

# 科技

## 桑蚕忙吐丝，济世有新功

### 古老蚕丝变身性能优异的生物兼容高分子聚合物，在人工智能、健康医疗等领域展现出巨大应用前景

■陶虎（中国科学院上海微系统与信息技术研究所研究员）

丝绸用作纺织面料已有五千多年的历史，其原料主要是抽取自蚕茧的蚕丝。随着科技的发展进步，尤其是材料科学、工程学、先进微机电系统加工技术等学科的交叉融合，科学家们发现，蚕丝蛋白除了作为传统纺织材料外，还可作为先进生物高分子聚合物，参与人体集成传感器、生物医疗器械等一系列高科技产品的制备。

作为一种理化特性优异的天然材料，蚕丝产物具有出色的生物兼容性，可与人体组织“友好相处”，无论是贴附于体表还是植入

体内，均不会引起生物排斥反应。作为一种蛋白质，蚕丝蛋白产品在植入人体后，甚至可以在预设的时间内，被人体完全吸收。近十年来，很多科学家和企业基于蚕丝蛋白展开了研究，并提出了大量具有高科技含量的新型应用，为传统材料注入了新的活力。

点“丝”成金，蚕丝蛋白作为一种天然高分子蛋白质在物理、电子、光学、生物、工程等领域都有着极大的应用前景，将可为未来智能社会、健康医疗、环境保护等技术领域带来革命性创新。

### 最轻柔纤细的天然纤维，人体“第二肌肤”

东晋诗人陶渊明在《归园田居》中写道：“但使愿无违，蚕月得纺绩。”桑叶田田是农耕时代婀娜多姿的风景，衣锦还乡是古往今来功成名就的象征。“绚烂如云霞，透亮如蝉翼”，人们对于丝绸的热爱与生俱来，直到今天，丝绸仍被许多人认为是美丽的纺织品。

在中国史前传说中，有黄帝的元妃嫘祖发明养蚕缫丝，史称“嫘祖始蚕”。从殷商（约公元前17世纪）起，桑树的种植面积和养蚕区域逐渐扩大，丝绸生产也逐步发展繁荣。西周武王（约公元前1046年）开始，华夏文明就有“亲蚕”和“亲桑”的礼仪，每年新年会通过皇帝亲耕、皇后亲桑的仪式来祭祀农桑。

丝绸作为华夏历史文明数千年来的重要见证，连接着欧、亚、非三大洲，将古老的中国文明、印度文明、希腊文明联结起来，影响着整个人类的文明发展史。公元前2世纪，汉武帝派张骞出使西域，开通了著名的“丝绸之路”。这是中国古代经中亚通往南亚、西亚，以及欧洲、北非的陆上贸易往来重要通道。唐代的经济文化发展水平居于当时世界前列，促进了丝绸之路的畅通繁荣。

蚕丝是人类最早利用的一种动物纤维，也

是最轻柔、最细的天然纤维之一。蚕丝截面直径约为头发丝的十分之一，其中桑蚕丝直径大约13至18微米（1微米等于千分之一毫米），而柞蚕丝稍粗一些，直径大约21至30微米。

此外，蚕丝也是力学强度最好的天然纤维之一，仅次于蜘蛛丝。但由于蜘蛛具有强烈的领地意识、攻击性强，不适合人工养殖，难以大量获取，因此蚕丝在人工养殖上更具优势。

由于对伤口刺激性小，有助于创面愈合，蚕丝素有“人工皮肤”“人体第二肌肤”“纤维皇后”等美誉。在很长一段时间内，蚕丝都作为伤口缝合线在临床医学上使用。从单个蚕茧中抽取的蚕丝具有良好的透气、透湿性能，在临床上也可用于术后伤口敷料和烧伤后创面敷料。

目前，市面上还有不少面膜，利用蚕丝蛋白作为面膜材料或营养液的载体。这是因为，相比其他材料制成的面膜，蚕丝面膜力学性能更为优异，更轻薄易贴服。在相同条件下，如果厚度减少10倍，贴服性可提高1000倍，同时，蚕丝面膜还可较好地保存水分和营养液，从而有助于受损肌肤得到修复。不过，蚕丝蛋白中含有的18种氨基酸，在被从蚕丝纤维中提取出来之前，无法被人体吸收。

### 从蚕丝被到可降解骨钉，古老文明焕新春

丝绸作为中国古代文明的重要象征，曾是古代贸易通商中最主要的商品之一，直至今日。2018年，中国、印度、土耳其等主要丝绸出口国及欧盟的丝绸商品贸易额约为300亿美元。

当历史的车轮进入新世纪，传统桑蚕产业面临着如何从劳动密集型产业转型为高科技、高附加值产业的挑战，我们的古老文明期待再度迸发出耀眼的光芒。

科学家已经发现，蚕丝蛋白具有优异的机械性能，生物兼容性好，可在体内无害降解并被人体吸收而无需取出。从天然蚕丝中提取出的蚕丝蛋白可作为医用原材料，并通过现代高科技制造技术，制备成蚕丝蛋白骨钉、人工脑膜、缓释微针、心血管支架、人工骨等高端医疗器械。

用蚕丝蛋白制成的医疗器械具有极佳的力学强度，可配合不同植入部位，完美匹配病患自身组织的强度。由于其本身来源于天然蛋

白，相较于目前普遍使用的金属和陶瓷材料，蚕丝蛋白具有优异的生物兼容性，且能进行可控降解，时间长度可从几周到几年。

此外，蚕丝蛋白还具有好的药物包裹和可控释放功能，可广泛应用于骨科、运动科、心血管科、脑外科、整形美容等植入式医疗器械领域，潜在应用市场规模高达每年数千亿美元。

从一组价格数据可以看出蚕丝传统产业与高科技产业的巨大价值差距：以丝绸制品为例，一条奢侈品牌的领带大约需要30克蚕丝，售价约为两三千元；一床普通蚕丝被需要用两公斤左右蚕丝，售价不过千元；而蚕丝蛋白制备的一套可降解骨钉，所需原料不到1克，其对应产品的临床售价可高达8000至10000元。换言之，一床普通蚕丝被的原料经过现代科技加工，可产出2000万元的经济价值——这就是科技的价值，也是丝绸这一古老文明焕发新春的重大机遇。

### 预设时间内可控降解，开启全新学科领域

蚕丝蛋白不仅在医疗器械上大有用武之地，还因其机械性能佳、介电损耗小、能可控降解、可兼容大部分微纳加工工艺等特点，而被用作电子器件的基底和介电材料，由此衍生出了一个全新学科领域——瞬态可溶电子学。

瞬态可溶电子器件是指当所制备的电子单元、器件、芯片及微系统在预设时间内完成指定功能后，其物理形态和功能可部分或者完全消失的一类全新电子器件。它们可在完成设定任务后，于体内或环境中完全降解，并通过生物再吸收或生态再吸收。

这类器件在信息安全、植入式可控降解生物芯片、电子垃圾回收等领域，具有非常广阔的应用前景，尤其在健康医疗、环境保护等未来电子技术领域，有望产生颠覆性突破和革命性创新。

### 存储数据和DNA，锁住数字与生命的记忆

优异的力学性能、良好的生物兼容性、极佳的光学性质，使得蚕丝蛋白可通过先进的微纳加工技术，被制备成透镜、薄膜、光纤、光子晶体等生物光学和光电子器件。

值得一提的是，经过工艺改良，蚕丝蛋白可作为生物光刻胶用于半导体集成电路加工工艺，并在人体可集成柔性传感器方面表现出巨大的应用潜力。

得益于蚕丝蛋白所具备的易于成膜、兼容大部分微纳加工工艺等特性，结合高精度近场快速读写手段，我国科研人员实现了基于蚕丝蛋白的高容量生物存储技术，研制出了“蚕丝硬盘”——通过纳米针尖将红外光聚焦，在纳米尺度下对蚕丝蛋白进行改性，从而达到信息存储和读取的目的。

蚕丝蛋白就是国际上首个瞬态可溶电子微系统的基底和封装材料。这个微系统用可降解的镁、氧化镁、纳米硅膜等半导体功能材料，集成了一系列基本电子元件。整个微系统放置在生理盐水中，大约10分钟就可溶解完毕。

基于瞬态可溶电子技术，随后又诞生了全球首个面向特定临床治疗功能、完全生物相容、可在降解后吸收的植入式器件。它同样以蚕丝蛋白为衬底材料，可植入生物皮下用于治疗细菌感染。

蚕丝蛋白还是一种性能优良的有机材料，受“瞬态可溶电子技术”启发，科学家又提出“瞬态可溶光学技术”的概念，并制造出了单色和多色的蚕丝蛋白光学衍射元件，并将其开创性地应用到信息技术和生物医疗领域中。

蚕丝硬盘作为一种高容量、高可靠性的新型存储技术，不仅可以像普通半导体硬盘那样存储数字信息，还可为活性生物信息存储提供一个功能强大的平台。新近问世的蚕丝硬盘即可同时存储人体DNA和血液样本。

此外，蚕丝硬盘还能按照预设的时序进行可控销毁，从而用于信息保密。目前，科研人员已用这种技术实现了图像和音频文件准确记录、存储和读取的原理验证。未来，通过对蚕丝硬盘存储容量和读写速率的不断优化改进，该技术有望成为下一代高容量、高可靠性的信息存储技术。现在可以想象的应用场景包括：永不丢失的生命铭牌、可控寿命的时间胶囊、外太空等极端条件下的信息保存，以及数字信息和生命信息的复制等。

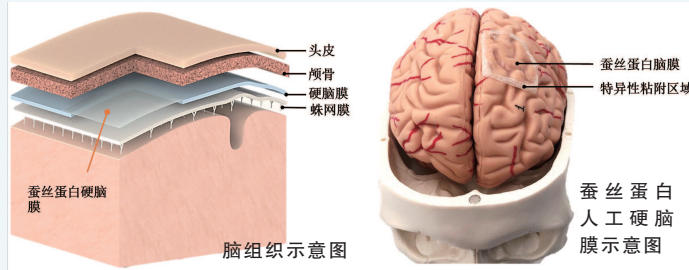
作为中国古代文明的一个重要象征，丝绸与中国古代四大发明——造纸术、指南针、火药和印刷术一样，都产生过世界性影响。

蚕丝是自然界中最轻柔最细的天然纤维之一，在高科技的“塑造”下，如今它早已超越了纺织面料的传统用途，逐步发展成为先进的生物高分子聚合物，参与生物传感器、电子元器件等的制备，展现出在未来人工智能、健康医疗、环境保护等领域的巨大应用前景。



## 古丝新用

### 蚕丝蛋白人工硬脑膜



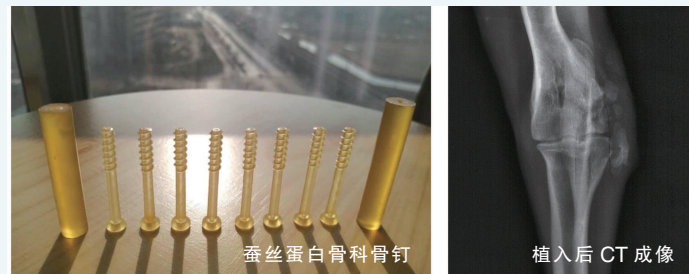
脑膜是人体颅骨和脑组织之间的一道重要屏障，它最主要功能是保护脑组织。当脑膜受损时，会引起脑脊液漏、脑膨出、颅内感染、癫痫等并发症，必须对破损的脑膜进行修补。

蚕丝蛋白脑膜以天然蚕丝中提取的丝素蛋白为基础，通过脱脂、透析、离心、冻干、成型等工艺过程开发蚕丝蛋白薄膜材料，生产过程绿色无毒。其机械性能与天然脑膜相当，可防止颅内压过大造成的人工硬脑膜破裂。

此外，在蚕丝蛋白膜中，可搭载抗生素和生长因子等药物。当蚕丝蛋白膜植入体内后，这些

药物将缓慢释放，起到化学抑

### 蚕丝蛋白骨科骨钉

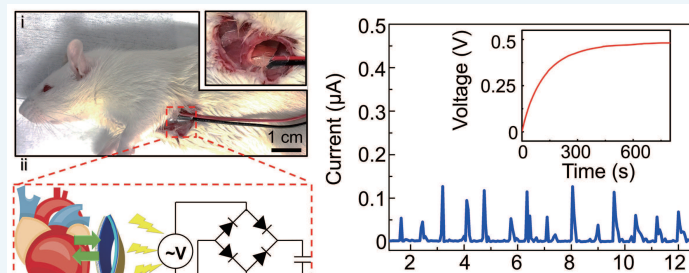


在生物医用材料中，植入式医疗器械中的人工骨固定产品具有极大的市场和临床需求，全球人工骨固定产品市场总销售额估计在300亿美元以上。

蚕丝蛋白作为骨科内固定材料主要具有几个优势：1、具有骨传导性，修复骨缺损的速度较快，相对基于聚乳酸或者钛合金的同类产品，适用于较大的骨质缺损，可在降解后吸收的植入式器件；2、相比聚乳酸，其机械强度足

以作为承力部位的骨折内固定材

### 蚕丝蛋白水凝胶



以蚕丝蛋白为原料制备的蚕丝蛋白水凝胶，既能保留天然细胞微环境的物质结构基础，又能很好地模拟细胞体内微环境，常用于三维细胞培养的细胞支架材料。

研究表明，将骨髓间充质干细胞（HMSCs）接种到混有培养基的蚕丝蛋白水凝胶材料上，随着蚕丝蛋白浓度的增加，

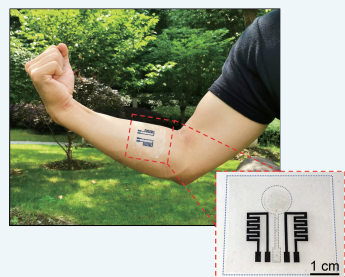
HMSCs细胞可以在蚕丝蛋白水凝胶上较好地生长，这也使得蚕丝蛋白水凝胶支架在骨组织修复有着广泛的应用前景。

原位可注射蚕丝蛋白水凝胶能够快速凝胶化，满足了在体内注射后凝胶能够立即成型的需要，因此原位可注射蚕丝蛋白水凝胶是一种理想的微创手术。

### 蚕丝皮肤电子系统

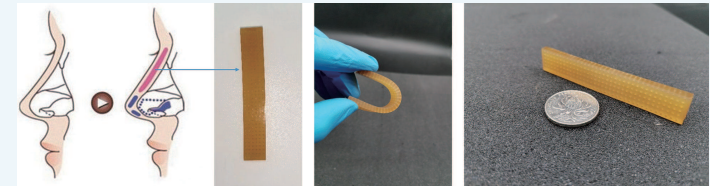
一种基于蚕丝蛋白材料的人体“友好”皮肤电子系统，可在使用过程中稳定牢固贴附于人体皮肤表面，测量人体电信号与多种生理化学分泌物，使用过后可以通过触发完成快速可控分离，可实现与人体皮肤集成的多维度实时测量。

此外，针对测量得到的多模态大数据，科研人员开发了一款基于人工神经网络的机器学习算法，可准确区分人体的多种生理状态，为人体全天候健康监测提供了一种有效的解决方案。这项研究将皮肤电子与机器学习相结合，对个性化智能医疗可带来至关重要的影响。



人体“友好”电子皮肤实物展示照片（电子皮肤贴附于人体手臂）

### 蚕丝蛋白鼻假体

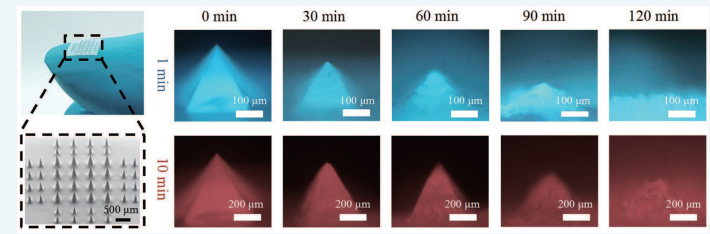


近20年来，我国医疗美容行业已涵盖了医疗美容、医疗美容、注射美容等多个领域，同时涉及到包括外科、骨科、妇科、口腔等学科在内的许多专业。

选择医疗美容材料，需要满足对人体无毒无害、与人体组织的相容性、稳定性好，以及植入人体组织后无排斥反应、手术时操作便利、可塑性好等条件。蚕

丝蛋白材料是颇具代表性的天然生物医学材料。它生物相容性良好，可通过多种加工方法制备成各种形状，并可调控蚕丝蛋白材料的孔隙率、力学性能、弹性等特性，是一种理想的医疗美容材料。此外，可在蚕丝蛋白材料中预先负载抗菌消炎药物或者细胞生长因子，以形成多功能的蚕丝蛋白医疗及美容材料。

### 蚕丝蛋白微针



微针给药系统是一种集皮下注射与透皮贴片双重释药特点的微侵袭透皮给药系统，其作用机制是药物通过微针穿透皮肤角质层后形成的微小孔道进入皮肤，达到促进经皮渗透和到达皮肤特定深度的目的。

蚕丝蛋白因其优异的机械性能、生物相容性和可降解性，可以用

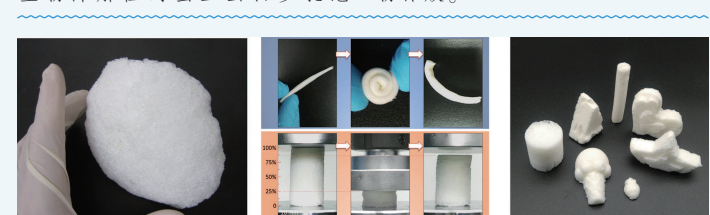
来作为新型的生物可降解微针材

料。通过预先负载药物分子的方式，科研人员可将蚕丝蛋白溶液功能化，随后通过微纳加工的方式将蚕丝蛋白加工成微针的形式，微针通过微创的方式向人体内输送药物，并且通过调控蚕丝蛋白的晶体结构，在时间和空间上控制其降解，从而精准控制药物分子的释放。

### 蚕丝蛋白干细胞支架

由于蚕丝蛋白是一种天然聚合物，纯度高、机械强度高，并具有良好的生物相容性，非常适用于组织工程。它可作为组织工程中提供干细胞生长的支架材料，同时也能够应用于骨再生的支撑材料。

以蚕丝蛋白为原料制备的具有三维孔隙率（孔隙分布均匀、孔隙率高、孔隙连通性好）、力学性能佳、具有良好的生物相容性及生物降解性的蚕丝蛋白多孔泡沫



蚕丝蛋白材料可通过多种加工方法制备成凝胶材料、多孔泡沫材料等多种形态，并可调控蚕丝蛋白材料的孔隙率、力学性能、弹性等特性。