

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2023.03.013

高频手术电极的研究进展

韩正一, 杨婉雯, 王晶晶, 黄婷, 宋成利, 毛琳
(上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093)

【摘要】高频手术电极集切割、电凝和止血等作用于一体,能快速实现组织的离断、消融与闭合,在临床中的应用越来越广泛。高频手术电极按施加的电流频率范围可以分为普通高频电极和射频电极。该文主要介绍高频手术电极的工作原理与分类,并结合国内外高频手术电极的研究现状,对其在外科手术中的应用进行综述,并对其发展进行展望。

【关键词】高频手术电极; 切割; 电凝; 止血

【中图分类号】R318

【文献标志码】A

文章编号: 1674-1242(2023)03-0308-06

Research Progress of High Frequency Surgical Electrode

HAN Zhengyi, YANG Wanwen, WANG Jingjing, HUANG Ting, SONG Chengli, MAO Lin

(School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

【Abstract】High frequency surgical electrode integrates the functions of cutting, electrocoagulation and hemostasis, and can quickly realize the disconnection, ablation and closure of tissues. It is more and more widely used in clinical practice. High frequency surgical electrodes can be divided into ordinary high frequency electrodes and radio frequency electrodes according to the frequency range of the applied current. This paper mainly introduces the working principle and classification of high-frequency surgical electrode, and summarizes its application in surgery combined with the research status of high-frequency surgical electrode at home and abroad, and prospects its development.

【Key words】High Frequency Surgical Electrode; Cutting; Electrocoagulation; Hemostasis

0 引言

18 世纪初, 电流开始应用于医学领域。19 世纪以来, 医疗逐渐电子化, 手术电极开始应用于临床外科手术中^[1]。1900 年, Joseph Rivered^[2]在工作中发现, 电极之间的火花电弧能够凝结病人的皮肤, 这一发现为高频电极在组织电凝中的应用提供了基础。1910 年, Clark^[3]设计并制作了一台设备, 通过改变电极的参数, 该设备能够穿透不同深度的人体

组织, 从此高频手术电极在美国推广开来, 促进了该技术在全球范围内的快速发展。随后, 高频手术电极被广泛应用于外科手术中。不同电流频率的高频手术电极能够分别实现电切、电凝和组织闭合等功能, 在现代外科手术中发挥着重要的作用。经过不断的研究与发展, 高频手术电极的应用领域越来越广泛, 同时具备安全可靠、对人体组织影响小、术后恢复快等优点。

收稿日期: 2022-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51901137, 51735003)。

作者简介: 韩正一, 硕士研究生, 研究方向: 微创医疗器械开发与研究, E-mail: 15684152013@163.com。

通信作者: 毛琳, 主要从事精密微创医疗器械、先进生物医用材料的开发与研究, 主持国家自然科学基金、中国博士后科学基金及“博士后国际学术交流计划”项目, 参与国家自然科学基金重点项目、上海市科学技术委员会项目; 发表 SCI 学术论文 20 余篇, 重要成果发表于国际著名杂志 *Nanoscale*、*ACS Applied Materials & Interface* 及 *Scientific Reports*; E-mail: linmao@usst.edu.cn。

1 高频手术电极的工作原理与分类

电极是电子或电器装置、设备中的一种部件，用作导电介质中输入或导出电流的两个端。输入电流的一端叫阳极或正极，失去电子发生氧化反应；导出电流的一端叫阴极或负极，获得电子发生还原反应。电子在两极之间进行定向的移动，就形成了电流。电极可以是金属或非金属，只要能够与电解质溶液交换电子，就可以作为电极。

高频手术电极是指在两极之间传导高频电流（频率大于 5kHz）的手术电极。它具有纯切、混切、单极电凝、电灼、双极电凝等作用，能够在维持功率的情况下提高电压的峰值，降低工作电流，所以其切割速度快、止血效果好，并且具有质量好、使用灵活的优点。此外，高频手术电极能有效降低患者在术中发生感染的风险，提高手术安全性，因而被广泛应用于各种临床手术中^[4]。

1.1 工作原理

通过电极尖端产生高密度的高频电流对生物组织进行加热，使组织成分汽化或爆裂，从而达到凝固或切割等外科手术目的。

1.2 分类

普通高频手术电极根据结构和工作原理的不同，分为单极手术电极、双极手术电极和中性电极，如图 1 所示。单极手术电极将高频电流传递到手术部位，形成很大的电流密度，实现手术部位的快速切割或凝固。此后，高频电流经过中性电极回到设备，从而完成电流回路。双极手术电极通常是一个类似手术钳形状的器械，两个电极组装在同一电极座上。工作时，高频电流从一个钳尖流向另一个钳尖，两个钳尖之间的组织受到电流的热效应作用，钳尖外组织几乎不受电流影响，这样可以有效保护周围组织。双极手术电极在使用时由本身的两个电极构成回路，一般不需要中性电极。中性电极具有相对较大的面积，直接与患者身体接触，能很好地分散电能量，避免较大的电能对人体组织产生灼伤。中性电极在手术时置于患者身下，一般与单极手术电极配套使用。

当通过电极的电流频率为 300kHz ~ 300GHz 时，该电极也称为射频电极。射频电极按材料不同，可以分为铜电极^[5]、钛合金电极^[6]和钨电极^[7]等。

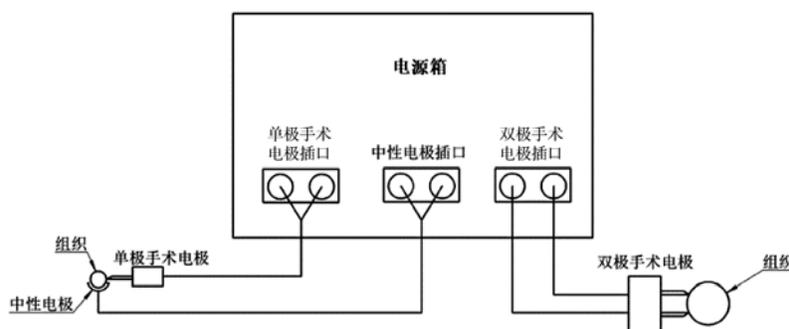


图 1 高频电极连接示意

Fig.1 Schematic diagram of high frequency electrode connection

2 高频手术电极的应用

2.1 普通高频手术电极

2.1.1 切割

高频电刀有单极和双极两种主要工作模式。1910 年，单极电灼的经尿道膀胱肿瘤电切除术被广泛应用，成为膀胱肿瘤切除的主要治疗方法。但是，经尿道单极高频电流电切术后，小膀胱乳头状瘤的切除还不够彻底。随着技术的进一步发展，在 20 世纪末的德国，几乎所有的腹腔镜手术都是通过高频电刀来完成的。单极电极的高频电刀同时具有电凝、电灼、电切

等多种效应模式，通过调节电极的形状、大小及电流输出功率、波形，能够控制灼烧的深度。

近年来，经尿道单极电切前列腺术作为一种微创疗法，已经广泛应用于良性前列腺增生症^[8]。在此基础上，相关研究者开始采用双极电切术，以降低经尿道前列腺电切综合征的风险，改善止血情况。双极电切术与单极电切术相比具有更好的凝血效果^[9]，其引入了盐水冲洗的过程，降低了术中感染的风险。双极能量作用于前列腺时，无须去除碎片即可蒸发前列腺组织，减少手术时间。但是汽化后的组织会逐渐附着

在电极表面,最终形成一层特别牢固的黏附组织。由于组织阻抗的存在,被组织附着的手术电极电阻增大,切割效率降低,切割精度也会受到影响。

为了解决这一问题,有学者提出使用聚四氟乙烯作为电极涂层。2005年,Greep等通过添加聚四氟乙烯和聚环氧乙烷制备了一种新型复合涂层电极,他们还将重金属颗粒作为催化剂添加在涂层中,以提高工作效率。高频电刀电极通电时,催化颗粒被激活,在手术过程中,活性催化颗粒与焦痂中的碳或氮基材料发生反应。这个反应减少了化学吸附及焦痂和电极尖端之间的键合,从而加快了焦痂从电极尖端的脱落。2018年,万健飞等^[10]选择美国威力聚四氟乙烯型高频电刀为主机,通过单极混切模式对新鲜猪肝组织进行切割实验。这次实验暴露了现有聚四氟乙烯涂层的不足之处,即不能保证在较低的组织热损伤的情况下提高切割效率,并且涂层抗组织黏附的耐久性较差。因此,有效减少组织的附着是高频手术电极在组织切割中需要解决的问题。

2.1.2 电凝

虽然电刀具有止血功能,但在术中的止血效果相对一般。电凝是利用高频电流凝固血管和组织,在电热的作用下使血管和组织凝结、碳化,完成止血愈合的过程。电凝能够快速止血,且不产生疤痕,因而在伴随出血的手术治疗中应用较为广泛。

李海峰^[11]观察了110例乳腺癌患者,以此探究电刀与双极电凝在术中止血的效果。在对手术情况进行统计分析后,该团队证明了双极电凝在止血方面的高效性。在扁桃体切除术中,因扁桃体供血充足,术中对凝血的要求很高,因此需要电极具有很好的凝血效果。采用高频电凝扁桃体切除术治疗慢性扁桃体炎相关的疾病,可以有效减少术中出血,缩短手术时间,利于患者的术后恢复^[12]。鼻出血是一种常见的疾病,高频手术电极电凝为其提供了一种有效的止血方法。与局部填塞治疗相比,电凝治疗后的止血效果显著,并且能够减少填塞对鼻黏膜组织的损伤^[13]。单极电凝和双极电凝的止血效果是值得进一步研究的,可以为临床手术中的器械选用提供一定的参考。双极电凝能够有效减少周围组织的损伤,因此相比单极电凝,双极电凝在颅骨修补手术^[14]中能够获得更优的止血效果。

2.1.3 医美

除应用于外科手术外,高频手术电极还可应用于

整形美容中。汗管瘤是一种良性肿瘤,但因其位于患者面部,从而对患者造成了极大的困扰。使用高频手术电极治疗汗管瘤能取得令人满意的疗效,具有比冷冻法更精确、比激光法更易控制的优点。在美容手术中,作用电极的角度、方向和深度均可任意改变,因此能对多种面部肿物进行治疗并取得不错的治疗效果。高频手术电极在治疗真菌性皮肤病的同时还能灭菌,使治疗效果更加显著。为了探讨高频手术电极对不同面部肿物的治疗效果,赵洋等^[15]对患者的治疗情况进行了统计分析。通过分析得知,高频手术电极主要适用于体积较小、位置较浅的皮肤肿物的治疗,对于真皮层肿物的治疗效果还有待提升。

除此之外,高频手术电极在牙齿整形固定方面也具有良好的治疗效果^[16]。使用高频手术电极修整牙龈,能够提高手术的准确性,加快术后的愈合,有效减少患者牙龈出血的症状。对于牙体缺损的坏牙,采用高频电极切龈术治疗能替代拔牙后的义齿修复,可以减轻患者的痛苦。切除牙龈瘤时,操作简单,不易复发,但是电灼创面大,恢复时间较长^[17]。因此,减少术中电极造成的创面损伤是目前研究的一个重点。

2.2 射频电极

2.2.1 消融

射频消融电极从单极发展到多极,已能够完成对不同体积肿瘤的消融。肺癌是一种常见的癌症,探究一种安全高效的治疗肺癌的方法是非常有意义的。在针孔胸腔镜下,采用射频消融术对肺恶性肿瘤进行治疗^[18],病灶部位得到了良好的控制,并且该方法手术时间短,术后并发症少。电极的形状与分布决定了消融范围,对于体积较大的晚期肝肿瘤,需要采用多电极射频消融。为了探讨更好的治疗效果,赵堃等^[19]对比了平行法布针与交叉法布针对离体牛肝的消融情况。该实验证明,平行法布针的消融区更规则,消融范围更大,为多电极射频消融的布针方法提供了参考。此外,在腺体切除方面,王园等^[7]使用射频消融电极对60例患者进行了扁桃体切除。他们使用的微创钨针电极,相比普通高频手术电极具有精确、高效、创面小等优点,在扁桃体切除术中能够取得良好的手术效果。

左室四极电极可以用于扩张型心肌病患者心脏再同步化治疗(Cardiac Resynchronization Therapy, CRT),它能提供14个起搏向量,比传统的左室双极电极在起搏向量上多了很多选择。由于具有较多的起

搏向量数, 四极电极可明显减少电极脱位、膈神经刺激、阈值增高等情况的发生。2021年, 陆政德等^[20]通过24例扩张型心肌病患者的治疗情况, 分析了左室四极电极与左室双极电极在CRT中的安全性和有效性。他们对术后患者进行了30个月的随访观察, 发现在治疗扩张型心肌病时使用左室四极电极能够有效减少各种并发症, 验证了左室四极电极的治疗效果。

2.2.2 焊接

组织吻合是外科手术中尤为重要的一个环节, 高频手术电极在此方面也有一定的应用。电能通过高频手术电极作用于组织, 从而完成组织的焊接吻合。在焊接过程中, 将温度控制在一定的范围内, 能保证焊接后的组织活性, 有利于创口组织的愈合^[21]。

2010年, Winter等^[22]使用双极圆形电极对24份猪结肠进行了组织焊接, 焊接后的结肠注满纯水, 通过超声造影法测定吻合口的最大破裂压力。此次实验验证了该电极在组织吻合应用中的可行性。2011年, Christoph等^[23]用环形电极和盘状电极对猪结肠进行了侧侧吻合, 焊接后肠道的爆破压高于手工缝合的爆破压。2012年, Kröger等^[24]用双极焊接电极对大鼠的盲肠进行了组织焊接。他们发现, 肠道在吻合的过程中能保持较低的热损伤。2013年, 赵灵犀等^[5]尝试用铜电极焊接猪结肠, 通过分析焊接后肠道的撕脱力和爆破压, 初步验证了此电极的可行性。然而, 焊接后肠道的性能相比手术要求稍显不足, 吻合效果还有待提升。为了提高焊接质量, 该团队设计了两种不同结构的电极, 并以此探究电极结构对焊接的影响。通过对比凹凸电极和光滑电极在肠道焊接中的吻合效果^[25], 验证了凹凸电极在组织焊接中的优势。在这些研究的基础上, 2020年, 胡钟欣等^[26]利用离散式正电极和柱形负电极对新鲜猪小肠进行了组织焊接, 在较短的焊接时间内获得了更好的实验结果, 初步实现了缩短时间、提升焊接质量的目标, 为人体肠道组织焊接的研究提供了理论依据。

2.2.3 医美

玫瑰痤疮是一种常见的慢性炎症性皮肤病, 目前主要通过传统高频电刀切除的方法进行治疗, 但术后不够美观。近年来有医生采用射频电极进行治疗, 与传统高频电刀相比, 射频电极治疗手术时间短, 术后恢复效果好^[27]。在整形美容领域, 射频技术主要用于

除皱。将射频电极针刺入人体皮肤, 射频电流使深层皮肤加热和收紧, 从而实现快速安全除皱的效果, 且疗效持久^[28]。

如今, 低脂的身体状态是很多人的追求, 因此需要探究一种可靠的减脂手段。双极射频溶脂技术比常规的负压吸脂手术效果更好, 术后患者的皮肤更加紧致, 具有很好的应用前景^[29]。然而, 这种直接加热脂肪层的方法会对人体组织造成热损伤, 为了减少此现象的发生, 周宇团队^[30]设计了一款无创双极RF溶脂设备。使用该设备对新鲜猪肉组织进行离体消融实验, 利用红外热成像仪实时监测温度变化。最终, 他们通过探究合适的温度, 达到了控制温度和安全溶脂的目的。这一研究为人体无创溶脂提供了一定的科学依据, 有利于形体塑造的科学发展。

3 问题与展望

高频手术电极在外科手术和整形美容等领域的应用十分广泛, 已经成为相关电外科医疗器械的重要组成部分。在腺体切除、肿瘤消融和电凝止血等方面, 高频手术电极具有工作效率高、治疗效果良好的优点。此外, 在塑形减脂等美容领域, 高频手术电极在保证治疗效果的同时, 也有利于患者的术后恢复。尽管高频手术电极的临床应用前景较好, 但在应用研究中还应考虑它的材料、结构及安全性。

(1) 在组织切除手术中, 普通材料的电极因组织黏附导致工作效率降低。新型医用生物材料的选用和复合涂层的添加, 能够有效解决以上问题。

(2) 电极结构会对手术效果产生影响。因此, 应根据具体的工作对象和应用场景, 优化设计电极结构, 提高电极的工作效率。

(3) 保证电极的安全性也是非常必要的。为避免电极对人体产生电损伤, 在设计电极时要根据应用场景选择适当的工作电压。

相比传统电极, 新型电极如微电极、阵列式电极, 能够实现更加精准的与个性化的疗效, 是未来电极研发与应用的一个重要方向。因此, 新型电极的研发不仅能够提高临床疗效, 还能扩大电极的应用领域, 促进电外科高端医疗器械的发展。

参考文献

- [1] 宋涛, 田金, 许锋. 高频电刀发展及临床应用的综述[J]. 中国医疗设备, 2016, 31(8): 75-7.

- SONG Tao, TIAN Jin, XU Feng. Review of development and clinical application of high-frequency electric knife[J]. *China Medical Devices*, 2016, 31(8): 75-7.
- [2] KEARNS S R, CONNONLLY E M, MCNALLY S, *et al.* Randomized clinical trial of diathermy versus scalpel incision in elective midline laparotomy[J]. *Br J Surg*, 2001, 88(1): 41-44.
- [3] HAROLD K L, POLLINGER H, MATTHEWS B D, *et al.* Comparison of ultrasonic energy, bipolar thermal energy and vascular clips for hemostasis of small, medium, and large size arteries[J]. *Surg Endosc*, 2003, 17(8): 1228-1230.
- [4] CHAROENKWAN K, CHOTIROSNIRAMIT N, RERKASEM K. Scalpel versus electrosurgery for abdominal incisions[J]. *Cochrane Db Syst Rev*, 2006, 6(6): 398-400.
- [5] 赵灵犀, 周宇, 卓长华, 等. 射频组织焊接技术用于结直肠吻合的探索性研究[J]. *中国生物医学工程学报*, 2013, 32(5): 626-630.
- ZHAO Lingxi, ZHOU Yu, ZHUO Changhua, *et al.* Preliminary study of radio-frequency induced tissue fusion in colorectal anastomosis[J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2013, 32(5): 626-630.
- [6] 聂佳力, 谷雪莲, 周流斌. 肩关节软组织低温等离子射频消融电极的材料改进[J]. *生物医学工程研究*, 2020, 39(1): 41-48.
- NEI Jiali, GU Xuelian, ZHOU Liubin. Research on material improvement of plasma radiofrequency electrode for shoulder soft tissue ablation[J]. *Journal of Biomedical Engineering Research*, 2020, 39(1): 41-48
- [7] 王园, 郭家亮. 高频消融电极在扁桃体切除术中的应用[J]. *继续教育医学教育*, 2020, 34(2): 83-85.
- WANG Yuan, GU Jialiang. The application of high-frequency ablation electrodes in tonsillectomy[J]. *Continuing Medical Education*, 2020, 34(2): 83-85.
- [8] SILVA R, BIDIKOV L, MICHAELS W, *et al.* Bipolar energy in the treatment of benign prostatic hyperplasia: a current systematic review of the literature[J]. *Can J Urol*, 2015, 22(5S1): 30-44.
- [9] 黎子瑞, 陈吉祥, 简钟宇, 等. 单极和双极技术在经尿道膀胱肿瘤电切术中有有效性和安全性比较的 Meta 分析[J]. *现代泌尿外科杂志*, 2020, 25(6): 505-509+523.
- LI Zirui, CHEN Jixiang, JIAN Zhongyu, *et al.* Comparison of efficacy and safety between monopolar and bipolar transurethral resection of bladder tumor: a Meta-analysis[J]. *Journal of Modern Urology*, 2020, 25(6): 505-509+523.
- [10] 万健飞, 郝汝飞, 龙运江, 等. PTFE 涂层抗粘附电极切割效率和抗粘附性能的时变性研究[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(17): 2-7.
- WAN Jianfei, HAO Rufeif, LONG Yunjiang, *et al.* Research on the variations of the incision efficiency and anti-sticking performance of PTFE-coated electrode with operation time[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(17): 2-7.
- [11] 李海峰. 双极电凝联合手术刀应用在乳腺癌手术中的效果观察[J]. *中国医疗器械信息*, 2021, 27(11): 124-125.
- LI Haifeng. The effect of bipolar electrocoagulation combined with scalpel in breast cancer operation[J]. *china medical device Information*, 2021, 27(11): 124-125.
- [12] 王心涛. 高频电刀电凝扁桃体切除术与传统剥切术的疗效对比研究[J]. *现代诊断与治疗*, 2014, 25(24): 5631-5632.
- WANG Xintao. Comparative study on the efficacy of high-frequency electrocoagulation tonsillectomy and traditional tonsillectomy [J]. *Modern Diagnosis and Treatment*, 2014, 25(24): 5631-5632.
- [13] 杨海峰. 鼻内镜下电凝止血老年难治性鼻出血患者的效果[J]. *医疗装备*, 2021, 34(24): 89-90.
- YANG Haifeng. Effect of electrocoagulation under nasal endoscopy on elderly patients with refractory epistaxis [J]. *Medical Equipment*, 2021, 34(24): 89-90.
- [14] 余瑞钿, 罗江兵, 冯家强, 等. 比较单极电凝、双极电凝对颅骨修补手术效果的影响[J]. *中国社区医师*, 2021, 37(29): 70-71.
- YU Ruidian, LUO Jiangbing, FENG Jiaqiang, *et al.* Comparison on the effect of monopole electrocoagulation and bipolar electrocoagulation on cranial repair[J]. *Chinese Community Doctors*, 2021, 37(29): 70-71.
- [15] 赵洋, 王瑾, 曹林. 高频电刀美容修复不同类型头面部皮肤肿物的疗效观察[J]. *中国美容医学*, 2021, 30(8): 19-21.
- ZHAO Yang, WANG Jin, CAO Lin. Effect of high frequency electric knife on cosmetic repair of different types of facial skin mass[J]. *Chinese Journal of Aesthetic Medicine*, 2021, 30(8): 19-21.
- [16] 令狐昌智, 林莉琬, 邱仁惠, 等. 高频电刀在前牙美容固定修复中的应用和护理[J]. *护士进修杂志*, 2008(13): 1238-1239.
- LINGHU Changzhi, LIN Lilong, QIU Renhui, *et al.* Application and nursing of high-frequency electric knife in cosmetic fixed restoration of anterior teeth [J]. *Journal of Nurses Training*, 2008(13): 1238-1239.
- [17] 刘秋. 高频电刀切除牙龈瘤临床体会[J]. *航空航天医学杂志*, 2015, 26(3): 345-346.
- LIU Qiu. Clinical experience of high-frequency electric knife resection for gingival tumors [J]. *Journal of Aerospace Medicine*, 2015, 26(3): 345-346.
- [18] 刘思杰, 吴迅, 辛兴, 等. 针孔胸腔镜下射频消融术在肺癌局部治疗中的可行性及适应证的探讨[J]. *癌症*, 2022, 41(2): 80-86.
- LIU Sijie, WU Xun, XIN Xing, *et al.* Feasibility and indications of

- radiofrequency ablation under needle hole thoracoscopy in local treatment of lung cancer [J]. **Chinese Journal of Cancer**, 2022, 41(2): 80-86.
- [19] 赵堃, 姜安娜, 王红, 等. 探讨应用射频电极针治疗较大肝肿瘤布针模式比较[J]. **介入放射学杂志**, 2020, 29 (9): 907-912.
ZHAO Kun, JIANG Anna, WANG Hong, *et al.* The ablation effect of parallel method versus crossed method of multiple radiofrequency electrodes placement in the treatment of liver tumor [J]. **Journal of Interventional Radiology**, 2020, 29(9): 907-912.
- [20] 陆政德, 薛焱, 林英忠, 等. 左室四极电极在扩张型心脏病心脏再同步化治疗中的效果观察[J]. **微创医学**, 2021, 16 (2): 169-173.
LU Zhengde, XUE Yan, LIN Yingzhong, *et al.* Left ventricular quadripolar lead for cardiac resynchronization therapy in dilated cardiomyopathy: an effect observation [J]. **Journal of Minimally Invasive Medicine**, 2021, 16(2): 169-173.
- [21] 黄德群, 陈军, 张佳泳. 软组织吻合技术现状与发展趋势[J]. **临床医学工程**, 2014, 21 (11): 1509-1510.
HUANG Dequn, CHEN Jun, ZHANG Jiayong. Current research and development trend of soft tissue anastomosis technology[J]. **Clinical Medicine & Engineering**, 2014, 21(11): 1509-1510.
- [22] WINTER H, HOLMER C, BUHR H J, *et al.* Pilot study of bipolar radiofrequency-induced anastomotic thermofusion-exploration of therapy parameters ex vivo[J]. **Int J Colorectal Dis**, 2010, 25(1): 129.
- [23] CHRISTOPH, HOLMER C, HANNO, *et al.* Bipolar radiofrequency-induced thermofusion of intestinal anastomoses—feasibility of a new anastomosis technique in porcine and rat colon[J]. **Langenbeck Arch Surg**, 2011.
- [24] KRÖGER M, JAENICKE A, WINTER H, *et al.* Reduction of thermal tissue damage caused by bipolar radiofrequency-induced thermofusion[J]. **Biomed Eng-Biomed Te**, 2012, 57(SI-1-Track-H): 432-432.
- [25] ZHAO L, SONG C, WANG Z, *et al.* Novel concave-convex electrode for colonic anastomoses by radiofrequency thermo-fusion[J]. **Surg Endosc**, 2014, 29(7): 1-8.
- [26] 胡钟欣, 宗乃馨, 宋成利, 等. 基于射频能量的肠道组织焊接研究[J]. **医用生物力学**, 2021, 36 (5): 790-796.
HU Zhongxin, ZONG Naixin, SONG Chengli, *et al.* Intestinal tissue fusion based on radiofrequency energy[J]. **Journal of Medical Biomechanics**, 2021, 36(5): 790-796.
- [27] 王维楠, 张健, 李铁男. 射频电刀和高频电刀治疗鼻部肥大增生型玫瑰痤疮的临床观察[J]. **中国美容整形外科杂志**, 2020, 31 (6): 369-371+389.
WANG Weinan, ZHANG Jian, LI Tienan. Clinical comparative observation on radiofrequency electrotome and high frequency electrotome in the treatment of nasal hyperplastic rosacea [J]. **Chinese Journal of Aesthetic and Plastic Surgery**, 2020, 31(6): 369-371+389.
- [28] 杨青, 曹川, 汪丽萍, 等. 射频联合电针除皱在面部年轻化美容术中的应用[J]. **现代生物医学进展**, 2009, 9 (6): 1129-1131.
YANG Qing, CAO Chuan, WANG Liping, *et al.* The application of radio frequency technique combined with electro-acupuncture rhytidectomy in facial rejuvenation[J]. **Progress in Modern Biomedicine**, 2009, 9(6): 1129-1131.
- [29] 薛楠. 改良的双极射频溶脂技术在形体雕塑中的应用[J]. **当代医学**, 2019, 25 (26): 175-176.
XUE Nan. Application of improved bipolar radiofrequency technology in sculpture [J]. **Contemporary Medicine**, 2019, 25(26): 175-176.
- [30] 葛晓丽, 孙婷婷, 王悦欣, 等. 一款智能温控的无创双极射频溶脂设备[J]. **生物医学工程研究**, 2022, 41 (1): 82-88.
GE Xiaoli, SUN Tingting, WANG Yuexin, *et al.* A noninvasive bipolar radio frequency fat dissolving device with intelligent temperature control [J]. **Journal Of Biomedical Engineering Research**, 2022, 41 (1): 82-88.