

激光加工

(日)金岡 優 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS





激光加工

(日) 金岡 優 著



机械工业出版社

1

本书是作者 20 多年激光加工技术的总结。书中尽量省略了关于激光的概念性知识，重点讲述了有关加工技术方面的内容。内容涉及激光加工的种类、特征，解决激光加工实际操作中所遇到的问题，发生加工不良时所要采取的措施，激光焊接技术及解决实际激光焊接时所遇到的问题，利用激光进行表面淬火的加工技巧等方面。

本书可供从事激光加工的技术人员和操作人员阅读使用，也可供相关专业在校师生参考。

機械加工現場診断シリーズ⑦レーザ加工

1999 年 5 月 28 日 初版 1 刷 行

2003 年 4 月 16 日 初版 2 刷 行

◎ 著者 金岡 優

行者 岡村信克

行所 日刊工業新聞社

版权所有，侵权必究。

本书版权登记号：图字：01-2005-3476

图书在版编目 (CIP) 数据

激光加工 / (日) 金岡 優著. —北京: 机械工业出版社, 2005.7

ISBN 7-111-16908-5

I. 激… II. 金… III. 激光加工 IV. TG665

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 076858 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 陈保华 版式设计: 张世琴 责任校对: 魏俊云

封面设计: 陈沛 责任印制: 洪汉军

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

890mm × 1240mm A5 · 6.375 印张 · 2 插页 · 130 千字

0 001—2 000 册

定价: 20.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

现在中国正在普及利用激光加工机进行钣金加工。与日本以及欧美相比，中国的激光加工机普及速度非常快。几乎所有的产业部门都在研究讨论引进激光加工机到生产现场，相信不久的将来，激光加工一定会成为钣金加工行业中主要的加工方式。

激光加工是将能量聚焦到微小的空间，利用这一高密度的能量进行非接触、高速度、高精度的加工方法。这是一种摆脱传统的机械加工、热处理加工之类的全新加工方法。它也是一种通过与数控装置、高刚性加工工作台相结合，使市场所要求的质量得以保证和生产效率有飞跃性提高的加工方法。激光加工机作为今后承担加工产业化（FA, Factory Automation）的主要手段倍受期待。

但是，随着激光加工机市场的急剧扩大，在使用加工机的现场也出现了各种各样的问题。客户就激光加工方面所提出的问题也随着时代的变化越来越复杂。由于加工材质或板厚的多样化、生产效率的提高、环保问题的对策等原因，对激光加工机的要求也相应提高。再加上，现在要求激光加工机与一般机床具有同样的运转效率，但不允许像过去那样在设定加工条件上花费很长时间，这就使现场的工作人员感到非常为难。

在这种状况下，现场工作人员都希望有一本从实际加

IV 激光加工

工出发，能够帮助解决现场所出现问题的技术书籍。但遗憾的是，现有的有关激光加工的书，大多数内容都局限于介绍原理、加工装置概要、引进实例的讲解和实验数据的介绍。因此，这些书在使用加工机的现场中不能成为解决问题的有效技术图书。

本书是针对现场操作人员的需求而编写的。因此，书中尽量省略了关于激光的概念性知识，重点讲述了有关加工技术方面的内容。比如发振器的构成、加工机的构成以及光学理论等这些在其他相关书籍中已经详细介绍的内容，本书尽量避免重复。另外，为了满足初学者的灵活使用，对于行业术语也进行了解释。

本书是为在加工现场从事激光加工的操作人员而编写的实用工具书。恳请各位读者能够有效地使用这本书，加深对激光加工的理解，扩大激光加工机的用途。

最后，对收集加工数据的三菱电机株式会社激光系统部加工技术课的各位同事致以真诚的谢意，对把书翻译成中文的三菱电机株式会社激光系统部的裴昌谦博士和付长德博士表示由衷的感谢。

金岡 優

目 录

前 言

第 1 章 什么是激光加工	1
1.1 激光加工的种类	2
1.2 激光加工的特征	3
1.3 加工用激光的种类	5
1.3.1 各种激光与加工用途的关系	5
1.3.2 激光波长和金属光谱反射因数的关系	6
1.3.3 根据加工来区别使用不同的激光	7
1.4 激光的基础	8
1.4.1 光束强度的分布	8
1.4.2 聚光点的强度分布	11
1.4.3 CW (连续波) 输出和脉冲输出	12
1.4.4 集光特性	13
1.5 辅助气体流动的基本特性	14
1.5.1 各种加工和辅助气体的作用	14
1.5.2 适合加工目的的喷嘴	15
1.5.3 关于辅助气体的消耗量	17
第 2 章 激光切割的基础	19
2.1 激光切割的原理	19
2.1.1 激光切割的机理	19
2.1.2 加工气体 (辅助气体) 的作用	21
2.1.3 加工气的种类	22

VI 激光加工

2.2 加工质量	24
2.2.1 加工精度	24
2.2.2 关于尺寸变化	25
2.2.3 金属切割中的坡度	30
2.2.4 非金属切割中的坡度	32
2.2.5 切断面的粗糙度	34
2.2.6 热影响	37
2.2.7 沾渣	38
2.2.8 炭化	41
2.2.9 缺口	42
2.2.10 精度测定仪器	43
2.3 加工条件	43
2.3.1 各种加工条件参数	45
2.3.2 激光输出功率对加工的影响	55
2.3.3 脉冲频率(低频率)对加工的影响	57
2.3.4 脉冲频率(高频率)对加工的影响	59
2.3.5 脉冲比例对加工的影响	60
2.3.6 加工速度对加工的影响	62
2.3.7 辅助气体压力对加工的影响	63
2.3.8 开孔时间对加工的影响	65
2.3.9 焦点位置对加工的影响	65
2.4 加工成本	67
第3章 实际上的激光切割	73
3.1 穿孔的难度	73
3.1.1 穿孔的原理	73
3.1.2 对付穿孔中出现缺陷的四个原则	75
3.1.3 适当的穿孔条件	78
3.1.4 防止在对不锈钢进行穿孔时出现须状物	80

3.1.5 高反射材料穿孔时的注意事项	80
3.2 缩短加工时间的方法	81
3.2.1 加工时间的内涵	82
3.2.2 正确使用加工程序的方法	83
3.2.3 提高切割速度的加工条件	85
3.2.4 不锈钢切割的常识	87
3.2.5 碳钢切割的特殊情况	89
3.2.6 缩短加工时间的实例	90
3.3 提高加工精度的方法	91
3.3.1 用程序修正热变形	91
3.3.2 防止厚板切割过程中终端部分的熔损	92
3.3.3 选择适合加工形状的条件	94
3.3.4 要改善坡度就要保证被加工件表面的光束焦点处 直径最小	95
3.3.5 防止切割管材时发生里面熔渣附着	95
3.3.6 切割超薄板时的注意事项	97
3.3.7 提高斜切割质量的方法	99
3.3.8 如何切割生锈的材料	101
3.3.9 穿孔定位	102
3.3.10 切割格纹板时的注意事项	103
3.4 预防在碳钢厚板切割中出现的质量问题	104
3.4.1 检查被加工件的表面状况	104
3.4.2 保存条件和检查记录	106
3.4.3 检查光轴偏离的简单方法	107
3.4.4 热透镜作用造成加工不良的初步判断方法	108
3.4.5 热透镜作用造成加工不良的进一步判断方法	109
3.5 防止不锈钢厚板无氧化切割中发生加工不良 的方法	112

3.5.1 穿孔后的切除部分	112
3.5.2 从沾渣状态推断合适的焦点位置	114
3.5.3 选择喷嘴直径	115
3.6 刻线的方法	116
3.6.1 加工条件的调整方法	116
3.6.2 各种加工条件	117
3.7 木材的切割特性	117
3.7.1 各种木材的最大切割速度	118
3.7.2 木纹与切割特性的关系	120
3.7.3 提高切割精度	121
3.7.4 用激光加工木材的实例	122
第4章 加工不良发生时的检查项目	124
第5章 激光熔接的基础	129
5.1 激光熔接的原理	129
5.1.1 激光熔接的机理	129
5.1.2 与 TIG 熔接相比较得出的激光特征	130
5.1.3 加工气体的作用	132
5.1.4 各种熔接用的光学系统	133
5.1.5 激光能量的有效利用 (熔融效率)	134
5.1.6 金属组合与熔接性	135
5.2 熔接质量的评估	137
5.2.1 激光熔接能力的评价	137
5.2.2 各种各样的熔接缺陷	138
5.2.3 熔接困难的材料和解决问题方法	141
5.3 加工条件参数	141
5.3.1 激光输出功率对加工的影响	142
5.3.2 熔接速度	142
5.3.3 聚光光学系统的焦点距离对加工的影响	143

5.3.4 焦点位置对加工的影响	145
5.3.5 保护气体对加工的影响	147
5.3.6 输出功率形态对加工的影响	148
5.4 熔接用 CO ₂ 激光和 YAG 激光 (Nd: YAG)	150
第 6 章 实际的激光熔接	152
6.1 关于熔接连接的注意事项	152
6.2 关于熔接用的工具	156
6.3 激光熔接的顺序	156
6.4 选择机种	161
6.4.1 输出功率 3kW 以下的 CO ₂ 激光熔接	161
6.4.2 输出功率 5kW 的 CO ₂ 激光熔接	162
6.4.3 输出功率 10kW 的 CO ₂ 激光熔接	163
6.4.4 输出功率 1kW 以下的 YAG 激光熔接	163
6.4.5 输出功率 2kW 的 YAG 激光熔接	165
6.5 设定加工条件的基准	165
6.5.1 关于输出功率和速度的设定	166
6.5.2 不同厚度材料的平熔接	166
6.5.3 坡度的控制	167
6.6 间隙范围的改善	168
6.6.1 光束扫描	169
6.6.2 使用金属丝	169
6.7 目标偏差的改善	170
6.8 强度的改善	172
6.9 熔接不好时怎么办	172
6.9.1 不同厚度的材料用激光熔接后再冲压成形时 产生裂缝	172
6.9.2 气孔或疤痕的发生	173
6.9.3 找不到点熔接的条件	174

6.9.4 对接熔接的强度不足	174
6.9.5 高强度钢板的对接熔接特性	175
6.9.6 在 SPHC 材料和 SUS 304 不锈钢的熔接中 产生裂缝	175
6.9.7 镀锌钢板熔接时的气孔	175
6.9.8 T形填补连接的角变形	177
6.10 熔接部位断面的宏观试验	178
6.10.1 碳钢	178
6.10.2 不锈钢	178
6.10.3 铝合金	178
6.10.4 纯钛及钛合金	179
第7章 激光表面淬火的基础和加工特性	180
7.1 表面淬火的原理	181
7.1.1 激光的强度分布	182
7.1.2 淬火特性	184
7.2 淬火能力	185
7.2.1 硬度分布和加工条件的关系	186
7.2.2 入热量和硬化深度的关系	188
7.2.3 扩大硬化层宽度	189
7.3 提高光束光谱吸收因数	190
7.3.1 光束吸收剂的重要性	190
7.3.2 利用布鲁士特角 (Brewster angle)	190
7.4 激光表面淬火的应用情况	191
参考文献	192

第 1 章 什么是激光加工

激光加工就是将具有高能量密度的、被聚焦到微小空间的激光用于加工的方法。这种加工方法有着各种各样的加工特性和优点。激光加工能够适用的领域有切割、打孔、熔接、热处理等。不同的加工，只要简单地调节被加工物表面的激光能量密度和辅助气体的条件就能够进行。图 1-1 中表示使用透镜来进行激光加工时，对加工性能带来影响的各种因素。这些因素有，影响加工对象对激光进行吸收的波长、决定能量大小的输出功率、脉冲输出功率的比例和频率、表示能量强度分布的激光光束模型等。加工透镜方面的因素是使激光聚焦时的透镜到焦点位置的焦距。这个焦距，影响在焦点位置上的光束直径和焦点深度。影响被加工物表面上的焦

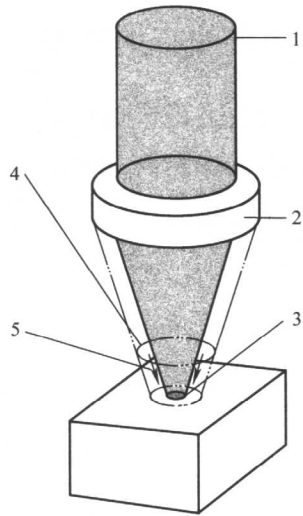


图 1-1 影响激光加工性能的因素

- 1—激光光束(输出形态, 波长, 输出, 比例, 频率, 光束模型)
- 2—加工透镜(焦点距离)
- 3—焦点光束(尺寸, 焦点位置, 焦点深度)
- 4—喷嘴(直径, 形状, 位置)
- 5—辅助气体(气体压力, 气体种类, 气体流量)

度分布的激光光束模型等。加工透镜方面的因素是使激光聚焦时的透镜到焦点位置的焦距。这个焦距，影响在焦点位置上的光束直径和焦点深度。影响被加工物表面上的焦

2 激光加工

点光束的因素是根据加工透镜的形式决定的光束尺寸，把焦点光束放在被加工物的上方还是放在下方的焦点位置。喷嘴因素是影响辅助气体流动均匀性和压力的喷嘴孔径、出口形状和加工材料表面的位置关系。辅助气体因素是影响排除熔融态金属的气体压力，影响加工质量和能力的气体种类等。

本章着重讲解影响激光加工的各种因素的基本特性。

1.1 激光加工的种类

激光加工是根据照射到被加工物表面上激光的能量密度和辅助气体的作用而进行各种加工的。图 1-2 表示了聚焦激光照射时间和根据照射而变化的被加工物表面温度的

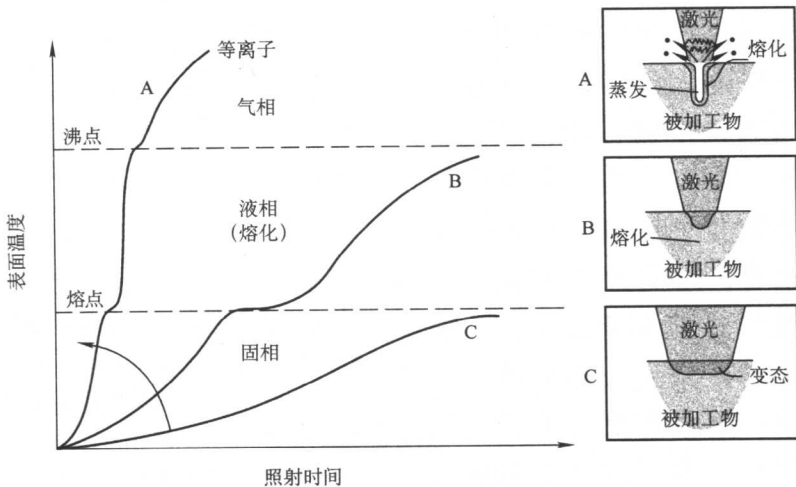


图 1-2 由激光照射引起的温度上升和相变化

A—切断 B—焊接 C—淬火

关系。随着被加工物的温度上升，从固相到液相变化，进一步向气相变化。照射的激光能量密度高，则像图中的 A 表示的那样，在短时间内从固相变到气相，成为打孔、切割加工及锁眼熔接^[1]的状态。图中的 B 是没有到达气相，而在液相状态停止加热的熔接状态，C 是表示在固相状态下停止温度上升的淬火状态。

1.2 激光加工的特征

由于激光加工的能量来源于光，并且是高密度的，所以在加工特性和施工方法方面与其他加工方式不同，具有各种各样的特征。

1. 优点

(1) 容易对陶器、玻璃（石英）、花砖、人工大理石等硬脆性材料进行加工。

(2) 因为是非接触加工，加工中没有反力，所以对塑料、布料、橡胶、纸等材质和超薄形加工物能高精度地进行加工。

(3) 结合数控装置，能加工圆弧和直线，或者由自由曲线制作的程序，能够加工切削和研磨加工不能加工的复杂形状和细微形状。

(4) 因为是非接触加工，所以加工中产生的噪声非常小，对加工机的设置环境无特殊要求，能够进行昼夜连续加工。

(5) 通过控制能量密度或强度分布，可以进行切割、熔接、热处理加工。

(6) 激光能够在大气中以小的扩散角传送到远方，所

以适合于大面积范围内的加工和分时加工。

(7) 利用半透镜等光学部件的激光光谱技术，可以进行高效率的加工。

(8) 由于焦点光束的直径很小，加热范围很小，所以能够进行加工变形和热变形的要求都很小的加工。

(9) 与电子光束相比，激光加工有不需要真空，没有X射线的产生，不受磁场的影响等优点，所以比较容易地组装加工系统。

(10) YAG激光可以使用光纤传送，所以容易与机器人组装成复杂路径的加工系统。

2. 缺点

(1) 安装在激光传送途中的光学部件（特别是透镜）的清洁度，会对光束的质量产生很大的影响，成为加工不良的原因。

(2) 消耗零部件的价格高。

(3) 进行金属材料的非熔化加工时，被加工物需要涂光束吸收剂来防止激光反射，所以加工后增加了除去吸收剂的工序。

(4) 加工厚板时，被加工物表面光束吸收状态的变化会影响加工质量，所以需要注意保管，不使其表面生锈或过于脏乱等。

加工人员在很好地理解上述特征的基础上，区别以前的加工方法进行选择使用。与其他的加工方法相比，激光加工的应用范围宽广，具有多种多样的用法。因此，激光加工对今后的生产制造来说是不可缺少的加工方法。

1.3 加工用激光的种类

在适用于加工的激光当中，自红宝石激光的发明以来，相继陆续开发了许多气体、固体、半导体、离子、液体、化学等激光。

1.3.1 各种激光与加工用途的关系

影响激光加工特性的代表性因素：影响聚光特性和光束光谱反射因数的光束波长，被加工物获得最优化加热状态所必要的输出功率形态，影响加工能力的激光平均输出功率。表 1-1 表示了各种加工用激光的种类和加工的例子。

考虑到各种激光的加工特性，需要按照加工的目的区别使用激光。但是，适合于激光加工机的发振效率、装置成本、运行成本、可靠性等生产线设备条件的激光是有限的。满足这个条件的有 CO₂ 激光和 YAG 激光，它们在产业界作为加工用激光被广泛地普及起来。

表 1-1 加工用激光的种类^[4]

激光名	波长/ μm	谐振形式	标准输出功率/W	应用加工例子
CO ₂	10.6	CW 往复 脉冲	$\approx 4 \times 10^4$ 400 (平均)	热处理 熔接 切割 熔接 清除加工
Ar +	0.4880 0.5145	CW	18	半导体加工
Nd: YAG	1.06	CW 往复 Q 开关	≈ 3000 5000 (峰值)	熔接 修剪加工

6 激光加工

(续)

激光名	波长/ μm	谐振形式	标准输出功率/W	应用加工例子
Nd: YAG	1.06	往复脉冲	500 (平均)	熔接 打孔
Nd: Glass	1.06	单脉冲	10^6 (峰值)	点熔接 打孔
Ruby	0.6943	单脉冲	10^5 (峰值)	点熔接 打孔
变色石	0.70~0.82	重复脉冲	70 18×10^5	打孔
激态	ArF	0.193	脉冲	光化学反应 光侵蚀
	KrF	0.249		
	XeCl	0.308		
	XeF	0.350		

1.3.2 激光波长和金属光谱反射因数的关系

图 1-3 表示波长和金属光谱反射因数的关系。图中各曲线表示的金属材料如下：A 为研磨的银，B 为铜，C 为

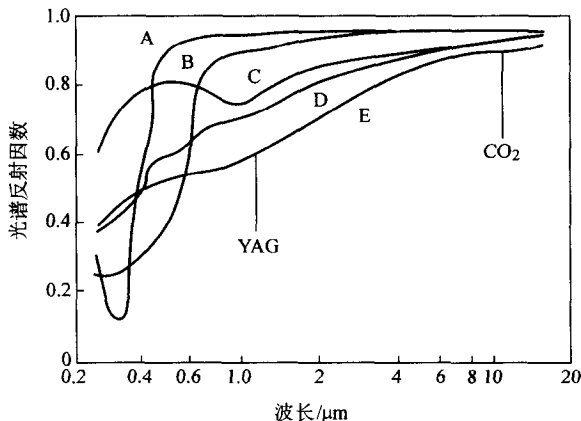


图 1-3 金属的光谱反射因数

A—研磨银 B—铜 C—铝 D—镍 E—碳钢