

发那科机械臂驱动 CO₂ 激光器切割塑料浇口的工艺研究

高国权

(上海市激光技术研究所有限公司, 上海 200233)

摘要: 本文提出一种基于发那科 M-20iA 六自由度工业机器人集成 CO₂ 激光器的智能化切割系统, 通过中空手臂结构与内置导光臂实现激光光束的灵活传输与稳定控制, 结合轨迹规划算法与工艺参数优化, 有效提升了浇口切割的精度与效率。本研究为塑料制品后处理提供了一种高柔性、高效率的自动化解决方案, 特别适用于多品种、小批量的现代生产需求。机械臂激光切割平均单件加工时间为 7.8 s, 远低于传统人工切割的 22 s, 效率提升约 64.5%。

关键词: 发那科机械臂; CO₂ 激光切割; 塑料浇口; 轨迹规划; 工艺参数优化

引用论文: 高国权. 发那科机械臂驱动 CO₂ 激光器切割塑料浇口的工艺研究 [J]. 橡塑技术与装备, 2026, 52(4):30-34.

中图分类号: TQ330.46

文章编号: 1009-797X(2026)04-0030-05

文献标识码: B

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2026.04.007

0 引言

在塑料注塑成型中, 浇口的去除质量直接影响产品外观与竞争力。传统去除方式易导致精度差、损伤产品表面。激光切割作为非接触技术, 具有无磨损、精度高和柔性好等优势。其中, CO₂ 激光器输出波长与非金属材料吸收特性匹配, 能高效实现塑料熔化与气化, 特别适用于浇口切割。

然而, 传统固定式激光设备难以应对复杂三维浇口的空间形态。随着工业机器人技术进步, 机器人激光加工系统凭借其灵活的工作空间、卓越运动性能及高度自动化, 为复杂三维零部件激光切割提供了有效解决方案^[1]。行业领先企业如发那科 (FANUC) 的机器人 CO₂ 激光切割系统, 已在汽车内外饰件、航空航天复合材料等领域成功应用, 展现出在非金属材料精密加工方面的显著优势。

1 机械臂切割系统组成及动作原理

发那科机械臂驱动 CO₂ 激光器的塑料浇口切割系统由机械臂本体、激光发生系统、控制系统及辅助装置四大部分组成。这些组件协同工作, 形成了一个高柔性、高精度的自动化加工平台, 如图 1 所示。

1.1 发那科机械臂系统

系统核心采用 FANUC M-20iA 型六自由度工业

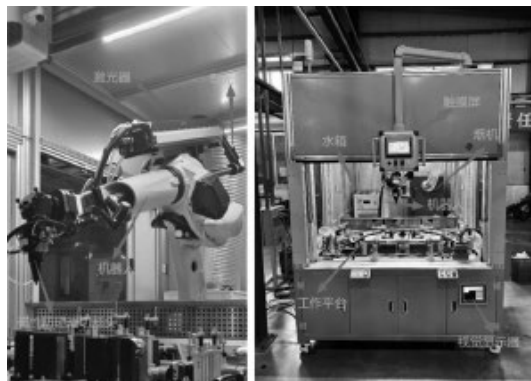


图 1 发那科机械臂切割系统实物图

机器人, 该机械臂具有 20 kg 负载能力和 1.8 m 工作半径, 适合中小型塑料制品的浇口切割作业。机械臂采用中空手臂设计, 实现了激光光路的内置集成, 有效减少了外部干涉, 提高了运动灵活性, 满足激光切割对路径精确性的严格要求。

机械臂集成了视觉零点校正技术和小圆精度软件, 显著提升了小轨迹切割时的精度表现。针对浇口切割中可能发生的碰撞风险, 系统配备了磁性防碰撞

作者简介: 高国权 (1993-), 男, 本科, 助理工程师, 主要研究方向为激光加工工艺。

基金项目: 上海市 2024 年度科技创新行动计划项目 (24DZ3101602)

切割头，能够在发生碰撞时迅速脱离并快速恢复，最大限度地减少设备停机时间。

1.2 CO₂ 激光器系统

如表 1 所示，激光源采用 Iradion 250W CO₂ 激光器，其发出的 10.6 μm 波长激光能被塑料材料高效吸收，实现快速熔化和气化。激光功率可根据切割要求进行连续调节，适应不同种类塑料的切割特性。激光器与机械臂采用一体式安装，结构紧凑，光路简洁稳定。Iradion 激光器的光束质量因子 $M^2 \leq 1.2$ ，接近理想高斯分布，能够聚焦到极小光斑，实现精细切割。采用基模输出可比多模切割的切缝宽度减少 25%，热影响区宽度降低 40%。

表 1 CO₂ 激光器系统运行参数

功率水平 /W	200 和 250
波长选项 /μm	10.6, 10.2
脉冲选项	标准
冷却选项	水冷
扩束 / 准直	6 倍, 5 倍, 4 倍, 2.5 倍

1.3 控制系统

控制系统详见图 2。

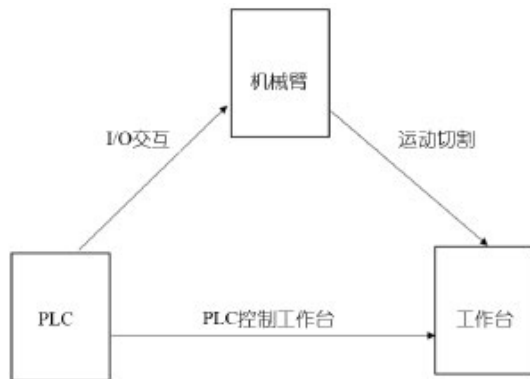


图 2 设备主要控制方式

1.4 辅助系统

导光系统由内置式导光臂和红光定位模块组成。导光臂将激光从发生器传输至切割头，内部采用高质量反射镜片，确保激光传输效率和光束质量。红光模块可在正式切割前显示预定路径，便于操作人员验证轨迹正确性，减少编程错误导致的废品率。

切割头集成聚焦镜片和辅助气体喷嘴，焦距可根据浇口几何特征进行调整。辅助气体系统提供清洁的压缩空气或惰性气体，用于吹除熔融材料、抑制燃烧并冷却切缝边缘，改善切割质量。

2 机械臂切割系统轨迹规划

塑料浇口的几何特征与产品外形紧密相关，通常位于注塑件的分型面或隐蔽区域，其空间形态复杂、尺寸微小且周围常有其他结构特征，这对机械臂的轨迹规划提出了特殊挑战。合理的轨迹规划不仅影响切割效率，更直接关系到浇口质量和工件完整性。

2.1 塑料浇口切割轨迹特点

塑料注塑件的浇口通常分为直接浇口、侧浇口和点浇口等多种类型，其共同特点是：

空间三维性：浇口往往不在单一平面内，需要三维空间切割轨迹；几何复杂性：浇口与产品主体连接处常有过渡圆角，需要精确跟踪；可达性挑战：周围模具结构可能限制机械臂末端姿态；热影响控制：需要优化路径以最大限度减少热累积。

2.2 塑料浇口切割轨迹规划

针对上述特点，机械臂轨迹规划需确保切割头与工件表面保持最佳姿态，维持聚焦镜距工件表面距离恒定，并保证激光光束始终垂直于切割面，以获得均匀的切缝质量。对于特别复杂的浇口几何特征，通常需要将复杂轨迹离散化为多个简单线段和圆弧，通过机械臂的连续路径控制功能，实现平滑过渡，避免速度突变导致的切割质量不一致^[2]。

3 激光切割工艺参数优化

3.1 不同切割参数下的质量记录

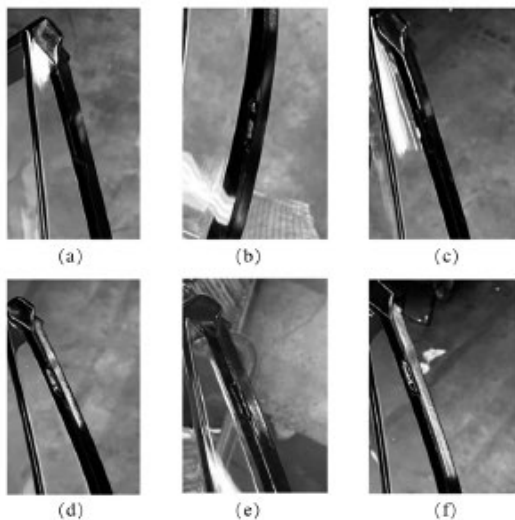
CO₂ 激光切割塑料浇口的质量主要受激光参数、运动参数和辅助气体参数共同影响。这些参数间存在复杂的交互作用，共同决定了最终切割质量。深入研究参数优化，对实现高质量、高效率的浇口切割至关重要。

综上所述激光切割在激光功率稳定的情况下，切割速度和吹气量的大小对切割效果有很大影响。当切割速度过快，同时吹气过大或者没有吹气时，切割产生的烟雾会附着在产品的表面 [如图 3(a)~(c)]；当切割速度放慢，同时没有吹气时，切割效果会有波浪感，并且会有烟雾附着在产品表面 [如图 3(d)]；当切割速度慢，同时吹气量增加到 0.1 Pa 时，切割产生的烟雾会附着在产品表面 [如图 3(f)]。

3.2 切割参数对质量的影响规律

根据激光切割理论及实验研究，关键工艺参数对塑料浇口切割质量的影响规律如下：

进给速度是决定切割深度和热影响区 (HAZ) 宽



- (a) 为机械臂切割运行速度为 300 mm/min, 关闭切割头部吹气;
 (b) 为机械臂切割运行速度为 300 mm/min, 微量的切割头部吹气 0.04 Pa;
 (c) 为机械臂切割运行速度为 300 mm/min, 加大切割头部吹气 0.1 Pa;
 (d) 为机械臂切割运行速度为 150 mm/min, 关闭切割头部吹气;
 (e) 为机械臂切割运行速度为 150 mm/min, 微量的切割头部吹气 0.04 Pa;
 (f) 为机械臂切割运行速度为 150 mm/min, 微量的切割头部吹气 0.1 Pa。

图3 在不同速度和吹气下机器光切割效果对比

度的主导因素。当进给速度从 150 mm/min 增至 300 mm/min 时, 切割深度呈现显著线性减少趋势, 而热影响区宽度则从 1.2 mm 减小至 0.5 mm。对于典型的塑料浇口(厚度 2~5 mm), 通常需要中等进给速度(150~300 mm/min) 以平衡穿透深度与热影响区控制。

激光功率是影响切割能力的关键因素。250 W 的 Iradion CO₂ 激光器可在 50~250 W 范围内连续调节, 适应不同塑料材料的切割需求。对于厚度 2~3 mm 的常见塑料浇口, 最佳功率范围为 150~220 W。功率过低会导致切不透, 功率过高则会引起材料过度气化、切缝过宽甚至燃烧碳化。

脉冲频率和占空比对热影响区控制有显著影响。Iradion 激光器支持 1~150 kHz 的脉冲频率调节, 通过脉冲调制可有效减少热累积。对于热敏感性材料(如 PMMA、PC), 采用高频率、低占空比的脉冲模式, 可降低热影响区宽度约 30%。

气体压力对切缝清洁度和热影响区有显著影响。高压气体(3 Pa)能有效清除切缝内碳化残留物, 使切边碳化层厚度减少 20%。但过高的压力在低速切割时会导致熔体侧向飞溅, 降低切缝质量评分。一般推荐

使用 2~3 Pa 的清洁干燥压缩空气或氦气^[3]。

焦点位置直接影响能量密度和切缝形状。对于塑料切割, 通常将焦点位置设置在工件表面以下 0.2~0.5 mm, 以获得上下均匀的切缝。对于三维曲面上的浇口, 可通过自动调焦系统实时调整焦点位置, 确保切割质量一致性。另外, 喷嘴高度的稳定性对保持切割质量至关重要。

3.3 基于视觉的质量监控系统

为实现切割质量的实时监控, 系统集成视觉检测模块, 通过工业相机采集切割区域图像, 分析以下质量指标:

热影响区宽度: 通过颜色特征识别碳化区域; 切缝宽度: 测量切缝几何尺寸; 表面质量: 基于纹理分析评估切割表面状况。视觉系统与控制系统形成闭环, 当检测到质量偏差时, 自动调整工艺参数, 确保切割质量的一致性。

3.4 质量评价体系

为客观评估浇口切割质量, 建立了全面的评价体系:

断面质量: 通过宏观和微观观察切割断面, 评估粗糙度、碳化程度和熔渣附着情况; 尺寸精度: 测量实际切割轮廓与理论轮廓的偏差, 包括切缝宽度、角度偏差等; 机械性能: 测试切割区域附近的材料强度, 评估激光切割对材料性能的影响。通过上述评价体系, 可量化分析不同参数组合下的切割质量, 为工艺优化提供数据支持。

4 应用案例与结果分析

为验证发那科机械臂驱动 CO₂ 激光器切割塑料浇口的实际效果, 选择汽车后尾灯组件作为实验对象。该组件材质为 ABS 塑料, 平均壁厚 2.5 mm, 拥有 12 个点浇口, 分布在复杂三维曲面上, 传统切割方式难以保证一致性。

4.1 实验设置

实验采用前述系统配置: FANUC M-20iA 机械臂配合 250 W Iradion CO₂ 激光器, 聚焦光斑直径 0.2 mm, 辅助气体为干燥压缩空气(压力 2.5 bar)。通过 ROBOGUIDE 软件导入仪表盘 CAD 模型, 自动提取浇口轮廓, 生成初始切割路径, 并经过轨迹优化算法处理。

对比实验分组进行:

组 A: 传统人工切割(熟练工人使用专用修剪刀);

组 B：机械臂激光切割（固定参数：功率 200 W，速度 100 mm/min）；

组 C：机械臂激光切割（优化参数：功率 180 W，速度 150 mm/min，脉冲频率 50 kHz）。

每组处理 20 个样品，评估指标包括：单件加工时间、浇口残留高度、表面粗糙度、热影响区宽度及产品合格率。

4.2 结果与分析

实验结果显示，机械臂激光切割在浇口处理质量方面显著优于传统人工方式。具体表现如下：

加工效率方面：机械臂激光切割（组 C）平均单件加工时间为 7.8 s，远低于传统人工切割的 22 s，效率提升约 64.5%。这主要得益于机械臂的高速运动和激光瞬时作用的特性，同时省去了人工定位与调整的时间。

切割质量方面：激光切割组浇口残留高度平均为 0.04 mm，达到几乎无残留的水平，而人工切割组平均为 0.18 mm。激光切割表面粗糙度 (R_z) 为 6.5 μm ，明显优于人工切割的 14.2 μm ，浇口表面粗糙度改善约 54%，提供了更接近产品本体的表面质感。

热影响区控制：优化参数下的激光切割热影响区宽度为 0.32 mm，且边界均匀，而固定参数达到 0.48 mm，表明参数优化对热控制的有效性。人工切割虽无热影响，但存在明显的应力白化和微观裂纹问题。

4.3 系统性能分析

发那科机械臂激光切割系统在塑料浇口处理中展现出以下突出优势：

高轨迹精度：通过小圆精度软件和视觉零点校正技术，系统在复杂三维轨迹上实现了 ± 0.1 mm 的轨迹精度，确保了浇口轮廓的精确跟踪。实际测量表明， $\Phi 8$ mm 圆形浇口的圆度误差小于 0.15 mm。

卓越的柔性：机械臂中空手臂与导光臂完美配合，实现光路内置，极大的减少了运动干涉，保证切割的灵活性。同一系统可处理不同产品型号的浇口，切换时间仅需几分钟。

稳定的质量输出：TCP 速度输出功能确保激光功率与切割速度实时匹配，消除了因速度变化导致的切口质量不一致。实验数据显示，优化参数组的质量一致性显著高于固定参数组，批次内质量波动降低 70%，产品合格率从 82% 提高至 98.5%。

碰撞防护能力：在实验过程中，模拟了意外位置偏差情况，磁性防撞设计有效避免了设备的碰撞损坏，平均恢复时间不超过 5 min，大幅减少了潜在停机时间。

5 结论

本研究成功开发了一套基于发那科 M-20iA 机械臂集成 250W Iradion CO₂ 激光器的塑料浇口切割系统，并验证了其在工业生产中的可行性与优越性。系统通过硬件集成、算法优化和工艺参数调控，有效解决了传统浇口去除方式面临的精度不足、效率低下和质量不稳等问题。随着技术不断完善和成本优化，发那科机械臂驱动 250W Iradion CO₂ 激光器切割塑料浇口的技术有望成为塑料制品后处理的标准化解方案，推动塑料制造业向智能化、高效化和高质量化方向发展。

参考文献：

- [1] 曾俊皓. CO₂ 激光切割亚克力板材的应用研究 [J]. 机械工程师, 2018,(01):112-114.
- [2] 平彦兴, 张亿鑫, 杜海潮, 等. 快递纸箱拆分机械臂结构设计及轨迹规划 [J]. 吉林化工学院学报, 2024,41(11):72-78.
- [3] 徐奔辰. 一种板材激光切割柔性生产线系统的设计与实现 [J]. 造纸装备及材料, 2022,51(09):108-110.

Research on the process of cutting plastic sprues using a CO₂ laser driven by a FANUC robotic arm

Gao Guoquan

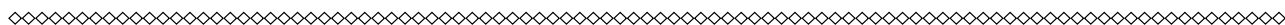
(Shanghai Institute of Laser Technology Co. LTD., Shanghai 200233, China)

Abstract: This paper presents an intelligent cutting system based on a FANUC M-20iA six-degree-of-freedom industrial robot integrated with a CO₂ laser. The system achieves flexible transmission and stable control of the laser beam through a hollow arm structure and a built-in light-guiding arm. Combined with

trajectory planning algorithms and process parameter optimization, it effectively enhances the precision and efficiency of gate cutting. This study provides a highly flexible and efficient automated solution for post-processing of plastic products, especially suitable for modern production needs with multiple varieties and small batches. The average processing time for a single piece of mechanical arm laser cutting is 7.8 seconds, significantly lower than the 22 seconds of traditional manual cutting, representing an efficiency improvement of approximately 64.5%.

Key words: Fanuc robotic arm; CO₂ laser cutting; plastic sprue; trajectory planning; process parameter optimization

(R-03)



国产轮胎再扬威！ 玲珑 Comfort Master 获欧洲权威测试“最具价值”评级

Domestic tires make a resounding comeback!

Linglong Comfort Master receives the "Most Valuable" rating from authoritative European testing

日前，玲珑产品在欧洲权威测评中再传捷报。在德语世界领先的在线杂志 Netzwelt 最新发布的 2026 年夏季轮胎测试中，玲珑 Comfort Master 凭借卓越的性能，荣获总分第 2，获得“good”评级，并获“最具价值”评价。

权威测评，树立标杆

本次测试由在消费电子、汽车和娱乐领域拥有近 30 年报道经验的知名在线杂志 Netzwelt 发起。作为德语世界备受信赖的买家指南和独立测试平台，netzwelt.de 及其专家团队一直是消费者做出明智购买决策的首选参考。为探究“中国制造轮胎能否成为欧洲成熟品牌的真正替代品”，Netzwelt 首次针对夏季轮胎进行了全面对比测试。

为确保绝对公正，所有测试轮胎（规格为 205/55 R16 91V）均直接从公开市场匿名购买。测试由独立服务提供商 Tempotire 在位于汉诺威附近的世界顶级轮胎研发中心 Contidrom 进行。测试严格遵循从 1.0（非常好）到 6.0（不满意）的评分制，湿地与干地性能各占总评分的 50%，其结论对终端消费者具有极高的指导意义。

玲珑 Comfort Master 性能惊艳

作为测试组中的“轻量级”选手，玲珑 Comfort Master 首先在环保与基础性能上展现出优势：更轻的重量意味着更少的材料使用，而其欧盟轮胎标签也交出了滚动阻力“C”级、湿地抓地力“B”级的可靠成绩单。

在至关重要的安全测试中，Comfort Master 无论是在湿滑还是干燥路面，其制动距离均表现优异，仅次于本次测试的冠军轮胎，展现了强大的安全性能。

在动态表现上，玲珑 Comfort Master 在湿滑沥青路面上大放异彩。它以快速的圈速、卓越的平衡性以及高水平的抓地力给人留下深刻印象。测试驾驶员评价其转向响应直接、反馈感愉悦。此外，在主观感受上，这款轮胎还兼具了出色的滚动静谧性与乘坐舒适性。

高价值产品，实至名归

综合所有测试项目，玲珑 Comfort Master 凭借优异的性能表现，荣获“good”评价，并被授予“高价值”标签，为全球消费者提供了一个值得信赖的优质新选择。

近 1 个月，从《Auto Bild》预选第 1，到 ACE“值得推荐”，再到 Netzwelt“高价值”奖——玲珑以席卷之势横扫欧洲权威测评。密集斩获的国际认可，标志着玲珑轮胎正强势跻身全球消费者的主流选择。

摘编自“中国轮胎商务网”

(R-03)