

激光加工技术在工业制造中的最新发展和未来趋势

顾波

玻色光子公司 北京 100081

摘要：激光技术彻底改变了工业制造，相较于传统工艺，在精度、效率和多功能性方面实现了质的飞跃。探讨了激光技术的最新进展，重点介绍了其在工业制造中的应用。深入研究了超快激光、增材制造、激光焊接、切割和表面处理等前沿发展。提供了来自汽车、航空航天、电子、医疗及农业等各个行业的真实案例，反映出激光技术的变革性影响。此外，还讨论了人工智能驱动的激光系统、绿色和蓝光激光，以及混合制造工艺等新兴趋势；展望了激光技术在工业制造中的未来，指出了潜在的挑战和机遇。

关键词：激光加工；激光焊接；激光增材制造；激光器；激光表面处理；激光混合制造工艺；激光清洗；激光辅助加工

The latest developments and future trends of laser processing technology in industrial manufacturing

GU Bo

BOS Photonics, Beijing 100081, China

Abstract: Laser technology has revolutionized industrial manufacturing, achieving a qualitative leap in precision, efficiency, and versatility compared to traditional processes. Explore the latest advancements in laser technology, focusing on its applications in industrial manufacturing. We delve into cutting-edge developments such as ultrafast lasers, additive manufacturing, laser welding, cutting, and surface treatment. Real-world examples from various industries, including automotive, aerospace, electronics, and medical devices, are provided to illustrate the transformative impact of laser technology. Furthermore, discuss emerging trends such as AI-driven laser systems, green lasers, and hybrid manufacturing processes. Conclude with an outlook on the future of laser technology in industrial manufacturing, highlighting potential challenges and opportunities.

Keywords: laser material processing; laser welding; laser additive manufacturing; laser; laser surface treatment; laser hybrid manufacturing process; laser cleaning; laser assisted processing

1 序言

激光技术已成为现代工业制造的基石，使曾经被认为不可能的工艺成为可能。自1960年发明激光以来，其应用已扩展到各个领域，这得益于激光源、光束传输系统和控制技术的不断进步。在工业

制造中，激光现在是切割、焊接、钻孔、打标和增材制造等应用中不可或缺的工具^[1]。

激光的独特性质——相干性、单色性和高强度，使其成为精密制造的理想工具。激光可以聚焦到极小的光斑尺寸，从而实现微米级的精度。此

外,激光加工的非接触性质可最大限度地减少机械应力和污染,使其适合完成精细和高精度的任务。

本文旨在全面概述激光技术的最新发展,特别关注其在工业制造中的应用,将探讨激光源、光束传输系统和过程控制方面的最新进展,以及对各种制造过程的影响。通过来自不同行业的真实案例,来反映激光技术应用的优势。另外,将讨论激光技术的新兴趋势和未来方向,深入了解未来的潜在挑战 and 机遇。

2 发展历程

激光加工技术的发展历程可以追溯到1960年,当梅曼发明了第一台红宝石激光器后,标志着量子光学从理论走向了技术工程。随后的几十年里,激光技术经历了从基础研究到工业应用的快速转变。1964年,帕特尔发明了第一台CO₂激光器;1965年,贝尔实验室发明了第一台YAG激光器。这些激光器的出现,为激光加工技术奠定了坚实的基础。

20世纪70年代初,YAG激光器开始作为微型件切割与焊接的重要光源,并逐步在生产中得到应用。随着激光器质量的不断提高和输出功率的大幅增加,激光加工技术逐渐普及并广泛应用于电子、钟表、集成电路等工业领域。80年代,CO₂激光器和YAG激光器的连续运行和脉冲运行方式得以实现,激光的模式也从多模输出发展到基模或接近基模输出,进一步推动了激光加工技术的普及与应用。

近年来,光纤激光器和超快激光器的发展为激光加工技术带来了新的突破。光纤激光器具有巨大的输出功率、良好的光束质量和转换效率,使激光材料加工更具吸引力。而超快激光器则实现了超微细(亚微米至纳米级)加工,并可在透明材料内部进行加工,为激光加工技术开辟了新的应用领域^[2]。

激光加工技术涉及多个关键技术,包括激光束的产生、传输、聚焦,以及与被加工材料的相互作用等。

(1) 激光器技术 激光器是激光加工技术的核心部件。目前,常用的激光器按激活介质的种类可以分为固体激光器和气体激光器。固体激光器(如YAG激光器、光纤激光器)具有结构紧凑、稳定性好、输出功率高等优点;气体激光器(如CO₂激光器)则具有波长长、易于聚焦、适用于厚材料加工

等特点。

(2) 光学系统 光学系统负责将激光器产生的激光束传输并聚焦到被加工材料上。这包括透镜、反射镜、光阑等光学元件的精确设计和组装。光学系统的性能直接影响激光加工的精度和效率。

(3) 控制系统 控制系统用于实现激光加工过程的自动化和精确控制。这包括激光器的开关控制、加工参数的设定和调整、加工过程的实时监测和反馈等。随着计算机技术和自动化技术的发展,激光加工控制系统的智能化水平不断提高。

(4) 辅助技术 激光加工过程中还需要一些辅助技术,如气体保护、冷却系统、废料收集等。这些辅助技术对于保证激光加工过程的稳定性和安全性至关重要。

总之,激光加工技术以其高精度、高效率、无污染等优点,在众多领域得到了广泛应用^[1, 2]。

3 激光技术的最新发展

3.1 超快激光器

超快激光器发射的脉冲范围为飞秒(10^{-15} s)至皮秒(10^{-12} s),已成为工业制造领域的变革者。这些激光器在极短的脉冲中提供极高的峰值功率,能够以最小的热影响区进行精确的材料加工。这使其非常适合需要高精度和最小热损伤的应用场景,例如微加工、表面结构化和医疗器械制造等^[3]。

(1) 微加工 超快激光器广泛应用于微加工,其中精度和最小热损伤至关重要。例如,在电子行业,超快激光器用于在直径小至10 μ m的印刷电路板(PCB)上钻微孔,可增加电路密度并提高电子设备的性能^[4, 5]。例如,三星采用飞秒激光切割技术,制造超高精度MicroLED芯片,提高了显示屏的亮度和耐用性;比亚迪动力电池生产采用超快激光焊接技术,使动力电池内部连接更加紧密,提高了充放电效率,同时避免了传统焊接工艺导致的微裂纹问题。

(2) 表面结构化 使用超快激光进行表面结构化是另一个备受关注的领域。通过精确控制激光参数,可以在材料表面创建微结构和纳米结构,从而增强其功能特性。例如,超快激光可在金属上创建超疏水表面,用于自清洁、防结冰和防腐涂层^[6]。

3.2 光纤激光器

光纤激光器因其高效率、高可靠性和紧凑的尺寸而在工业制造中得到广泛应用。这些激光器使用加入有Er（铒）、Yb（镱）或Tm（钬）等稀土元素的光纤作为增益介质，可实现高功率输出和出色的光束质量。

（1）高功率切割与焊接 光纤激光器广泛应用于高功率切割与焊接应用。例如，在汽车行业，光纤激光器用于以高精度和高速度切割与焊接高强度钢部件，可显著提高车辆的安全性和燃油效率。

（2）增材制造 光纤激光器还广泛用于增材制造工艺，如选区激光熔化（SLM）和直接金属沉积（DMD）。这些工艺涉及金属粉末的逐层沉积，采用高功率激光器使金属粉末熔化或熔合。光纤激光器提供必要的功率和光束质量，以实现具有复杂几何形状的致密、高强度金属部件^[7, 8]。

近年来，大面积3D打印（Area Printing）正在兴起，它或将改变传统的激光3D打印，进入低成本制造生产。

3.3 半导体激光器

半导体激光器，也称为二极管激光器，近年来取得了重大进展，特别是在功率输出和光束质量方面。这些激光器效率高、结构紧凑，适用于广泛的工业应用。

（1）激光熔覆和表面处理 半导体激光器通常用于激光熔覆和表面处理应用。激光熔覆涉及在基材上沉积保护涂层，以增强其耐磨性、耐腐蚀性或热性能。半导体激光器特别适合这种应用，因为其效率高，且能够在大面积上提供均匀的光束^[7]。

（2）激光退火 激光退火是半导体激光器的另一个重要应用，特别是在半导体行业。该过程涉及对材料进行局部加热以改变其晶体结构，从而改善其电气性能。半导体激光器用于硅晶片退火，从而能够生产高性能晶体管和其他电子元件。

3.4 CO₂ 激光器

CO₂激光器使用CO₂、N₂和He的混合气体作为增益介质，几十年来一直是工业制造的支柱。尽管近年来CO₂激光器在某种程度上被光纤和二极激光器所掩盖，但其在某些应用中仍然发挥着至关重要的作用，尤其是那些涉及非金属材料的应用。

（1）非金属材料的切割和雕刻 CO₂激光器广泛用于切割和雕刻非金属材料，如塑料、木材、玻璃和陶瓷。在包装行业，CO₂激光器用于在纸板和塑料包装材料上切割和雕刻复杂的图案。

（2）医疗应用 CO₂激光器还适于各种医疗应用，特别是在外科手术和皮肤病学中。在外科手术中，CO₂激光器用于精确的组织消融，对其周围组织的损伤最小。在皮肤科，CO₂激光器用于皮肤重修、疤痕去除，以及治疗疣和皮肤癌等疾病。

4 激光技术在工业制造中的应用

4.1 激光切割

激光切割是激光技术在工业制造中最广泛的应用之一。与传统切割方法相比，它具有多种优势，包括精度高、速度快以及切割复杂形状的能力。激光切割技术被广泛应用于汽车制造、航空航天、金属加工等行业。

高功率激光器切割在重工业的应用，如马士基船舶制造使用100kW光纤激光器进行厚钢板切割，替代传统等离子切割，可减少切割误差，提高焊接质量。

（1）汽车工业 在汽车工业中，激光切割用于生产从车身面板到发动机的各种部件。例如，光纤激光器用于高精度切割高强度钢部件，从而实现汽车的轻量化。激光切割的使用还减少了二次精加工操作的需求，从而节省了成本并提高了生产效率。

特斯拉的Model Y和Model 3生产线广泛应用激光切割技术，在车身钣金加工过程中，采用6kW光纤激光切割机，相较传统冲压工艺，激光切割减少了材料浪费，提高了切割精度，使车身结构更加轻量化。

（2）航空航天工业 航空航天工业也受益于激光切割技术，特别是在生产由钛和复合材料等先进材料制成的复杂部件方面。例如，超快激光可用于切割形状复杂的钛合金部件，同时最大程度地减少热损伤，确保部件的结构完整性，显著提高了航空航天部件的性能和安全性。

空客使用激光切割技术加工碳纤维复合材料（CFRP）机身结构，确保机身组件符合高强度和轻量化的要求。相比传统机械加工，激光切割避免了材料热损伤，提高了加工精度和生产效率。

4.2 激光焊接

激光焊接是激光技术在工业制造中的另一个关键应用。与传统焊接方法相比，它具有多种优势，包括精度高、热输入最小以及能够焊接不同材料。另外，需关注的一个趋势是，手携式激光焊接成为了快速成长的应用领域。

美国IPG光子公司的超高功率光纤激光器（100kW级别）已成功应用于船舶制造业的厚钢板切割和焊接，提高了焊接强度，并减少了焊接缺陷。中国锐科激光研制了300kW级别的高功率光纤激光器，应用于钢铁加工、船舶制造等领域，大幅提升了工业加工效率。

（1）汽车行业 在汽车行业中，激光焊接用于连接车身面板、发动机部件和其他关键部件。例如，光纤激光器用于高精度焊接高强度钢部件，从而形成坚固耐用的接头。激光焊接的使用还使生产轻型车辆成为可能，同时提高了燃油效率 and 安全性。在宝马（BMW）汽车的自动化生产线上，采用激光拼焊技术，使汽车门板由不同厚度的钢板焊接而成，优化了车身强度，实现了减重效果。宝马还采用激光远程焊接，使车身焊接速度提高80%，同时焊缝质量更加稳定。

近年来，激光焊接成为了新能源汽车电池制造不可缺少的关键制造技术。

（2）电子行业 在电子行业中，激光焊接用于高精度连接小而精密的部件。例如，二极管激光器用于焊接锂离子电池中的电池片，确保可靠的电气连接。激光焊接的使用还使生产更小、更紧凑的电子设备成为可能。

（3）航空航天工业 波音787梦幻客机采用激光焊接工艺连接钛合金与复合材料，大幅减少了铆钉数量，降低了机身重量，提高了燃油效率。

4.3 增材制造

增材制造也称为3D 打印，已被激光技术彻底改变。基于激光的增材制造工艺，例如选区激光熔化和直接金属沉积，能够生产具有高精度和高强度的复杂金属部件^[8-10]。

（1）航空航天工业 在航空航天工业中，基于激光的增材制造被用于生产涡轮叶片和燃油喷嘴等复杂部件。例如，选区激光熔化用于生产具有复杂

内部冷却通道的钛涡轮叶片，从而提高喷气发动机的性能和效率。增材制造的使用还减少了材料浪费和交货时间，从而节省了成本并提高了生产效率。西门子能源公司使用激光增材制造来生产燃气轮机旋转器。图1所示为通用电气采用激光增材制造生产LEAP航空发动机燃油喷嘴，相较于传统机械加工，喷嘴的制造时间缩短至原来的1/3，且零部件重量降低了25%。



图1 LEAP航空发动机燃油喷嘴

（2）医疗行业 在医疗行业中，基于激光的增材制造用于生产定制植入物和假肢。例如，选区激光熔化用于生产具有复杂几何形状的钛牙科植入物，以匹配患者的解剖结构。增材制造的使用还能够生产具有更好生物相容性和性能的患者专用植入物。

（3）汽车制造 法拉利F1赛车的钛合金部件使用激光增材制造技术制造，提高了零部件的耐热性和强度，助力赛车优化空气动力学设计。2024年10月，意大利豪华跑车品牌法拉利正式发布了全新F80超级跑车，这款车型不仅在动力、设计和技术方面实现了显著提升，更是在制造过程中采用了增材制造技术，标志着汽车制造业的一次重大飞跃。F80超级跑车首次采用增材制造技术生产了主动悬架系统的上叉臂。传统的上叉臂设计复杂且对重量极为敏感，而增材制造技术则能提供更高的精度和灵活性，如图2所示。

4.4 激光打标和雕刻

激光打标和雕刻广泛应用于工业制造，用于产品识别、品牌塑造和可追溯性。与传统打标方法相比，激光打标具有多种优势，包括精度高、持久性强以及能够标记多种材料。苹果公司采用紫外激光



图2 法拉利F80超级跑车的钛合金部件

打标技术在iPhone后壳上刻印序列号和Logo，与传统蚀刻工艺相比，激光打标不会损伤材料表面，标记清晰且耐磨损。

(1) 汽车行业 在汽车行业，激光打标用于在零件上标记序列号、条形码和其他识别信息。例如，光纤激光器用于高精度标记发动机部件，确保整个生产过程的可追溯性。另外，激光打标的使用还提高了库存管理和质量控制的效率。

(2) 电子行业 在电子行业，激光打标用于高精度标记PCB、半导体晶圆和其他部件。例如，超快激光器用于在微芯片上标记识别码，确保可追溯性和质量控制。另外，激光打标的使用还使生产更小、更紧凑的电子设备成为可能。

4.5 激光表面处理

激光表面处理用于改变材料的表面性能，提高其耐磨性、耐蚀性和热性能。与传统的表面处理方法相比，激光表面处理具有多种优势，包括精度高、热输入少，以及能够处理复杂的几何形状。

(1) 汽车工业 在汽车工业中，激光表面处理用于提高发动机部件（如活塞和气缸套）的耐磨性。例如，二极管激光器用于硬化钢部件的表面，提高其耐用性和力学性能。另外，激光表面处理的使用还减少了二次精加工操作的需要，从而节省了成本并提高了生产效率。

(2) 航空航天工业 在航空航天工业中，激光表面处理用于提高由钛和复合材料等先进材料制成的部件耐蚀性。例如，CO₂激光器用于在涡轮叶片上施加保护涂层，提高其性能和寿命。另外，激光表面处理的使用也使轻量化、高性能的航空航天部件的生产成为可能。

4.6 激光清洗

激光清洗是一种环保、高效的表面处理技术。法国达索航空使用激光清洗技术维护战斗机机身，去除氧化层和涂层，而不会损伤金属表面。IPG推出的激光清洗系统被广泛用于航空航天零部件表面处理，替代传统化学清洗方式。

5 激光技术的新趋势

5.1 人工智能驱动的激光系统

人工智能（AI）越来越多地被集成到激光系统中，以增强其性能和能力。人工智能驱动的激光系统可实时优化工艺参数，提高激光加工的质量和效率。

(1) 自适应控制 人工智能驱动的自适应控制系统可实时监控和调整激光参数，如功率、脉冲持续时间和光束焦点，确保最佳加工条件。例如，在激光焊接中，人工智能驱动的系统可以检测和补偿材料特性的变化，从而实现一致且高质量的焊接。

(2) 预测性维护 人工智能驱动的预测性维护系统可以监控激光系统的健康状况并在潜在故障发生之前进行预测，这减少了停机时间和维护成本，提高了激光加工操作的整体效率。

5.2 绿光激光器和蓝光激光器

绿光激光器和蓝光激光器发出可见光谱（分别为约532nm、<450nm）的光，由于能够处理传统红外激光器难以处理的材料，因此在工业制造中越来越受欢迎。

(1) 铜和金加工 绿光激光器和蓝光激光器特别适合处理高反射材料，例如铜和金，这些材料难以用红外激光器加工。例如，绿光激光器和蓝光激光器用于焊接电动汽车中的铜部件，可确保可靠的电气连接。另外，绿光激光器和蓝光激光器的使用，还使生产具有改进的热管理的高性能电子设备成为可能。

(2) 医疗应用 绿光激光器适于各种医疗应用，特别是在眼科和皮肤科。例如，绿光激光器用于激光眼科手术，可高精度矫正视力问题。在皮肤科中，绿光激光器用于治疗血管病变和色素病变，对其周围组织的损伤最小。

5.3 激光混合制造工艺

激光混合制造工艺将激光技术与CNC加工、超

声波焊接等其他制造技术相结合，正在成为工业制造领域的一种趋势。

(1) 激光辅助加工 (LAM) 将激光加热与车削和铣削等传统加工工艺相结合。激光在切削刀具前加热材料，从而减少切削力并延长刀具寿命。激光辅助加工特别适合加工硬脆材料，如陶瓷和复合材料。

(2) 激光辅助增材制造 (LAAM) 将基于激光的增材制造与铸造和锻造等传统制造工艺相结合。例如，激光辅助增材制造可用于生产具有复杂几何形状的近净成形组件，然后使用传统加工工艺进行精加工。这减少了材料浪费和交货时间，从而节省了成本并提高了生产效率。

6 市场现状和未来展望

随着激光源、光束传输系统和过程控制的不断进步，激光技术在工业制造领域的前景一片光明。人工智能驱动的激光系统、绿色激光和混合制造工艺等新兴发展趋势有望进一步增强激光技术的功能和应用。然而，也存在一些需要面临的挑战。例如，激光系统的高成本和对熟练操作员的需求可能会成为应用的障碍，特别是对于中小型企业而言。此外，激光加工对环境的影响，特别是在能源消耗和废物产生方面，需要谨慎管理。尽管存在这些挑战，但激光技术在工业制造中的潜在优势是巨大的。随着激光技术的不断发展，预计其在各行各业生产高性能、轻量化和可持续产品方面将发挥越来越重要的作用。

1) 随着激光技术的不断进步和应用领域的不断拓宽，全球激光加工市场呈现出快速增长的态势。有数据显示，至2029年，全球激光技术市场规模将攀升至295亿美元。这一增长趋势主要归功于激光技术的持续进步，如光纤激光器、半导体激光器和超快激光器的不断创新，它们在提升效率、性能以及多功能性方面发挥了关键作用。

2) 亚太地区有望在激光加工市场中占据领先地位，这得益于激光技术在微电子和机床领域的广泛应用，以及建筑、航空航天和国防等行业对激光系统的日益增长的需求。特别是在打标、雕刻和材料加工等复杂且耗时的操作中，激光技术展现出的显著优势更是赢得了众多行业的青睐。此外，亚洲

各国政府为促进制造业发展所推出的扶持政策和措施，也为激光加工市场的繁荣提供了有力支撑。

3) 材料加工领域有望成为激光加工市场的引领者。这一细分市场的扩张，主要归功于各类材料所具备的多功能性以及对环保的日益重视。激光加工技术在金属、陶瓷、玻璃、复合材料及塑料等多样化材料的处理上均表现出色，其多功能性深受汽车、电子、航空航天及医疗保健等众多行业的青睐。相较于传统加工方法，激光加工不仅材料利用率更高，对环境的影响也更为轻微。在制造业日益注重可持续发展的背景下，激光加工技术正成为行业转型的首选。

4) 机床细分市场在激光加工领域也占据了重要地位，并预计在未来一段时间内持续领跑市场。机床与激光技术的融合，使得精确切割、焊接和雕刻成为可能，这在航空航天、汽车制造及电子设备等行业尤为重要。随着技术的不断创新，机床在激光加工市场的竞争力日益增强，越来越多的企业开始考虑采用激光加工方案。而机床制造成本的下降与性能的提升，更是让激光加工成为一种经济的选择。

然而，激光加工市场也面临一些挑战。部署成本高是当前面临的主要问题之一。激光系统的复杂性要求使用专用组件、尖端技术以及严格的安全措施，这些都显著增加了总体成本。同时，为了推进激光技术的研发和确保安全标准，需要大量的投资，这也进一步推高了前期成本。另外，缺乏训练有素的专业人员也是制约激光加工市场发展的一个因素。熟练劳动力对于操作和维护激光系统至关重要，而培养这样的专业人员需要时间和资源。

尽管面临这些挑战，但激光加工市场的未来发展前景仍然值得期待。随着科技的不断进步和应用领域的不断拓宽，激光加工技术的应用将更加广泛，市场需求也将持续旺盛。特别是在增材制造、文化遗产保护等尖端领域，激光加工技术的应用日益广泛，为行业带来了新的发展机遇。

7 结束语

激光技术已经改变了工业制造，激光源、光束传输系统和过程控制方面的最新进展进一步扩展了激光技术的功能和应用。来自汽车、航空航天、电
(下转第16页)

- Research and Technology, 2024, 33: 2958-2969.
- [35] RYU K S, PARK Y J, KIM C G, et al. Core loss reduction by laser scribing in grain-oriented 3% Si-Fe under different magnetizing direction[J]. Physica Status Solidi (A), 2004, 201 (8): 1815-1818.
- [36] PONNALURI S V, CHERUKURI R, MOLIAN P A. Core loss reduction in grain-oriented silicon steels by excimer laser scribing part I: Experimental work[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 112: 199-204.
- [37] KRAUSE R F, RAUCH G C, KASNER W H, et al. Effect of laser scribing on the magnetic properties and domain structure of high permeability 3% Si-Fe[J]. Journal of Applied Physics, 1984 (6): 2121-2123.
- [38] PETRYSHYNETS I, KOVÁČ F, PUCHÝ V, et al. Magnetic losses reduction in grain oriented silicon steel by pulse and continuous fiber laser processing[J]. Aip Advances, 2018, 8 (4): 047604.
- [39] JAHANGIRI M R, BAYANI H, ARDESTANI M, et al. Core loss reduction in grain oriented silicon steel sheets by two-sided laser scribing in the presence of a magnetic field[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 891: 162080.
- [40] HIDEHYKI H, TATSUHIKO S, NAOYA H. Grain-oriented electrical steel sheet excellent in magnetic properties and method for producing the same: US7045025B[P]. 2006-5-16.
- [41] 储双杰, 赵自鹏, 杨勇杰, 等. 一种耐热磁畴细化型取向硅钢及其制造方法: CN110323044B[P]. 2018-2-19.
- [42] 赵自鹏, 李国保, 杨勇杰, 等. 一种耐热刻痕取向硅钢及其刻痕方法: CN114255971B[P]. 2024-12-10.
- [43] 朱业超, 王向欣, 王若平, 等. 一种取向硅钢多次激光刻槽降低铁损的方法: CN102941413A[P]. 2013-2-27. **MW** 20250216

(上接第6页)

子和医疗设备等各个行业的真实案例反映了激光技术的变革性影响。

人工智能驱动的激光系统、绿色和蓝色激光器与混合制造工艺等新兴趋势, 有望进一步增强激光技术的功能和应用。然而, 要充分发挥激光技术在工业制造中的潜力, 需要解决高成本、对熟练操作人员的需求和环境影响等挑战。

随着激光技术的不断发展, 预计其在各行各业生产高性能、轻量化和可持续产品方面将发挥越来越重要的作用。激光技术在工业制造中的前景光明, 持续的进步和创新推动着行业向前发展。

参考文献:

- [1] STEEN W M, MAZUMDER J. Laser Material Processing[M]. USA: Springer, 2010.
- [2] READY J F. Industrial Applications of Lasers[M]. USA: Academic Press, 2001.
- [3] DAUSINGER F, LICHTNER F, LUBATSCHOWSKI H. Femtosecond Technology for Technical and Medical Applications[M]. USA: Springer, 2004.
- [4] CHRYSSOLOURIS G. Laser Machining: Theory and Practice[M]. USA: Springer, 2013.
- [5] NOLTE S, MOMMA C, JACOBS H, et al. Ablation of metals by ultrashort laser pulses[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1997, 14 (10): 2716-2722.
- [6] KAUTEK W, KRÜGER J. Femtosecond-pulse laser ablation of metallic, semiconducting, ceramic, and biological materials: SPIE Proceedings[C]. USA: SPIE, 1994: 600-611.
- [7] TOYSERKANI E, KHAJEPOUR A, CORBIN S. Laser Cladding[M]. USA: CRC Press, 2004.
- [8] GEBHARDT A. Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing[M]. Germany: Hanser Publishers, 2011.
- [9] ZHANG X, LIOU F. Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications[M]. English: Butterworth-Heinemann, 2018.
- [10] DAHOTRE N B, HARIMKAR S P. Laser Fabrication and Machining of Materials[M]. USA: Springer, 2008. **MW** 20250216