·综述·

3D打印技术在糖尿病足患者中的应用进展

苏家怡[1],张华[2*],彭薇[1]
(重庆医科大学附属第一医院:[1]内分泌内科,[2]护理部,重庆 400042)

【摘 要】 3D打印技术是先进制造业的重要组成部分,能够精准契合患者的个性化需求,体现“以患者为中心”的精准医疗理念。糖尿病足已成为全球非创伤性下肢截肢的主要原因,3D打印技术凭借其精准、快速、个性化等优势在糖尿病足的预防与治疗中具有广阔前景。本文从3D打印技术的概述、在糖尿病足患者中的具体应用、存在问题与对策等展开阐述,以期为3D打印技术在糖尿病足患者中的临床实践提供参考。

【关键词】 糖尿病足;3D打印技术;综述
【中图分类号】 R578.2 【文献标志码】 A 【DOI】 10.11915/j.issn.1671-5403.2026.06.098

Progress in the application of 3D printing technology in patients with diabetic foot

Su Jiayi[1], Zhang Hua[2*], Peng Wei[1]
([1]Department of Endocrinology, [2]Department of Nursing, the First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400042, China)

【Abstract】 As a pivotal component of the advanced manufacturing, 3D printing technology precisely aligns with the needs of an individual patient, embodying the patient-centered concept of precision medicine. Diabetic foot has become the leading cause of non-traumatic lower limb amputations worldwide. 3D printing technology, with its advantages of precision, speed, and customizability, offers promising applications in the prevention and management of diabetic foot. This paper elaborates on 3D printing technology, its clinical applications in patients with diabetic foot, current problems, and countermeasures, aiming to provide a reference for the clinical practice.

【Key words】 diabetic foot; 3D printing technology; review
This work was supported by the Key Quality Specialty Construction Project "Clinical Nursing" in Chongqing (0203〔2023〕No.47, 202336).

Corresponding author: Zhang Hua, E-mail: 201950@hospital.cqmu.edu.cn

糖尿病足是糖尿病的慢性并发症,糖尿病足国际工作组将其定义为继发于糖尿病的皮肤皲裂、溃疡、感染或足部组织破坏[1]。作为一种代谢紊乱引起的慢性并发症,糖尿病足的病理生理状态不同于其他慢性伤口,具有病程长、高复发率、高截肢率及高死亡率的特点。因此,早期识别危险因素并及时处理足部溃疡,对保留肢体功能、提高生活质量及生存率至关重要。传统糖尿病足防治存在个体化不足、溃疡愈合周期长、修复效率低等问题,导致患者治疗依从性差、经济负担重,而3D打印技术作为增材制造技术,具有精准定制、快速成型等优势,为糖尿病足防治提供了新选择。鉴于此,本文从技术概述、临床应用、现存问题与对策等方面展开综述,旨在为3D打印技术在糖尿病足治疗中的临床应用提供参考。

1 3D打印技术概述

1.1 3D打印技术的概念

3D打印技术,也称增材制造技术,是通过计算机辅助分解将特定形状拆解为一系列平面薄片,随后使用有机或无机材料逐层复制这些薄片,通过叠加积累,最终形成三维实体物体的过程,其核心理念是通过逐层添加材料来制造物体,以区别于通过减材方式去除材料的传统加工方法[2]。

收稿日期:2025-07-10;接受日期:2025-09-05
基金项目:重庆市重点专科建设《临床护理》精品建设项目(0203〔2023〕47号 202336)
通信作者:张华,E-mail:201950@hospital.cqmu.edu.cn

1.2 3D 打印技术的发展

3D 打印技术由 Hull 于 1980 年提出,最初应用于塑料器件制造[3]。进入 21 世纪后,该技术迎来跨越式发展,被公认为第三次工业革命的核心技术之一[4]。中国 3D 打印技术起步虽晚于国外,但过去十余年实现了快速发展。2012 年 10 月,中国 3D 打印技术联盟成立[5]。2015 年 2 月,《国家增材制造产业发展推进计划(2015-2016 年)》的发布,将 3D 打印产业正式纳入国家战略[4]。2024 年国家发展和改革委员会最新发布的《产业结构调整指导目录(2024 年本)》,进一步将智能制造领域的 3D 打印技术列为鼓励类项目[6],充分体现了国家层面的战略重视。

2 3D 打印技术在糖尿病足患者中的具体应用

2.1 3D 打印技术在功能性敷料制备中的应用

糖尿病足伤口的愈合机制复杂,考虑到糖尿病足创面的类型、深度、解剖位置等,应选择恰当的敷料促进伤口的愈合,而传统型伤口敷料功能较为单一,难以满足伤口愈合进程中的复杂需求。Huang 等[7]通过 3D 生物打印技术制备出一种负载自体富血小板血浆的生物活性多层壳核纤维水凝胶,可持续释放生长因子,促进糖尿病足溃疡愈合速度,还可降低 33% 的换药频率,减轻患者疼痛。Fratini 等[8]采用 3D 生物打印技术将脂质纳米粒子和水凝胶组合,制备成支架状和皮肤状结构的糖尿病伤口敷料,该敷料可以释放载有抗生素的分子,结果证明,对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌有抑制作用。Ferroni 等[9]利用 3D 打印技术将人体间充质干细胞嵌入甲基丙烯酸透明质酸伤口敷料中,可加速糖尿病溃疡的伤口修复,促进血管生成和神经支配。3D 打印技术解决了传统伤口敷料低氧渗透性、非仿生性及药物装载量不足的问题,制备时通过调控材料结构与功能,实现敷料功能精准化及生物活性物质(如抗生素、细胞因子、纳米颗粒)的可控释放[10]。此外,3D 打印制备的功能性敷料还可减少更换频率,节约人力物力,成为糖尿病足创面治疗的解决方案。

2.2 3D 打印技术在组织构建中的应用

皮肤是可在身体与外部环境之间提供屏障的器官,3D 打印技术的皮肤移植物能够定制大小及形状,以适合患者独特的伤口。Zhou 等[11]采用仿生生物墨水结合 3D 打印技术制备出功能性活体皮肤,模仿皮肤生理结构促进再生和新生血管形成,其力学性能和生物黏附特性强,能稳定贴附伤口创面。骨折或骨缺损部位的微血管再生对于骨再生和重塑过程至关重要。Wang 等[12]研制出新型 3D 打印复合支架用于糖尿病骨缺损修复,研究证实,该支架促进了糖尿病骨缺损的组织填充和骨血管再生,为成骨和血管生成提供适宜的微环境。尽管 3D 打印技术在糖尿病足组织构建中取得了技术性突破,但大部分还在小样本试验阶段,临床验证不足,需要长期随访,但仍为糖尿病足创面的修复提供了新的思路和研究方向。

2.3 3D 打印技术在足部及伤口监测中的应用

糖尿病患者居家自我护理时常面临足部评估困难,导致病情延误,错过最佳治疗时机,实时监测足部情况对预防足部溃疡、评估治疗效果及愈合情况具有重要意义[13]。Beach 等[14]研发了个性化 3D 打印可穿戴传感器鞋垫,用于连续监测足底温度变化,该研究发现糖尿病患者足部特定区域温度上升更快,提示未来应深入研究糖尿病患者足部温度动态变化,尤其是温度上升时间与足部溃疡发展的风险的关联。Liu 等[15]团队采用 3D 打印技术负压智能贴片实现伤口 pH 值和葡萄糖浓度的无线监测,为伤口管理提供了便捷且有效的工具。Feng 等[16]通过 3D 打印技术制备了双层水凝胶敷料,兼具监测与治疗功能,可精准感应伤口温度并传输至智能设备,实现动态伤口愈合监测,尤其适用于感染性创面。未来可开发基于 3D 打印技术多参数监测功能的柔性可穿戴设备,实现压力、温度、湿度和炎症指标等同步采集;推动 3D 打印穿戴设备与物联网技术整合,建立实时的远程监测与预警系统,优化糖尿病足的居家管理。

2.4 3D 打印技术在足部矫形器具中的应用

常见的足部畸形包括趾间关节畸形、跖趾关节畸形和扁平足等,足部畸形、神经病变和创伤三者相互作用并导致足部溃疡,且增加溃疡复发的概率,应早期对足部畸形进行管理[17]。Yildiz 等[18]利用 3D 打印技术开发出硅胶矫形鞋垫,采用美国骨科足踝协会评分及足部健康问卷进行追踪随访,结果显示患者功能改善显著。Bari 等[19]将 3D 打印的足部矫形器用于扁平足,4 周内有效减轻了疼痛,提高了患者舒适度和满意度。Cheng 等[20]将 3D 打印定制足弓支撑鞋垫应用于扁平足患者,结果发现,内侧中足区域峰值压力显著增加,后足区域峰值压力显著降低,但对后足外翻和前足外展的作用不显著。一项系统评价发现,3D 打印技术的踝足矫形器具在生物

力学效应、机械性能与传统踝足矫形器具相当,在硬度、重量、舒适度及治疗依从性方面弥补了传统足部矫形器的缺陷[21]。由此可见,3D打印技术根据人体的解剖结构或病理特征定制足部矫形器,其贴合度高,可按需调整硬度、弯曲度等参数,外观良好,可显著提升患者的体验感及满意度,能够真正实现“以患者为中心”的精准医疗。

2.5 3D打印技术在减压鞋垫中的应用

异常足底压力与糖尿病足发生发展密切相关,减压技术对预防及治愈糖尿病足溃疡至关重要,其中减压鞋垫是常用减压技术之一[1]。陈薇薇等[22]基于足部CT三维扫描与步态分析数据,应用3D打印技术制作糖尿病足减压鞋垫,结果显示,治疗组足部动脉收缩期峰值血流速度和足底压力分布两项指标均较治疗前显著改善,且足部溃疡发生率显著降低。朱思尧等[23]针对传统糖尿病鞋垫制备依赖CT图像且耗时的问题,采用个性化足部缩放建模结合足底压力数据设计区域模量,结果发现,相较于普通鞋垫,3D打印制成的梯度模量鞋垫使足底峰值压力显著下降约20%。糖尿病周围神经病变患者因足部保护性感觉功能受损,导致糖尿病足溃疡的发生风险显著升高[24,25]。Malki等[26]针对该类患者开发出个性化算法的3D打印摇杆中底和自调节鞋垫,其中鞋垫的六边形元件根据足部压力可以随时调整高度,将足趾、前足中央及外侧区域均实现峰值压力降低到200 kPa以下。综上,3D打印技术的减压鞋垫充分满足其生物力学需求,克服传统鞋垫局限性,实现有效减压。此外,理想的减压鞋垫材料需兼具缓冲性、弹性、耐久性,针对糖尿病患者足部易感染、敏感的特点,还需考虑透气性与抗菌性,以满足糖尿病足的需求。

3 3D打印技术在糖尿病足患者应用中存在的问题与展望

3D打印技术作为个性化精准技术,展现独特优势的同时,亦存在未解决的问题。(1)标准化与监管滞后,3D打印技术在医疗领域的应用以安全有效为首,国家需要制定监管标准,生产符合标准、质量可靠的3D打印技术医疗产品,共同推动3D打印技术在医疗领域的标准化发展[4,27]。(2)医保覆盖不足致患者接受度差异大,限制临床应用。未来需合理设定3D打印医疗产品报销比例,建立定价与补贴机制,提升患者接受度并使其受益。(3)尽管3D打印技术能实现自动化高效生产,但其设备及后期维护复杂、高性能材料昂贵,且医疗应用要求兼具技术专长与临床经验的复合型人才,可能阻碍其在基层医疗机构应用。未来国家应政策扶持增材制造产业,研发便携、经济、易操作的3D打印设备,并培养复合型医疗人才。同时,加强内分泌、药学、创面修复等多学科协作,与计算机工程、生物力学、材料学等开展跨领域合作,共同推进3D打印技术在糖尿病足等领域的临床应用。

综上,随着全球糖尿病发病率的上升,有效管理策略对预防糖尿病足及降低相关残疾、致死风险至关重要。3D打印技术凭借其优势,为糖尿病足预防与治疗提供了新的视角,随着人工智能、材料科学的进步及学科之间的深度融合,3D打印技术在糖尿病足中的应用前景将更加广阔。

【参考文献】

[1] Bus SA, Armstrong DG, Crews RT, *et al*. Guidelines on offloading foot ulcers in persons with diabetes (IWGDF 2023 update)[J]. Diabetes Metab Res Rev, 2024, 40(3): e3647. DOI: 10.1002/dmrr.3647.

[2] Derby B. Printing and prototyping of tissues and scaffolds[J]. Science, 2012, 338(6109): 921-926. DOI: 10.1126/science.1226340.

[3] Memic A, Navaei A, Mirani B, *et al*. Bioprinting technologies for disease modeling[J]. Biotechnology Letters, 2017, 39(9): 1279-1290. DOI: 10.1007/s10529-017-2360-z.

[4] 工业和信息化部, 国家发展和改革委员会, 财政部. 国家增材制造产业发展推进计划(2015-2016年): 工信部联装〔2015〕53号[EB/OL]. [2025-05-24]. https://www.cac.gov.cn/2015-03/02/c_1114491348.htm

[5] 王梦颖, 张诚. 数字技术、产业关联与服务出口技术升级——基于3D打印技术的证据与解释[J]. 中国科技论坛, 2023(11): 78-86. DOI: 10.13580/j.cnki.fstc.2023.11.009.

[6] 国家发展和改革委员会. 产业结构调整指导目录(2024年本)[EB/OL]. [2025-05-25]. https://www.gov.cn/zhengce/202401/content_6924187.htm.

[7] Huang Q, Wu T, Guo Y, *et al*. Platelet-rich plasma-loaded bioactive chitosan@sodium alginate@gelatin shell-core fibrous hydrogels with enhanced sustained release of growth factors for diabetic foot ulcer healing[J]. Int J Biol Macromol, 2023, 234: 123722. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.123722.

[8] Fratini C, Weaver E, Moroni S, *et al*. Combining microfluidics and coaxial 3D-bioprinting for the manufacturing of diabetic wound healing dressings[J]. Biomater Adv, 2023, 153: 213557. DOI: 10.1016/j.bioadv.2023.213557.

[9] Ferroni L, D'Amora U, Gardin C, *et al*. Stem cell-derived small extracellular vesicles embedded into methacrylated hyaluronic acid

wound dressings accelerate wound repair in a pressure model of diabetic ulcer[J]. J Nanobiotechnology, 2023, 21(1): 469. DOI: 10.1186/s12951-023-02202-9.

[10] Kondej K, Zawrzykraj M, Czerwiec K, *et al*. Bioengineering skin substitutes for wound management — Perspectives and challenges[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(7): 3702. DOI: 10.3390/ijms25073702.

[11] Zhou F, Hong Y, Liang R, *et al*. Rapid printing of bio-inspired 3D tissue constructs for skin regeneration[J]. Biomaterials, 2020, 258:120287. DOI:10.1016/j.biomaterials.2020.120287.

[12] Wang J, Xia Y, Hao Z, *et al*. A Triple-Integrated 3D-printed composite scaffold of high-activity peptide-metal ion-bone cement facilitates osteo-vascular regenerative repair of diabetic bone defects[J]. Adv Funct Mater, 2025, 25: 2422950. DOI: 10.1002/adfm.202422950.

[13] Chen H, Xi Y. Delayed treatment of diabetic foot ulcer in patients with type 2 diabetes and its prediction model[J]. World J Diabetes, 2024,15(10): 2070-2080. DOI: 10.4239/wjd.v15.i10.2070.

[14] Beach C, Cooper G, Weightman A, *et al*. Monitoring of dynamic plantar foot temperatures in diabetes with personalised 3D-printed wearables[J]. Sensors, 2021, 21(5): 1717. DOI: 10.3390/s21051717.

[15] Liu X, Zhao P, Wu X, *et al*. Negative pressure smart patch to sense and heal the wound[J]. Adv Sci (Weinh), 2025, 12(3): e2408077. DOI:10.1002/advs.202408077.

[16] Feng L, Peng Q, Miao L, *et al*. "Monitor-and-treat" that integrates bacterio-therapeutics and bio-optics for infected wound management[J]. Bioact Mater, 2025, 48: 118-134. DOI: 10.1016/j.bioactmat.2025.02.001.

[17] Lin C, Tian J, Zhang Z, *et al*. Risk factors associated with the recurrence of diabetic foot ulcers: a meta-analysis[J]. PLoS One, 2025, 20(2): e318216. DOI: 10.1371/journal.pone.0318216. DOI: 10.1371/journal.pone.0318216.

[18] Yildiz K, Medetalibeyoglu F, Kaymaz I, *et al*. Triad of foot deformities and its conservative treatment: with a 3D customized insole[J]. Proc Inst Mech Eng H, 2021, 235(7): 780-791. DOI: 10.1177/09544119211006528.

[19] Bari AZ, Ahmed N, Farhan M, *et al*. Comparing prefabricated and 3D-printed foot orthoses for the management of flat foot condition: a randomized controlled trial[J]. Am J Phys Med Rehabil, 2025, 104(4): 298-304. DOI: 10.1097/PHM.0000000000002585.

[20] Cheng KW, Peng Y, Chen TL, *et al*. A three-dimensional printed foot orthosis for flexible flatfoot: an exploratory biomechanical study on arch support reinforcement and undercut[J]. Materials (Basel), 2021, 14(18): 5297. DOI: 10.3390/ma14185297.

[21] Pollen TN, Jor A, Munim F, *et al*. Effects of 3D-printed ankle-foot orthoses on gait: a systematic review[J]. Assist Technol, 2025, 37(4): 287-303. DOI: 10.1080/10400435.2024.2411563.

[22] 陈薇薇, 张国锋, 陈育宏, 等. 3D 打印减压鞋垫在糖尿病足防治中的临床应用[J]. 同济大学学报(医学版), 2018, 39(6): 76-81. DOI: 10.16118/j.1008-0392.2018.06.015.

[23] 朱思尧, 李涤尘, 汤磊, 等. 具有梯度模量的 3D 打印糖尿病鞋垫设计[J]. 医用生物力学, 2021, 36(1): 102-109. DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.01.017.

[24] Parveen K, Hussain MA, Anwar S, *et al*. Comprehensive review on diabetic foot ulcers and neuropathy: treatment, prevention and management[J]. World J Diabetes, 2025, 16(3): 100329. DOI: 10.4239/wjd.v16.i3.100329.

[25] 李小蕾, 王冰, 王芬. 老年糖尿病周围神经病变患者生活质量调查及其影响因素[J]. 中华老年多器官疾病杂志, 2024, 23(11): 850-854. DOI: 10.11915/j.issn.1671-5403.2024.11.186.

[26] Malki A, Baltasar BM, Dekker R, *et al*. Effects of individually optimized rocker midsoles and self-adjusting insoles on plantar pressure in persons with diabetes mellitus and loss of protective sensation[J]. Giat Posture, 2024, 112: 154-158. DOI: 101016/j.gaitpost.2024.05.011.

[27] 刘晓华, 田耘, 徐超楠, 等. 某医院 3D 打印定制式医疗器械管理实践探索[J]. 中华医院管理杂志, 2025, 41(3): 245-248. DOI: 10.3760/cma.j.cn111325-20240906-00735.

(编辑: 龚志忠)