

生命健康中的有机硅高分子

卢佳双¹, 许晓阳¹, 何有清², 武明月¹, 时瑞鑫¹, 于文芳¹, 卢杭³, 刘继³, 朱庆增^{1,*}

¹ 山东大学化学与化工学院, 特种功能聚集材料教育部重点实验室, 济南 250100

² 山东师范大学附属中学, 济南 250100

³ 浙江新安化工集团股份有限公司, 杭州 311600

摘要: 聚有机硅氧烷是一类主链由重复的Si—O键构成的高分子聚合物, 主链Si原子上连接有机基团, 是一类用途最广泛的有机硅高分子。这种无机-有机分子结构赋予了聚有机硅氧烷稳定的物理化学性能和生理惰性, 生物相容性好, 耐候耐老化性能优异, 加工性能好, 广泛应用于修复或替换人体器官、美容整形、组织工程、医疗器械和药物载体等人类生命健康和日常生活领域, 本文介绍了聚有机硅氧烷高分子的结构和性能, 并对聚有机硅氧烷在生命和医疗健康领域的应用进行了详细论述。

关键词: 聚有机硅氧烷; 硅橡胶; 美容健康; 组织工程; 医疗器械; 药物载体

中图分类号: G64; O6

Organosilicon Polymers in Life and Health Applications

Jiashuang Lu¹, Xiaoyang Xu¹, Youqing He², Mingyue Wu¹, Ruixin Shi¹, Wenfang Yu¹, Hang Lu³, Ji Liu³, Qingzeng Zhu^{1,*}

¹ Key Laboratory of Special Functional Aggregated Materials, Ministry of Education, School of Chemistry and Chemical Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China.

² High School Attached to Shandong Normal University, Jinan 250100, China.

³ Zhejiang Xin'an Chemical Industrial Group Co., Ltd. Hangzhou 311600, China.

Abstract: Polysiloxanes, among the most versatile organosilicon polymers, feature a backbone composed of repeating Si—O bonds with organic groups attached to the silicon atoms. This unique inorganic-organic hybrid structure imparts exceptional physicochemical stability, physiological inertness, outstanding biocompatibility, remarkable weather and aging resistance, as well as excellent processability to polysiloxane materials. These superior properties have enabled their widespread applications in life sciences and healthcare, including human organ repair/replacement, cosmetic surgery, tissue engineering, medical devices, and drug delivery systems. This review systematically examines the structure-property relationships of polysiloxanes and provides a comprehensive discussion of their applications in biomedical and healthcare fields.

Key Words: Polysiloxane; Silicone rubber; Cosmetic surgery; Tissue engineering; Medical devices; Drug carrier

高分子材料已成为改变我们生活方式和生命健康的重要物质, 聚有机硅氧烷材料无疑是其中重要的成员之一。聚有机硅氧烷高分子主链由重复的Si—O键构成, 主链Si原子上连接有机基团(甲基、

收稿: 2024-09-30; 录用: 2024-12-19; 网络发表: 2025-05-13

*通讯作者, Email: qzhu@sdu.edu.cn

基金资助: 新安集团基础研究项目(2024); 山东省泰山产业领军人才项目(tscx202312086)

乙烯基等), 属于应用最广泛的有机硅高分子材料之一。这种无机-有机分子结构赋予其良好的物理化学性能、生理惰性、生物相容性以及耐高低温性能, 在 $-50\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的宽温域范围内可长期使用, 且耐候耐老化性能优异, 是一种重要的生物医用材料。自20世纪40年代被人工合成以来, 有机硅材料已广泛用于人们的生活和医疗健康领域, 1948年就用于人体内修补物替换尿道。1955年国外制造了第一根聚硅氧烷橡胶脑室引流管, 期间加利福尼亚大学Fiedman等人研制的聚硅氧烷人工膀胱, 在动物体内获得了较好的应用效果^[1]。20世纪60-70年代, 已有许多医用聚硅氧烷制品, 如硅橡胶乳房、指关节、眼眶底托、耳廓、气管插管、脑积水引流管、腹膜透析管、带气囊分道导管和导尿管等投入了临床应用。我国用聚有机硅氧烷材料制成了球形二尖瓣, 植入体内后, 患者的心脏功能恢复正常, 能胜任一般的体力劳动^[2]。此外, 聚有机硅氧烷还用于制造人工颅骨、人工皮肤、人工脑膜、人工鼓膜、鼻梁、下颌、喉罩、婴儿奶嘴、医用凝胶垫、隐形眼镜、气管支架、面部填充物、胶囊和皮下埋置剂、胃管、腹腔引流管、胸腔引流管、膀胱造瘘管、肾盂造瘘管、人工节育器、胎儿吸引器、皮下植入型避孕药物缓释胶棒等。已有上千种医用聚有机硅氧烷制品应用于临床医疗, 保障人类生命健康, 提高了人们的生活品质。

1 聚有机硅氧烷材料

聚有机硅氧烷结构通式可以表示为 $(\text{R}_n\text{SiO}_{4-n/2})_m$, 通常R为氢原子或甲基、乙烯基等基团, n 为硅原子上连接的有机基团数, m 为聚合度, 图1是聚二甲基硅氧烷(PDMS)的分子结构示意图。具有不同化学结构和聚合度的聚有机硅氧烷表现出不同的宏观形态和性能, 如液体硅油、有机硅凝胶、硅橡胶、硅树脂粉体材料等(图2)。液体硅油是一种线性的聚有机硅氧烷, 数均分子量通常在几百至几万之间。有机硅凝胶是一种适度交联的聚有机硅氧烷, 表现为凝胶状, 力学性能不高。硅橡胶是由较高分子量的聚有机硅氧烷和增强填料, 经硫化交联制成的弹性体材料。硅树脂是高度交联的聚有机硅氧烷, 分子结构中有大量 $\text{SiO}_{1.5}$ 化学结构, 具有高的硬度和耐热性能。

聚有机硅氧烷属于半无机半有机的高分子化合物, 兼具有机高分子和无机高分子的特性。主链上的 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 键长较长, 键角较大, $\text{Si}-\text{O}$ 键容易旋转, 高分子链柔顺性好, 链间相互作用力小, 因此, 聚有机硅氧烷具有优异的耐低温性能, 典型PDMS的玻璃化转变温度为 $-123\text{ }^{\circ}\text{C}$; 由于 $\text{Si}-\text{O}$ 键键能为 $452.1\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ^[3,4], 因此 $\text{Si}-\text{O}$ 键较为稳定, 使得聚有机硅氧烷具有优异的耐高温性能, 其结构能够在 $-50\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的宽温域范围内保持稳定, 例如用聚有机硅氧烷制成的婴儿奶嘴在高温条件下消毒不会受损; 聚有机硅氧烷耐候性好, 在自然环境中能够长期保持其性能而不老化, 使用寿命在

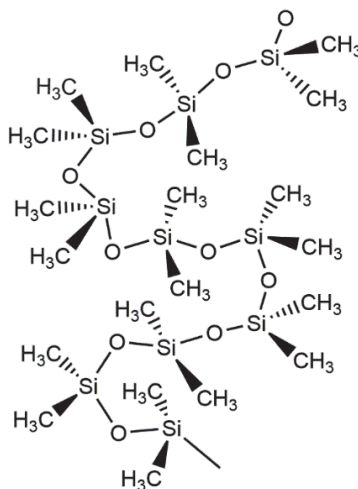


图1 聚二甲基硅氧烷分子结构示意图

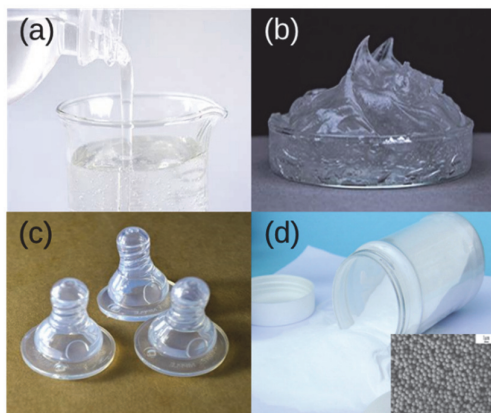


图2 不同形态聚有机硅氧烷材料

(a) 液体硅油; (b) 有机硅凝胶; (c) 硅橡胶奶嘴; (d) 硅树脂粉体材料

20年以上;聚有机硅氧烷材料具有生理惰性,生物相容性好,对生物体无刺激,在人体环境中具有良好的安全性和稳定性;聚有机硅氧烷材料表面能低,可作为消泡剂治疗疾病,例如由伤风感冒引起的支气管分泌液起泡,伴随咳嗽症状,用有消泡作用的含液体聚硅氧烷的糖浆能够显著减弱咳嗽症状,并且能疏通急性肺水肿病人的呼吸道,避免因泡沫阻塞呼吸道窒息死亡;聚硅氧烷润滑性能优良,能够有效减少摩擦和磨损,因此常配合人体内窥镜检查使用。

聚有机硅氧烷材料无毒、无味、无臭,物理化学性能稳定,耐高低温,耐候,生理惰性,生物相容性好,对人体组织反应小,是现代医疗技术发展的关键支撑材料。它既可植入人体内作为器官或组织的代用品,也可短期留置体内发挥补液、抢救、引流等作用,还可作为医疗领域的关键制品应用于整容和修复等领域,在生命健康领域发挥着重要作用^[5]。

2 人体植入物

人体植入物可用于修复或替换人体器官、组织或功能,它们可以由金属、陶瓷、聚合物和复合材料等不同材料制成,这些植入物在医疗行业的治疗、外科手术和人造身体部位植入等有着广泛的应用。近年来,随着材料科学和医疗技术的进步,人体植入物的种类和应用范围不断扩大。聚有机硅氧烷具有稳定的物理和化学性质,耐高低温,生物相容性好,透氧性高,是制造医疗植入物的理想材料,在人体植入物方面的应用逐渐扩大。

聚有机硅氧烷已用于制造人工颅骨、人工喉、人工角膜、人工肺膜、人工泪道、阴茎假体、人工睾丸、气管支架、鼻孔支架胸腔隔离膜、脑积水分流装置等(图3)。脑积水分流装置是最早的硅橡胶人体植入物^[6],它主要由脑室导管、分流阀门、腹腔导管和储液囊组成。通过一个小型手术将导管植入体内,以绕过阻塞区域,重新引导脑脊液流向其他部位,从而减轻颅内压力。人工硅胶关节已用于治疗外伤和类风湿性关节炎所致的关节僵硬或畸形、退行性关节炎或损伤性关节炎所致的功能障碍。聚有机硅氧烷海绵做成的盘状物嵌入腕骨与掌骨间,可以保持粗糙骨面分离,用于治疗腕掌骨间关节炎,患者能恢复手部原来的动作,并且拇指无痛,各方面运动均不受限制。聚硅氧烷人工脑膜用于修补外伤性硬脑膜缺损,可修补因切除肿瘤在硬脑膜上的基蒂或浸润区造成的硬脑膜或硬脊膜缺损等。聚有机硅氧烷人工喉可代替除去的软骨,使患者较快地恢复说话、饮食及呼吸等功能。聚有机硅氧烷堵漏片用于肠外瘘治疗能耐肠液腐蚀,对人体无刺激,有效阻止肠液外溢,保持肠道通畅,恢复肠道营养吸收功能。聚有机硅氧烷薄膜用于包裹肌腱松解术后已愈合良好的肌腱,可防止肌腱与软组织、骨与肌腱间的粘连。此外,聚有机硅氧烷制成的盾形宫内节育器避孕效果好、副作用小、继续存放效率高。

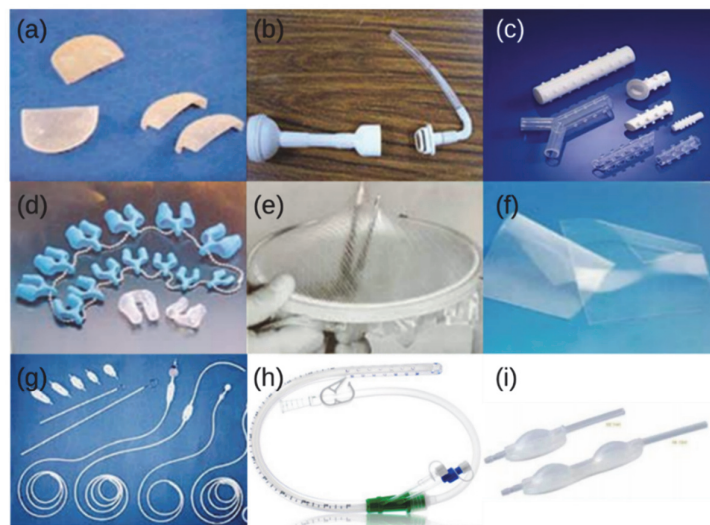


图3 聚有机硅氧烷材料用于人体植入物

(a) 人工颅骨^[7]; (b) 人工喉; (c) 气管支架; (d) 鼻孔支架^[7]; (e) 人工肺膜^[7]; (f) 胸腔隔离膜^[7];
(g) 脑积水分流装置脑室导管及分流阀门^[7]; (h) 脑积水分流装置腹腔导管; (i) 脑积水分流装置储液囊

3 美容健康

美容健康是通过各种方法和产品来提高个人外观和整体健康状态，包括自然美容和医疗美容。聚有机硅氧烷是美容外科的重要高分子材料，已成功应用于鞍鼻、面部凹陷畸形、偏侧面部萎缩、颌骨发育不全、口腔根管填充等医疗整形。聚有机硅氧烷高分子材料有多种形态，对人体组织无刺激性，无毒性，无过敏反应，机体排异反应极少；具有良好的理化特性，不被降解，与体液以及组织接触过程中能保持其原有的弹性和柔软度，是一种相当稳定的惰性物质，且耐高温性能良好，可被高温消毒处理而不丧失其功能；加工成型方便，易加工雕刻形状，方便用于不同的应用场景。自20世纪60年代引入乳房植入以来，聚有机硅氧烷材料在医疗美容健康领域逐步兴起，被用于人的面部填充体，改善面部轮廓、修复面部缺陷或损伤，以及增强面部特征的美容健康效果。通常说的硅胶人工乳房就是由聚有机硅氧烷橡胶包膜充填的有机硅凝胶组成，其外形、手感均是其他材料所不能及的。此外，聚有机硅氧烷材料还被制成人工鼻梁、人工下巴、人工颌骨和人工耳廓等面部美容产品(图4)。

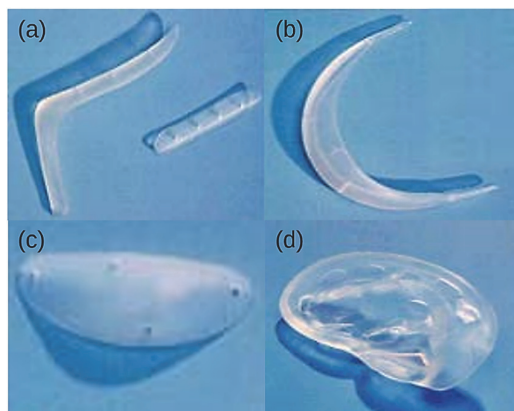


图4 聚有机硅氧烷材料的面部填充物产品^[7]

(a) 人工鼻梁; (b) 人工下巴; (c) 人工颌骨; (d) 人工耳廓

聚有机硅氧烷材料因其良好性能，被誉为“化妆品界的液体黄金”，添加于化妆品和护肤品中，能够改善产品的质地和稳定性，使产品更加易于涂抹和吸收，同时不会给皮肤带来油腻感。基于聚有机硅氧烷制备的护肤品有很好的抗氧化效果，护肤品能够清除自由基，减少皮肤受到的损害。聚有机硅氧烷材料还被用于祛疤贴、足垫、隐形眼镜、粉底、彩妆、口红、防晒乳等个人护理品(图5)。

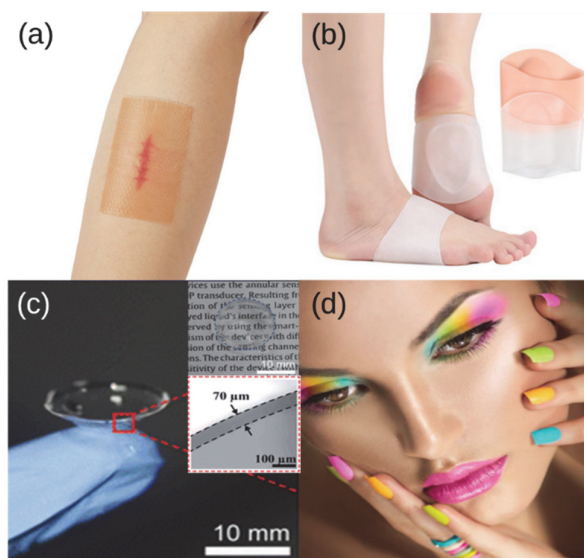


图5 聚有机硅氧烷材料的其他用途

(a) 祛疤贴; (b) 足垫; (c) 隐形眼镜^[8]; (d) 美容护肤品

聚有机硅氧烷类材料与胶原蛋白、透明质酸等生物材料结合使用，可以满足面部填充体的个性化需求。用透明质酸(HA)和聚多巴胺(PDA)复合物修饰PDMS，构建了稳定的亲水性的有机硅材料(图6)，降低了血小板粘附和活化，增强了血液相容性，是美容健康应用中植入式器械重要材料。

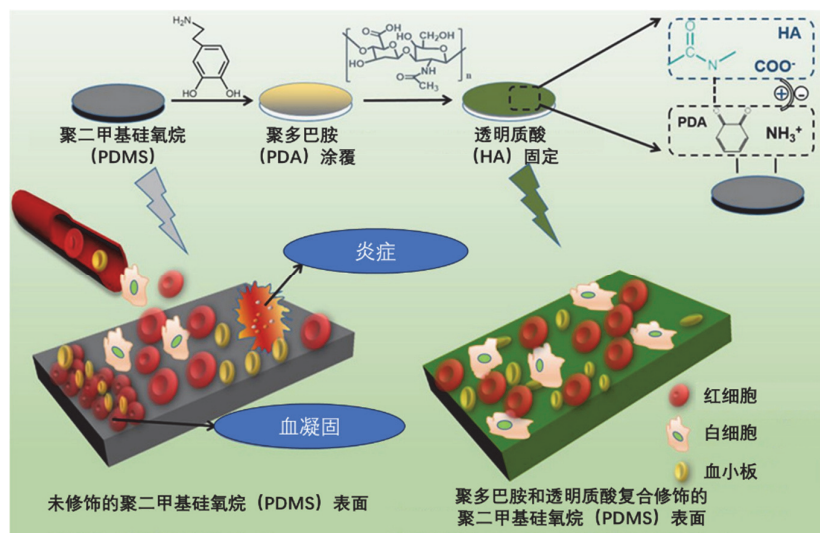


图6 聚多巴胺和透明质酸复合修饰PDMS表面作用示意图^[9]

4 医疗器械

使用医疗器械需要考虑与人的接触次数和时长，以保障医疗环境更加安全健康。聚有机硅氧烷材料性能稳定，生理惰性，柔性好，与人体组织接触舒适度高，在医疗器械领域被用于制造一次性导管：人工心肺机泵管、气管插管、脑室外引流管、鼻腔扩张引流管、中耳炎通气管、左右胸腔引流管、四腔双囊止血导管、胃造瘘管、双腔胃管、洗胃管、胃减压管、十二指肠管、体外循环机泵管以及梗阻导管等(图7)。表面改性的PDMS细菌附着少，减少了PDMS导尿管中生物膜的形成，提高了临床应用性能^[10]。聚有机硅氧烷弹性体材料制成的胎儿吸引器吸头柔软且富有弹性，因而在难产情况下使用它代替其他助产器，可避免引起新生儿颅内血肿与损伤。

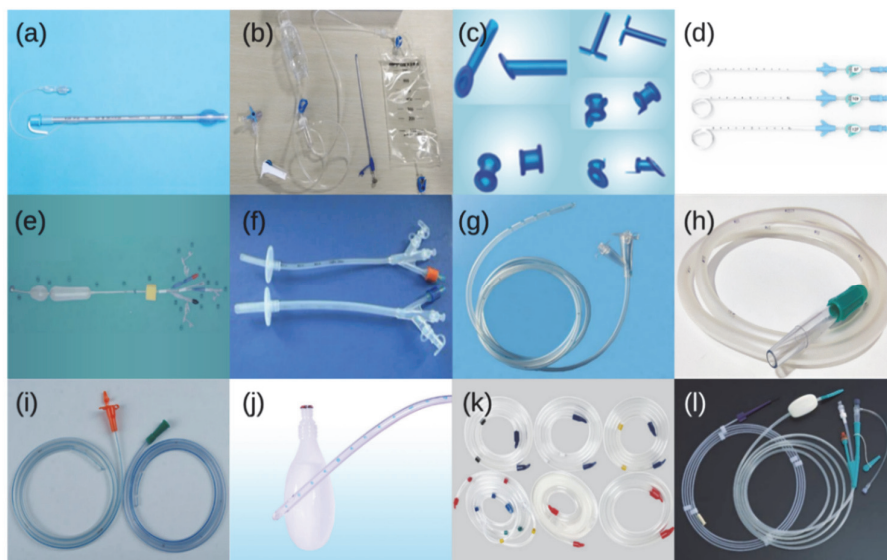


图7 聚有机硅氧烷材料制成的医疗导管

(a) 气管插管；(b) 脑室外引流管；(c) 中耳炎通气管；(d) 左右胸腔引流管；(e) 四腔双囊止血导管；
(f) 胃造瘘管；(g) 双腔胃管；(h) 洗胃管；(i) 胃减压管；(j) 十二指肠管；(k) 体外循环机泵管；(l) 梗阻导管

聚有机硅氧烷除了用作医疗器械导管材料，还用于制造人工呼吸器(波形管、球囊、面罩)、鼻腔止血气囊、眼科用环扎带、喉罩、肛门封堵器、泪道探通装置、医用凝胶垫、体外绷带、医用胶带以及皮肤扩张器等医疗用器械(图8)，这些应用展示了聚有机硅氧烷在医疗器械领域的重要性和多样性。随着技术的进步和对医疗器械性能要求的提高，聚有机硅氧烷材料在医疗器械领域的应用将不断扩展，从而为患者提供更安全、更有效的治疗方案。

注射是临床治疗中重要的给药和治疗手段，药物通过注射直接进入体内，能够避免口服对药物的影响，起效迅速，同时药物吸收效率高。金属注射针头在给药过程中会对人体造成疼痛等不适。使用聚有机硅氧烷对注射器针头进行表面处理是医疗器械制造中的一项重要工艺，处理后的针头表面覆盖了一层极薄的聚有机硅氧烷膜(图9)，这层膜能提高针头的润滑性和穿刺的顺畅度，有效降低针头与皮肤或血管壁之间的摩擦，减少因摩擦引起的组织损伤，保护血管和周围组织，降低感染风险，使穿刺过程更加顺畅，从而减少患者在使用过程中的不适感。

液体PDMS(硅油)是专业应用于医疗领域的润滑剂，用于注射用药物包装组件，可以润滑药瓶塞、注射器柱塞、针尖帽和针头护罩等部件。PDMS常应用到玻璃小瓶的内壁来降低玻璃表面能，并防止药液浸湿容器表面。1950年人们已将PDMS硅油涂覆在玻璃小瓶、注射玻璃器、橡胶塞或瓶盖表面，是有机硅高分子在制药领域中最早的应用之一。

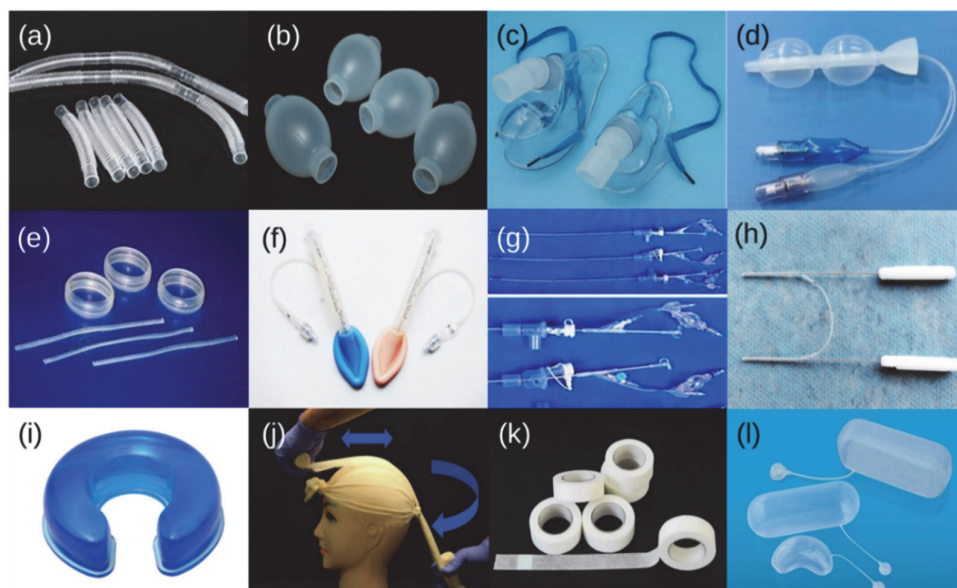


图8 聚有机硅氧烷在医疗器械领域的重要性和多样性

(a) 波形管; (b) 球囊; (c) 面罩; (d) 鼻腔止血气囊; (e) 眼科用环扎环及环扎带; (f) 喉罩;
(g) 肛门封堵器; (h) 泪道探通装置; (i) 医用凝胶垫; (j) 体外绷带^[11]; (k) 医用胶带; (l) 皮肤扩张器

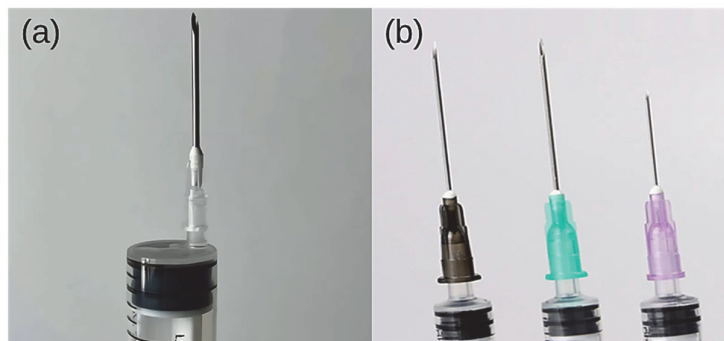


图9 临床医疗用注射针头

5 组织工程

组织工程是利用细胞、生物材料和生长因子等，在体外或体内构建出具有生物活性的组织或器官替代物，以再生患病和畸形的组织并改善器官功能^[12]，如骨组织工程、神经组织工程和皮肤组织工程等。聚有机硅氧烷材料在组织工程领域有着重要应用潜力。

5.1 骨组织工程

骨组织工程为骨缺损的治疗提供了一种新的途径，与传统的骨修复方法相比，骨组织工程具有自体细胞来源所带来的低感染性和低致癌率等显著优势。随着组织工程技术的不断发展，个性化定制骨支架技术的研发也为骨组织工程的应用提供了更广阔的前景。在骨组织工程中，聚有机硅氧烷材料可以用于制造牙科材料、人工骨关节、骨缺损填充材料等(图10)。临床上应用的硅胶骨假体有人工桡骨头、人工尺骨头、腕舟状骨、腕月状骨及人工多角骨等。其中，硅胶月状骨可以治疗月状骨无菌性坏死和拇指基底部关节炎。



图10 聚有机硅氧烷材料用于骨组织工程示例

(a) 牙科印模材料; (b) 人工关节; (c) 骨缺损填充材料

5.2 神经组织工程

神经组织工程要创建一个能够促进神经再生、重建神经回路并恢复功能的环境。这通常涉及到模拟自然神经外基质的特性，创造一个支持细胞生长、迁移和分化的微环境。由于聚有机硅氧烷材料具有良好的生物相容性，可调的力学性能和可构建的孔隙结构，可以模拟天然神经组织的微环境，为神经细胞的生长和再生提供支持 and 引导。因此，在神经组织工程中，聚有机硅氧烷材料常被用于制备神经支架及神经接口，如神经电极和神经探针等，这些接口能够安全、稳定地与神经组织接触，并传输信号或化学物质。

人工耳蜗是聚有机硅氧烷材料在神经组织工程中的一个重要实例。人工耳蜗可以分为外带式和植入式(图11)。在外带式人工耳蜗中，聚有机硅氧烷材料主要用于制作盖板、内腔等部件。这些部件需要具有一定的柔软性和可弯曲性，以满足人体工学的需求。在植入式人工耳蜗中，聚有机硅氧烷材料作为电极阵列的绝缘层，保护电极并确保电刺激的精确传递，还可以通过复制技术和微加工技术制成复杂的微结构，制造精细的电极阵列和内部电子组件。

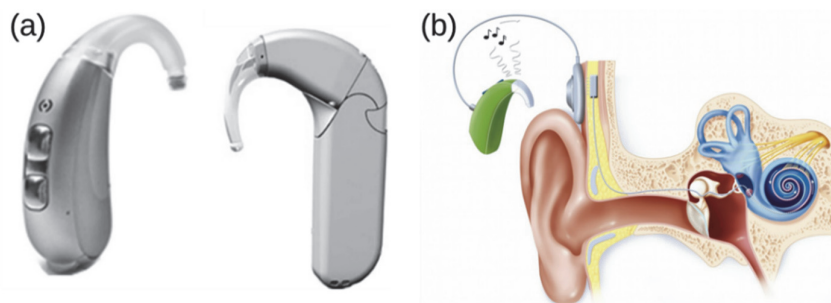


图11 人工耳蜗示意图

(a) 外带式人工耳蜗^[18]; (b) 植入式人工耳蜗

5.3 皮肤组织工程

人体皮肤是身体最大的器官，它提供了一个由内而外的屏障，抵御外部环境，保护人们免受环境影响，并防止水分从体内流失^[13]。烧伤、创伤或者手术切除失去皮肤屏障时，必须进行组织修复^[14,15]。皮肤伤口愈合是一个动态而复杂的生理过程，涉及数个相互关联的复杂的细胞和生化活动才能实现组织再生并恢复皮肤的结构和功能完整性^[16]。而伤口敷料将生物活性分子输送到伤口部位，具有支持组织修复的特性，可以加速愈合过程。聚有机硅氧烷敷料膜可保护伤口避免液体和蛋白质的流失，提供适合组织再生的最佳湿度和温度环境，抑制伤口收缩并保护受损部位免受不必要的外部影响，实现自然皮肤的功能。液体硅油、有机硅凝胶和硅橡胶人工皮等有机硅高分子制品应

用在烧伤创面、供皮区创面、手部肌腱暴露的软组织缺损、开放性挤压伤的创面治疗可以使坏死组织、感染组织与创面分离，防止创面干燥，促进健康肉芽组织形成，加快上皮再生、促进创面愈合，减少肌腱粘连，促进功能恢复。有机硅凝胶膜容易设计加工，可匹配皮肤的延伸率(40%)，用作创面敷料，使患者感觉舒适，且更换敷料简单、方便、无痛苦。同时，有机硅凝胶膜对瘢痕增生有抑制作用，可使增生性瘢痕变平、变软，减少瘢痕挛缩^[2,15]。弹性PDMS/TiO₂薄膜用作血液排斥性伤口敷料^[17](图12)，能够抵抗血液粘附，阻止血液渗透并减少血液损失和感染风险，其具有较高的透气性，在水环境下可以为伤口提供充足的氧气，有助于伤口愈合。该薄膜还具备自清洁和抗菌特性，在紫外光照射下能够分解化学污染物并杀死细菌，是血液排斥性伤口敷料的理想材料。

仿真人体硅胶是一种柔软的聚有机硅氧烷弹性材料，用于制作仿人体面部、肢体和实体娃娃等(图13)，触感柔软，皮肤质感强，可长期使用并保持其柔软弹性性能。

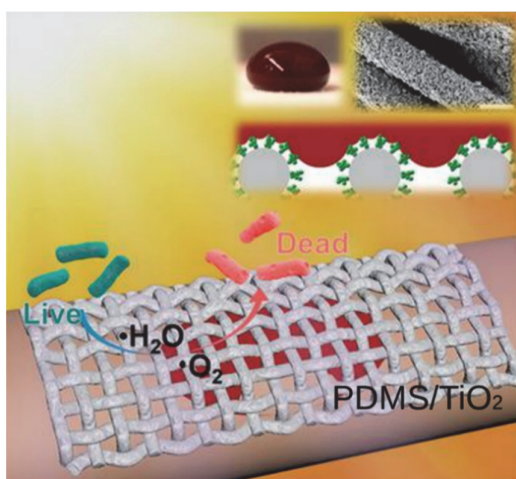


图12 PDMS/TiO₂薄膜伤口敷料功能示意图^[17]

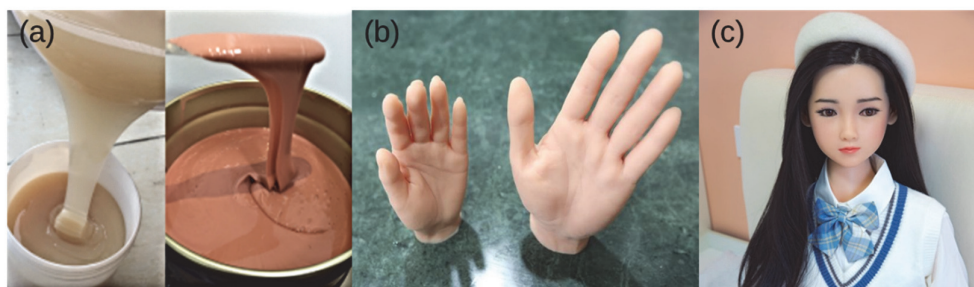


图13 仿真人体硅胶及其制品

6 药物载体

药物递送在生命健康领域一直受到广泛的关注，其目的是将预期的药物直接运送到需要治疗干预的部位，提高药物疗效，进行靶向治疗，减少可能在非靶向细胞和组织中产生的副作用。聚有机硅氧烷材料生物相容性良好，物理与化学性能稳定，可用于药物递送载体，是抗生素、镇静剂、安眠药、抗癌药和麻醉剂等药物的良好缓释载体。比如可用于制造具有药物缓释功能的接触式眼镜。将硅油和抗菌药物(氧氟沙星)复合制成有机硅凝胶药膜，能缓慢、持久地释放低分子量硅油及添加的药物，且药物的释放量可通过添加硅油的多少来控制。此外，在有机硅凝胶膜中加入有稳定溶酶

体膜作用的维生素E，能有效加强维生素E的透皮效果。研究表明，PDMS纳米粒子是良好的药物输送载体，有助于保护药物在系统循环中被输送到特定部位，并以持续的速率在作用部位释放，在改善药物的药代动力学和药效学特性方面表现出优势。PDMS纳米粒子还可实现无配体的增强型抗炎药物的细胞内或核内输送，显著提高治疗的精确性和有效性^[19]。形态学检查和细胞活性实验确定了PDMS良好的生物相容性和无毒性(图14)。

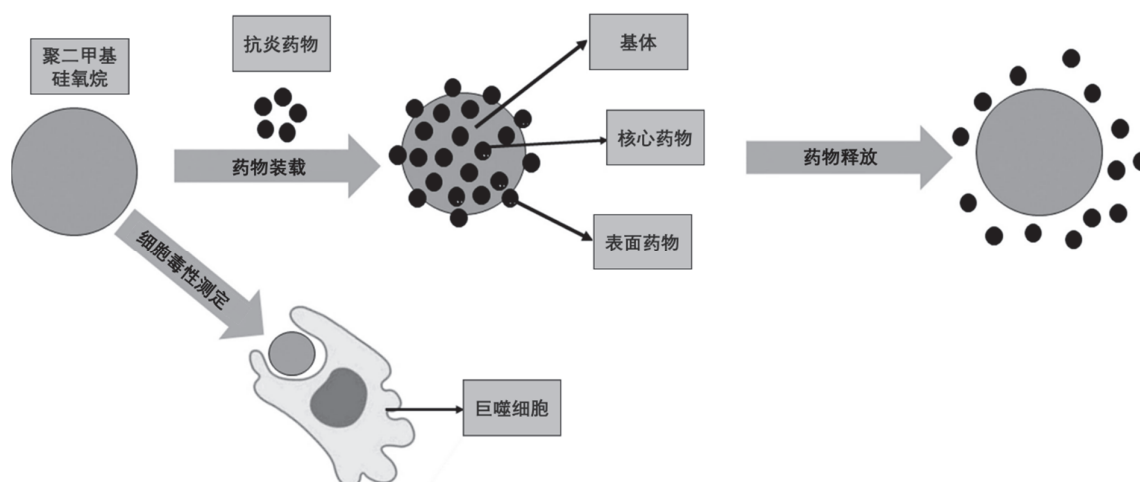


图14 聚二甲基硅氧烷纳米粒子作为药物递送载体^[19]

聚有机硅氧烷材料用在药物递送领域除了以纳米粒子和微管形式外，还可以通过胶囊、皮下埋置剂等形式封装药物。以胶囊形式留置体内，药物透过聚硅氧烷包覆层缓慢扩散，可以长期发挥药效。例如，以聚二甲基硅氧烷为缓释剂载体能够持续释放避孕甾体的药库型和基质型埋植剂，已有Norplant和Jadella皮下埋植剂产品^[20](图15)。将孕酮类避孕药封装在长3.4 cm、直径0.24 cm的硅胶囊内，或将药物与硅橡胶混匀制成有机硅橡胶膜，植入手臂内侧皮下组织，药物可以恒定持续地释放5–7年，获得长效避孕效果。又如，将治疗青光眼的毛果兰香碱或治疗运动呕吐的藜若胺包在聚硅氧烷胶囊中，贴敷在皮肤上，药物通过此胶囊缓慢释放，达到了良好的治疗效果。

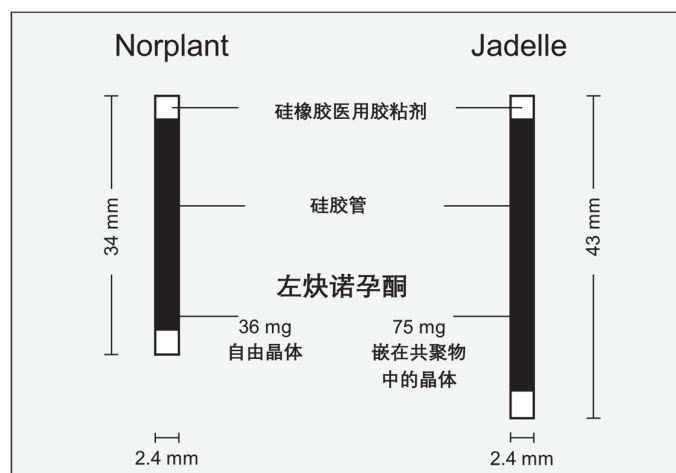


图15 左炔诺孕酮皮下埋植剂Norplant和Jadella^[20]

药物沉积在PDMS表面具有可靠的附着和缓释特性,例如PDMS表面装载的抗炎药物Budesonide释放具有持续性,且在体外和体内实验中,Budesonide药物装载的PDMS管表现出显著的抗炎效果(图16),减少了周围组织的炎症反应^[21],证明聚有机硅氧烷材料在药物释放领域具有很大的潜力^[22,23]。

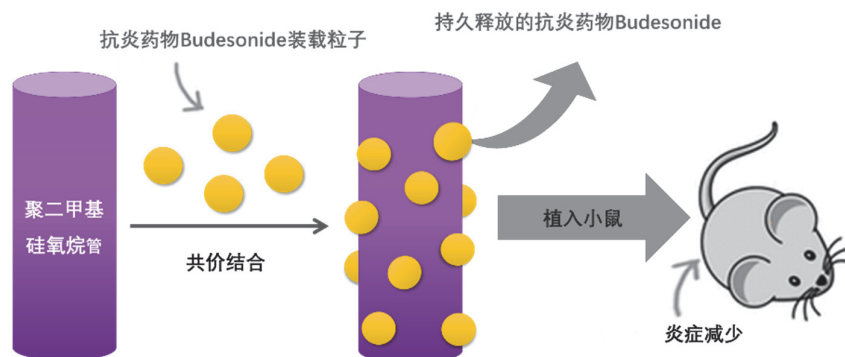


图16 聚二甲基硅氧烷管装载药物试验^[21]

7 结语

聚有机硅氧烷是应用最广泛的有机硅高分子,在生命健康领域表现出卓越的性能,拥有物理化学稳定性、生理惰性、生物相容性、耐高低温性和耐候性等多重性能优势,能够适应医疗和生命健康环境下的应用,可实现长期稳定的体内共存,精准满足普通外科、心血管外科、胸部外科、神经外科、颅骨与颌面外科、耳鼻喉科、眼科、矫形外科、泌尿科、口腔科和妇科等多样化的医疗需求。聚有机硅氧烷材料已经深刻影响了众多生命健康领域和人们的生活,随着医疗科技的持续发展和人们对高质量生命健康需求的日益增长,未来可能会有更多的聚有机硅氧烷创新产品被开发出来,并在更多领域发挥重要作用,对促进人类健康生活和社会发展具有重要意义。

致谢: 感谢苏州祺添新材料股份有限公司的大力支持。

参 考 文 献

- [1] 赵应慧. 中国医学百科全书: 生物医学工程学. 第1版. 上海: 上海科学技术出版社, 1989: 149.
- [2] 中国组织工程研究与临床康复, 2011, 15 (8), 1519.
- [3] 徐龙平, 李志豪, 王伟杰. 有机硅材料, 2022, 36 (6), 70.
- [4] 冯圣玉, 张洁, 李美江, 朱庆增. 有机硅高分子及其应用. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [5] 刘芳, 胡琛. 中国材料进展, 2016, 35 (4), 308.
- [6] 苏花平, 李中华. 化学世界, 2005, No. 3, 188.
- [7] 史文红, 赵成如. 中国医疗器械信息, 2009, 15 (11), 12.
- [8] Aravind, M.; George, S. D. *Lab Chip* 2024, 24 (8), 2327.
- [9] Xue, P.; Li, Q.; Li, Y.; Sun, L.; Zhang, L.; Xu, Z.; Kang, Y. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2017, 9 (39), 33632.
- [10] Gayani, B.; Dilhari, A.; Kottegoda, N.; RatnaweeraManjula, D. R.; Weerasekera, M. *ACS Omega* 2021, 6 (17), 11488.
- [11] Dellatorre, G.; Dorn, T. V. *J. Am. Acad. Dermatol.* 2020, 82 (4), e123.
- [12] Gupta, A.; Seifalian, A. M.; Ahmad, Z.; Edirisinghe, M. J.; Winslet, M. C. *J. Bioact. Compat. Polym.* 2007, 22 (3), 265.
- [13] Zaidi, Z.; Lanigan, S. W. *Dermatology in Clinical Practice*; Springer: Heidelberg, German, 2010.
- [14] Boateng, J.; Catanzano, O. *J. Pharm. Sci.* 2015, 104 (11), 3653.

- [15] 樊东力, 石含英. 中国临床康复, **2003**, *7* (32), 4396.
- [16] Boateng, J. S.; Matthews, K. H.; Stevens, H. N.; Eccleston, G. M. *J. Pharm. Sci.* **2008**, *97* (8), 2892.
- [17] Liu, J.; Ye, L.; Sun, Y.; Hu, M.; Chen, F.; Wegner, S.; Mailänder, V.; Steffen, W.; Kappl, M.; Butt, H. *Adv. Mater.* **2020**, *32* (11), 1908008.
- [18] Zirn, S.; Angermeier, J.; Arndt, S.; Aschendorff, A.; Wesarg, T. *Trends Hear.* **2019**, *23*, 2331216519843876.
- [19] Ajitha, A. A.; Kumar, S. S.; Viswanathan, G.; Baby, S.; Biju, P. G. *Comb. Chem. High Throughput Screen.* **2022**, *25* (10), 1672.
- [20] Nash, H.; Robertson, D. N.; Young, A. J. M.; Atkinson, L. E. *Contraception* **1978**, *18* (4), 367.
- [21] Mokkaḥan, J.; Banlunara, W.; Palaga, T.; Sombuntham, S.; Wanichwecharungruang, S. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2014**, *6* (22), 20188.
- [22] 张鑫, 张蒙蒙, 杨在孝, 宋慈, 武明月, 杨林川, 刘刚, 朱庆增. 科学通报, **2021**, *66* (14), 1767.
- [23] Zhang, X.; Zhang, M.; Wu, M.; Yang, L.; Liu, R.; Zhang, R.; Zhao, T.; Song, C.; Liu, G.; Zhu, Q. *Polymers* **2021**, *13* (15), 2392.