

# 结核后支气管狭窄支架治疗现状及进展

李美玲<sup>1</sup>, 李元军<sup>2</sup>

<sup>1</sup>延安大学附属医院, 陕西 延安

<sup>2</sup>延安市第二人民医院, 陕西 延安

收稿日期: 2022年9月19日; 录用日期: 2022年10月11日; 发布日期: 2022年10月19日

## 摘要

结核后支气管狭窄是气管支气管结核的主要并发症, 重建气道能改善患者的预后, 对于稳定期结核后支气管狭窄手术治疗的效果是肯定的, 但部分患者无法耐受手术。近年来, 介入呼吸病学的迅速发展为这类患者提供更多的气道重建的方案, 选择非支架还是支架支气管镜下介入治疗, 目前尚缺乏统一的操作规范及指导方案。本文通过总结PTBS经气道支架治疗的常用方法以及近年来新型支架的研究进展, 对PTBS的气道内支架治疗的现状及进展进行综述。

## 关键词

结核, 气道狭窄, 支气管镜, 介入治疗, 气道支架

# Present Situation and Progress of Stent Therapy for Posterior Bronchial Stenosis of Tuberculosis

Meiling Li<sup>1</sup>, Yuanjun Li<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Affiliated Hospital of Yan'an University, Yan'an Shaanxi

<sup>2</sup>The Second People's Hospital of Yan'an, Yan'an Shaanxi

Received: Sep. 19<sup>th</sup>, 2022; accepted: Oct. 11<sup>th</sup>, 2022; published: Oct. 19<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Posterior bronchial stenosis is the main complication of tracheobronchial tuberculosis. Airway reconstruction can improve the prognosis of patients, and the effect of surgical treatment for stable posterior bronchial stenosis is positive, but some patients can't tolerate surgery. In recent years, the rapid development of interventional respiration has provided more airway reconstruc-

tion schemes for these patients, and there is still a lack of unified operating norms and guiding schemes to choose non-stent or stent bronchoscopy interventional therapy. In this paper, the current situation and progress of airway stent therapy for PTBS are reviewed by summarizing the common methods of airway stent therapy for PTBS and the research progress of new stents in recent years.

## Keywords

Tuberculosis, Narrow Airway, Bronchoscope, Interventional Therapy, Airway Bracket

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

气管支气管结核(tracheobronchial tuberculosis, TBTB)是指发生在气管、支气管的黏膜、黏膜下层、平滑肌、软骨及外膜的结核病,是结核病的特殊临床类型,常造成气管、支气管狭窄[1]。在肺结核患者中结核后支气管狭窄(Post-Tuberculosis Tracheobronchial Stenosis, PTBS)的发病率为10%~20%,是TBTB的严重后遗症[2]。对于稳定期PTBS手术治疗的效果是肯定的,但外科手术创伤大、花费高且部分患者无法耐受外科手术[3]。对于不能进行手术治疗的患者,经支气管镜气道支架置入治疗也是一种有效解决狭窄的方法,目前临床常用的支架类型包括硅酮支架、金属支架、硅酮和金属杂合支架,硅酮支架的安全性高,相对便宜且易操作,可以有效治疗气管支气管狭窄,但仍存在一些并发症,如支架移位、再狭窄、需要用刚性支气管镜进行支架置入带来的相关风险(口腔创伤、声带损伤、气管和支气管损伤、出血、感染、缺氧、呼吸衰竭等)、肉芽增生、咳痰困难。另外,取出支架时间目前仍无明确规定。既往报道中,1年后取出支架再狭窄率低于1年内取出。因此,放置硅酮支架必须把握好适应证,出现并发症及时处理,才能获得良好的疗效。金属支架在恶性气道疾病中应用已广为报道,可快速重建气道,缓解呼吸困难等症状,但也存在窒息、出血、肉芽组织增生或肿瘤向内生长等并发症,因此放置时须严格把握适应证和禁忌证,且对支架与放置方法的选择也很重要。美国食品药品监督管理局(US food and drug administration, FDA)发布公共卫生警告,禁止在良性气道疾病中使用金属支架[4]。但由于传统支架的置入可并发感染、肉芽组织形成、粘液阻塞、支架嵌入正常组织难以去除的风险[5]。近年来,随着新兴技术的发展,对于PTBS患者可置入个性化支架、过渡支架、药物涂层支架、生物可降解支架和3D打印支架等。本文针对PTBS经气道行支架置入术治疗的现状及进展作一综述。

## 2. PTBS 的概述

PTBS是TBTB引起的气道瘢痕型狭窄,是支气管内结核的一种并发症。根据支气管镜下表现及病理分型包括TBTB中的IV型(瘢痕狭窄型)及V型(管壁软化型),根据狭窄的类型分为膜状环形狭窄和复杂型狭窄。

## 3. PTBS 支架置入新进展

### 3.1. 个性化支架置入

与传统的直筒硅酮支架相比,成角度的硅酮支架能够适应成角度的狭窄,并且可减少支架移位、肉芽组织过度生长和再狭窄的并发症,有望进一步改善PTBS患者的预后。2018年, Tay Chee Kiang.等[6]

回顾性分析 2004 年~2014 年, 在该中心接受介入性支气管镜检查的 283 名 PTBS 患者, 包括 21 名患者接受了至少一个成角支架的治疗。发表的研究结果显示, 中位随访 26 个月后, 21 名患者中有 7 名(33.3%)成功取出支架。在使用成角支架的患者中, 更换支架或最终移除的中位持续时间比使用直管支架的患者长(392 天 vs. 86 天;  $p < 0.05$ )。成角支架通过减少并发症和延长支架更换间隔是成角 PTBS 患者的一种可行的治疗选择。

### 3.2. 过渡支架

过渡支架综合了覆盖式自膨胀支架和置入硅酮支架等技术, 利用过渡的形式。2021 年, Zhou ZQ 等[7]比较了分别采用支气管硅酮支架植入术和覆盖式自膨胀金属支架(SEMS)植入作为硅胶支架植入桥梁的 58 例严重瘢痕性 PTBS 患者的结果, 显示 SEMS 的放置时长为  $28.4 \pm 11.1$  天, 移除 SEMS 后, 所有硅胶支架均成功插入, 并减少支气管扩张次数。他们认为覆盖式 SEMS 植入作为向硅胶支架的过渡, 可作为减少并发症、提高重度 PTBS 患者硅胶支架植入成功率的一种有效的方法[8]。

### 3.3. 药物涂层支架

气道药物涂层支架是由支架、药物和载体组成, 将药物和载体按照一定的比例配置成溶液, 涂覆于支架上, 通过药物缓慢释放抑制气道再狭窄, 是治疗 TPBS 的一种新方法。目前涂层支架主要采用金属或聚合物支架, 聚合物支架主要包括聚对二氧环己酮、聚 L-乳酸、聚(d, l-丙交酯-共-乙交酯)和聚己内酯。在支架表面添加抗增殖的药物主要有: 紫杉醇、丝裂霉素 C、雷帕霉素和强力霉素、西罗莫司、类固醇激素[9]。在过去的几年里, 越来越多的材料和涂层被用于气道支架, 尽管这些研究大多数还处于动物试验阶段, 但对气管支架的发展仍然很重要。

紫杉醇可以抑制成纤维细胞的增殖, 2006 年, 有学者首次在实验动物(犬)气道植入了紫杉醇支架。2014 年, Kong 等[10]制备了新型的紫杉醇洗脱气道支架, 发现涂层比例为 0.1% (w/v) 的紫杉醇和 2% (w/v) 的聚乳酸-乙醇酸 PLGA, 得到的总紫杉醇载药量为  $(16.3806 \pm 0.0021)$  mg/支架, 其药物释放量为  $(0.376 \pm 0.003 \pm 8)$  mg/d, 为治疗水平, 且持续释放时长超过 40 天, 提示该支架可作为 PTBS 的治疗方案之一。2011 年, Zhu 等[11]首次在实验动物(兔子)上通过药物洗脱支架对丝裂霉素 C 进行缓释, 经过 12 周的研究, 结果表明包含 0.1 mg 丝裂霉素 C 药物洗脱的生物可吸收支架可减少气道分泌物的产生、肉芽组织的生成和气道狭窄程度, 可用于预防气道狭窄。2020 年, Duvvuri 等[12]利用患有喉气管狭窄(LTS)的小鼠作为动物试验模型, 将结合雷帕霉素的 PLLA-PCL (70% 聚-L-丙交酯和 30% 聚己内酯)支架植入到小鼠体内, 观察该药物洗脱支架在减少气道纤维化和胶原沉积方面的有效性。发现, PLLA-PCL 支架显示出稳定的雷帕霉素释放, 减少了气管中的瘢痕形成, 在生理条件下显示出稳定的机械性能、良好的生物相容性、很少的气道炎症反应。且该支架制造需要 28~30 小时, 可以容易被复制, 允许大规模的实验。2021 年, 我国有学者将 36 只新西兰大耳白兔作为动物模型, 尝试通过观察两组(普通镍钛合金裸支架组、西罗莫司涂层镍钛合金裸支架组), 每组内不同时间(1 月、2 月、3 月)气道狭窄的情况, 发现对照组最狭窄处平均狭窄程度分别为  $(81.6 \pm 2.8)\%$ 、 $(66.4 \pm 1.6)\%$  和  $(78.2 \pm 2.3)\%$ , 实验组分别为  $(61.68 \pm 2.3)\%$ 、 $(45.23 \pm 4.5)\%$  和  $(50.97 \pm 3.8)\%$ , 实验组病理检查结果显示西罗莫司涂层支架组纤维素增生和胶原蛋白沉积程度较轻。结果证实, 西罗莫司涂层可有效抑制镍钛合金支架置入后的肉芽组织增生, 降低支架置入后再狭窄程度[13]。高剂量类固醇药物的全身给药可减缓肉芽组织的过度生长, 但长期使用可导致毒副作用。2021 年, Sindeeva 等[14]通过动物实验研究以 PLA、PCL、和 PLGA 为载体载低分子量的甲泼尼龙琥珀酸钠涂层支架治疗气道狭窄的疗效。PLA、PCL 和 PLGA 可牢固地固定在可扩张的镍钛合金气道支架上, 作为载体在浸入去离子水中分别可保留 96.3%、9.5% 和 15.7% 的药物浓度, 其中 PLA 和 PCL 具有良好的机械

性能。对兔子的体内研究表明, PLA、PLGA 可有效抑制肉芽组织增生, PLGA 的薄膜涂层在气道中在 10 天内几乎完全降解, PLA 部分保留了它们的结构, PCL 是最稳定的, 这可能导致在低药物浓度的背景下阻止液体从气管粘膜流出并加重炎症过程。因此在制造具有微室以保留治疗化合物的膜时聚合物的组合和可变性被建议作为一种新型的药物洗脱涂层。

尽管气道涂层支架的研究目前报道了较多的动物试验结果, 较少进行大量的临床试验研究, 且目前仍面对诸多挑战[15]。其中抗增殖药物与载体聚合物在体内释放的规律仍需要进一步探讨, 同时需要临床医学、生物材料学、药理学等多学科的专业人士的相互协作[16]。总之, 随着技术的发展, 药物涂层支架在预防和治疗 TPBS 肉芽组织增生将会发挥重要的作用, 其中可生物降解的药物涂层支架可作为未来气道支架的方向。

### 3.4. 生物可降解支架

生物可降解(Biodegradable, BD)支架是通过将微加工技术与生物可吸收聚合物相结合制成的气道支架, 具有机械强度高、生物相容性和可生物降解等特性, 可有效缓解 TPBS 的气道狭窄症状并且可以减少支架相关的并发症, 为 TPBS 的治疗提供了新的选择[17]。1998 年, 芬兰学者首次在动物(兔子)气道内植入聚左旋乳酸(PLLA)支架进行了的尝试, 结果显示经过 10 个月的随访支架完全降解了[18]。截止至 2006 年, 有 7 种可生物降解高分子聚合物获得美国 FDA 批准, 其中仅聚二恶烷酮(PDS)气道支架进行了临床试验。

植入 BD 支架的有效性已经得到多个临床试验证实。Lischke [19]等发表了一项肺移植术后吻合口狭窄的患者植入聚二恶烷酮(PDS)制成的气道支架随访了 4 年的结果, 该小型试点研究共纳入 6 例患者, 研究表明, 所有患者气道狭窄均得到初步缓解且术后无出血、穿孔或支架移位。4 例患者因吻合口再狭窄需要再次支架植入, 其中位时间为 5 个月(2~15 个月)。1 例患者死于肺栓塞, 所有 5 名幸存者自第一次支架植入后随访 4 年(中位数 40 个月, 范围 7~48 个月), 患者状况良好, 无干预达 44 个月(中位数 24 个月, 范围 7~44 个月)。因此结论认为, 对于肺移植术后吻合口狭窄的患者, BD 支架是传统金属支架的一种安全、有效和可靠的替代物, 并且可以避免永久性支架的需要。并且有研究发现, PDS 制成的气道支架对儿童因外部压迫或内在塌陷导致气道狭窄的患者同样有效[20]。

近年来, 随着新型材料的发展, 有更多可降解生物材料被应用于气道支架的制造。2019 年, Wu 等 [21]在体外实验研究中表明使用可生物降解的镁 - 铝 - 锌 - 钙 - 锰(AZXM)合金气道支架表现出更高的耐腐蚀性、更强的机械性能和优异的细胞相容性, 但仍需要进一步的合金加工来改善其延展性和更多的体内研究证明支架的可行性, 这可能是未来可降解支架高分子聚合物的一个新的材料。2020 年, 该团队报道了 [22]使用气囊可膨胀的生物可降解气道支架对小儿喉气管狭窄患者进行治疗的结果, 显示随着时间的推移支架在体内安全降解, 气道组织对金属基质和降解产物的耐受性良好, 没表现出任何明显的局部或全身毒性, 首次证实了基于超高延展性镁合金的可生物降解气道支架的可行性。

总之, 经支气管镜对良性气道狭窄病变进行可降解支架植入治疗是可行的, 可以作为 TPBS 患者缓解气道狭窄的一种有效方法, 但是可降解的高分子聚合物材料是多种多样的, 目前大规模的临床研究还比较少, 其安全性和有效性还需进一步探讨。此外, 不同的生物可降解材料降解时间是不同的, 并且气道支架在完全降解前可能已失去对狭窄病灶的支撑作用, 可能需要多次支架植入。因此支架植入后的 CT 随访是很有必要的, 可以动态观察支架及病灶的情况以便及早发现气道的再狭窄, 尽早再次植入气道支架, 提供足够的支撑时长。

### 3.5. 3D 打印支架

3D 打印气道支架植入术是近年来出现的通过介入治疗结核后气道狭窄的新技术。其原理是通过计算机断层扫描患者气管三维重建结构, 提取影像资料, 用 3D 打印技术制造人工气道支架, 通过支气管镜



植入狭窄气道,从而加速患者症状缓解[23]。2012年,有研究者在动物(健康兔子)上进行了测试[24],2013年,Zopf等[25]报道了人体首次使用3D打印气道支架的试验研究结果,验证了3D打印支架与气道环周狭窄患者气道独特的适用性。

3D打印技术,最早出现在20世纪90年代。使用3D打印的定制支架,可以为患者定制个性化气道模型,精确支架尺寸、优化支架与气道的贴合度并允许分支气道的交叉通气[26]。2018年,Gildea等[27]报告了2例由肉芽肿性多血管炎引起的气道疾病患者的1年结果,显示与患者特异性支架植入前6个月相比,植入后>1年的观察结果与气道支架植入后根据常规护理标准的数量、临床所需支架更换、手术时间和一般临床改善情况进行了比较。他们认为3D定制打印的硅酮支架表现出更高的耐用性、更短的手术时间,且在1年的随访中患者症状取得持久的改善,是一种改善患者气道通气的可行方法。2020年,Hatachi等[28]报告了1例侵犯右主支气管的支气管肺癌患者,行右上肺叶切除术和隆突成形术完全切除肿瘤,但术后4个月患者再次出现劳力性呼吸困难,CT显示由于肉芽组织的生长导致患者气道狭窄变形。他们构建了一个3D打印的气道模型,并根据模型对所使用的Y型支架进行修改。结果显示,三维打印支架置入后,患者左右支气管均得以保留,患者症状好转。三维打印的气道模型提高了气道支架植入手术的准确性和安全性。此外,近期有研究报道了使用3D打印的新型金属分段气道支架对12名患有恶性肿瘤引起的气道狭窄的患者进行治疗,术后11名患者的呼吸困难症状得到改善,术后患者的休-琼斯(HJ)分类、卡氏功能状态(KPS)分级显著改善(分别为 $P = 0.003$ 和 $P = 0.006$ )。在随访期间,分别有2名和4名患者出现肉芽组织增生和痰液潴留。他们认为植入借助3D打印设计的新型支架对于缓解呼吸困难和改善不能手术的涉及隆突或支气管的恶性狭窄患者的性能状况是可行的[29]。随着支气管镜技术的普及,PTBS的诊断率越来越高,对3D打印支架的需求比以往任何时候都大,这也许可以作为PTBS气道支架未来的一个研究方向。虽然精确的气道模型可以提高气道支架的适用性,但不会阻止一些支架相关并发症的发展,例如肉芽组织增生和痰液潴留[30]。

总之,随着技术的不断发展,气管支气管支架在呼吸系统介入治疗方面存在很大的前景,尤其在治疗结核后支气管狭窄方面,将会发挥越来越重要的作用。

## 参考文献

- [1] 气管支气管结核诊断和治疗指南(试行)[J]. 中华结核和呼吸杂志, 2012(8): 581-587.
- [2] Kiang, T.C., Byeong-Ho, J. and Kim, H. (2018) Angulated Stents—A Novel Stent Improvisation to Manage Difficult Post-Tuberculosis Bronchial Stenosis. *ASAIO Journal*, **64**, 565-569. <https://doi.org/10.1097/MAT.0000000000000692>
- [3] Yaqeen, M.E.N., Kamariah, O.S., Arif, M.Z.M., et al. (2022) Bronchoscopic Features and Morphology of Endobronchial Tuberculosis: A Malaysian Tertiary Hospital Experience. *Journal of Clinical Medicine*, **11**, Article No. 676. <https://doi.org/10.3390/jcm11030676>
- [4] Nicolas, G., Hideo, S. and Hervé, D. (2020) Airway Stenting: Technological Advancements and Its Role in Interventional Pulmonology. *Respirology*, **25**, 953-962. <https://doi.org/10.1111/resp.13801>
- [5] Marc, F., Yves, L., Xavier, E., et al. (2017) Safety and Efficacy of a Fully Covered Self-Expandable Metallic Stent in Benign Airway Stenosis. *Respiration*, **93**, 430-435. <https://doi.org/10.1159/000472155>
- [6] Hideyuki, T., Ichiro, H., Masahiro, J., et al. (2017) Preliminary Experience of Endovascular Embolization Using N-Butyl Cyanoacrylate for Hemoptysis Due to Infectious Pulmonary Artery Pseudoaneurysms via Systemic Arterial Approach. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*, **28**, 1438-1442.e1. <https://doi.org/10.1016/j.jvir.2016.03.023>
- [7] Zhou, Z.Q., Feng, J.X., Chen, Y., et al. (2021) Self-Expanding Covered Metallic Stents as a Transition to Silicone Stent Implantation in Management of Severe Post-Tuberculosis Bronchial Stenosis. *Therapeutic Advances in Respiratory Disease*, **15**. <https://doi.org/10.1177/17534666211019564>
- [8] Li, F.Q., et al. (2022) Post-Tuberculosis Tracheobronchial Stenosis: Long-Term Follow-Up after Self-Expandable Metallic Stents Placement and Development of a Prediction Score: The Restenosis Score. *European Journal of Medical Research*, **27**, Article No. 133.

- [9] Johnson, C.M., Luke, A.S., Jacobsen, C., *et al.* (2021) State of the Science in Tracheal Stents: A Scoping Review. *Laryngoscope*. <https://doi.org/10.1002/lary.29904>
- [10] Kong, Y.Y., Zhang, J., Wang, T., *et al.* (2014) Preparation and Characterization of Paclitaxel-Loaded Poly Lactic Acid-Co-Glycolic Acid Coating Tracheal Stent. *Chinese Medical Journal (Engl)*, **127**, 2236-2240.
- [11] Zhu, G.H., Ng Anthony, H.C., Venkatraman, S.S., *et al.* (2011) A Novel Bioabsorbable Drug-Eluting Tracheal Stent. *Laryngoscope*, **121**, 2234-2239. <https://doi.org/10.1002/lary.22175>
- [12] Madhavi, D., Kevin, M., Hsiu-Wen, T., *et al.* (2020) Design of a Biocompatible Drug-Eluting Tracheal Stent in Mice with Laryngotracheal Stenosis. *Journal of Visualized Experiments*, **155**, e60483. <https://doi.org/10.3791/60483>
- [13] 李宗明, 张全会, 韩新巍, 焦德超, 任克伟, 路慧彬. 西罗莫司涂层气管支架在气管狭窄动物模型中的应用[J]. 放射学实践, 2021, 36(6): 717-721. <https://doi.org/10.13609/j.cnki.1000-0313.2021.06.005>
- [14] Sindeeva, O.A., Prikhozhdenko, E.S., Schurov, I., *et al.* (2021) Patterned Drug-Eluting Coatings for Tracheal Stents Based on PLA, PLGA, and PCL for the Granulation Formation Reduction: *In Vivo* Studies. *Pharmaceutics*, **13**, Article No. 1437. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13091437>
- [15] Debiane, L., Reitzel, R., Rosenblatt, J., *et al.* (2019) A Design-Based Stereologic Method to Quantify the Tissue Changes Associated with a Novel Drug-Eluting Tracheobronchial Stent. *Respiration*, **98**, 60-69. <https://doi.org/10.1159/000496152>
- [16] 孔颖颖, 张杰. 气道药物涂层支架的研究进展[J]. 中华结核和呼吸杂志, 2014, 37(4): 293-295.
- [17] Wang, J., Boutin, K.G., Abdulhadi, O., *et al.* (2013) Fully Biodegradable Airway Stents Using Amino Alcohol-Based Poly(ester amide) Elastomers. *Advanced Healthcare Materials*, **2**, 1329-1336. <https://doi.org/10.1002/adhm.201200348>
- [18] Korpela, A., Aarnio, P., Sariola, H., *et al.* (1998) Comparison of Tissue Reactions in the Tracheal Mucosa Surrounding a Bioabsorbable and Silicone Airway Stents. *The Annals of Thoracic Surgery*, **66**, 1772-1776. [https://doi.org/10.1016/S0003-4975\(98\)00763-2](https://doi.org/10.1016/S0003-4975(98)00763-2)
- [19] Lischke, R., Pozniak, J., Vondrys, D., *et al.* (2011) Novel Biodegradable Stents in the Treatment of Bronchial Stenosis after Lung Transplantation. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, **40**, 619-624. <https://doi.org/10.1016/j.ejcts.2010.12.047>
- [20] Vondrys, D., Elliott, M.J., McLaren, C.A., *et al.* (2011) First Experience with Biodegradable Airway Stents in Children. *The Annals of Thoracic Surgery*, **92**, 1870-1874. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2011.07.042>
- [21] Wu, J.Y., Lee, B., Saha, P., *et al.* (2019) A Feasibility Study of Biodegradable Magnesium-Aluminum-Zinc-Calcium-manganese (AZXM) Alloys for Tracheal Stent Application. *Journal of Biomaterials Applications*, **33**, 1080-1093. <https://doi.org/10.1177/0885328218824775>
- [22] Wu, J.Y., Mady, L.J., Roy, A., *et al.* (2020) *In-Vivo* Efficacy of Biodegradable Ultrahigh Ductility Mg-Li-Zn Alloy Tracheal Stents for Pediatric Airway Obstruction. *Communications Biology*, **3**, Article No. 787. <https://doi.org/10.1038/s42003-020-01400-7>
- [23] 刘春全, 李华伟, 蔡先启, 贺迎, 崔永. 3D 打印复合人工气管移植的实验研究[J]. 临床和实验医学杂志, 2018, 17(4): 350-354.
- [24] Park, J.H., Jung, J.W., Kang, H.-W., *et al.* (2012) Development of a 3D Bellows Tracheal Graft: Mechanical Behavior Analysis, Fabrication and an *in Vivo* Feasibility Study. *Biofabrication*, **4**, Article ID: 035004. <https://doi.org/10.1088/1758-5082/4/3/035004>
- [25] Zopf, D.A., Hollister, S., Nelson, M.E., *et al.* (2013) Bioresorbable Airway Splint Created with a Three-Dimensional Printer. *The New England Journal of Medicine*, **368**, 2043-2045. <https://doi.org/10.1056/NEJMc1206319>
- [26] Xu, J., Sullivan, C., Ong, H.X., *et al.* (2020) Using Individualized Three-Dimensional Printed Airway Models to Guide Airway Stent Implantation. *Interactive CardioVascular and Thoracic Surgery*, **31**, 900-903. <https://doi.org/10.1093/icvts/ivaa206>
- [27] Gildea, T.R., Young, B.P. and Machuzak, M.S. (2018) Application of 3D Printing for Patient-Specific Silicone Stents: 1-Year Follow-Up on 2 Patients. *Respiration*, **96**, 488-494. <https://doi.org/10.1159/000489669>
- [28] Hatachi, G., Matsumoto, K., Miyazaki, T., *et al.* (2020) Enhanced Airway Stenting Using a Preoperative, Three-Dimensionally Printed Airway Model Simulation. *General Thoracic and Cardiovascular Surgery*, **68**, 1591-1593. <https://doi.org/10.1007/s11748-020-01404-4>
- [29] Shan, Q.G., Huang, W., Shang, M.Y., *et al.* (2021) Customization of Stent Design for Treating Malignant Airway Stenosis with the Aid of Three-Dimensional Printing. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **11**, 1437-1446. <https://doi.org/10.21037/qims-20-727>
- [30] 张博友, 王志豪, 张国中, 潘枢, 史宏灿. 3D 打印技术构建组织工程气管支架的研究进展[J]. 中华胸心血管外科杂志, 2019(7): 443-446.