常压介质阻挡放电(DBD)等离子体(Ar)对 UHMWPE 纤维表面进行改性,放电间隙为 1 mm,处理 5 min,不同放电电压下(6 500 ~ 8 000 V 范围内),分析测试结果表明:纤维和环氧树脂之间的层间剪切应力增长范围为 14.69% ~ 22.11%,但是断裂应力下降了 5.50% ~ 10.42%,大部分在 7% 左右。SEM 观察得知:纤维表面产生许多凹槽和裂纹,是使纤维与基体之间粘度提高,造成断裂应力降低的主要原因。

1.3 电晕放电处理

电晕放电处理^[15]就是将 UHMWPE 纤维放入 2 ~ 100 kV、2 ~ 10 kHz 的高频高电压中,在该条件下,电晕放电装置的两极出现强烈电场,使得气体介

质发生击穿现象从而产生电晕放电,从而生成等离子体或 O₃,与纤维表面发生反应,纤维表面产生极性官能团(例如羰基等),并且提高了纤维的表面粗糙度,从而使纤维与树脂之间的粘结性加强。缺点是效果保持率不高,难以连续生产,且生产工艺复杂。

Ogawa 等^[32]利用数学方法结合 XPS 和 AFM 技术,研究电晕放电的辐射能能量、纤维表面粗糙度及表面官能团之间的关系,并且对复合材料的 IFSS 做了定量分析。

Andreopoulos 等^[33]采用电晕放电处理纤维,通过润湿角的测量发现:与环氧的接触角仅仅降低 1.98°(处理前是 40.18°,处理后 38.2°),并没有明显改善纤维与树脂的润湿性,说明极性官能团对纤维与树脂的粘结性能的影响较小,而表面粗糙度对电晕放电处理提高纤维粘结性起主要作用。

Gutowski 等^[34-35]发明了一种在不降低 UHMWPE 纤维力学性能的前提下,同时有效提高纤维粘结性的方法,称为“SICOR”。这种方法是将电晕放电处理与偶联剂处理相结合,增加纤维表面的极性官能团的种类和数量,从而改变与基体的润湿性,最终达到提高界面粘结性的目标。

戚东涛等^[36]在处理电压为 15 kV,处理速度为 6 m/s 的条件下,对纤维表面进行了电晕处理,环氧树脂的界面粘结强度提高可达 535%,剪切强度提高了约 43%;电晕处理后,表面粗糙度提高,同时引入了活性极性基团。

1.4 辐射引发表面接枝处理

辐射引发表面接枝处理原理:通过辐射引发单体接枝表面对 UHMWPE 纤维惰性面改性,在纤维表面形成一层活性基团的过渡层,该层起了桥梁作用,将基体与纤维连接,从而提高了纤维与树脂的粘结性。通常辐射源有:X 射线、γ 射线、微波、紫外光、⁶⁰Co 和电子轰击等^[14,37]。常用单体有:马来酸酐、丙烯酸、丙烯酰胺、丙烯酸丁酯、甲基丙烯酸环氧酯、丙烯酸甲酯等丙烯类单体^[14-15]。紫外光辐射特别之处在于首先引发光敏剂(例如二苯甲酮),然后才能引发单体接枝。这种处理方式不能连续生产,对纤维表面处理有限(只对纤维表面较薄层有效果)。

Nguyen 等^[38]将丙烯酸通过紫外光引发接枝 UHMWPE 纤维表面(其中二苯甲酮作光敏剂),通

过测试证明:影响纤维与树脂粘结性的原因,不仅有辐射能量大小,还有纤维本身的结晶状态。辐射能量最佳值在 7×10^3 J,纤维结晶区大则接枝效果下降。

Abdel^[39]使用 γ 射线辐照 UHMWPE 纤维表面,采用聚丙烯腈单体接枝。通过对纤维增强氯丁胶复合材料的机械性能测试,发现改性后的纤维与基体的粘性显著提高。

Kondo 等^[40]采用电子束辐照将乙烯基甲酰胺接枝到 UHMWPE 纤维表面,通过测试得到改性后纤维与橡胶复合材料的剪切强度提高 2 倍,证明改性后纤维与基体的粘结性能改善。

陈自力等^[41]在光敏剂和交联剂下,用紫外光辐照引发对 UHMWPE 纤维交联改性。通过 SEM 观察发现,纤维表面出现细微沟槽,粗糙度提高,与树脂拉拔强度从原来的 0.57 MPa 提高到 0.89 MPa。骆玉祥等^[42]以 UHMWPE 纤维布为处理对象,紫外接枝处理过程中,研究了不同单体、单体浓度、引发剂浓度以及紫外光照时间,对处理后复合材料层间剪切强度的影响。结果表明:在不萃取的情况下,单体浓度、引发剂浓度等因素对处理后复合材料的 ILSS 影响不显著,处理时间正反两面各 2 min 为宜。经萃取处理后,复合材料的 ILSS 仍能进一步提高,最高达 18.85 MPa。接枝单体选用 AM,溶剂选用乙醇时为最佳。黄鑫等^[43]将不同生产阶段的 UHMWPE 纤维进行紫外辐照交联三羟甲基丙烷三丙烯酸酯(TMPTA)改性,首先在正庚烷中浸泡一定时间,浸入交联溶液中,紫外光辐照交联。通过分析得出,正庚烷浸泡最佳时间为 48 h,辐照时间为 6 min,冻胶纤维结构交联效果较好,交联程度随改性剂浓度增加而提高。徐明忠等^[44]选用三聚氰酸三丙烯酸酯(TAC)作为交联剂对 UHMWPE 纤维进行紫外辐照交联,采用红外、SEM 及力学性能测试等对 UHMWPE 纤维结构进行测试与表征。结果表明,浸泡正庚烷的最佳时间为 24 h;辐照最佳时间为 15 h。

吴越等^[45]利用等离子接枝法对 UHMWPE 纤维布进行表面处理,测试结果表明:制品的层间剪切强度随着丙烯酸胺(AM)浓度的增加,逐渐下降;将纤维布在不同单体(丙烯酸胺 AM、丙烯酸 AA、马来酸酐 MAH、甲基丙烯酸环氧脂 GMA)浸泡 5 min,然后等离子体处理 3 min,发现 MAH 效果最好,GMA 效果最差,AA 与 AM 的效果差不多。通过对浓度及单体的优化,使纤维/环氧复合材料剪切强度从 5.93

MPa 提高到 17.5 MPa。

魏寒等^[46]将 UHMWPE 纤维置于丙烯酸甲酯的甲醇溶液用 γ 射线进行辐照接枝反应。并且发现,接枝率随着反应温度、时间、单体浓度、吸收剂量的增加而增加,并且证明不同接枝率下,纤维强度变化不大。红外分析表明 UHMWPE 纤维已经接枝聚甲基丙烯酸甲酯;SEM 照片显示 UHMWPE 纤维表面被 MA 的接枝层所覆盖,纤维表面由光滑变粗糙。

1.5 化学交联处理法

化学交联法就是利用引发剂(如过氧化物)引发单体,使其接枝到纤维表面,从而提高纤维表面的活性基团。采用该方法可以在纤维生产过程中实现,也容易实现工业化连续生产。

Boer 等^[47]将 UHMWPE 纤维冻胶用正己烷萃取,干燥后,在 50 °C 下,将其放入含有过氧化二异丙苯交联剂的正己烷溶液中 6h,常温下干燥,超倍拉伸制得改性纤维。结果表明:改性后的纤维不仅有较高的交联度,还有很大的取向度。

郎彦庆等^[48]采用不同的过氧化物作为引发剂,通过硅烷(KH-570)对 UHMWPE 纤维进行接枝交联改性,经过对纤维的拉伸强度、拉伸模量、断裂伸长率等性能比较:发现硅烷在处理液浓度为 20% 时,叔丁基过氧化氢(TBPO)对纤维的拉伸强度的影响效果最好,过氧化苯甲酰(BPO)的效果最差。在拉伸模量一项中,过氧化苯甲酰(BPO)的处理效果最好,可达到 43.1 GPa,未经处理的纤维只有 30.1 GPa;硅烷用量在 10% ~ 30% 时,处理的效果较好,较稳定。SEM 观察表面出现明显的刻蚀、斑纹和凹槽,纤维的表面粗糙。通过纤维表面和树脂基体的机械互锁、啮合提高界面粘结合能。

张一等^[49]采用不同偶联剂(烷偶联剂 KH-550, KH-560 和钛酸酯偶联剂 NDZ-201)对 UHMWPE 冻胶进行萃取,高倍拉伸值得改性纤维(其中首先在二甲苯中萃取 5 min,在添加 1% 的偶联剂的二甲苯改性液中萃取 2 次 5 min)。通过接触角及粘结强度等测试,结果发现,硅烷偶联剂 KH-550 改性纤维与树脂基体间的 IFSS 最大,其 IFSS 比未改性 UHMWPE 纤维的提高了 87.8%,改性纤维在断裂强度和模量上比未改性纤维分别提高了 6.9% 和 32.6%。

郑逢时等^[50]将 UHMWPE 纤维放入含有硅烷偶联剂 KH-570 的乙醇水溶液中,其中偶联剂质量分数均为 1%,在超声波氛围下混合 10 min 后,放置

24 h,然后放入改性纳米碳酸钙溶液,控制反应温度在 80 ℃,反应 1 h,用无水乙醇洗涤,干燥即得最终的联合改性纤维。结果得到的纤维表面变得粗糙,改性后的 UHMWPE 单纤维与树脂的接触角明显降低,降低幅度达 64%。

杨新革等^[51]采用醋酸乙烯的质量分数分别为 18% 和 28% 的乙烯-醋酸乙烯酯嵌段共聚物(EVA),溶于二甲苯中,质量分数为 1%,超高分子量聚乙烯纤维冻胶先在二甲苯萃取 5 min,然后在表面改性剂溶液中萃取 5 min,三级拉伸(20 倍、40 倍、45 倍)后得到改性纤维。对改性后纤维进行红外、力学、拉拔粘度测试,结果表明:纤维表面产生了极性基团,纤维与树脂基体的粘结性提高,醋酸乙烯含量高的改性效果更明显,EVA 改性后的纤维强度有所降低,但纤维基本保留了原有的高强高模的力学性能。

邝金艳等^[52]利用乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(EVA)作为表面改性剂,将其溶解在二甲苯中制成复合萃取液,对超高相对分子量聚乙烯(UHMWPE)冻胶纤维进行萃取,经干燥和超倍拉伸制得表面改性 UHMWPE 纤维。结果表明:抗断裂强度、模量和断后延长率变化不大,纤维表面引入了极性基团,其中 EVA 质量分数为 2% 时,改性效果最好,其改性纤维与树脂基体间的 IFSS 与未改性纤维相比增幅达到了 45.3%。

边丽娜等^[53]将 UHMWPE 纤维置于 2 mol/L 的三氯化铁溶液中浸渍 24 h,用实验室自制的涂覆机将吡咯单体均匀地涂覆于纤维表面,吡咯单体在纤维表面聚合后得到 PPy-UHMWPE 纤维。然后将微滴直径在 300~700 μm 的环氧树脂滴在纤维上,并对纤维/微滴试样进行拉出实验。测得结果显示:改性后的平均最大拉出力由以前 24.28 mN 提高为 73.82 mN,平均界面剪切强度 1.06 MPa 提高为 3.03 MPa。

1.6 其他处理方法

除了以上常见的几种纤维表面处理方法外,还有溶胀结晶法、激光法、涂层法及压延法等方法,从增加纤维比表面积、纤维表面粗糙度及表面官能团等不同方面改善了纤维与树脂的粘结性能^[12-15]。

2 结束语

目前处理 UHMWPE 纤维表面的方法很多,但

是这些方法单独使用均存在不足之处,例如,操作繁琐、生产工艺不连续,成本偏高、环境污染等缺陷。最主要是存在提高纤维表面粘结性能的同时降低了纤维本身的力学性能。为了更好的保持纤维原有的优良性能,改善纤维表面粘结性,可以采用几种方法联合使用,各取所长,取利避害,提高纤维及其复合产物的综合性能,优化工艺路线,开拓 UHMWPE 纤维及其衍生产品的应用范围。

参考文献

- [1] Meihuizen Cornelis E, Pennings Albertus J, Zwijsenburg Arie, et al. Process for continuous preparation of fibrous polymercrystals. United States Patent, 4137394. 1979-01-30
- [2] Capaccio G, Ward I M. Preparation of ultra-high modulus linear polyethylenes; effect of molecular weight and molecular weight distribution on drawing behaviour and mechanical properties. *Polymer*, 1974, 15(4): 233-238
- [3] 张博. 超高分子量聚乙烯纤维概述. *广州化工*, 2010, 38(4): 28-29
- [4] 栾秀娜, 于俊荣, 刘兆峰. 超高相对分子量聚乙烯纤维及其应用. *高科技纤维与应用*, 2003, 28(3): 23-27
- [5] 毛云增, 蔡正国, 杨曙光, 等. 超高分子量聚乙烯纤维研究进展. *中国材料进展*, 2012, 31(10): 37-42
- [6] 蒲侠, 张兴华, 童速玲, 等. 超高强度高模聚乙烯纤维及其复合材料的研究进展. *合成纤维工业*, 2004, 27(4): 35-38
- [7] 黄玉松, 陈跃如, 邵军, 等. 超高分子量聚乙烯纤维复合材料的研究进展. *工程塑料应用*, 2005, 33(11): 69-73
- [8] 任意. 超高分子量聚乙烯纤维性能及应用概述. *广州化工*, 2010, 38(8): 87-88
- [9] 姜生, 晏雄. 改善超高分子量聚乙烯纤维粘合性能的研究. *玻璃钢/复合材料*, 2004(3): 47-49
- [10] Ladizesky N H, Ward I M. The adhesion behavior of high modulus polyethylene fibers following plasma and chemical treatment. *Material Science*, 1989(18): 533-540
- [11] Ladizesky N H, Ward I M. Study of the adhesion of drawn polyethylene fiber-polymeric resin system. *Journal of Material Science*, 1983, 18: 533-544
- [12] 熊结刚, 晏雄. 超高分子量聚乙烯纤维复合材料界面性质的研究进展. *产业用纺织品*, 2005(4): 35-38
- [13] 田晓伟. UHMWPE 纤维表面改性技术的研究进展. *纤维复合材料*, 2006(4): 60-63
- [14] 景强. 超高分子量聚乙烯纤维的表面处理. *化学工业与工程技术*, 2008, 29(3): 24-27
- [15] 赵英翠, 李金鹰, 高大鹏, 等. 浅谈超高分子量聚乙烯纤维的表面处理. *化工科技*, 2012, 20(5): 64-67
- [16] 吴著. 高聚合物的界面与粘合. 北京: 纺织工业出版社, 1987, 174-177
- [17] 骆玉祥, 胡福增, 郑安响, 等. 超高分子量聚乙烯纤维表面处理.

- 玻璃钢/复合材料,1998(5):9-13
- [18] Hsieh Y, Xu S. Effects of acid oxidation on wetting and adhesion properties of ultra-high modulus and molecular weight polyethylene fibers. *J Adhes Sci Tech*, 1991, 5(12):1023-1039
- [19] Silverstein MS, Breuer O. Relationship between surface properties and adhesion for etched ultra-high-molecular-weight polyethylene fibers. *Composites Science and Technology*, 1993, 48(1-4):151-157
- [20] 吴越, 骆玉祥, 胡福增, 等. 液态氧化法处理超高分子量聚乙烯纤维. *功能高分子学报*, 1999, 12(4):427-430
- [21] 金军, 张慧萍, 晏雄. 高分子量聚乙烯纤维的表面改性研究. *产业用纺织品*, 2010, 28(2):36-40
- [22] 向媛. 简单化学表面处理增强超高相对分子质量聚乙烯-环氧树脂粘接性能. *化学与黏合*, 2009, 31(1):66-69
- [23] Tissington B, Pollard G, Ward I M. A study of the influence of fibre/resin adhesion on the mechanical behaviour of ultra-high-modulus polyethylenefibre composites. *J Mater Sci*, 1991, 26(1):82-92
- [24] Bettge D J, Hinrichsen G. Continuous manufacturing of composites of high-performance polyethylene fibres. *Compos Sci Technol*, 1993, 47(2):131-136
- [25] Moon S I, Jang J. A study of the impact properties of surface-modified UHMPE-fiber/vinylester composites. *Compos Sci Technol*, 1997, 57(2):197-203
- [26] 袁超廷, 高尚林, 牟其伍, 等. 超高分子量聚乙烯纤维的等离子体表面处理. *材料科学进展*, 1992, 6(5):427-434
- [27] 肖干, 牟其伍. 低温等离子体表面处理对 UHMW-PE 复合材料冲击性能的影响. *重庆建筑大学学报*, 2004, 26(6):86-89
- [28] 洪剑寒, 潘志娟. 氧气等离子体处理对超高分子量聚乙烯纤维力学性能的影响. *产业用纺织品*, 2013(2):29-32
- [29] 吴越, 胡福增, 骆玉祥, 等. 空气等离子法处理超高分子量聚乙烯纤维. *功能高分子学报*, 2001, 14(2):190-194
- [30] 王书忠, 吴越, 骆玉祥, 等. 超高分子量聚乙烯纤维的低温等离子体处理. *复合材料学报*, 2003, 20(6):98-103
- [31] 王良, 唐晓亮, 邱高, 等. 常压 DBD 等离子体对高分子纤维材料改性应用. *新技术新工艺*, 2005(6):61-62
- [32] Ogawa T, Mukai H. Effects of functional groups and surface roughness on interfacial shear strength in ultrahigh molecular weight polyethylene fiber/polyethylene system. *J Appl Polym Sci*, 1999, 71(2):243-249
- [33] Andreopoulos A G, Liolios K, Patrikis A. Treated polyethylene fibres as reinforcement for epoxy resins. *J Mater Sci*, 1993, 28(18):5002-5006
- [34] Gutowski W S, Wu D Y, Li S, et al. Surface silanization of polyethylene for enhanced adhesion. *J Adhes*, 1993, 43(1-2):139-155
- [35] Gutowski W S, Wu D Y, Li S, et al. Surface treatment of polymers. United States Patent:5879757, 1999-03-09
- [36] 戚东涛, 陶继志, 王秀云. 电晕处理对超高分子量聚乙烯纤维表面性能的影响. *材料科学与工艺*, 2006, 14(5):535-537
- [37] 张建春, 郭玉海. 电晕辐照技术. 北京:中国纺织出版社, 2003, 10-11
- [38] Nguyen Huy X, Poursartip A, Riahi G, et al. Treatment of ultrahigh molecular weight polyolefm to improve adhesion to a resin. United States Patent:5039549, 1991-08-13
- [39] Abdel E M. Radiation induced UHMWPE chopped fibers as reinforcing filler in polychloriprene. *Polym Adv Techn*, 1997, 8(10):588-590
- [40] Kondo Y, Miyazaki K, Yamaguchi Y, et al. Mechanical properties of fiber reinforced styrene-butadiene rubbers using surface-modified UHMWPE fibers under EB irradiation. *European Polymer Journal*, 2006(42):1009-1013
- [41] 陈自力, 于俊荣, 刘兆峰, 等. 紫外光辐照交联对超高相对分子质量聚乙烯纤维结构和性能的影响. *高分子材料科学与工程*, 2001, 17(3):62-65
- [42] 骆玉祥, 吴越, 胡福增, 等. 超高分子量聚乙烯纤维紫外接枝处理. *复合材料学报*, 2001, 18(4):29-33
- [43] 黄鑫, 王恩召, 张天骄, 等. 紫外辐照交联改性 UHMWPE 纤维的研究. *合成纤维工业*, 2011, 34(2):23-26
- [44] 徐明忠, 赵国樑. UHMWPE 纤维的表面交联改性. *高分子材料科学与工程*, 2012, 28(10):59-62
- [45] 吴越, 张洪生, 薛志云, 等. 等离子接枝处理超高分子量聚乙烯纤维. *功能高分子学报*, 2001, 14(1):76-80
- [46] 魏寒, 邢哲, 王谋华, 等. 超高分子量聚乙烯纤维预辐照接枝丙烯酸甲酯. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2012, 30(6):328-331
- [47] Boer J de, van den Berg H J, Pennings AJ. Crosslinking of Ultra High Molecular Weight Polyethylene in the Oriented State with Dicumylperoxide. *Polymer*, 1984, 25(4):513-519
- [48] 郎彦庆, 王耀先, 程树军. 超高分子量聚乙烯纤维的硅烷交联改性. *合成纤维*, 2004(4):1-3
- [49] 张一, 于俊荣, 黄献聪, 等. 偶联剂改性 UHMWPE 纤维表面性能的研究. *合成纤维工业*, 2009, 32(1):1-3
- [50] 郑逢时, 丛培良, 陈拴发. 偶联剂和改性碳酸钙联合改性 UHMWPE 纤维对砂浆力学性能的研究. *混凝土*, 2013(11):132-135
- [51] 杨新革, 于俊荣, 胡祖明, 等. 超高相对分子质量聚乙烯纤维的表面改性研究. *合成纤维*, 2007(8):9-12
- [52] 邝金艳, 南建举, 于俊荣, 等. 超高相对分子质量聚乙烯纤维的表面改性研究. *高科技纤维与应用*, 2010, 35(5):51-55
- [53] 边丽娜, 肖长发, 金欣. PPy-UHMWPE 纤维结构与性能的研究. *纺织学报*, 2011, 32(3):1-4