

显影材料在外科疝修补中的应用及进展

丁绪忠¹, 曹庆², 柳安宁¹, 徐宇¹, 杨宇民³, 李鹏^{2*}

¹南通大学研究生院, 江苏 南通

²南通大学附属医院胃肠外科, 江苏 南通

³南通大学教育部/江苏省神经再生重点实验室/神经再生协同创新中心, 江苏 南通

收稿日期: 2021年11月12日; 录用日期: 2021年12月29日; 发布日期: 2022年1月5日

摘要

补片植入已经成为外科疝修补术的主流。与传统的有张力的手术修补方法相比, 补片植入极大地加强了缺损腹壁强度, 降低了复发率, 但同时会带来一些补片相关并发症, 如慢性异物反应(FBR)、腹腔粘连、感染以及痿的发生。研究表明, 这些并发症的发生与补片的牵缩移位密切相关, 然而现有的影像学手段很难追踪这一过程, 导致迫切需要开发一种与人体具有良好相容性并可在影像学下观察到的补片。本文介绍了常见显影材料在疝修补应用中的安全性及可视化的进展。

关键词

疝气, 补片, 显影材料, 可视化

Application and Progress of Imaging-Visible Materials in Surgical Hernia Repair

Xuzhong Ding¹, Qing Cao², Anning Liu¹, Yu Xu¹, Yumin Yang³, Peng Li^{2*}

¹Graduate School of Nantong University, Nantong Jiangsu

²Department of Gastrointestinal Surgery, Affiliated Hospital of Nantong University, Nantong Jiangsu

³Key Laboratory of Neuroregeneration of Jiangsu and Ministry of Education, Co-Innovation Center of Neuroregeneration, Nantong University, Nantong Jiangsu

Received: Nov. 12th, 2021; accepted: Dec. 29th, 2021; published: Jan. 5th, 2022

Abstract

The use of meshes has become the mainstay of surgical hernia repair. Compared to traditional

*通讯作者。

文章引用: 丁绪忠, 曹庆, 柳安宁, 徐宇, 杨宇民, 李鹏. 显影材料在外科疝修补中的应用及进展[J]. 纳米技术, 2022, 12(1): 1-7. DOI: 10.12677/nat.2022.121001

tensioned surgical repair methods, mesh implantation has greatly enhanced the strength of the defective abdominal wall and reduced the recurrence rate, but at the same time, brings about some mesh-related complications, such as chronic foreign body reaction (FBR), abdominal adhesions, infection, and fistula development. Studies have shown that the occurrence of these complications is closely related to contracture and displacement of the mesh, yet available imaging tools do not track this process, leading to an urgent need to develop a mesh that is compatible with the body and can be observed on imaging. This article presents advances in the safety and visualization of common developing materials for hernia repair applications.

Keywords

Hernia, Meshes, Imaging-Visible Materials, Visualisation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

疝气修复是全球最常见的外科手术之一，每年约有 2000 万例手术[1]。此外，由于腹部开放手术以及肥胖患病率的不断增加，导致疝气发生率逐步升高[2]。鉴于疝气的发生多伴随基本解剖结构的改变，手术治疗是其唯一彻底治愈方式。与传统手术方式相比，由于复发率显著降低，网状补片的使用已成为金标准，但不能忽视补片和宿主组织之间存在的潜在问题[3]。常见的补片相关并发症包括感染、疼痛、血清肿以及腹腔脏器粘连[4]。研究表明，大约 1/3 的并发症是由补片的皱缩、移位导致，对疝外科医生来说，如何能够快速方便甚至三维地显示植入体内的补片状态一直是一个挑战，因为现在主流的补片材料无法被常规影像技术追踪探测[5]。近年来，越来越多的研究者意识到假体植入人体后可视化的重要性，并研究出大量可被追踪的显影材料。这些材料通过不同的方法与原有补片材料结合(见表 1)，进一步推动了“功能性补片”的概念。

Table 1. Method of combining developing material with polymer

表 1. 显影材料与聚合物结合方法

方法	优点	缺点
熔融混合	操作简单方便，显影物质衰减缓慢，显影时间长	理化性质可能改变，安全性未知
涂层	操作简单，耗时短	显影时间短，无法满足长期定位需求
共价结合	降低原有材料毒性，安全性高	制作工艺复杂，显影时间较短

2. 补片设计的主要标准

一般来说，无论哪种类型的补片，在设计的过程中都应该遵循以下两种标准：生物相容性，基本力学性能[6] [7]。

2.1. 生物相容性

生物相容性是移植物的重要性能，决定着补片植入后的异物反应(FBR)，包括纤维化、钙化、血栓形

成、感染以及肉芽肿、瘘管和血清肿形成[8] [9] [10]。根据 Williams 的说法,“区分生物材料与任何其他材料的最重要的一个因素是它能够与人体组织接触而不会对人体造成不可接受的伤害”[11]。因而用于腹壁修复的材料必须保持生物惰性并抵抗机体排斥。单丝聚丙烯补片足以满足上述要求,但是避免不了异物反应的发生,由此可见外科修补中不存在理想的补片,这一点从当今市场上各种各样的网格材料和设计中可以明显看出[12]。因此,生物相容性是补片设计中永恒的主题。

2.2. 基本力学性能

Cobband 等人的研究表明,人类最高的腹内压是在咳嗽和跳跃时产生的,最大峰值可达 171 mmHg [13]。根据普拉斯定律转换为平均拉伸强度可得知,要想成功修复疝气,补片必须承受的每单位宽度的最大理论拉伸强度分别为 32 N/cm [14] [15]。补片的弹性是衡量补片物理性能的关键指标,可以通过顶破实验中的面积增加率来模拟。Junge 等人的实验发现当顶破力达到 16 N/cm 时,人体腹壁发生的形变范围约在 10%~30%之间[16]。弹性值低于这一范围的补片,顺应腹壁运动的能力较差,患者在弯腰、咳嗽等动作时会有明显的异物感[10]。除此之外,补片的撕破强度决定着疝修补术复发的概率。研究表明人体腹壁的撕破强度约为 20 N,撕破强度低于这一数值的补片很容易撕裂,引起疝气的复发[10]。

3. 常用显影材料分类

临床上诊断疝气常用方法有超声、CT 或 MRI 等影像学检查[17]。由于市场上常用补片很难通过上述检查发现,在近年来研究出大量可显影补片,并通过了体外试验、动物模型以及人体临床试验(表 2)。

Table 2. Clinical applications of commonly used developing materials

表 2. 常用显影材料临床应用

显影材料	临床应用	影像学检查
硫酸钡	骨板/补片/牙髓内封闭剂	X 射线/计算机断层扫描
氧化铁	靶向调控药物/补片	核磁共振扫描
碘化物	外科敷料/抗菌聚合物/补片	计算机断层扫描
钆	补片	核磁共振扫描
镍钛合金	支架/补片	计算机断层扫描

3.1. 超声可见材料

目前的人工合成材料如聚丙烯等,由于其高回声性,首选方法的探测方法是超声波[18]。然而在被宿主组织浸润后直接定位植入材料是极具挑战性的,甚至是不可能的[19]。超声检查中,如果手术区域没有水肿、感染或瘢痕形成,则不能将补片与周围组织区分开来,因为信号差异太小,无法分辨补片与周围组织。更多的超声方法如闪烁伪影,也被用于探测补片的位置,遗憾的是,腹股沟网状物的存在与灰度超声检查中的网状物检测之间没有显著关系[19]。总而言之,尽管超声因为其方便、廉价在疝气诊断中表现出良好的适用性,然而疝修补术后的并发症与补片的关系不能通过这种方法进行验证,因为目前并没有一种具有材料植入人体后与周围组织有良好的回声对比。

3.2. CT 可视材料

高电子密度材料具有吸收 X 射线的的能力,常用于 CT 影像诊断,经典的造影剂包括硫酸钡,碘化物。随着钛合金材料的临床应用,其显影性也得到了广泛关注。

3.2.1. 硫酸钡类补片

硫酸钡化学性质稳定,不溶于水,理论上无毒性,广泛应用于工业生产中。作为常用的造影剂,医学使用的硫酸钡须通过化学合成法,达到形貌和粒径可控的微细硫酸钡颗粒。在消化道造影中,黏膜完整的肠道中不能吸收硫酸钡颗粒,虽然混悬液中有极少量的有毒的游离钡离子被肠道吸收,但没有证据表明其对机体有实际的危害意义[20]。早期,人们发现钡具有良好 X 射线衰减系数($2.196 \text{ cm}^2/\text{g}$)以及优秀的 X 线吸收性,曾被用作不透射线的材料,以允许在临床使用中监测植入的医疗器械的位置,例如椎体成形术水泥和牙髓封闭剂[21]。随后,硫酸钡的显影性能被广泛研究,含硫酸钡骨板与节育环也通过实验证明其基本的临床应用价值[22] [23]。虽然硫酸钡生物惰性,理化性质良好,但是其应用于人体的安全性仍然引起广泛关注。实验表明,含硫酸钡的骨水泥抗拉强度、横向强度以及断裂模量均会降低[24]。细胞层面,硫酸钡可能改变巨噬细胞的分化从而招募破骨细胞沉淀,促进骨-种植体界面的骨溶解[25]。相比之下,硫酸钡材料与纤维混匀并未发现这些问题。马志君等人研究发现硫酸钡的与黏胶纤维混合后改变了其原有的晶体结构,提高了纤维结晶度,同时可以增强防辐射能力,理化性质良好,达到了一级品的标准[26]。与聚丙烯单丝相比,硫酸钡/聚丙烯材料不仅没有体现更多的细胞毒性,而且可在 CT 下追踪补片位置[27]。此外,硫酸钡没有延长伤口愈合时间的潜在危险性[28]。这些证据表明,硫酸钡复合材料在软组织中表现出生物惰性,但其对材料的强度影响依然需要继续研究。

3.2.2. 碘化物类补片

目前的碘化物复合补片材料相对较少,与硫酸钡一样,早期的碘化物主要临床应用于造影剂。然而碘剂的不良反应用却远远多于硫酸钡,据报道其不良反应发生率为 0.32%~0.64%,重度不良反应率为 0.01%~0.04% [29]。最常见的不良反应主要为皮肤反应,如荨麻疹,瘙痒,此外还可出现面色潮红等血管炎性症状。目前,作为血管造影剂的碘化物已成为医源性急性肾损伤的重要原因[30]。

Ballard 等人曾通过 3D 打印补片并浸渍碘造影剂,结果发现体外模拟人体环境下,碘造影剂衰减明显,无法很好的显影,同时没有更多的实验证明其生物安全性[31]。在长期应用的情况下,碘离子有可能渗入体液,这使得显影效果持续短暂,并可能导致全身毒性反应。潜在的危险也促进了碘化物的发展。研究发现,将碘化物部分共价结合到聚合物主链上不仅可以降低碘的毒性,而且给聚合材料提供了可影像追踪的途径。基于上述方法,S. Kiran 等人合成具有共价键合的重卤原子(碘)的单体,并用这些单体构建不透射线碘化聚氨酯[32]; Ghosh 等人通过碘与丁烯二醛的不饱和位点共价结合,并与壳聚糖交联反应,设计出无毒碘化产品[33]。除了安全性的改善,碘化物共价结合聚合材料还可加强其力学性能,这在上述研究中也有所体现。在与聚丙烯共价结合过程中,壳聚糖发挥了重要作用。François 等人发现,壳聚糖与柠檬酸交联剂摩尔比为 1%w/v 时富含阳离子铵基团,可选择性的结合碘基团,为聚丙烯提供了一定的抗菌能力[34]。虽然目前没有碘化物应用于补片的相关报道,但聚丙烯作为补片主流材料,其共价结合碘化物应用于人体的可行性已被 François 发现,为显影补片的制作提供了基础。

3.2.3. 镍钛合金类补片

镍钛合金作为一种新型的合成材料,具备多种优秀的物理性能,包括:超弹性、耐磨损性与抗腐蚀性[35],并且拥有其他金属材料不可比拟的生物相容性,已被广泛应用于五官科、微创介入科、骨科等学科。然而任何材料都不是完美的,早在 1990 年,国际癌症研究所(IARC)就将镍化合物归为 I 类致癌物。研究表明,镍暴露不仅会引起肺纤维化和不同程度的肾及心血管毒性,还会促进包括肺上皮细胞在内的多种正常细胞的癌变[36]。虽然表面层钛氧化充当了保护屏障,但是潜在的风险依然引起了人们对其软组织应用的担忧。相比之下,纯钛可能具备更好的生物相容性。俄罗斯的研究者通过多项研究证明了纯钛的安全性,临床人体试验也显示出钛丝补片的 X 线吸收性能,这一特性让他们更简便的计算了补片的皱

缩率并可观察补片的移位[37]。值得一提的是, 这些研究中钛丝补片的物理性能并没有下降。可以预见在未来, 钛丝补片将会有广阔的市场。

3.3. MRI 可视化材料

核磁共振成像是目前世界上最强大的无创成像技术, 可用于提供较高的空间和时间分辨率, 而不产生辐射[38]。在国外, MRI 可视的补片已被广泛研究, 常用的材料包括氧化铁、钆及其相关产物[39] [40] [41]。

3.3.1. 氧化铁类补片

氧化铁是临床诊断中常用的低毒性造影剂, 纳米修饰的氧化铁, 因其具有超顺磁性在磁共振成像中具有较好的暗对比效果[42]。与 CT 造影剂相比, MRI 造影剂不良反应发生率明显降低, 且大多为一过性, 症状较轻[43], 与氧化铁相关的不良反应更是鲜有报道。这导致了氧化铁成为体内植入可显影材料的热门。

早期, I. Slabu 等人研究了超顺磁氧化铁纳米颗粒的理化性质, 证实了其作为纺织外科植入物巨大潜力[44]。为了重建骨盆骨和神经血管结构的空間关系, Luyun Chen 及其同事将顺磁性氧化铁微粒集成到聚偏二氟乙烯(PVDF)聚合物细丝中, 结果发现 MRI 扫描可清晰显示重要骨盆结构及相关的网状结构[40]。动物实验中, 含氧化铁切口疝网片也可被 MRI 探查, 并且清楚的与腹腔脏器进行区别, 这为临床治疗提供了指导[45]。值得关注的是, 这些实验没有验证其生物安全性, 尽管前期的临床实践中氧化铁的并发症相对较少。

3.3.2. 钆类补片

1987 年, 美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)首次批准二乙三胺五乙酸合钆(Gd-DTPA)为临床应用的 MRI 造影剂, MRI 自此进入了对比剂检查时代。钆本身是具有毒性的, 通过顺磁螯合可以去除毒性, 并且性质稳定。目前常用的螯合物主要为钆喷酸葡胺(GdDTPA)、钆贝葡胺(GdBOPTA)、钆双胺(Gd-DTPA-BMA) [43]。将这些显影剂应用于体内移植材料是具有诊断意义的。研究发现, 钆螯合物可以共价和不稳定链接枝到疏水聚合物的主链上, 并且形成不易分解的聚合物。Blanquer 和 Guillaume 等人分别将 GdDTPA 分别结合到聚(ϵ -己内酯)(PCL)与聚丙烯脂酸上, 构建了可 MRI 显影的网片, 并通过细胞增殖实验证明了网片没有毒副作用[41] [46]。鉴于细胞与体内环境的巨大差异, 更多的体内实验是有必要的。

4. 总结

随着“功能性补片”的定义出现, 临床上对补片的要求越来越高, 单丝聚丙烯与其他疏水聚合物功能单一, 已不能完全满足市场的需求。近年来, 补片在外科中的应用逐渐增多, 随之而来的是补片相关并发症也逐渐增加, 尽管发生率较低, 但是在庞大的基数下, 数量依然不容忽视。当疼痛、感染、粘连以及疝气复发时, 临床医生无法通过常规手段辨别这些并发症是否与补片的挛缩、移位有关, 这决定着治疗策略。唯一解决办法是手术探查, 无疑增加了患者的痛苦与经济负担, 与精准治疗的理论相违背。由此可见, 显影补片在术后具有重要的临床检测意义。

目前应用于假体植入的材料基本为造影剂, 可能的原因是这些材料的安全性已经经过了长期的临床验证。部分研究者已经注意到补片显影的应用前景, 将硫酸钡、碘化物、镍钛合金、氧化铁以及钆与现有的网片材料结合, 制成了可在不同影像学下示踪的补片。然而绝大部分的网片都没有经过系统的安全性测试, 此外, 由于这些显影材料的缓慢降解, 长期的显影性依然值得研究。不可否认的是, 显影性能

丰富了“功能性补片”的定义，是补片设计的趋势。

参考文献

- [1] Kingsnorth, A. and LeBlanc, K. (2003) Hernias: Inguinal and Incisional. *The Lancet*, **362**, 1561-1571. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(03\)14746-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(03)14746-0)
- [2] Lau, B., et al. (2012) Obesity Increases the Odds of Acquiring and Incarcerating Noninguinal Abdominal Wall Hernias. *The American Surgeon*, **78**, 1118-1121. <https://doi.org/10.1177/000313481207801024>
- [3] Collaboration, E.U.H.T. (2000) Mesh Compared with Non-Mesh Methods of Open Groin Hernia Repair: Systematic Review of Randomized Controlled Trials. *British Journal of Surgery*, **87**, 854-859.
- [4] Seker, D. and Kulacoglu, H. (2011) Long-Term Complications of Mesh Repairs for Abdominal-Wall Hernias. *Journal of Long-Term Effects of Medical Implants*, **21**, 205-218.
- [5] Rakic, S. and LeBlanc, K.A. (2013) The Radiologic Appearance of Prosthetic Materials Used in Hernia Repair and a Recommended Classification. *American Journal of Roentgenology*, **201**, 1180-1183. <https://doi.org/10.2214/AJR.13.10703>
- [6] Bringman, S., et al. (2010) Hernia Repair: The Search for Ideal Meshes. *Hernia*, **14**, 81-87. <https://doi.org/10.1007/s10029-009-0587-x>
- [7] Earle, D.B. and Mark, L.A. (2008) Prosthetic Material in Inguinal Hernia Repair: How Do I Choose? *Surgical Clinics of North America*, **88**, 179-201. <https://doi.org/10.1016/j.suc.2007.11.002>
- [8] Junge, K., et al. (2012) Mesh Biocompatibility: Effects of Cellular Inflammation and Tissue Remodelling. *Langenbeck's Archives of Surgery*, **397**, 255-270. <https://doi.org/10.1007/s00423-011-0780-0>
- [9] Klinge, U., et al. (1999) Foreign Body Reaction to Meshes Used for the Repair of Abdominal Wall Hernias. *European Journal of Surgery*, **165**, 665-673.
- [10] Klosterhalfen, B., Junge, K. and Klinge, U. (2005) The Lightweight and Large Porous Mesh Concept for Hernia Repair. *Expert Review of Medical Devices*, **2**, 103-117. <https://doi.org/10.1586/17434440.2.1.103>
- [11] Williams, D.F. (2008) On the Mechanisms of Biocompatibility. *Biomaterials*, **29**, 2941-2953. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2008.04.023>
- [12] Brown, C.N. and Finch, J.G. (2010) Which Mesh for Hernia Repair? *Annals of the Royal College of Surgeons of England*, **92**, 272-278. <https://doi.org/10.1308/003588410X12664192076296>
- [13] Cobb, W.S., et al. (2005) Normal Intraabdominal Pressure in Healthy Adults. *Journal of Surgical Research*, **129**, 231-235. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2005.06.015>
- [14] Pott, P.P., et al. (2012) Mechanical Properties of Mesh Materials Used for Hernia Repair and Soft Tissue Augmentation. *PLoS ONE*, **7**, e46978. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0046978>
- [15] Deeken, C.R., et al. (2011) Physicomechanical Evaluation of Polypropylene, Polyester, and Polytetrafluoroethylene Meshes for Inguinal Hernia Repair. *Journal of the American College of Surgeons*, **212**, 68-79. <https://doi.org/10.1016/j.jamcollsurg.2010.09.012>
- [16] Junge, K., et al. (2001) Elasticity of the Anterior Abdominal Wall and Impact for Reparation of Incisional Hernias Using Mesh Implants. *Hernia*, **5**, 113-118. <https://doi.org/10.1007/s100290100019>
- [17] 中华医学会外科学分会疝和腹壁外科学组, 中国医师协会外科医师分会疝和腹壁外科医师委员会. 成人腹股沟疝诊疗指南(2014年版)[J]. 中国实用外科杂志, 2014, 34(6): 484-486.
- [18] Fischer, T., et al. (2007) Functional Cine MRI of the Abdomen for the Assessment of Implanted Synthetic Mesh in Patients after Incisional Hernia Repair: Initial Results. *European Radiology*, **17**, 3123-3129. <https://doi.org/10.1007/s00330-007-0678-y>
- [19] Girish, G., et al. (2011) Usefulness of the Twinkling Artifact in Identifying Implanted Mesh after Inguinal Hernia Repair. *Journal of Ultrasound in Medicine*, **30**, 1059-1065. <https://doi.org/10.7863/jum.2011.30.8.1059>
- [20] 唐兴华, 等. 硫酸钡制剂在消化道造影中的不良反应及并发症研究进展[J]. 中国全科医学, 2013, 16(21): 2536-2538.
- [21] Pepioli, A., et al. (2011) A Highly Radiopaque Vertebroplasty Cement Using Tetraiodinated O-Carborane Additive. *Biomaterials*, **32**, 6389-6398. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2011.05.056>
- [22] 张晗. 聚乙烯/硫酸钡纳米复合材料的制备和表征[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津理工大学, 2012.
- [23] Choi, S.Y., et al. (2015) Bioabsorbable Bone Fixation Plates for X-Ray Imaging Diagnosis by a Radiopaque Layer of Barium Sulfate and Poly(Lactic-Co-Glycolic Acid). *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Bio-*

- materials*, **103**, 596-607. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.33235>
- [24] Ginebra, M.P., *et al.* (2002) Mechanical Performance of Acrylic Bone Cements Containing Different Radiopacifying Agents. *Biomaterials*, **23**, 1873-1882. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(01\)00314-3](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(01)00314-3)
- [25] Wilmhurst, J.A., Brooks, R.A. and Rushton, N. (2001) The Effects of Particulate Bone Cements at the Bone-Implant Interface. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, **83**, 588-592.
- [26] 马君志, 等. 防辐射粘胶短纤维的研制及性能分析[J]. 人造纤维, 2018, 48(6): 2-7.
- [27] Li, H., *et al.* (2021) Visualization of Implanted Mesh in the Pelvic Reconstructive Surgery Using an X-Ray-Detectable Thread. *Archives of Gynecology and Obstetrics*, **304**, 965-973. <https://doi.org/10.1007/s00404-021-06180-x>
- [28] Orucoglu, H. and Cobankara, F.K. (2008) Effect of Unintentionally Extruded Calcium Hydroxide Paste Including Barium Sulfate as a Radiopaque Agent in Treatment of Teeth with Periapical Lesions: Report of a Case. *Journal of Endodontics*, **34**, 888-891.
- [29] Li, X., *et al.* (2017) Clinical Observation of Adverse Drug Reactions to Non-Ionic Iodinated Contrast Media in Population with Underlying Diseases and Risk Factors. *The British Journal of Radiology*, **90**, Article ID: 20160729. <https://doi.org/10.1259/bjr.20160729>
- [30] 黄双, 等. 国内外造影剂的最新研究进展[J]. 中国药理学杂志, 2010, 45(16): 1213-1217.
- [31] Ballard, D.H., *et al.* (2018) 3D Printing of Surgical Hernia Meshes Impregnated with Contrast Agents: *In Vitro* Proof of Concept with Imaging Characteristics on Computed Tomography. *3D Printing in Medicine*, **4**, Article No. 13. <https://doi.org/10.1186/s41205-018-0037-4>
- [32] Kiran, S., *et al.* (2009) Synthesis and Characterization of Iodinated Polyurethane with Inherent Radiopacity. *Biomaterials*, **30**, 5552-5559. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.06.049>
- [33] Ghosh, P., *et al.* (2014) Chitosan Derivatives Cross-Linked with Iodinated 2,5-Dimethoxy-2,5-Dihydrofuran for Non-Invasive Imaging. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **6**, 17926-17936. <https://doi.org/10.1021/am504655v>
- [34] Aubert-Viard, F., *et al.* (2015) Chitosan Finishing Nonwoven Textiles Loaded with Silver and Iodide for Antibacterial Wound Dressing Applications. *Biomedical Materials*, **10**, Article ID: 015023. <https://doi.org/10.1088/1748-6041/10/1/015023>
- [35] 黄亦成, 等. 镍钛合金在医疗领域应用研究进展[J]. 生物医学工程学进展, 2015, 36(3): 169-172.
- [36] 吕建伟, 等. 环境致癌物诱导慢性炎症致肺癌发生发展的研究进展[J]. 生物化学与生物物理进展, 2014, 41(1): 41-51.
- [37] Shemyatovsky, K.A., *et al.* (2020) Computed Tomography Options in the Evaluation of Hernia Repair Outcomes Using “Titanium Silk” Mesh Implants. *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, **14**, 684-689. <https://doi.org/10.1002/term.3029>
- [38] Gallez, B. and Swartz, H.M. (2004) *In Vivo* EPR: When, How and Why? *NMR in Biomedicine*, **17**, 223-225. <https://doi.org/10.1002/nbm.913>
- [39] Kramer, N.A., *et al.* (2010) A Concept for Magnetic Resonance Visualization of Surgical Textile Implants. *Investigative Radiology*, **45**, 477-483. <https://doi.org/10.1097/RLI.0b013e3181e53e38>
- [40] Chen, L.Y., *et al.* (2017) MRI Visible Fe₃O₄ Polypropylene Mesh: 3D Reconstruction of Spatial Relation to Bony Pelvis and Neurovascular Structures. *International Urogynecology Journal*, **28**, 1131-1138. <https://doi.org/10.1007/s00192-017-3263-1>
- [41] Guillaume, O., *et al.* (2012) Permanent Polymer Coating for *in Vivo* MRI Visualization of Tissue Reinforcement Prostheses. *Macromolecular Bioscience*, **12**, 1364-1374. <https://doi.org/10.1002/mabi.201200208>
- [42] 秦苗, 等. 氧化铁纳米颗粒在磁共振成像中的应用[J]. 化学进展, 2020, 32(9): 1264-1273.
- [43] 贡雪芄, 等. 对比剂的临床应用及其不良反应[J]. 医药导报, 2015, 34(9): 1192-1195.
- [44] Slabu, I., *et al.* (2012) Investigation of Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles for MR-Visualization of Surgical Implants. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, **13**, 545-551. <https://doi.org/10.2174/138920112799436249>
- [45] Otto, J., *et al.* (2014) *In Vivo* MRI Visualization of Parastomal Mesh in a Porcine Model. *Hernia*, **18**, 663-670. <https://doi.org/10.1007/s10029-014-1270-4>
- [46] Blanquer, S., *et al.* (2012) New Magnetic-Resonance-Imaging-Visible Poly(ϵ -Caprolactone)-Based Polyester for Biomedical Applications. *Acta Biomaterialia*, **8**, 1339-13347. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2011.11.009>