



溶液辅助 激光加工技术研究

龙芋宏 著 ■



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

溶液辅助激光加工技术研究

龙芋宏 著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

激光加工具有能量大、效率高和非接触等优点,在各类加工中得到广泛的应用。但在一些要求较高的产品中,因其有过大的热影响区、污染大和严重热变形等缺陷,激光加工无法胜任。在此背景下,溶液辅助激光加工技术得以兴起。本书在总结过去研究工作的基础上详细阐述了激光—溶液—物质相互作用的相关理论、溶液辅助激光加工相关的技术方法,为溶液辅助激光加工研究者提供参考。

本书主要作为企业工程师、从事激光加工工作的研究人员和相关专业研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

溶液辅助激光加工技术研究/龙芋宏著. —西安:西安电子科技大学出版社, 2017.9
ISBN 978-7-5606-4477-6

I. ① 溶… II. ① 龙… III. ① 激光加工—研究 IV. ① TG665

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 150704 号

策 划 陈 婷

责任编辑 杨 璠 陈 婷

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2017 年 9 月第 1 版 2017 年 9 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 10.875

字 数 252 千字

印 数 1~1000 册

定 价 24.00 元

ISBN 978-7-5606-4477-6/TG

XDUP 4769001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

前 言

激光加工技术是先进制造技术领域中的一个重要分支。随着激光技术的迅速发展,激光加工作为一种新工艺已经显示出了强大的竞争力,并在国内外尤其是国外得到广泛的应用,取得了显著的经济效益。

硅、玻璃、陶瓷和蓝宝石等材料的优质属性对很多产品来说是不可或缺的,但是对于这些硬脆性难加工材料,目前的激光加工技术只能满足部分加工需求。在一些要求较高的产品中,因激光加工具有过大的热影响区、污染大和严重热变形等缺陷,已无法胜任。在此背景下,兴起了溶液辅助激光加工技术。目前,溶液辅助激光加工技术属于一个新兴研究领域,很多方面处于初级阶段。在我国还未见有相关书籍出版,发表的文章虽然不少,但都比较分散且各有侧重点,而编著一本内容新颖并具有一定理论意义的溶液辅助激光加工方面的专著,是作者多年的梦想。

本书在总结过去研究工作的基础上详细阐述了溶液辅助激光加工的基础理论、技术方法及应用。全书共分6章。第1章是绪论,对溶液辅助激光加工的基础知识进行了介绍,是全书的铺垫;第2章是激光—溶液—固体交互的过程,对激光—溶液—物质相互作用的理论进行了介绍;第3章是溶液辅助激光加工中的流场分析,对溶液辅助激光加工过程中流场特性的相关研究进行了介绍;第4章是溶液辅助激光加工的热力效应,对溶液辅助激光加工过程中的热、力学效应和激光加工过程中的温度及热应力分析进行了介绍;第5章是溶液辅助激光加工的分子动力学模拟,介绍了溶液中高能量短脉冲激光加工过程中的分子动力学模拟;第6章是溶液辅助激光加工的实验研究,对溶液辅助加工中的实验研究、相关现象及机理进行介绍。

笔者希望通过本书的“抛砖引玉”,能促进溶液辅助激光加工理论和应用的研究,为溶液辅助激光加工相关问题的研究贡献一份力量。

本书由桂林电子科技大学龙芋宏编写。在本书的编写过程中,得到了两位导师华中科技大学史铁林教授、熊良才副教授的悉心指导和帮助;书中部分内

容参考了有关单位或个人的研究成果，相关著作均已在参考文献中列出。此外，在本书的出版过程中，还得到了李雪梅教授的帮助。在此一并表示由衷的感谢。

感谢廖志强、童友群、冯唐高、刘清原和刘鑫等研究生对本书的出版所作的贡献。

本书的研究得到了国家自然科学基金(课题编号：51065007、61366009)等的资助，在此表示感谢。感谢西安电子科技大学出版社在本书的出版过程中所付出的艰辛努力。

本书的内容多为作者近年来的一些研究成果。因本书涉及的内容目前还是个很新的研究领域，且属于一个多学科交叉的新领域，研究范围较宽，加之作者水平及能力有限，在一些新技术的研究和新问题的分析方面还存在不足，恳请专家和同行批评指正。

作者于桂林电子科技大学

2017年5月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 激光加工技术面临的挑战	(1)
1.3 溶液辅助激光加工技术	(2)
1.4 溶液辅助激光加工的方式	(5)
1.4.1 较低激光功率的溶液辅助激光加工	(5)
1.4.2 高激光功率的溶液辅助激光加工	(6)
1.4.3 激光束和水射流分开布置	(7)
1.5 本书探讨的几个问题及其意义	(8)
1.5.1 激光—溶液—固体交互的过程	(8)
1.5.2 溶液辅助激光加工中的流场分析	(8)
1.5.3 溶液辅助激光加工的热力效应	(9)
1.5.4 分子动力学模拟仿真	(9)
1.5.5 溶液辅助激光加工的实验研究	(10)
第 2 章 激光—溶液—固体交互的过程	(11)
2.1 相变现象	(11)
2.1.1 总体现象	(11)
2.1.2 从液体自由表面汽化	(12)
2.1.3 蒸气气泡的成核	(13)
2.1.4 气泡动态	(15)
2.2 液体的光学击穿和等离子体	(17)
2.3 液体和固体中的冲击波	(24)
2.4 空化	(27)
2.5 射流的产生	(30)
2.6 高温水和水蒸气中氧化物的行为	(31)
第 3 章 溶液辅助激光加工中的流场分析	(34)
3.1 喷嘴内流场的数值模拟	(34)

3.1.1	数值分析过程	(34)
3.1.2	仿真结果分析	(35)
3.1.3	理论验证	(38)
3.1.4	小结	(39)
3.2	喷嘴外流场的数值模拟	(40)
3.2.1	数值分析过程	(40)
3.2.2	仿真结果分析	(43)
3.2.3	理论验证	(46)
3.2.4	小结	(46)
3.3	喷嘴布局对流场特性的影响分析	(47)
3.3.1	流场特性分析过程	(47)
3.3.2	仿真结果分析	(49)
3.3.3	小结	(53)
3.4	不同装置的流场特性分析	(53)
3.4.1	水流装置的模型	(54)
3.4.2	仿真结果分析	(55)
3.4.3	小结	(57)
3.5	SPH 流场动态仿真分析	(58)
3.5.1	光滑粒子动力学原理	(58)
3.5.2	SPH 方法基本方程	(58)
3.5.3	材料的状态方程	(60)
3.5.4	熔融物喷溅结果分析	(62)
3.5.5	小结	(64)
第 4 章	溶液辅助激光加工的热力效应	(65)
4.1	激光微加工过程中的热效应研究	(65)
4.1.1	溶液中激光与物质相互作用的热效应	(65)
4.1.2	热传导方程的求解方法和精度	(66)
4.1.3	激光加热溶液中物质的热效应求解方法	(70)
4.1.4	小结	(72)
4.2	连续激光电化学微加工金属的热效应仿真分析	(72)
4.2.1	激光定点刻蚀时瞬态温度场的数值模拟	(72)
4.2.2	激光扫描加工时瞬态温度场的数值模拟	(77)

4.2.3	小结	(80)
4.3	脉冲激光电化学微加工过程中的热力效应研究	(81)
4.3.1	准分子激光作用溶液中物质产生瞬态温度场的分析	(81)
4.3.2	溶液中激光与物质相互作用的力学效应	(83)
4.3.3	小结	(92)
4.4	水射流激光加工的热应力分析	(92)
4.4.1	模型参照	(93)
4.4.2	模型构建方法	(94)
4.4.3	结果分析	(96)
4.4.4	小结	(102)
第 5 章	溶液辅助激光加工的分子动力学模拟	(104)
5.1	高能量短脉冲激光作用水分子的动力学模拟	(104)
5.1.1	模型构建及计算方法	(104)
5.1.2	模拟结果及分析	(108)
5.1.3	小结	(109)
5.2	高能量短脉冲激光作用铜原子的动力学模拟	(110)
5.2.1	模型构建及计算方法	(110)
5.2.2	模拟结果及分析	(112)
5.2.3	小结	(114)
5.3	高能量短脉冲激光作用水下铜原子的动力学模拟	(115)
5.3.1	模型构建及计算方法	(115)
5.3.2	模拟结果及分析	(116)
5.3.3	小结	(121)
第 6 章	溶液辅助激光加工的实验研究	(122)
6.1	连续激光电化学微加工的实验研究	(122)
6.1.1	半导体激光电化学刻蚀金属的实验研究	(122)
6.1.2	半导体激光电化学微加工不锈钢的机理分析	(126)
6.1.3	与刻蚀硅材料对比分析	(127)
6.1.4	小结	(128)
6.2	脉冲激光电化学微加工的实验研究	(128)
6.2.1	准分子激光电化学刻蚀硅工艺的实验研究	(129)
6.2.2	与激光直接刻蚀硅工艺的对比分析	(135)

6.2.3	准分子激光电化学刻蚀硅的机理分析·····	(136)
6.2.4	对比分析·····	(140)
6.2.5	小结·····	(143)
6.3	溶液辅助激光加工实验研究·····	(143)
6.3.1	实验条件·····	(144)
6.3.2	传统激光划片工艺·····	(146)
6.3.3	水下激光划片工艺·····	(148)
6.3.4	水射流激光划片工艺·····	(149)
6.3.5	小结·····	(151)
6.4	溶液辅助激光加工过程中的自聚焦现象·····	(151)
6.4.1	自聚焦理论·····	(151)
6.4.2	实验过程·····	(154)
6.4.3	水射流激光划片中的自聚焦现象·····	(155)
6.4.4	小结·····	(157)
参考文献 ·····		(158)

第1章 绪论

1.1 引言

硅、玻璃、陶瓷和蓝宝石的优质属性对很多产品来说是不可或缺的。硅具有优秀的机械和电性能,广泛应用于微电子、光伏和高密度系统;玻璃用来制作智能手机的显示屏和光学镜片等;陶瓷坚硬、化学性质稳定,可用来制作电子零部件、电路基板及电气绝缘体;蓝宝石极其坚硬、耐划伤,适用于半导体和LED技术。但硅、玻璃、陶瓷和蓝宝石有个共同点就是很难加工。同时,在电子产品追求高性能以及轻薄的趋势下,使用的硅片、玻璃等材料越来越薄,导致它们的抗拉、抗挤压强度越来越弱,对机械外力极为敏感,容易在加工时破损。这些问题迫使业界急需寻求一种低损伤的加工方法。激光技术因其独特的性质而成为理想的加工技术,被广泛用于各个加工领域。

1.2 激光加工技术面临的挑战

激光技术作为20世纪最伟大的发明之一,满足了现代化工业高速、高效、高质量的要求。近年来,随着各行各业对各种微型电子产品以及电子元器件应用量的逐日增长,应用激光加工技术对工程材料(特别是聚合物材料和高熔点材料)进行精密加工逐渐成为激光在制造业、航天等应用中发展前景最优的领域之一。

激光具有方向性好、亮度高、单色性好、相干性好、能量密度高等特点,激光技术被广泛应用于各种尖端领域的生产以及科研。另外,激光在开拓交叉性学科的研究方面也很有价值,如非线性光学、激光光谱学、激光医学等。据统计,从高端的激光医疗到常见的条形码识别,激光应用每年产生的市场价值高达上万亿美元。根据《2013—2017年中国激光加工设备制造行业产销需求预测与转型升级分析报告》,工业加工是我国激光产品应用的主要活跃领域,占据了40%以上的市场。

激光技术可以对各种材料进行加工,如对金属和非金属的加工,是基于激光束与物质相互作用的特性。激光加工包含了激光焊接、激光切割、激光打标、激光打孔等多种加工工艺。激光加工作为激光产业中的重要应用,比传统的机械加工更准确、更快速、更精密。激光独特的性质使之成为微加工的理想工具,目前被广泛应用于微电子、微机械等加工领域。其特点如下:

- (1) 范围广泛:不同功能的激光器几乎可以对任何材料进行加工。
- (2) 安全可靠:操作人员远程操作,采用非接触式加工,不会对材料造成机械损伤。
- (3) 精确细致:加工精度可以达到微米级。

(4) 效果一致：加工的重复性高，加工误差小。

(5) 高速快捷：一个脉冲时间最小能达到飞秒(fs)级，可减少加工时间。

(6) 成本低廉：对于不同零件的小批量加工，激光加工不用更换设备，更节省成本。

(7) 加工边缘光滑：激光加工的精度高，加工边缘毛刺较少。

(8) 热变形小：由于激光加工的高速性及能量集中性能，传到被加工区域周围的热量少，相对传统加工而言，引起材料的形变也非常小。

针对硅、玻璃、陶瓷、蓝宝石等难加工的硬脆性材料的微加工，因激光加工热影响区大、污染大、严重的热变形等缺陷，在集成电路的加工处理中始终无法被认可。尽管短波长激光(如紫外激光)能生产更小的切槽，但是YAG(Yttrium Aluminum Garnet)激光因其电学性能和经济性较佳常常被采用。由于YAG激光的热伤害严重影响硅基组件的功能，因而激光加工后，样片表面需要采用化学刻蚀或超声清洗去除重铸层。另外，加工中多余的热传导到材料内部而沿切割区域产生热影响，这会导致材料加工表面和内部出现明显的相位改变和裂纹。当激光脉宽大于皮秒时，这种缺陷不能忽略^[1]。为了减少热伤害，超短脉冲激光(如飞秒激光)多被用来直接打断工件的原子键而不至于造成热累积^[2]，但飞秒激光加工速度低，不适合投入生产且设备价格昂贵。这些问题迫使业界急需寻求一种低损伤的激光微加工方法。

1.3 溶液辅助激光加工技术

研究表明，在水下进行激光加工比在空气中进行激光加工有优势，例如水下激光加工可减少加工表面废屑囤积、增强冷却效果等。在水下进行激光加工的过程中，短脉冲高能量密度激光作用水下靶材时，靶材表面和激光束焦点附近的水吸收能量，产生等离子冲击波及空泡效应。同时，水在固体表面迅速升温时会产生爆发沸腾现象，爆发沸腾现象会伴随着蒸气爆炸及压力波，也会影响激光对材料的加工效果。水还是一种最常见的冷却剂，在水的冷却作用下，工件加工边缘热影响区明显减小，提高了加工精度，如图1-1所示。同时，激光的水下应用也是海洋开发和医学等行业迫切需要的技术手段，船舶的水下激光焊接技术以及医学上的激光手术都需要对激光在溶液环境下作用靶材的机理进行研究。

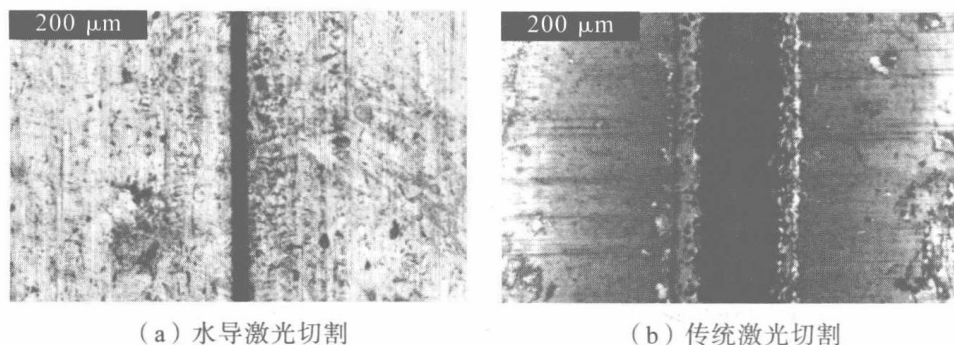


图 1-1 激光切割 50 μm 厚的不锈钢

水射流与激光复合加工技术的萌芽可以回溯到 19 世纪末至 20 世纪初^[3]。

1886 年, 瑞士的 Colladon 发现了水束导光现象。图 1-2 所示为根据水束导光原理设计的导光喷泉。

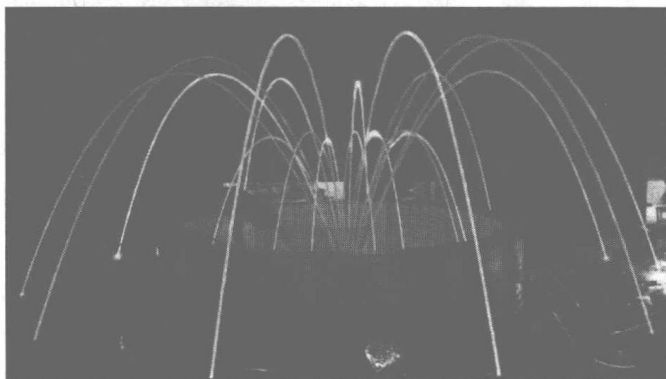


图 1-2 导光喷泉

1993 年, 瑞士洛桑联邦技术学院的 Bernold 博士进一步探索了该现象, 设计了水射流和激光耦合装置(见图 1-3), 从而实现了一种新的加工方式——微水导激光加工(Laser-Microjet, LMJ)(见图 1-4), 该技术主要依靠激光束穿过加压水腔聚焦在射流的喷嘴出口, 从喷嘴处射出的水束引导光束, 同时水束能对工件进行冷却, 并去除熔融材料。

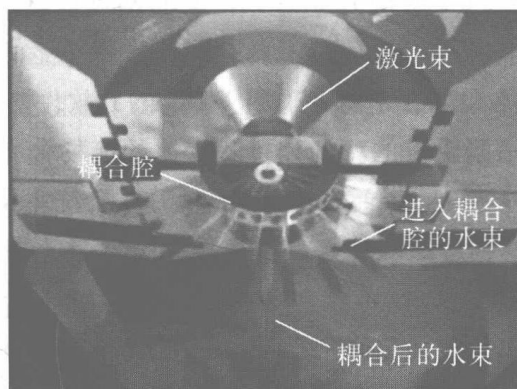


图 1-3 激光耦合装置结构图

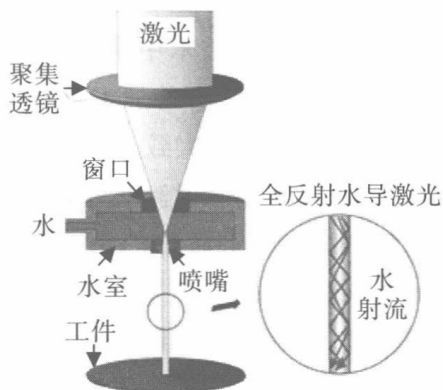


图 1-4 微水导激光加工示意图

1995年, Bernold博士申请了该技术的美国专利, 并以该技术为核心, 在瑞士成立了SYNOVA公司。SYNOVA公司目前主要生产四个系列的水导激光加工设备, 分别是切割、划片、研磨和模板, 在水导激光划片设备领域一枝独秀。与传统激光加工相比, 水导激光具有低热影响区、工作距离长、无熔渣等优势。因此, 水导激光加工技术引起了国内外很多学者和科学家的关注和研究, 并取得了一系列的成果。

2002年, 瑞士Frank Wagner博士等对射流的稳定长度和喷嘴孔径进行了实验研究, 总结了水束破碎的原因, 得到了不同喷嘴孔径下水束的最大稳定速度和最长稳定长度^[4]。2005年, 瑞士Philippe Couty博士等对水束中能量的分布进行了研究, 发现激光在水束中传播与激光在多模光纤中的传导相似, 研究结果显示对水束横截面能量分布影响最大的因素是聚焦透镜的数值孔径。数值孔径越大, 能量密度越小, 同时发现激光能量在横截面上的分布是均匀的^[5]。在该领域研究中, 研究者同时使用FLUENT软件建立了能量在水束中分布的数学模型, 仿真结果显示, 激光脉冲会影响水束的稳定性。2013年, Klaus Hock等从热影响区、表面碎屑厚度和切口宽度三个方面对水导激光加工和传统激光加工进行了实验对比, 结果显示, 水导激光加工在各个方面比传统的激光加工更为优异^[6]。在国内, 哈尔滨工业大学、厦门大学和江苏大学对水导激光进行了研究, 三者分别侧重于水导激光加工设备的研制、光路设计和水导激光加工的工艺仿真。2006年, 哈尔滨工业大学初杰成等设计了水导激光加工耦合装置及液压系统, 并将水导激光加工中各参数对加工工件质量的影响进行了对比^[7]。2009年, 叶瑞芳等为了避免水导激光中调焦等问题, 首次将无衍射光束引入到水导激光加工体系中, 设计出了具有同轴监测功能的水射流导引激光加工系统的新方案^[8]。2009年, 江苏大学詹才娟等采用FLUENT软件对水导激光打孔进行了仿真研究, 分析了打孔过程中不同阶段的温度分布及熔池的流场分布^[9]。2012年, 哈尔滨工业大学孙胜廷等研制了较为完整的水导激光加工系统, 该系统主要包含实时监测系统、激光加工系统、水束稳压系统、耦合系统等, 并将液压泵压力与喷嘴直径对射流稳定性的影响进行了研究^[10]。

但是, 水导激光加工设备中激光束对准喷嘴的过程很难控制, 稍有不慎就会导致烧蚀喷嘴。易耗件喷嘴的深宽比达到20, 孔径极小且材料昂贵的特性提高了使用成本; 高压低速水射流通过水腔转换为低压高速稳定的水束是很难控制的; 光路在水中的光程长, 受激拉曼散射的能量损耗大。这些技术特点导致了水导激光加工设备价格昂贵, 维护费用高, 应用受到极大限制。为了避开水导激光划片技术中水腔复杂和调焦困难等问题, 简化设备以及维护费用, 2009年, 一种水射流和激光复合的加工方式, 即水射流激光加工被学者关注和研究。水射流激光加工根据不同的射流形式大致分为两种——同轴射流和非同轴射流。2009年, Dinesh K. 等对同轴式和非同轴式水射流激光加工脆性材料进行了研究, 设计了非同轴的水射流耦合腔, 并将各参数对加工质量的影响作了对比^[11]。2013年, Suvradip M. 等对同轴式水射流激光水下加工进行了研究(见图1-5), 主要分析了激光能量、切割速度、射流速度等因素对切割宽度的影响。研究表明, 切口宽度随着激光能量的增加而缓慢增大, 随着切割速度的变大而逐渐变小^[12]。2014年, V. Tangwarodomnukun等对激光脉冲能量、水射流压力、光斑重叠率和射流压力对温度分布的影响进行了实验和仿真研



图 1-5 水导激光划片

究,得到了较好的仿真结果^[13]。2014年,Yuvraj K. Madhukar等对同轴式水射流激光划片进行了实验研究,研究发现在相同的激光功率下增加射流压力,可以有效减少重铸层和熔渣,同时对激光峰值能量和划片的深度进行了研究^[14]。2015年,Suvradip Mullick等建立了水射流水下激光加工的激光能量损失模型并进行了实验验证,研究表明,损失的激光能量主要来自水的汽化。水汽化损失的能量占总损失能量的40%~50%^[15]。

国内对水射流激光加工的研究还处于起始阶段,2013年,陈春映等对水射流激光切割 Al_2O_3 陶瓷进行了研究,研究表明,水射流可以有效减小重铸层的厚度,同时比较了激光脉宽、激光脉冲能量、水射流速度、切割速度对重铸层的影响,结果显示,水射流速度对重铸层厚度影响最大^[16]。2014年,张崇天等对水射流激光刻蚀晶体硅进行了实验研究,研究发现水射流速度对槽体深度会产生影响,随着射流速度的提高,槽体深度先降后升^[17]。2015年,谢兵兵等对水射流激光刻蚀 Al_2O_3 -SiC复合相陶瓷进行了研究,研究表明,水射流越大,刻槽的形状越接近“V”形,同时激光能量损失越大^[18]。2015年,陆平卫等对水射流激光在 Al_2O_3 陶瓷上打孔进行了研究,结果显示水射流可以减小孔的相对误差及锥度,同时也能减少熔渣堆积,提高打孔的质量^[19]。

1.4 溶液辅助激光加工的方式^[20,21]

1.4.1 较低激光功率的溶液辅助激光加工

水辅助激光加工的主要目的是带走加工区域的材料沉积。当激光在溶液中加工时,由溶液热对流和气泡诱导运动带走切屑。要达到这个效果,激光脉冲应短(在ms/ns范围),脉冲频率要低(小于kHz)。Morita等报道,脉冲长度超过100 μs ,重铸层不能消除。Cortona等^[23]的研究表明,在1ms脉宽和频率50kHz的条件下,由于气泡散光和碎屑吸收导致刻蚀孔宽而浅。图1-6所示为溶液辅助激光加工过程中不同的供液方式。其中,在图1-6(d)和(e)中,激光受溶液传输特性的影响很小。目标液体层的厚度通常是1mm。

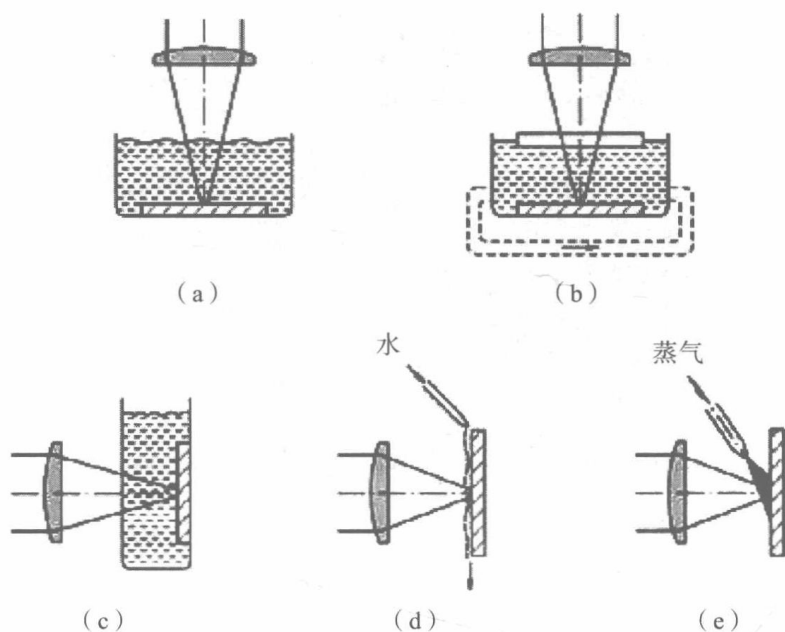


图 1-6 溶液辅助激光加工过程中的供液方式

1.4.2 高激光功率的溶液辅助激光加工

高功率激光加工不同于低功率激光加工。激光束通过一个切割头中的溶液传递到工件表面，如图 1-7 所示。切割材料的厚度可达 50 mm，连续激光或毫秒脉冲激光功率高达几千瓦。

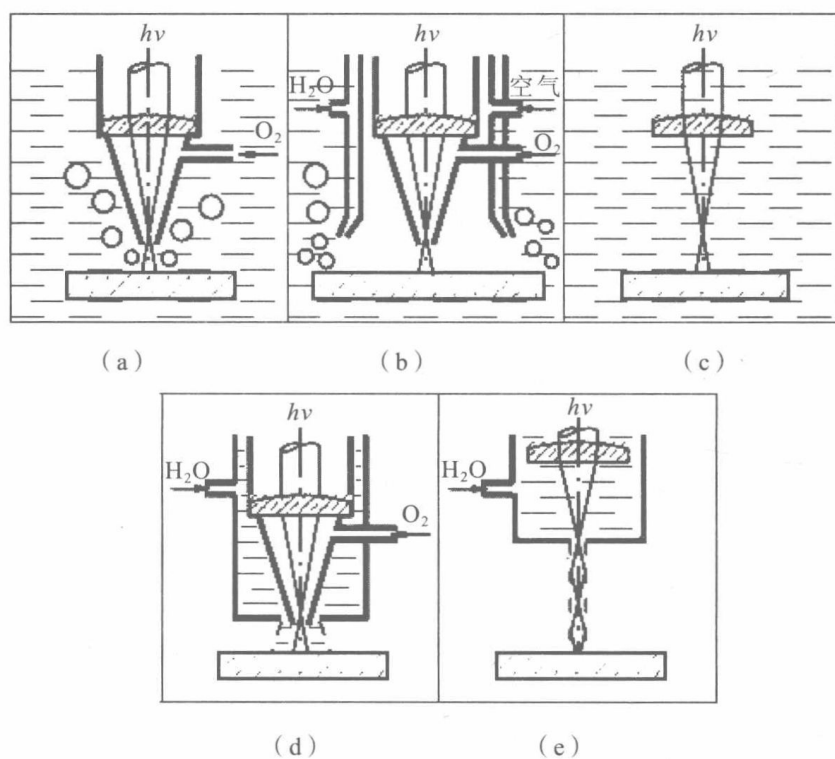


图 1-7 高激光功率的溶液辅助激光切割方式

在图 1-7 中,当采用 CO_2 激光器时,因为水对 $10.6\ \mu\text{m}$ 激光吸收大,在工件表面上需要一个干燥区,见图 1-7(a)、(b)、(d)。而 Nd:YAG 激光器(约 $1\ \mu\text{m}$ 波长)透过水的激光能量损失小,光可通过水(见图 1-7(c))或甚至沿水射流(见图 1-7(e))传送。在图 1-7(d)中,加入水的目的是冷却工件;同时发现这种方案可以减少废物气体和微粒排放或释放进入大气。在图 1-7(e)中,水射流被用来传输激光束,激光束在水流束中实现全反射传输,使喷嘴与工件之间避免了聚焦问题(在切割非平面材料时避免动态聚焦)。

1.4.3 激光束和水射流分开布置

这种布置简单、经济,因为工作头或工件不需要浸泡在液体中,所以通用的激光切割设备可以很容易地用一个水射流喷嘴实现升级。这种布置又分为水射流在激光束之前、水流束和激光束相交、水射流在激光束之后三种方式,分别如图 1-8、图 1-9 和图 1-10 所示。

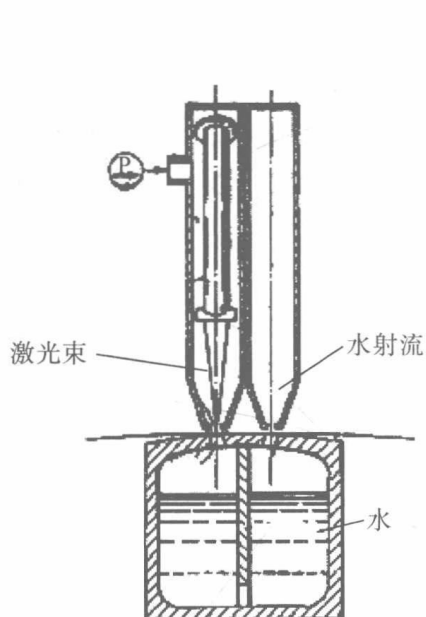
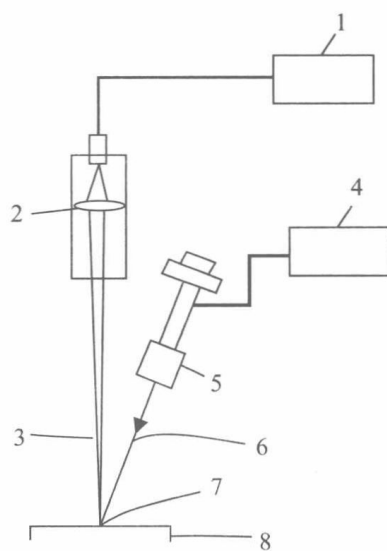


图 1-8 激光水射流分切机的原理图



1—激光器；2—聚集透镜；3—激光束；4—水泵；
5—喷嘴；6—水束；7—加工点；8—样品

图 1-9 组合喷水/激光切割设备

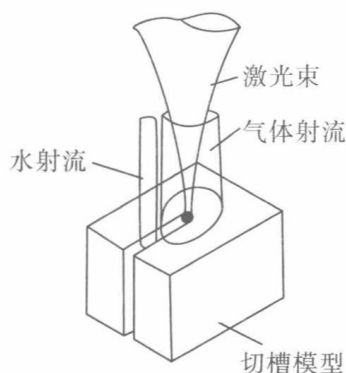


图 1-10 水射流支持的激光切割方法

1.5 本书探讨的几个问题及其意义

1.5.1 激光—溶液—固体交互的过程

激光加工技术是指光学系统将高能量的激光束聚焦在一块很小的区域内(即光斑),并在光斑区域内达到很高的功率密度,在短时间内实现对各种材料的加工。整个加工过程涉及多个学科领域,其中包括光学、物理学、传热学、材料学、流体力学等。其过程相当复杂,所以激光与物质相互作用过程及其理论一直是人们研究的重点。

随着激光技术的快速发展,应用领域的不断扩展,原有的激光与固态物质相互作用模型和理论在某些领域不太适用。在此背景下,一些学者对激光与液态物质或水中靶材的相互作用机理和实验进行了研究。当激光作用水下靶材时,激光束需要穿过水层才能到达靶材表面,但水会吸收激光束的能量。水对激光能量的吸收会随水体环境、水下光程、水体流速以及激光波长的不同而变化,所以进行水下激光加工时,这些因素是必须考虑的。

激光与水下物质相互作用是一个十分复杂的物理过程,迄今为止,在激光加工水下物质这一领域无论是理论还是实验研究方面,其进展明显落后于激光对气态或固态物质相互作用机理的相关研究。本书在总结、学习国外先进技术和理论的同时,也力求通过自主创新,在某些方面取得突破。

1.5.2 溶液辅助激光加工中的流场分析

基于水射流激光划片技术,对其中的关键元件喷嘴的流场特性进行数值仿真研究。首先从喷嘴的内部流场入手,研究不同结构的喷嘴在激光束与水射流同轴的条件下的内部速度、压力、湍流动能损耗情况。其次通过建模仿真射流喷嘴的外流场情况,以四种不同形状的喷嘴为例,通过观察四种不同喷嘴的速度、压力、水的体积分数云图,比较在进入气液两相流的射流工况下各自数值的变化。针对激光划片工艺,根据实验结果研究流场特性是否满足该工艺的要求,通过各种参数的比较挑选出最优的喷嘴结构。最后,分析喷嘴不同布局的条件下对激光水射流划片工艺的影响。通过改变冲蚀角度值,从模拟仿真结果中提取不同冲蚀角度下的速度、压力云图与前部分研究的激光束与水射流同轴的工况下进行比较分析,得出此工况下最佳的冲蚀角度,为后续的研究提供一定的理论指导。

在溶液辅助激光加工中,水层流动特性是影响加工效果的一个重要因素,而这方面的研究还处于初级阶段。本书通过对溶液辅助激光加工中的三种不同的水辅助激光流体装置,借助 Fluent 流体分析软件,研究了三种流体装置中流体的流动特性,可为水辅助激光加工中选取放置工件的位置、选取流体入口速度提供相关的理论依据。

同时,在进行水辅助激光加工时,样片熔层内的沸腾相当剧烈,温度在瞬间内急剧升高,导致熔层内部压力迅速升高,为了释放这部分压力,会形成相似于爆炸的熔融物质喷溅。传统的基于网格的有限元模拟方法在模拟变形较大较剧烈的问题时,常常会出现网格畸变等一系列问题而导致计算无法进行,不适合熔融物喷溅模拟。本书基于光滑粒子动力学原理对熔融物喷溅进行了模拟,为探究物质喷溅和溶液相互作用的机理提供了一定的理