

金属材料表面的激光抛光研究进展

戴伟 郑志镇 李建军 黄齐文 刘佳

华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074

摘要 金属材料表面的激光抛光,作为一种新型的激光加工工艺,具有抛光效率高、材料去除效果好、材料利用率高等优点。在介绍了激光抛光材料类型的基础上,对比分析了金属材料抛光过程中所使用激光器的类型,论述了激光抛光金属材料表面过程中的理论模型方法,详细总结了激光抛光金属表面的工艺参数和抛光效果,并对激光抛光金属材料的现状和发展方向进行了评价和展望。

关键词 材料;金属材料;激光加工;抛光;理论模型;工艺参数

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.110001

Research Progress of Laser Polishing on the Metal Surface

Dai Wei Zheng Zhizhen Li Jianjun Huang Qiwen Liu Jia

State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Laser polishing on the metal surface, as a new type of laser processing technology, has an advantage of high machining efficiency, nice material removal effect, excellent material utilization and so on. The types of metal materials used in laser polishing are presented. The laser polishing application machine types are analyzed. The theory models of laser interact with metal surface when laser polishing the metal surface are discussed. The process parameter and polishing effect of laser polishing on the metal surface are reviewed in detail. The current situation and the trend of laser polishing on the metal surface are evaluated and prospected.

Key words materials; metal materials; laser processing; polishing; theory model; process parameters

OCIS codes 160.3900; 140.3390; 240.5450; 190.4975

1 引言

现代制造业的发展,对金属制品表面的要求越来越高。一些金属制品,在使用前,还需要对其表面做进一步的抛光处理。而金属产品表面的最后抛光,不仅占到产品总加工成本的30%,而且这项工作目前大多数还依赖手工抛光,抛光精度差、效率低,产品质量缺乏一致性和稳定性,选择和开发新的金属产品表面的抛光工艺尤为重要。

激光加工作为一种新型加工技术,具有高效率、高柔性等优点^[1-2]。激光抛光金属作为一种新的激光加工应用技术,目前已经得到多国学者和研究机构的青睐。它通过一个聚焦的激光束斑作用在粗糙的原始金属表面^[3],造成金属材料表面凸起薄层的熔化和蒸发。熔化的材料,由于材料本身的表面张力和重力的作用发生流动,填补金属表面凹陷处并发生凝固,最终得到理想的抛光材料表面。通过激光器的控制,激光抛光时的输出能量与金属材料的作用层厚度很小,只在微米厚度的材料层上发生,因此不会像一般的激光束加工金属那样造成大面积的粗糙表面。

激光在金属表面抛光应用具有其潜在的各种优势,其不仅具有可选择抛光速度,无化学污染,抛光过程可检测性^[4-5],而且是一种非接触加工方法,可以通过一般的工业计算机来控制。另外,激光在与金属材料

收稿日期: 2015-01-25; 收到修改稿日期: 2015-03-18; 网络出版日期: 2015-10-29

基金项目: 国家重大科研专项(2012ZX04010-081)

作者简介: 戴伟(1983—),男,博士研究生,主要从事金属材料表面的精密抛光加工方面的研究。

E-mail: whutdaiwei@163.com

导师简介: 李建军(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事现代化模具精密成型、材料表面加工等方面的研究。

E-mail: jianjun@mail.hust.edu.cn(通信联系人)

表面相互作用时,由于其独特的脉冲特性,能快速地抛光金属表面^[6]。即使对于复杂的金属表面几何,激光抛光也能快速实现微米尺度的抛光,并且对于不同的金属表面,激光可以选择不同的输出能量和频率特性^[7],甚至对于有些高硬度金属材料,采用激光抛光也是最合适的方法^[8-9]。

激光抛光金属表面被视为一种新的加工技术,这种技术完全有希望最终取代耗时且容易出错的手工和其他传统的抛光^[10]。在对近年来国内外各个研究者对激光抛光应用研究成果总结的基础上,本文综述了金属材料的激光抛光研究进展。

2 激光抛光金属材料类型

到目前为止,激光抛光已经成功应用于多种金属。从工具钢、不锈钢、镍合金到钛合金等^[10]。随着技术的发展,激光抛光的应用开始扩展到航空航天材料和生物医疗材料。

在最近的研究中,Zhao等^[4-5]使用了激光来抛光超导射频加速器中的铌材料。1986年,Tuckerman等^[11]就提出了一种利用脉冲激光,通过控制金属熔化所需要能量的方法,来抛光在集成电路中的金和铝薄膜材料。

2.1 模具钢、工具钢和不锈钢材料的激光抛光

激光抛光金属的研究,目前应用在模具钢的报道最多。Brinksmeier等^[12]最早提出将激光抛光应用在X40Cr13模具钢表面,并通过实验得到平整光滑的抛光表面。Ukar等^[13]选择注塑模镶件中所用的,硬度为62HRC的DIN1.2379工具钢来进行激光抛光实验。

Hua等^[14-19]做出了很多工作,他们选择AISI-01冷作模具钢。Lamikiz等^[20]采用激光,对经过电火花加工处理的C45钢、X40CrMoV51工具钢进行了抛光研究。Lamikiz等^[21]同时采用具有52 HRC硬度的DIN1.2344工具钢和激光烧结的AISI 420渗铜不锈钢来进行激光抛光实验^[9]。Pfefferkorn等^[22]研究了S7工具钢材料的激光抛光特性。Avilés等^[23-24]使用具有高疲劳强度的AISI 1045钢来进行激光抛光实验。Christian等^[6,25-26]都选择了DIN 1.2343工具钢来进行激光抛光实验。Nüsser等^[27]对X38CrMoV5-1马氏体不锈钢进行了激光抛光实验。DIN 1.2379工具钢由于其马氏体结构,材料表面的硬度可以达到62 HRC。Ukar等^[9,28-30]使用经过铣削和EDM加工处理后的DIN1.2379工具钢,来进行激光抛光实验。Michael等^[31-32]使用AISI H13模具钢来进行激光抛光实验,Shao等^[33]选择Fe, Al, Ti和304不锈钢几种金属材料进行了抛光对比实验研究。

作为模具和汽车行业中经常用到的球墨铸铁材料,由于其具有游离的石墨形态、较高的熔化温度,因此一般很难被抛光,Ukar等^[13,34-35]使用GGG70L球墨铸铁材料来进行激光抛光实验研究验证。

Smith等^[17,36]使用304不锈钢模具来作为抛光材料,Mai等^[37]也采用304不锈钢来研究金属表面在激光抛光作用下的熔化现象。Benoit等^[38]使用激光,对铣削加工后的316 L不锈钢进行抛光实验,Campanelli等^[18]用选择性激光熔化316 L不锈钢材料来进行激光烧蚀抛光实验,而Jang等^[39-40]直接对316 L材料进行抛光实验,张峰烈等^[41-42]也采用316 L材料来进行激光抛光实验研究。

2.2 钛合金材料的激光抛光

钛合金具有极其优良的物理和化学性能,如强度高、质量轻和耐腐蚀等。可以被应用于电子、冶金、航天技术和医学等各个领域。钛合金目前以Ti6Al4V材料研究最多。Nüsser等^[27,40,43-50]很多学者都选择Ti6Al4V来进行激光抛光实验。而Milan等^[41,51]选择用激光抛光,应用于工业纯钛抛光的同时实现表面改性。Myriam等^[52]使用脉冲激光沉积方法,得到光滑的Ti64材料表面。Yermachenko等^[53]使用VT16钛合金来进行激光抛光实验。

2.3 其他金属材料的激光抛光

在其他金属材料方面,目前应用最多的是采用激光技术直接或者间接地抛光激光烧结的金属产品。Grez等^[54]采用激光来抛光一种选择性激光烧结铁铜合金零件。Lamikiz等^[20]采用激光,对选择性激光烧结的铜合金表面进行抛光,Gisario等^[55]用激光来抛光烧结青铜,Lamikiz等^[56-57]采用LaserForm ST-100的烧结青铜件来进行激光抛光实验。

Inconel718高温合金(简称IN718)独特的合金成分设计使其具有良好的综合性能,即较高的强度、抗蠕变性能和疲劳寿命,现代航空发动机的很多零部件都采用IN718制成。Kumstel等^[49]选择了IN718高温合金来进行激光抛光对比实验,Hafiz等^[58]使用经过铣削加工的IN718高温合金来进行激光抛光实验。Lambarri等^[59]选择两种不同的镍基高温合金来进行激光表面抛光。张峰烈等^[41,60-61]使用激光来抛光镍材料,另外,李诚等^[62]

采用烧结的镍材料作为激光微抛光的对象。学者 Vadali 等^[40]选择纯镍和 Al-6061-T6 材料来进行激光抛光实验, Gao 等^[63]使用 400 镍合金和 1095 弹簧钢, 来进行激光抛光实验。

3 金属抛光激光器的选择类型

激光器是现代激光抛光系统中必不可少的核心组件之一。随着激光加工技术的发展, 激光器也在不断向前发展, 出现了许多新型激光器。按激光工作介质分, 激光器可分为气体激光器、固体激光器、半导体激光器和染料激光器 4 大类。早期激光加工用激光器主要是大功率 CO₂ 气体激光器和固体 YAG 激光器。21 世纪初, 出现了另外一种新型半导体激光器。随着半导体激光技术的不断发展, 以半导体激光器为基础的其他固体激光器, 如光纤激光器等的也十分迅速, 使得激光在抛光金属材料等领域获得了广泛的应用。

3.1 气体激光器的应用

Lamikiz 等^[22,45]最先采用 2500 W 的 CO₂ 激光器, 用于金属表面的激光抛光实验研究。Ramos 等^[64]后来也使用这种激光器来进行抛光研究。Ukar 等^[9,13]对高硬度的 DIN 1.2379 工具钢进行激光抛光实验时, 选择了一个 2.5 kW 的 CO₂ 激光器和一个 3.1 kW 的高功率二极管激光器。

3.2 固体激光器的应用

激光抛光金属材料最关键的因素之一是选择合适的激光器, 目前来说, Nd:YAG 激光器以其卓越的性能, 被最多的应用于金属材料的抛光研究中。早在 2001 年, Ramos 等^[64]就开始研究 Nd:YAG(1064 nm) 激光器来抛光金属材料, 2004 年, Mai 等^[37]就研究使用 532 nm 波长的 Nd:YAG 固体激光器来抛光金属表面。Brinksmeier 等^[7,8,12,14-19,25,31,61]成功使用 Nd:YAG 激光器(1064 nm)来抛光金属材料表面, Lambbarri 等^[59]使用一个连续(CW)Nd:YAG 激光器进行激光表面抛光, Milovanovi 等^[44]使用一个 266 nm 波长的 Nd:YAG 激光器来进行激光抛光实验。

Trtica 等^[54]同时采用波长为 1064 和 532 nm 的 Nd:YAG 皮秒激光器来抛光金属表面。Gharbi 等^[48,52]选择一个 Yb:YAG 激光器, 波长 1.03 μm 的激光器来做抛光实验。Nüsser 等^[27]选择了双束激光器来进行激光抛光实验, 其中一个 Yb:YAG 激光器用来预热金属表面, 另外一个 Nd:YAG(1064 nm) 激光器用来抛光金属表面。

Hafiz 等^[58]开始尝试使用超短的皮秒激光器(波长 1030 nm)来进行激光抛光实验, 这种激光器使激光与金属材料相互作用的时间非常短, 激光作用在材料上几乎不产生热影响区。因此, 采用这种激光器对金属材料的抛光将是一个重大的突破。

3.3 半导体和其他激光器的应用

Pfefferkorn 等^[22]选择 1070 nm 波长的光纤激光器来进行金属表面的抛光实验, 通过二极管来控制激光器的开关。Yermachenko 等^[53]使用波长 1.07 μm 的脉冲光纤激光器来进行激光抛光实验。

Jang 等^[39]对 316 L 进行抛光实验, 分别选择 532 nm 波长的 CW 半导体激光器和 355 nm 波长的大功率紫外激光器(AVIA355-3000)组合的方式, 来同时进行抛光金属实验。他采用 CW 半导体激光器来控制输出的激光的能量密度, 采用紫外激光器来进行抛光。

Shao 等^[33]使用 KF 准分子激光器, 对几种金属表面进行了抛光实验。

4 激光抛光金属材料的数值模型研究

激光抛光金属材料材料模型、计算模型和预测模型, 作为激光抛光金属材料研究的一个方面, 近年来也得到越来越多的学者的研究。对这些模型的准确描述和定义, 为进一步研究激光与金属材料的抛光效果奠定基础^[65]。

4.1 激光抛光金属材料的热源模型

Greiz 等^[54]最先提出激光抛光金属材料过程中材料表面的去除原理模型。他提出激光作用到金属材料表面的能量密度, 在达到一个能抛光材料表面的极限值之前, 材料表面粗糙度的降低程度, 是随着激光的能量密度的增加程度来决定的。这种现象的存在, 有两个不同的过程来描述: 一个过程称为浅表面融化(SSM); 另外一个为表面过度融化(SOM)。第一个过程的发生范围, 是抛光过程中的低于材料表面峰谷值的熔化层厚度; 而第二个过程的发生范围, 是抛光过程中的高于材料表面峰谷值的熔化层厚度。SOM 过程的材料熔池的大小决定了抛光后表面的最后形貌。Ramos-Greiz 提出的这一激光作用金属材料的模型, 目前

基本上已经成为广大学者研究激光热源作用在金属材料上的经典模型。

Guo等^[15,17]在大量实验的基础上,推导出DF-2冷作模具钢在进行激光抛光时的温度场模型。他在对冷作模具钢进行激光抛光工艺参数研究时,发现了激光与材料相互作用过程中,金属材料发生熔化或蒸发的机理^[18]。他提出,激光抛光的作用机制,取决于金属基体热量的摄入程度。当外界输入的热量(Hinput)等于金属的熔化热阈值(Hthreshold)时,激光抛光金属表面的主要表现作用机制为金属的熔化;当输入的热量(Hinput)大于金属的熔化热阈值(Hthreshold)时,激光抛光金属表面的主要作用机制为金属的蒸发和熔化;当输入的热量(Hinput)远远大于金属的熔化热阈值(Hthreshold)时,激光抛光金属表面的主要作用机制为金属的蒸发。

之前的学者,在研究激光和金属材料相互作用的模型时,没有考虑到由于激光加热金属材料时,金属固态冶金相变过程。Ukar等^[19,28]使用激光抛光工具钢时,提出了激光抛光过程中,由热传递所引起的金属冶金相变的热模型。通过对实际的金属材料表面的高温测量和温度场测定,发现实验结果和这个热模型模拟的结果非常吻合。他提出在考虑能量平衡的前提下,这个热模型对于预估材料内部的温度场分布,准确的预测材料熔化层厚度是很有帮助的。

Ma等^[46,50]进行激光抛光实验时,研究了激光与金属材料相互作用的热模型,他们研究发现热毛细流现象会造成材料表面粗糙度的降低。随着热毛细流动的加剧,材料表面的局部变粗糙和变光滑效果也增强。而热毛细流的模型,可以从如材料的初始形貌、材料属性、抛光过程中的工艺参数得到,并且使用这个热毛细流的模型,可以预测抛光后的金属表面形貌。

4.2 激光抛光金属材料的数值计算模型

Mai等^[37]开发了一个有限差分热传导模型,用来模拟激光抛光过程中金属材料的快速熔化和凝固过程。他们提出激光作用金属时的固体/液体移动边界的非线性问题,可以通过一种新的混合数值计算模型方法来解决。他通过这个模型模拟激光抛光过程中金属表面的快速凝固过程,发现和实际的实验结果非常吻合。

之前的学者研究激光抛光金属时,很少研究到金属熔池流动的特性对抛光效果的影响规律。因此,Ma等^[40,47]又提出一个基于COMSOL软件的多物理场的二维轴对称瞬态模型,耦合传热和流体流动,并使用有限元方法来构建这个模型。这个模型可以帮助了解金属熔池中的流体流动对脉冲激光抛光的影响规律。另外,这个模型不仅提供了抛光过程中的激光作用温度和速度的解决方案,还能预测表面形貌的演化规律。这个模型还同时可以被用来研究激光脉宽和金属产生熔池效果的关系。

Ukar等^[29]通过一个(DoE)实验设计方法,将激光抛光的实验结果作为输入数据,来优化和选择激光抛光的工艺参数。他提出的这种实验设计方法的功能函数,能准确地预测表面粗糙度的减少规律,发现模型的预测结果和实际的结果误差在10%以下。他通过有限差分方法求解得出一个热平衡微分方程,再利用热平衡微分方程得出一个数值模型,并提出利用这个模型进行实验验证的方法。Ukar等^[30]还提出了一个激光抛光金属表面效果的预测模型,在基于热传导微分方程的基础上导出一个温度场的计算方法,而这个温度场计算可以间接得出一个抛光效果预测模型。预测的金属抛光后的表面形貌,再通过一种快速傅里叶变换(FFT)算法,基于对材料的初始的表面的峰谷特性进行过滤的基础上得到。这样一旦温度场确定后,材料表面的关键的最终形貌特性可以计算得到。

Bustillo等^[57]对烧结材料ST-100来进行激光抛光实验,发现激光抛光的效果,主要取决于材料类型、初始表面形貌、能量密度。而前面两个参数比较好确定,激光在实际抛光中作用的能量密度常常未知。因此,他开发了一个模型来解决这个问题。这个模型的应用程序由4个阶段组成:数据采集系统、一个数据集输入系统、一个计算模型和一个数据库。最后,利用获得的模型来生成不同工艺参数。他提出的这种系统的数据库的方法,目前是比较全面的统计和计算激光与金属材料的作用效果模型。

Shao等^[33]提出了一种全面的激光抛光金属的计算模型。他基于传热分析和金属材料表面的蒸发特性,建立起了应用于激光表面抛光一个简化的模型。由于金属表面微凸起的尺寸的规模通常是在亚微米级,因此他的模型假设在恒定的温度条件下,一个粗糙的金属体和传热可因此被视为一个点单元问题。他提出的模型旨在初步预测适当的工艺参数(通常是激光照射时间)。通过这个模型预测抛光金属,如铁、铝、钛、304

不锈钢,显示温度上升的规律,通常和原始的粗糙表面有关。结果表明,对于大多数金属的激光抛光,发生在脉冲时间较短的纳秒范围,更少的脉冲时间通常是必需的。他提出了在材料表面参数和材料性能参数确定的情况下,建立起一种指导和选择激光抛光金属材料的工艺参数的模型和方法。

Guo^[17]对冷作模具钢进行激光抛光,给出了激光抛光作用时的作用温度和激光抛光工艺参数,如脉冲能量、脉宽、脉冲频率、扫描速度的关系的数值模型。这个模型显示,当脉冲能量和频率增加时,激光作用的速度也增加。但是当脉宽和扫描速度时,抛光过程的作用速度却下降,特别是当扫描速度增加时,激光的作用速度下降非常快。他建立起了一个激光抛光工艺参数和作用速度的模型,并通过这个模型得出激光扫描速度对抛光速度的影响最明显。

Zhao等^[4-5]提出了一种激光抛光金属表面的计算模型,用来计算抛光表面温度分布和得出激光抛光的作用机理。在他的研究中,他通过一个一维的热传导公式来计算激光光斑处的温度,并通过这个公式导出激光与材料作用的热源模型。相对于激光抛光作用所诱发的熔化层直径(~100 μm)和深度(~100 nm)来说,熔化层直径比深度要大得多,因此他认为可以将材料设定为一维的半无限大单位实体单元。他的这个计算模型,能准确地模拟材料吸收脉冲激光后产生的温度曲线,这一点显得尤为重要,因为实际的温度曲线对抛光金属局部表面形貌产生的影响更大。在他的数值模型里,他模拟了材料随激光作用时间变化的温度场分布,同时还模拟了材料温度场和激光作用层深度分布规律。并且对多个脉冲激光作用在金属材料上的余热效果也实现了模拟,结果表明每个激光脉冲作用所产生的材料峰值温度和熔化深度,受余热的作用影响,有小范围的上升。

4.3 激光抛光金属材料的结果预测模型

Ramos等^[64]通过假设待抛光的金属表面的凸起为一个半球模型,并通过这个模型作为一个激光能量、扫描速度和金属颗粒大小的函数,来预测抛光零件的表面粗糙度的变化情况,他们发现最后这个预测的模型与实际的实验数据的误差控制在15%以内。

Hafiz等^[32]提出了一种参考ISO 4287标准的材料比函数(MRF)模型方法,该方法能有效地描述抛光前后的金属表面的整体表面形貌的高度分布,最关键的是可以利用这种方法来优化激光抛光的工艺参数。采用实际实验发现,采用90%的激光重叠率的抛光效果最好,而这一点,发现和MRF方法优化方法预测得到的结果一致。

Vadali等^[40,45]通过整合一个分析性的金属流体流动模型和一个数值热传导模型,得到一个激光抛光作用在金属表面的抛光效果预测模型。他首先通过合适的测量方法得到未抛光表面的数据,并采用最小平方误差法将这些数据进行转化得到新的数据。通过未抛光表面的空间频率的数据,采用二维傅里叶分析方法,预测得到需要抛光表面的空间频率数据。接着,他利用一个二维的轴对称热传导模型来估算激光作用时的最大熔融时间,并通过最大熔融时间的估算结果和粗糙表面结果来估算激光作用的临界频率。将以上二者结合,进而得出最终的抛光作用的粗糙度结果。

Rosa等^[38]采用激光抛光AISI 316 L材料,通过一个预测模型来预测激光抛光后的金属材料形貌,发现金属材料的初始形貌和激光抛光的输出功率,对激光抛光效果影响比较大。该作者采用“弃一”交叉验证法来实现预测模型的建立,发现预测模型和最后的实验结果的平均误差为11.5%。通过这个预测模型,对一个原始表面粗糙度为 $R_a=13.6 \mu\text{m}$ 的表面给与最佳的抛光加工工艺参数进行实验后发现,粗糙度最后能降低到 $0.94 \mu\text{m}$,预测的模型能降低93%的原始表面粗糙度。他在考虑材料组织成分的基础上,参考激光抛光过程中的工艺参数和材料的原始表面形貌,来预测最后的抛光效果。同时他通过这个模型,对一种选定的材料,可以实现最优的激光抛光工艺参数的输出。

Vadali等^[40]也研究了一个预测激光抛光金属表面效果的模型,他指出因为激光的作用,造成了金属表面一定尺寸规模的熔池的存在。而熔池中的金属,由于其表面张力的存在,会对金属表面曲率半径小的地方有一个“摧毁”作用。他用一个随着温度而变化的材料的二维轴对称瞬态热传导模型,来预测抛光后的金属表面的熔化层厚度,并通过设计和组合一个流体动力学的材料表面张力模型和一个数值传热模型,预测金属材料表面在激光抛光作用下,表面形貌的空间特性,从而预测得到抛光后的表面粗糙度。

由于激光与金属材料作用过程中复杂的热、流动和相变存在,目前激光抛光金属过程中仍然没有一个

可靠的、全面和普遍适用的模型,能预测激光抛光过程达到的抛光效果和抛光表面所需要的最佳工艺参数。尤其是涉及到激光与材料相互作用的微米尺度的作用层内的模型的计算和预测困难最大,因此完成一个适用的激光抛光模型是目前的激光抛光技术研究的挑战之一。

5 激光抛光金属的影响因素

在激光抛光金属的过程中,必须考虑一些影响因素,如材料条件、激光功率、能量密度、脉宽和频率大小、激光进给速率、偏移率、离焦量、加工轨迹重叠率等工艺参数。激光的能量密度决定着材料的破坏阈值,能量密度和辐照时间是影响抛光效果的两个最重要的因素。激光扫描速度通过激光辐照时间和光斑重叠率两个方面影响抛光效果,激光光束扫描方式主要通过影响不同扫描过程间的激光辐照光斑重叠率和重叠形式,影响抛光表面质量,激光脉宽影响着激光的辐照时间^[1-2]。金属表面在激光的作用后,材料表面薄层开始熔化,材料表面上凸起和凹陷的部分,由于表面张力和毛细管压力的作用,表面上凸起和凹陷的熔料重新分配^[31]。由于熔融态的材料在表面的流动是一个复杂的动态热过程,关键的激光工艺参数影响最终的加工表面形貌,而许多工艺因素都会影响最后的抛光表面。

Ramos等^[64]采用斑点直径为 0.35 ± 0.05 mm的CO₂激光器进行激光抛光实验,分别采用420,320,220 W的激光功率来抛光时,在其他相同条件下,发现420 W的激光功率能使材料表面的粗糙度从 $R_a=2.38$ μm降低到 $R_a=0.82$ μm,而320 W的激光可以使材料的粗糙度降低到 $R_a=1.13$ μm,220 W的激光反而使材料的粗糙度增加到 $R_a=2.56$ μm,可见合适的激光能量,能对SLS金属表面进行有效地抛光。

Hua等^[14]研究了在毫秒范围内,不同的激光脉宽所形成的激光束斑对金属表面的抛光形貌的影响规律。他采用脉宽为1,2,3,4,5,6,7,8,9,10 ms,对应的激光功率密度分别为24,12,8,6,4.8,4,3.4,3,2.7, 2.4×10^4 W/cm²共10组数据来做对比实验,发现激光对金属表面的形貌的影响变化规律,不是像脉宽的线性变化趋势一样呈线性变化。在相对短的脉冲宽度下,金属表面形貌的变化趋势不明显。Hua等^[16]还分别采用了1,1.5,2,2.5和4 mm/s几种激光扫描运动速度来做对比实验,研究发现,使用2.5 mm/s的扫描速度时,抛光效果最好,表面粗糙度 R_a 值和 R_{max} 值降到最低,这是因为过低的激光扫描速度反而会因为激光作用时间过长而造成材料表面粗糙的增加,而过快的扫描速度几乎造成不了抛光作用效果。

Shao等^[33]使用了30 ns的KF准分子激光器,对DF-2工具钢表面进行了抛光实验。采用30 ns的脉宽、频率5 Hz、扫描速度2 mm/min、能量密度1.015 J/cm²、光斑直径为0.2 mm的激光后发现,材料表面的粗糙度 R_a 值,最后可以降低到99.5 nm。

Trtica等^[61]使用激光来抛光金属钛表面时,选择的激光脉冲宽度为40 ps,他分别采用波长为1064 nm和532 nm的激光进行抛光时,发现能产生抛光效果的激光能量密度分别是0.9 J/cm²和0.6 J/cm²,说明低波长的激光在抛光钛合金时,需要的激光能量密度更低一些。

Guo等^[15,17-19]在对DF-2冷作模具钢进行激光抛光参数研究后发现,在激光输入能量密度为1.0 J/cm²,扫描速度300 mm/min,脉宽3 ms,脉冲频率20~25 Hz时,DF-2冷作模具钢表面的激光抛光效果最好。

Perry等^[61]对镍进行激光抛光,分别使用脉宽为300 ns和650 ns的激光来进行抛光后发现,分别可以使镍材料的表面粗糙度达到 $R_a=66$ nm和47 nm,分别能够减少原始表面30%和50%的粗糙度值。这一结果也证实了他提出的脉宽大的激光,更适合用来抛光的结论^[43]。他同时提出,激光抛光过程中的扫描速度,对抛光后的材料表面的形貌有很大的影响。

Nüsser等^[6]在研究了具有不同几何强度分布(圆形、方形)、脉宽(100~1400 ns)的高斯分布和Top-Hat分布的激光强度对抛光金属表面粗糙度的影响,得出在同等条件下,具有Top-Hat分布的激光强度,能得到比高斯分布的激光强度更低的粗糙度。同时,他又得出在Top-Hat分布的激光强度中,圆形强度分布比矩形强度分布能更好地抛光金属表面。在对抛光的激光脉宽进行实验对比后发现,脉宽越短,金属表面的抛光去除越快。进一步的研究发现,脉宽为111 ns和164 ns的方形强度分布,初始空间波长 $20\text{ m}\leq\lambda\leq 80\text{ m}$ 的激光来进行抛光时,材料表面粗糙度反而增加。研究激光脉宽对抛光效果的影响规律后发现,对于初始空间波长 $\lambda\geq 40\text{ m}$,脉宽1.15 μs的激光,能比164 ns脉宽的激光产生更好的抛光效果。

Zhang等^[21]使用激光进行抛光实验,选择的YAG激光器,电流200~300 A,脉宽5~15 ms,频率4~10 Hz,激光扫描速度0.24~0.72 mm/s,来研究激光作用与金属的层深和金属表面粗糙度的关系。他得出,脉宽为

5 ms, 频率 10 Hz, 扫描速度 0.24 mm/s 的抛光效果最好。

Zhao 等^[4-5]研究了激光抛光铌材料后发现, 在激光能量密度在 0.90~1.13 J/cm² 时抛光效果最好。进一步的实验发现, 在一个激光斑点宽度范围内, 34 次的脉冲激光作用, 能获得最佳的抛光表面。

Vadali 等^[45]研究了脉冲激光的脉宽与抛光表面形貌的变化规律, 他选择 0.65 μs、1.91 μs 和 3.60 μs 三种不同的脉宽, 分别对应于表面粗糙度 S_a 为 193.9 nm, 211.6 nm, 206.5 nm 的三种 Ti6Al4V 材料的激光抛光实验, 经过实验发现, 采用 3.60 μs 的激光抛光 Ti6Al4V 材料, 材料表面粗糙度 S_a 可以从 206.5 nm 降低到 57.0 nm, 而采用 0.65 μs 的激光抛光 Ti6Al4V 材料, 材料表面粗糙度 S_a 可以从 193.9 nm 降低到 152.4 nm。因此他得出利用长的脉冲宽度(1.91 μs、3.60 μs)的激光抛光金属时, 主要起抛光作用的是金属的对流现象, 这一现象发现最多能减少 72.4% 的金属材料表面粗糙度。而短脉宽(0.65 μs)的激光虽然也出现金属间的对流现象, 但是这种对流基本上可以忽略不计。因此长激光相比短激光来说, 能更有效地降低 Ti6Al4V 材料的表面粗糙度。

Perry 等^[43]在使用脉冲激光来抛光 Ti6Al4V 时发现, 脉宽为 650 ns, 能量密度为 1.14±0.071 J/cm² 的激光的抛光效果较明显, 材料的表面粗糙度值, 从初始的 $R_a=0.206 \mu\text{m}$ 减少到 $R_a=0.070 \mu\text{m}$ 。

Rosa 等^[88]采用激光抛光 AISI 316 L 材料后发现, 激光抛光平均可以降低 65% 的材料表面粗糙度, 最大可以降低 85% 的粗糙度。他分别组合激光输出能量为 600, 950, 1300 W, 扫描速度为 1500, 1700, 1900 mm/min, 抛光加工路径偏移量为 0, 10, 20 mm 等几组数据来进行实验。结果显示, 采用 600 W 的激光能量输出, 对金属材料几乎无抛光效果, 而 1300 W 的激光能量输出, 抛光效果明显。进一步的实验, 他又分别采用组合激光输出能量为 750, 850, 950, 1050, 1300 W, 扫描速度为 500, 1000, 1500, 2000 mm/min, 抛光加工路径偏移量为 30 mm, 并采用 Taguchi 实验设计优化方法来重新来组合实验。结果发现, 当激光输出能量为 750 W, 扫描速度为 1500 mm/min, 抛光加工路径偏移量为 30 mm 的抛光效果最好, 表面粗糙度 S_a 值能减少 85%。

Hafiz 等^[58]使用超短的皮秒激光器来进行激光抛光实验, 为了得到最佳的抛光工艺参数, 他对几个影响到激光抛光作用效果的参数(离焦量、斑点直径、工作棱镜到工件表面的距离等)来进行实验分析。对激光抛光的作用效果, 该作者使用脉冲频率 7.45 MHz, 扫描速度 20 mm/s, 激光能量 12 W, 离焦量从 0 mm 开始并以 0.1 mm 的增值增加, 直到 1.2 mm。发现离焦量在 0~0.6 mm, 斑点直径为 31.40~35.60 μm, 能量密度为 0.19~0.24 J/cm² 时, 激光对金属材料表面的主要作用效果为烧蚀, 而当离焦量在 0.8~1.2 mm, 斑点直径为 38.16~45.10 μm, 能量密度为 0.13~0.18 J/cm² 时, 激光对金属材料表面的主要作用效果为熔化, 而根据之前学者的结论, 激光要在金属材料表面产生抛光效果, 最好是以熔化为主要方式。因此, 在对这几组数据重新实验的基础上, 得出激光的离焦量为 0.90 mm, 能量密度为 0.17 J/cm² 时的抛光效果最好, 材料表面的粗糙度可以从 $R_a=0.80$ 降低到 0.50 μm。在离焦量为 1.0 mm 时, 对于一维的激光抛光, 可以从原始表面粗糙度 $R_a=0.50 \mu\text{m}$ 降低到 $R_a=0.24 \mu\text{m}$, 最大能降低 52% 的材料表面粗糙度; 而对于二维的激光抛光, 可以从原始表面粗糙度 $R_a=0.435 \mu\text{m}$ 降低到 $R_a=0.127 \mu\text{m}$, 最大能降低 70.8% 的材料表面粗糙度。

Kumstel 等^[49]对 Ti6Al4V, Inconel718 进行激光抛光实验, 并结合之前的学者 DIN 1.2343 工具钢的实验数据的基础上, 对比三种材料来进行激光抛光实验, 发现采用 7 s/cm² 的抛光作用时间抛光 Ti6Al4V 的表面, 其粗糙度可以从 $R_a=1.0 \mu\text{m}$ 降低到 $R_a=0.16 \mu\text{m}$; 采用 10 s/cm² 的抛光时间抛光 Inconel718 的表面, 其粗糙度可以从 $R_a=1.0 \mu\text{m}$ 降低到 $R_a=0.11 \mu\text{m}$ 。在采用 60 s/cm² 的抛光速率抛光 DIN 1.2343 工具钢表面时, 其粗糙度可以从 $R_a=5.0 \mu\text{m}$ 降低到 $R_a=0.10 \mu\text{m}$ 。对比发现, 采用相同的激光条件时, Ti6Al4V, Inconel718 材料比 1.2343 工具钢更易抛光。

Temmler 等^[25]选择最大激光功率为 400 W, 脉宽为 100~700 ns, 光斑直径为 $\Phi 150\sim 800 \mu\text{m}$ 的 Nd:YAG 固态激光器来抛光 1.2343 工具钢表面。发现采用 44 W 的激光功率时, 抛光效果最好, 过高或过低的激光作用功率, 都会造成金属熔池的固液相密度的变化, 造成抛光金属表面粗糙度的增加。

Yermachenko 等^[53]使用激光功率为 5~150 W, 脉宽 100 ns~20 ms, 频率 50~400 Hz, 对 VT16 钛合金来进行激光抛光实验。在激光功率 55 W, 脉宽 1.5 ms, 频率 300 Hz 时, VT16 钛合金表面的粗糙度值能从 2050 nm 降低到 571 nm; 在激光功率 100 W, 脉宽 2.0 ms, 频率 100 Hz 时, VT16 钛合金表面的粗糙度值能从 2050 nm 降低到 416 nm; VT16 钛合金表面的粗糙度值降低到原来的 1/5。

Lambarri 等^[60]发现在抛光轨迹规划中, 使用双方向作用、小重叠率的激光, 150 W 的输出功率, 4 m/min 的扫

描速度时,抛光效果最好。抛光能使原始粗糙度为 $R_a=4\sim 5\ \mu\text{m}$ 的减小到 $R_a=1.0\ \mu\text{m}$,能减少80%的表面粗糙度。

Chow等^[31]研究了不同的离焦量对激光抛光效果的影响。他得出,激光离焦量是激光的能量直接传递到金属表面的重要参数,通过改变激光的离焦量,激光作用到金属表面的能量密度也发生变化。这个参数对激光抛光金属的影响效果也比较明显。他在实验中,对比使用了小于1.8 mm,大于2.2 mm,介于1.8 mm和2.2 mm的三种激光离焦量抛光H13材料后发现,大于2.2 mm的离焦量的激光的抛光效果最好,材料表面的粗糙度能降低39.7%。

Gao等^[63]使用一个两步法的纳秒激光来抛光金属表面。首先采用一个高能量的激光来烧蚀工件表面(产生表面凹陷现象),接着再采用一个低能量的激光来熔化材料,形成可流动的金属材料流,再次凝固后凹陷表面变平滑。结果显示,采用两步法的激光,可以得到一个非常光滑的抛光表面。在研究了激光扫描速度对两步法的第二步的影响后发现,扫描速度对材料表面的形貌和粗糙度的影响不大,而采用200 ns脉宽的激光,在这个步骤中能产生最佳的抛光效果。他分别采用了15 ns、30 ns、65 ns脉宽的激光在第二步中实验发现,对于镍合金,其表面形貌和粗糙度受激光的脉宽和扫描速度的变化的影响比较复杂,而对于模具钢,其表面形貌和粗糙度受激光的脉宽和扫描速度的变化的影响不大,但是其表面粗糙度的增加,还是受到激光脉宽降低的影响。

Hafiz等^[32]研究了激光抛光过程中,激光束作用到金属表面的重叠率对抛光效果的影响,他研究在相同的能量密度条件下,80%,90%,95%和97.5%这4种重叠率的激光,发现采用80%的激光重叠率时,可以减少65.9%的H13工具钢的表面粗糙度 R_a 值;采用97.5%的激光重叠率时,可以减少77.9%的表面粗糙度 R_a 值;当采用95%的激光重叠率时,材料表面的粗糙度可以从 $R_a=1.21\ \mu\text{m}$ 降低到 $R_a=0.13\ \mu\text{m}$,可以减少近90%的表面粗糙度。因此这种重叠率的激光的抛光效果最好。

Chow等^[31]研究了不同的离焦量对激光抛光效果的影响,他得出,通过改变离焦量的大小可以改变激光作用在材料表面的能量密度的大小。实验对比发现,采用低于1.30的离焦量时,激光对金属表面只产生烧蚀效果,采用1.30~2.90的离焦量时,激光对金属表面才产生熔化效果,而当离焦量大于2.90时,激光对金属表面只产生热处理效果。进一步的研究发现,在采用1.30~1.80的离焦量时,材料的去除,可以用Greig等^[54]的材料表面的SOM去除原理模型来解释,材料表面的粗糙度 R_a 可以从726 nm降低到493 nm(降低32%)。在采用1.80~2.20的离焦量时,材料表面的粗糙度 R_a 可以从684 nm上升到746 nm(增加11.7%)。在采用2.20~2.90的离焦量时,材料表面的粗糙度 R_a 可以从675 nm减少到601 nm(降低11%)。因此,采用合适的离焦量,才会对金属表面产生更好的抛光效果。他同时采用铣削加工的H13材料进行激光抛光,发现当铣削的深度很大时,采用小于1.8 mm的离焦量的抛光效果更好;而对于表面的凹凸分布对材料表面的粗糙度影响比较大时,采用大于2.2 mm的离焦量的抛光效果更好。

Jang等^[39]采用一个CW激光和一个脉冲紫外激光组合的抛光方法,可以实现减少两种不同类型的316 L材料表面粗糙度的56.4%和57.3%。他指出,激光作用在材料表面的能量密度的恒定控制,对于激光抛光金属来说尤为重要。因此他采用紫外激光器来进行抛光,并同时采用CW半导体激光器来控制激光的能量密度。CW半导体激光器主要用来控制激光光斑直径和离焦量,这样紫外激光器就可以形成一个恒定的激光能量密度,采用CW半导体激光器和紫外激光器结合来进行抛光,发现抛光效果比较好。

Campanelli等^[8]使用1064 nm的Nd:YAG激光抛光316 L不锈钢材料表面,他采用激光功率分别为10, 15, 20 W,扫描速度为300, 500, 700,脉冲频率为10, 20, 30 kHz,离焦量为-2, 0, 2 mm的参数组合来做实验。为了得到优化的抛光参数,他选择一种数据统计方法和田氏优化方法来优化。结果显示,高的激光扫描速度,会影响到抛光效果。为了得到最佳的抛光效果,激光的功率和重叠率越大越好。激光的离焦量对材料表面粗糙度的影响,只发生在很低的一个去除层,这也意味着,当使用激光抛光很薄的材料层时,材料表面粗糙度的变化,要考虑到离焦量的影响。

6 激光抛光效果分析

6.1 金属抛光材料粗糙度的降低

一般说来,要达到金属材料的抛光效果,要求金属材料表面的粗糙度能尽可能降低。学者们对金属材料的激光抛光研究后发现,在合适的激光作用参数下,材料表面的粗糙度才能降低。Bordatchev等^[10]提出,最后

激光抛光的金属材料表面的粗糙度,通过调整合适的工艺参数,可以降低到纳米级。

Ukar等^[29]通过一个DoE实验设计方法,将激光抛光的实验结果作为输入数据,因此,影响抛光表面的最优化的工艺参数可以通过这个方法设计得到。通过这种方法得到的优化工艺参数,发现对高速铣削得到的DIN 1.2379工具钢表面,粗糙度能降低到 $R_a=0.8\ \mu\text{m}$,可以降低80%的表面粗糙度。

Pinkerton等^[60]研究了激光脉冲宽度与316 L不锈钢的表面粗糙度的影响规律,提出了不断增加脉冲宽度到能形成一个连续的激光束极限时,会造成316 L不锈钢表面的粗糙度值的增加。

Ukar等^[123]使用高功率二极管激光器抛光DIN1.2379工具钢表面,得到 $R_a=0.5\ \mu\text{m}$ 的表面。在对不同的激光器类型进行对比后发现,在相同的作用时间和激光能量密度下,采用高功率二极管激光器,比采用CO₂激光器的抛光效果好。

Lamikiz等^[3]通过采用原始粗糙度值为 $R_a=1.7\sim 2.3\ \mu\text{m}$ 的工具钢来进行激光抛光实验,得到最终的表面粗糙度值为 $R_a=0.34\ \mu\text{m}$ 的抛光表面。他通过实验对比发现,若激光抛光时的激光功率过高,或者激光头与工件的距离过低,抛光效果都不好。对于激光抛光金属材料来说,他提出最重要的参数是作用到金属材料表面的单位面积的能量密度。

Lamikiz等^[20]采用激光,对金属表面进行抛光后发现,表面粗糙度值 R_a 可以减少到3倍以下,根据加载到金属表面的激光参数,他得出有一个激光能量和激光头到工件表面距离的范围值,在这个范围之内,随着激光功率的增加,或者激光头到工件距离的减少,这时激光加工得到的表面粗糙度值会增加。

Lamikiz等^[56]采用LaserForm ST-100的烧结件来进行激光抛光实验,发现该材料的表面粗糙度,可以从原始的 $R_a=7.5\sim 7.8\ \mu\text{m}$ 降低到 $R_a=1.49\ \mu\text{m}$,粗糙度值降低了80.1%。他发现材料表面粗糙度的降低,是材料本身发生流动造成的。

Lambarri等^[59]使用激光进行抛光,发现在抛光过程中,原始表面几何形貌会影响到抛光后的几何形貌。进一步的研究发现,当激光的功率在150~200 W,扫描速度超过10 m/min时,由于材料表面的凸起没有足够的时间向凹陷处移动,因此这个参数不能起到抛光作用。但是,过低的扫描速度,会造成材料表面氧化。同时,材料本身先前存在的缺陷,根据其规模,也会阻碍抛光过程。在这种情况下,一些小的片状结构,附在材料表面并未被抛光。材料的熔融区的扩展范围是从40~100 μm 。微观结构分析表明类似的凝固枝晶结构,在所有情况下都几乎没有过渡到金属基体。

Shao等^[33]在使用KF准分子激光器抛光几种金属表面。他提出金属表面的原始微凸起几何特征,对激光抛光的金属表面效果有很大的影响。对于一个给定材料的已知表面几何特征的参数确定是激光照射时间。

6.2 激光抛光去除金属材料方式

Temmler等^[25,31,32,43,54,58,60]几位学者均提出,激光抛光金属材料,实现粗糙的金属表面变得平滑,主要是由于凸起处的材料熔化发生流动,而不是凸起处金属的气化来实现。

Gisario等^[36]使用激光来抛光经过磨削的304不锈钢表面,发现激光抛光,对于改变磨削的金属表面近表面的凸起和凹陷纹理,是一种非常合适的方法。基于材料SSM机理,激光在与磨削的材料相互作用过程,是一个选择性去除材料表层的过程。最大的影响因素是单位体积的能量,当这个能量转化为热量后,金属表层就发生了熔化。在经过磨削的表面,增加激光功率和激光扫描的速度,可以实现更好和更均匀的抛光效果。但同时要注意,根据非接触抛光过程中的材料SOM机理,必须采取一定的措施,来防止材料表面的过热和材料基体的熔化层的出现。

Ramos等^[64]进行激光抛光研究时提出,简单来说,一个粗糙的金属表面可以设想为由无限多的球形波峰和波谷组成。当激光束作用到粗糙的表面时,表面上的波峰位置相对于波谷位置来说,更容易受到激光束的作用而先产生熔化效果。一部分波峰位置熔化的金属材料,在Marangoni压力,本身重力和激光作用力的共同作用下,将流向波谷位置。这种部分熔化的机制,有效地减少了材料表面波峰和波谷的高度差值,从而也减少了材料表面的粗糙度。

Brinksmeier等^[12]使用激光抛光金属模具时,发现模具材料表面不断地被熔化和凝固,由于被熔化的材料表面的张力的作用,得到光滑的模具表面。

Hua等^[14]研究了激光脉冲宽度和抛光金属表面粗糙度的关系,发现在能使金属表面发生熔化和蒸发的

有效的脉冲宽度范围内,对于脉冲宽度长的激光,在抛光时会引起抛光表面体积的膨胀,造成表面粗糙度的增加;而当脉冲宽度足够小时,能明显的降低抛光后的金属表面粗糙度。在研究了激光频率与抛光效果的关系时^[19],他得出高的激光频率,意味着高的激光能量作用在金属上,这样会造成金属在熔化和重新凝固过程中的严重的组织不均匀,而低的激光频率,则会在抛光过程中没有辐照效果。因此频率过高和过低,都对金属的抛光效果不利。后来他又研究了各种激光参数与抛光金属表面粗糙度的关系^[10],发现激光抛光时,金属表面形貌的改变,取决于三个方面:1)是激光辐照和材料的相互作用过程;2)是激光器的扫描速度,当激光的斑点直径和输出能量确定后,能影响激光抛光效果的只有激光的扫描速度了。采用低的扫描速度时,抛光后的金属表面粗糙度更大,而采用更快的扫描速度,又没有抛光效果;3)是金属表面的熔化、蒸发和相变。进一步研究发现,在1~4 mm/s的激光扫描速度的范围内,当采用低的扫描速度时,金属表面形貌的变化主要是大面积的熔化和蒸发;扫描速度适中时,主要是金属表面局部地熔化,而蒸发很少出现;采用更快的激光扫描速度时,相变此时则作为一种重要的抛光作用机制影响着抛光后的金属表面的形貌。

Pfefferkorn等^[22]利用脉冲微束激光在抛光S7工具钢时,发现金属表面能快速变得平整光滑,而金属材料表面之所以变得平整光滑,是因为表面的材料发生了流动。

Temmler等^[25]发现相比于传统的抛光方法,激光抛光的金属材料并没有消失,而是熔化后发生流动。抛光后的金属表面结构和粗糙度的变化,取决于受到激光抛光影响的熔化后的金属的表面张力。

Kumstel等^[49]发现激光抛光金属表面的过程,是激光诱使金属表面的一个很薄的金属层发生熔化,熔化层的金属,由于表面张力的作用,材料会从凸起的地方向凹陷处流动。

Gisario等^[51]用高功率的二极管激光器来抛光烧结青铜后发现,在高的激光功率和较短的激光作用时间下,烧结青铜的表面粗糙度能降低50%。对于激光抛光金属表面,为了得出一个大概的实验工艺条件,他提出了一个初步的实验模型来预测实验参数。他得出,材料表面粗糙度的降低,是基于材料表面的一个不超过两层,直径为125 μm的熔化过程来实现。

Nüsser等^[27]用双束激光器来进行实验,研究了预热激光束的激光功率、扫描速度、两个束斑的偏移量、预热激光束的能量分布和抛光材料表面粗糙度的关系。通过对马氏体工具钢和TiAl6V4两种材料实验后发现,对于马氏体工具钢,采用双束激光抛光时,由于马氏体相的增加,发现抛光后的材料表面粗糙度比传统的单束激光抛光的效果差;而对于TiAl6V4,采用双束激光抛光时,由于比单束激光具有更长的熔化作用时间,发现抛光后的材料表面粗糙度比传统的单束激光抛光的效果好很多(比单束激光抛光后的表面粗糙度低36%)。研究激光扫描速度值后发现,随着扫描速度的增加,表面粗糙度值也同时增加。对于双束激光器,该作者还发现,具有高斯能量分布的激光器,相比较具有Top-Hat分布的,能更好地抛光金属表面。组合研究各种参数后发现,采用双束激光器来抛光金属时,预热用的激光器,在不使材料发生熔化时,激光能量越大越好。此外,抛光中的扫描速度越低越好,最后,预热激光器的光束不要和抛光用的激光束重合。

Pfefferkorn等^[46,50]进行激光抛光实验时,研究发现在使用脉冲激光抛光Ti6Al4V表面时,由于材料表面张力构成的温度梯度,长的熔化时间会造成熔化金属内部热毛细流的出现,进而能更有效地减少72%的材料表面粗糙度。而在短的熔化时间时,发现没有热毛细流的出现。

Gharbi等^[48,52]做激光抛光参数对比实验后发现,采用准连续脉冲模式,而不是完全连续模式的激光器,能得到更佳的抛光表面。这是因为采用准连续脉冲模式,能形成大而稳定的熔池,并且能减少金属熔池内部的融化区的热梯度和侧向流动。而金属熔池内部的融化区的热梯度和侧向流动,一般认为是影响抛光金属表面的一个主要因素。另外通过研究,他得出在采用相同的平均输出功率时,使用大占空比的脉冲模式,显然能提供平滑的抛光效果。

6.3 激光抛光后金属材料的表面改性效果

Ukar等^[9]对高硬度的DIN 1.2379工具钢进行激光抛光。他采用CO₂激光器,材料表面的粗糙度值能减小75%;采用高功率二极管激光器,材料表面的粗糙度值能减小80%。他对比两种激光器后发现,高功率二极管激光器能更有效地减低材料表面的粗糙度。该作者在对比铣削加工后和EDM加工后的粗糙表面后发现,EDM加工后的粗糙表面,采用激光抛光后,不仅有一个小的热影响区的出现,而且材料表面没有裂纹的产生。

Hua等^[14]用AISI-01冷作钢进行激光抛光实验,发现材料表面的微观硬度,可以从初始的289 HK_{50g}增加到665 HK_{50g}。

为了研究模具抛光后的脱模性能和耐磨性能,Conrad等^[26]使用超短激光来抛光金属模具,发现有一个层厚小于20 μm的疏水性抛光表面生成,并且激光抛光后的材料粗糙度能降低到 $R_a=0.03 \mu\text{m}$ 。

球墨铸铁材料由于材料组织中自由的石墨形态的存在,一般不能直接进行抛光,也很少用激光来抛光。Ukar等^[34-35]对GGG70L球墨铸铁材料进行激光抛光实验,在大气压条件下,对GGG70L球墨铸铁材料进行脱碳处理,在这种条件下用激光抛光后发现,材料表面的粗糙度 $R_a=4.35 \mu\text{m}$ 能降低到 $R_a=0.63 \mu\text{m}$,并证实这种激光抛光工艺可用于球墨铸铁材料表面的强化。当采用250 W的输出功率,100 mm/s的扫描速度,30%重叠率时,GGG70L球墨铸铁材料表面的硬度可以从28.7 HRC增加到53.4 HRC,材料表面的硬度有很大的提高。

之前激光对材料表面的抛光后,材料的断裂性能的改善很少有人关注,Avilés等^[24]使用具有高疲劳强度的AISI 1045钢来进行激光抛光实验,检测激光抛光金属材料后,对其断裂性能有明显的改善效果。发现这种材料抛光后的性能,受到抛光后材料表面粗糙度的影响,但是发现主要还是受到抛光后,熔化和蒸发后的材料的微观组织结构和热影响区的影响。

一般的激光抛光金属材料都在大气压条件下进行,但是这种条件下抛光得到的金属表面有夹杂物和氧化物,这不利于提高材料的疲劳强度。Avilés等^[23]在N₂的气氛中进行AISI 1045钢的激光抛光实验,发现能得到更好的表面形貌和疲劳强度。他研究发现,这种工艺进行的抛光,有一个100 μm的热影响区,并且这个热影响区里面的残余应力均为200 MPa的压应力。在这个热影响区内,珠光体组织全部转化为马氏体,而铁素体没有发生变化,抛光前材料的硬度为20 HRC,抛光后热影响区的硬度为52 HRC。通过对AISI 1045钢的激光抛光实验和疲劳强度对比实验,得到 $R_a=0.35 \mu\text{m}$ 的表面,进行10⁶次的疲劳强度实验后发现,激光抛光不仅能去除材料的表面粗糙度,还能有效提高材料的抗疲劳强度。

Lamikiz等^[56]采用LaserForm ST-100的烧结件来进行激光抛光实验。发现抛光后的材料表面具有比原始材料更高的均匀硬度分布,同时发现,采用激光来抛光这种材料,热影响区中没有裂纹的出现,能有效地避免材料后期的过早失效。

Mai等^[37]采用304不锈钢抛光实验后,发现其粗糙度从 $R_a=195 \text{ nm}$ 降低到 $R_a=75 \text{ nm}$ 的同时,不均匀的表面硬度最终都转化为均匀的表面硬度分布。同时由于激光抛光作用造成金属快速的熔化和凝固现象,经电化学测试发现,凝固后的表面的耐腐蚀性有提高。进一步的研究发现,激光抛光作用,对于304不锈钢表面的微孔和微裂纹的控制和材料表面划痕的消除有积极作用。

由此看来,激光抛光不仅能实现粗糙表面的光滑化,还可以提高材料的表层硬度、耐磨性和耐腐蚀性。

7 结论与展望

激光抛光应用在金属材料上,作为一种新型的加工技术,已经得到越来越多的研究者的关注。这种方法具有其独特的优越性,它是一种非接触式抛光方法,灵活性强,既可以对材料整体抛光,又可以局部抛光。其抛光在大气环境中进行,对材料没有限制。通过对这种技术的进一步深入研究,可以为现代工业提供一种高效率、高柔性、低成本、工艺相对简单的抛光方法。

激光抛光金属这项技术虽然有其许多优点,但目前对其研究工作还不是很多。其本身的限制条件也是一个重要原因。如由于激光器类型的限制,很多激光不能应用在金属表面的抛光中。正是近年来激光器的不断发展,才有很多学者开始尝试使用新型的激光器对金属表面进行抛光。因此,作为激光抛光的最大的限制条件,开发出新的激光器是目前最大的研究需求之一。此外,三维(3D)增材制造现在是一个研究热点,而一般3D增材制造得到的金属表面都比较粗糙,使用激光对这种金属表面进行直接抛光是最好的方法。但是目前激光对3D增材制造的表面抛光的文献报道还不是很多,因此,关于这方面还有大量的研究工作可以进行。

进一步的研究还需要开发新的激光抛光金属表面的模型,为激光抛光工艺参数的选择建立一个知识库。同时,对激光抛光表面的其他特性,如表面摩擦性能、微/纳米表面裂缝的形成进行全面描述,另外,对于选择不同的材料进行激光抛光时,抛光工艺参数的快速选择和优化也是一个需要研究的方向。

激光抛光作为一种有效的抛光方法,完全有可能替代人工抛光。但是,仅仅通过实验来证明激光能抛光金属材料本身是远远不够的,深入的分析激光与材料相互作用的机理是很有必要的。目前的研究工作,主要是围绕机理形成、建模计算、工艺实验、分析结果等几方面进行,但总体研究水平尚处在初步的探索阶段,进入实际的企业生产应用还需要一定的时间。

参考文献

- 1 Chen Ling, Yang Yongqiang. Laser polishing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2003, 40(7): 57-59.
陈林, 杨永强. 激光抛光[J]. 激光与光电子学进展, 2003, 40(7): 57-59.
- 2 Huang Jiafu, Wei Xin, Xie Xiaozhu, *et al.*. Research on influences of condition parameters on laser polishing process[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(12): 20-24.
黄加福, 魏昕, 谢小柱, 等. 影响激光抛光效果的因素分析[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(12): 20-24.
- 3 Lamikiz A, Sanchez J A, De L L N L, *et al.*. Laser polishing techniques for roughness improvement on metallic surfaces [J]. International Journal of Nanomanufacturing, 2007, 1(4): 490-498.
- 4 Zhao L, Klopff J M, Reece C E, *et al.*. Laser polishing of niobium for superconducting radio-frequency accelerator applications[J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2014, 17(8): 083502.
- 5 Singaravelu S, Klopff J M, Xu C, *et al.*. Laser polishing of niobium for application to superconducting radio frequency cavities[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2012, 30(5): 051806.
- 6 Nüsser C, Wehrmann I, Willenborg E. Influence of intensity distribution and pulse duration on laser micro polishing[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 462-471.
- 7 Smith B B, Wolf D M, Turner K T, *et al.*. Laser polishing of micro-machined microfluidic molds[C]. ICOMM/4M, 2010, 75: 445-451.
- 8 Campanelli S L, Casalino G, Contuzzi N, *et al.*. Taguchi optimization of the surface finish obtained by laser ablation on selective laser molten steel parts[C]. Procedia CIRP, 2013, 12: 462-467.
- 9 Ukar E, Lamikiz A, De Lacalle L N L, *et al.*. Laser polishing of tool steel with CO₂ laser and high-power diode laser[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(1): 115-125.
- 10 Bordatchev E V, Hafiz A M K, Tutunea-Fatan O R. Performance of laser polishing in finishing of metallic surfaces[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(1-4): 35-52.
- 11 Tuckerman D B, Weisberg A H. Planarization of gold and aluminum thin films using a pulsed laser[J]. IEEE Electron Device Letters, 1986, 7(1): 1-4.
- 12 Brinksmeier E, Riemer O, Gessenharter A, *et al.*. Polishing of structured molds[C]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2004, 53(1): 247-250.
- 13 Ukar E, Lamikiz A, de Lacalle L N L, *et al.*. Laser polishing parameter optimization for die and moulds surface finishing [C]. ASME 2008 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the 3rd JSME/ASME International Conference on Materials and Processing, American Society of Mechanical Engineers, 2008: 197-204.
- 14 Hua M, Shao T, Hong Y T, *et al.*. Influence of pulse duration on the surface morphology of ASSAB DF-2 (AISI-01) cold work steel treated by YAG laser[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 185(2): 127-136.
- 15 Guo W. Effect of irradiation parameters on morphology of polishing DF2 (AISI-01) surface by Nd: YAG laser[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2007, 1: 1-5.
- 16 Hua M, Shao T M, Tam H Y. Surface transformation of DF-2 steel after continuous mode laser irradiation[J]. Journal of materials processing technology, 2007, 192: 89-96.
- 17 Guo K W. Effect of polishing parameters on morphology of DF2 (AISI-01) steel surface polished by Nd: YAG laser[J]. Surface Engineering, 2009, 25(3): 187-195.
- 18 Guo K W, Tam H Y. Study on polishing DF2 (AISI 01) steel by Nd: YAG laser[J]. Journal of Materials Science Research, 2012, 1(1): p54.
- 19 Guo W, Hua M, Tse P W T, *et al.*. Process parameters selection for laser polishing DF2 (AISI 01) by Nd: YAG pulsed laser using orthogonal design[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59(9-12): 1009-1023.
- 20 Lamikiz A, Sánchez J A, López de Lacalle L N, *et al.*. Surface roughness improvement using laser-polishing techniques [C]. Materials science forum, 2006, 526: 217-222.

- 21 Zhang Z, Ren L, Zhou T, *et al.*. Optimization of laser processing parameters and their effect on penetration depth and surface roughness of biomimetic units on the surface of 3Cr2W8V steel[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2010, 7: S67–S76.
- 22 Pfeifferkorn F E, Duffie N A, Morrow J D, *et al.*. Effect of beam diameter on pulsed laser polishing of S7 tool steel[C]. *CIRP Annals–Manufacturing Technology*, 2014, 63(1): 237–240.
- 23 Avilés R, Albizuri J, Ukar E, *et al.*. Influence of laser polishing in an inert atmosphere on the high cycle fatigue strength of AISI 1045 steel[J]. *International Journal of Fatigue*, 2014, 68: 67–79.
- 24 Avilés R, Albizuri J, Lamikiz A, *et al.*. Influence of laser polishing on the high cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel[J]. *International Journal of Fatigue*, 2011, 33(11): 1477–1489.
- 25 Temmler A, Willenborg E, Wissenbach K. Design surfaces by laser remelting[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 419–430.
- 26 Conrad D, Richter L. Ultra–short pulse laser structuring of molding tools[J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 1041–1046.
- 27 Nüsser C, Sändker H, Willenborg E. Pulsed laser micro polishing of metals using dual–beam technology[J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 346–355.
- 28 Ukar E, Lamikiz A, De Lacalle L N L, *et al.*. Thermal model with phase change for process parameter determination in laser surface processing[J]. *Physics Procedia*, 2010, 5: 395–403.
- 29 Ukar E, Lamikiz A, López de Lacalle L N, *et al.*. Laser polishing operation for die and moulds finishing[C]. *Advanced Materials Research*, 2010, 83: 818–825.
- 30 Ukar E, Lamikiz A, Martínez S, *et al.*. Roughness prediction on laser polished surfaces[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(6): 1305–1313.
- 31 Chow M T C, Bordatchev E V, Knopf G K. Experimental study on the effect of varying focal offset distance on laser micropolished surfaces[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 67(9–12): 2607–2617.
- 32 Hafiz A M K, Bordatchev E V, Tutunea F R O. Influence of overlap between the laser beam tracks on surface quality in laser polishing of AISI H13 tool steel[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2012, 14(4): 425–434.
- 33 Shao T M, Hua M, Tam H Y, *et al.*. An approach to modelling of laser polishing of metals[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2005, 197(1): 77–84.
- 34 Ukar E, Lamikiz A, Martínez S, *et al.*. Laser Polishing of GGG70L Cast Iron with 2D scan–head[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 63: 53–59.
- 35 Ukar E, Lamikiz A, Martínez S, *et al.*. Polishing of ductile cast iron with scan–head guided fiber laser[C]. *Materials Science Forum*, 2014, 797: 151–156.
- 36 Gisario A, Boschetto A, Veniali F. Surface transformation of AISI 304 stainless steel by high power diode laser[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(1): 41–51.
- 37 Mai T A, Lim G C. Micromelting and its effects on surface topography and properties in laser polishing of stainless steel [J]. *Journal of Laser Applications*, 2004, 16(4): 221–228.
- 38 Rosa B, Hascoët J Y, Mognol P. Topography modeling of laser polishing on AISI 316 L milled surfaces[J]. *Mechanics & industry*, 2014: 51–61.
- 39 Jang P R, Jang T S, Ji K H, *et al.*. A method of laser micro–polishing for metallic surface using UV nano–second pulse and CW lasers[J]. *ArXiv*, 2014: 1411.5085.
- 40 Vadali M, Ma C, Duffie N A, *et al.*. Pulsed laser micro polishing: Surface prediction model[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2012, 14(3): 307–315.
- 41 Zhang Fenglie. Study on Micro–polishing Theory and Technique of Metal Materials Using UV Nanosecond Pulsed Laser [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
张峰烈. 金属材料纳秒紫外脉冲激光微抛理论与技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- 42 Zhang Fenglie, Fu Xing, Liu Chunyang. Influences of nanosecond pulsed laser on parameters in micro–polishing of stainless steel 316 L[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2011, 9(4): 370–376.
张峰烈, 傅 星, 刘春阳. 纳秒脉冲激光对 316 L 不锈钢微抛光效果的影响[J]. *纳米技术与精密工程*, 2011, 9(4): 370–376.
- 43 Perry T L, Werschmoeller D, Li X, *et al.*. Pulsed laser polishing of micro–milled Ti6Al4V samples[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2009, 11(2): 74–81.
- 44 Milovanovic D S, Radak B B, Gakovic B M, *et al.*. Surface morphology modifications of titanium based implant induced by 40picosecond laser pulses at 266nm[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 501(1): 89–92.
- 45 Vadali M, Ma C, Duffie N A, *et al.*. Effects of pulse duration on laser micro polishing[J]. *Journal of Micro and Nano–*

- Manufacturing, 2013, 1(1): 011006.
- 46 Pfefferkorn F E, Duffie N A, Li X, *et al.*. Improving surface finish in pulsed laser micro polishing using thermocapillary flow[C]. CIRP Annals–Manufacturing Technology, 2013, 62(1): 203–206.
- 47 Ma C, Vadali M, Duffie N A, *et al.*. Melt pool flow and surface evolution during pulsed laser micro polishing of Ti6Al4V [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2013, 135(6): 061023.
- 48 Gharbi M, Peyre P, Gorny C, *et al.*. Influence of various process conditions on surface finishes induced by the direct metal deposition laser technique on a Ti–6Al–4V alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(5): 791–800.
- 49 Kumstel J, Kirsch B. Polishing titanium–and nickel–based alloys using cw–laser radiation[J]. Physics Procedia, 2013, 41: 362–371.
- 50 Ma C, Vadali M, Li X, *et al.*. Analytical and experimental investigation of thermocapillary flow in pulsed laser micropolishing[J]. Journal of Micro and Nano–Manufacturing, 2014, 2(2): 021010.
- 51 Trtica M, Gakovic B, Batani D, *et al.*. Surface modifications of a titanium implant by a picosecond Nd: YAG laser operating at 1064 and 532nm[J]. Applied Surface Science, 2006, 253(5): 2551–2556.
- 52 Gharbi M, Peyre P, Gorny C, *et al.*. Influence of a pulsed laser regime on surface finish induced by the direct metal deposition process on a Ti64 alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(2): 485–495.
- 53 Yermachenko V M, Vdovin Y A, Mironov V D, *et al.*. Technology of polishing of titanium surface using the fiber–laser radiation[J]. Laser Physics, 2010, 20(6): 1537–1544.
- 54 Ramos G J A, Bourell D L. Reducing surface roughness of metallic freeform–fabricated parts using non–tactile finishing methods[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2004, 21(4): 297–316.
- 55 Gisario A, Bellisario D, Veniali F. Thermal–morphological analysis of diode laser polishing on sintered bronze[J]. International Journal of Material Forming, 2010, 3(1): 1067–1070.
- 56 Lamikiz A, Sanchez J A, de Lacalle L N L, *et al.*. Laser polishing of parts built up by selective laser sintering[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(12): 2040–2050.
- 57 Bustillo A, Ukar E, Rodriguez J J, *et al.*. Modelling of process parameters in laser polishing of steel components using ensembles of regression trees[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2011, 24(8): 735–747.
- 58 Hafiz A M K, Bordatchev E V, Tutunea F R O. Experimental analysis of applicability of a picosecond laser for micro–polishing of micromilled Inconel 718 superalloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(9–12): 1963–1978.
- 59 Lambarri J, Leunda J, Soriano C, *et al.*. Laser surface smoothing of nickel–based superalloys[J]. Physics Procedia, 2013, 41: 255–265.
- 60 Perry T L, Werschmoeller D, Duffie N A, *et al.*. Examination of selective pulsed laser micropolishing on microfabricated nickel samples using spatial frequency analysis[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2009, 131(2): 021002.
- 61 Perry T L, Werschmoeller D, Li X, *et al.*. The effect of laser pulse duration and feed rate on pulsed laser polishing of microfabricated nickel samples[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2009, 131(3): 031002.
- 62 Li cheng. Investigation of Micro Laser Polishing on Surface of the Part Sintered by Selective Laser Micro Sintering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012.
李 诚. 激光微烧结工件表面的激光微抛光研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- 63 Gao Y, Wu B, Zhou Y, *et al.*. A two–step nanosecond laser surface texturing process with smooth surface finish[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(23): 9960–9967.
- 64 Ramos J A, Murphy J, Wood K, *et al.*. Surface roughness enhancement of indirect–SLS metal parts by laser surface polishing[C]. Proceedings of the 12th Solid Freeform Fabrication Symposium, 2001: 28–38.
- 65 Xu Gang, Dai Yutang, Xiao Xiang. Study on mathematical modeling and experiment of ultrashort laser polishing micro–processing[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0603003.
徐 刚, 戴玉堂, 肖 翔. 超短激光抛光微加工的数学建模与实验研究[J], 中国激光, 2013, 40(6): 0603003.
- 66 Pinkerton A J, Li L. The effect of laser pulse width on multiple–layer 316L steel clad microstructure and surface finish [J]. Applied Surface Science, 2003, 208: 411–416.