

A photograph of a Mitsubishi laser processing machine. The machine is red and black, with the brand name 'MITSUBISHI' printed in white on the red upper section. The laser head is positioned above a workpiece, which is a dark, textured surface. The background is a solid dark red color.

MITSUBISHI

[日] 金岡 優 著

图解激光加工实用技术

——加工操作要领与问题解决方案



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

014011308

TG665
28

图解激光加工实用技术

——加工操作要领与问题解决方案

[日] 金岡 優 著



北 京

冶金工业出版社



北航

C1697593

TG 665
28

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2013-6833 号

© 2007 年 金岡 優 著「続とき レーザ加工の実務 —— 作業の勘どころとトラブル対策」日刊工業新聞社

图书在版编目(CIP)数据

图解激光加工实用技术: 加工操作要领与问题解决方案/(日)
金岡 優著. —北京: 冶金工业出版社, 2013. 9

ISBN 978-7-5024-6364-9

I. ①图… II. ①金… III. ①激光加工—图解
IV. ①TG665-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013) 第 208695 号

出版人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 宋 良 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 禹 蕊 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6364-9

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2013 年 9 月第 1 版, 2013 年 9 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 6.5 印张; 192 千字; 198 页

26.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿信箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100010) 电话: (010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前言

首先需要说明的是，本书所论述的“激光加工”主要是指激光在金属加工领域中运用最为广泛的“激光切割加工”。起初，也曾考虑过介绍些激光在其他领域的加工方法，但为了能在技术上进行更深层次的挖掘，在此特对用途加以限定，仅对“切割”现象集中进行剖析。

聚焦于极小光点、能量密度极高的激光运用在加工上时，表现出多种多样与其他加工法所不同的优势。激光加工的优势得到充分发挥的加工领域有：切割、钻孔、焊接、热处理等，这些加工都是只需对被加工物表面的激光能量密度或辅助气体压力等参数进行调整便可进行操作。

之前也曾于1999年通过日刊工业新闻社出版过拙著《機械加工現場診断シリーズ⑦ レーザ加工》（中文版《激光加工》于2005年由机械工业出版社出版），主要是面向激光加工的工作现场，为现场工作人员介绍加工必备信息，出版后收到了海内外众多的读者来信，其中有些读者希望能用图解来代替文字讲解，也有些读者希望能对基本现象进行更详细的讲解，以便灵活运用，提高实用性。如此种种需求，主要是由于当用户在实际操作中出现问题时，仅靠一般的设备说明书或厂家提供的数据，不足以应对类似问题并加以解决。有鉴于此，我欣然应允了日刊工业新闻社的奥村功氏和新日本编辑规划的饭岛光雄氏的图解系列稿约。

在本书中,我根据自己20多年来从事加工技术工作的经验,对激光切割现象产生的原理进行了详细的讲解。其中有关加工原理方面的论述多属我个人见解,相信此领域中经验丰富的各位有识之士可能会持有不同意见,本人衷心希望能借本书出版发行之机得到各方指教,为激光加工提供更为广泛的讨论契机。

书中所举事例主要是从实际使用激光加工机的用户所提出的问题中筛选出来的,尽可能忠实地再现原提问的内容,以专题的形式进行了归纳总结。

编写中力求做到对各种现象的讲解论述配以图解形式进行说明,尽量采用分条叙述形式以求论述简明易懂,但还会存在些费解之处,读者可结合图例解决实际操作问题。受本人绘图能力所限,书中如有不尽如人意之处,还望读者谅解。

本书若能为有意更深刻理解激光切割现象、挑战各种加工难题的人士提供些许帮助,自当不胜荣幸。

最后,谨向为本书的出版给予大力支持与帮助的新武机械贸易股份有限公司的天满浩四郎先生、三菱电机自动化中心的郭澄若先生表示衷心的感谢。

金岡 優

2013年1月

目 录

第 1 章 加工现象的基础	1
1.1 影响激光加工性能的因素	2
1.2 氧化反应的燃烧作用	4
1.3 氧化反应的热传导与切割速度的关系	6
1.4 熔融金属的举动	8
1.5 拖曳线是如何形成的	10
1.6 什么是切缝的坡度	12
1.7 什么是穿孔	16
1.8 焦点位置与切割的关系	18
1.9 透镜焦距与切割性能的关系	20
1.10 激光功率、切割速度与切割结果的关系	22
1.11 脉冲频率与切割的关系	24
1.12 脉冲占空比与切割的关系	26
1.13 氧气辅助气流与切割性能的关系	29
1.14 氮气或空气辅助气流与切割的关系	32
1.15 加工材料要素与切割性能的关系	35
第 2 章 激光加工机的基础	39
2.1 加工头的结构与功能	40
2.2 光学元件的布局	42
2.3 热透镜效应对切割加工的影响	45
2.4 热透镜效应及其不良原因的分辨方法 (初级判断)	48
2.5 热透镜效应及其不良原因的分辨方法 (再次判断)	50
2.6 10 英寸透镜对焦点时的注意事项	52
2.7 辅助气流的基本特性	54

2.8 合适的喷嘴与辅助气体条件的选择	56
2.9 解决喷嘴挂渣的方法	58
第3章 碳钢材料的切割	61
3.1 穿孔类型与切割原理	62
3.2 缩短穿孔时间的方法	65
3.3 解决穿孔缺陷的方法	68
3.4 解决加工 12 毫米厚 25 毫米见方形状时频繁发生 过烧的方法	71
3.5 查找 16 毫米厚板产生过烧的原因: 被加工物原因	74
3.6 查找 16 毫米厚板产生过烧的原因: 加工机原因	77
3.7 解决 19 毫米厚板在加工中产生过烧的方法	80
3.8 解决 9 毫米厚板在穿孔时产生过烧的方法	82
3.9 解决 22 毫米厚板在开始条件处产生过烧的方法	85
3.10 适合碳钢厚板的光束模式	88
3.11 选择最适于碳钢厚板切割的喷嘴	91
3.12 防止厚板末端熔损的方法	93
3.13 生锈材料难以切割的原因及其解决方法	95
3.14 可使碳钢材料刻线变粗的刻线用加工条件	98
3.15 斜向切割的加工性能	101
3.16 花纹金属板切割中的注意事项	103
3.17 厚板切割面粗糙度的改善方法	105
第4章 不锈钢材料的切割	109
4.1 不锈钢无氧化切割的特长	110
4.2 解决不锈钢的须状毛刺所导致加工缺陷的方法	112
4.3 解决厚板在穿孔后开始加工部位产生加工缺陷 的方法	115
4.4 减少用空气或氮气切割薄板时在尖角处产生毛刺 的方法	118
4.5 解决不锈钢厚板氮气切割时产生毛刺的方法	120

4.6	不锈钢提取多个加工中的切割余量(间距)	123
4.7	如何寻找不锈钢无氧化切割时的最佳焦点位置	125
4.8	等离子体切割面的切割方法	128
4.9	解决厚度小于0.1毫米不锈钢切割不稳定的方法	130
4.10	减少不锈钢无氧化切割背面烧痕的方法	133
4.11	直接切割贴膜不锈钢的方法	135
4.12	减少1毫米厚板材在加工中产生变形的办法	137
4.13	选择适合于不锈钢无氧化切割的喷嘴	139
第5章 铝合金材料的切割		143
5.1	解决喷嘴与铝合金的“须状物”相接触的方法	144
5.2	防止厚板拐角处产生逆喷的方法	146
5.3	解决铝合金刻线不稳定的方法	149
5.4	解决铝合金穿孔不稳定的方法	151
第6章 铜材料的切割		155
6.1	铜的加工条件与切割上的问题及其对策	156
6.2	解决铜切割中不能进行穿孔的方法	159
第7章 高强度钢/碳钢材料的切割		161
7.1	解决切割3.2毫米厚高强度钢时出现挂渣的方法	162
7.2	切割中碳钢(S45C)、工具钢(SK)时的注意事项	164
第8章 金属材料共同的切割现象		167
8.1	解决毛刺黏着在管材内的方法	168
8.2	将两三张材料重叠起来切割的方法	170
8.3	如何减小切割的方向性	172
8.4	解决加工末端翘起的方法	175
8.5	解决小孔加工时产生过烧的方法	177
8.6	轻松打孔定位的方法	180

8.7 解决切割中产生等离子体的方法	182
8.8 提高底漆材料、表面喷漆材料的切割质量	184
第9章 非金属材料的切割	187
9.1 激光切割在木材加工上的应用	188
9.2 玻璃切割的可能性	192
参考文献	195
索 引	197

第1章

加工现象的基础

在了解激光的切割技术之前，首先需要熟悉与激光加工密切相关的专业术语以及一些基本加工现象。例如，金属因吸收激光辐射而熔化，铁因氧气的助燃而燃烧，熔化的金属因辅助气体的喷射而被从切缝中排出等等，这些都是最为基础的激光加工现象。

1.1 影响激光加工性能的因素

图 1.1-1 和图 1.1-2 中显示的是影响激光加工性能的各主要因素。加工性能的提高,离不开对这些要素的优化。

A 与激光束相关的要素

激光的输出形态中包含连续输出 CW 模式和脉冲模式两种。加工材料对激光束的吸收特性将受激光波长影响,而激光的波长又是取决于激光的工作介质。输出功率表示能量的大小,占空比表示在脉冲输出时的每一脉冲时间内激光照射时间所占的比例,频率表示每一秒内的照射次数,光束模式表示能量强度的分布。

B 与加工透镜相关的要素

焦点距离表示从透镜位置到焦点的距离,是直接影响焦点位置处的光斑直径与深度的要素。加工透镜中有能抑制像差的凹凸透镜和普通的平凸透镜两种。

C 与激光束的焦点光斑相关的要素

焦点的直径取决于透镜的规格,透镜的焦距越短,则焦点的直径就会越小。焦点位置是指聚焦点距离加工材料表面的相对位置,我们把材料表面之上方向定义为正、之下定义为负。焦点深度是指在焦点附近能得到与聚焦点处光斑直径大小基本相同光斑的范围。

D 与喷嘴相关的要素

喷嘴的直径决定着熔化、燃烧的可限制范围以及喷射于加工部位的辅助气体流量。喷嘴的前端之所以呈圆形,主要是为了能胜任对任何方向的加工,喷嘴与加工材料表面间的间距要尽量设定得窄一些。

E 与辅助气体相关的要素

辅助气体的压力影响着熔化金属从切缝中排出的情况。气体的种类将影响到加工质量与加工能力,切割时需要氧气的助燃作用;而焊接或热处理时,则需要对加工部位起保护作用。每一个喷嘴都存在着与其自身相配的最佳气体流量。

F 与加工材料相关的要素

板材的材质和厚度会影响到激光能量的消耗。材料的表面状况会影响到激光束吸收的稳定性,而加工形状又会影响到热量的扩散。

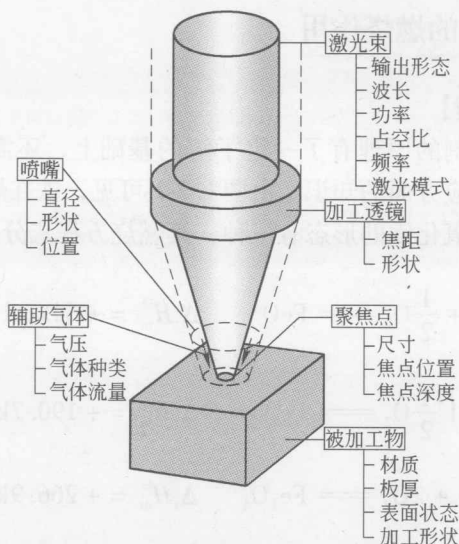
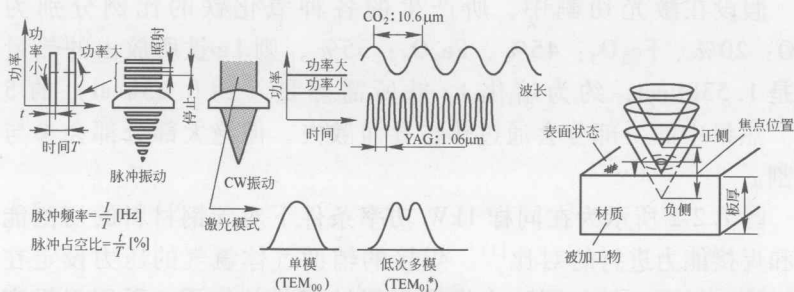
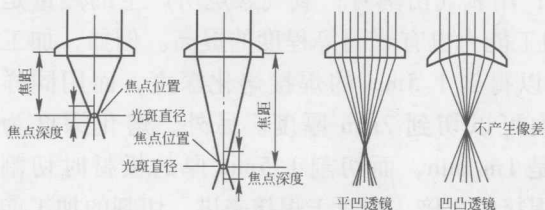


图 1.1-1 影响激光加工性能的要素

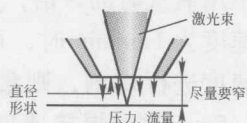


(a) 激光束的相关要素

(c) 聚焦光斑的相关要素



(b) 加工透镜的相关要素



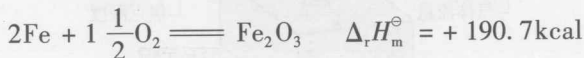
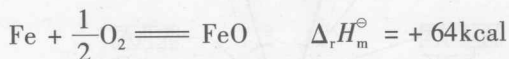
(d) 喷嘴与辅助气体的相关要素

图 1.1-2 各要素详情

1.2 氧化反应的燃烧作用

【现象与原理】

在对激光切割的原理有了一定了解的基础上, 还需要掌握一些有关铁的氧化反应方面的知识。由图 1.2-1 可见, 铁在燃烧时, 因燃烧反应而生成的氧化铁的形态有三种, 其燃烧方程式分别为:



以 1g 铁来换算, 其所产生的热量如表 1.2-1 所示, 可以看出铁在燃烧中会释放大量的热。

假设在激光切割中, 所产生的各种氧化铁的比例分别为 FeO: 20%、Fe₂O₃: 45%、Fe₃O₄: 35%, 则 1g 铁所放出的热量将是 1.538kcal, 约为熔化 1g 铁所需热量 (约 0.23kcal) 的 5 倍。热量中的一部分会通过热传导而散失, 但绝大部分都会参与切割。

图 1.2-2 所示为在同样 1kW 功率条件下对碳钢材料的切割能力和焊接能力进行的对比^[1]。焊接的辅助气体氩气的压力设定在 0.01MPa 以下, 仅起到防止焊缝表面被氧化的作用, 不用于提高加工能力 (熔化深度); 用氧气切割时, 氧气燃烧所产生的热量是不用氧气时的 5 倍, 加工能力也有着同等程度的提高。例如, 加工速度为 1m/min 时, 可以得到 1.5mm 的焊接熔化深度, 而用同样速度进行切割, 则最大可以切到 7mm 厚度。另外, 熔化深度为 1.5mm 时的焊接速度是 1m/min, 而切割 1.5mm 厚的板材时切割速度可达 5m/min, 是焊接的 5 倍。相对于焊接来讲, 切割的加工能力所提高的量, 基本是与氧气燃烧所放出的热量倍率 (约 5 倍) 是一致的。

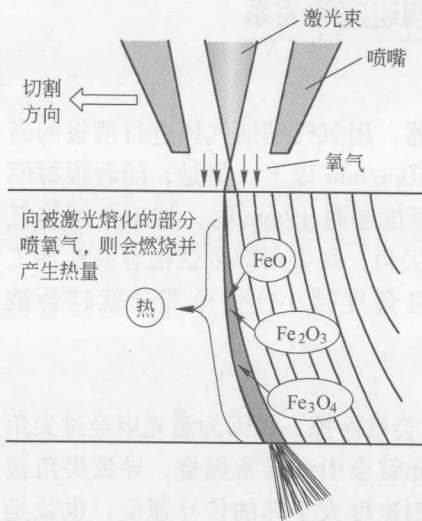


表 1.2-1 铁所产生的热量

成分	每 1g 铁所产生的热量/kcal
FeO	1.14
Fe ₂ O ₃	1.69
Fe ₃ O ₄	1.57

图 1.2-1 铁的燃烧

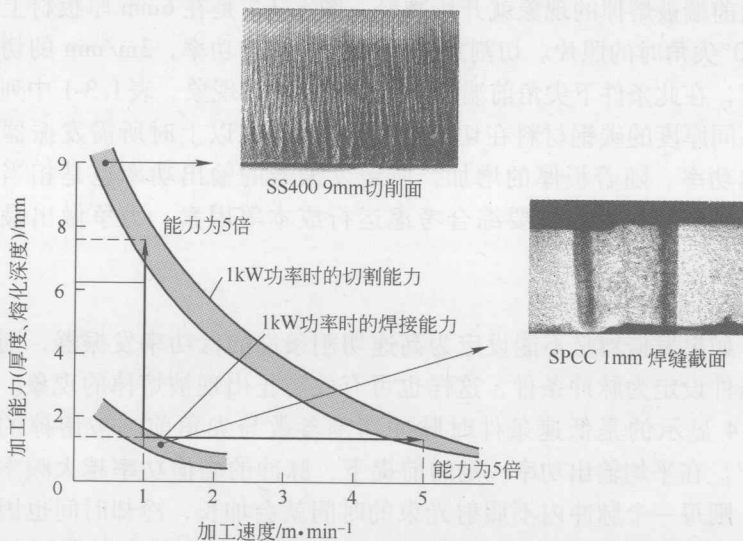


图 1.2-2 碳钢材料的激光焊接与切割加工能力的对比

1.3 氧化反应的热传导与切割速度的关系

【现象】

使用4kW级输出功率的发振器,用氧气辅助气体进行薄板的高速切割时,切割速度可以设定在10m/min以上。但是,随着板材厚度的增加,加工速度会变慢,当厚度超过19mm时,加工速度将低于1m/min。如果切割形状中存在尖角,则尖角部分就很容易在加工中被熔掉(如图1.3-1所示),且角度越小,尖角部分就越会被熔掉。

【原理】

如图1.3-2所示,尖角之所以会被熔掉,是因为激光束经过尖角时尖角部分已处高温,再照射激光就会引起异常燃烧,导致尖角被熔掉。解决方法就是让激光的切割速度大于热的传导速度,也就是说要让尖角部分的切割完成在材料被加热之前。

A 高速切割

在我们的加工实验中,当把激光切割速度设在2m/min以上时,尖角前端被熔掉的现象就开始减轻。图1.3-3是在6mm厚板材上切割60°尖角时的照片。切割条件是:3kW输出功率,3m/min的切割速度,在此条件下尖角前端没有出现被熔掉的现象。表1.3-1中列举了不同厚度的碳钢材料在切割速度为2m/min以上时所需发振器的输出功率。随着板厚的增加,所需发振器的输出功率也是相当大的。选择发振器时,要综合考虑运行成本等因素,力争做出最佳的选择。

B 脉冲切割

如果发振器是不能设定为高速切割条件的低功率发振器,则可将条件设定为脉冲条件,这样也可有效防止出现被熔掉的现象。图1.3-4显示的是低速条件时脉冲切割参数与尖角前端被熔掉的关系^[2]。在平均输出功率一定的前提下,脉冲的峰值功率越大频率越低,则每一个脉冲内不照射光束的时间就会加长,冷却时间也因而变长,尖角前端被熔掉的现象也就可以得到减轻。在设定脉冲峰值功率及频率时,须注意与切割速度的平衡,进行最优的设定。

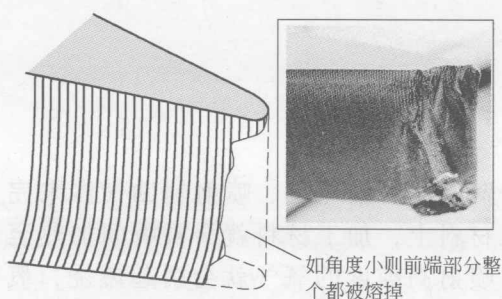


图 1.3-1 切割中尖角被熔

表 1.3-1 碳钢板厚度与切割所需发振器功率

板厚/mm	所需功率/kW
4.5	2
6	3
9	4
12	6
16	7

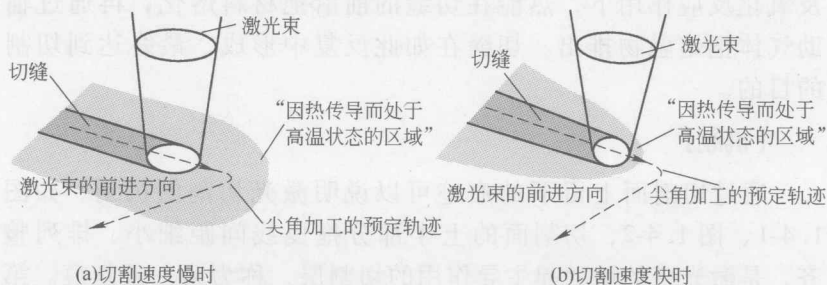
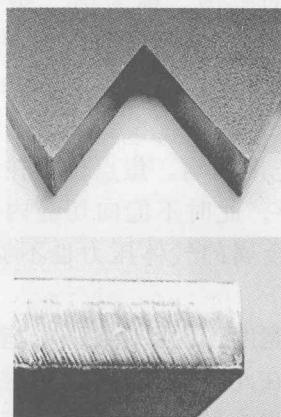
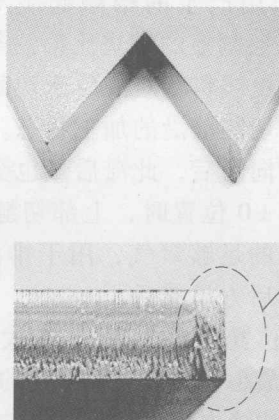


图 1.3-2 激光的切割速度与热传导速度的关系

图 1.3-3 碳钢的尖角切割
(高速切割)图 1.3-4 碳钢的尖角切割
(脉冲切割)

1.4 熔融金属的举动

【现象】

激光切割是通过照射聚焦过的激光束、喷射辅助气体来完成的。激光束照射到加工材料上,加工材料就会被瞬间加热至可熔化蒸发的温度,此时喷射高纯度的氧气就会引起燃烧,氧化反应所产生的热量会再促进加工。辅助气体还起到把燃烧中生成的物质及熔化金属从切缝中排出的作用。在激光束的照射及氧化反应作用下,热能在切缝的前沿把材料熔化,再通过辅助气体把熔融物排出。切缝在如此反复中形成,最终达到切割的目的。

【机制】

通过切割面上留下的痕迹可以说明激光切割的机制。如图 1.4-1、图 1.4-2,切割面的上半部分拖曳线间距细小、排列整齐,是激光束的熔融起主导作用的切割层,称为第一条割痕。第一条割痕的下面是在切割面上半层生成的熔融金属向下方移动、氧气燃烧作用产生的熔融起主导作用的范围,称为第二条割痕^[1]。第二条割痕的燃烧比第一条割痕要慢。切割速度快或板材很厚时,拖曳线将相对滞后于切割的行进方向。图 1.4-3 是 9mm 厚碳钢材料切割前沿的加工状态。第二条割痕的拖曳线相对于切割的行进方向滞后,此滞后量也受切缝宽度影响。焦点位置在材料表面 $Z = \pm 0$ 位置时,上部切缝为最小,此时不能向切缝内供应燃烧所需的足够氧气,用于排出熔融金属的气体压力也不够,拖曳线会向后方呈滞后。

把焦点位置向上方调整,扩大切缝的宽度,就将存在一个拖曳线的滞后量最小、切缝宽度适宜的范围。在此范围内的话,熔融金属可顺利从切缝内排出,向材料的热输入也为最少。如把焦点进一步向上方调整,则能量密度会下降,熔融能力会降低,拖曳线也会因此而滞后。