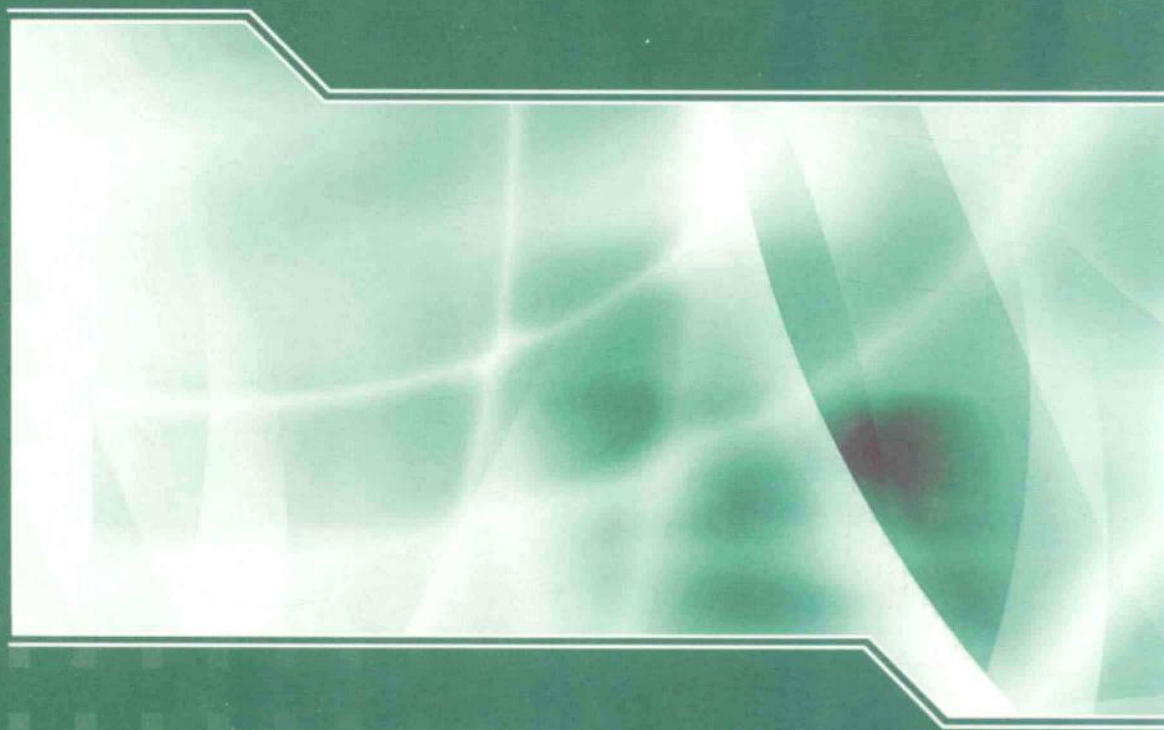


超短脉冲 激光微细加工技术

——齐立涛 著



HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

超短脉冲激光微细加工技术

齐立涛 著

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书共分7章,主要对近些年来发展迅速的超短脉冲激光微细加工技术进行了系统介绍,重点介绍了超短脉冲激光微细加工技术的特点,超短脉冲激光微细加工系统的组成及工艺实验方法,超短脉冲激光和材料的作用机理,超短脉冲激光直写加工微细结构及超短脉冲激光在固体材料表面诱导周期微纳米结构,还介绍了超短脉冲激光微细加工技术的主要应用和未来发展趋势,最后介绍了超短脉冲激光的安全防护知识。

本书可供机械制造、材料加工、机电一体化等专业的科研与技术人员参考,也可作为高等院校从事相关专业的研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

超短脉冲激光微细加工技术/齐立涛著. —哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社,2012. 11
ISBN 978-7-5661-0469-4

I. ①超… II. ①齐… III. ①脉冲(力学) — 激光加工
IV. ①TG665

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 265784 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 7.25
字 数 150 千字
版 次 2012 年 11 月第 1 版
印 次 2012 年 11 月第 1 次印刷
定 价 16.00 元
<http://press.hrbeu.edu.cn>
E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

本书主要介绍了超短脉冲激光微细加工的基本原理,系统阐述了超短脉冲激光微细加工特点、设备、工艺、应用、发展和安全防护等。全书共分7章:第1章详细介绍了超短脉冲激光微细加工的特点、研究现状及未来发展趋势;第2章讲述了飞秒激光微细加工系统和加工结果的检测方法及设备;第3章对超短脉冲激光和材料作用的机理以及超短脉冲加工中去除材料的主要机理等进行了介绍;第4章对飞秒激光加工蓝宝石的主要工艺过程进行了阐述;第5章对飞秒激光直写加工微细结构和超短脉冲激光在不同领域中的应用等进行了介绍;第6章对于飞秒激光在固体材料表面诱导周期性微纳米结构进行了介绍;第7章阐述了激光微细加工中的安全防护和标准。

本书是作者多年来学习和研究激光微细加工工艺、设备和应用成果的一个总结。在将多年来研究的成果进行系统归纳、整理编写的过程中,参阅并摘引了大量专家、学者的论文和论著,同时得到了黑龙江科技学院机械工程学院刘春生教授的帮助;并得到黑龙江科技学院的大力支持,在此特向学院领导和为本书出版给予支持与帮助的同志们表示衷心的感谢。

由于作者的学知有限和技术的迅速发展,书中难免存在缺点和错误,敬请广大读者提出批评和指正。

著 者

2012年2月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 超短脉冲激光微细加工概述	1
1.2 超短脉冲激光微细加工特点	2
1.3 超短脉冲激光微细加工的研究现状	6
1.4 超短脉冲激光微细加工的未来发展趋势	6
第2章 飞秒激光微细加工系统组成及检测设备	7
2.1 飞秒激光微细加工系统	7
2.2 飞秒激光微细加工区域的主要检测方法和设备	16
第3章 超短脉冲激光和固体材料的作用机理	23
3.1 超短脉冲激光和固体材料相互作用的物理过程	23
3.2 超短脉冲激光和材料作用中的能量传递和热传导	27
3.3 飞秒激光烧蚀材料机理	38
3.4 材料的激光损伤机理	45
第4章 飞秒激光加工蓝宝石	47
4.1 飞秒激光加工蓝宝石概述	47
4.2 飞秒激光加工蓝宝石实验方法与设备	48
4.3 飞秒激光静态照射蓝宝石	49
4.4 飞秒激光加工蓝宝石的不同晶面	55
4.5 飞秒激光加工蓝宝石的机理	56
4.6 飞秒激光在蓝宝石表面加工微槽	57
第5章 飞秒激光直写加工微细结构	59
5.1 飞秒激光直写加工概述	59
5.2 微细结构的常用加工方法	59
5.3 飞秒激光微细加工的精度	60

5.4	飞秒激光加工固体材料的加工阈值·····	62
5.5	激光脉冲能量和脉冲数量对加工尺寸的影响·····	62
5.6	飞秒激光直写加工微细结构·····	64
5.7	飞秒激光微细加工的应用·····	66
第6章	飞秒激光在固体材料表面诱导周期性微纳米结构 ·····	82
6.1	激光诱导周期性微纳米结构概述·····	82
6.2	激光诱导周期性微纳米结构的现状·····	82
6.3	激光诱导周期性微纳米结构的原理·····	83
6.4	激光诱导周期性微纳米结构实验方法及设备·····	84
6.5	飞秒激光在固体材料表面诱导长周期微纳米结构·····	84
6.6	飞秒激光在固体材料表面诱导短周期微纳米结构·····	89
6.7	激光诱导周期性微纳米结构的应用·····	94
第7章	激光加工安全防护及标准 ·····	98
7.1	激光的危险性·····	98
7.2	激光危险性分类·····	101
7.3	激光防护·····	102
7.4	不同类别的激光产品所使用的安全防护·····	106
7.5	激光安全标准·····	107
参考文献	·····	109

第1章 绪 论

超短脉冲激光的微细加工,也就是具有非线性效应的多光子吸收过程的超短脉冲激光的微细加工,具体来讲就是用聚焦的超短脉冲激光对材料进行加工。超短脉冲激光微细加工主要分为两大类:一类是多光子吸收进行材料消融或改性;另一类是多光子吸收进行材料聚合。超短脉冲激光微细加工主要是指激光脉冲宽度小于10皮秒(ps, 10^{-12} s)的激光微细加工,本书主要是以飞秒(fs, 10^{-15} s)激光微细加工为主对超短脉冲激光微细加工技术进行介绍。

1.1 超短脉冲激光微细加工概述

20世纪80年代,飞秒激光器在美国问世,飞秒技术得到迅速发展;90年代初,随着宽带可调谐激光晶体和自锁模技术的出现,飞秒激光技术得到了突飞猛进的发展。以掺钛蓝宝石为代表的新一代飞秒激光器输出光脉冲的持续时间最短可至5 fs。飞秒激光是一种以脉冲形式运转的激光,持续时间短。1飞秒就是10的负15次方秒,也就是一千万亿分之一秒,它比利用电子学方法获得的最短脉冲要小三个数量级,是人类目前在实验条件下所能获得的最短脉冲。飞秒激光具有三个显著特点:第一个特点是超快;第二个特点是具有非常高的瞬时功率,可达到百万亿瓦,比目前全世界发电总功率还要多出百倍;第三个特点是超强,当把飞秒激光聚焦时,所产生的电磁场的强度比原子核对其周围电子的作用力还要高数倍。

飞秒激光的一个重要应用就是微细加工。通常,按激光脉冲标准来讲,持续时间大于10 ps(相当于热传导时间)的激光脉冲属于长脉冲。用长脉冲激光加工材料,由于热效应使周围材料发生变化,从而影响加工精度。脉冲宽度只有几千亿分之一秒的飞秒激光的微细加工,是在极短的时间、极小的空间和极端的物理条件下对材料进行加工的,可以说“超快”“超微”与“超强”的组合是飞秒激光微细加工的独特之处。用超短脉冲激光进行材料加工(或处理)不仅可以改进长脉冲激光加工材料的不足之处,而且还可以完成传统激光加工无法实现的工作。飞秒激光具备极高的三维光子密度,可对各种材料实现逐层、微量加工;飞秒激光加工的热影响区域极小,并且不存在长脉冲激光或连续激光加工中的等离子体屏蔽效应,这就使得其能量利用效率和加工精度都非常高。当用飞秒激光加工透明材料时,加工过程不受材料本身的线性吸收率的影响,同时,对材料表面或内部的缺陷不敏感。从光和物质相互作用的角度来看,飞秒激光加工主要涉及多光子电离的过程,在机理上不同于传统激光加工。飞秒激光进行微细加工有比较确定的加工阈值,加工和不加工有着明显的区分,因此加工过程重复性好。

飞秒激光微细加工中的“加工”二字具有广义性,它可以是对物质在原子、分子水平上的操纵,或者是对物质在微小区域内某些重要属性的改变与处理,而并非只是通常人们所理解的

“机械加工”。飞秒激光微细加工不仅具有通常基础应用研究的特征,而且涉及到激光物理、原子分子物理、激光光学、材料学、热动力学、等离子体物理、流体气体力学等广泛知识,属于跨学科的应用。

1.2 超短脉冲激光微细加工特点

超短脉冲激光微细加工的根本特点是焦点处极高的光功率密度使材料产生强烈的非线性的多光子吸收,并且不同的材料存在不同的多光子吸收阈值。有精确的多光子吸收区域,该区域可以远小于焦点光斑直径,该区域的光能(有用光)将被高效吸收,而这个区域以外的光能(无用光)将不被材料吸收。超短脉冲激光微加工的特点可简单总结如下:加工精度高,不受光的衍射极限的限制;超短脉冲激光的高速能量局部注入,回避了等离子体屏蔽效应和热扩散损失;有用光的转换效率极高,这主要是由于多光子吸收率大(正比于 I^n);熔融区域很小;重铸层(热影响区)很薄;基本不产生微裂纹;不产生导致结构损坏的冲击波;不损坏临近结构组织等。

1.2.1 极高的峰值功率和非线性吸收

飞秒激光借助于啁啾脉冲放大技术,单个脉冲能量从几个纳焦耳就可放大至几百毫焦耳、甚至焦耳量级,此时脉冲的峰值功率可达 GW(10^9 W)或 TW(10^{12} W),再经过聚焦后的功率密度为 $10^{15} \sim 10^{18}$ W/cm²,甚至更高。具有如此极高峰值强度和极短持续时间的光脉冲与物质相互作用时,能够以极快的速度将其全部能量注入到很小的作用区域,瞬间内的高能量密度沉积将使电子的吸收和运动方式发生变化,避免了激光线性吸收、能量转移和扩散等影响,从而在根本上改变了激光与物质相互作用的机制,使飞秒激光加工成为具有高精度、高空间分辨率和高广泛性的处理过程。

1.2.2 等离子体屏蔽的回避

飞秒激光加工的光效率极高,这是因为飞秒激光脉冲加工不会有长脉冲激光加工常产生的等离子体屏蔽效应。飞秒激光脉冲在等离子体膨胀前,已全部注入到了固体表面。激光等离子体从表面向外侧膨胀时的膨胀速度约为 10^4 m/s 量级,若使用 100 fs 以下超短脉冲激光加工,很明显,在等离子体膨胀前,激光照射就终止了,回避了等离子体屏蔽。

1.2.3 热扩散损失的回避

飞秒激光加工的最大特点是与物质的热扩散时间相比,激光脉冲可以在极短的时间内向加工区注入能量。因此照射到材料中的能量在热扩散前,激光脉冲就已终止,因此能量没有在照射区域内的热扩散损失,可得到高效加工。例如,当脉冲宽度为1 000 fs时,即使是热扩散系数较大的金属,热扩散长度也只有10 nm,金属表面吸收激光的区域也只有数纳米;当脉冲宽度为100 fs时,激光照射时的热扩散长度只有1 nm,基本可以忽略。因此,由于光斑的焦点中心区域的光密度极高,又无热扩散损失,使这一微小区域达到以往激光加工所无法达到的高温高密度状态,使极少的材料汽化获得很高的加工精度。

1.2.4 飞秒激光微细加工的优点

飞秒激光微细加工的上述特点,使得飞秒激光微细加工和长脉冲激光微细加工相比具有如下的优势。

1. 加工过程的非热熔性

这是飞秒激光加工的最重要特征。飞秒激光在极短的时间和极小的空间内与物质相互作用,由于没有能量扩散等影响,向作用区域内集中注入的能量获得有效地高度积蓄,大大提高了激光能量的利用效率。作用区域内的温度在瞬间内急剧上升,并将远远超过材料的熔化和汽化温度值,使得物质发生高度电离,最终处于高温、高压和高密度的等离子体状态。此时,材料内部原有的束缚力已不足以抑制高密度离子、电子气的迅速膨胀,最终使得作用区域内的材料以等离子体向外喷发的形式得到去除。由于等离子体的喷发几乎带走了原有全部的热量,作用区域内的温度获得骤然下降,大致恢复到激光作用前的温度状态。在这一过程中严格避免了热融化的存在,实现了相对意义上的“冷”加工,大大减弱和消除了传统激光加工中热效应带来的诸多负面影响。如果将材料的密度设为 ρ ,比热容设为 C_v ,激光作用空间体积设为 V ,吸收能量 ΔE 所升高的温度 ΔT 可以用 $\Delta E = C_v \rho V \Delta T$ 表示。例如对于比热为 $0.75 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,密度为 $2.2 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的石英材料来说,脉冲能量为 $1 \mu\text{J}$ 的入射激光在 $1 \mu\text{m}^3$ 的体积内被瞬间吸收所产生的温度约 10^6 K 。若石英内部压力随温度变化的速率为 $2 \times 10^5 \text{ Pa/K}$,则这一温度所导致的压力可高达200 GPa。在这种工作条件下,任何物质都将在瞬间内转变成气态的物质,实现加工过程。不仅如此,由于等离子体屏蔽的回避,提高了能量耦合效率。

2. 加工过程的准确性

一方面,对于飞秒激光加工,在每一个激光脉冲和物质相互作用的持续期内,避免了热扩

散的存在,在根本上消除了类似于长脉冲激光加工过程中的熔融区、热影响区、冲击波等多种效应对周围材料造成的影响和热损伤,将加工过程所涉及的空间范围大大缩小,从而提高了激光加工的准确程度。另一方面,在高浓度、电子气迅速膨胀和向外喷发过程中,由于电子比离子质量小且动能大,使得它们首先与物质脱离,随之而来的是离子。这些离子都具有正电荷,使得它们在向外膨胀和喷发过程中相互排斥,不会因液滴的洒落和重新凝结而对周围表面造成各种污染。

3. 加工尺寸的亚微米特征和 3D 空间分辨率

这是飞秒激光微细加工的另一个重大特征。首先,在飞秒激光微细加工过程中,激光与物质之间的能量转移是建立在多光子吸收的基础上,材料对能量的吸收与光子强度的 n 次方成正比,即能量的吸收高度依赖于激光强度 I^n 。由于激光的强度在空间上一般呈高斯型分布,即入射激光经过聚焦后在焦斑中心的位置强度最大,趋向于焦斑边缘时,强度逐渐减弱。如果调节入射激光束,使得焦斑的中心强度刚好满足材料的多光子电离阈值,则加工过程中的能量吸收和作用范围就被仅限于焦点中心位置处的很小一部分体积内,而非整个聚焦光斑所辐照的区域。例如,当入射飞秒激光经过聚焦后的强度包络如图 1-1 中的实线所示时,其相应的光斑直径(FWHM)值为 $1\text{ }\mu\text{m}$,则加工过程中的 4 光子包络为图 1-1 中的点画线所示,如果控制激光脉冲能量,使得中心强度的 70% 刚好满足 4 光子吸收阈值,则相应的加工范围直径约为 $0.35\text{ }\mu\text{m}$ 。

另外,如果将聚焦强度位于阈值附近的飞秒激光射向某些透明材料的内部空间,当光束穿过表面行进时,一方面,材料的透明特征使得光束的共振线性吸收可以忽略,另一方面,较低的光束强度又无法满足材料的多光子非线性吸收要求,因此,光束几乎可以毫无衰减地到达材料内部的聚焦点。事实上,入射激光唯有在该点位置才能获得较高的功率密度,发生多光子吸收和电离,从而实现材料内部三维空间上任意部位的超精细加工,使得飞秒激光加工过程具有严格的空间定位选择能力。

4. 加工材料的广泛性

飞秒激光加工过程中,脉冲的超高峰值使得材料对入射激光进行多光子吸收,而非共振吸收,这就造成飞秒激光加工高度依赖于激光强度的变化,具有确定的阈值特征。另外,由于多光子吸收程度和电离阈值仅依赖于材料中的原子特征,而与其中的自由电子浓度无关,因此当脉冲持续时间足够短、峰值足够高时,飞秒激光可以实现对任何材料的精细加工、修复和处理,而与材料的种类和特征无关。

5. 加工能量的低耗性

由于飞秒激光的脉冲持续时间非常短,能量在时间上高度集中。在同等能量的情况下,飞

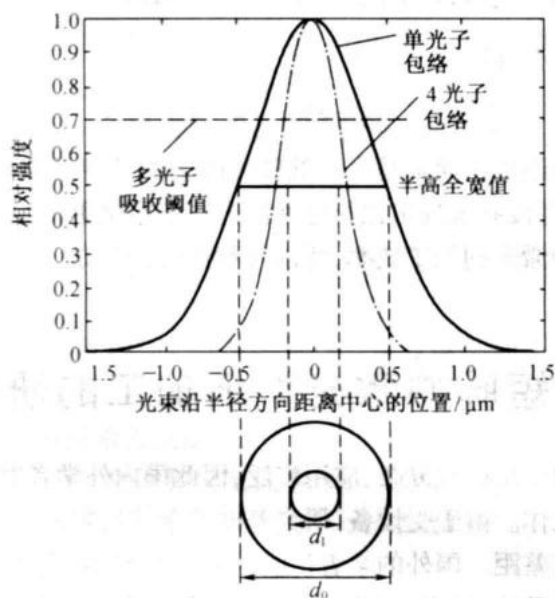


图 1-1 飞秒激光微加工突破光束衍射极限的限制

秒激光的峰值强度大于纳秒长脉冲的 10^5 倍,因此飞秒激光加工所需的脉冲数量阈值一般为毫焦耳或微焦耳量级,较传统激光加工消耗的光能量低。

1.2.5 飞秒激光微细加工的缺点

飞秒激光除具有上述优点外,目前还存在一些缺点,具体如下。

1. 设备昂贵

由于飞秒激光(100 fs, 1 ~ 5 kHz, 1 mJ)放大器已经商品化,其价格在 25 ~ 30 万美元左右。与自动控制机械平移台和光学传输、聚焦系统一体化的加工机也已经有商品出售,价格在 45 ~ 75 万美元左右。

2. 维护费用高和周期长

飞秒激光器在工作过程中,需要纯净水过滤装置、高洁气体等对飞秒激光发生器进行冷却和清洁作用,需要一定的维护费用。另外,由于飞秒激光的瞬时功率峰值高,很容易损伤光学器件,而损伤的光学器件也需要一定的费用进行更换。此外,飞秒激光器中的核心部件有一定的生命周期,超过了一定的工作时限就要进行及时更换,也需要一定的费用。由于国内的飞秒

激光发生器基本依靠从国外进口,在更换部件时也需要从国外进口,使得维修、安装和调试的费用很高,周期较长。

3. 加工效率低

高质量的飞秒激光微细加工通常是在较低脉冲能量的条件下获得的,而随着脉冲能量的增加,飞秒激光加工质量并没有表现出比长脉冲激光加工质量更优。由于其单脉冲能量低,使得其加工效率不如长脉冲激光的加工效率,所以飞秒激光微细加工在工业上的应用还有待进一步的开发。

1.3 超短脉冲激光微细加工的研究现状

超短脉冲激光加工的作用机理复杂、应用广泛,因此国内外学者对超短脉冲和材料作用的机理进行了大量的研究工作。由于受设备、研究基础等条件的限制,国内外学者在超短脉冲激光微细加工的研究上稍有差距。国外的学者(主要为德国、日本、美国、法国和新加坡等)对超短脉冲激光和材料作用的理论、机理、工艺试验和应用等多个方面进行了研究。基本完成了超短脉冲激光和材料作用的基本理论、作用机理、表面加工工艺试验和应用的研究。现在的研究主要集中在透明材料的内部加工、在纳米科学中的应用、超短脉冲激光热影响区、生命科学等应用研究。由于超短脉冲激光和材料作用的瞬时性和复杂性,对其作用过程(机理)的研究一直在进行中。

国内学者近些年在超短脉冲激光微细加工上进行了大量的研究。由于缺少一定的理论基础,基础理论的研究相对较少,更多的研究主要集中在工艺实验上。近几年来国内的学者进行了多层次的研究工作,得到了国家科研基金的大力支持。但是由于受到检测条件的限制,对机理的研究还没有完全展开。经过近些年的积累,已经开始有了一些创新性的成果,在此领域研究中已有一定的成就,但是世界顶级研究成果还较少,需要进行更多的研究工作。

1.4 超短脉冲激光微细加工的未来发展趋势

降低超短脉冲激光微细加工系统的价格,如开发低价光纤激光器;降低维护费用,设计开发高稳定的光学系统和针对超短脉冲激光的光学器件等;提高超短脉冲激光的效率;在应用领域,主要是实际工程应用、拓展科研领域、加强基础理论研究等。

第2章 飞秒激光微细加工系统组成及检测设备

2.1 飞秒激光微细加工系统

激光微细加工系统是激光微细加工的基础装备。激光微细加工系统主要包括激光源、数控操作平台、在线观测系统、光传输和聚焦器件和控制系统等。同时在加工过程中,还需要一些附件用于调整光束质量、测量激光能量等。目前的激光微细加工系统集多项现代技术于一体,如 CAD 技术、虚拟加工技术、数控和机电技术等。飞秒激光微细加工系统区别于传统激光微细加工系统主要是激光源的不同,本章将着重对飞秒激光的产生、发展、分类和主要参数进行详细的叙述。

2.1.1 飞秒激光微细加工系统组成

飞秒激光微细加工系统主要由飞秒激光源、微细加工数控操作平台、在线观测系统、光路传输系统和控制系统组成(图 2-1)。飞秒激光微细加工系统的结构示意图如图 2-2 所示。在加工的过程中还需要一些其他的附件,如能量(功率)计、中性滤波片、小孔、偏振片、激光护目镜等。



图 2-1 飞秒激光微细加工系统的组成

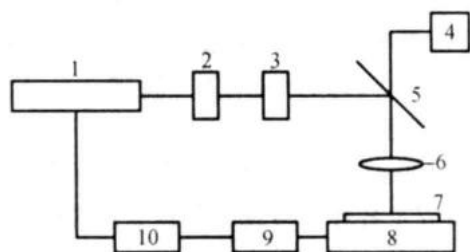


图 2-2 飞秒激光微细加工系统的结构示意图

- 1—飞秒激光器;2—中型滤波片;3—小孔;
4—CCD 面振探测器;5—反射镜;6—聚焦透镜;7—加工样品;
8—三维精密移动平台;9—工作台控制系统;10—计算机

图 2-3 是国外某公司的飞秒激光微细加工系统,它包括了飞秒激光进行微细加工的一切设备和配件。该系统提供足够的空间给用户进行光束传递和操作,包括了一个精密的加工检测系统,整个工作台完全由计算机控制。软件接口使用大多数计算机数控加工机床所用的工业标准 G 代码格式。可用于多种材料的微加工,生成亚微米精细结构,而不会对周边材料造成损害,不会造成材料飞溅,加工结果极其精确。系统采用整体水循环冷却,无热漂移,性能极其稳定,无需调试、无需精通飞秒激光即可使用,也不需花费大量时间和费用去维护激光器。

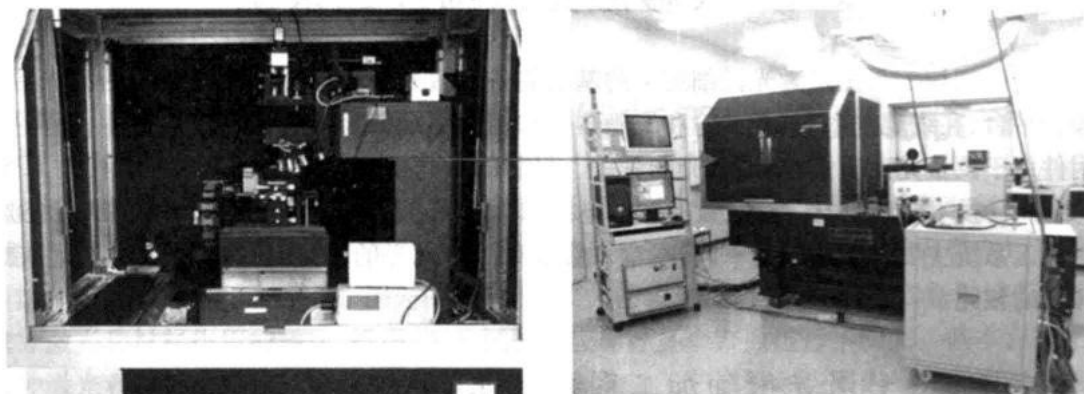


图 2-3 国外某公司的飞秒激光微细加工系统的照片

2.1.2 飞秒激光加工用光源

1. 飞秒激光器

自从 20 世纪 60 年代第一台激光器诞生以来,激光技术飞速发展。激光输出的脉冲宽度向着越来越窄的方向发展,历经纳秒、皮秒到目前的飞秒,甚至阿秒(10^{-18} s)。在这一领域的发展大致可以分为以下四个阶段。

(1) 第一阶段

20 世纪 60 年代中期,激光的脉冲宽度为 $10^{-10} \sim 10^{-9}$ s,作为超短脉冲激光发展的初始阶段,研究了各种锁模理论的建立和各种锁模方法的试验阶段。

(2) 第二阶段

20 世纪 70 年代中后期,脉冲激光宽度发展到 $10^{-12} \sim 10^{-11}$ s,在这一时期各种锁模方式和理论(如主动锁模、被动锁模、同步泵浦锁模等)开始逐步成熟,并在物理和化学领域展开了皮秒级的初步应用。

(3) 第三阶段

20 世纪 80 年代,超短脉冲激光的脉冲宽度已进入飞秒阶段,它是以所谓碰撞锁模染料激光器为主要代表,该激光器就其基本的锁模原理来说依然为被动锁模,在锁模机理和方法上并没有根本性的突破,但是由于脉冲的碰撞效应,使该激光器不仅能够产生,并且能够稳定地运转在飞秒量级。在这一阶段超短脉冲激光的研究与应用进入了十分活跃的阶段,并出现激光研究新的分支——飞秒激光技术与科学。

(4) 第四阶段

20 世纪 90 年代,超短激光脉冲在现有的脉冲宽度基础上,激光介质方面的研究得到突破,飞秒激光器全固化的研究与应用取得了突破性进展。自 70 年代初开始,超短脉冲激光器的激光介质都是采用有机染料,在 1991 年英国圣安德鲁大学 Spence 等人首次实现了掺钛蓝宝石自锁模激光的运转(脉冲宽度 60 fs),标志了飞秒激光进入固体阶段。同时,半导体激光器的迅速发展及 Cr:LiSAF 晶体、掺铈光纤等优良激光材料的出现,为飞秒激光实现全固化运转创造了条件。由于全固化飞秒激光器具有很高的增益带宽,容易获得很短的飞秒脉冲,可调谐范围宽、输出功率高、结构简单(与普通激光器几乎没有区别)、性能稳定、寿命长、无污染(染料激光器中的染料需要喷成薄膜状,有毒性),完全克服了染料激光器的缺点,成为新的飞秒激光器发展的方向。表 2-1 列出了常见固体飞秒激光增益介质的主要参数。随着半导体激光器输出功率的提高,全固化飞秒激光器在可输出功率、调谐范围和脉冲宽度等方面都将超过离子激光泵浦的飞秒激光器。

表 2-1 常见固体飞秒激光增益介质的主要参数

增益介质	E 峰 /nm	A 峰 /nm	Flou 寿命 / μ s	E 区域 / 10^{-2}cm^2	最短脉冲宽度 /fs
Ti:sapphire	790	490	3	39.0	5
Cr:LiSAF	846	645	67	4.8	14
Cr:LiSGaF	835	645	88	3.3	14
Nd:glass	1 050	800	350	4.0	60
Yb:glass	1 020	972	2 200	0.8	58
Yb:YAG	1 030	941	1 170	1.8	340
Cr:Mg ₂ O ₄	1 235	740	15	20.0	40
Cr:YAG	1 350	1 050	4	40.0	43

目前,在产生和操纵超短激光脉冲方面取得了巨大的进步,为脉冲宽度向阿秒数量级发展奠定了基础,Dresher 等人用氩管证实了脉冲周期最快可以达到 2.5 fs。另一方面,飞秒激光波长范围的扩展也是飞秒激光技术发展的主要趋势之一。通过使用新型激光介质、多种频率变换技术和汤姆逊散射等,将其波长向软 X 射线、中红外甚至远红外方向发展,以满足各种应用的要求。

2. 激光锁模原理

产生激光超短脉冲的技术常称为锁模技术 (Mode Locking)。这是因为一台自由运转的激光器中往往会有很多个不同模式或频率的激光脉冲同时存在,而只有在这些激光模式相互间相位锁定时,才能产生激光超短脉冲或称锁模脉冲。实现锁模的方法有很多种,但一般可以分成两大类:即主动锁模和被动锁模。主动锁模指的是通过外部向激光器提供调制信号的途径来周期性地改变激光器的增益或损耗从而达到锁模目的,而被动锁模则是利用材料的非线性吸收或非线性相变的特征来产生激光超快脉冲。

目前,最为广泛使用的一种产生飞秒激光脉冲的克尔透镜锁模 (KerrLens Mode Locking) 技术是一种独特的被动锁模方法。克尔透镜锁模实际上是利用材料的折射率随光强变化的特征使得激光器运转中的尖峰脉冲得到的增益高出连续的背景激光增益,从而最终实现短脉冲输出。

一台脉冲器实现锁模运转后,在通常情况下,只有一个激光脉冲在腔内来回传输,该脉冲每到达激光器的输出镜时,就使一部分光通过输出镜耦合到腔外。因此,锁模激光器的输出是一个等间隔的激光脉冲系列。相邻脉冲间的时间间隔等于光脉冲在激光腔内的往返时间,即周期。一台锁模激光器所产生的激光脉冲的宽度是否达到了飞秒量级主要取决于腔内色散特征、非线性特征及两者间的相互平衡关系。而最终的极限脉宽则受益于增益介质的光谱范围。

飞秒激光的主要指标为:脉冲宽度、平均功率和脉冲重复频率。此外,还有谱宽与脉宽积、脉冲的中心波长、输出光斑大小、偏振方向等。脉冲重复频率实际上表示了激光脉冲序列中两个相邻脉冲间的间隔。由平均功率和脉冲重复频率可求出单脉冲能量,由单脉冲能量和脉冲宽度可求出脉冲的峰值功率。

3. 飞秒激光的产生

单一频率的激光持续性的发光,其振幅不随时间改变。要制造出激光脉冲,可把两个相位相同、频率不同的波相加,此时就会产生所谓的拍频,加强型干涉的部分就会大幅增强,相消性干涉的部分则会相互抵消。愈多条相位相同、频率不同的波相加时,产生的拍频也就愈短,尖峰强度也愈大。

要让激光产生如此短的脉冲,必须同时符合诸多条件。首先,激光放大器本身要拥有宽频的激光介质,这样它才有办法放大各种频率以求符合前述的激光。目前,最新的激光介质是一

种叫做“掺钛蓝宝石晶体”的材料,这是在1988年由美国军方解密的材料。由于这个晶体可容纳的频宽相当广泛,在1.5 m长的共振腔中大约可以放大100万个等间隔频率的光线,如果这些光线能有相同的相位,那么干涉效果可以把光波加强成100万倍的强度,而脉冲的长度则缩小了100万倍。其次,要有脉冲压缩机制。激光线在聚焦的过程中,由于光学科尔效应的关系,高强度的光线会增强其效果,但其他低强度的部分则会被额外装置的光圈所阻挡,丧失其效用。在这样的装置之下,激光的高强度部分被放大的比较多,会越来越强,自然就能产生高强度的短脉冲激光。最后,要具有腔内色散补偿的功能。在介质中不同波长的光线速度并不相同,折射率也不同。光线通过介质时,也会产生不同的折射,但要产生飞秒激光,就要把这些不同波长的光线经过棱镜的作用补偿它们的光程差,才能达到所需的加强性干涉的效果。

4. 飞秒激光系统的组成

飞秒激光器除了一般激光器中必不可少的泵浦源、增益介质和光谐振腔三个组成部分外,通常在其激光腔内还要有专门的色散补偿装置,一般的飞秒激光系统由以下四部分组成。

(1) 振荡腔:在振荡腔内,利用特殊技术获得飞秒激光脉冲;

(2) 展宽腔:展宽腔将激光飞秒脉冲按不同波长在时间上拉开;

(3) 放大器:放大器使展宽的脉冲获得充分能量;

(4) 压缩器:把放大后的不同成分的光谱汇集到一起,恢复到飞秒宽度,以形成具有极高瞬时功率的飞秒激光脉冲。

在飞秒激光振荡腔中产生的激光脉冲的单脉冲能量通常只有几到几十纳焦(10^{-9} J),所以为了得到较高能量的飞秒激光脉冲,往往需要用飞秒激光放大器对飞秒激光振荡腔输出的飞秒激光脉冲进行能量放大。

由于飞秒脉冲非常短,所以脉冲能量的直接提高会导致极大的峰值功率从而会损坏放大器光路中的光学元器件,因此,飞秒激光在被送入放大器之前必须先要进行脉冲展宽,一般展宽到几十或几百个皮秒,然后再进行放大。放大之后的光脉冲在光束横截面大幅度提高的条件下再压缩回飞秒。这就是在超短脉冲激光放大器中广泛使用的啁啾脉冲放大技术。用来展宽脉冲的装置称为光脉冲展宽器,而用来压缩脉冲宽度的装置则称为光脉冲压缩器。最常用的光脉冲展宽器和光脉冲压缩器都由光栅或光栅对等光学器件组成。

飞秒激光放大器通常有两种类型:一种是再生放大器,一种是多通放大器。根据脉冲能量大小的不同要求,两类放大器也常组合在一起使用。即先用再生放大器产生毫焦(10^{-3} J)量级的脉冲,而后再用多通放大器产生几十毫焦,乃至上百毫焦或更高能量的脉冲。再生放大器本身实际上犹如一台激光器,所不同的只是激光谐振腔内多了快速开启和关闭的光开关(可从电路上进行控制),致使受激辐射放大的信号是从激光腔外引入的待放大的种子激光脉冲,而非自生的初始自发辐射光。种子激光脉冲在腔内往复多次,得到充分的放大后再由光开关