

生物医用材料激光制造技术研究进展

梅 涛¹, 姚燕生¹, 周瑞根¹, 葛张森¹, 张亦元², 张志宏³

(1. 安徽建筑大学 机械与电气工程学院, 安徽 合肥 230601;
2. 中国科学技术大学 工程科学学院, 安徽 合肥 230027;
3. 中国科学技术大学附属第一医院, 安徽 合肥 230001)

摘 要: 随着生物医学领域的发展和各种生物医用材料需求的增加, 快速制备高质量、高性能的生物医用材料成为科研界的关注点。激光制造技术制备生物医用材料具有设计灵活、结构定制和产品轻量等独特优势。本文系统总结了激光制造技术(激光快速成型、激光微焊接和激光表面改性)在生物医用材料方面的若干最新应用, 针对影响生物植入物材料的几个关键因素, 例如骨骼植入物的孔隙率、生物医用材料连接的牢固性与密封性和植入物表面的拓扑结构, 讨论了生物医用材料从长脉冲或短脉冲激光的快速成型与微焊接到超短脉冲激光的表面改性等技术, 最后对生物医用材料激光制造技术进行总结和展望。

关键词: 生物医用材料; 激光制造技术; 快速成型; 微焊接; 表面改性

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382(2022)04-079-06

Research Progress of Laser Fabrication Technology for Biomedical Materials

MEI Tao¹, YAO Yansheng¹, ZHOU Ruigen¹, GE Zhangsen¹, ZHANG Yiyuan²,
ZHANG Zhihong³

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;
2. School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;
3. The First Affiliated Hospital of University of Science and Technology of China, Hefei 230001, China)

Abstract: With the development of biomedical field and the increasing demand for various biomedical materials, the rapid preparation of high-quality and high-performance biomedical materials has become the concern of scientific researchers. The laser manufacturing technology for the preparation of biomedical materials has unique advantages such as flexible design, customized structure and lightweight. In this paper, the latest applications of laser manufacturing technologies (laser rapid prototyping, laser micro-welding and laser surface modification) for biomedical materials are summarized. Several key factors affecting bio-implant materials, such as the porosity of the bone implants, the robustness and sealing of biomedical material welding, and the topology of the implant surface are discussed, including rapid prototyping and micro-welding by long or short pulse laser and surface modification by ultrashort-pulse laser for biomedical materials. Finally, the laser manufacturing technology for biomedical materials is summarized and prospected.

Keywords: biomedical materials; laser manufacturing technology; rapid prototyping; micro welding; surface modification

收稿日期: 2021-09-17

基金项目: 安徽省自然科学基金面上项目(1908085ME130); 安徽省高校自然科学基金重点项目(KJ2019A0791)

作者简介: 梅涛(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 激光先进制造技术。

生物材料和仿生材料的开发通常需要先进的制造和加工技术,以得到复杂的材料结构和增强材料特性。随着人口老龄化与意外事故的增加,人们对个性化仿生人造骨、组织工程支架和植入式医疗器械等生物医用材料需求明显增多。20 世纪 90 年代激光制造技术直接成型复杂的高性能零件成为生物医用材料领域的研究热点^[1]。激光制造技术能够加工多种材料,主要包括金属、无机非金属、有机聚合物等粉末材料,为植入人体的生物材料提供了广泛的选择范围。

植入式生物电子设备需要与人体软组织紧密相连,以进行健康诊断和反馈治疗。而这些设备通常由外壳和微电子电路组成,密封性失效是最主要的故障之一。此外,电子设备的内外引线和其他各种医用材料也时常需要连接使用,这对医用材料的焊接质量提出了更高的要求。对于植入物来说,大多数合成材料不支持强健的成骨细胞活性,并且经常导致细胞分化差和骨形成受限,而材料的表面形态和特征会影响植入物在生物体内的生物学响应,甚至可以决定植入物的后期效果。因此,创建具有良好生物相容性的表面是作为植入物的关键^[2]。改变激光的照射参数,可以创建不同性质的表面,引起细胞的生物学行为变化,这对于细胞朝着目标方式进行生物学响应至关重要^[3]。

激光制造技术作为先进的制造加工技术,涉及多学科交叉融合,由于具有高度可控性、精准性和数据化等特点,推动了生物医用材料制造加工方法的改造升级。本文对激光制造技术在生物医用材料快速成型、微焊接和表面改性等方面的研究与应用进行综述,并对今后的发展前景做出展望。

1 生物医用材料激光快速成型

激光快速成型技术是结合制造高精度与高性能为一体,制造过程绿色环保的先进制造技术。与其他快速成型技术例如电子束增材制造^[4]、熔融层积成型^[5]、电弧增材制造^[6]等相比,其原理基本相同,即通过计算机建立模型,再由打印机将材料层层叠加,以制备零件。然而这些技术存在着热积累、制造精度较低、产生较强的 X 射线、降温时间长等各种缺点,影响制造工艺稳定性和材料成型效率。基于数字化的激光快速成型能够实现个性化的增

材制造和微观结构精准调控,制造具备良好生物力学相容性的复杂仿生结构植入物。在成型过程中,为防止出现较大的残余热应力、变形和微小裂纹等问题,需要选取合理范围的激光参数,从而获得良好性能的成型件。

人体骨骼由 50%~90% 孔隙率的内部松质骨和 5%~10% 孔隙率的外部皮质骨两个基本结构组成。其弹性模量约在 0.5~20 GPa 之间,与金属弹性模量相差甚大,会导致骨结合部位载荷失效与“应力屏蔽”现象。激光制造技术可以制造多孔连通微结构的骨骼植入物,同时提供骨细胞生长空间和营养物质、代谢废物的输送通道^[7]。Zhu 等^[8]利用选区激光熔化技术(Selective laser melting, SLM)制备了不同孔隙率的 Co-Cr 合金。大鼠的成纤维细胞(L929)和骨髓间充质干细胞(rBMSCs)在 SLM 成型的 Co-Cr 合金上均具有良好的细胞形态和迁移能力,60% 孔隙率的 Co-Cr 合金明显促进了成骨细胞的增殖和分化。

金属玻璃具备高强度、低弹性模量和良好的生物相容性,在生物医用材料领域表现出巨大应用潜力^[9]。Lu 等^[10]利用激光增材制造技术制备了一种梯度结构的锆基大块金属玻璃复合材料(Bulk metallic glass composites, BMGC)。制备的梯度结构 BMGC 能够将出色的屈服强度(>1.3 GPa)和拉伸延展性(约 13%)组合起来,这种高强度-延伸性协同作用的 BMGC 也为人体骨骼代替物奠定了理论基础。

在多材料增材制造过程中,配置不同比例的多种材料不仅可以改变孔隙率,还可以实现材料的性能组合,例如通过添加适当的生物活性剂成分,提高骨传导性和抗菌性等。图 1 展示了两种用于金属的多材料增材制造的工作方式^[11]。Sing 等^[12]利用 SLM 技术制备出每种元素含量为 50 wt% 的钛钽合金。研究发现:SLM 生产的钛钽合金在快速凝固后仅由 β 相组成,表现出高强度和较低的弹性模量,可以减轻“应力屏蔽”效应,但较大的 Ti 粉末粒子不会完全融化,导致其分散在由完全熔化的 Ti 和小尺寸 Ta 形成的基质中。多材料增材制造在不同的材料性质相差较大时存在一些难以解决的问题,还需要进一步研究。

陶瓷材料具有出色的生物活性,被广泛用于骨

组织再生^[13]。Safonov等^[14]利用激光立体光刻技术打印出具有复杂细胞微结构的氧化铝基陶瓷植入物样品,不同微结构和厚度的试样经单轴压缩测试表现出的载荷范围为93~817.5 N。Rau等^[15]通过Nd:YAG纳秒脉冲激光沉积法得到了致密无裂纹、更强的耐腐蚀性的玻璃陶瓷涂层。韩国研究团队Seung等^[16]利用纳秒激光开发了快速可控制备羟基磷灰石涂层的方法,如图2所示。基材表面沉积涂层的强度范围为31.7~47.2 N,并能够促进血清蛋白和成骨细胞的粘附,这些结果为骨结合部位植入物的表面处理提供了参考。

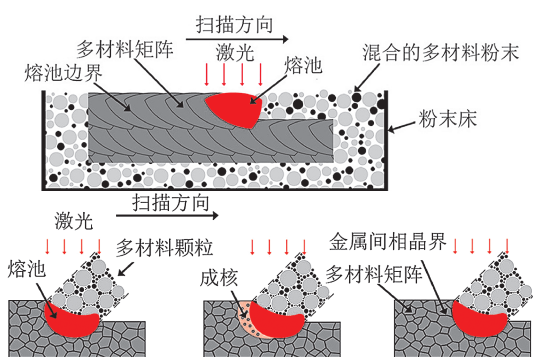


图1 用于金属的激光多材料增材制造技术^[14]

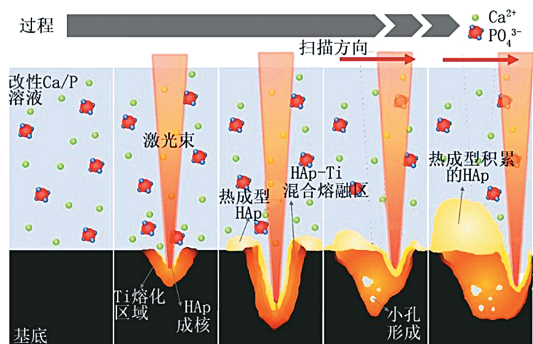


图2 激光快速诱导HAp涂层形成的过程示意图^[16]

激光快速成型技术在毫秒范围脉冲下加工金属粉末,可以制造出具有复杂多孔结构的植入物,不仅在形状大小上满足美学要求,也在舒适性方面具有重大进步。此外,利用激光立体光刻制备陶瓷植入物,以及利用纳秒脉冲激光沉积法来制备玻璃陶瓷涂层也取得了出色进展。通过结合医学成像技术与计算机软件设计特定的模型,能够让医务人员提前模拟手术过程,优化手术程序,及时发现问题,提高可靠性。然而定制植入物成本较高,目前临床应用较少,没有形成广泛的产业体系。生物材

料以及成型件内部结构设计还是影响植入物进一步发展的因素,其发展的难点在于如何确保材料长期在人体环境内的安全性、生物相容性、力学性能等。尽管如此,激光快速成型的生物医用材料仍然可以满足当前基本的使用需求。

2 生物医用材料激光微焊接

激光微焊接技术是以激光为热源进行微组装的技术。焊接金属材料时,聚焦的激光撞击金属基材的表面,激光束被金属表面部分吸收,通过热传导熔化基材,实现材料焊接,其余激光束被反射,吸收的激光能量有一部分以热损失消耗并在熔池附近形成热影响区^[17]。对于透明易碎材料,超短脉冲激光与透明材料相互作用具有热效应小及非线性多光子吸收的特点,不仅可以在透明材料表面上制取各种结构,还可以在内部进行微细加工^[18]。由于医用材料的特殊性及其细微化,对焊接质量提出了严格的要求,在考虑材料特性的同时,还要考虑材料的可焊性。焊接过程中材料的原有特性会受到热循环的影响,发生不同程度的变化,所以激光微焊接的研究主要集中在良好焊接质量的工艺参数及产生缺陷的控制措施等方面。

Ti合金具有良好的生物相容性,在植入物和医疗器械方面具有很大应用价值。Fan等^[19]比较了使用脉冲Nd:YAG激光器、连续二极管激光器和光纤激光器封装微型TC4薄片的焊接质量。结果表明:用脉冲Nd:YAG激光器的焊接质量最高。Baruah^[20]接着研究Nd:YAG脉冲激光参数对微焊接两片500 μm厚的TC4薄片的影响。研究发现:在激光扫描速度3~7 mm/s、峰值功率1~5 kW等适宜的工艺参数下,减少了氧化物的形成,可获得高质量的焊接接头。

形状记忆合金广泛应用于血管和腔内支架、心脏修补器、牙科正畸器等器件上。Dong等^[21]使用Nd:YAG脉冲激光微焊接NiTi形状记忆合金丝,研究发现:Ni元素饱和蒸气压水平高于Ti元素,大量Ni元素挥发使熔合区的成分发生变化,生成了脆性金属间化合物。焊缝组织中的金属间化合物会抑制马氏体形变,导致材料焊接区的自弹性恢复率降低^[22]。如何减少或消除脆性金属间化合物还需要进行研究。

玻璃为植入式生物传感器常用材料,传统的粘接方法容易降低其耐久性和成品率。Kim 等^[23]提出了一种基于超快激光微焊封装植入式血压传感器的新工艺。结果发现:脉冲能量为 4 μJ 、界面焦点位置为 -225 μm 、扫描速度为 20 mm/s 时,焊接区域均匀整齐,质量最佳。激光焊接的血压式传感器最大内部压力可高达 1.4 MPa,整个焊接过程最多仅需 40 s,提高了玻璃键合效率。

微型化、高性能是现代医用植入器械的发展方向,选择合适的焊接工艺连接这些材料、获得期望的焊接质量至关重要。激光微焊接医用金属材料时,利用毫秒脉冲激光,在合适的热量输入、扫描速度、重复频率等工艺参数下,确保焊接的稳定性,降低变形度,从而获得表面光滑、强度大的焊接件。但激光微焊接异种材料时,需要衡量焊接材料的组合,因为热性能差异较大的材料组合容易出现气孔、裂纹和脆性金属化合物等缺陷。使用皮秒或飞秒超快激光可发射透明材料吸收带的波长,在非线吸收过程下,材料的加工局限于聚焦点体积内,能够在低热应力下精确加工。但对于一些高度热敏感的材料,会导致激光工艺窗口较小,熔池体积受限,焊接条件苛刻。因此,还需要充分认识激光与材料的相互作用和连接机理,开发新的焊接工艺,从而制备可靠性高的焊接件。

3 生物医用材料激光表面改性

细胞与生物材料表面的相互吸附方式主要包括:利用溶液中的蛋白质吸附、细胞介导蛋白的合成与沉积、在生物材料表面构建生物粘附模体,与细胞表面的整合素相互关联,完成吸附并为后续反应做准备,如图 3 所示^[24]。由于细胞与材料表面的相互作用和材料的物理化学性质(如润湿性、粗糙度、表面能量等)有直接关系^[3,25],所以改变材料的表面性质可以调控细胞的生物学行为。传统的植入物表面改性方法存在加工效率低、结构精度差、容易引入杂质影响骨整合等缺点。超短脉冲激光与材料作用时间极短,具有峰值极高、损伤阈值较小、聚焦能量高等特点,能够在材料表面加工出不同形貌结构,因而成为生物医用材料表面改性的有效工具^[26]。通过物质的自组织或者对样品进行连续烧蚀的微加工能够获得高纯度的微/纳米尺

度结构,不仅赋予了材料表面特殊的功能,还有效避免了潜在的污染^[27]。

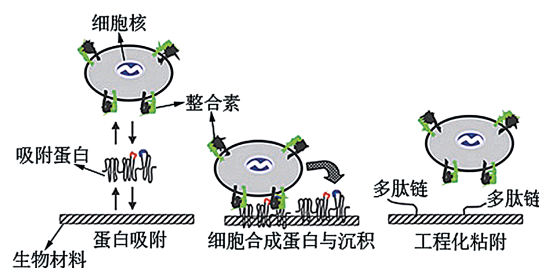


图 3 控制细胞与合成材料粘附的机制^[24]

Ti 合金作为骨科和牙科植入物发挥着重要作用,对 Ti 材料的表面改性受到广泛关注。Yu 等^[28]利用皮秒激光在 TC4 钛合金种植体样品表面制备出微沟槽阵列,细胞实验结果表明:微沟槽促进了细胞粘附和增殖,而微沟槽深度的增加增强了细胞的粘附和增殖。为了进一步研究钛合金表面其他地形结构对细胞的影响,Schnell 等^[29]采用飞秒光纤激光器照射 TC4 表面,结果显示:柱状微结构抑制了人成骨肉瘤 MG-63 细胞的粘附、生长和扩散,而在纳米结构和正弦微结构表面上得到明显改善。Li 等^[30]利用微秒激光直写和飞秒激光诱导在 TC4 表面制备了微/纳米复合结构。培养检测 MC3T3-E1 细胞,结果表明:微六角形通道促进了细胞的聚集、粘附、生长和增殖,而微结构和纳米波纹的组合进一步增强了成骨细胞的粘附和增殖能力。此外,还发现 MC3T3-E1 细胞以片状脂蛋白和丝状伪足粘附在纳米波纹上,大多数细胞定向在 -45° 至 45° 之间,如图 4 所示。

Oberringer 等^[31]利用飞秒激光在 316LS 不锈钢表面制备出不同密度的点阵微结构。在表面培养人微血管内皮细胞和人成纤维细胞,结果显示:所有点阵微结构几乎同等程度抑制了成纤维细胞的增殖,内皮细胞的增殖没有受到负面影响。Shaikh 等^[32]利用飞秒激光处理 45S5 生物活性玻璃(BG)的表面,培养检测金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌、大肠杆菌以及人类 INT407 细胞。结果显示:少数金黄色葡萄球菌粘附在激光处理区域,其他细菌在激光处理区域都受到抑制,INT407 细胞在激光处理 BG 上的生长和粘附没有受到影响。超快激光制备的表面特征结构能够抑制目标细胞的生物学行为和多种有害细菌的存活。

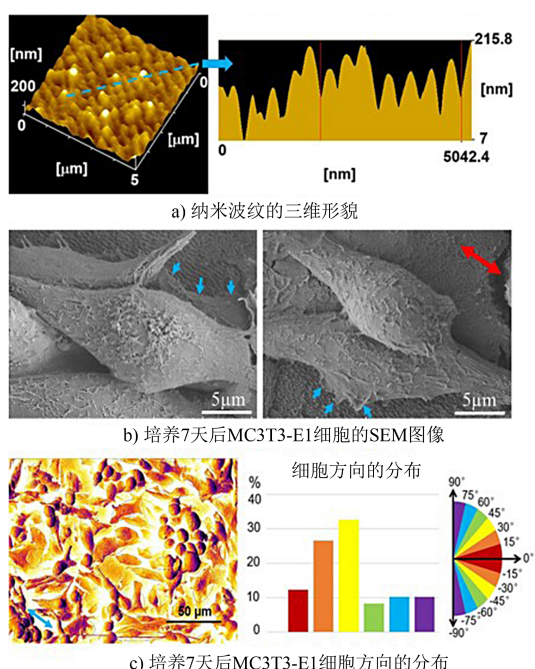


图4 激光处理后Ti-6Al-4V表面的结构和细胞培养结果^[30]

晶硅片广泛应用于医疗器械中,Yiannakou等^[33]采用脉宽150 fs、波长800 nm、1 kHz频率的钛宝石飞秒激光照射单晶硅片表面。激光能量由低到高,所得表面由周期性的纳米级波纹变为随着高度增加的准周期性微沟槽,微槽高度从 $2.42 \pm 1.07 \mu\text{m}$ 升至 $10.98 \pm 1.52 \mu\text{m}$ 。培养神经胶质SW10细胞的结果显示:在低激光能量照射硅片的纳米结构上,细胞受到排斥,生长受到抑制,而高激光能量照射硅片产生的微/纳米复合结构为细胞提供有利的生存地形,明显改善细胞生长与粘附情况。

芳香族聚合物是脊柱植入物以及整形外科手术的生物材料,表面纳米结构也有利于提高聚合物传感器灵敏度^[34]。Wu等^[35]用氮化硅微粒与聚醚酮酮混合制备了具有生物活性的复合材料植入物,随后用脉宽120 fs、功率20 mw、扫描速度800 $\mu\text{m/s}$ 的飞秒激光修饰复合材料表面,生成了微/纳米结构。研究表明:微/纳米结构的存在增强了表面的亲水性、蛋白质吸附、rBMSCs细胞的光密度和碱性磷酸酶活性,表明了微/纳米结构显著促进了rBMSCs细胞的增殖和成骨分化。

超快激光能够加工几乎所有类型的材料,对生物医用材料表面改性具有独特优点。在组织工程领域,利用超快激光在生物医用材料表面创建特殊的形貌结构,能够促进或抑制某种细胞的生物学行

为。微/纳复合结构通常有利于细胞生物响应,而单一的微米或纳米结构在不同材料和不同表面地形结构下也会抑制细胞生物学行为。由于细胞的种类繁多,激光又能在各种生物材料表面制备出形态迥异的微/纳结构,所以,各种生物材料表面形貌和微/纳结构对不同细胞生物学行为的影响还需要更多基础性研究,探索细胞生物学行为的规律与控制方法。

4 总结与展望

激光制造技术打破了传统制造工艺束缚,激光快速成型的多孔隙结构植入物能够在保持高强度的前提下降低弹性模量,减少“应力屏蔽”效应。脉冲激光沉积具有生物活性的玻璃陶瓷涂层为细胞提供了适宜的微环境。激光能够在较小的热影响区下对各种生物医用材料焊接和封装,提高了微型精密材料应用的灵活性,而在焊接过程中如何减少或消除脆性金属间化合物、实现残余应力的最小化等问题还需要进一步的研究。利用超快激光在生物材料表面制备微/纳结构,改善材料表面物理化学性质,有效提高了材料表面的生物相容性。然而,超快激光表面改性创建的拓扑结构与细胞的作用机理还缺少完整解释,有待深入研究。

目前的激光制造技术虽然能够直接制造并进一步处理生物材料,但是在生物医学领域的发展还不够成熟,个性化的植入物也没有得到规模化的应用。下一步可以通过升级激光制造技术的设备和工艺,实现高效、智能、绿色的生产模式,并开发复合粉末材料,对不同材料的力学性能和生物活性进行有机结合。利用有限元软件对焊接温度场与应力场进行模拟仿真,优化激光参数,减少缺陷产生。为满足微机电系统元件和材料功能表面发展的需要,超快激光提供的微纳制造将是未来的研发重点。与此同时,还要探索降低生产成本、建立行业标准、完善性能评价体系等,以在生物医学领域争取更大的发展空间。

参考文献:

- [1] 黄卫东,吕晓卫,林鑫.激光成形制备生物医用材料研究现状与发展趋势[J].中国材料进展,2011,30(4): 1-10,29.

- [2] Ribeiro A A, Vaz L G, Guastaldi A C, et al. Adhesion strength characterization of PVDF/HA coating on cp Ti surface modified by laser beam irradiation[J]. Applied Surface Science, 2012, 258 (24) : 10110–10114.
- [3] Mariscal-Muñoz E, Costa C A S, Tavares H S, et al. Osteoblast differentiation is enhanced by a nano-to-micro hybrid titanium surface created by Yb:YAG laser irradiation[J]. Clinical Oral Investigations, 2016, 20 (3) : 503–511.
- [4] Wei D X, Koizumi Y, Chiba A, et al. Heterogeneous microstructures and corrosion resistance of biomedical Co–Cr–Mo alloy fabricated by electron beam melting (EBM) [J]. Additive Manufacturing, 2018, 24: 103–114.
- [5] Zhang C G, Wang L, Kang J F, et al. Bionic design and verification of 3D printed PEEK costal cartilage prosthesis[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2020, 103: 103561.
- [6] Wu B T, Ding D H, Pan Z X, et al. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 250: 304–312.
- [7] 尹滨兆, 秦瑜, 温鹏, 等. 激光粉末床熔融制备金属骨植入物 [J]. 中国激光, 2020, 47 (11) : 8–25.
- [8] Zhu M, Lu Y J, Tang H, et al. In vitro study on the suitable porosity of co–Cr alloys manufactured by selective laser melting for promoting osteogenesis[J]. Science of Advanced Materials, 2019, 11 (10) : 1402–1410.
- [9] 姚燕生, 葛张森, 陈庆波, 等. 医用钴基块体非晶合金飞秒激光加工表面特性研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57 (11) : 130–136.
- [10] Lu Y Z, Su S, Zhang S B, et al. Controllable additive manufacturing of gradient bulk metallic glass composite with high strength and tensile ductility[J]. Acta Materialia, 2021, 206: 116632.
- [11] Putra N E, Mirzaali M J, Apachitei I, et al. Multi-material additive manufacturing technologies for Ti-, Mg-, and Fe-based biomaterials for bone substitution[J]. Acta Biomaterialia, 2020, 109: 1–20.
- [12] Sing S L, Yeong W Y, Wiria F E. Selective laser melting of titanium alloy with 50 wt% tantalum: Microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 660: 461–470.
- [13] Haider A, Haider S, Han S S, et al. Recent advances in the synthesis, functionalization and biomedical applications of hydroxyapatite: a review[J]. RSC Advances, 2017, 7 (13) : 7442–7458.
- [14] Safonov A, Maltsev E, Chugunov S, et al. Design and fabrication of complex-shaped ceramic bone implants via 3D printing based on laser stereolithography[J]. Applied Sciences, 2020, 10 (20) : 7138.
- [15] Rau J V, Antoniac I, Fosca M, et al. Glass–ceramic coated Mg–Ca alloys for biomedical implant applications[J]. Materials Science and Engineering: C, 2016, 64: 362–369.
- [16] Um S H, Chung Y W, Seo Y, et al. Robust hydroxyapatite coating by laser-induced hydrothermal synthesis[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30 (48) : 2005233.
- [17] Xie J. Laser hermetic welding of implantable medical devices[M]//Joining and Assembly of Medical Materials and Devices. Amsterdam: Elsevier, 2013: 211–235.
- [18] Yu Y C, Bai S, Wang S T, et al. Ultra-short pulsed laser manufacturing and surface processing of microdevices[J]. Engineering, 2018, 4 (6) : 779–786.
- [19] Fan Y, Chen Z, Zhang C H, et al. A comparison of microstructure and mechanical properties of welded thin Ti6Al4V with three different types of laser[J]. Materials Research Innovations, 2015, 19 (sup4) : S187–S192.
- [20] Baruah M, Bag S. Influence of pulsation in thermo-mechanical analysis on laser micro-welding of Ti6Al4V alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 90: 40–51.
- [21] Dong P, Li H M, Wang W X, et al. Microstructural characterization of laser micro-welded Nitinol wires[J]. Materials Characterization, 2018, 135: 40–45.
- [22] 郭志宏, 姚润华, 胡永金. 医用 NiTi 合金在激光微连接下的微观组织和力学行为 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (9) : 11–14, 10.
- [23] Kim S, Park J, So S, et al. Characteristics of an implantable blood pressure sensor packaged by ultrafast laser microwelding[J]. Sensors, 2019, 19 (8) : 1801.
- [24] García A J, Reyes C D. Bio-adhesive surfaces to promote osteoblast differentiation and bone formation[J]. Journal of Dental Research, 2005, 84 (5) : 407–413.
- [25] Khalili E, Sarafbidabad M. Combination of laser patterning and nano PTFE sputtering for the creation a super-hydrophobic surface on 304 stainless steel in medical applications[J]. Surfaces and Interfaces, 2017, 8: 219–224.
- [26] Sugioka K, Cheng Y. Ultrafast lasers—reliable tools for advanced materials processing[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3 (4) : e149.
- [27] Hairaye C, Mermet F, Engel T, et al. Functionalization of surfaces by ultrafast laser micro/nano structuring[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 558: 012063.

水平较低,对于智慧城市的规划较少,相对来说评价指标较少。此外,智慧城建评价体系不仅应根据本地经济发展、建设水平的提高进行修改,更应根据宏观行业发展规划的变化进行适当调整,以满足不断变化的实际需求,如城市住建行业已经与城市发展、居民日常生活密不可分,建筑节能也已经成为安徽省必不可少的节能政策之一。因此,合肥、省辖市及区县均涉及相关的智慧城市评价指标。各地根据智慧城建评价指标体系对智慧城建的发展建设情况进行考核,以达到促进行业发展,提高行业竞争力,带动本地相关产业以及经济总体的发展,更好地为建设智慧城市,提升居民幸福感,促进城市和谐、健康发展服务。

参考文献:

- [1] 李德仁,姚远,邵振峰.智慧城市的概念、支撑技术及应用[J].工程研究-跨学科视野中的工程,2012,4(4):313-323.
- [2] Gil-Garcia J R, Pardo T A, Nam T. What makes a city smart? Identifying core components and proposing an integrative and comprehensive conceptualization[J]. Information Polity, 2015, 20(1):61-87.
- [3] Khatoun R, Zeadally S. Smart cities[J]. Communications of the ACM, 2016, 59(8):46-57.
- [4] Meijer A, Bolívar M P R. Governing the smart city: a review of the literature on smart urban governance[J]. International Review of Administrative Sciences, 2016, 82(2):392-408.
- [5] 马惠雯.大数据背景下智慧城市建设创新路径[J].中小企业管理与科技(中旬刊),2021(11):46-48.
- [6] 王朝南.智慧城市建设绩效评价指标体系构建及实证研究[D].湘潭:湘潭大学,2019.
- [7] 安永文.张掖市智慧城市建设研究[D].武汉:湖北工业大学,2018.
- [8] 中国智慧城市建设行业现状研究分析及市场前景预测报告(2016年)[R].北京:中国产业调研网,2016.
- [9] 陈铭,王乾晨,张晓海,等.“智慧城市”评价指标体系研究——以“智慧南京”建设为例[J].城市发展研究,2011,18(5):84-89.
- [10] 陈桂龙.智慧城市2.0的“浦东模式”[J].中国建设信息,2015(13):34-36.
- [11] 王思雪,郑磊.国内外智慧城市评价指标体系比较[J].电子政务,2013(1):92-100.
- [12] 常文辉.智慧城市评价指标体系构建研究[D].开封:河南大学,2014.
- [13] 单志广.国家新型智慧城市评价数据分析报告[R].沈阳:国家信息中心,2017.
- [14] 丁国胜,宋彦.智慧城市与“智慧规划”——智慧城市视野下城乡规划展开研究的概念框架与关键领域探讨[J].城市发展研究,2013,21(8):34-39.
- [15] 郭素娴.智慧城市评价指标体系的构建及应用[D].杭州:浙江工商大学,2013.
- [16] 安徽省统计局.安徽统计年鉴(2018 汉英对照附光盘)[M].北京:中国统计出版社,2018.
- [28] Yu Z, Hu J. Microstructure and characteristic of biomedical titanium alloy based on picosecond laser micromachining[J]. Materials Science Forum, 2018, 939:104-109.
- [29] Schnell G, Staehlke S, Duenow U, et al. Femtosecond laser nano/micro textured Ti6Al4V surfaces—effect on wetting and MG-63 cell adhesion[J]. Materials, 2019, 12(13):2210.
- [30] Li C, Yang Y, Yang L J, et al. In vitro bioactivity and biocompatibility of bio-inspired Ti-6Al-4V alloy surfaces modified by combined laser micro/nano structuring[J]. Molecules, 2020, 25(7):1494.
- [31] Oberringer M, Akman E, Lee J, et al. Reduced myofibroblast differentiation on femtosecond laser treated 316LS stainless steel[J]. Materials Science and Engineering: C, 2013, 33(2):901-908.
- [32] Shaikh S, Singh D, Subramanian M, et al. Femtosecond laser induced surface modification for prevention of bacterial adhesion on 45S5 bioactive glass[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2018, 482:63-72.
- [33] Yiannakou C, Simitzi C, Manousaki A, et al. Cell patterning via laser micro/nano structured silicon surfaces[J]. Biofabrication, 2017, 9(2):025024.
- [34] Michaljaníčová I, Slepíčka P, Rimpelová S, et al. Regular pattern formation on surface of aromatic polymers and its cytocompatibility[J]. Applied Surface Science, 2016, 370:131-141.
- [35] Wu H, Liu T, Xu Z Y, et al. Enhanced bacteriostatic activity, osteogenesis and osseointegration of silicon nitride/polyetherketoneketone composites with femtosecond laser induced micro/nano structural surface[J]. Applied Materials Today, 2020, 18:100523.

(上接第 84 页)