



硅橡胶鼻胃管表面聚丙烯酰胺水凝胶涂层的 制备及其性能评价研究*

苟菊香¹, 蔡明^{1△}, 李精健¹, 王志国¹, 刘雨薇¹, 涂睿婷², 冉轶尘², 林笑锐¹, 李卡¹, 徐家壮^{2△}

1. 四川大学华西医院/四川大学华西护理学院(成都 610041); 2. 四川大学高分子科学与工程学院(成都 610065)

【摘要】目的 在鼻胃管表面制备水凝胶涂层,并利用兔模型评价其置管性能。**方法** 采用紫外光引发自由基聚合制备聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAAm)水凝胶涂层,通过扫描电子显微镜观察涂层形貌及其与硅橡胶鼻胃管的界面结合。利用红外光谱仪和X射线光电子能谱仪分析涂层的组成。采用称重法检测涂层的吸水性能和稳定性。利用水接触角仪评价涂层的润湿性,采用摩擦磨损测试仪测试改性前后硅橡胶鼻胃管的摩擦系数。使用CCK-8试剂盒检测改性前后的鼻胃管与小鼠成纤维细胞L929细胞共培养24 h前后的细胞相容性。利用新西兰兔鼻胃管置管动物模型,评价涂层的置管效果(置管时间、鼻腔损伤等)。**结果** 本研究在硅橡胶鼻胃管表面构筑的PAAm水凝胶涂层具有三维网络结构,与硅橡胶鼻胃管界面结合良好。氨基和羰基特征峰的出现表明水凝胶涂接枝在硅橡胶鼻胃管表面。未改性硅橡胶鼻胃管基本不吸水,而涂层改性鼻胃管的吸水率显著改善,高达2.9%,超声处理90 min后,涂层的质量损失率为0.15%。相比未改性的鼻胃管,PAAm涂层改性鼻胃管的表水接触角由 $111.9^\circ \pm 2.2^\circ$ 下降到 $58.9^\circ \pm 1.5^\circ$ ($t=22.59, P<0.05$),同时,摩擦系数由 0.378 ± 0.050 降低至 0.116 ± 0.004 ($t=42.80, P<0.05$),降低幅度约69.3%。无论是否改性,鼻胃管与细胞共培养前后组间的细胞相容性差异均无统计学意义。体内鼻胃管置管动物实验表明,PAAm水凝胶涂层组的置管时间从 (41.6 ± 7.8) s缩短至 (12.4 ± 2.9) s ($t=8.509, P<0.05$)。喉镜观察结果显示PAAm水凝胶涂层可以明显减轻置管所致黏膜损伤。**结论** 本研究在硅橡胶鼻胃管上制备了强界面结合的PAAm水凝胶涂层。该涂层的亲水润滑性能和生物相容性良好,有效缩短置管时间并减轻置管损伤。

【关键词】 水凝胶涂层 界面结合 润滑性能 鼻胃管置管

Preparation and Performance Evaluation of Polyacrylamide Hydrogel Coating on the Surface of Silicone Rubber Nasogastric Tube GOU Juxiang¹, CAI Ming^{1△}, LI Jingjian¹, WANG Zhiguo¹, LIU Yuwei¹, TU Ruiting², RAN Yichen², LIN Xiaorui¹, LI Ka¹, XU Jiazhuan^{2△}. 1. West China Hospital, Sichuan University/West China School of Nursing, Sichuan University, Chengdu 610041, China; 2. College of Polymer Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China

△ Corresponding author, CAI Ming, E-mail: caiming826@126.com; XU Jiazhuan, E-mail: jzxu@scu.edu.cn

【Abstract】 Objective To prepare the hydrogel coating on the surfaces of nasogastric tubes and to evaluate its effect on the insertion of nasogastric tubes in a rabbit model. **Methods** The polyacrylamide (PAAm) hydrogel coating was prepared by UV-induced free radical polymerization. The morphology of the PAAm coating and its interfacial bonding with the silicone rubber substrates of nasogastric tubes were observed with scanning electron microscope. The composition of the coating was analyzed by Fourier transform infrared (FTIR) spectrometer and X-ray photoelectron spectrometer (XPS). The water absorption power and stability of the coating were measured by the weighing method. Water contact angle meter was used to measure the wettability of the coating and tribometer was used to determine the friction coefficient of the silicone rubber substrates before and after the modification. The cytotoxicity of the coating on L929 murine fibroblast cell line was explored with CCK-8 assay after 24-h coculturing of the L929 cell line with silicone rubber substrates before and after modification. An animal model of nasogastric tube insertion in New Zealand rabbits was used to evaluate the effect of the lubrication coating by assessing the insertion time and nasal damage. **Results** In this study, PAAm hydrogel coating was prepared and constructed on the surface of silicone rubber nasogastric tubes. The coating, with a three-dimensional network structure, showed strong interfacial bonding with silicone rubber substrates. The appearance of amino and carbonyl groups indicated that the PAAm hydrogel coating was grafted on the surfaces of nasogastric tubes. Before the modification, the silicone rubber substrate essentially did not absorb much water, whereas, after the modification, the silicone rubber substrate showed significant improvement of as much as 2.9% in water absorption. After sonication for 90 min, the weight loss rate was only 0.15%. Compared with pristine nasogastric tubes,

* 国家自然科学基金重点项目(No. U22A20334)、四川大学华西医院学科卓越发展1.3.5工程项目(No. ZYJC21057)和四川大学华西护理学科发展专项基金(No. HXHL21007)资助

△ 通信作者, 蔡明, E-mail: caiming826@126.com; 徐家壮, E-mail: jzxu@scu.edu.cn

the water contact angle of the modified nasogastric tubes was reduced from $111.9^{\circ} \pm 2.2^{\circ}$ to $58.9^{\circ} \pm 1.5^{\circ}$ ($t=22.59$, $P<0.05$). In addition, the friction coefficient of silicone rubber nasogastric tubes decreased by 69.3% from 0.378 ± 0.05 to 0.116 ± 0.004 ($t=42.80$, $P<0.05$) after modification. Moreover, there was no significant difference in the cytocompatibility between L929 cells cocultured with pristine nasogastric tube and those cocultured with modified nasogastric tube. The animal experiment of nasogastric tube insertion showed that the insertion time of the modified nasogastric tubes was reduced from (41.6 ± 7.8) s to (12.4 ± 2.9) s ($t=8.509$, $P<0.05$). Laryngoscopy revealed that the PAAm hydrogel coating significantly reduced the mucosal damage caused by the insertion of nasogastric tubes. **Conclusion** In this study, PAAm hydrogel coating with strong interfacial bonding was prepared on the surface of silicone rubber nasogastric tubes. The coating has excellent hydrophilic lubrication property and cytocompatibility, effectively shortens the insertion time, and reduces the damage caused by nasogastric tube insertion.

【Key words】 Hydrogel coating Interfacial bonding Lubrication performance Nasogastric tube insertion

置入鼻胃管为给药、引流、供给食物等治疗提供必要途径,是临床诊疗和护理过程中最基本、最常见的操作之一,广泛用于消化道出血、神经性厌食症、肠道功能障碍患者的护理和围手术期营养管理等^[1-2]。全球每年鼻胃管使用量超过4 000万支^[3]。高分子材料凭借易加工、易塑形、生物相容性好等优势,被广泛用于生产鼻胃管。但高分子鼻胃管材料(主要为硅橡胶和聚氨酯等)表面模量与人体黏膜严重不匹配且多为疏水性,置管过程中的摩擦对鼻咽食道黏膜的机械刺激大^[4-5],这易导致患者鼻咽部疼痛、呛咳和异物感等劣性应激^[6-8]。统计数据表明,鼻胃管置管是仅次于动脉血管穿刺的难以忍受的医疗体验,并且鼻胃管置管易诱发黏膜损伤、咽部水肿等并发症,甚至加重患者心脑血管原发疾病症状,不利于患者康复^[9-10]。

临床上,通常将石蜡油涂覆到鼻胃管表面,以减少置管摩擦,但其效果较差、难以持久且操作时间较长^[11-12]。水凝胶涂层由具有三维网状结构的亲水性高分子构成,其润滑性强、生物相容性好、与人体软组织相似,在赋予鼻胃管润滑功能方面潜力巨大^[13-14]。然而,水凝胶内含有大量不断运动中的水分子,使得水凝胶和高分子基体难以结合^[15-16]。针对这一难题,美国麻省理工学院赵选贺教授将高分子基体表面硅烷化,实现了基体与水凝胶涂层网络的共价连接,取得了一定突破^[17-18]。美国哈佛大学锁志刚教授设计了一种水凝胶涂料,先将高分子基材表面等离子体活化,然后与硅烷偶联剂末端作用形成致密的硅烷结构,最后将水凝胶预聚物(丙烯酸酯)涂覆在基体表面,通过自由基聚合形成水凝胶涂层^[19]。但仍存在步骤繁琐,潜在的生物毒性等问题。并且,现有的大多数研究都是将规则的块状水凝胶固定在二维基材平面,不具有形状适配性,限制了其在鼻胃管复杂表面上的应用。

本研究旨在通过紫外光引发自由基聚合在鼻胃管表面实现强界面结合共形修饰的聚丙烯酰胺(polyacrylamide,

PAAm)水凝胶涂层构筑,利用其水合润滑机理,减轻鼻胃管置管并发症,探寻低损伤新型鼻胃管的制备策略。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

丙烯酸酯、乙醇(成都科龙化工试剂厂);光引发剂2959、二苯甲酮、N'-N-亚甲基双丙烯酸酯(MBA, aladdin);硅橡胶鼻胃管(长度为70 cm,直径为2 mm,内径为1.67 mm,惠众国际医疗器械有限公司);场发射扫描电子显微镜(SEM, Nova NanoSEM450, FEI, USA);水接触角测试仪(DA 30, Krüss, Hamburg, GER);摩擦磨损仪(UMT-TriboLab, Bruker, USA);兽用多参数监护仪(徐州市永康电子科技有限公司)。

1.2 材料结构和性能测试

1.2.1 PAAm水凝胶涂层制备与结构表征

硅橡胶鼻胃管通过超声清洗干燥后,浸入质量分数20%二苯甲酮/乙醇溶液中30 min,随后利用氮气将材料表面吹干。随后制备含有质量分数20%丙烯酸酯、质量分数1%光引发剂2959和少量MBA的水凝胶预聚体溶液。将处理后的硅橡胶鼻胃管和鼻胃管浸入水凝胶预聚体溶液中,在紫外光(波长为365 nm,功率为30 W)下照射1 h,制得PAAm水凝胶涂层。

采用SEM对涂层包覆前后硅橡胶鼻胃管的微观结构进行观察分析。将改性前后的鼻胃管进行烘干后,利用FTIR仪反射模式在常温下对鼻胃管表面官能团进行检测,测试分辨率为 4 cm^{-1} ,扫描次数为32次,测试范围为 $600 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$ 。随后利用XPS仪测试鼻胃管表面的元素组成,其X光源为单色Al K α 源,能量为1486.6 eV。

为测试涂层的稳定性,我们将涂层改性鼻胃管置于水浴超声中处理30、60和90 min,超声功率和频率分别为500 W和40 kHz。通过超声处理前后的质量差计算涂层的失重百分比。数值越高表明涂层稳定性越差。

1.2.2 涂层改性硅橡胶鼻胃管的亲水润滑性能

为研究鼻胃管表面的润湿性,利用水接触角测试仪测定了改性前后硅橡胶鼻胃管的室温静态水接触角。数值越高表明表面亲水性越差。硅橡胶鼻胃管表面的润滑性能通过摩擦磨损仪进行测试,指标为摩擦系数。摩擦系数为摩擦曲线的平均值。数值越高表明表面润滑性能越差。摩擦副选用涂层改性后的硅橡胶鼻胃管和直径 6 mm 的不锈钢球。测试通过直线往复运动模式在常温水环境中进行。施加的力和滑动速度分别设定为 5 N 和 5 mm/s。以上每个测试至少重复 3 次,每组至少 3 个样品。

1.3 生物学评价

1.3.1 涂层改性鼻胃管的细胞相容性

生物相容性是置入材料生物学评价的重要指标。将小鼠成纤维细胞 L929(普华赛尔生物医疗科技有限公司)置于 CO₂ 孵箱培养(α -MEM 培养基+10%FBS),L929 细胞传代培养至 80% 融合度后再接种到 96 孔板(2×10⁴/孔)备用。将改性前、后的鼻胃管各裁剪成长为 1 cm、直径为 2 mm、内径为 1.67 mm 的圆筒形样品,并进行紫外线灭菌,随后将裁成的小片放入前面的孔板中,与细胞共培养 24 h。用无菌镊子将小片取出,并用 PBS 溶液冲洗 2 次。使用 CCK-8 试剂盒检测共培养前后的细胞在 450 nm 处的光密度(OD)值以评价细胞相容性。数值越高表明细胞

相容性越好。

1.3.2 涂层改性鼻胃管置管评价

通过建立新西兰兔鼻胃管置管动物模型验证亲水润滑涂层在置管情况下的效果。选取 2~3 月龄,体质量为 2.0~2.5 kg 的新西兰兔 24 只,随机分成 2 组,每组 12 只。通过兔耳缘静脉注射戊巴比妥钠对新西兰兔进行麻醉,随后固定新西兰兔,使其呈仰卧位。经鼻缓慢插入胃管至一定长度,通过注射器经鼻胃管吸取胃液,检验鼻胃管是否成功插入胃部,最后将体外胃管部分缝合固定于同侧鼻外侧软骨处。在置管过程中,记录置管时间和次数。鼻胃管留置 8 h 后,取出鼻胃管,通过可视软性喉镜对新西兰兔的鼻腔和鼻咽部进行观察,评估置管所致损伤程度。主要结局指标为置管时间。次要结局指标为置管次数和黏膜水肿、出血。

1.4 统计学方法

计量资料采用 $\bar{x} \pm s$ 表示,采用独立样本 *t* 检验进行组间比较, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果与讨论

2.1 微观结构和宏观形貌分析

见图 1。未改性硅橡胶鼻胃管表面平坦光滑。当涂层修饰后,鼻胃管表面呈三维网络结构,证实了 PAAm 水

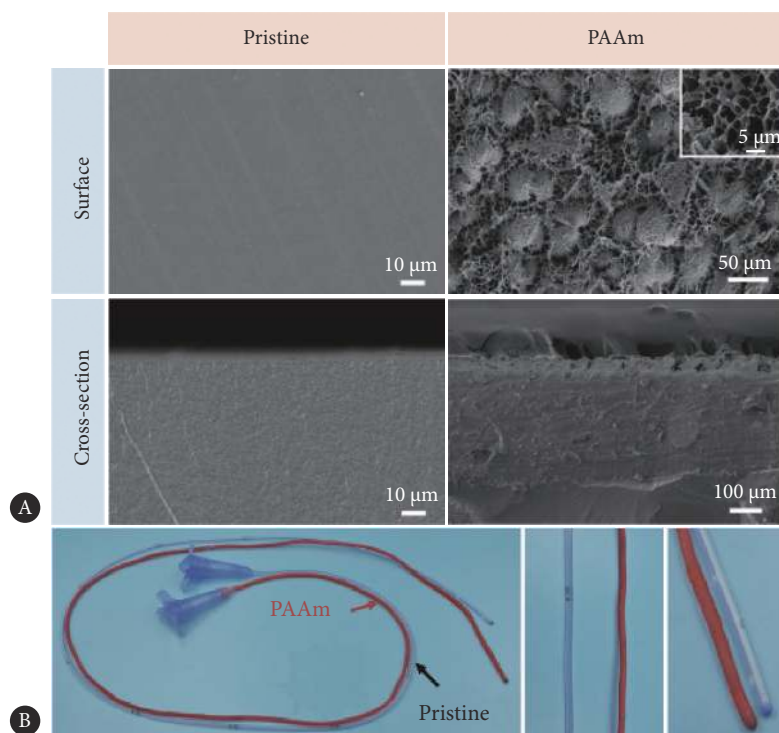


图 1 改性前后硅橡胶鼻胃管 SEM 下的微观结构 (A) 及鼻胃管的宏观照片 (B)

Fig 1 The microstructure of silicone rubber substrate observed under scanning electron microscope (A) and photos of nasogastric tubes (B) before and after the modification

B, Macroscopic observations revealed that the coating completely covered the entire surface of the nasogastric tube, including the spherical tip (the red tube, PAAm).

凝胶涂层成功构筑。与改性前硅橡胶鼻胃管相比,涂层改性鼻胃管的断面呈现波纹状轮廓。涂层与鼻胃管间模糊的界面体现了良好的界面相容性,证明涂层共形修饰的成功。截留在硅橡胶鼻胃管表面以下的二苯甲酮在紫外光下从硅橡胶分子链上夺取H原子,使大分子链带有自由基^[20]。在丙烯酰胺单体进行紫外光引发自由基聚合的过程中与大分子链通过共价键相连接,保证了涂层与鼻胃管的界面结合。宏观观察显示,涂层完全覆盖了鼻胃管的整个表面,包括球形的尖端。

2.2 组成及吸水性能分析

2.2.1 涂层组成分析

相比于未改性硅橡胶鼻胃管,涂层改性鼻胃管的红外光谱中在 3415 和 3201 cm^{-1} 处出现了对应于 $-\text{NH}_2$ 的特征吸收峰,并在 1667 cm^{-1} 处出现了对应于 $-\text{C}=\text{O}$ 的特征吸收峰(图2A)。这充分表明PAAm涂层在硅橡胶鼻胃管上的成功修饰^[21]。XPS谱图显示改性鼻胃管中出现了新的氮(N)元素峰(图2B),证实了PAAm涂层的存在。

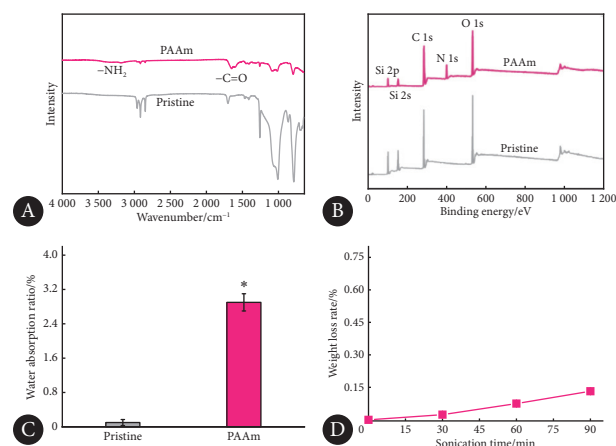


图2 改性前后硅橡胶鼻胃管组成及吸水性能

Fig 2 The composition and water absorption property of silicone rubber substrate before and after modification

A, FTIR spectra of silicone rubber substrate; B, XPS spectra of silicone rubber substrate; C, the saturated water absorption ratio of silicone rubber substrate; D, the weight loss rate of modified silicone rubber substrate after different sonication time. * $P < 0.05$, vs. pristine. $n = 5$.

2.2.2 吸水性能分析

图2C显示未改性硅橡胶鼻胃管基本不吸水,而涂层改性鼻胃管的吸水率显著改善,高达2.9%。这与PAAm水凝胶涂层的三维网络结构密切相关。为验证涂层的稳定性,涂层改性硅橡胶鼻胃管经过不同时间的超声处理,结果表明涂层的失重率始终处于较低的水平,在超声90 min后,涂层的失重率仅为0.15%(图2D)。涂层与鼻胃管间的界面共价结合保证了涂层的良好稳定性。

2.3 亲水润滑性能分析

2.3.1 亲水性分析

利用水接触角测试仪检测了涂层改性前后硅橡胶鼻胃管表面的润湿性。未改性鼻胃管呈高疏水性,水接触角为 $111.9^\circ \pm 2.2^\circ$,而涂层改性鼻胃管的水接触角明显下降到 $58.9^\circ \pm 1.5^\circ$ ($t = 22.59$, $P < 0.05$)。PAAm水凝胶涂层的良好润湿性为实现水合润滑功能奠定了基础。

2.3.2 润滑性能分析

通过在水溶液中利用摩擦磨损仪测定硅橡胶鼻胃管表面的摩擦系数以评估PAAm水凝胶涂层的润滑性能^[22]。随着滑动时间的变化,未改性鼻胃管的摩擦系数持续增加(图3A),平均值为 0.378 ± 0.050 。相比之下,涂层改性鼻胃管的摩擦系数基本保持稳定且明显降低,平均值仅为 0.116 ± 0.004 ($t = 42.80$, $P < 0.05$)。PAAm水凝胶涂层吸收了大量的水,降低了界面处的摩擦,呈现良好的润滑特性。

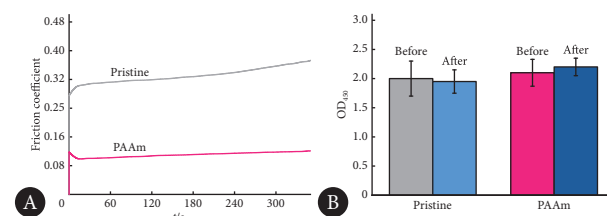


图3 改性前后硅橡胶鼻胃管的润滑性能及细胞相容性

Fig 3 The lubrication property and cytocompatibility of silicone rubber substrate before and after modification

A, The curves of friction coefficient for silicone rubber substrate; B, the OD value of samples at 450 nm, $n = 5$.

2.4 细胞相容性检测

图3B表明,改性前的鼻胃管与细胞共培养前、后,组间细胞的光密度值差异没有统计学意义;改性后的鼻胃管与细胞共培养前、后,组间细胞的光密度值差异没有统计学意义。这证明PAAm水凝胶涂层没有生物毒性^[23]。

2.5 鼻胃管置管参数及损伤评价

2.5.1 置管参数分析

剔除因个体差异产生的不合格数据后,每组纳入5只兔的数据。使用未改性鼻胃管完成置管过程所需平均时间为 $(41.6 \pm 7.8)\text{ s}$,而完成涂层改性鼻胃管置管过程所需时间缩短,仅为 $(12.4 \pm 2.9)\text{ s}$,差异有统计学意义($t = 8.509$, $P < 0.05$)。图4A显示完成置管过程所需次数在使用未改性鼻胃管时为平均2~3次,涂层改性后鼻胃管仅需一次就可以实现成功置管。PAAm水凝胶涂层的引入可以使鼻胃管置管更快更易进行。

2.5.2 置管损伤评价

图4B表明未改性鼻胃管置管后鼻黏膜水肿明显并伴有出血,使用涂层改性鼻胃管置管后新西兰兔的鼻黏膜

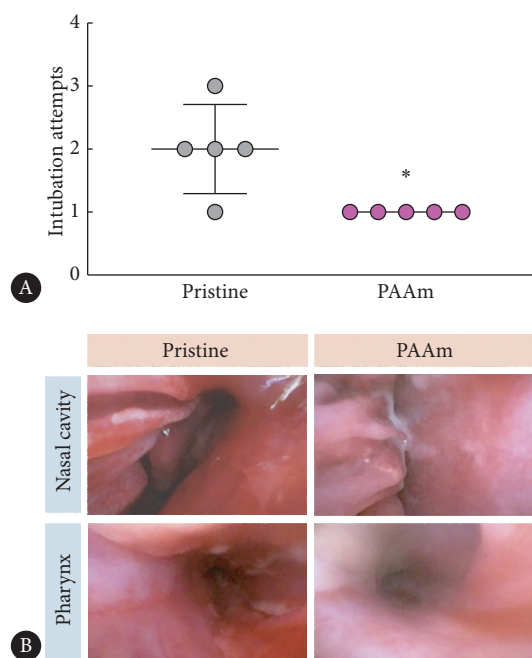


图 4 改性前后鼻胃管置管参数及损伤评价

Fig 4 The insertion parameters and evaluation of damage caused by nasogastric tube insertion before and after modification

A, The total insertion attempts for one successful insertion of nasogastric tubes; B, laryngoscopic images of the nasal cavity and pharynx. * $P < 0.05$, vs. pristine. $n = 5$.

损伤明显减轻。这证明PAAm亲水润滑涂层在鼻胃管表面的引入有利于减轻置管损伤及并发症。

3 结论与展望

本研究在硅橡胶鼻胃管表面制备PAAm水凝胶涂层,该涂层与硅橡胶鼻胃管界面结合良好。PAAm水凝胶涂层的引入显著改善了硅橡胶鼻胃管的亲水润滑性能。PAAm水凝胶涂层改性鼻胃管具有良好的生物相容性。在置管实验中涂层改性鼻胃管有效缩短了置管时间,减轻了黏膜水肿和出血现象。本研究为制备低损伤新型鼻胃管提供了有价值的参考。

本研究的局限性在于缺乏涂层与鼻胃管结合强度的测定以及置管损伤的定量评价。本研究下一步的工作目标是测试涂层的界面结合强度以及对改性鼻胃管的置管损伤进行更多维度的评价,充分研究涂层改性鼻胃管减轻置管并发症的效果和机理。

* * *

作者贡献声明 苟菊香和徐家壮负责论文构思,蔡明和李精健负责调查研究,蔡明负责提供资源,王志国负责研究方法,王志国和涂睿婷负责正式分析,涂睿婷、冉轶尘和林笑锐负责验证;林笑锐负责可视化,刘雨薇负责研究项目管理,苟菊香、李卡和徐家壮负责经费获取,苟菊香负责初稿写作,蔡明、李卡和徐家壮负责审读与编辑写作。所有作者已经同

意将文章提交给本刊,且将对要发表版本进行最终定稿,并同意对工作的所有方面负责。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] SIDDHARTHA B S V, SHARMA N G A, KAMBLE S, *et al.* Nasogastric tube insertion in anesthetized intubated patients undergoing laparoscopic hysterectomies: a comparative study of three techniques. *Anesth Essays Res*, 2017, 11(3): 550–553. doi: 10.4103/aer.AER_41_17.
- [2] PARK J W, PARK K D, KIM T H, *et al.* Comparison of tube feeding in stroke patients: nasogastric tube feeding versus oroesophageal tube feeding--a pilot study. *Medicine (Baltimore)*, 2019, 98(30): 16472. doi: 10.1097/MD.00000000000016472.
- [3] SCHLAGER A, METZGER Y C, ADLER S N. Use of surface acoustic waves to reduce pain and discomfort related to indwelling nasogastric tube. *Endoscopy*, 2010, 42(12): 1045–1048. doi: 10.1055/s-0030-1255801.
- [4] ZHAO B, LI Y P, WANG Q, *et al.* Ultra-slippery, nonirritating, and anti-inflammatory hyaluronic acid-based coating to mitigate intubation injury. *Chem Eng J*, 2022, 427: 130911. doi: 10.1016/j.cej.2021.130911.
- [5] BAI M H, ZHAO B, LIU Z Y, *et al.* Mucosa-like conformal hydrogel coating for aqueous lubrication. *Adv Mater*, 2022, 34(46): 2108848. doi: 10.1002/adma.202108848.
- [6] PRABHAKARAN S, DORAISWAMY V A, NAGARAJA V, *et al.* Nasoenteric tube complications. *Scand J Surg*, 2012, 101: 147–155. doi: 10.1177/145749691210100302.
- [7] KUO Y W, YEN M, FETZER S, *et al.* Reducing the pain of nasogastric tube intubation with nebulized and atomized lidocaine: a systematic review and meta-analysis. *J Pain Symptom Manage*, 2010, 40(4): 613–620. doi: 10.1016/j.jpainsymman.2010.01.025.
- [8] THOMPSON R. Endoscopy: acoustic lubrication reduces pain and discomfort associated with nasogastric intubation. *Nat Rev Gastroenterol Hepatol*, 2010, 7(12): 654. doi: 10.1038/nrgastro.2010.177.
- [9] YANG C W, YEN H H, SU W W, *et al.* Esophageal submucosal tunnel: a rare complication of nasogastric tube placement. *Dis Esophagus*, 2016, 29(6): 690. doi: 10.1111/dote.12109.
- [10] HIRSHOREN N, GROSS M, WEINBERGER J M, *et al.* Retropharyngeal infected hematoma: a unique complication of nasogastric tube insertion. *J Trauma*, 2009, 67(4): 891. doi: 10.1097/TA.0b013e31805d8f80.
- [11] WOOD C. New strategy to ease the discomfort of insertion of nasogastric tubes. *Int J Clin Pract*, 2005, 59(12): 1373–1374. doi: 10.1111/j.1368-5031.2005.00751b.x.
- [12] LI Y P, LIU W, LIU Y H, *et al.* Highly improved aqueous lubrication of polymer surface by noncovalently bonding hyaluronic acid-based hydration layer for endotracheal intubation. *Biomaterials*, 2020, 262: 120336. doi: 10.1016/j.biomaterials.2020.120336.
- [13] LIU G, FENG Y, ZHAO N, *et al.* Polymer-based lubricating materials for functional hydration lubrication. *Chem Eng J*, 2022, 429: 1322324. doi: 10.1016/j.cej.2021.132324.
- [14] PARADA G, YU Y, RILEY W, *et al.* Ultrathin and robust hydrogel coatings on cardiovascular medical devices to mitigate thromboembolic

- and infectious complications. *Adv Healthc Mater*, 2020, 9(20): 2001116. doi: [10.1002/adhm.202001116](https://doi.org/10.1002/adhm.202001116).
- [15] ZHANG J, JIANG D, WANG D, *et al.* MoS₂ lubricating film meets supramolecular gel: a novel composite lubricating system for space applications. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13(48): 58036–58047. doi: [10.1021/acsami.1c20182](https://doi.org/10.1021/acsami.1c20182).
- [16] XU R, ZHANG Y, MA S, *et al.* A universal strategy for growing a tenacious hydrogel coating from a sticky initiation layer. *Adv Mater*, 2022, 34(11): 2108889. doi: [10.1002/adma.202108889](https://doi.org/10.1002/adma.202108889).
- [17] YU Y, YUK H, PARADA G A, *et al.* Multifunctional "hydrogel skins" on diverse polymers with arbitrary shapes. *Adv Mater*, 2019, 31(7): 1807101. doi: [10.1002/adma.201807101](https://doi.org/10.1002/adma.201807101).
- [18] GAO L, ZHAO X, MA S, *et al.* Constructing a biomimetic robust bi-layered hydrophilic lubrication coating on surface of silicone elastomer. *Friction*, 2021, 10(7): 1046–1060. doi: [10.1007/s40544-021-0513-5](https://doi.org/10.1007/s40544-021-0513-5).
- [19] YIN T, LAVOIE S R, QU S, *et al.* Photoinitiator-grafted polymer chains for integrating hydrogels with various materials. *Cell Rep Phys Sci*, 2021, 2(6): 100463. doi: [10.1016/j.xcrp.2021.100463](https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100463).
- [20] YU Y, WANG J, WANG X W, *et al.* A tough, slippery, and anticoagulant double-network hydrogel coating. *ACS Appl Polym Mater*, 2022, 4(8): 5941–5951. doi: [10.1021/acsapm.2c00800](https://doi.org/10.1021/acsapm.2c00800).
- [21] XUE H, HU L, XIONG Y, *et al.* Quaternized chitosan-matrigel-polyacrylamide hydrogels as wound dressing for wound repair and regeneration. *Carbohydr Polym*, 2019, 226: 115302. doi: [10.1016/j.carbpol.2019.115302](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115302).
- [22] ZHANG Y, ZHAO W, MA S, *et al.* Modulus adaptive lubricating prototype inspired by instant muscle hardening mechanism of catfish skin. *Nat Commun*, 2022, 13(1): 377. doi: [10.1038/s41467-022-28038-9](https://doi.org/10.1038/s41467-022-28038-9).
- [23] YAO M, WEI Z, LI J, *et al.* Microgel reinforced zwitterionic hydrogel coating for blood-contacting biomedical devices. *Nat Commun*, 2022, 13(1): 5339. doi: [10.1038/s41467-022-33081-7](https://doi.org/10.1038/s41467-022-33081-7).

(2023-05-16收稿, 2023-07-14修回)

编辑 吕 熙



开放获取 本文遵循知识共享署名—非商业性使用

4.0国际许可协议(CC BY-NC 4.0), 允许第三方对本刊发

表的论文自由共享(即在任何媒介以任何形式复制、发行原文)、演绎(即修改、转换或以原文为基础进行创作), 必须给出适当的署名, 提供指向本文许可协议的链接, 同时标明是否对原文作了修改; 不得将本文用于商业目的。CC BY-NC 4.0许可协议详情请访问<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>。

© 2023《四川大学学报(医学版)》编辑部 版权所有