**2.4.2 激光加工**

激光技术推动了众多领域的迅速发展，应用范围越来越广，其中激光加工技术是最具有代表性、用途最广的激光应用技术。激光加工是指将激光聚焦到微小的空间，利用其高密度的能量进行非接触、高精度加工的方法。激光加工的自动化程度高，生产效率高，产品质量稳定可靠，且制造过程中清洁无污染，环保指标高，是建设资源节约型、环境友好型社会所应提倡的一种先进制造技术，被公认为是21世纪先进制造技术的代表性加工手段[1]。激光加工可解决传统加工方法难以实现的难题，非常适合于航空航天、军工国防等领域中具有重大需求的难加工、高精尖零件的制造，同时也广泛应用于汽车、电子、机械制造、冶金等重要国民经济领域。

由于激光加工的能量来源于光，其在加工方式和加工机理方面与其他加工方法具有明显的区别。相对于其他加工技术，激光加工具有独特的优势：

（1）可加工材料范围广。聚焦的激光光斑尺寸微小，能量密度极高，因此可以加工高熔点、高强度的合金材料，也可以加工陶瓷、金刚石、玻璃（石英）等硬脆性材料以及其他一些常规制造技术难以加工的材料；

（2）非接触加工。加工速度快，可控性好，无噪声，对工件无直接冲击，因此无机械变形，能够对塑性材料、薄壁工件等进行高精度的加工，并且激光束的能量及其移动速度均可调，因此可以实现多种制造工艺和加工目的；

（3）加工灵活、适应性强。激光束易于导向、聚焦，可通过调整光路系统实现激光作用方向和位置的改变，极易与数控系统配合，对复杂形状的工件进行加工，因此激光加工是一种极为灵活的加工方法；

（4）加工的热影响区小。激光加工过程中，激光束能量密度高，加工速度快，并且是局部加工，对非激光照射部位没有或影响极小，因此，其热影响区小，工件热变形小，后续加工量小；

（5）可实现精密加工。激光束焦点光斑直径很小，且激光能量遵循高斯分布，可通过调节焦斑尺寸、激光能量等手段实现高精度的选择性加工，激光加工在高精密的微纳制造领域起到越来越重要的作用；

（6）无需特殊的加工环境。相比于电子束和离子束加工，激光加工不需要严格的真空环境，其在大气环境下即可实现加工，且不易受电磁干扰。



图 1. 双光子聚合方法制备的纳米牛[6]

激光加工由于其突出的特点，在众多领域中都具有许多重要的实际应用，比如激光打孔、激光切割、激光焊接、激光强化和激光微纳加工等。激光打孔是最早被实际应用的激光加工技术，具有精度高、适应性强、效率高等优势，尤其适合加工高熔点、高硬度材料，利用空间整形的飞秒激光打孔已经可以实现1000：1超高深径比的高质量微孔[2]；激光切割是目前应用最为广泛的激光加工技术之一，具有精度高、切缝窄、非接触式加工、切割速度快、加工材料范围广等特点。激光切割不仅擅长复杂平面零件切割成形，目前在三维空间曲面切割方面也展现出其独特优势[3]，在航空航天、汽车、钣金加工、工程机械、医疗器械和石油化工等行业具有广阔的应用前景；激光焊接是激光加工技术的重要领域，与传统焊接技术相比，其独特优势是焊接变形小、焊接深度大、焊接速度快、焊接质量好、设备操控性好和无污染等。此外，由于激光焊接具有能量密度高的特点，对于高熔点、高反射率、高导热率和物理特性相差较大的金属焊接具有明显的技术优势[4]；激光强化是激光加工技术中的一个重要方向，是提高金属材料表面的机械性能、耐磨性、耐腐蚀性等表面性能的重要方法。其中激光冲击强化技术是目前最有效的金属材料表面强化工艺之一，尤其适用于加工壁薄且型面复杂的结构，已经成为航空发动机各关键零部件的必要加工手段[5]；激光微纳加工技术可以制备特定的微纳结构以及微纳器件，在表面与界面工程、微机械、微电子、微光学等领域具有极其重要的应用地位，例如通过双光子聚合的激光微纳加工方法可以在树脂材料上制造出空间分辨率高达120 nm的“纳米牛”[6]。激光加工已然成为加工制造业的重要制造技术手段，越来越能够体现一个国家在工业制造领域的加工水平。

随着激光技术和激光器的发展，超快激光加工技术迅速应用于先进微纳制造和其他现代制造领域。超快激光由于具有超短脉宽和超高瞬时能量密度的明显突出特点，具有许多明显的优势，包括热影响区小，空间分辨率高、非接触式制造等，并且超快激光可以加工几乎所有已知材料[7]。超快激光的特性使激光加工的精度显著提高，使纳米尺度的微机械、微电子元件成为可能，从而带来了激光加工领域的革命性进步。

**参考文献**

1. 虞钢，虞和济. 激光制造工艺力学[M]. 北京：国防工业出版社, 2012.
2. Q. Xie, X.W. Li, L. Jiang, B. Xia, X.L. Yan, W.W. Zhao, and Y.F. Lu. High-Aspect-Ratio, High-Quality Microdrilling by Electron Density Control Using a Femtosecond Laser Bessel Beam[J]. Applied Physics A, 2016, 122, 136.
3. 朱有坤，黄木春，崔永忠，周罡. 基于Motoman机器人的激光三维切割技术[J]. 激光杂志, 2016 ,37(10): 39-41.
4. 谢冀江，郭劲，刘喜明等. 激光加工技术及其应用[M]. 北京：科学出版社, 2012.
5. 卢国鑫，金涛，周亦胄，赵吉宾，刘纪德，乔红超，孙晓峰. 激光冲击强化在高温合金材料应用上的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(09): 1755-1764.
6. S. Kawata, H. B.Sun, T. Tanaka, and K. Takada. Finer features for functional microdevices[J]. Nature, 2001, 412, 697–698.
7. L. Jiang, A. D. Wang, B. Li, T. H. Cui and Y. F. Lu. Electrons dynamics control by shaping femtosecond laser pulses in micro/nanofabrication: modeling, method, measurement and application. Light: Science & Applications, 2018, 7, 17134.