

丝素蛋白在护肤护发领域的研究进展

柴雪晴^{1,2}, 张兴卓^{1,2}, 李昭灿^{1,2}, 邢江艳^{2,3}, 孟宏^{1,2}, 靳玉娟^{1*}

(1.北京工商大学, 北京, 100048;

2. 丝蛋白生物科技协同创新中心北京工商大学-奥丝美联合实验室, 北京, 100048;

3. 北京绮丝创新科技有限公司, 北京, 100085)

DOI:10.61369/CDCST.2026010018

摘 要: 文章简要综述了丝素蛋白的结构性能、制备方法、提取工艺, 及其在护肤护发领域美白保湿、抗衰老、滋养修复等作用的研究现状, 系统梳理了其在皮肤和头发产品中的应用, 以期对丝素蛋白护肤护发产品的开发提供指导。

关 键 词: 丝素蛋白; 提取工艺; 护肤护发

第一作者简介: 柴雪晴, 硕士研究生, 就读于北京工商大学轻工科学与工程学院, 从事丝素蛋白相关研究工作。

E-mail: 3114616185@qq.com。



柴雪晴

随着消费需求升级, 兼具功效、安全与环保的天然生物材料备受重视。丝素蛋白作为源自蚕丝的天然蛋白, 凭借其亲水性氨基酸和 β -折叠结构, 在护肤护发领域展现出多重仿生修复潜能。在护肤方面, 它能形成透气保湿膜, 高效锁住水分并促进屏障修护, 还可作为载体协同递送美白等活性成分, 并辅助抵抗氧化等环境压力。在护发领域, 其水解产物可吸附于发丝, 在表面形成保护层以提升光泽顺滑度, 同时渗透内部补充氨基酸, 从而强化头发纤维弹性、对抗损伤。当前, 丝素蛋白的深入应用仍面临提取工艺优化、配方稳定性及成本控制等挑战。因此, 系统性地论述丝素蛋白在护肤护发中的作用机理, 并推动其与现代制剂技术的融合, 对开发高效、安全的丝素蛋白功能性个人护理产品具有重要的科学价值与市场意义。

1. 丝素蛋白的结构性能与制备

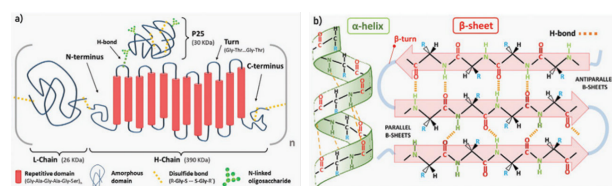
1.1 分子结构与理化性质

丝素蛋白的性能归根结底源于其精密的分子构象和化学组成。深入了解其“结构-性能”关系, 是设计并优化其护肤护发应用的前提。

1.1.1 亲疏水交替的氨基酸序列

丝素蛋白主要由家蚕后部丝腺合成并分泌, 其基本结构单元是由一条重链(H)和一条轻链(L)通过二硫键连接以及分泌到后丝腺中的糖蛋白(P25)组成, 一般认为H链、L链和P25的组装比例为6:6:1。丝素蛋白的H链由高度重复的疏水区块与相对亲水的区块交替排列, 其氨基酸组成为: 甘氨酸(Gly, 46%)、丙氨酸(Ala, 30%)、丝

氨酸(Ser, 12%)、酪氨酸(Tyr, 5.3%)、缬氨酸(Val, 1.8%)等^[1]。图1为丝素蛋白的结构示意图。



注: (a) 丝素蛋白主蛋白质折叠示意图; (b) 丝素蛋白的 α -螺旋、 β -折叠示意图^[2]。

图1 丝素蛋白的结构示意图

Zhou等报道了H链的一级结构, 该氨基酸序列大致可分为四个沿肽链交替排列的基序: (i)、(ii)、(iii)和(iv)。基序(i)由高度重复的AGSGAG序列构成, 并形成了纤维的疏水结晶区域。AGSGAG序列的重复次数总计为433次(共2598个氨基酸残基)。由于H链的氨基酸残基总数为5263个, 因此几乎一半是AGSGAG序列^[3]。基序(ii)是一个重复性相对较低的序列, 包含疏水性和/或芳香族残基GAGAGY、GAGAGV和GAGAGVGY。基序(iii)与基序(i)的序列非常相似, 只是存在一个AAS基序。最后, 基序(iv)含有带负电荷、极性、大体积疏水性和/或芳香族残基, 并构成了丝素蛋白H链的亲水非结晶区域^[4]。

1.1.2 β -折叠为主导的构象多态性

在剪切力、甲醇处理或脱水条件下, 丝素蛋白疏水区域的氨基酸链会从 α -螺旋构象转变为高度有序的 β -折叠构象。在 β -折叠片中, 多肽链充分伸展, 通过链间氢键相互连接, 形成平行或反平行的片层结构。这些 β -折叠片再通过范德华力紧密堆叠, 构成尺度仅为数纳米的结晶区, 赋予了丝素蛋白极高的刚性和强度。同时, 连接结晶

区的亲水性非结晶区则提供了分子链的柔性和运动能力。这种“刚性结晶区”与“柔性非晶区”的纳米级复合,是丝素材料兼具高强度与良好韧性的根本原因。此外,丝素蛋白的构象具有动态可调性,通过控制 pH、离子强度、溶剂等加工条件,可以调控 β -折叠的含量与分布,从而获得从可溶状态到不溶凝胶、薄膜、纤维等不同形式的材料。

1.1.3 丝素蛋白的关键性能

丝素蛋白的结构直接决定了其在护肤护发领域的价值性能。

(1) 成膜性

高含量的 β -折叠结晶网络,使丝素蛋白材料展现出优异的机械强度、韧性和弹性模量。当其应用于皮肤或发丝表面时,丝素蛋白溶液能通过水分蒸发诱导分子链自组装,形成一层致密、透明、透气且具有良好的附着力的柔性保护膜。它不仅能减少皮肤经皮水分流失,实现长效保湿,还能在头发表面形成光滑涂层,有效抚平受损毛鳞片,减少摩擦,提升发丝的光泽感和顺滑度。

(2) 保湿性

丝素蛋白分子中含有大量亲水性氨基酸残基,这些极性基团能通过氢键有效结合水分子。其多孔的网络结构具备物理吸附和保持水分的能力。更重要的是,其 β -折叠结晶区作为物理交联点,能形成稳定的三维网络,防止材料在水中过度溶胀溶解,从而实现对水分的“智能”调控。

(3) 生物相容性与可降解性

丝素蛋白源自天然,其最终降解产物为氨基酸,对人体无害,具有良好的生物相容性,极少引起炎症或过敏反应,这使其非常适合用于敏感性皮肤和直接接触人体的护理产品。其降解速率可通过调控 β -折叠含量来精确控制,这为实现活性成分的控制释放提供了可能。

(4) 负载活性成分

丝素蛋白分子的亲疏水区块以及其自组装形成的多级网络结构,为各类活性成分提供了包载的理想场所。疏水性成分可嵌入疏水微区或通过疏水相互作用结合;亲水性成分则可通过氢键等作用分散于亲水区域。其 β -折叠网络能稳定被包载的成分,防止其氧化失活,并实现基于扩散或材料降解的缓慢、持续释放,提高活性成分的利用效率和作用时间。

(5) 抗氧化与辅助防护

丝素蛋白分子中的酪氨酸、色氨酸等氨基酸残基具有

一定的自由基清除能力,可提供基础的抗氧化保护。此外,其形成的致密物理屏障,不仅能抵御外界污染物和微生物的附着,对紫外线、热辐射等环境压力也具有一定隔离缓解作用,为皮肤和头发提供防护。

1.2 提取工艺

丝素蛋白的提取工艺是将其从天然蚕丝原料转化为可应用于护肤护发领域功能性原料的关键技术环节。这一过程不仅直接决定了丝素蛋白的分子量、结构构象、纯度和溶解性等核心性质,也深刻影响着其最终产品的生物活性、稳定性和应用性能。丝素蛋白主要的水解方法有:酸水解、碱水解、酶水解以及中性溶解体系如无机盐体系(常用溶解液有钙盐溶解液、钙醇水三元溶解液、溴化锂溶解液等)。基于现有文献,丝素蛋白的提取工艺可系统地归纳为四个核心步骤(如图2所示):原料前处理、脱胶、溶解与纯化,各步骤中的工艺选择与参数调控共同塑造了最终产物的特性。

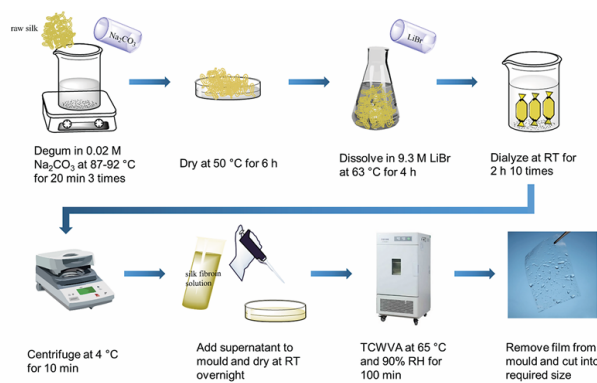


图2 提取并制备丝素蛋白膜的示意图^[5]

1.2.1 原料前处理

提取的原料主要为桑蚕或柞蚕蚕茧、生丝及废弃丝制品。对于废弃丝制品,需先进行除杂与剥色处理,以去除染料、助剂等杂质。使用特定剥色剂在温和条件下处理,获得高达98%以上的剥色率,为后续提取高纯度丝素蛋白奠定基础^[6]。此步骤确保了原料的均匀性和后续反应的效率。

1.2.2 脱胶工艺

脱胶旨在去除包裹丝素蛋白的丝胶蛋白。传统工业上广泛采用皂碱法(如碳酸钠或碳酸氢钠溶液蒸煮),该方法脱胶效率较高,但高温强碱条件可能导致丝素蛋白部分水解,分子量分布变宽,且产生高化学需氧量的废水,对环境不友好。研究表明,通过调控碱液的浓度、温度和处理时间,可以定向获得不同分子量分布的丝素蛋白,脱胶时间延长通常导致分子量减小^[7]。为克服传统方法的弊

端,酶法脱胶成为研究热点。在优化条件下,酶法能在更短时间内实现更高的蛋白溶出率,且处理后的丝素纤维损伤小、色泽好,废水污染负荷显著降低,更符合绿色生产理念^[8]。

1.2.3 溶解工艺

脱胶后的纯丝素纤维需溶解于溶剂中以制备再生丝素蛋白溶液。最经典的体系是三元溶剂系统, $\text{CaCl}_2\text{-H}_2\text{O-C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (摩尔比通常为1:8:2)^[9]。该体系能有效破坏丝素蛋白的 β -折叠结晶区,使其溶解。溶解温度和时间是关键参数,直接影响溶解效率和丝素蛋白的分子量。研究表明,在优化的钙醇体系中溶解,可获得更高含量、更小分子量的丝素蛋白,从而更易溶于水,便于后续加工^[10]。此外,微波辅助加热可通过内部快速均匀加热,促进蚕丝快速溶解,所得蛋白溶液分子量分布更均匀,且对丝素蛋白天然结构的破坏可能更小,产率较高^[11]。

1.2.4 纯化与后处理

溶解后的溶液需经过透析以彻底去除小分子盐类和溶剂,获得纯净的丝素蛋白水溶液。随后可通过过滤或离心去除不溶杂质。根据最终应用需求,丝素蛋白溶液可直接使用,或进一步冷冻干燥加工成固体形态以便储存和运输。冷冻干燥过程本身一般不会改变丝素蛋白以无规卷曲和 α -螺旋为主的构象。通常,再生丝素蛋白水溶液中主要以不稳定的Silk I构象存在,但在后续成膜、成胶或乙醇等有机溶剂处理后,会不可逆地转变为更稳定、以 β -折叠为主的Silk II结晶结构,这一转变对其力学性能、耐水性和作为缓释载体的能力至关重要^[12]。

丝素蛋白的提取工艺已从传统的皂碱法向更精细化、绿色化和可控化的方向发展。通过精准调控脱胶与溶解的化学物理条件,可以获得特定分子量范围、特定构象和功能特性的丝素蛋白,满足护肤护发领域不同剂型对原料的个性化需求。

2. 护肤护发功效与作用机制

丝素蛋白凭借其独特的氨基酸组成、多级结构以及优异的生物相容性,在皮肤与头发护理领域展现出优异的生物活性。其功效并非单一作用的结果,而是通过物理防护、生化调节和主动修复等多重机制协同实现。本章将深入探讨丝素蛋白在解决皮肤色素沉着、屏障损伤、光热老化以及头发受损等关键问题上的功效表现与科学机制。

2.1 美白与淡斑

皮肤色素沉着的核心病理基础是黑色素细胞中黑色素的过度合成、异常积聚或转移紊乱。丝素蛋白本体因分子量大、渗透性弱,美白活性有限,但其经水解或修饰得到的衍生物具有良好的生物相容性与分子活性,已被多项体外细胞实验及动物模型研究证实具有显著的美白、淡斑功效,其作用机制主要靶向黑色素代谢的关键节点,形成多通路协同调控效应。

Wang等^[13]针对B16黑色素瘤细胞进行了深入研究并阐明了丝素蛋白的潜在美白机制。该研究通过无标记定量蛋白质组学技术对比分析了丝素蛋白提取物与经典美白剂曲酸的作用异同。研究发现,丝素蛋白并非直接强力抑制酪氨酸酶的即时酶活性,而是通过调控其上游表达来实现长效抑制。生物信息学富集分析表明,丝素蛋白的处理影响了氧化还原过程、RNA加工、脂肪酸降解以及黑色素生物合成在内的多条通路。其中,针对黑色素合成通路的核心调控因子—黑素细胞诱导转录因子(MITF)及其下游的关键酶酪氨酸酶,研究进一步验证了丝素蛋白能显著下调它们的蛋白表达水平。MITF是调控黑色素细胞分化和黑色素生成相关基因表达的“总开关”,丝素蛋白通过抑制MITF,进而减少酪氨酸酶的表达,从源头减缓了黑色素的生物合成速率,SF对黑色素生成的可能抑制机制如下图3所示。

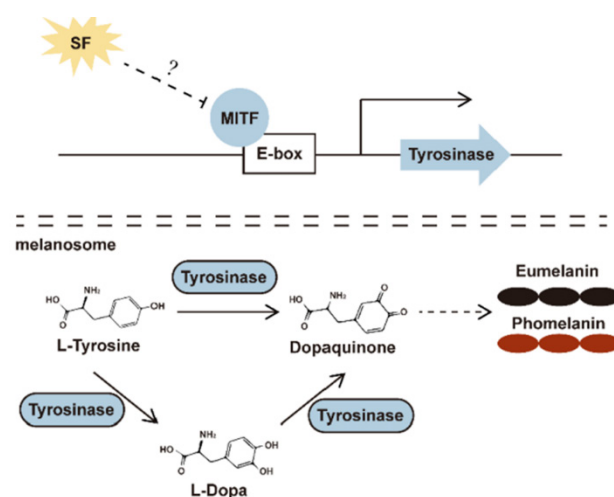


图3 SF对黑色素生成的可能抑制机制^[13]

Lu等^[14]设计了一种具有核壳结构的丝素蛋白微针的贴片,用于程序化释放氨甲环酸与谷胱甘肽。该体系借助丝素蛋白壳层通过结晶度调控形成长效释放通道,并利用芯层醋酸纤维素的亲水性修饰实现对药物释放动力学的分级控制,从而在24小时内实现谷胱甘肽与氨甲环酸的时序性

释放。实验表明,该微针能显著提高药物的皮肤滞留与生物利用度,并通过协同抑制酪氨酸酶活性及下调内皮素-1的表达,双重阻断黑色素的合成与转运。在动物模型中,仅三次贴敷即观察到色素沉着明显减轻,治疗28天后皮肤色泽基本恢复正常,核壳微针的组成和工作原理如下图4所示。该研究不仅证实丝素蛋白可作为高效、安全的载体实现对美白活性成分的经皮递送,更通过结构创新实现了释放行为的精准调控,为色素性疾病的临床治疗提供了兼具长效性与微创性的新策略。

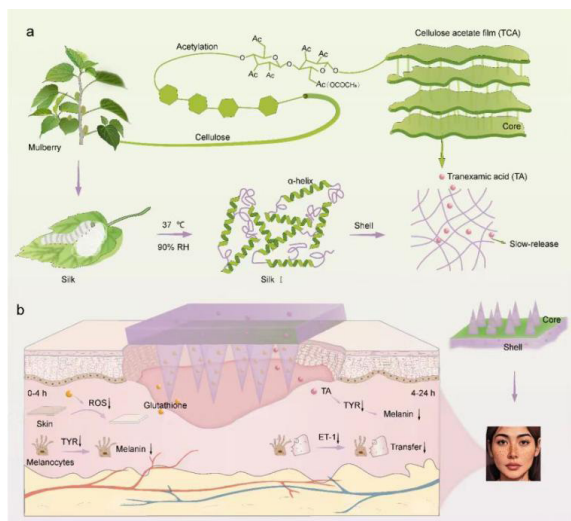


图4 SF核壳微针的组成和工作原理示意图^[14]

2.2 保湿与屏障修复

皮肤屏障功能的核心在于角质层构建的“砖墙结构”,其中角质形成细胞作为“砖块”,细胞间脂质作为“灰浆”,二者协同维持皮肤水分稳态与外界防御能力。丝素蛋白在保湿及屏障修复领域的优异效能,本质上源于其独特的理化特性与皮肤屏障结构的仿生适配性,可通过被动防护与主动调控双重机制发挥作用。

2.2.1 高效吸湿

丝素蛋白在皮肤保湿方面的潜力,源于其独特的界面调控与亲水特性。研究表明,丝素蛋白作为一种天然两性分子,能有效降低水的表面张力,显著提升水溶液在疏水表面的润湿与铺展能力。这种特性对于皮肤保湿具有重要意义,因为皮肤表面具有疏水性,许多传统保湿成分难以有效附着与渗透。丝素蛋白分子能够自适应地吸附在不同表面能的基质上,促进水分与皮肤角质层间的相互作用,从而增强皮肤表面对水分的捕获与保持能力^[15]。这使其能够协助构建更为稳定、亲肤的水性配方体系,促进其他保湿活性成分在皮肤表面的均匀分布与驻留。

2.2.2 调控皮肤屏障修复

丝素蛋白具有促进组织再生的能力,已成为皮肤组织工程与创面敷料研究的关键生物材料。丝素蛋白能有效促进皮肤伤口愈合,其机制涉及多个层面。首先,丝素蛋白支架能模拟细胞外基质的结构和功能,为细胞黏附、迁移和增殖提供三维支持。其次,研究表明丝素蛋白可激活如NF- κ B等关键信号通路,调控炎症反应,并促进上皮化、血管生成及胶原蛋白有序沉积,从而加速愈合进程。为优化其修复性能,常将丝素蛋白与壳聚糖、明胶、藻酸盐等生物材料复合,或通过负载生长因子、抗菌成分及功能肽进行生物功能化^[16]。

2.3 抗衰研究

2.3.1 抗内源性衰老

丝素蛋白能够超越单纯的物理填充,主动促进真皮组织的内源性修复与再生。Cheng等^[17]研究表明,丝素蛋白可通过多路径协同发挥抗衰功效,其关键机制之一是显著促进胶原蛋白,特别是III型胶原的合成与再生。III型胶原被誉为“婴儿胶原”,是维持皮肤弹性与柔韧性的关键成分,其含量随年龄增长而急剧下降。研究证实,基于丝素蛋白的复合水凝胶在植入后,能有效激活皮肤成纤维细胞,特异性上调III型胶原的表达与分泌,从而从根源上改善皮肤质地、减少皱纹,实现由内而外的年轻化,其功能示意图如图5所示。此外,丝素蛋白的抗衰作用还与其对皮肤微环境的综合调控有关。它不仅能增强细胞与填充材料间的黏附,提供更持久的力学支撑,还能通过调节氨基酸代谢、脂质代谢等细胞代谢通路,优化成纤维细胞的功能状态,全面提升皮肤活力。相较于传统仅具物理占位效应的填充材料,丝素蛋白实现了“填充、修复、再生”三位一体,为开发兼具即时效果与长期抗衰功能的护肤品提供了坚实的科学依据。

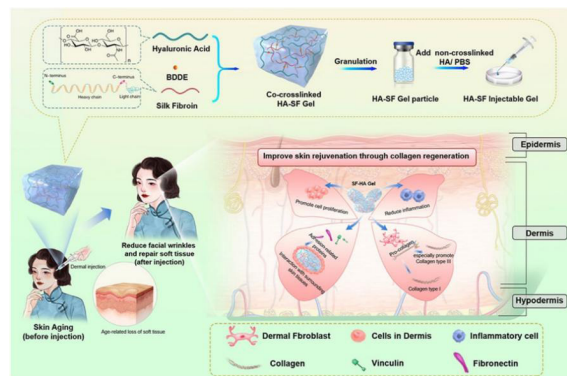


图5 HA-SF 共交联水凝胶增强组织黏附及III型胶原蛋白再生功能示意图^[17]

2.3.1 抗外源性光热老化

丝素蛋白在构建智能响应型抗光热老化体系中展现出独特潜力。**Hu等**^[18]通过将丝素蛋白与聚乳酸结合制成平行取向的复合膜,并进一步负载具有高效近红外吸收与光热转换能力的金-聚多巴胺黑球(AuPBs),可构建一种多功能复合平台,该体系的作用机制为抗光热损伤提供了新思路。在特定近红外光照射下,AuPBs产生的可控热效应能温和激活皮肤的成纤维细胞、角质形成细胞等膜上的TRPV1离子通道,促使钙离子内流。这一过程模拟了有益的生理性热刺激,可激活细胞内信号通路,进而上调如脑源性神经营养因子、神经生长因子等关键生长因子的表达。同时,体系中的聚多巴胺成分能有效清除照射过程中可能产生的活性氧,减轻炎症反应,并促进血管内皮生长因子表达以改善局部微循环。因此,基于丝素蛋白的此类光热响应复合材料,能够将外源性的近红外光能转化为对皮肤细胞有益的生物信号,通过“热激活-抗氧化-促修复”的协同机制,从多维度抵御和修复光热损伤。

Quan等^[19]通过将丝素蛋白与经聚多巴胺和聚乙二醇修饰的氧化铁纳米颗粒复合,构筑了一种兼具“被动防护”与“主动干预”双重功能的涂层体系。该体系的抗光热老化机制在于协同作用。首先,丝素蛋白与功能化纳米颗粒的复合结构能显著降低细菌在表面的黏附,这为皮肤提供了基础的物理屏障,减少了外界刺激引发的初始炎症风险。其次,该体系具备优异的光热响应性。在特定近红外光照射下,复合涂层中的纳米颗粒能将光能高效转化为热能,产生可控、局部的光热效应。这一过程并非单纯的加热损伤,而是可以被精确调控,用以实现“按需”的生物效应激活或有害物质清除。更重要的是,丝素蛋白在其中扮演了不可或缺的角色。它不仅是将纳米颗粒稳固负载的基质,其本身优异的生物相容性确保了整个体系对皮肤细胞的安全与亲和性,避免了由材料本身引发的刺激。这种“丝素蛋白基可控光热响应平台”的设计理念,为开发抗光热老化产品提供了创新思路。

2.4 毛发修复

在护发功效研究方面,丝素蛋白的应用正从传统的表面修护向主动促进毛囊再生与毛发生长的深度干预拓展,展现出作为功能性生发材料的潜力。其核心机制在于利用丝素蛋白构建能够优化毛囊微环境、提供再生信号的递送系统。研究表明,基于再生丝素蛋白的复合水凝胶体系在促进皮肤全层愈合的同时,能够有效诱导新生毛发的形

成。**Chen等**^[20]将丝素蛋白与聚(N-异丙基丙烯酰胺)及包覆液态金属的纳米粒子复合,可构建一种具有光热响应性的双交联水凝胶。在动物感染创面模型中,该水凝胶在近红外光照射下不仅能高效抗菌、加速创面闭合,更在14天内观察到新生皮肤伴随毛发的生成。组织学分析进一步揭示,该治疗促进了真皮层内有序的胶原沉积和上皮化进程。这一发现提示丝素蛋白可能通过多重协同机制助力护发:其一,其形成的三维网络结构能为毛乳头细胞等提供仿生的支撑微环境;其二,通过响应性释放或产生的局部效应,可调节毛囊周期相关的信号通路,激活处于休止期的毛囊;其三,通过促进血管新生及抑制炎症,从根本上改善毛囊的健康存活环境。因此,丝素蛋白已超越其在发丝表面形成保护膜的物理性护发角色,正向干预毛囊生物学过程、促进毛发再生的生物活性材料方向发展。

3. 典型应用形式

3.1 乳液

乳液是护肤产品中常见的基础剂型,丝素蛋白在乳液体系中具有较好的应用适配性,已成为功能性护肤配方中的常用添加成分。在护肤乳液体系中,再生丝素蛋白展现出优异的Pickering乳化性能。研究表明,再生丝素蛋白可在油水界面自组装形成微纤维-纳米膜互连网络结构,有效稳定鱼油负载乳液,31天室温储存乳析指数低至0%~10%^[21]。该乳化能力受油水体积比、均质化能量及再生丝素蛋白浓度协同调控,高内相乳液可实现半固体质地转换。

3.2 面膜

丝素蛋白在面膜应用中展现出多重护肤优势。其能在皮肤表面形成一层透气保水的“生物屏障”,有效锁住水分并支持皮肤自由呼吸,长期使用有助于强化皮肤屏障功能。同时,丝素蛋白能温和刺激表皮细胞更新、促进伤口愈合,因而常被用于修复型面膜配方^[22]。它富含的氨基酸还能能为皮肤细胞提供营养,促进胶原蛋白合成,从而帮助抗皱与紧致。此外,其良好的加工适应性使其能通过静电纺丝、溶液浇注等绿色工艺,被制成纳米纤维膜、水凝胶等多种形式,兼顾力学强度与贴肤柔韧性。将丝素蛋白与透明质酸、蜗牛黏蛋白等其他活性成分复合,通过精确调控配比来实现力学性能和降解速率的“可编程”,这为开发能够分时释放营养成分的智能控释面膜奠定了关键技术

基础^[23]。

3.3 防晒产品

丝素蛋白具有优异的紫外吸收能力，近年来在防晒领域的应用受到了广泛关注。研究表明，丝素蛋白不仅能够吸收紫外光，还能有效地减少紫外线引发的皮肤损伤和炎症反应。

通过将丝素蛋白制备为微球（SFMP），研究进一步增强了其在防晒中的效果。SFMP的紫外线防护能力较传统的有机防晒成分有显著提高，且具有较好的稳定性。Wang等^[24]发现，SFMP能够有效反射UV光，并比二氧化钛更有效地清除紫外线产生的自由基，如图6所示。此外，SFMP在模拟汗水环境中的稳定性也得到了验证，实验结果表明，在8小时的模拟汗水环境下，SFMP仍能保持较高的紫外线阻挡能力^[25]。

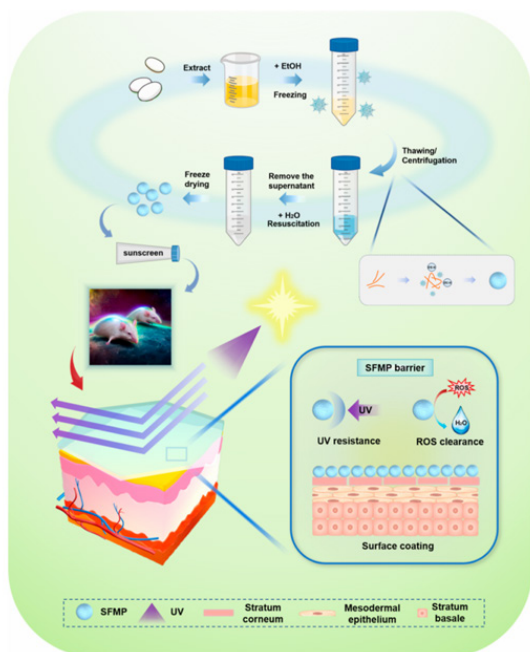


图6 用于紫外线防护的SFMP示意图^[24]

丝素蛋白的防晒作用不仅限于物理屏蔽，还包括其抗氧化和抗炎特性。研究表明，丝素蛋白能够通过清除自由基、减轻细胞氧化损伤，从而减少紫外线引发的皮肤炎症^[13]。此外，Wang等还进一步研究了丝素蛋白对黑色素合成的抑制作用，结果表明，丝素蛋白能够通过抑制MITF和酪氨酸酶的表达，减少黑色素的合成，从而减轻皮肤色素沉着^[26]。这些研究为丝素蛋白在防晒护肤产品中的应用提供了理论依据和技术支持。

3.4 护发素与发膜

发膜与护发素是护发产品中常用的调理型剂型，主要通过毛发表面形成覆盖层或与角质层相互作用，改善发

丝的顺滑性、光泽度及可梳理性。研究表明，丝素蛋白可作为护发基材模拟头皮细胞外基质微环境。具体而言，Rajasekaran等^[27]通过构建丝素蛋白/聚己内酯电纺纤维支架证实，高丝素蛋白负载量能显著促进细胞增殖与组织浸润，该特性若应用于发膜基质设计，有望增强活性成分对毛囊的渗透效率。在功能化改性方面，Fan等^[28]开发的抗炎肽偶联丝素蛋白/冷冻凝胶杂化支架，通过调控巨噬细胞极化改善慢性创面炎症微环境，此策略为缓解脂溢性脱发相关的头皮炎症提供了新思路。

与此同时，丝素蛋白的载药能力为其在护发素中的复配应用创造可能。Dou等^[29]将益生菌负载于丝素蛋白/海藻酸钠双层支架，利用丝素蛋白网络提升菌株存活率并持续释放乳酸，实现抗菌与促修复双重功效；该体系对金黄色葡萄球菌的抑制率达90%以上，为去屑护发产品解决马拉色菌继发感染问题提供了技术原型。Cheng等^[30]进一步将光热功能整合至丝素蛋白水凝胶，通过近红外辐照增强抗菌活性，这种“护发素+物理治疗”的跨界模式或可为顽固性头皮感染提供家用解决方案。

4. 结论

丝素蛋白作为源自蚕丝的天然结构蛋白，其独特的氨基酸组成与 β -折叠结构是在个人护理领域发挥多功能作用的核心基础。在护肤方面，它不仅能通过物理成膜实现长效保湿和屏障修护，还可作为智能载体协同递送美白、抗衰等活性成分，通过调节黑色素代谢通路、促进胶原再生等多重机制，有效应对色素沉着、皮肤老化等问题。在护发领域，其水解产物能附着于发丝，通过填补毛鳞片损伤和内部营养补充，显著改善发质光泽与强韧度。当前研究已推动丝素蛋白从传统膜材发展为面膜、乳液、防晒及智能响应型复合体系等多种应用形式。尽管其在产业化过程中仍面临稳定性优化、成本控制等挑战，但通过与现代制剂技术融合，丝素蛋白有望为开发更高效、安全的天然来源个人护理产品提供创新解决方案。

参考文献

- [1] Satoshi Inoue, Kazunori Tanaka, Fumio Arisaka, et al. Silk Fibroin of Bombyx mori Is Secreted, Assembling a High Molecular Mass Elementary Unit Consisting of H-chain, L-chain, and P25, with a 6:6:1 Molar Ratio [J]. THE JOURNAL OF BIOLOGICAL CHEMISTRY,

2000, 275(51): 40517–40528.

[2]Ander Reizabal, Carlos M. Costa, Leyre Pérez-Álvarez, et al., Silk Fibroin as Sustainable Advanced Material: Material Properties and Characteristics, Processing, and Applications [J]. *Advanced Functional Mater.* 2023, 33: 2210764.

[3] 龚砚硕, 付钢. 丝素蛋白在骨组织工程中的应用 [J]. *生物医学*, 2025, 15(4), 773–779.

[4] Asakura, Tetsuo. Structure of Silk I (Bombyx mori Silk Fibroin before Spinning) –Type II β –Turn, not α –Helix–, [J]. *Molecules*, 2021, 26: 3706.

[5] Wei Zhang, Longkun Chen, Jialin Chen, et al., Silk Fibroin Biomaterial Shows Safe and Effective Wound Healing in Animal Models and a Randomized Controlled Clinical Trial [J]. *Advanced Healthcare Materials* 2017, 6: 1700121.

[6] 张欢欢. 利用废弃蚕丝制取再生丝素蛋白以改善羊毛织物服用性能 [D]. 东华大学, 2021.

[7] 刘俊伟. 天然丝素蛋白的提取工艺及其水凝胶性能研究 [D]. 盐城工学院, 2022.

[8] 胡蝶. 柞蚕丝胶蛋白制备工艺优化与生物活性研究 [D]. 辽宁大学, 2017.

[9] 刘纯. 双氯芬酸钠丝素蛋白—壳聚糖缓释微球的研究 [D]. 苏州大学, 2009.

[10] 王新, 王进美, 周娅楠. 基于钙醇体系的丝素蛋白提取工艺 [J]. *印染*, 2022, 48(02): 36–40.

[11] 张迪. 可溶性蚕丝的提取工艺研究 [D]. 北京化工大学, 2018.

[12] 张旭. 羽毛角蛋白提取及角蛋白/丝素多孔复合材料制备 [D]. 苏州大学, 2021.

[13] Yuqiu Wang, Tianbi Duan, Minhua Hong, et al. Quantitative proteomic analysis uncovers inhibition of melanin synthesis by silk fibroin via MITF/tyrosinase axis in B16 melanoma cells [J]. *Life Sciences*, 2021, 284(1): 119930.

[14] Tianshuo Jia, Yiyu Geng, Huiyan Shao, et al. A Core–Shell Structured Microneedle Patch With Adjustable Release of Kinetically for the Treatment of Melasma [J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2025, 9: e02052.

[15] Taehoon Kim, Beom Joon Kim, Giorgio E. Bonacchini, et al. Silk fibroin as a surfactant for water–based nanofabrication [J]. *Nature Nanotechnology*, 2024, 19: 1514–1520.

[16] Mazaher Gholipourmalekabadi, Sunaina Sapru, Ali Samadikuchaksaraei, et al. Silk fibroin for skin injury repair: Where do things stand? [J]. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2020, 153(1): 28–53.

[17] Jialing Cheng, Zhiyang Chen, Demin Lin, et al. A high clinically translatable strategy to anti–aging using hyaluronic acid and silk fibroin co–crosslinked hydrogels as dermal regenerative fillers [J]. *Acta Pharmaceutica Sinica B*, 2025, 15(7): 3767–3787.

[18] Chenshi Hu, Xiaohui Li, Zhongbing Huang, et al. Fabrication of

Au–polydopamine blackspheres–loaded PLLA–(silk fibroin) scaffold with photothermal conversion in NIR–II biowindows for deep nerve regeneration [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 489: 151171.

[19] Kecheng Quan, Yupu Lu, Zhinan Mao, et al. Functionalized–nanoparticles/silk fibroin coating with anti–adhesive and photothermal capabilities to prevent implant–associated infections [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 486(15): 150147.

[20] Qichao Cheng, Yan He, Lantian Ma, et al. Regenerated silk fibroin coating stable liquid metal nanoparticles enhance photothermal antimicrobial activity of hydrogel for wound infection repair [J]. *International Journal of Biological Macromolecules* 2024, 263(2): 130373.

[21] Shudan Huang, Jiawei Peng, Ye Zi, et al. Regenerated silk fibroin for the stabilization of fish oil–loaded Pickering emulsions [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 678(5): 132523.

[22] 李莹莹, 王窻, 刘其春, 等. 丝素蛋白及其复合材料的研究进展 [J]. *材料工程*, 2018, 46(8): 14–26.

[23] 高宁萧, 吴晶, 刘勇. 静电纺丝法制备溶解型胶原蛋白肽/丝素蛋白复合纤维面膜 [J]. *北京化工大学学报 (自然科学版)*, 2018, 45(6): 21–28.

[24] Yecheng Wang, Mei Yang, Jie Wang, et al., Design of Bombyx mori (B. mori) silk fibroin microspheres for developing biosafe sunscreen [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2024, 16(13): 15798–15808.

[25] Shihang Zhou, Hongliang Zeng, Jinhua Huang, et al., Epigenetic regulation of melanogenesis [J]. *Ageing Research Reviews*, 2021, 69: 101349.

[26] Swarup Roy, Jong–Whan Rhim. New insight into melanin for food packaging and biotechnology application [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 62 (17): 4629–4655.

[27] Ragavi Rajasekaran, Abir Dutta, Preetam Guha Ray, et al., High fibroin–loaded silk–PCL electrospun fiber with core–shell morphology promotes epithelialization with accelerated wound healing [J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2022, 10(46): 9622–9638.

[28] Ruyi Fan, Jiebing Zhao, Lei Yi, et al., Anti–inflammatory peptide–conjugated silk fibroin/ cryogel hybrid dual fiber scaffold with hierarchical structure promotes healing of chronic wounds [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(16): e2307328.

[29] Zhaona Dou, Binbin Li, Lin Wu, et al., Probiotic–functionalized silk fibroin/sodium alginate scaffolds with endoplasmic reticulum stress–relieving properties for promoted scarless wound healing [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(5): 6297–6311.

[30] Qichao Cheng, Yan He, Lantian Ma, et al., Regenerated silk fibroin coating stable liquid metal nanoparticles enhance photothermal antimicrobial activity of hydrogel for wound infection repair [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 263(2): 130373.

Research Progress on Silk Fibroin in the Skincare and Haircare Fields

Chai Xue-qing^{1,2}, Zhang Xing-zhuo^{1,2}, Li Zhao-can^{1,2}, Xing Jiang-yan^{2,3}, Meng Hong^{1,2}, Jin Yu-juan¹

(1. Beijing Technology and Business University, Beijing, 100048;

2. Silk Protein Biotechnology Collaborative Innovation Center BTBU-AUSMA Joint Laboratory, Beijing 100048;

3. Beijing Qisi Innovation Technology Co., Ltd., Beijing 100085)

Abstract : This article provides a concise review of the structural properties and preparation methods of silk fibroin, along with current research on its roles in skin whitening, moisturizing, anti-aging, nourishment, and repair within the skincare and haircare domains. It systematically outlines its applications in both skin and hair products, offering guidance for the development of silk fibroin-based skincare and haircare formulations.

Keywords : silk fibroin; extraction process; skin and hair care

