

doi: 10.13241/j.cnki.pmb.2019.01.038

医用钕铁硼体内植入表面改性研究现状*

刘豪^{1,2,3} 付珊^{1,2,3} 付琴琴⁴ 马思捷^{1,2,3} 张砚超^{1,2,3} 邱明龙^{1,2,3}
马锋² 安英凤^{2,5} 史爱华² 田波彦¹ 张曼¹ 吕毅^{1,2Δ} 严小鹏^{1,2Δ}

(1 西安交通大学第一附属医院肝胆外科 陕西 西安 710061;

2 精准外科与再生医学国家地方联合工程研究中心 陕西 西安 710061; 3 西安交通大学医学部启德书院 陕西 西安 710061;

4 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室 陕西 西安 710049; 5 陕西省疾病预防控制中心 陕西 西安 710054)

摘要:随着磁外科相关技术的不断深入研究和临床探索应用,钕铁硼磁体体内植入需求不断增加,对于植入人体的磁体表面要求也不断提高。由于人体不同植入部位生理环境不同,对表面改性的要求也不同。目前钕铁硼磁性材料体内植入表面改性方法多样,但用于人体内不同部位的表面改性效果尚不确切,且缺乏系统的评价。该文详细总结了现有医用钕铁硼磁体表面改性方法,针对现阶段表面改性存在的问题提出总结,以为后续研究提供思路 and 方向。

关键词:磁外科;钕铁硼;表面改性

中图分类号:Q64; R318; R608 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-6273(2019)01-175-05

Research Status of Medical NdFeB Implantation Surface Modification*

LIU Hao^{1,2,3}, FU Shan^{1,2,3}, FU Qin-qin⁴, MA Si-jie^{1,2,3}, ZHANG Yan-chao^{1,2,3}, QIU Ming-long^{1,2,3},

MA Feng², AN Ying-feng^{2,5}, SHI Ai-hua², TIAN Bo-yan¹, ZHANG Man¹, LV Yi^{1,2}, YAN Xiao-peng^{1,2}

(1 Department of Hepatobiliary Surgery, The First Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi, 710061, China;

2 National Local Joint Engineering Research Center for Precision Surgery & Regenerative Medicine, Xi'an, Shaanxi, 710061, China;

3 Qide College, Xi'an Jiaotong University Health Science Center, Xi'an, Shaanxi, 710061, China;

4 National key laboratory of metal material strength of Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi, 710049, China;

5 Shaanxi Provincial Centre for Disease Control and Prevention, Xi'an, Shaanxi, 710054, China)

ABSTRACT: With the continuous in-depth research and clinical exploration of related technologies in magnetic surgery, the demand for implanting NdFeB magnets has been increasing, and the surface requirements for the magnets implanted into the human body have also been continuously improved. Because of the different physiological environments of different implantation sites in the human body, the requirements for surface modification are also different. At present, the surface modification methods of NdFeB magnetic materials implanted in vivo are various, but the effect of surface modification in different parts of the human body is not yet definitive, and the lack of systematic evaluation. In this paper, the implanted environment and a variety of surface modification methods of the existing medical NdFeB magnets are summarized in detail. The problems existing in the surface modification at the current stage are summarized in order to provide ideas and directions for follow-up study.

Key words: Magnetic surgery; NdFeB; Surface modified

Chinese Library Classification(CLC): Q64; R318; R608 **Document code:** A

Article ID:1673-6273(2019)01-175-05

引言

磁外科(magnetic surgery, MS)是借助磁体与磁体(或磁体与顺磁性材料)之间的“非接触性”磁场力,利用相吸或相斥原理来完成或辅助完成某些操作,如吻合、压迫、锚定、引导、牵引、支撑等,以实现疾病进行诊断和治疗的目的。磁外科根据磁力应用原理和所要解决的临床问题的不同,其相关技术可分为磁压榨技术(magnetic compression technique, MCT)、磁锚定

技术(magnetic anchor technique, MAT)、磁导航技术(magnetic navigation technique, MNT)、磁悬浮技术(magnetic levitation technique, MLT)和磁示踪技术(magnetic tracer technique, MIT)。在磁外科相关技术中,磁体要完成的功能不同,体内留置的时间也不同,因此对磁性材料种类的选择、磁性材料表面改性方案的选择也不同。该文对磁外科中钕铁硼磁性材料体内植入表面改性相关文献进行了总结和分析。

1 永磁材料的发展现状

* 基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2017JQ8021);国家自然科学基金项目(81700545)

作者简介:刘豪(1996-),男,大学本科在读,研究方向:临床医学,电话:029-82657541, E-mail: 1952898162@qq.com

Δ 通讯作者:吕毅(1963-),博士,教授,主任医师,研究方向:磁外科、肝胆胰肿瘤、肝移植,电话:029-85323900, E-mail: luyi169@126.com;

严小鹏(1984-),博士,助理研究员,研究方向:磁外科、肝胆外科疾病,电话:029-85323900, E-mail: yanxiaopeng99@163.com

(收稿日期:2018-04-18 接受日期:2018-06-13)

磁性材料分为铁氧体永磁材料和稀土类永磁材料两大类。稀土永磁材料在磁力学性能上较铁氧体明显占优势,是目前应用最普遍的永磁材料。迄今为止,稀土永磁的发展经历了三代,第一代稀土永磁材料为 SmCo_5 , 第二代稀土永磁材料为 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, 第三代为钕铁硼永磁材料(NdFeB)^[1]。另外还有其他的稀土永磁材料如 MnBi 、 Fe-Co-V 等,因其成本高、性能差而逐渐被淘汰。 NdFeB 永磁材料是上世纪八十年代日本科学家研制成功的,钕铁硼作为第三代稀土永磁,具有高矫顽力、高剩磁、高磁能积等性能^[2]。 NdFeB 以其优异的磁学性能,加之价格便宜,一经问世,便迅速取代了其他永磁材料,成为目前市场中应用最广泛的磁性材料。同时 NdFeB 材料具有良好的组织相容性^[3],因此也是磁外科相关技术中磁性材料的理想选择。

NdFeB 永磁材料的缺点是易被氧化腐蚀,因此使用前必需经过表面改性处理。目前工业上常用的钕铁硼表面处理方法有

电镀、化学镀、物理气相沉积、喷涂、复合表面改性等。这些方法在工业化生产中已成为成熟技术,基本能满足大部分工业及日常生活所需。但是人体环境与工业环境差异较大,且对磁体表面处理的安全性要求更高,因此探索和评估适于人体植入的最优化钕铁硼磁体表面改性方案具有重要意义。

2 医用钕铁硼外环境

钕铁硼永磁材料最早被用于口腔正畸^[4]。随着近二十多年来磁外科相关技术的诞生和拓展,钕铁硼磁体的体内植入范围显著增加,基本涵盖了整个人体的空腔脏器、组织间隙等。而且不同的磁外科技术要求磁体在体内留置的时间也不同,短则数分钟,长则终生。表 1 列出了不同磁外科技术下磁体所处的外环境。表 2 列出了人体不同部位的理化生环境特点。

表 1 磁外科相关技术下磁体外环境

Table 1 The environment of the magnets which was related to the magnetic surgery

Related technologies	Field of application	External environment of the magnets
MCT	血管侧侧吻合 ^[5] 、胃肠吻合 ^[6] 、小肠吻合 ^[7] 、结肠吻合 ^[8] 、膀胱造瘘 ^[9] 、食管狭窄 / 闭锁再通 ^[10] 、胆道狭窄 / 闭锁再通 ^[11] 、胆肠吻合 ^[12] 、胰肠吻合、消化道造瘘 ^[13] 、消化道瘘口修补 ^[14] 、抗胃食管返流 ^[15] 、血管端端吻合 ^[16] 等	血管腔 [*] 、胃腔 [*] 、肠腔 [*] 、输尿管 / 膀胱 [*] 、食管 [*] 、胆道 ^{**} 、胰管 ^{**} 、腹腔 ^{**} 、胸腔 [*] 、组织间隙 [*] 等
MAT	口腔正畸 ^[4] 、减戳卡手术 ^[17] 、骨骼畸形矫正 ^[18] 、磁锚定辅助内镜下粘膜切除术 ^[19] 等	口腔 [*] 、腹腔 ^Δ 、胸腔 ^Δ 、组织间隙 [*] 、消化道 ^Δ 等
MNT	磁导航磁性导管与磁控胶囊内镜 ^[20] 、磁导航支气管镜 ^[21] 等	血管腔 ^Δ 、呼吸道 ^Δ 、消化道 ^Δ 等
MLT	颈椎牵引、人工关节等	组织间隙 ^{*/*} 、关节腔 ^{*/*} 等

Note: ^Δ Temporary implant: internal retention time is generally less than 72 h; ^{*} Short-term implant: internal retention time is generally less than 30d; ^{**} Longish implant: internal retention time is generally between 30 to 90d; ^{***} Long-term implant: internal retention time is generally greater than 90d or permanent implant.

表 2 磁体留置部位的理化生环境特点

Table 2 The characteristics of the natural environment of the magnet retaining site

Site	The external environment characteristics of the magnets						
	液体	温度(℃)	氧含量	pH 值	主要电解质	生物蛋白	微生物
口腔	半液	36.3-37.2	乏氧	6.6-7.1	钠、钾、钙、磷、硫氰酸盐 (SCN ⁻)、钙、氯	粘蛋白、免疫球蛋白、唾液淀粉酶、溶菌酶、过氧化物酶、生长因子	链球菌、假丝酵母菌、溶源性噬菌体、古细菌属
食管	半液	36.2-37.4	乏氧	5.5-7.0	钠、钾、碳酸氢根、氯	粘蛋白、唾液淀粉酶、免疫球蛋白	链球菌、普氏菌属、梭杆菌属、韦荣球菌属
胃	全液	36.5-37.7	乏氧	0.9-1.5	氢离子、氯离子、碳酸氢根、钠、钾	胃蛋白酶原、内因子、糖蛋白为主的粘液	幽门螺杆菌、乳杆菌、念珠菌、葡萄球菌
十二指肠	全液	36.5-37.5	乏氧	7.0-8.5	钠、钾、氯、钙、碳酸氢根	胃蛋白酶、糖蛋白、胰消化酶、胆盐、胆固醇	链球菌、葡萄球菌、乳杆菌
小肠	全液	36.5-37.5	乏氧	7.6	钠、钾、氯、碳酸氢根	消化酶、肠激酶、粘蛋白	乳杆菌、双歧杆菌、葡萄球菌、消化球菌
结肠	半液	36.7-37.7	乏氧	8.3-8.4	碳酸氢根、钠、钾	黏液蛋白、少量二肽酶、淀粉酶	大肠杆菌、葡萄球菌
胆道	全液	36.5-37.5	乏氧	6.8-7.4	钠、钾、钙、碳酸氢根	胆盐、胆色素、胆固醇、卵磷脂(无消化酶)	-
胰管	全液	36.5-37.5	乏氧	7.8-8.4	碳酸氢根、氯、钠、钾、钙	胰淀粉酶、胰脂肪酶、胰蛋白酶、糜蛋白酶	-
胸腔	半液	36.5-37.5	乏氧	-	-	-	-
腹腔	半液	36.5-37.5	乏氧	-	-	-	-
血管内	全液	36.5-37.5	富氧	7.35-7.45	碳酸氢根、氯、钠、钾、磷酸氢根、磷酸二氢根	白蛋白、球蛋白、纤维蛋白	-
呼吸道	半液	36.2-37.2	富氧	-	氢离子、碳酸氢根、碳酸根	粘蛋白、免疫球蛋白	念珠菌、链球菌、葡萄球菌

续表 2 磁体留置部位的理化生环境特点

Table 2 The characteristics of the natural environment of the magnet retaining site

Site	The external environment characteristics of the magnets						
	液体	温度(℃)	氧含量	pH 值	主要电解质	生物蛋白	微生物
泌尿道	全液	36.5-37.5	乏氧	4.5-8.0	钠、钾、钙、氯	极少:白蛋白、免疫球蛋白、血红蛋白	-
阴道	半液	36.5-37.5	乏氧	3.8-4.4	氢离子、碳酸氢根、碳酸根、钠、钾	粘蛋白、免疫球蛋白	乳杆菌、棒状杆菌、加德纳菌、大肠埃希菌、消化球菌、支原体、假丝酵母菌

Note: The relevant parameters in table 2 are derived from references^[22-27].

3 钕铁硼磁体工业化表面改性方案

我国是钕铁硼产量大国,目前已达全球产量的一半以上^[28]。但是长期以来,我国的钕铁硼产品一直在走低端道路,工业附加值较低,钕铁硼的表面防护处理工艺落后。虽经多年发展,国内 NdFeB 表面防护技术已经有很大进步,但防腐问题还没有从根本上解决,国内 NdFeB 永磁产品销量差很大程度上在于其防护涂层不过关^[29]。近些年,随着钕铁硼的应用领域不断拓展,对其表面改性也提出了更高的要求,单纯的钝化和磷化已不能满足现有市场的需求。钝化和磷化目前主要作为前处理或后处理工艺为后序工艺提供有效附着面或增加已有膜层的致密度;电镀工艺应用虽较为普遍,但环境污染严重;化学镀作为电镀工艺的补充,能在复杂的零件上制备膜层,并显著提高镀层结合力和产品硬度。在诸多技术成熟的表面防护措施中,电镀和化学镀是目前最为成熟的技术。物理气相沉积技术和热喷涂技术相对来说发展较晚,技术工艺方面欠成熟,但它们都属于干式成膜技术,对磁体本身损伤较小,发展潜力巨大,随着研究的进一步深入和工艺的进一步提高,这两种技术有望成为今后钕铁硼表面防护的主要手段^[28]。

4 现有的钕铁硼体内植入表面改性方案

钕铁硼体内植入最早被用于口腔正畸,因此有关钕铁硼磁体口腔环境下表面改性相关研究较多^[30]。但近二十多年来,随着磁外科相关技术的发展,钕铁硼磁性材料已用到人体诸多部位。体内植入钕铁硼磁体的形状、大小、实现的功能较前均有了很大变化。但目前表面改性方面的研究相对滞后,在国内外还没有形成较为统一的标准。表 3 列举了一些国内外文献中钕铁硼所用表面改性方案。图 1 为相关文献中提及的钕铁硼表面改性后的钕铁硼磁体图片。回顾分析可见,国外学者大多采用高分子材料包裹作为表面处理方案,而国内学者多采用氮化钛镀层处理。在诸多体内植入治疗中,从生物相容性角度来说,血管内植入对材料的表面改性要求最高。Klima U 等在磁吻合冠状动脉搭桥术中采用了氮化钛表面改性方案,临床效果显示长期通畅率良好^[5]。

5 小结与展望

通过对磁外科相关文献回顾分析可以发现,钕铁硼磁性材料体内植入表面改性研究存在以下不足:

表 3 医用钕铁硼表面改性临床应用现状

Table 3 Clinical application of medical NdFeB surface modification

作者	应用对象	植入部位	改性方案	留置时间(d)
Avaliani M, et al. ^[12]	人体	胆道、十二指肠	聚氨酯	7-10
Graves CE, et al. ^[7]	人体	小肠	聚碳酸酯	17-85
Matsuzaki I, et al. ^[19]	犬	胃	聚酰胺	<1
Yan XP, et al. ^[14]	人体	阴道	氮化钛	16
Klima U, et al. ^[5]	人体	血管	氮化钛	永久
Ganz RA, et al. ^[15]	人体	腹腔	钛壳	永久
Wang SP, et al. ^[16]	犬	腹腔	氮化钛 + 钛壳	168
Liu SQ, et al. ^[31]	犬	腹腔	氮化钛 + 聚丙烯壳	168
Fan C, et al. ^[32]	犬	胆道、空肠	氮化钛 + 金属壳	14
Gonzales KD, et al. ^[33]	猪	十二指肠、结肠	聚碳酸酯	3-7
Uygun I, et al. ^[13]	大鼠	胃、腹膜外	镀铬	20
Pichakron KO, et al. ^[34]	猪	胃、空肠	聚碳酸酯	3-7
Jamshidi R, et al. ^[6]	猪	小肠	聚四氟乙烯	7-14
严小鹏, 等. ^[35]	猪	阴道	氮化钛 / 镍	14-28
严小鹏, 等. ^[36]	犬	胃	镍	14

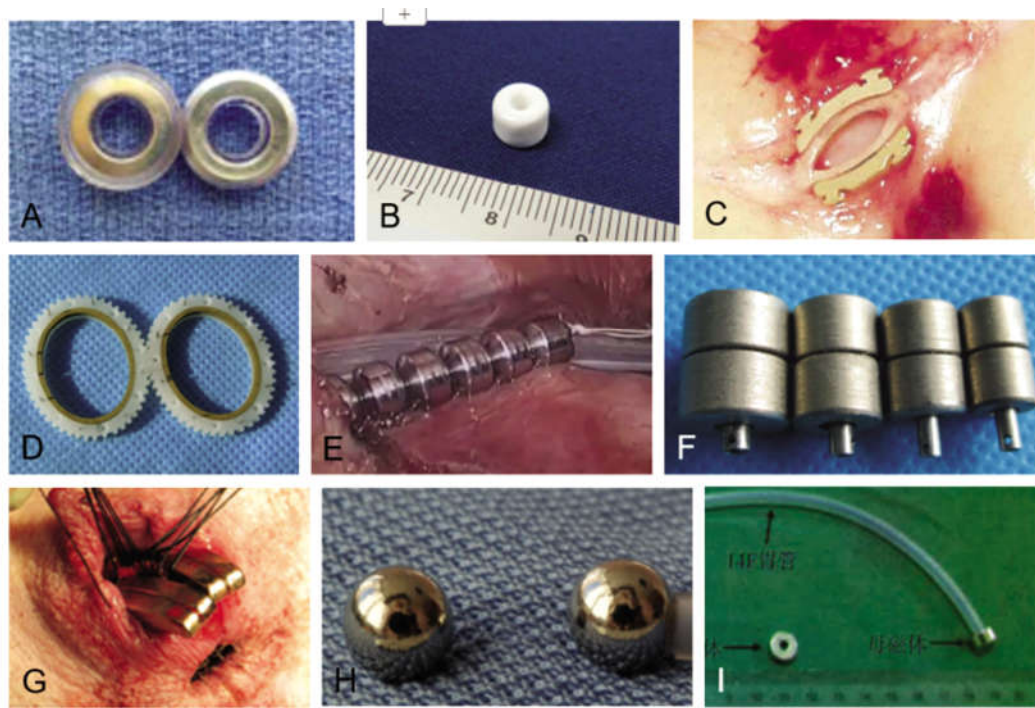


图1 磁外科相关技术中钕铁硼磁体所用到的表面改性方法

Fig 1 The technology of NdFeB surface modification related to magnetic surgery

(A: polycarbonate^[7]; B: polyamide^[19]; C: titanium nitride^[5]; D: titanium nitride+ polypropylene^[31]; E: titanium^[15]; F: titanium nitride & electrical pure iron^[32]; G: titanium nitride^[35]; H: chrome^[13]; I: nickel^[36])

1)磁外科医学研究者关注程度不够。目前磁外科处于快速发展阶段,磁外科相关技术临床创新不断涌现,磁外科医学研究者将注意力投向了技术创新,忽视了磁外科的基础研究,对所用的磁性材料表面改性缺乏关注;2)医工结合薄弱。磁性材料的表面改性属工科领域研究课题,而磁性材料体内植入却是医学诊疗的需要。目前有关 NdFeB 磁性材料表面改性研究绝大多数由工科研究人员开展,并且其研究目的是为了工业应用需求,衡量和评价指标是基于产品的工业化标准。目前尚无基于磁外科应用大背景下的规范化、系统化的研究;3)标准化研究方案缺失。磁外科是新兴的外科技术,磁外科相关技术中磁体植入部位、留置时间、功能需求均不同,对磁体的表面改性效果要求也不同,因此应根据实际应用需要制定满足不同临床需要的 NdFeB 表面改性方案和评价标准。

综上所述,随着磁外科技术的不断拓展,钕铁硼磁体植入范围越来越广,但磁体表面改性研究相对滞后,不能满足磁外科发展需要。因此,只有以医学应用为目标,以工科技术为工具,以医工结合为核心才能有效推动钕铁硼磁体体内植入表面改性研究的深入开展。

参考文献(References)

- [1] 迟煜顿,荆鹏,汪强兵. 医用钕铁硼磁环的发展及应用现状[J]. 热加工工艺, 2012, 41(16): 77-78, 81
Chi Yu-di, Jing Peng, Wang Qiang-bing. Development and Research Status of Medical NdFeB Ring Magnet[J]. Material&Heat Treatment, 2012, 41(16): 77-78, 81
- [2] 陈溪,吴建勇. 氮化钛镀膜钕铁硼磁体的生物机械性能[J]. 实用临床医学, 2009, 10(11): 134-135
Chen Xi, Wu Jian-yong. Biomechanical properties of titanium nitride coating NdFeB magnets[J]. Practical Clinical Medicine, 2009, 10(11): 134-135
- [3] 曹晓明,侯志明. 钕铁硼永磁体磁在正畸领域应用展望[J]. 口腔材料器械杂志, 2008, 17(2): 78-80
Cao Xiao-ming, Hou Zhi-ming. Expectation in the application of the NdFeB magnets in orthodontics[J]. Journal of dental materials, 2008, 17(2): 78-80
- [4] 刘奕,郑蓬莱. 磁性材料在口腔正畸中的应用 [J]. 口腔材料器械杂志, 1999, 8(1): 40-42
Liu Yi, Zheng Peng-lai. The application of magnetic material in orthodontics [J]. Chinese Journal of Dental Materials and Devices, 1999, 8(1): 40-42
- [5] Klima U, Mac Vaughn H, Bagaev E, et al. Magnetic vascular port in minimally invasive direct coronary artery bypass grafting [J]. Circulation, 2004, 110(11 suppl 1): II55-II60
- [6] Jamshidi R, Stephenson JT, Clay JG, et al. Magnamosis: magnetic compression anastomosis with comparison to suture and staple techniques[J]. J Pediatr Surg, 2009, 44(1): 222-228
- [7] Graves CE, Co C, His RS, et al. Magnetic compression anastomosis (magnamosis): first-in-human trial [J]. J Am Coll Surg, 2017, 225(5): 676-681
- [8] Zhang H, Tan K, Fan C, et al. Magnetic compression anastomosis for enteroenterostomy under peritonitis conditions in dogs[J]. J Surg Res, 2017, 208: 60-67
- [9] Uygun I, Okur MH, Cimen H, et al. Magnetic compression ostomy as new cystostomy technique in the rat: magnacystostomy [J]. Urology, 2012, 79(3): 738-742
- [10] Zaritzky M, Ben R, Zylberg GI, et al. Magnetic compression

- anastomosis as a nonsurgical treatment for esophageal atresia [J]. *Pediatr Radiol*, 2009, 39(9): 945-949
- [11] Oya H, Sato Y, Yamanouchi E, et al. Magnetic compression anastomosis for bile duct stenosis after donor left hepatectomy: a case report[J]. *Transplant Proc*, 2012, 44(3): 806-809
- [12] Avaliani M, Chigogidze N, Nechipai A, et al. Magnetic compression biliary-enteric anastomosis for palliation of obstructive jaundice: initial clinical results[J]. *J Vasc Interv Radiol*, 2009, 20(5): 614-623
- [13] Uygun I, Okur MH, Cimen H, et al. Magnetic compression gastrostomy in the rat[J]. *Pediatr Surg Int*, 2012, 28(5): 529-532
- [14] Yan XP, Zou YL, She ZF, et al. Magnet compression technique: a novel method for rectovaginal fistula repair [J]. *Int J Colorectal Dis*, 2016, 31(4): 937-938
- [15] Ganz RA, Peters JH, Horgan S, et al. Esophageal sphincter device for gastroesophageal reflux disease [J]. *N Engl J Med*, 2013, 368 (8): 719-727
- [16] Wang SP, Yan XP, Xue F, et al. Fast magnetic reconstruction of the portal vein with allogeneic blood vessels in canines [J]. *Hepatobiliary Pancreat Dis Int*, 2015, 14(3): 293-299
- [17] Shang Y, Guo H, Zhang D, et al. An application research on a novel internal grasper platform and magnetic anchoring guide system (MAGS) in laparoscopic surgery [J]. *Surg Endosc*, 2017, 31 (1): 274-280
- [18] Graves CE, Hirose S, Raff GW, et al. Magnetic Mini-Mover Procedure for pectus excavatum IV: FDA sponsored multicenter trial [J]. *J Pediatr Surg*, 2017, 52(6): 913-919
- [19] Matsuzaki I, Hattori M, Hirose K, et al. Magnetic anchor-guided endoscopic submucosal dissection for gastric lesions (with video)[J]. *Gastrointest Endosc*, 2018, 87(6): 1576-1580
- [20] Carpi F, Pappone C. Stereotaxis Niobe magnetic navigation system for endocardial catheter ablation and gastrointestinal capsule endoscopy[J]. *Expert Rev Med Devices*, 2009, 6(5): 487-498
- [21] Khan AY, Berkowitz D, Krinsky WS, et al. Safety of pacemakers and defibrillators in electromagnetic navigation bronchoscopy [J]. *Chest*, 2013, 143(1): 75-81
- [22] 万学红, 卢雪峰. 诊断学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2013.
- Wan Xue-hong, Lu Xue-feng. *Diagnostics* [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2013.
- [23] 朱大年, 王庭槐. 生理学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2013
- Zhou Da-nian, Wang Ting-huai. *Physiology* [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2013
- [24] 谢幸, 苟文丽. 妇产科学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2013
- Xie Xing, Gou Wen-li. *Obstetrics and Gynecology* [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2013.
- [25] 陈渠奕, 林路得, 斯灵, 等. 口腔微生物群和人体健康[J]. *中国微生物学杂志*, 2017, 29(10): 1219-1224
- Chen Qu-yi, Lin Lu-de, Si Ling, et al. Oral microbiota and human health[J]. *Chinese Journal of Microecology*, 2017, 29(10): 1219-1224
- [26] Di Pilato V, Freschi G, Ringressi MN, et al. The esophageal microbiota in health and disease [J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2016, 1381 (1): 21-33
- [27] 马立艳, 孙伟. 阴道正常菌群构成及其影响因素的研究进展 [J]. *国际检验医学杂志*, 2015, 36(24): 3599-3601
- Ma Li-yan, Sun Wei. The Research Progress of Normal Vaginal Microflora and its influencing factors [J]. *International Journal of Laboratory Medicine*, 2015, 36(24): 3599-3601
- [28] 赵钦浩, 徐晋勇, 高波, 等. 钕铁硼永磁材料表面防护的研究现状 [J]. *热加工工艺*, 2017, 46(8): 5-9
- Zhao Qin-hao, Xu Jin-yong, Gao Bo, et al. Researches in Protective Surface on NdFeB Permanent Magnetic Material [J]. *Hot Working Technology*, 2017, 46(8): 5-9
- [29] 严芬英, 赵春英, 张琳. 钕铁硼永磁材料表面防护技术的研究进展 [J]. *电镀与精饰*, 2012, 34(8): 22-25
- Yan Fen-ying, Zhao Chun-ying, Zhang Lin. Advances in Protective Technology on NdFeB Permanent Magnetic Material[J]. *Planting and Finishing*, 2012, 34(8): 22-25
- [30] 解保生, 朱慧兰, 李爱霞, 等. 口腔正畸用磁块镀氮化钛膜后抗人工唾液腐蚀研究[J]. *实用口腔医学杂志*, 2003, 19(3): 257-259
- Xie Bao-sheng, Zhu Hui-lan, Li Ai-xia, et al. Corrosion resistance of orthodontic magnet coated with titanium nitride in artificial saliva[J]. *Journal of Practical Stomatology*, 2003, 19(3): 257-259
- [31] Liu SQ, Lei P, Cao ZP, et al. Nonsuture anastomosis of arteries and veins using the magnetic pinned-ring device: a histologic and scanning electron microscopic study [J]. *Ann Vasc Surg*, 2012, 26(7): 985-995
- [32] Fan C, Zhang H, Yan X, et al. Advanced Roux-en-Y hepaticojejunostomy with magnetic compressive anastomats in obstructive jaundice dog models [J]. *Surg Endosc*, 2018, 32 (2): 779-789
- [33] Pichakron KO, Jelin EB, Hirose S, et al. Magnamosis II: Magnetic compression anastomosis for minimally invasive gastrojejunostomy and jejunoejejunostomy[J]. *J Am Coll Surg*, 2011, 212(1): 42-49
- [34] Jamshidi R, Stephenson JT, Clay Jg, et al. Magnamosis: magnetic compression anastomosis with comparison to suture and staple techniques[J]. *J Pediatr Surg*, 2009, 44(1): 222-228
- [35] 严小鹏, 高燕凤, 邹余粮, 等. 基于磁压榨技术的直肠阴道瘘一期修补装置[J]. *生物医学工程学杂志*, 2015, 5: 1096-1099
- Yan Xiao-peng, Gao Yan-feng, Zou Yu-liang, et al. Rectovaginal Fistula Stage-one Repair Device Based on Magnetic Compression Technique [J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2015, 5: 1096-1099
- [36] 严小鹏, 任冯刚, 刘雯雁, 等. 磁锚定技术联合磁压榨技术实现超微创胃造瘘[J]. *中华实验外科杂志*, 2016, 33(2): 291-294
- Yan Xiao-peng, Ren Feng-gang, Liu Wen-yan, et al. Application of magnetic anchor combining magnetic compression technique in ultra minimal invasive gastrostomy: an experimental study [J]. *Chin J Exp Surg*, 2016, 33(2): 291-294