



光大证券
EVERBRIGHT SECURITIES

经典五指灵巧手拆机：腱绳材料的选择

——人形机器人专题（四）



作者：光大环保电新 殷中枢、黄帅斌

2024年1月4日



证券研究报告

更多免费行业报告

并购家

www.ipoipo.cn

并购家 免费行业报告网

IPOIPO.CN 每日更新 不用注册会员 无广告 永久免费

- 腱绳驱动的优势及适用场景
- 腱绳材料的选择与案例分析
- 主流腱绳材料分析
- 投资建议
- 风险分析



表1：不同传动方式对比

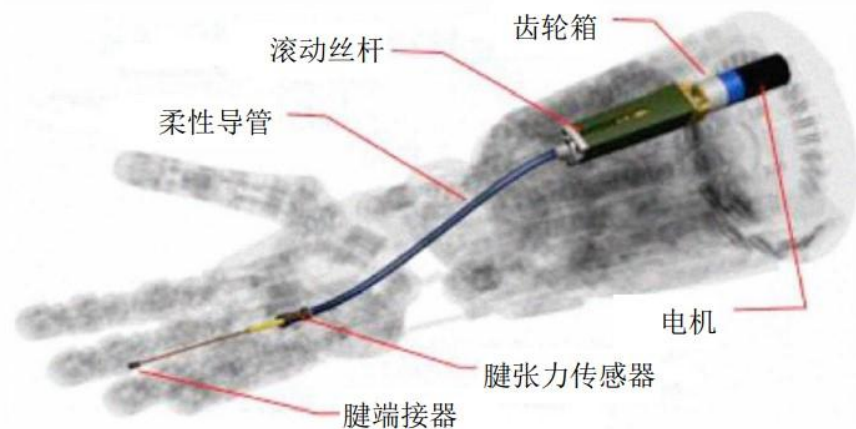
传动方式	特点	缺点
腱传动	由腱（钢丝绳、迪力马绳等）加上滑轮或者软管实现传动。腱一般具有很高的抗拉强度和很轻的重量，容易实现多自由度和远距离动力传输，节省空间和成本，是一种柔顺传动方式。	腱本身的刚度有限，影响位置精度；控制时需要一定的预紧力，容易产生摩擦；腱的布局容易产生力矩和运动的耦合。这些因素都增加了手爪抓取控制的难度和复杂性。
连杆传动	采用平面连杆机构传动，刚度好、出力大、负载能力强、加工制造容易、易获得较高的精度，构件之间的接触可以依靠几何封闭来实现，能够较好实现多种运动规律和运动的轨迹的要求。	结构冗杂，笨重，柔性不足，抗冲击性能较弱，对手内空间配置要求较高。
齿轮/蜗轮蜗杆传动	驱动器通过齿轮或蜗轮蜗杆将旋转变成直线运动，拉动驱动器和手指之间的弹簧来驱动手指产生动作，手指部分采用金属连接，各个手指动作相互独立，具有多种的抓取构形，和别的多指灵巧手相比，驱动更加灵活，但是手指的闭合时间较长。	结构冗杂，笨重，柔性不足，抗冲击性能较弱，对手内空间配置要求较高，手指的结构比较复杂，容易出现故障。
人工肌肉 (液压/气动)	液压驱动和气动的驱动方式是近年来兴起的一种重要的驱动方式，是模拟人肌肉的一种驱动方式。	由于材料和技术的限制，这些“人工肌肉”技术还远远不能满足机器人手爪实现可靠、快速和精确地抓取功能。

按灵巧手手指的传动方式可分为腱绳传动、连杆传动、齿轮传动、人工肌肉（液压/气动）。传动系统的设计不仅决定了灵巧手的机械结构，而且直接影响到灵巧手的抓取稳定性和灵活性。腱传动对于空间狭小、传动精密的灵巧手空间设计较为友好，关键在于腱绳材料的选择；连杆、齿轮等传动方式更为直接，但对空间、设计的要求较高。

资料来源：小米技术微信公众号



图1：Robonaut 2 Hand 腱绳示意图



资料来源：韩如雪《腱驱动空间多指灵巧手感知与控制关键技术研究》

图2：shadow hand使用腱绳驱动



资料来源：Shadow Robot官网

腱绳传动使用腱绳传递动力。一般电机通过齿轮箱驱动滚珠丝杠，通过滚珠丝杠上的螺母把旋转运动转换为直线运动，腱绳形成一个腱环套在螺母上，螺母拉动连接在灵巧手手指指骨上的腱绳，实现手指绕关节轴的转动运动。其中为了引导腱绳的走线，避免腱绳之间的干扰，采用腱绳外包裹导管的形式。



表2：不同传动方式对比

传动方案	原理简图	驱动器数目	腱绳数目	特点
N 型		N	2N	驱动器数目少；需要预紧机构
N+1 型		N+1	N+1	腱绳数目少；单根腱绳负载大
2N 型		2N	2N	承载能力强、动态性能较好；驱动器数目多

腱绳的传动方案对于腱驱动手指动力与运动的传递至关重要。目前，主流的腱绳传动方案有三种：N型、N+1型、2N型。其中，N、N+1、2N分别代表驱动N个独立自由度所需的驱动单元数目。

资料来源：孙成远《腱驱动灵巧手指结构设计及其运动分析与试验》



表3：常用腱绳张力测量方式

名称	机构简图	特点
串联弹性体		测量精度高、传动系统动态性能差、结构体积大、电路易疲劳
包覆弹性体		结构尺寸小、摩擦严重
偏置引导轮		结构尺寸较小、摩擦较小、传动系统动态性能好

为了检测腱绳的受力情况， 腱绳张力传感器必不可少。目前腱绳张力的测量方式主要有三种：串联弹性体、包覆弹性体、偏置引导轮。

- 腱绳驱动的优势及适用场景
- **腱绳材料的选择与案例分析**
- 主流腱绳材料分析
- 投资建议
- 风险分析



Robonaut 2 Hand 于2010年由NASA和GM（通用汽车公司）联合研制。

最初被选为肌腱材料的是Spectra™，因为它具有高强度和良好的耐磨特性。但经过测试，Spectra™固有的蠕变性与 Robonaut 2 Hand 手指致动系统不兼容，进而导致滚珠丝杠致动器的行程有限。

经过广泛测试，研究团队选择 Vectran™ 作为肌腱材料，因为它具有高强度以及抗拉伸和蠕变能力。通过使用 Teflon™ 与 Vectran™ 混合编织，其耐磨性能得到改善。最终方案为：标称直径 1.2 毫米、断裂强度为 181 公斤的肌腱材料，以实现尺寸、强度和磨损寿命之间的最佳平衡。在加入相关润滑剂后，肌腱耐磨性超过100 万次循环。

图3: Utah/MIT 灵巧手



资料来源：Computer History Museum

图4: Robonaut Hand

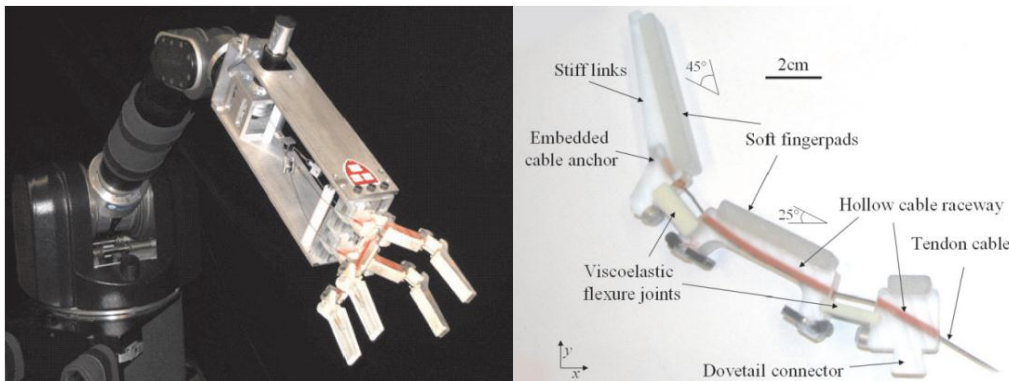


资料来源：孙成远《腱驱动灵巧手指结构设计及其运动分析与试验》

Utah/MIT 灵巧手发明于1982年由美国犹他大学工程设计中心与麻省理工学院人工智能实验室研制，共有32个驱动器、32跟腱绳、32个腱绳张力传感器，其腱绳材料选用Dacron and Kevlar混合制成。



图5: SDM hand



SDM hand问世时间在2010年，由耶鲁大学和哈佛大学共同研制。

肌腱材料选用预拉伸的尼龙涂层不锈钢丝，一端固定在远端连杆上，并穿过低摩擦尼龙 11 管到达底座。

资料来源：Aaron M. Dollar 《The Highly Adaptive SDM Hand: Design and Performance Evaluation》

图6: Yale Hand



Yale Hand于2013年由耶鲁大学研制。在腱绳方面，使用经100磅测试的Spectra纤维。

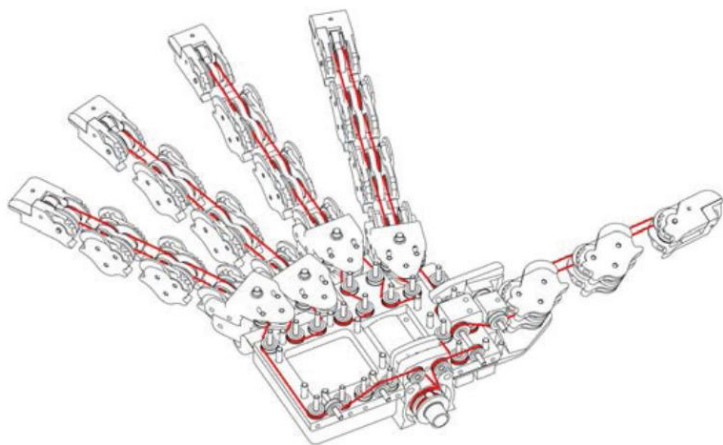
在很大的载荷下，肌腱容易磨损并切断原型材料。为了防止这种情况，将3.18mm的钢腱导销压入指状物中，从而提供更硬的滑动接触，摩擦力显著降低。

资料来源：Raymond R. Ma 《A Modular, Open-Source 3D Printed Underactuated Hand》



Metamorphic hand由King's College London (KCL) 与天津大学于2011年联合研制。
为了简化手的控制，采用了欠驱动策略和肌腱传动。材料方面，选用直径为0.5 mm的Carl Stahl不锈钢丝。

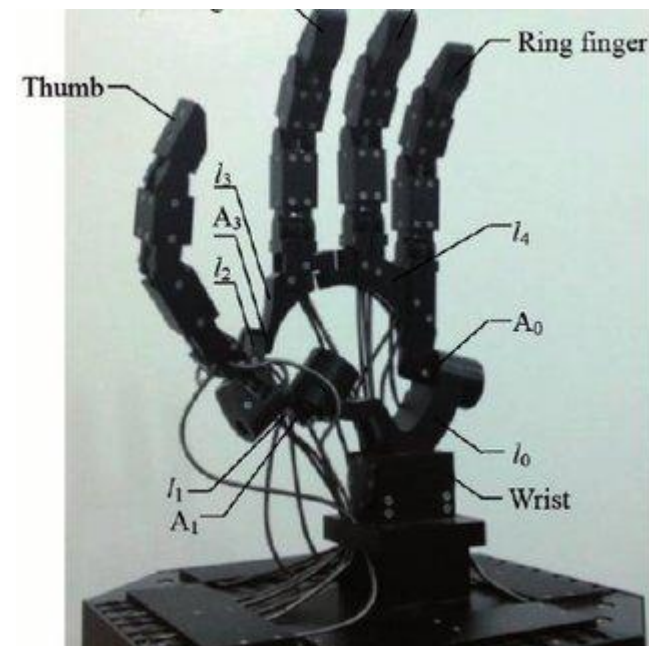
图8: PISA/IIT hand



资料来源: M.G. Catalano 《Adaptive synergies for the design and control of the PisaIIT SoftHand》

请务必参阅正文之后的重要声明

图7: Metamorphic hand

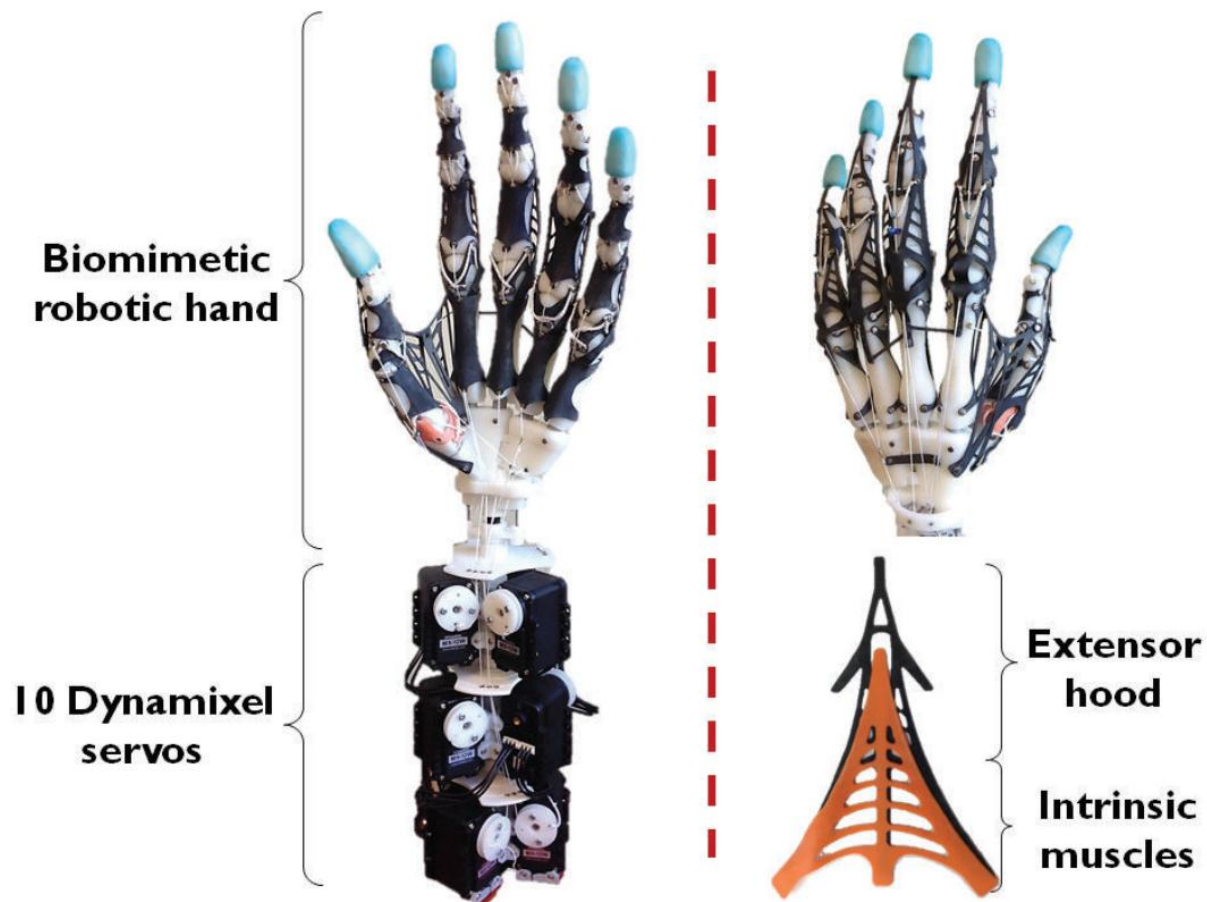


资料来源: GUOWU WEI 《Kinematic Analysis and Prototype of a Metamorphic Anthropomorphic Hand with a Reconfigurable Palm》

PISA/IIT hand于2012年由 Istituto Italiano di Tecnologia (意大利理工学院)、Università di Pisa (比萨大学) 共同发明。

手指的驱动是通过使用被动防脱轨滑轮穿过所有关节的单个Dyneema腱来实现的。肌腱动作使手指和拇指弯曲并内收，抵消韧带的弹力，并实现自适应欠驱动，而无需差速齿轮。

图9: Washington Hand



Washington Hand发明时间为2016年，作者华盛顿大学。
Washington Hand手指骨架充分模仿人体结构。使用钩编带来模拟指骨关节处的掌侧韧带和侧韧带，激光切割橡胶片用于模拟软组织，提供类似人类的顺应性。
肌腱方面，使用三块激光切割橡胶片来模拟弹性滑轮机构。由高强度Spectra®（屈服强度200 N）制成的屈肌腱通过几个铆钉加固端口穿过橡胶腱护套。

资料来源: Zhe Xu 《Design of a highly biomimetic anthropomorphic robotic hand towards artificial limb regeneration》

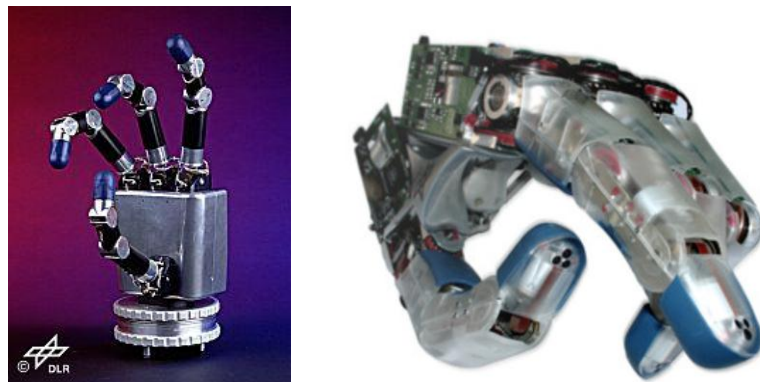


图10: David's Hand



资料来源：德国宇航中心官网

图11: DLR Hand I和DLR Hand II



资料来源：德国宇航中心官网

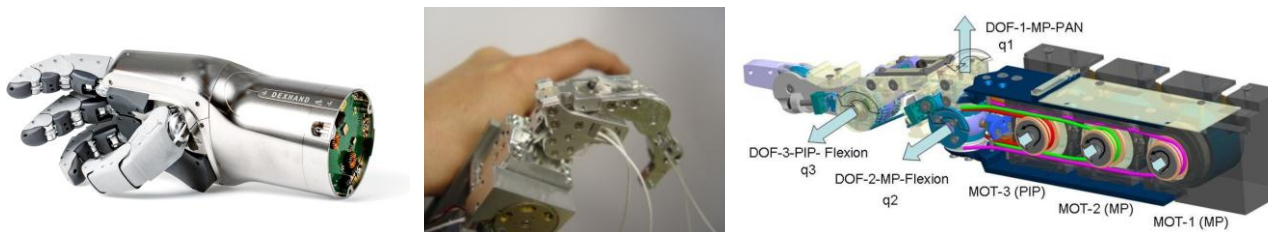
David's Hand共有两个版本，David's Hand I和David's Hand II发明时间分别为2010年和2014年。

David's Hand I选用钢丝为肌腱材料，缺点是体积太大，无法插入手掌，尤其是在组装和维护过程中的双曲面。组装过程中钢丝不可避免的的折叠大大缩短了使用寿命。David's Hand II先后考虑了Kevlar或Aramid肌腱，因为其在磨损、折叠和抗蠕变方面更为突出。然而，这些材料的终止是复杂的，因为打结会显著削弱肌腱，并且很难实现。最终David's Hand II使用编织Dyneema材料，以防止拼接。Dyneema肌腱的测试显示，其磨损明显小于钢或Kevlar肌腱（尤其是滑动接触）。

DLR Hand I和DLR Hand II分别于1998年和2001年发明，均通过 SPECTRA®肌腱实现向手指关节的力传递。



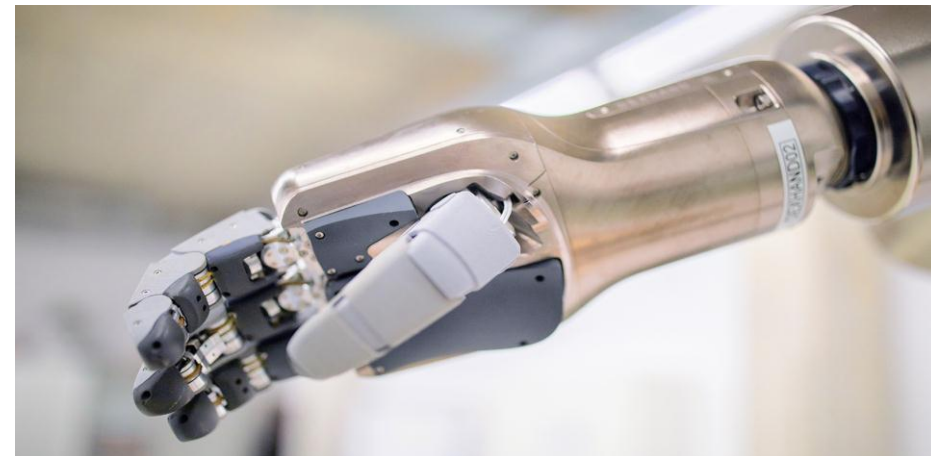
图12: DEXHAND



资料来源: Maxime Chalon 《Dexhand:a Space qualified multi-fingered robotic hand》

DEXHAND是德国宇航中心(DLR)于 2011 年研制的面向空间应用的多指灵巧手。传动系统使用聚合物Dyneema腱和谐波传动装置,将电机扭矩传递至关节。

图13: Spacehand



资料来源: Maxime Chalon 《Spacehand:a multi-fingered robotic hand for space》

Spacehand 是DEXHAND的升级版,专为在地球同步轨道上长期运行而设计。

手指的设计可主动产生30N的指尖力。DEXHAND 传动系统使用聚合物Dyneema腱,该腱非常耐用,但对于长期任务而言,蠕变率过高。

因此,Spacehand 选择了一种新材料——“Marlow Ropes”编织的高性能 Zylon 纤维。测试环境包括真空下的太阳模拟、真空下伽马辐射的辐射测试、在不同材料上滑动的耐久性测试以及模拟负载条件下的蠕变测试。同时,用于手指基部多次引导的滑动材料也接受了相同的测试。在任务的预期环境条件下,所有材料均未表现出任何明显的退化。



表4：绳驱灵巧手的腱绳材料统计

绳驱灵巧手	发布时间	腱绳牌号	腱绳材料	设计初衷	指尖力
Utah-MIT	1982	Dacron and Kevlar	聚酯纤维（涤纶）+芳纶纤维（凯夫拉）	科研	
DLR	1998	Spectra®	高强度聚乙烯纤维	航空（太空操作）	30N（DLR HAND II）
Robonaut 2 Hand	2010	Teflon™ with Vectran™	特氟龙+芳纶纤维	航空（太空操作）	
SDM hand	2010	尼龙涂层不锈钢缆	不锈钢丝	工业	
David's Hand I	2010	钢丝		航空（太空操作）	20N指尖力
Metamorphic hand	2011	Carl Stahl®不锈钢丝	不锈钢丝（直径0.5mm）	科研	
Dexhand	2012	Dyneema	超高分子量聚乙烯纤维	航空（太空操作）	25N
PISA/IIT	2012	Dyneema	超高分子量聚乙烯纤维	工业	Z轴抓力20N，换电机后最高可达28N
Yale	2013	Spectra®	高强度聚乙烯纤维	科研	10N
David's Hand II	2014	Dyneema	超高分子量聚乙烯纤维	航空（太空操作）	40N指尖力
Washington Hand	2016	Spectra®	高强度聚乙烯纤维	科研	
Spacehand	2019	ZYLON纤维	聚对苯撑苯并二噁唑	航空（长期太空操作）	

- 1) 腱绳材料整体分为不锈钢、高分子纤维两大类，其中高分子纤维使用更为广泛；
- 2) 高分子纤维中以Dyneema和Spectra®两种纤维为主流，分别为帝斯曼和霍尼韦尔生产的超高分子量聚乙烯纤维材料；
- 3) 早期使用的腱绳材料有特氟龙、芳纶纤维、涤纶等，但因性能方面不如超高分子量聚乙烯纤维而被淘汰；
- 4) ZYLON纤维在长期作业方面优于超高分子量聚乙烯纤维，在某些恶劣场景、长期高负载运行情况下可以代替超高分子量聚乙烯纤维。

请务必参阅正文之后的重要声明

- 腱绳驱动的优势及适用场景
- 腱绳材料的选择与案例分析
- **主流腱绳材料分析**
- 投资建议
- 风险分析

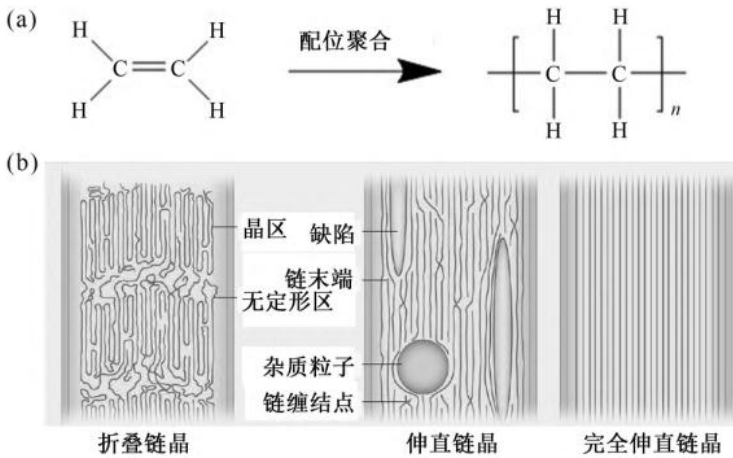


图14: UHMWPE纤维



资料来源：国家新材料产业资源共享微信公众号

图15: UHMWPE纤维分子链的晶体结构



资料来源：董彬《高性能有机纤维在防弹复合材料领域应用研究现状》

超高分子量聚乙烯纤维简称UHMWPE纤维，别名又叫做高强高模聚乙烯纤维，是分子量150万以上的无支链的线性聚乙烯。它和碳纤维、芳纶合称为“世界三大高科技纤维”。超高分子量聚乙烯树脂最早由德国赫斯特公司于1958年研制成功，并实现工业化。其后，美国赫尔克斯勒和日本三井化学、荷兰DMS公司相继实现了较大规模的工业化生产。

UHMWPE分子链为-CH₂-CH₂-结构，无侧基，分子链结构柔性极好，具有高度的对称性和规整性，高倍拉伸时分子链沿拉伸方向发生高度取向和结晶，赋予UHMWPE纤维高强高模性能。

UHMWPE纤维的力学性能是由内部晶体结构和缺陷杂质等决定的，其分子链的晶体结构如图所示。当晶区由折叠链晶转变为伸直链晶时，力学性能大幅提升。内部缺陷杂质和链缠结点等的减少也会大幅提升纤维的力学性能。此外，UHMWPE纤维还具有低密度、抗切割、耐腐蚀、耐磨损等其他优异性能。

同时，UHMWPE纤维也存在明显的不足，包括：①熔点低（约为138℃），高温下纤维熔融丧失防弹功能；②抗蠕变性能较差，应力作用下易发生形变；③表面化学惰性强，与树脂界面结合强度低；④抗压缩性能和抗剪切性能低；⑤不具备阻燃性能。



国外发展：

1957年，美国联合化学公司首先制备出UHMWPE；

1979年，荷兰DSM公司申请了第一份关于UHMWPE纤维的发明专利，随后DSM建成5套UHMWPE纤维生产装置，实现工业化规模生产，注册商品名迪尼玛；

1983年，日本三井石化公司采用凝胶挤压超倍拉伸法，以石蜡作溶剂，生产超高分子量聚乙烯纤维，商品名为Tekmilon；

1986年，美国的联合信号公司（AlliedSignal）购买了荷兰专利，同时开发自己的生产工艺并申报了专利，于1988年实现了商业化生产。

国内发展：

1999年，中国实现UHMWPE纤维工业化生产；

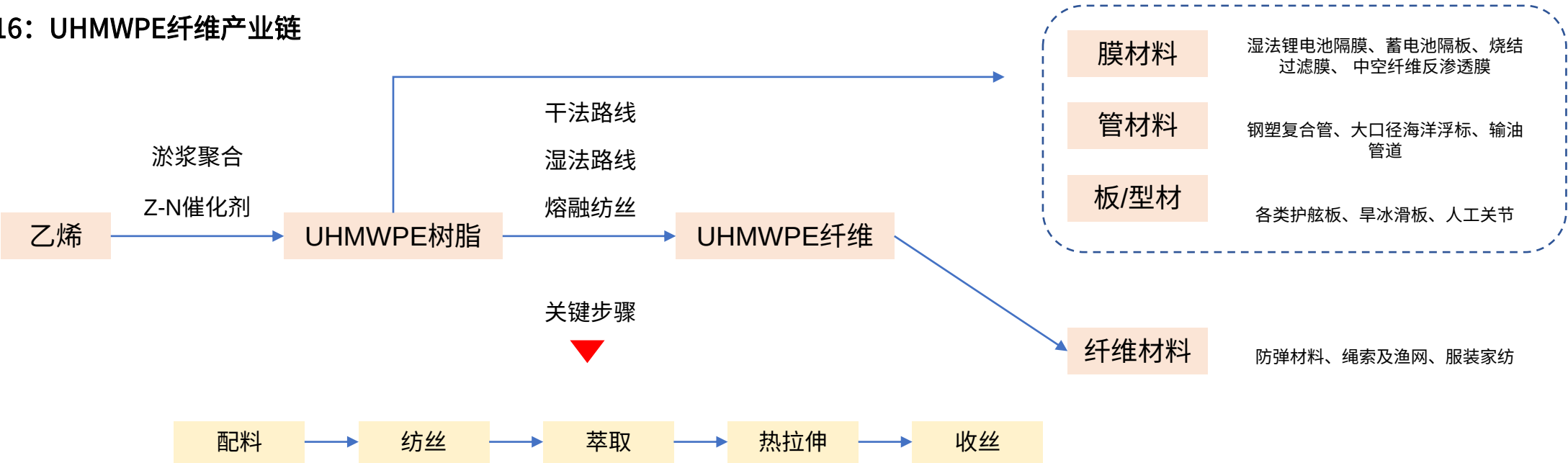
2008年，仪征化纤建成国内第一条干法纺丝UHMWPE纤维工业化生产线；

2016年，中国UHMWPE纤维年产量突破9000吨；

2019年，全球UHMWPE纤维产能达到6.46万吨/年，其中中国产能约为4.10万吨/年，占全球总产能的60%以上。



图16: UHMWPE纤维产业链



资料来源: 王新威《超高分子量聚乙烯材料的研究进展》

UHMWPE纤维的工艺制备流程包括: 配料、纺丝、萃取、热拉伸、收丝, 其中关键技术包括超高分子量聚乙烯快速溶解技术、超高分子量聚乙烯纤维的连续化生产技术、多级超倍热拉伸技术、萃取剂在线回收技术等。

UHMWPE纤维的制备原材料为UHMWPE树脂, 其分子量、粒径分布是影响纺丝的关键技术参数。树脂分子量高、粒径分布窄、溶胀比大, 所得纤维力学性能好。其次, 在纺丝过程中可以进行个性化改性, 以制造出不同侧重性能的产品。DSM Dyneema公司基于聚合物基础、纤维结构和纤维性能间关系开发新纤维建立了3个技术平台开发新纤维: Dyneema Force Multiplier技术,Dyneema Max技术和Dyneema Diamond 技术, 分别对应超高强度高模纤维、超低蠕变纤维、高防切割纤维。



表5：UHMWPE纤维工艺对比

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
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

高强度聚乙烯的基本纺丝技术叫做“凝胶纺丝法”，1979年由荷兰DSM公司向世界提出专利申请。超高相对分子量柔性链聚乙烯在溶液中，分子链呈扩展状态，纺丝溶液的浓度达到半稀溶液时进行纺丝，冷却结晶，可取得理想的一个分子一个缠结的状态，制得拉伸性非常好的凝胶丝。在高温时，聚乙烯分子链间容易滑移，重新排列并可能结晶。因此凝胶丝加热时，平稳的高倍拉伸（超拉伸）可制得缺陷极少、分子高度取向，结晶度接近100%的高强度、高弹性模量纤维。

超高分子量聚乙烯纤维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。采用的溶剂和后续工艺是这两种工艺路线最大的区别，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。

资料来源：智研咨询《2023年中国超高分子量聚乙烯纤维行业市场运行态势、产业链全景及发展趋势报告》



图17：典型的干法路线工艺流程

初生纤维中溶剂的充分挥发是影响溶剂回收和纤维力学性能的关键，干法路线中，冻胶纤维经过喷丝板挤出，利用惰性气体将溶剂带走，实现溶质与溶剂的两相分离，然后冻胶纤维在甬道内进一步拉伸，继续溶剂分离和大分子链结晶。

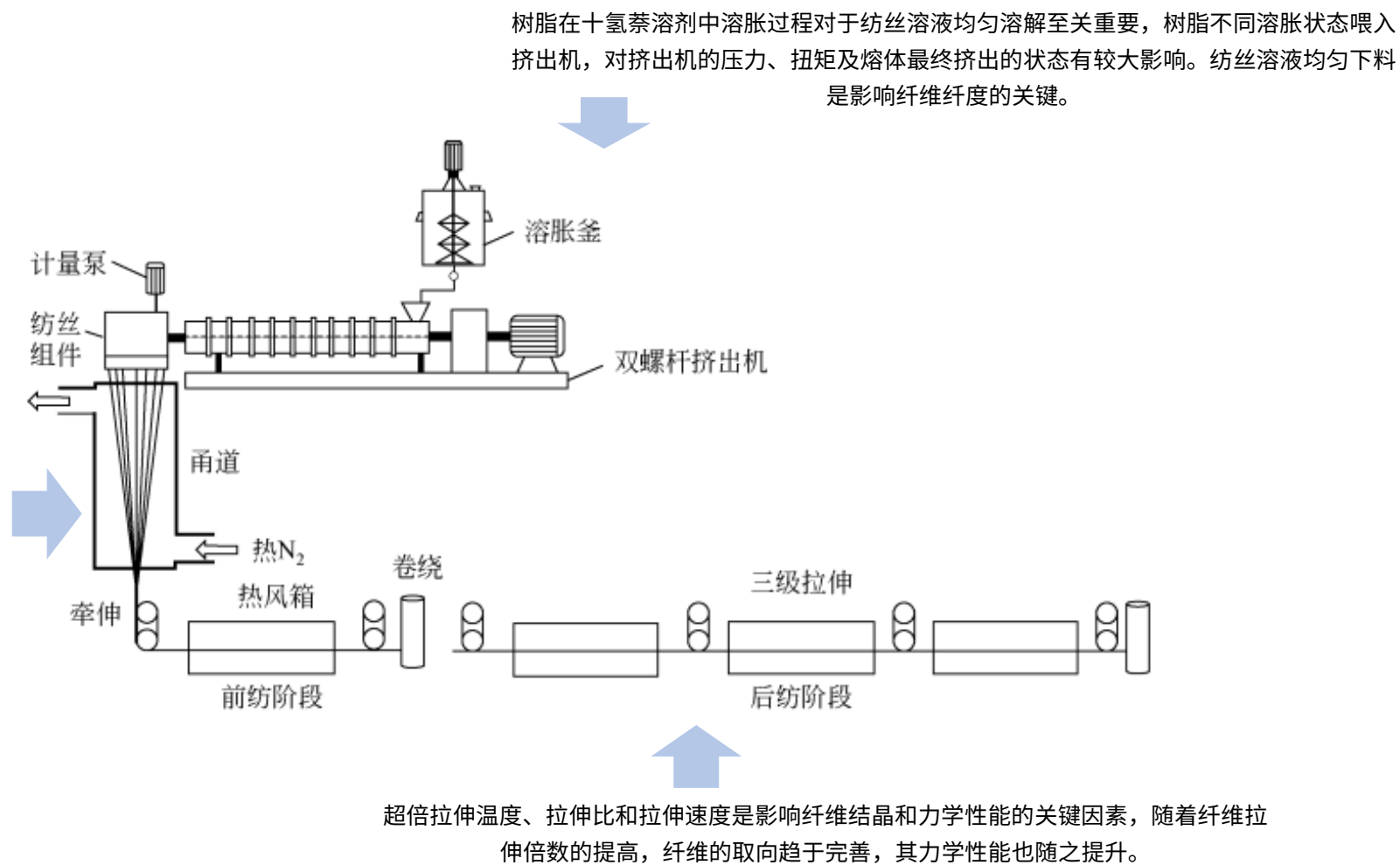
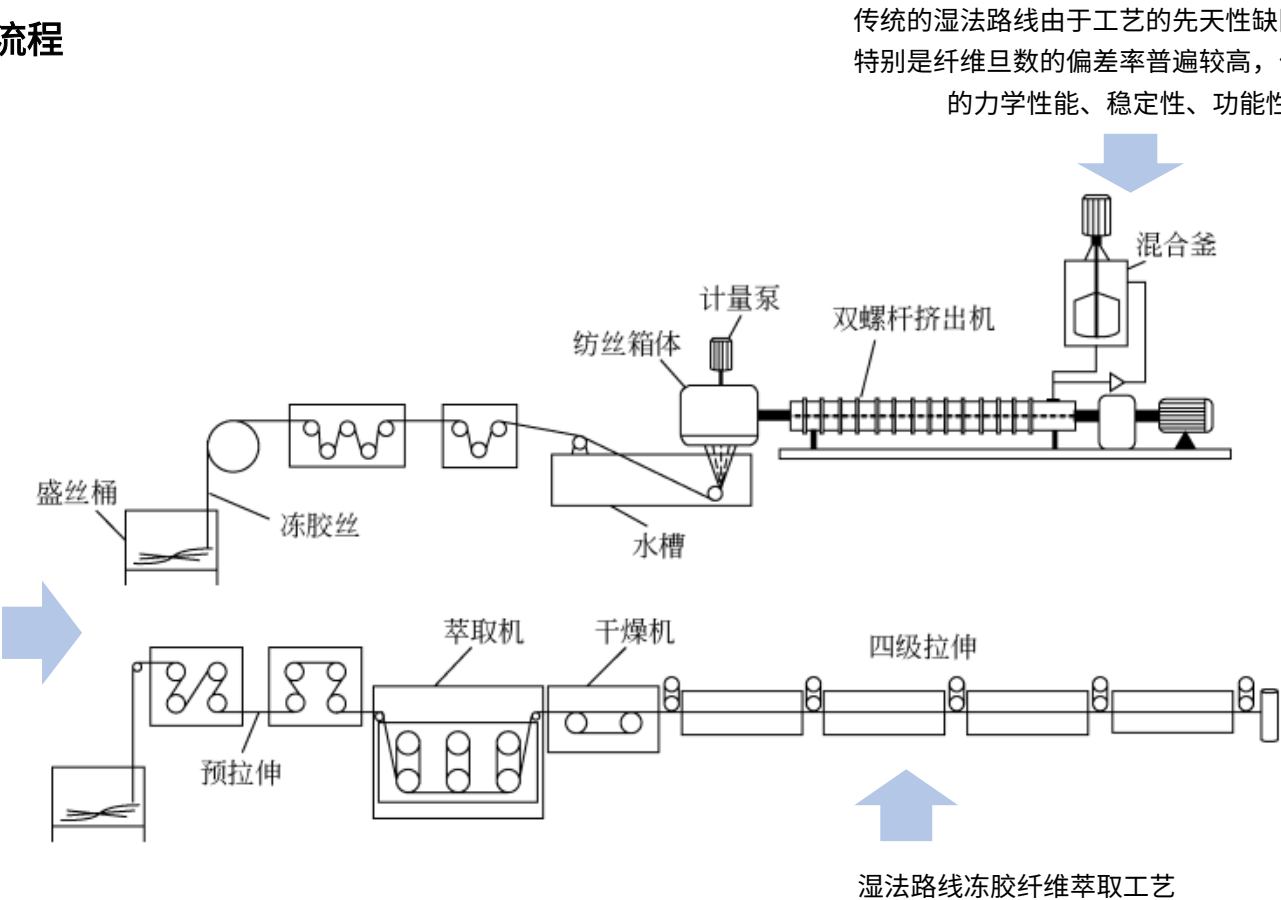




图18：典型的湿法路线工艺流程

冻胶断点的优势在于冻胶纤维进入盛丝桶后，一部分溶剂析出，减轻了后续萃取的压力；前纺过程短，操作方便；然而由于盛丝桶冻胶丝堆积等原因导致纤维各段粗细偏差大，对后纺纤维的超倍拉伸、成品纤维力学性能提升等均有较大影响。



传统的湿法路线由于工艺的先天性缺陷，导致产品质量的稳定性受到影响，特别是纤维旦数的偏差率普遍较高，优化现有的工艺路线，进一步提高纤维的力学性能、稳定性、功能性是目前湿法路线研究的重点。

干燥断点有效避免了冻胶断点法的缺陷，虽然其对装备精度要求高，萃取压力较大，但随着加工技术的进步和纤维行业对更高性能纤维的追求，干燥断点法将成为后续湿法路线研究和产业化的热点。

资料来源：王新威《超高分子量聚乙烯材料的研究进展》



表6：高性能有机抗弹纤维的基本性能

纤维种类	具体牌号	拉伸强度/(cN/dtex)	拉伸模量/(cN/dtex)	断裂伸长率/%	密度/(g/cm³)	极限氧指数/%	热分解温度/°C	生产厂家
对位芳纶	Kevlar®129	22	680	3.3	1.44	29	500	美国Dupont
	Kevlar®KM2	24	550	4.3	1.44	29	500	美国Dupont
	Twaron®	23	840	2	1.44	29	500	日本Teijin
	Taparon®629T	24	660	3.7	1.44	29	500	中国烟台泰和
杂环芳纶	Armos®	26	700	2.5	1.44	39	550	俄罗斯化纤院
	Rusar®-S	28	1 200	2.5	1.44	32	550	俄罗斯化纤院
	Rusar®-NT	35	1 200	2.6	1.47	45	550	俄罗斯化纤院
	Staramid®F-3	30	850	3	1.44	37	550	中国中蓝晨光
UHMWPE	Dyneema®SK75	34	1 038	3.8	0.97	17	150	荷兰DSM
	Dyneema®SK77	40	1 300	3.8	0.97	17	150	荷兰DSM
	Dyneema®SK99	42	1 400	3.7	0.97	17	150	荷兰DSM
	Spectra®1000	39	1 400	2.9	0.97	17	150	美国Honeywell
	Spectra®2000	35	1 300	3	0.97	17	150	美国Honeywell
	Spectra®3000	36	1 300	3.3	0.97	17	150	美国Honeywell
PBO	Zylon®-AS	38	1 170	3.5	1.54	68	650	日本Toyobo
	Zylon®-HM	37	1 800	2.5	1.56	68	650	日本Toyobo
PIPD	M5	23	1 560	1.5	1.74	59	530	美国Magellan
	M5 Conserv	50	1 760	2.5	1.7	59	530	美国Magellan
	M5 Goal	56	2 650	2.5	1.7	59	530	美国Magellan

注：红色字体代表高端产品性能指标



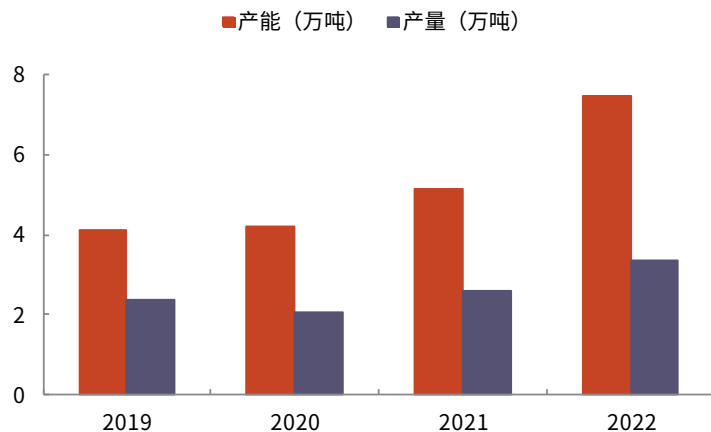
表7：UHMWPE纤维的优劣势分析

优缺点	具体特点	简要说明
优势	优良的力学性能	在线性密度相同的情况下，超高分子量聚乙烯纤维抵抗拉伸的强度是钢丝绳的15倍。比同为“世界三大高科技纤维”之一的芳纶高百分之四十，比优质钢纤维和普通的化学纤维高10倍。
	优良耐冲击性能	它在变形和塑形过程中的吸收能量的能力和抵抗冲击的能力比同为“世界三大高科技纤维”的芳纶纤维、碳纤维都高。
	优良的耐磨性能	将超高分子量聚乙烯纤维与碳纤维、芳纶纤维的增强塑料摩擦系数比较，超高分子量聚乙烯纤维的耐磨性和弯曲疲劳度远远高于碳纤维和芳纶纤维。
	耐化学腐蚀性	将超高分子量聚乙烯纤维和芳纶纤维进行在不同化学品介质中的强度保留率进行比较。超高分子量聚乙烯纤维的耐腐蚀性能明显高于芳纶纤维，它在酸、碱、盐中的性质结构特别稳定，只有在次氯酸钠溶液中强度有所损失。
	良好的耐光性能	因为超高分子量聚乙烯纤维的化学结构稳定，所以它的耐光性也是高科技纤维中最优越的
	其他性能	良好的疏水性能、耐水耐湿性能、电绝缘性能和较长的曲折寿命。
劣势	熔点较低	在对其加工过程中温度不能超过130℃，否则就会因为超高分子量聚乙烯纤维之间分子链间作用力较弱的原因，使其发生蠕变现象，减短使用寿命。
	浸润性和染色性差	超高分子量聚乙烯纤维上不存在染基团，使其浸润性差，染料很难渗透到纤维内部，导致它的染色性差，这些缺点影响了它的应用领域的范围。

资料来源：国家新材料产业资源共享微信公众号



图19：中国UHMWPE纤维产能与产量



资料来源：智研咨询

一、产能规模现状

我国超高分子量聚乙烯纤维的产能在持续增长。

自2010年以来，我国超高分子量聚乙烯纤维的产能已经超过全球总产能的50%，2021年，总产能约4.3万吨/年，截至2022年我国超高分子量聚乙烯纤维产能约为7.45万吨/年。

二、产能结构现状及成因

现状：我国超高分子量聚乙烯纤维产能结构层次较低。

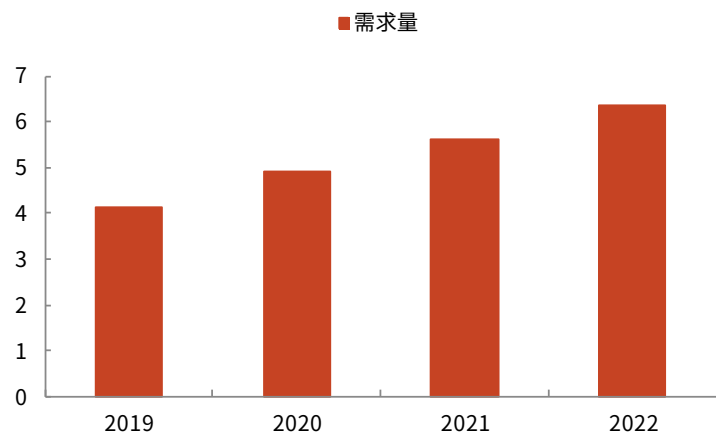
整体呈现中低端产能富余、高端产能紧缺的情况，尤其在医用缝合线、雷达天线罩等高端应用领域的产品研发仍处于起步阶段，在产品一致性及稳定性、抗蠕变产品等细分领域仍处于不断追赶海外龙头公司的位置。

成因：主流工艺存在先天缺陷，新兴工艺发展不足。

超高分子量聚乙烯纤维凝胶纺丝工艺主要有两大类：一类是干法工艺路线；另一类是湿法工艺路线。湿法路线作为主流工艺，具有先天性缺陷。传统湿法路线会使得产品质量的稳定性受到影响，特别是纤维旦数的偏差率普遍较高，提高纤维的力学性能、稳定性、功能性是目前采用湿法路线企业研究的重点。干法路线，作为新兴工艺具备更多优势。如工艺流程短、经济环保，其制备的纤维具备表面平整和缺陷少等优点。不过与湿法路线相比，目前国内产业化的干法路线冻胶过程不充分，导致干法纤维性能与湿法纤维存在差异。干法路线存在巨大发展空间。



图20：中国UHMWPE纤维需求量情况（万吨）



资料来源：智研咨询

需求领域：军用、民用和其他

军用：防护材料和航空航天。

民用：绳索和渔网；服装及家纺；体育器材用品；用作生物材料。

其他：航空领域和工业领域等。

需求规模：国内需求持续增长

据同益中招股书披露，2015年至2020年，中国超高分子量聚乙烯纤维需求量复合增长率为19.68%，2021年至2025年，预期中国超高分子量聚乙烯纤维需求量复合增长率为15.73%。

需求结构：

当前现状：主要满足军用需求。

未来趋势：军用民用两端需求持续增长；民用需求占比持续提高。一方面军用需求持续增长。国际形势变幻不定，国内国外军用需求加速增长。另一方面民用需求后劲十足。国内超高分子量聚乙烯纤维于传统下游的需求不减。如海洋产业、纺织服饰领域和体育用品领域需求逐渐旺盛。



全球格局：行业集中度较高。从企业来看，全球主要的企业有塞拉尼斯，巴西布拉斯科，大韩油化公司，上海联乐化工，九江中科鑫星新材料和利安德巴塞尔。其中塞拉尼斯是全球市场的领导者。从地区来看，超高分子量聚乙烯的生产消费主要集中于中国、美国、日本、韩国，德国等地。其中中国占据了36.7%的消费市场份额。

国内格局：我国超高分子量聚乙烯纤维行业形成规模化生产的企业相对较少，行业集中度有待提升，产品的稳定性、单线产能有待进一步提高，生产成本有待进一步降低。我国超高分子量聚乙烯纤维主要生产企业已近20家，主要企业有浙江千禧龙纤特种纤维股份有限公司、北京同益中新材料科技股份有限公司、江苏九州星际新材料有限公司等。

目前，国内外市场上的超高分子量聚乙烯纤维按机械性能分为高端和中低端，高端超高分子量聚乙烯纤维拉伸强度大于等于39cN/dtex、拉伸模量大于等于1500cN/dtex，目前国内90%以上的则是拉伸强度小于39cN/dtex、拉伸模量小于1500cN/dtex的中低端聚乙烯纤维。



表8：UHMWPE纤维的优劣势分析

企业名称	业务概况
北京同益中新材料科技股份有限公司	同益中是国内首批掌握全套超高分子量聚乙烯纤维生产技术和较早实现超高分子量聚乙烯纤维产业化的企业龙头企业，拥有超高分子量聚乙烯纤维行业全产业链布局。
浙江千禧龙纤特种纤维股份有限公司	目前，公司已成为国内超高分子量聚乙烯纤维行业中常规细丝生产规模有色丝品类、产品一致性等方面具有较强竞争力的企业之一，产品已销售至北美、欧洲、东南亚等众多国际市场。
山东南山智尚科技股份有限公司	公司2022年顺利完成超高分子量聚乙烯纤维一期600吨项目的全面投产并逐步升级成品工艺，实现了产品纤维纤度从400D到800D的全线转变。2022年公司UHMWPE纤维收入为1952.06万元。
江苏九州星际新材料有限公司	九州星际科技有限公司是一家专业从事超高分子量聚乙烯纤维研发、生产和销售的专业生产企业，目前公司超高分子量聚乙烯纤维年产能达到32000吨，位居全球第一，公司致力打造超高分子量聚乙烯纤维全球专业化生产工厂。
中国石化仪征化纤有限责任公司	公司是中国石化中高端聚酯生产基地和特种纤维生产基地。拥有PTA产能142万吨/年(含合资权益产能42万吨/年)，240万吨/年聚酯产能(含聚酯切片、短纤、中空、瓶片)，超高分子量聚乙烯纤维产能3300吨/年。

资料来源：智研咨询

国际上，荷兰DSM、美国Honeywell和日本Toyobo三家企业垄断着全球超高分子量聚乙烯纤维高端产品技术。近年来，随着超高分子量聚乙烯纤维在军事、航空航天和民用领域应用需求的提升，中国企业产能逐步扩大，虽然中国代表性企业超高分子量聚乙烯纤维的市场占有率在逐渐上升，但是中国本土企业产品主要以中低端产品为主。目前，我国超高分子量聚乙烯纤维主要生产企业已近20家，主要企业有浙江千禧龙纤特种纤维股份有限公司、北京同益中新材料科技股份有限公司、江苏九州星际新材料有限公司等。



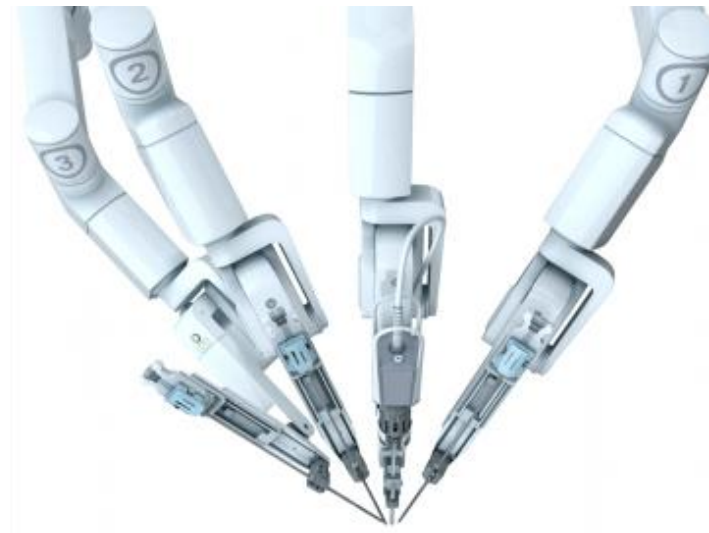
德国Carl Stahl（卡尔施达）公司成立于1880年，是一家集设计、生产、销售为一体的专业化起重吊索具集团企业。Carl Stahl旗下有两个主营不锈钢钢丝绳的子公司，分别是Technocable（德国）、Sava（美国）。Technocable的钢丝绳主要集中于普通的进口不锈钢钢丝绳，同时种类更多，适用于农业、工业、医药、机器人等多种行业和生产应用；Sava则集中精力在更细的进口不锈钢钢丝绳，在1mm以下的进口不锈钢绳产品范围更加丰富。

Sava为手术机器人设计了高强度、耐用的钨钢丝绳组件，所涉及的钨缆可由多达 700 根电线组成，直径小至 0.0005 英寸，在单次手术中执行超过1000个周期。

图21：手术机器人用钨钢丝



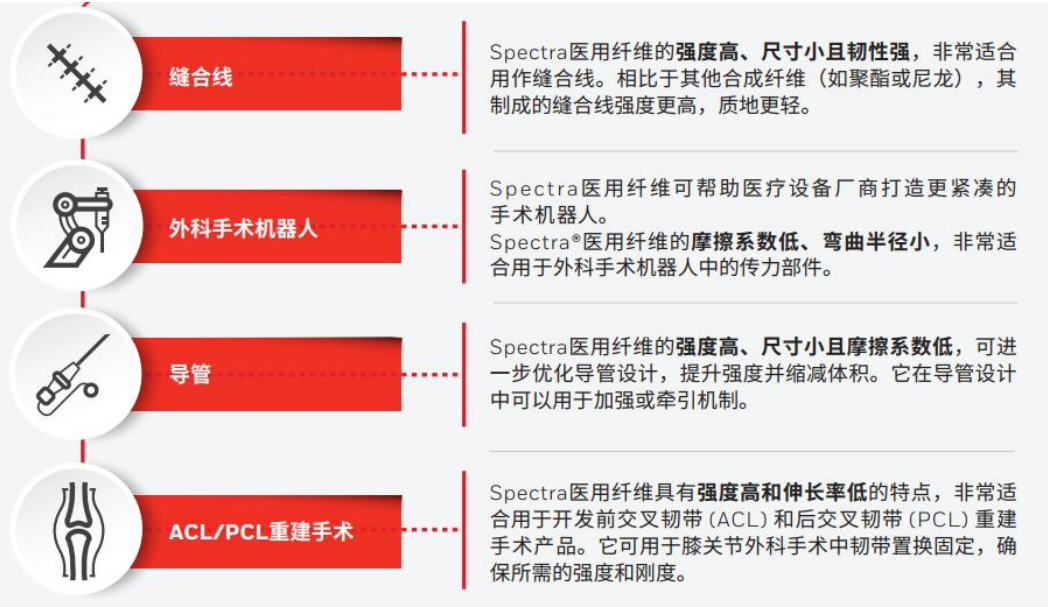
图22：使用钨钢丝的手术机器人





霍尼韦尔Spectra® MG医用纤维是一种生物相容、质地超轻的高强度聚乙烯纤维，由凝胶纺丝工艺制成。在医疗领域，其用途包括医用缝合线、外科手术机器人传力部件、导管设计、韧带重建等。根据霍尼韦尔官网信息，同等重量下，Spectra®MG的强度是钢的15倍，但质地轻得能漂在水面；相同体积下，Spectra®MG的强度是聚酯纤维的3倍。

图23：SPECTRA®医用纤维应用场景



资料来源：霍尼韦尔官网

图24：SPECTRA®医用纤维产品指标

产品	旦尼尔	分特克斯	细丝旦尼尔 (dpf)	相对强度 (g/den)	断裂强度 (lbs)	模量 (g/den)	伸长率 (%)
MG50	50	55	1.3	45.0	5.0	1650	2.8
MG10	100	110	2.5	40.5	9.0	1580	2.9
MG13	130	144	3.3	38.0	11.1	1390	3.2
MG21	215	239	3.6	38.0	18.0	1320	2.9
MG37	375	417	6.3	35.0	29.0	1200	3.1
MG43	435	483	3.6	37.5	36.0	1260	3.3

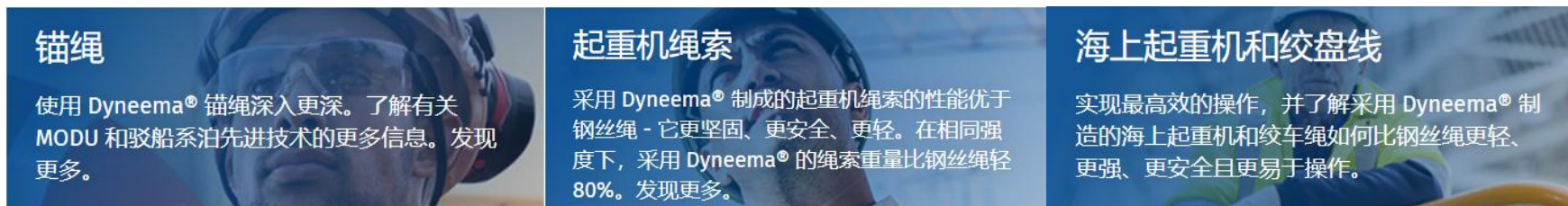
资料来源：霍尼韦尔官网



Dyneema®纤维采用获得专利的凝胶纺丝工艺生产，其中纤维经过拉伸、加热、伸长和冷却。拉伸和纺丝导致分子排列、高结晶度和低密度。Dyneema®具有极长的分子链，可以更有效地将负载转移到聚合物主链上。在相同重量下，Dyneema®纤维的强度是钢的15倍，拉伸强度高达43cN/dtex。除了非凡的强度外，Dyneema®还具有出色的耐切割性和耐磨性，并且具有很高的耐化学性和耐紫外线性。Dyneema®纤维非常轻，可以漂浮在水面上，而且具有非常高的模量（抗变形）。采用Dyneema®XBO技术制造的坚固而轻质的绳索不仅在弯曲性能上优于其他合成绳索，而且还匹配甚至优于特种钢丝绳的弯曲性能。这使得采用Dyneema®XBO技术的绳索非常适合需要卓越弯曲性能的应用。

目前Dyneema®纤维的应用集中在防护装甲、个人防护装备、缆绳/线材/吊索/链条、以及织网四大领域。在我们比较关注的缆绳/线材/吊索/链条领域。Dyneema®纤维已成为一种成熟且经过认证的解决方案，可替代钢丝或优于低成本合成材料。

图25： Dyneema®纤维在缆绳/线材/吊索/链条领域的应用



资料来源： dyneema官网

■ 腱绳驱动的优势及适用场景

■ 腱绳材料的选择与案例分析

■ 投资建议

■ 风险分析



回顾现有的腱绳传动灵巧手案例，腱绳材料整体分为不锈钢、高分子纤维两大类，其中以Dyneema和Spectra®两种纤维为代表的高分子纤维使用更为广泛。

高分子纤维：以Dyneema和Spectra®为代表的UHMWPE纤维（超高分子量聚乙烯纤维）逐步成为腱绳材料的主流选择。主要原因在于，相比钢丝、特氟龙、芳纶纤维等金属、高分子化合物，UHMWPE纤维具备腱绳材料所需的高强度、低蠕变性、耐磨损、折叠不受损等特性，在高精度、频繁使用、长期受力的情况下，能够满足灵巧手动力传动的要求。产能方面，截至2022年我国超高分子量聚乙烯纤维产能约为7.45万吨/年，整体呈现**中低端产能富余、高端产能紧缺**的情况，尤其在医用缝合线、雷达天线罩等高端应用领域的产品研发仍处于起步阶段。湿法路线作为主流工艺，具有先天性缺陷。不过与湿法路线相比，目前国内产业化的干法路线冻胶过程不充分，导致干法纤维性能与湿法纤维存在差异。

钢丝：钢丝绳组件是部分手术机器人及腱绳传动灵巧手所选择的腱绳材料。部分索具厂商对材料的性能掌握较为充分，可以满足面向工业、医疗、消费、机器人等领域要求的钢丝绳产品。

关注国产零部件厂商投资机会：大业股份、同益中、恒辉安防等。

■ 腱绳驱动的优势及适用场景

■ 腱绳材料的选择与案例分析

■ 投资建议

■ 风险分析



- (1) 产业化进程不及预期：目前人形机器人产业链成本仍较高，尚未具备确定的应用场景，若产业化进程不及预期，可能对供应链企业造成不利影响；
- (2) 竞争加剧风险：产业界对人形机器人高度关注，若后续丝杠、空心杯电机、减速器等领域竞争加剧，可能对供应链企业造成不利影响；
- (3) 核心技术进步不及预期：人形机器人的产业化推进有赖于AI、自动驾驶、以及相关零部件的核心技术持续进步，若后续核心技术进步不及预期，可能对产业链落地造成负面影响。

衷心 感谢

光大证券研究所



电新环保研究团队

殷中枢（首席分析师）

📄 执业证书编号：S0930518040004
☎ 电话：010-58452071
✉ 邮件：yinzs@ebscn.com

黄帅斌（分析师）

📄 执业证书编号：S0930520080005
☎ 电话：0755-23915357
✉ 邮件：huangshuaibin@ebscn.com

和霖（分析师）

📄 执业证书编号：S0930523070006
☎ 电话：021-52523853
✉ 邮件：helin@ebscn.com

郝骞（分析师）

📄 执业证书编号：S0930520050001
☎ 电话：021-52523827
✉ 邮件：haoqian@ebscn.com

陈无忌（分析师）

📄 执业证书编号：S0930522070001
☎ 电话：021-52523693
✉ 邮件：chenwuji@ebscn.com

分析师声明

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并注册为证券分析师，以勤勉的职业态度、专业审慎的研究方法，使用合法合规的信息，独立、客观地出具本报告，并对本报告的内容和观点负责。负责准备以及撰写本报告的所有研究人员在此保证，本研究报告中任何关于发行商或证券所发表的观点均如实反映研究人员的个人观点。研究人员获取报酬的评判因素包括研究的质量和准确性、客户反馈、竞争性因素以及光大证券股份有限公司的整体收益。所有研究人员保证他们报酬的任何一部分不曾与、不与、也将不会与本报告中的具体的推荐意见或观点有直接或间接的联系。

行业及公司评级体系

买入—未来6-12个月的投资收益率领先市场基准指数15%以上；
增持—未来6-12个月的投资收益率领先市场基准指数5%至15%；
中性—未来6-12个月的投资收益率与市场基准指数的变动幅度相差-5%至5%；
减持—未来6-12个月的投资收益率落后市场基准指数5%至15%；
卖出—未来6-12个月的投资收益率落后市场基准指数15%以上；
无评级—因无法获取必要的资料，或者公司面临无法预见结果的重大不确定性事件，或者其他原因，致使无法给出明确的投资评级。
基准指数说明：A股市场基准为沪深300指数；香港市场基准为恒生指数；美国市场基准为纳斯达克综合指数或标普500指数。

特别声明

光大证券股份有限公司（以下简称“本公司”）成立于1996年，是中国证监会批准的首批三家创新试点证券公司之一，也是世界500强企业——中国光大集团股份公司的核心金融服务平台之一。根据中国证监会核发的经营证券期货业务许可，本公司的经营范围包括证券投资咨询业务。

本公司经营范围：证券经纪；证券投资咨询；与证券交易、证券投资活动有关的财务顾问；证券承销与保荐；证券自营；为期货公司提供中间介绍业务；证券投资基金代销；融资融券业务；中国证监会批准的其他业务。此外，本公司还通过全资或控股子公司开展资产管理、直接投资、期货、基金管理以及香港证券业务。

本报告由光大证券股份有限公司研究所（以下简称“光大证券研究所”）编写，以合法获得的我们相信为可靠、准确、完整的信息为基础，但不保证我们所获得的原始信息以及报告所载信息之准确性和完整性。光大证券研究所可能将不时补充、修订或更新有关信息，但不保证及时发布该等更新。

本报告中的资料、意见、预测均反映报告初次发布时光大证券研究所的判断，可能需随时进行调整且不予通知。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议。客户应自主作出投资决策并自行承担投资风险。本报告中的信息或所表述的意见并未考虑到个别投资者的具体投资目的、财务状况以及特定需求。投资者应当充分考虑自身特定状况，并完整理解和使用本报告内容，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。对依据或者使用本报告所造成的一切后果，本公司及作者均不承担任何法律责任。

不同时期，本公司可能会撰写并发布与本报告所载信息、建议及预测不一致的报告。本公司的销售人员、交易人员和其他专业人员可能会向客户提供与报告中观点不同的口头或书面评论或交易策略。本公司的资产管理子公司、自营部门以及其他投资业务板块可能会独立做出与本报告的意见或建议不相一致的投资决策。本公司提醒投资者注意并理解投资证券及投资产品存在的风险，在做出投资决策前，建议投资者务必向专业人士咨询并谨慎抉择。

在法律允许的情况下，本公司及其附属机构可能持有报告中提及的公司所发行证券的头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或正在争取提供投资银行、财务顾问或金融产品等相关服务。投资者应当充分考虑本公司及本公司附属机构就报告内容可能存在的利益冲突，勿将本报告作为投资决策的唯一信赖依据。

本报告根据中华人民共和国法律在中华人民共和国境内分发，仅向特定客户传送。本报告的版权仅归本公司所有，未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式、任何目的进行翻版、复制、转载、刊登、发表、篡改或引用。如因侵权行为给本公司造成任何直接或间接的损失，本公司保留追究一切法律责任的权利。所有本报告中使用的商标、服务标记及标记均为本公司的商标、服务标记及标记。