

大气压低温等离子体在口腔医学中应用进展

谢娜¹, 刘飞², 李子夏¹, 唐成芳¹, 贲宁¹, 姬小婷³, 王丹杨¹

1. 西安医学院口腔医学院, 陕西 西安 710021; 2. 西安交通大学口腔医院, 陕西 西安 710004; 3. 陕西中医药大学附属医院口腔科, 陕西 咸阳 712000

【摘要】等离子体医学是一门结合物理、化学、生命科学以及临床医学等相关学科的一门综合性的交叉学科,其在医学领域中具有非常广泛的应用前景。近年来,等离子体在口腔医学领域中的应用越来越广泛。本文首先阐述了等离子体用于杀毒和灭菌等方面的研究,另外等离子体还可以对口腔中常用的材料通过接枝或引入新的化学官能团,在不破坏材料本身结构和形态的前提下进行表面改性,而且在使用的过程中对口腔组织没有损伤作用。正是由于等离子体具有这些独特的性能,使其在口腔医学领域中的研究不断扩大,现已将其应用在材料改性、美学修复、抗菌、抗炎症、成骨、抗肿瘤等多方面的研究中。未来随着对等离子体不断深入以及细致的研究,等离子体有望成为口腔临床医学中一种常规的辅助治疗手段。

【关键词】大气压低温等离子体;口腔医学;等离子体医学;综述

【中图分类号】R312;TM89;R783.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2021)02-0245-05

Application of atmospheric-pressure low-temperature plasma in stomatology: a review

XIE Na¹, LIU Fei², LI Zixia¹, TANG Chengfang¹, YUN Ning¹, JI Xiaoting³, WANG Danyang¹

1. School of Stomatology, Xi'an Medical University, Xi'an 710021, China; 2. Hospital of Stomatology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710004, China; 3. Department of Stomatology, Affiliated Hospital of Shaanxi University of Traditional Chinese Medicine, Xianyang 712000, China

Abstract: Plasma medicine, as an interdisciplinary subject which combines physics, chemistry, life science and clinical medicine, has great application prospects in biomedicine. In recent years, plasma medicine has attracted lots of attention in stomatology, and the application of plasma in stomatology is becoming wider. Herein the application of plasma in disinfection and sterilization is firstly reviewed. By grafting or introducing new chemical functional groups, the surface of the common-used dental materials is modified by plasma, without destroying the structure and morphology of the materials, and the use of plasma causes no damage to the oral tissues. These unique properties of plasma make the researches on plasma in oral medicine more extensive. Plasma has been applied in different medical research fields, such as material modification, aesthetic restoration, disinfection and sterilization, anti-inflammatory, osteogenic and anti-tumor researches. In the future, with the in-depth and meticulous researches, plasma is expected to become a conventional and complementary treatment in clinical stomatology.

Keywords: atmospheric-pressure low-temperature plasma; stomatology; plasma medicine; review

前言

等离子体是继固态、液态、气态以外的第4种物质形态。1879年Wiliam Crookes初次提出“物质第四

态”用来描述气体放电时所产生的电离气体,“等离子体”这个专业术语则由Irving Langmuir在1928年首次定名。等离子体是指气体被加热或置于高频高压电场中,形成了高度电离的气体云,获取巨大能量的气体云外层电子脱离原子核的束缚成为自由电子,原子核所带正电荷与自由电子所带负电荷总量相等,整体呈现出电中性状态,故称之为等离子体^[1-3]。宇宙中99.9%的物质都处于等离子体状态,例如恒星、极光以及蜡烛的火焰等^[4]。近年来,随着等离子体技术的不断深入研究,等离子体已经逐渐成为一门包罗万象的学科。

【收稿日期】2020-08-14

【基金项目】国家自然科学基金青年科学基金(81701014);陕西省自然科学基金基础研究计划面上项目(2017JM8038);西安市未央区科技局科技计划项目(软科学类)(201846)

【作者简介】谢娜,硕士,讲师,主要研究方向:组织工程牙髓再生, E-mail: springna888@163.com

【通信作者】王丹杨,副教授,研究方向:等离子医学, E-mail: xiaocha8-30803@qq.com

1 等离子体相关介绍

1.1 等离子体形成相关原理

等离子体产生及其存在的本质是气体分子在加热或强电磁场作用下获得高能量后转变为由电子和离子群所组成的近似电中性的电离气体。这种高度电离的气体中包含了电子、离子、原子、分子、活性自由基、激发态粒子以及射线等^[5]。

1.2 等离子体的分类

根据等离子体产生的温度,可将等离子体分为高温等离子体和低温等离子体两种类型。高温等离子体是指温度达 $10^8\sim 10^9\text{ K}$ 下完全电离产生的电离度接近于1的等离子体,并且重粒子和电子的温度都很高。低温等离子体则是在低温下($\leq 10^4\text{ K}$)实现,只有部分气体电离(电离度为 $10^{-7}\sim 10^{-4}$),而大多数气体分子仍然处于未电离状态。根据热力学状态不同,低温等离子体又可分为热平衡等离子体(也称热等离子体)和非热平衡等离子体(也称冷等离子体),在非热平衡等离子体中,因为重离子的温度远远低于电子的温度,因此其温度相对较低,故这样的等离子体十分适合应用于医学领域^[6]。本文主要介绍大气压低温等离子体在口腔医学领域中的应用。

2 大气压低温等离子体在口腔医学领域中的应用

近年来,大气压低温等离子体技术的迅猛发展,极大地推动了等离子体技术在医学领域中的应用。Sladek等^[7]在研究过程中发现等离子体对口腔中的大肠杆菌和变异链球菌具有很高的灭活能力,开启了等离子体在口腔医学领域应用中的新篇章。至此,越来越多的学者开始关注等离子体在口腔医学领域中的应用,例如口腔致病微生物的灭活、龋病治疗、牙齿美白、材料表面改性等,等离子体在口腔医学领域中展现出极大的应用前景。

2.1 大气压低温等离子体在口腔灭菌方面的应用

大气压低温等离子体在口腔医学领域中最初应用于杀菌方面的研究。例如口腔治疗器械的消毒、牙齿根管消毒、口腔致病微生物的灭菌等^[8]。

口腔治疗器械的表面清洁包含了朊病毒/病原微生物的灭活、有机物的移除等^[8]。Whittaker等^[9]应用等离子体对器械表面进行处理,利用扫描电镜等检测方法确定等离子体处理前后器械表面有机物的存留程度,结果发现使用等离子体处理后,器械表面的有机物数量降低至检测仪器能够测量到的最低极限值之下。这项工作表明,等离子体清洗为牙科器械的去污提供了一种安全有效的方法。

在临床治疗中,根管治疗失败的主要原因是没有

完全清除感染根管内坏死的牙髓组织和病原微生物,从而导致根管系统的再次感染。作为一种气态介质,等离子体具有穿透不规则龋洞/裂隙和杀灭细菌的能力。等离子体治疗龋齿或牙齿表面能够避免污染,可以有效的抑菌,对于细菌侵蚀的龋洞可以去除玷污层。Lu等^[10]根据牙齿根管系统的结构特点,研制出一种可以在根管内直接放电产生等离子体的等离子针装置,利用此装置几分钟内即可有效杀灭引起根管治疗失败的主要致病菌-粪肠球菌,从而大大增强了根管内灭菌效率。Pan等^[11]通过进一步研究发现,等离子体射流能够到达感染根管的深部,可以更加有效的杀灭粪肠球菌。

近年来,越来越多的实验研究显示,等离子体可有效杀灭口腔中的致病微生物,例如与龋病发生相关的致病菌,如变异链球菌以及嗜酸乳杆菌等^[12-13]。Blumhagen等^[14]用氩气等离子体刷对接种于牙釉质类似物上的变异链球菌进行处理,13 s内即可将低浓度细菌($<1.7\times 10^7\text{ CFU/cm}^2$)完全杀灭。Abonti等^[15]应用氧气作为冷常压等离子体射流的工作气体处理变异链球菌时,获得了比其他工作气体更好的杀菌效果,可快速有效地杀灭变异链球菌。Yang等^[13]证实氩气等离子体刷处理15 s即可杀灭变异链球菌,5 min可杀灭嗜酸乳杆菌。不仅如此,等离子体还可以有效地清除生长在牙齿和口腔黏膜上的耐药性生物膜,减少由口腔生物膜造成的龋齿、牙周炎和口腔黏膜相关的口腔疾病^[16-17]。牙龈卟啉单胞菌是目前公认的导致牙周炎和种植体周围炎的可疑致病菌,周鑫才等^[18]通过制备与氯已定相结合的等离子体,有效的杀灭牙龈卟啉单胞菌,为牙周炎以及种植体周围炎的临床治疗提供新的思路。

因此低温等离子体在致病性微生物灭活中的作用可能是一种更新、更便捷、更经济的替代方法,其在口腔临床灭菌中具有极为广阔的应用前景。

3 大气压低温等离子体在口腔材料表面改性的应用

通过改善材料本身机械以及物理性能从而提高材料与机体生物相容性是材料改性非常重要的目的,而低温等离子体可在不改变材料基本性能的基础上,对材料的表面起到活化的作用,从而改变材料的湿润性以及细胞生物相容性^[19]。

3.1 口腔种植材料的表面改性

种植体植入机体后未能与机体周围骨组织形成很好的骨结合,常常是导致种植手术失败的重要原因,通过改变种植体表面性能,增加种植体与周围组织的生物相容性,降低植入后的感染从而提高种植成功率一直是广大学者研究的方向。

Lee等^[20]利用大气压低温等离子体射流对钛片表面处理10 s,发现等离子体处理后可增加钛片表面的润湿性,还可促进牙龈成纤维细胞在钛片表面的早期附着,从而增强种植体与周围软组织的密封效果,降低致病菌的感染,增强种植体与周围组织骨结合的能力。Matos等^[21]发现等离子体处理可极大提高钛片表面的亲水性能、促进成骨细胞在其表面的黏附能力,进而提高植体骨结合能力。谢艳婷等^[22]也在随后的实验中进一步印证了这一结论。

3.2 口腔修复材料的表面改性

口腔内环境比较复杂,多种因素制约着口腔材料的修复效果。等离子体在不影响材料本身基本特性的情况下,在材料表面形成一个惰性的表面保护层,从而提高材料表面本身的润湿性、分子极性、粘接性以及生物相容性^[23-24]。

修复材料中常用的氧化锆与树脂粘接强度的高低与其本身亲水性能密切相关^[25]。廖宇等^[26]使用等离子体处理氧化锆后发现,材料表面形态并未明显改变,但其表面的润湿性增加,进而材料与树脂之间的粘接强度显著提高。

热固化丙烯酸树脂是制作全口义齿和可摘局部义齿基托的常用材料,而此种材料表面亲水性较低,因此在临床中常导致义齿的吸附效果不好。王萍等^[27]利用低温等离子体对热凝基托树脂进行处理后,发现等离子体的活性物质可在材料表面引入氧极性基团,使材料表面润湿性显著增加,增强了义齿基托与黏膜之间的吸附力。马小青等^[28]发现等离子体对老化的热凝树脂基托处理后可增加材料表面的亲水性能,并且可以提高树脂材料与硅橡胶软衬材料之间的粘接力,从而改善了义齿重衬技术,有效延长树脂基托的使用寿命。等离子体为口腔修复材料的表面改性提供了新的思路和方法。

4 大气压低温等离子体对牙体组织表面改性的影响

等离子体中富含基态或者是激发态的活性粒子成分,这些活性成分可对生物材料的表面产生轰击和热蚀刻效应^[29]。通过这些效应可有效改变牙本质表面的物理、化学以及生物等相关性能,从而提高牙本质表面的湿润性、增加牙本质胶原纤维表面含氧官能团的嫁接并且促进粘接树脂的渗透性、形成粘接耐久性能更高的混合层结构^[30]。

Chen等^[31]利用等离子体刷对牙本质进行处理,通过红外光谱分析发现等离子体处理前后牙本质胶原纤维中的二级结构发生改变,并且等离子体处理后明显

增强了牙本质-复合树脂的粘接性能。Zhu等^[32]利用低温等离子体装置处理脱矿后的牙本质发现,等离子体处理后可显著降低等离子体射流中活性粒子成分对脱矿后牙本质表面胶原纤维“轰击”的蚀刻效应,大大增强了牙本质-复合树脂即刻的粘接强度。Ayres等^[33]用等离子体作用于酸蚀后的牙本质表面后测定树脂和牙本质的微拉伸结合强度,结果显示等离子体处理组与未使用等离子体处理组未有明显差异,1年后的测量结果显示等离子体处理组仍能维持较高的结合强度,与未使用等离子体处理组存在显著差异。因此等离子体对牙本质处理后可增加牙本质表面粗糙度及亲水性,从而获得更高的粘接强度。

5 大气压低温等离子体在牙齿美白中的应用

目前临床中对于牙齿的美白主要借助过氧化物(过氧化氢、过氧化脲、过硼酸钠等)的漂白来完成。牙齿漂白的原理是过氧化物在特殊光源局部照射下,其活化时可分解产生羟基等自由基,这些自由基能够切断着色牙内部的有机大分子中未饱和的二价键(着色分子锁),将这些不饱和二价键氧化分解成小分子物质,从而达到牙齿脱色或者使牙面颜色变浅的目的。但是目前这些漂白方法存在着一些不良反应。一方面,高浓度的过氧化物易引起牙颈部硬组织的吸收,从而造成术者在处理后对外部刺激敏感。另一方面,这些光源可引发牙体组织升温,进而对牙髓组织造成不可逆的损伤。低温等离子体操作过程中产生的热量属于牙髓组织可接受的正常范围之内,并且射流中的活性粒子可作为过氧化物的催化剂,可激发过氧化物的分解并且释放大量的羟基,从而提高临床美白效率^[2]。近些年来越来越多的研究者将等离子体技术应用于牙齿美白研究中,为牙齿美白带来了新的临床治疗思路。

Sun等^[34]将大气压直流低温等离子体应用于牙齿的美白研究中,结果显示在20 min的处理时间内,等离子体处理 H_2O_2 后的 $\cdot OH$ 自由基峰值是单纯双氧水组的两倍,等离子体可以加速过氧化氢分解,生成更多的可以促进氧化着色大分子分解的 $\cdot OH$ 自由基,进而增强过氧化氢凝胶的美白功效,并且对处理时的温度进行了检测,发现等离子体处理时牙齿表面的温度仅为37℃左右,此温度属于牙齿可耐受的正常温度,因此在利用等离子体对牙齿进行美白时可减轻对牙髓组织的损伤。Lee等^[35]将 H_2O_2 单独处理和等离子体与 H_2O_2 联合处理过后牙齿的美白效果进行了对比,通过扫描电镜等检测方法发现,与仅使用 H_2O_2 相比,利用等离子体与 H_2O_2 相结合处理牙齿,较单纯使用 H_2O_2 进行处理,可使美白效果提高3倍,且扫描电镜下观测到牙齿表面的蛋白可被明显移除,因此证实等离子体可有效促进牙齿美白效

果。但是目前等离子应用于牙齿美白的过程仍然需要借助过氧化物的参与,因此怎样更好的利用等离子本身自有的自由基和活性物质仍然是学者们进一步研究的问题。

6 大气压低温等离子体在牙周病治疗中的应用

牙周病是口腔最常见的一种细菌感染性疾病,其可导致牙周支持组织的渐进性破坏,从而引起牙齿缺失。牙周病与人体全身性疾病有着极大的关联,其可诱发或加重心脏病、肾病、糖尿病等全身系统性疾病,因此对牙周病的治疗一直是口腔学者们致力解决的问题。大量研究表明等离子体可以有效杀灭与牙周病致病密切相关的牙龈卟啉单胞菌,并且还可促进裸露牙根表面成骨细胞的粘附能力^[36]。因此,等离子体技术在牙周病治疗中有着极大的应用潜力,研究其治疗牙周病的效果以及生物安全性具有十分重要的意义。

7 大气压低温等离子体在口腔颌面部止血中的应用

创伤治疗中凝血是一个非常重要的概念,口腔颌面部因血运丰富,快速有效地止血在口腔颌面部治疗中就显得尤为重要。目前临床中应用比较广泛的止血方法是高频电刀,但电刀温度过高,易烧焦需处理的组织面。而低温等离子体技术则是通过调节特定凝血机制来达到凝血作用,并且在处理过程中并不损伤其周围组织,止血过程中不产生热量、碳化、气化以及细菌污染等负面效应^[2, 37-38]。

Fridman等^[39]利用单电极低温等离子体进行凝血实验中发现,等离子体处理只需几秒钟即可使血液迅速凝结,极大节省了血液凝结所需的时间。并且等离子体短时间内直接处理皮肤时,可在几秒钟之内杀死皮肤菌群,但不会对皮肤正常组织造成伤害。

8 其他

等离子体在应用过程中还需要关注的一个重点问题是等离子体是否会对口腔正常组织产生不利影响。研究证实,只要恰当选择等离子体源、剂量以及处理时间,无论是在体外以及在活体上直接应用等离子体处理,都不会对人体正常的组织形成危害^[40-41]。熊紫兰等^[42]使用大气压等离子体射流处理人体成骨细胞,通过荧光跟踪等离子处理和未处理的成骨细胞生长状态,激光共聚焦显微镜下可见与未处理的细胞相比,等离子体处理过的细胞数量没有发生明显改变,因此可以证实正常细胞经适当条件的等离子体处理后并不会造成死亡。熊紫兰等^[42]还对动物进行活体试验研究,他们

利用等离子体对家兔口腔舌粘膜进行处理,于处理后再对相应的黏膜做病理切片,可见试验组与对照组的上皮组织均属于正常状态。以上实验均表明,等离子体在应用中并未对人体组织造成不利影响。

9 结论与展望

综上所述,等离子体技术在口腔医学领域中拥有着极大的应用前景,对于等离子体的研究不仅局限于消毒灭菌、牙齿美白、材料改性等方面,随着等离子装置的进一步改善,它可以提供更为精细、安全和便捷的医学治疗手段。但是,将等离子体的研究结果转化为临床应用仍然还有很多难点需要攻破,主要是因为等离子体装置目前没有相关统一的标准,它在应用中需要考虑到气体种类、作用时间、发生功率、暴露方式等因素,不同的使用条件可能会产生不同的生物学效果。并且我们对等离子体应用过程中与细胞、组织、器官乃至整个机体之间的机制仍在不断探索之中。因此,将等离子体应用于口腔领域的临床治疗过程仍然还要解决很多问题,但其在口腔医学领域中的应用前景是十分光明的。

【参考文献】

- [1] FRIDMAN G, FRIEDMAN G, GUTSOL A, et al. Applied plasma medicine[J]. Plasma Processes Polym, 2008, 5(6): 503-533.
- [2] 王丹杨, 汪鹏, 张凌, 等. 低温常压等离子体技术在口腔医疗领域的应用进展[J]. 中华口腔医学杂志, 2014, 49(9): 571-573.
WANG D Y, WANG P, ZHANG L, et al. Dental applications of non-thermal atmospheric pressure plasma: a review[J]. Chinese Journal of Stomatology, 2014, 49(9): 571-573.
- [3] 葛鑫, 赵宝红. 冷常压等离子体在口腔医学中的应用进展[J]. 中国实用口腔科杂志, 2019, 12(1): 47-49.
GE X, ZHAO B H. Progress of application of cold atmospheric plasma in dentistry[J]. Chinese Journal of Practical Stomatology, 2019, 12(1): 47-49.
- [4] TENDERO C, TIXIER C, TRISTANT P, et al. Atmospheric pressure plasmas: a review[J]. Spectrochim Acta Part B, 2006, 61(1): 2-30.
- [5] BÁRDOS L, BARÁNKOVÁ H. Cold atmospheric plasma: sources, processes, and applications[J]. Thin Solid Films, 2010, 518(23): 6705-6713.
- [6] 熊紫兰. 大气压常温等离子体射流源及其在根管治疗中的应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
XIONG Z L. Atmospheric pressure room-temperature plasma jets (RT-APPJs) and their applications in root canal treatment[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [7] SLADEK R E, STOFFELS E, WALRAVEN R, et al. Plasma treatment of dental cavities: a feasibility study[J]. IEEE Trans Plasma Sci, 2004, 32(4): 1540-1543.
- [8] 卢新培. 等离子体射流及其医学应用[J]. 高电压技术, 2011, 37(6): 1416-1425.
LU X P. Plasma jets and their biomedical application[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(6): 1416-1425.
- [9] WHITTAKER A G, GRAHAM E M, BAXTER R L, et al. Plasma cleaning of dental instruments[J]. J Hosp Infect, 2004, 56(1): 37-41.

- [10] LU X P, CAO Y G, YANG P. An RC plasma device for sterilization of root canal of teeth[J]. IEEE Trans Plasma Sci, 2009, 37(5): 668-673.
- [11] PAN J, SUN K, LIANG Y D, et al. Cold plasma therapy of a tooth root canal infected with enterococcus faecalis biofilms *in vitro*[J]. J Endod, 2013, 39(1): 105-110.
- [12] GOREE J, LIU B, DRAKE D, et al. Killing of *S. mutans* bacteria using a plasma needle at atmospheric pressure[J]. IEEE Trans Plasma Sci, 2006, 34(4): 1317-1324.
- [13] YANG B, CHEN J R, YU Q S, et al. Oral bacterial deactivation using a low-temperature atmospheric argon plasma brush[J]. J Dent, 2011, 39(1): 48-56.
- [14] BLUMHAGEN A, SINGH P, MUSTAPHA A, et al. Plasma deactivation of oral bacteria seeded on hydroxyapatite disks as tooth enamel analogue[J]. Am J Dent, 2014, 27(2): 84-90.
- [15] ABONTI T R, KAKU M, KOJIMA S, et al. Irradiation effects of low temperature multi gas plasma jet on oral bacteria[J]. Dent Mater J, 2016, 35(5): 822-828.
- [16] RUPF S, IDLIBI A N, AL MARRAWI F A, et al. Removing biofilms from microstructured titanium *ex vivo*: a novel approach using atmospheric plasma technology[J]. PloS One, 2011, 6(10): e25893.
- [17] KOBAN I, HOLTRETER B, HÜBNER N O, et al. Antimicrobial efficacy of non-thermal plasma in comparison to chlorhexidine against dental biofilms on titanium discs *in vitro*-proof of principle experiment[J]. J Clin Periodontol, 2011, 38(10): 956-965.
- [18] 周鑫才, 梁德凤, 陈伟建, 等. CHX等离子体杀灭牙龈卟啉单胞菌的实验研究[J]. 临床口腔医学杂志, 2018, 34(6): 341-344.
- ZHOU X C, LIANG D F, CHEN W J, et al. The antimicrobial activity of plasma jet with helium flowing through 2% chlorhexidine against *Porphyromonas gingivalis*[J]. Journal of Clinical Stomatology, 2018, 34(6): 341-344.
- [19] 柏娜, 朱智敏. 低温等离子体在口腔医学中的研究进展[J]. 口腔医学研究, 2014, 30(6): 583-586.
- BO N, ZHU Z M. Research progress of low temperature plasma in stomatology[J]. Journal of Oral Science Research, 2014, 30(6): 583-586.
- [20] LEE J H, KIM Y H, CHOI E H, et al. Air atmospheric-pressure plasma-jet treatment enhances the attachment of human gingival fibroblasts for early peri-implant soft tissue seals on titanium dental implant abutments[J]. Acta Odontol Scand, 2015, 73(1): 67-75.
- [21] MATOS A O, RICOMINI-FILHO A P, BELINE T, et al. Three-species biofilm model onto plasma-treated titanium implant surface[J]. Colloids Surf B Biointerfaces, 2017, 152: 354-366.
- [22] 谢艳婷, 李绍杰, 顾舒扬, 等. 冷常压等离子体处理对纯钛表面性能和成骨细胞增殖迁移的影响研究[J]. 中国实用口腔科杂志, 2018, 11(11): 674-678.
- XIE Y T, LI S J, GU S Y, et al. Study on the effects of cold atmospheric plasma on property of pure titanium surface and proliferation and migration of osteoblasts[J]. Chinese Journal of Practical Stomatology, 2018, 11(11): 674-678.
- [23] LIU Y, LIU Q, YU Q S, et al. Nonthermal atmospheric plasmas in dental restoration[J]. J Dent Res, 2016, 95(5): 496-505.
- [24] 路政宽, 秦爽, 刘红. 低温等离子体在口腔医学应用中的研究进展[J]. 中华老年口腔医学杂志, 2019, 17(5): 304-307.
- LU Z K, QIN S, LIU H. Advances in the application of low-temperature plasma in stomatology[J]. Chinese Journal of Geriatric Dentistry, 2019, 17(5): 304-307.
- [25] PIASICK J R, SWIFT E J, BRASWELL K, et al. Surface fluorination of zirconia: adhesive bond strength comparison to commercial primers[J]. Dent Mater, 2012, 28(6): 604-608.
- [26] 廖宇, 刘晓强, 陈立, 等. 不同表面处理对氧化锆与树脂水门汀粘接强度的影响[J]. 北京大学学报(医学版), 2018, 50(1): 53-57.
- LIAO Y, LIU X Q, CHEN L, et al. Effects of cold plasma treatment on the zirconia-resin cement bond strength[J]. Journal of Peking University (Health Sciences), 2018, 50(1): 53-57.
- [27] 王萍, 程祥荣, 谢光勇. 低温等离子体改性基托树脂表面粘接性能的研究[J]. 口腔医学研究, 2007, 23(2): 144-146.
- WANG P, CHENG X R, XIE G Y, et al. Effect of low temperature plasma treatment on the bonding strength of denture base[J]. Journal of Oral Science Research, 2007, 23(2): 144-146.
- [28] 马小青, 乔春元, 张怀勤. 等离子体对老化义齿基托树脂表面润湿性和粘接性的影响[J]. 实用口腔医学杂志, 2017, 33(6): 750-753.
- MA X Q, QIAO C Y, ZHANG Q H. The effects of plasma treatment on the wettability and adhesion properties of the surface of aged denture base resin[J]. Journal of Practical Stomatology, 2017, 33(6): 750-753.
- [29] ZHU X M, ZHOU J F, GUO H, et al. Effects of a modified cold atmospheric plasma jet treatment on resin-dentin bonding[J]. Dent Mater J, 2018, 37(5): 798-804.
- [30] 朱晓鸣, 齐璇, 李德利, 等. 不同温度新型大气压冷等离子体处理对牙本质粘接强度的影响[J]. 北京大学学报(医学版), 2019, 51(1): 43-48.
- ZHU X M, QI X, LI D L, et al. Effect of a novel cold atmospheric plasma jet treatment with different temperatures on resin-dentin bonding[J]. Journal of Peking University (Health Sciences), 2019, 51(1): 43-48.
- [31] CHEN M S, ZHANG Y, DUSEVICH V, et al. Non-thermal atmospheric plasma brush induces HEMA grafting onto dentin collagen[J]. Dent Mater, 2014, 30(12): 1369-1377.
- [32] ZHU X M, GUO H, ZHOU J F, et al. Influences of the cold atmospheric plasma jet treatment on the properties of the demineralized dentin surfaces[J]. Plasma Science & Technology, 2018(4): 63-70.
- [33] AYRES A P, BONVENT J J, MOGILEVYCH B, et al. Effect of nonthermal atmospheric plasma on the dentin- surface topography and composition and on the bond strength of a universal adhesive[J]. Eur J Oral Sci, 2018, 126(1): 53-65.
- [34] SUN P, PAN J, TIAN Y, et al. Tooth whitening with hydrogen peroxide assisted by a direct-current cold atmospheric-pressure air plasma microjet[J]. IEEE Trans Plasma Sci, 2010, 38(8): 1892-1896.
- [35] LEE H W, KIM G J, KIM J M, et al. Tooth bleaching with nonthermal atmospheric pressure plasma[J]. J Endod, 2009, 35(4): 587-591.
- [36] 顾舒扬, 江鹭鹭, 赵宝红. 冷常压等离子体在口腔灭菌方面的应用[J]. 中国实用口腔科杂志, 2019, 12(2): 113-117.
- GU S Y, JIANG L L, ZHAO B H. Application of cold atmospheric plasma in oral sterilization[J]. Chinese Journal of Practical Stomatology, 2019, 12(2): 113-117.
- [37] HEINLIN J, ISBARY G, STOLZ W, et al. Plasma applications in medicine with a special focus on dermatology[J]. J Eur Acad Dermatol Venereol, 2011, 25(1): 1-11.
- [38] KIM G C, LEE H W, BYUN J H, et al. Dental applications of low-temperature nonthermal plasmas[J]. Plasma Process Polym, 2013, 10(3): 199-206.
- [39] FRIDMAN G, PEDDINGHAUS M, BALASUBRAMANIAN M, et al. Blood coagulation and living tissue sterilization by floating-electrode dielectric barrier discharge in air[J]. Plasma Chem Plasma Process, 2006, 26: 425-442.
- [40] KALGHATGI S, FRIEDMAN G, FRIDMAN A, et al. Endothelial cell proliferation is enhanced by low dose non-thermal plasma through fibroblast growth factor-2 release[J]. Ann Biomed Eng, 2010, 38(3): 748-757.
- [41] YILDIRIM E D, AYAN H, VASILETS V N. Effect of dielectric barrier discharge plasma on the attachment and proliferation of osteoblasts cultured over poly (ϵ -caprolactone) scaffolds[J]. Plasma Process Polym, 2008, 5(1): 58-66.
- [42] 熊紫兰, 卢新培, 曹颖光. 等离子体医学[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(10): 1279-1298.
- XIONG Z L, LU X P, CAO Y G. Plasma medicine[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2011, 41(10): 1279-1298.

(编辑: 薛泽玲)