



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

- 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

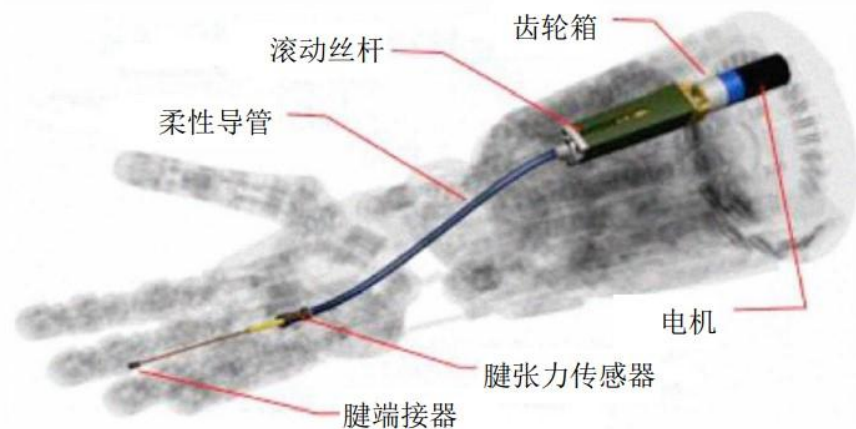
传动方式	特点	缺点
腱传动	由腱（钢丝绳、迪力马绳等）加上滑轮或者软管实现传动。腱一般具有很高的抗拉强度和很轻的重量，容易实现多自由度和远距离动力传输，节省空间和成本，是一种柔顺传动方式。	腱本身的刚度有限，影响位置精度；控制时需要一定的预紧力，容易产生摩擦；腱的布局容易产生力矩和运动的耦合。这些因素都增加了手爪抓取控制的难度和复杂性。
连杆传动	采用平面连杆机构传动，刚度好、出力大、负载能力强、加工制造容易、易获得较高的精度，构件之间的接触可以依靠几何封闭来实现，能够较好实现多种运动规律和运动的轨迹的要求。	结构冗杂，笨重，柔性不足，抗冲击性能较弱，对手内空间配置要求较高。
齿轮/蜗轮蜗杆传动	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

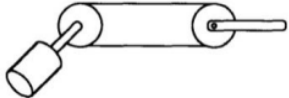
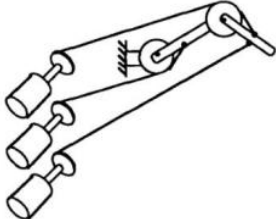
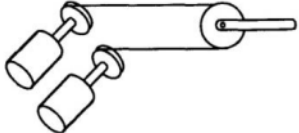


资料来源：Shadow Robot官网

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

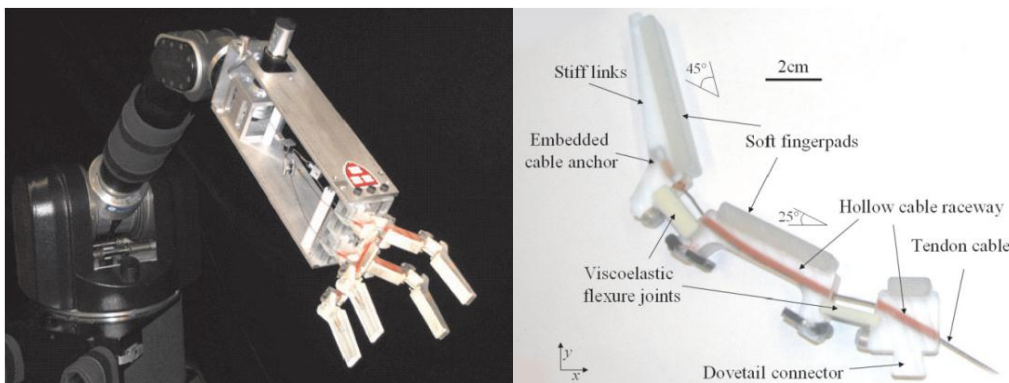


资料来源：孙成远《腱驱动灵巧手指结构设计及其运动分析与试验》

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。

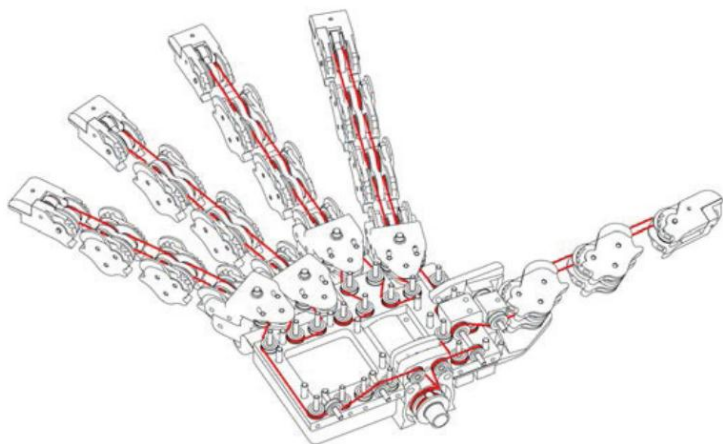
在很大的载荷下，肌腱容易磨损并切断原型材料。为了防止这种情况，将3.18mm的钢腱导销压入指状物中，从而提供更硬的滑动接触，摩擦力显著降低。

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。

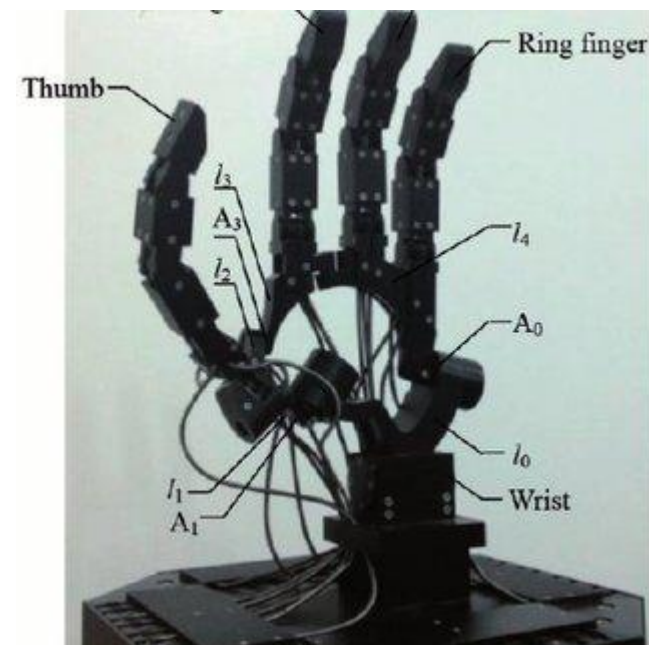
图8: PISA/IIT hand



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

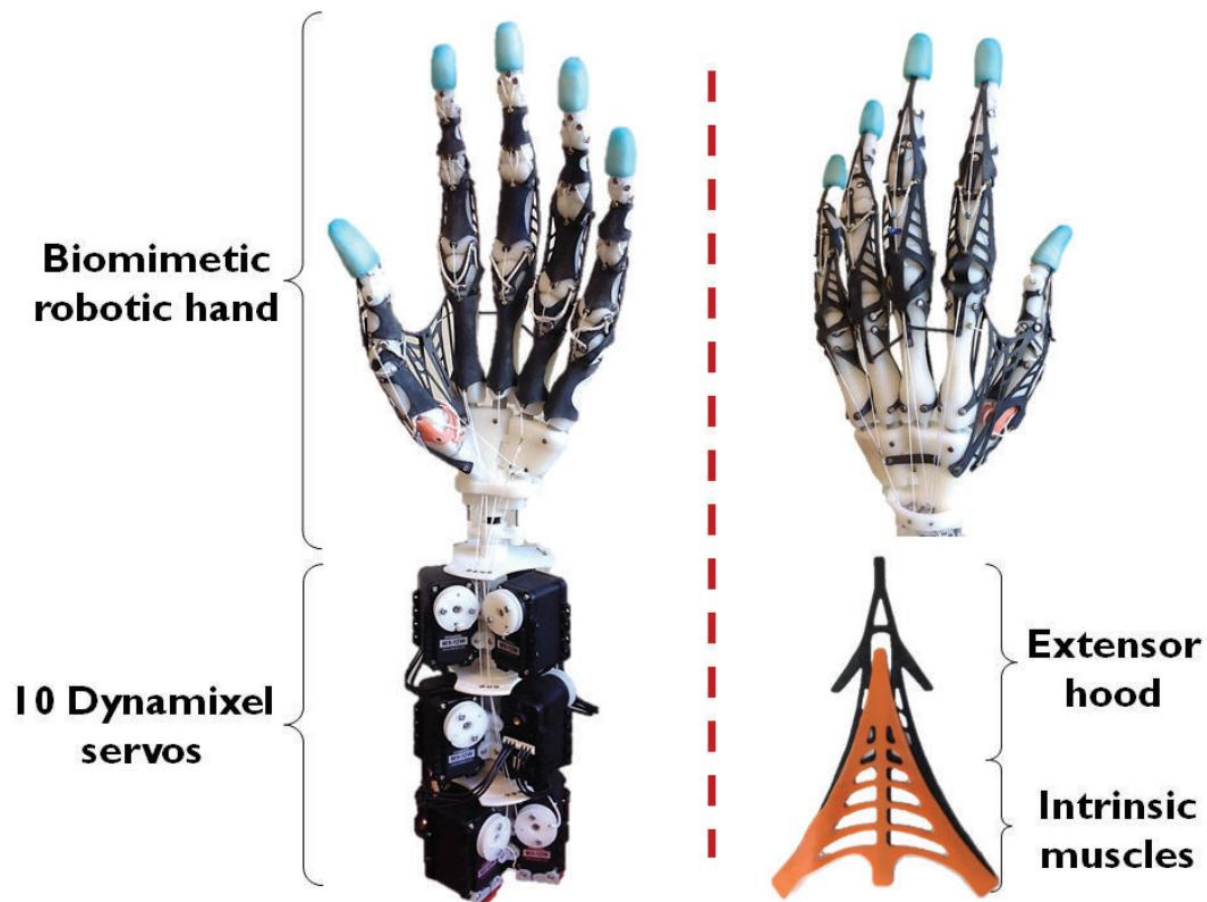


资料来源: GUOWU WEI 《Kinematic Analysis and Prototype of a Metamorphic Anthropomorphic Hand with a Reconfigurable Palm》

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。使用钩编韧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》

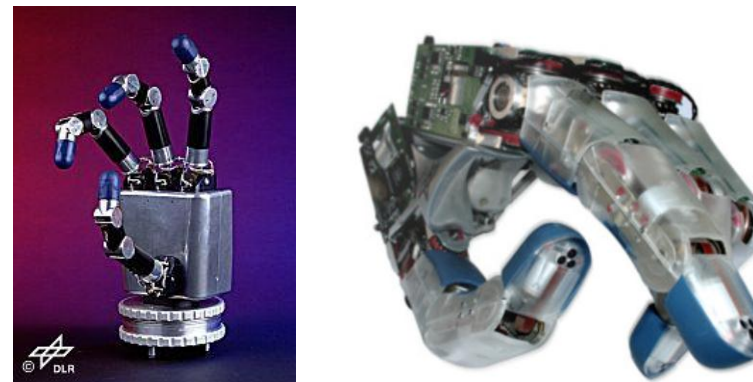


图10: David's Hand



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

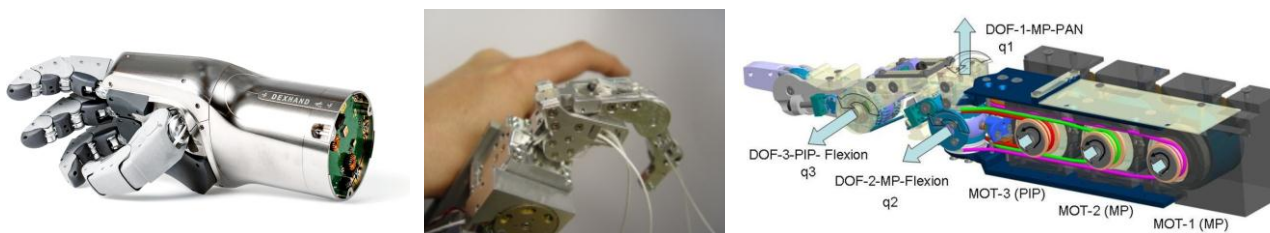
David's Hand共有两个版本，David's Hand I和David's Hand II发明时间分别为2010年和2014年。

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。



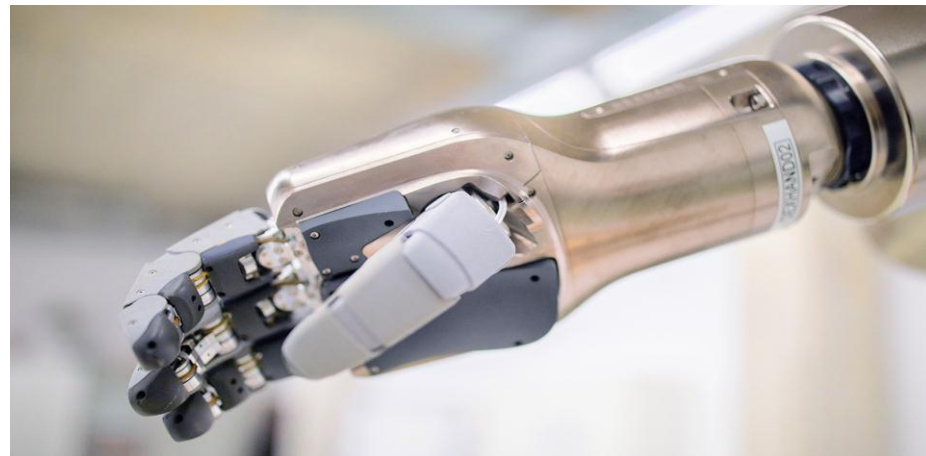
图12: DEXHAND



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。

- 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

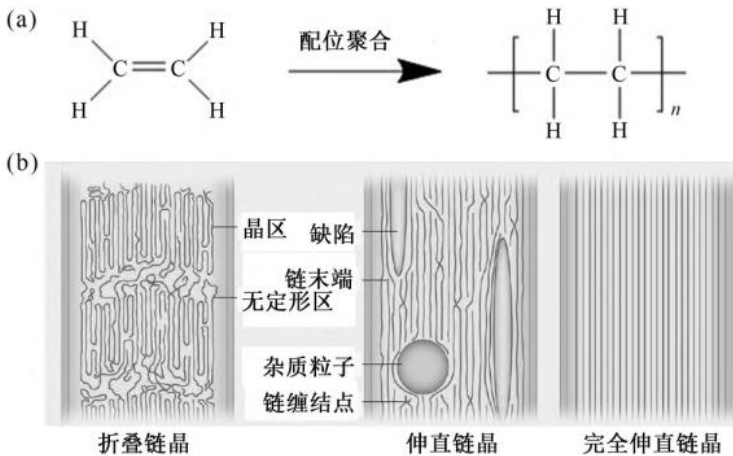


图14: UHMWPE纤维



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；

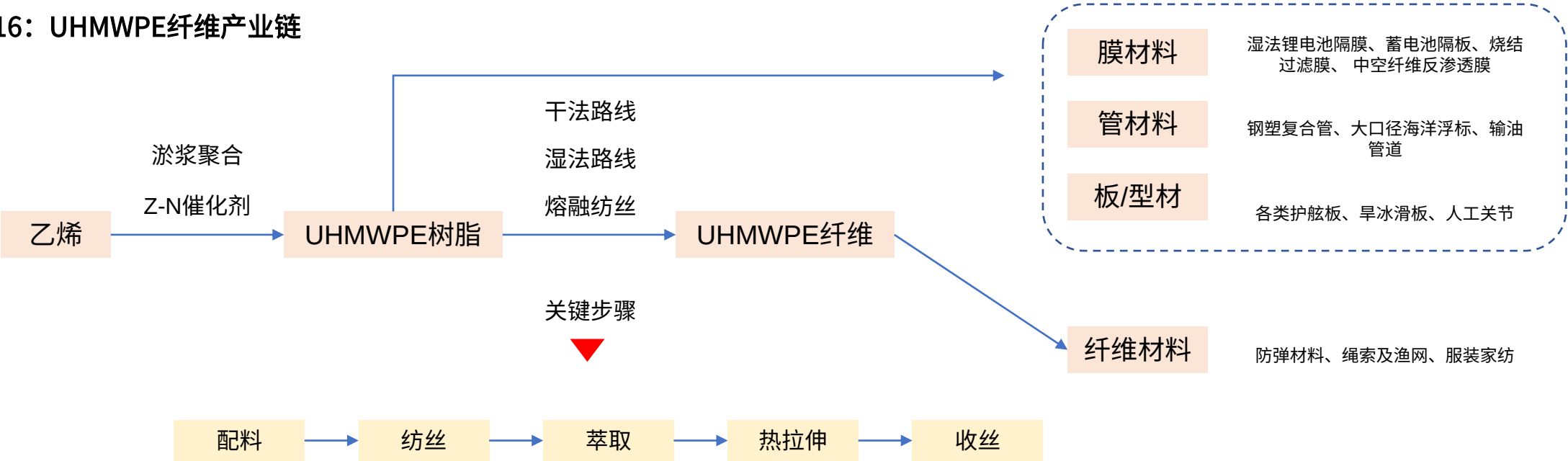
2008年，仪征化纤建成国内第一条干法纺丝UHMWPE纤维工业化生产线；

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，分别对应超高强高模纤维、超低蠕变纤维、高防切割纤维。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/48520112140011034>