

激光切割下料钢板工艺优化与效率提升研究

刘 佳

(四川纽克利科技有限公司, 四川 德阳 618000)

摘 要 本研究针对激光切割下料钢板工艺中存在的效率低、成本高等问题, 从激光切割原理和影响因素入手进行研究, 分析了激光切割的基本原理及影响因素, 设计并开展了正交试验, 分析激光功率、切割速度、激光频率、占空比和辅助气体压力等工艺参数对切割质量的影响, 并通过采用多目标优化方法确定了最佳激光切割工艺参数组合。研究表明, 优化后的工艺参数组合能够显著提高切割速度, 同时保证良好的切割质量, 以期对激光切割下料钢板的实际生产提供有益参考。

关键词 激光切割; 钢板; 工艺优化; 多目标优化; 正交试验

中图分类号: TG48

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.02.003

0 引言

激光切割技术以其高精度、高效率、无接触等优点, 广泛应用于金属板材加工领域。然而, 传统的激光切割工艺参数往往依靠经验设定, 难以兼顾切割速度和切割质量, 导致生产效率低下、成本较高。因此, 对激光切割下料钢板工艺进行优化, 提升切割效率和质量, 具有重要的经济和社会意义^[1]。本文通过实验研究和多目标优化方法, 探索最佳激光切割工艺参数组合, 以期为提高激光切割下料钢板的效率和质量提供有效的技术手段。

1 激光切割基本原理及影响因素

激光切割技术的核心在于利用激光束的高能量密度精确切割材料, 激光作为受激辐射产生的光束, 其产生需要三个必要条件: 工作物质、泵浦源和光学谐振腔。工作物质是能够产生激光的介质, 如气体、液体或固体; 泵浦源为工作物质提供能量, 使其原子或分子跃迁到高能级; 光学谐振腔则用于增强激光输出, 保证激光束具有良好的方向性和单色性。低能级粒子吸收泵浦源提供的能量后跃迁至高能级, 形成粒子数反转, 处于高能级的不稳定态粒子自发或受激跃迁回低能级时, 会释放出相同频率、相位和方向的光子。大量光子在谐振腔内多次反射放大, 最终形成高能量密度、高方向性的激光束, 激光加工根据光能大小可分为热加工和冷加工两种。冷加工主要用于对热敏感材料如塑料的加工, 激光冷加工利用激光破坏材料分子键, 实现分子间的分离, 不会产生明显的热损伤和热变形。热加工则广泛应用于金属材料的切割、焊接和熔覆等, 例如, 在钢板激光切割过程中, 激光束通

过聚焦镜聚焦后, 会在材料表面形成极小的焦点, 能量高度集中。焦点附近的材料迅速吸收激光能量, 温度急剧升高至熔点以上, 甚至气化。同时, 辅助气体(如氧气)以高压喷射到切缝处, 将熔融或气化的金属吹走, 形成狭窄而精确的切口, 从而完成金属材料的切割^[2]。辅助气体除了清除熔融物, 在某些情况下还能参与氧化反应, 进一步促进材料的切割。激光功率、聚焦方式、辅助气体压力以及切割速度等参数都会显著影响切割质量和效率^[3]。激光切割具体如图 1 所示。

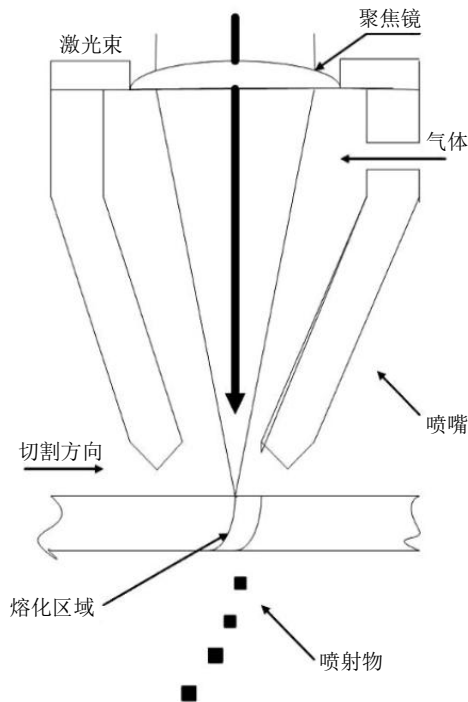


图 1 激光切割原理图

2 激光切割实验材料与设备

待切割材料为3 mm厚的Q235钢板,试件尺寸为500×500 mm。采用LC-F1000-L光纤激光切割机,激光器为IPG公司的YLS-1000,输出功率为1 kW,激光波长长1 070 nm,激光传输不依赖反射镜等器件,转换效率大于30%,具有良好的柔性布置能力,可应用于薄板切割的需要。试验检测仪器有TR200粗糙度测量仪、精密电子秤(精度0.001 g)。

3 激光切割实验结果及分析

3.1 激光功率对切割质量的影响

当激光功率较低(低于600 W)时,激光能量不足以完全熔化和气化材料,导致切割不完全,出现切不透的现象。即使勉强切透,由于能量不足以提供足够的动能将熔融金属充分排出切缝,熔融金属也会在切缝底部凝固,形成显著的挂渣,严重影响切割质量。切口表面由于热量不足以迅速清除熔融物,表面粗糙度也较大,呈现出不规则的波纹状,随着激光功率的增加(600~1 000 W),切割质量得到显著改善。切割完全率提高,不再出现切不透的情况,熔融金属的流动性增强,在辅助气体的作用下,能够更有效地从切缝中排出,从而减少了底部挂渣的现象,挂渣量的减少不仅提升了切割效率,也避免了因挂渣导致的后续加工问题。切口表面粗糙度也随着激光功率的增加而减小,这是因为更高的激光功率能够提供更充足的能量,使熔融金属在更短时间内完成熔化、气化和排出过程,减少了热量向周围扩散的机会,从而降低了切口表面的不规则性。实验结果显示,当激光功率达到1 000 W时,可以获得最佳的切割质量,此时测得的最小表面粗糙度达到5.433 μm 。

3.2 切割速度对切割质量的影响

切割速度较快时,激光束在单位面积上的作用时间缩短,单位面积所接收的激光能量降低,导致材料的熔化量减少,熔融金属的量也随之减少^[4]。较少的熔融金属更容易被辅助气体吹离切缝底部,从而减少了挂渣的产生,反之,当切割速度较慢时,激光束在单位面积上的作用时间延长,单位面积所接收的激光能量增加,导致更多的材料熔化,增加熔融金属的量,从而增加挂渣的可能性。切割速度为40 mm/s时,可以获得较低的表面粗糙度,达到5.624 μm ,因为较快的切割速度能够缩短激光作用时间,减少热量向周围材料扩散,从而降低切口表面的不规则性,获得更平

滑的表面,而较慢的切割速度则会导致热量扩散加剧,增加表面粗糙度。

3.3 激光频率对切割质量的影响

激光频率与单位时间内产生的激光脉冲数成正比,增加激光频率意味着在相同时间内产生更多脉冲,但每个脉冲携带的能量会相应降低,能量分布的变化直接影响材料的熔化和气化过程,进而影响切割质量^[5]。随着激光频率的增加,底部挂渣量也随之增,因为当激光频率较高时,每个脉冲的能量降低,导致材料的熔化和气化过程不充分。虽然脉冲数量增加,但每个脉冲的能量不足以提供足够的动能将熔融金属完全排出切缝,熔融金属的温度相对较低,黏度较高,难以被辅助气体有效吹除,容易残留在切缝底部,形成挂渣,激光频率与表面粗糙度的关系则较为复杂,呈现出非线性变化趋势,在一定的频率范围内,增加激光频率可以降低表面粗糙度,更高的频率意味着更频繁的能量输入,可以更有效地去除材料表面的熔融金属,减少表面不规则性,当激光频率为200 Hz时,可以获得较低的表面粗糙度,达到5.320 μm 。当激光频率继续增加时,表面粗糙度反而会增大,过高的频率导致每个脉冲能量过低,熔化过程不稳定,容易形成不均匀的熔融层,增加表面粗糙度。

3.4 激光占空比对切割质量的影响

激光占空比是指激光器在单位时间内工作的时间与总时间的比率,它直接影响激光能量的输出方式,进而影响激光切割的质量。

本实验研究了激光占空比对3 mm厚Q235钢板激光切割质量的影响,主要关注其对底部挂渣量的关系。实验结果表明,激光占空比与底部挂渣量之间存在显著的相关性,但并非简单的线性关系,而是呈现出先减小后增大的趋势。在较低的激光占空比下(例如20%),挂渣量相对较低,实验测得挂渣量为0.122 g,这是因为较低的占空比意味着激光器在单位时间内工作时间较短,峰值功率较高,高峰值功率能够提供足够的能量快速熔化和气化材料,形成大量高动能的熔融金属,更容易被辅助气体吹离切缝底部,从而减少挂渣。然而,随着激光占空比的增加,挂渣量也逐渐增加,当激光占空比达到80%时,挂渣量增加到0.671 g,较高的占空比虽然增加了总能量输入,但峰值功率降低了。较低的峰值功率导致材料的熔化和气化过程不充分,熔融金属的温度降低,黏度增大,流动性变差,更难以被辅助气体吹离切缝,从而增加了挂渣的可能性,

与低激光功率下产生挂渣的现象相似，都是因为能量不足以充分熔化和排出熔融金属导致的。

3.5 辅助气体压力对切割质量的影响

辅助气体压力是激光切割过程中一个重要的工艺参数，直接影响熔融金属的清除效果，进而影响切割质量。

实验研究了辅助气体压力对 3 mm 厚 Q235 钢板激光切割质量的影响，主要关注其对底部挂渣量和表面粗糙度的影响。辅助气体压力与底部挂渣量之间存在负相关关系，增加辅助气体压力可以有效降低挂渣量，更高的气体压力能够提供更大的吹除力，更有效地将熔融金属从切缝底部吹离，防止其凝固形成挂渣，较高的气体压力能够增强气流速度，提高熔融金属的清除效率。同时，辅助气体压力也影响切口表面的粗糙度。实验结果显示，当辅助气体压力达到 0.4 MPa 时，可以获得最低的表面粗糙度，达到 4.533 μm ，更高的气体压力能够更有效地清除切口表面的熔融金属残渣，减少表面不规则性，从而提高表面光洁度。气体压力过低，熔融金属清除不彻底，容易形成毛刺或其他表面缺陷，而气体压力过高，虽然可以提高清除效率，但可能会导致切口变宽，甚至损伤工件。辅助气体压力对熔融金属清除效率的影响，与气流速度和喷嘴设计有关，更高的气体压力导致气流速度增加，使得熔融金属更容易被吹离切缝，合理的喷嘴设计可以进一步优化气流的形状和速度，提高熔融金属的清除效果。

4 激光切割工艺参数多目标优化

采用非支配排序遗传算法 NSGA-II 对激光切割 Q235 钢板的工艺参数进行多目标优化。优化目标为最大化切割速度 (V) 和最小化表面粗糙度 (R_a) 以及底部挂渣量 (W)。三个目标函数分别为：最大化 V 、最小化 R_a 、最小化 W 。优化变量为激光功率 (P)、切割速度 (v)、激光频率 (f)、占空比 (D) 和辅助气体压力 (G)，根据单因素试验结果，确定各个变量的取值范围，并将其编码为遗传算法中的基因。

采用实数编码，每个变量的取值范围分别为： P (600 ~ 1 000 W)， v (20 ~ 60 mm/s)， f (100 ~ 300 Hz)， D (20% ~ 80%)， G (0.2 ~ 0.6 MPa)。每个个体由 5 个基因组成，代表 5 个工艺参数。种群规模设置为 100，交叉概率设置为 0.8，变异概率设置为 0，算法运行至最大迭代次数 500 代或收敛时停止。采用 NSGA-II 算法的非支配排序和拥挤距离计算适应度值，选择非支配解和分布均匀的解进入下一代，具体应用效果如表 1 所示。

表 1 优化效果统计表

序号	激光功率 (W)	切割速度 (mm/s)	激光频率 (Hz)	占空比 (%)	辅助气体压力 (MPa)	切割速度 (mm/s)	表面粗糙度 (μm)	底部挂渣量 (g)
最优解 1	950	55	220	35	0.45	55.2	4.87	0.08
最优解 2	880	52	200	40	0.42	52.5	4.95	0.09
最优解 3	920	53	210	38	0.43	53.1	5.02	0.10
初始参数	800	40	150	50	0.3	40.0	6.25	0.25

从表 1 可以看出，通过 NSGA-II 算法优化后的工艺参数组合，显著提高了切割速度，同时有效降低了表面粗糙度和底部挂渣量。与初始参数相比，切割速度提高了约 13% ~ 33%，表面粗糙度降低了约 15% ~ 22%，底部挂渣量降低了约 60% ~ 70%。这表明，多目标优化方法能够有效地平衡切割速度和质量之间的矛盾，为激光切割工艺参数的优化提供了一种有效途径。

5 结束语

本研究通过实验研究和多目标优化方法，系统地探讨了激光切割 3 mm 厚 Q235 钢板的工艺参数优化问题。实验结果表明，激光功率、切割速度、激光频率、占空比和辅助气体压力等参数对切割质量（包括切割速度、表面粗糙度、底部挂渣量）均有显著影响，可采用非支配排序遗传算法 NSGA-II，对上述五个参数进行多目标优化，在激光切割工艺参数优化中具有很好的有效性和实用性。

参考文献：

- [1] 叶安. 激光技术在钢铁切割与加工中的应用 [J]. 冶金与材料, 2024, 44(10): 124-126.
- [2] 陈谦哲, 刘列, 韩良华. 激光切割 Q235 钢板在救援破拆中的研究 [J/OL]. 激光技术, 1-11 [2024-11-26]. <http://119.29.172.80:8085/kcms/detail/51.1125.TN.20240620.1744.002.html>.
- [3] 黄伟溪, 李若涛, 李文威, 等. 激光切割高频动态复合运动轨迹规划与控制方法 [J]. 自动化与信息工程, 2024, 45(05): 54-61.
- [4] 张新建, 冯力力. 激光切割自动上下料与视觉定位加工系统的设计 [J]. 设备管理与维修, 2024(15): 21-23.
- [5] 秦涛. 基于 3 mm 厚碳钢薄板激光切割工艺的试验研究 [J]. 汽车实用技术, 2024, 49(10): 108-111.