

激光加热辅助切削技术及研究进展

吴雪峰¹, 王 扬²

(1. 哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 激光加热辅助切削技术将激光作为热源来提高切削区的温度, 达到降低切削力、延长刀具寿命、提高表面质量及加工效率的目的. 介绍了激光加热辅助切削技术的特点、加工方式及加工机理, 从仿真研究与试验研究两方面, 对激光加热辅助切削技术的研究现状进行了分析和总结, 讨论了其研究的发展方向.

关键词: 激光应用; 激光加热辅助切削; 难加工材料

中图分类号: TG655 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2012)04-0034-12

The Technology and Development of Laser Assisted Machining

WU Xue-feng¹, WANG Yang²

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Laser assisted machining (LAM) which uses laser to elevate the cutting zone temperature has the advantages of decreasing cutting force, improving machining characteristics and increasing tool life productivity. The technical characteristics, processing method and machining mechanism of LAM are depicted in the paper. The latest development of LAM is summarized from two sides of simulation and experiments, as well as the tendency of developing.

Key words: laser application; laser assisted machining; difficult-to-machine material

0 引 言

随着航空航天工业、兵器工业、机械工业的发展, 对产品零部件材料的性能有了更高要求, 同时也出现了各种高强度、高硬度、高脆性的工程材料. 材料性能提高的同时给加工带来了困难, 例如高温合金在高温下具有优良的热强度、热稳定及热疲劳性能, 采用常规切削方法刀具磨损严重, 表面质量差. 工程陶瓷硬度高、耐磨损、抗腐蚀, 目前通常采用磨削加工, 生产效率低, 成本高, 砂轮损耗大. 加热辅助切削技术是解决上述难加工材料加工的一种有效方

法, 通过提高工件局部温度改变将要去除材料的性能, 使强度与硬度下降, 从而改善材料的可加工性. 采用的热源包括等离子弧、氧乙炔焰和激光, 其中激光具有能量密度高且易于调整, 光斑尺寸与入射位置可控性好, 自动化集成方便的优点, 已成为加热辅助加工首选热源.

激光加热辅助切削 (laser assisted machining, LAM) 早在 20 世纪 70 年代提出, 至今国内外学者已经开展了大量的研究工作, 期间材料技术、激光技术的发展不断扩展其应用范围. 本文综述了激光加热辅助切削技术的研究现状, 展望了技术的发展方向.

收稿日期: 2011-10-17

作者简介: 吴雪峰 (1982—), 男, 博士, 讲师, E-mail: hlqxuefeng@163.com;

王 扬 (1960—), 男, 博士, 教授.

1 激光加热辅助切削技术

LAM 技术是将高功率激光束聚焦在切削刃前的工件表面,将工件局部加热到很高的温度,在材料被切除前的短时间内,切削性能发生改变,之后采用刀具进行加工.通过对材料加热,提高材料的塑性,使屈服强度降低到断裂强度以下,降低切削力,减小刀具磨损,防止切削振颤,从而达到提高加工效率,降低成本,提升加工表面质量的目的,其原理如图1所示.

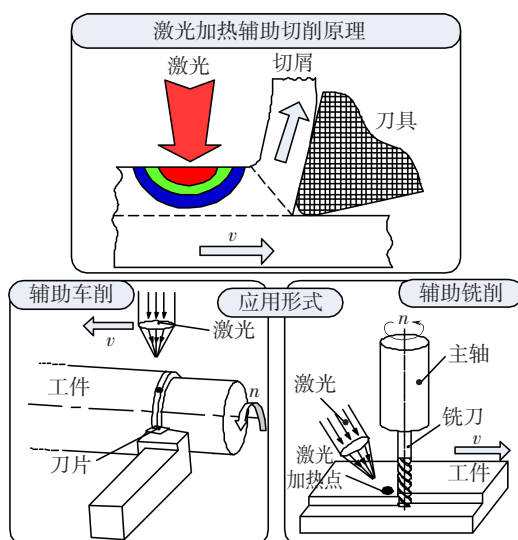


图1 激光加热辅助切削原理

1.1 光源种类

激光的特点是相干性好、聚焦性强、功率密度高,是适合 LAM 的理想热源.选择合适的激光器与激光参数,对 LAM 加工至关重要.在早期的研究中,功率大,技术成熟的 CO_2 激光器是主要的光源,但是由于金属材料对 CO_2 激光的吸收率比较低,导致其经济型差^[1-2].随着激光技术的发展,激光器功率提高,设备的成本降低,尤其工程陶瓷材料的应用,激光加热效率显著提高.陶瓷材料对 CO_2 激光的吸收率可达 85% 以上,因此加工陶瓷等非金属材料通常选用 CO_2 激光作为光源.与 CO_2 激光器相比 YAG 激光器输出波长短,有利于金属材料对激光的吸收,而且适于光纤传导,光学传输部分得到简化,能够方便的与传统机床集成,逐渐替代了 CO_2 光源.

高功率半导体激光器 (high power diode laser, HPDL) 具有波长小,金属材料吸收率高的优点,并且电-光能的转化效率高,运行费用少,冷却系统要求低,激光头与外围设备的体积大大减小,更适用于

LAM 技术的工业应用. Dumitrescu^[3] 采用 HPDL 作为光源对 AISI D2 工具钢材料进行了激光加热辅助切削试验研究,激光头尺寸小,可很好地与加工系统相结合,试验结果表明刀具寿命增加约 100%,切削力降低,加工振颤明显减弱,加工后材料的表面质量与常规切削得到的结果相同. Kim^[4-5] 采用 HPDL 激光器对氮化硅陶瓷进行了 LAM 试验研究,证明了 HPDL 的适用性.

1.2 加工方式

车削是主要的激光加热辅助加工方式,车削时车刀相对机床是静止的,激光与车床整合相对容易.通过调整光纤头与反射镜的位置可以改变激光光斑直径、激光入射角、激光与刀具之间的距离.

与加热辅助车削相比,辅助铣削方面的研究较少.首先,铣削是一个间歇切削过程,铣削加工过程复杂,影响因素多,容易引起刀具损坏;另外一方面,由于铣刀在加工过程中是旋转的,切削层的位置是周期变化的,因此将激光束与铣床结合相对困难. König^[6] 对钨铬钴合金材料进行了激光加热辅助铣削试验研究,证明了加热辅助铣削的可行性. Yang^[7] 建立了激光加热辅助铣削系统,如图2所示,对氮化硅陶瓷进行了试验研究,可以显著的降低切削力,切屑连续,并且得到良好的加工表面,证明了陶瓷材料加热辅助铣削加工的可行性. Tian^[8] 采用 TiAlN 涂层硬质合金刀具对氮化硅陶瓷进行了加工试验,刀具寿命可以达到 260 mm.

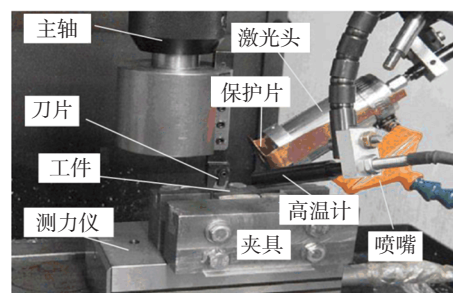


图2 激光加热辅助铣削试验系统

激光加热辅助加工不仅局限于车削、铣削,许多学者还将其它加工方式与激光加热辅助相结合,如刨削、磨削、钻削、抛光等加工方式. Chang^[9] 对氧化铝材料进行了激光加热辅助刨削的研究,与不采用激光加热的常规加工相比切削力减小 10% ~ 16%,表面粗糙度降低 50% 以上. Tian^[10] 建立了激光加热辅助抛光系统,并对 MP35N 与 AISI4140 等材料进行抛光试验.抛光时进给力降低,刀具磨损减小,表面硬度提高. Jen^[11] 进行了激光加热辅助钻削研究,

通过光路设计将 CO_2 激光束调整为环形,采用有限元方法分析了加工过程中的温度场,并且进行了试验验证,初步证明了激光加热的有效性. 目前为止采用激光加热辅助切削方法加工的材料及加工方式如表1所示.

表1 激光加热辅助切削方法加工的材料及加工方式

辅助加工方式	激光器种类	刀具材料	工件材料
车削、铣削、 钻削、磨削、 抛光	YAG、 CO_2 、HP- DL	金刚石、立 方氮化硼、 陶瓷、硬质 合金、涂层 硬质合金	氮化硅、氧化铝、氧化锆、莫来 石、AISI D2 工具钢、1018/ 1040 钢, 420/316/320/P550 不锈钢、Inconel 718 合金、钛、 Ti-6Al-4V 钛合金、蠕墨铸 铁、氧化铝颗粒增强铝基复合 材料等

1.3 加工机理研究

将高功率激光束聚焦在切削刃前的工件表面,在材料被切除前的短时间内,加热到很高的温度,材料的切削性在高温下发生改变,使材料发生软化,温度对材料强度的影响如图3所示,降低材料的剪切强度、屈服强度,将材料去除. 另外由于激光对材料加热软化深度可控性比较好,可实现加热软化深度与切削深度基本一致,加工后工件表面的性能不发生改变.

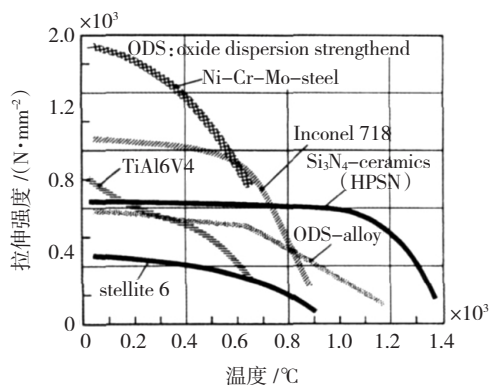
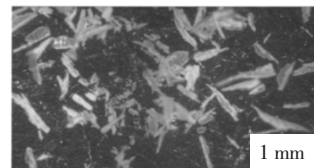


图3 温度对不同材料拉伸强度的影响规律

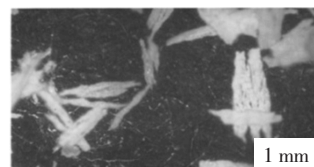
对于塑性材料,加热的作用是降低材料的剪切强度. Demitrescu^[3]对工具钢材料进行了LAM试验研究,可以降低材料的强度、提高延展性,产生的切屑由粗糙断续的小切屑转变为平滑连续大切屑.

对于脆性的陶瓷材料来说,加热的目的是使材料的屈服极限降低到材料的断裂极限之下,尤其是热压烧结陶瓷材料,当切削区超过软化温度后,转变为塑性的切削过程. Lei^[4]对氮化硅材料(含有10%的 YSiAlON 玻璃相)进行了LAM试验研究,发现当

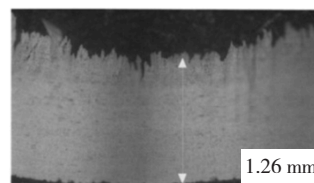
温度超过 $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ (玻璃相的软化温度)后,玻璃相晶界的黏性降低. 氮化硅晶粒在刀具的前进过程中,在软化的玻璃相中开始滑移旋转,玻璃相围绕氮化硅晶粒流动,产生塑性变形. 当裂纹产生并传播到边界,切屑断裂分离,切削开始进行. 切屑的形成包括玻璃相的粘性流动,氮化硅晶粒的重分布,晶粒间裂纹产生、传播等复杂物理过程,不同温度时产生的切屑如图4所示.



(a) 崩碎切屑



(b) 断续切屑



(c) 带状切屑

图4 氮化硅陶瓷切屑形貌

对于不含玻璃相的陶瓷材料,如莫来石与氧化锆,与氮化硅陶瓷的去除机理有所不同. 莫来石陶瓷材料在高温高应力条件下位错运动产生的塑性变形与脆性断裂的共同作用下使材料去除,刀尖与材料的接触点的塑性作用是表面质量提高的主要原因^[5]. 氧化锆陶瓷材料去除是由脆性断裂与塑性变形共同作用下而形成的,随距离刀具接触点越近,塑性去除占主导作用,最终使加工表面完全由塑性作用形成的^[6]. 莫来石加工产生的切屑与加工氮化硅陶瓷产生的切屑类似,而在氧化锆陶瓷的加工中只产生崩碎切屑.

LAM颗粒增强复合材料时,由于温升、基体材料软化,受机械拉伸载荷和热应力共同作用下,在工件与刀尖的接触处出现应力集中. 通过基体传递给颗粒的应力不足以使颗粒破裂,颗粒被挤出、挤入基体,决定了颗粒增强金属基复合材料切削过程中颗粒的三种状态即被剥离、破碎、被挤入^[5-14],LAM TiC颗粒增强钛基复合材料的表面如图5^[7]所示.

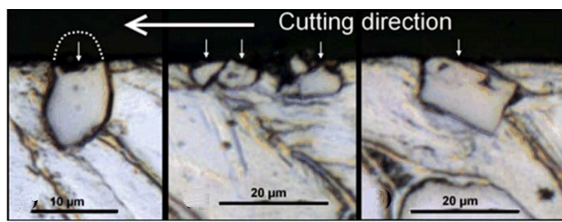


图5 LAM 颗粒增强复合材料的表面

2 激光加热辅助切削仿真研究

2.1 温度场仿真研究

激光加热辅助切削时激光与材料, 刀具与工件之间相互作用, 包含复杂的物理过程. 影响加工结果的参数较多, 工艺参数的合理选择是能否加工出精度高、表面质量好的零件的重要因素, 往往需要大量的实验. 切削区温度对 LAM 来说是最重要的参数, 它是决定切削能否顺利进行的关键因素, 温度过高会造成材料过烧, 影响加工后工件的表面质量, 而温度过低会影响辅助加热的作用. 温度模型的预测主要针对工艺参数对切削区温度的影响规律, 来找到合适的参数范围, 可以减少实验次数, 得到良好的加工效果.

Rozzi^[18-19] 通过对 LAM 氮化硅陶瓷深入研究, 采用有限体积法建立了激光加热辅助车削瞬态三维传热模型, 充分考虑到激光热流密度、工件热传导、工件表面对流与辐射、材料去除时产生的热及切屑带走的热量, 温度场模型如图 6 所示. 此模型还被应用在莫来石^[20]、氧化锆^[21]、蠕墨铸铁^[22] 等材料的 LAM 温度场预测上.

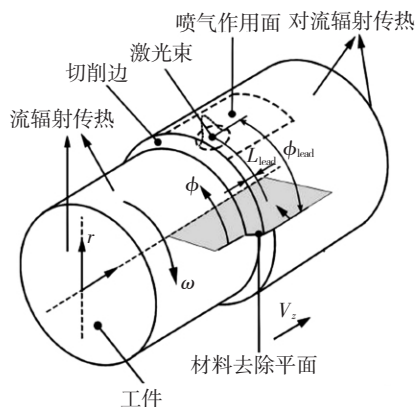


图6 激光加热辅助切削温度场模型示意图

在图 6 所示三维瞬态温度场模型的基础上, Tian^[23] 采用部分离散控制体积法进行了改进, 建立了复杂形状工件的三维瞬态车削温度场模型, 将红外相机拍到的检测结果与仿真结果进行了对比分

析, 如图 7 所示, 证明了此模型的准确性.

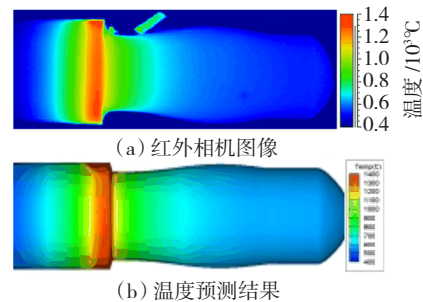


图7 复杂形状工件试验与仿真温度场分布

Yang^[24] 在分析激光加热 Ti-6Al-4V 材料产生的热影响区基础上, 以温度场模型为依据建立了热影响区预测模型, 温度场预测与试验结果比较如图 8 所示. 分析了参数对热影响区的影响规律, 参数优化后可以将生成的热影响区通过刀具去除.

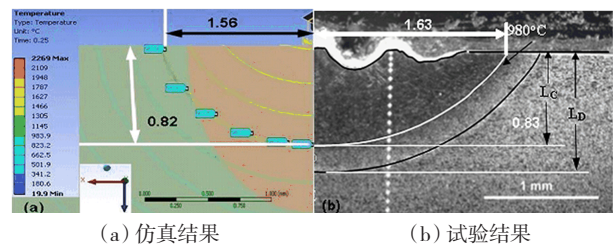


图8 温度场预测与试验结果比较

此外, Wu^[25] 采用有限元的方法得到了 LAM 氮化硅陶瓷三维瞬态温度场分布模型, 并以此为依据优选了工艺参数. Ho^[26] 采用解析的方法建立了激光加热辅助切削氧化锆陶瓷材料的温度模型. 王扬^[27] 采用解析法及有限差分法和有限元结合的混合解法建立了陶瓷材料的激光加热辅助温度场. 鄢铨^[28] 采用有限差分方法得到了氧化铝陶瓷激光辅助切削温度场分布, 并以此确定不同加工参数下的切削深度. Chang^[29] 采用 Lattice Boltzmann Method (LBM) 方法建立了激光加热辅助切削氧化铝材料的温度场模型, 计算了激光加热作用下的切削点温度随时间的变化规律与切削点沿直径方向的温度分布.

在激光加热辅助切削温度场的研究方面, Tian^[30] 建立了激光加热辅助切削氮化硅与 Inconel 718 三维瞬态温度场模型, 并且采用红外相机与热电偶测温, 证明了模型的准确性. Shen^[29-30] 采用有限元方法模拟了激光加热辅助切削氮化硅材料的温度与应力场, 通过仿真结果优选了加工工艺参数. Zaeh^[31] 建立了激光加热辅助切削温度场模型, 通过 S235 钢与 Ti-6Al-4V 的试验结果修正了模型.

2.2 切削过程仿真研究

加工工件的质量最终取决于刀具与工件的热机械物理过程,因此,不仅需要预测加工过程中的温度场,还需要对 LAM 的加工过程进行建模与仿真,从而对减少表面损伤与加工优化提供理论模型。

LAM 氮化硅材料的物理过程包括玻璃相的流动,氮化硅晶粒的重分布、微裂纹产生与形成的过程,仿真过程相对复杂. Shen^[32] 等人采用离散单元法(discrete element method, DEM) 与有限元分析(finite element analysis, FEA) 结合方法,以粘合的圆形粒子模拟陶瓷工件,粒子簇代表氮化硅材料组织,粘合单元的断裂代表加工过程中裂纹形成与扩展过程,将 FEA 软件计算得到的温度场结果导入 DEM 模型中,从而得到工件在不同温度下的机械特性,仿真结果如图 9 所示. Tian^[33] 在温度场模型的基础上,建立了 LAM 氮化硅陶瓷的多尺度有限元模型,对切削过程及切屑形成进行了仿真,仿真结果如图 10 所示. 模型考虑到切削过程中的微结构与裂纹形成,采用六边形连续单元代表晶粒,粘性单元表示晶粒间的玻璃相,建立了氮化硅材料模型. 仿真得到了连续的切削过程,成功模拟出晶粒间裂纹的形成与传播,切屑分离过程. 并进行了相应的切削实验,切削力、切屑形状及残余应力与实验得到的结果相吻合。

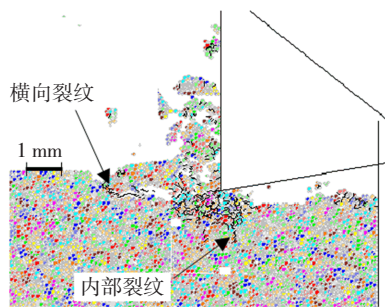


图9 DEM方法模拟LAM仿真结果

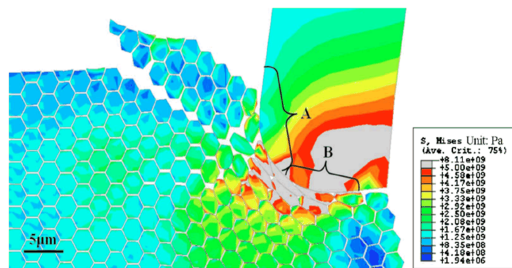


图10 激光加热辅助切削陶瓷切屑仿真

Germain^[34] 建立了加热辅助切削热-机械模型,可以预测切屑形成过程,切削力及残余应力,并采用正交切削 42CrMo4 钢试验验证模型. Ozel^[35] 采

用有限元方法对激光辅助铣削 AISI 4340 钢材料进行了仿真,模拟切屑的形成过程,得到了切削力变化及刀具温度分布。

3 激光加热辅助切削试验研究

3.1 加工性能的研究

对于传统加工中难加工金属材料方面,通过激光加热可以降低切削力,减小刀具磨损严重、提高加工效率. Anderson^[36] 采用 LAM 方法加工了 P550 不锈钢,随加工区域温度升高,比切削能降低 25%,硬度与传统加工的硬度相同,并可以使加工时间节省 20%~50%. Sun^[37] 对钛金属材料进行了 LAM 试验研究,切削力可以降低 20%~50%,并且随切削速度增加,产生的切屑由锋利的锯齿状向连续切屑转变. 在 Inconel 718、Ti-6Al-4V、白口铸铁^[38] 等金属材料的 LAM 试验中,比切削能都得到下降,刀具寿命有了明显的提升。

工程陶瓷材料由于塑性变形能力差、脆性高、断裂韧性低及强度高等特点加工难度大,在室温条件下很难采用切削方法加工. 陶瓷材料在达到一定温度后开始软化,脆性转变为塑性,可以采用传统刀具进行加工. Rozzi、Lei、Rebro 等人对氮化硅^[39]、氧化锆^[40]、莫来石^[41] 等陶瓷材料进行了加工试验研究,加工结果表明切削力与比切削能随加工温度升高而降低,得到的工件如图 11 所示. 此外,国内的学者也对氮化硅、氧化铝等陶瓷材料进行了试验研究^[40-41]。



图11 LAM加工不同陶瓷材料得到的工件

由于陶瓷材料的软化温度较高,金刚石刀具容易发生氧化反应,不宜长时间工作,因此硬度高、耐高温好的 PCBN 材料刀具是作为陶瓷材料加工的首选刀具. 加工氮化硅陶瓷时,切削区温度约为 1410℃,采用 PCBN 刀具加工的刀具磨损极限设定 VB=0.3 mm 时,刀具寿命可以达到 42 min^[42]. 后面磨损是主要的磨损形式,其原因是黏结磨损,在高温高压的作用下,玻璃相粘结在刀具上,形成连接点. 由于刀具与工件的相对运动,在加工中受拉而断裂,撕开刀具材料,形成了刀具磨损. 在加工氧化锆陶瓷时,机械磨损、黏结磨损与扩散磨损共同作用,

在主后刀面与副后刀面产生沟纹,并且由于氧化锆的塑性较低、热导率较小,在切削刃边缘会产生月牙洼磨损^[4]。

LAM 与传统磨削加工相比的一个优势是可以高效的加工复杂形状零件。Tian^[4]通过实时改变激光能量,采用激光加热辅助车削的方法,在氮化硅材料上加工出复杂形状的工件,并且取得了良好的加工质量,没有产生亚表面裂纹与热损伤,而采用传统磨削方法很难高效地加工出复杂形状的工件。

在加热辅助铣削研究方面,Yang^[5]进行了加热辅助铣削陶瓷材料的加工研究,切削区温度由 838 °C 提高至 1 319 °C 后切削力降低至 50%,材料的可加工性得到了改善,避免了刀具发生脆性断裂。此时主要发生后刀面磨损,并且随着温度的升高,刀具磨损降低,并且降低幅度逐渐减小。与车削时切削区温度达到一定值后刀具磨损有所提升不同的是,当温度达到相当高的时候刀具磨损依然降低,归其原因是由于刀具与工件接触的时间比较短,刀具温度在旋转过程中有所下降产生的。

3.2 加工质量的研究

对于 LAM 来说,需要关心的是激光对加工表面质量是否产生影响。通常的情况下,激光光斑入射区域的温度较高,材料可能会发生融化、烧蚀等现象,但此层材料会被刀具去除,通过仿真与试验的参数优化可以避免对加工表面产生影响。

激光加热辅助切削金属材料的工件表面与常规加工相比表面粗糙度更低,并且表面组织与硬度没有变化。Anderson^[4]对 Inconel 718 进行了试验研究,当切削区域温度达到 540 °C 时,表面粗糙度由 1.7 μm 降低至 0.9 μm 。Ding^[3]对加热辅助切削得到的淬硬钢零件表面进行了表面完整性分析,切削区温度提高至 270 °C,表面粗糙度 R_a 可以稳定在 0.3 μm 之下,与常规加工相比表面硬度影响很小,亚表面组织也没有变化,工件的残余压应力比常规切削高 150 MPa。

对于陶瓷材料来说,其表面性能受到晶粒尺寸及分布的影响。LAM 加工氮化硅的表面包含着晶间的玻璃相、由于晶粒脱离产生的空腔及抛出的氮化硅晶粒。采用不同加工方法加工氮化硅与氧化锆陶瓷的工件表面如图 12 所示。LAM 加工的表面较为平整,微坑相比磨削较少,表明 LAM 加工更多是塑性的加工过程,产生微裂纹的几率更低。三种不同的陶瓷 LAM 加工得到的表面粗糙度略高于磨削得到基体的粗糙度,如图 13 所示^[4]。

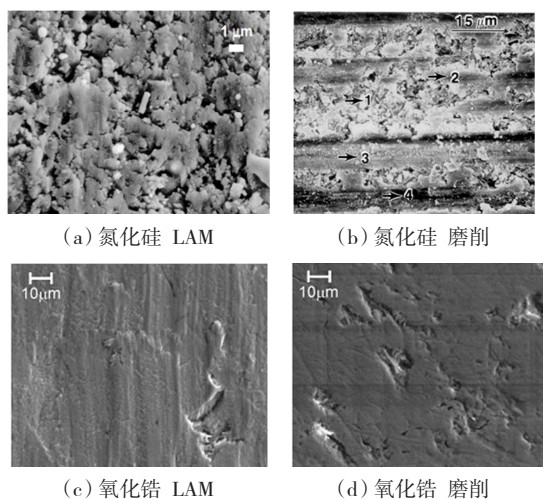


图 12 不同加工方法加工氮化硅与氧化锆陶瓷得到的工件表面

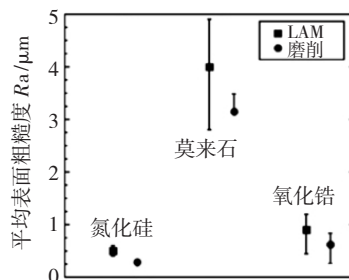


图 13 LAM 与磨削加工陶瓷材料表面粗糙度

氮化硅陶瓷加工表面残余应力为压应力,圆周方向的应力值要小于轴向的应力值,并且由于晶粒间的玻璃相软化后产生粘性流动,会释放在切削区产生的应力,因此产生的残余压应力要小于磨削产生的压应力^[4]。Klocke^[6]分别采用磨削与 LAM 方法加工了氮化硅陶瓷试件,通过旋转弯曲强度测试证明 LAM 加工的弯曲强度要高于磨削加工工件的强度。

氮化硅陶瓷通过加热辅助铣削加工得到的表面粗糙度与磨削得到的表面粗糙度相近,并且受切削区温度的影响很小。此外,在陶瓷材料的加工过程中,会产生边缘碎裂的现象,如图 14 所示,影响工件的性能。将切削区温度提高至合适的范围可以降低切削力并其提高材料的边缘韧性,达到降低边缘碎裂的目的^[4]。

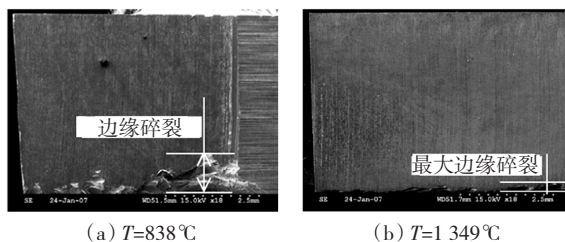


图 14 加热辅助铣削氮化硅陶瓷的边缘碎裂现象

3.3 加工优化研究

由于激光加入,工艺参数项目增多,如何选择合适的工艺参数是一个难题.切削区温度是影响加工结果的重要参数,而对于不同的材料,其软化温度有所不同.另外,刀具磨损通常随着切削区温度升高而降低,但是当温度升高到一定值后,刀具材料的性能会有所下降,最终导致刀具寿命降低.因此对于LAM来说,存在一个适宜的温度范围,既可以使工件材料利于切削,又可以保证刀具的性能.

通过温度模型的预测及试验结果,例如氧化锆陶瓷温度对试验结果的影响如图15所示^[4],比较不同切削区温度时的比切削能、刀具寿命、废品率与粗糙度,可以找到适合材料的最优加工温度范围.不同材料适宜的切削区温度如表2所示.

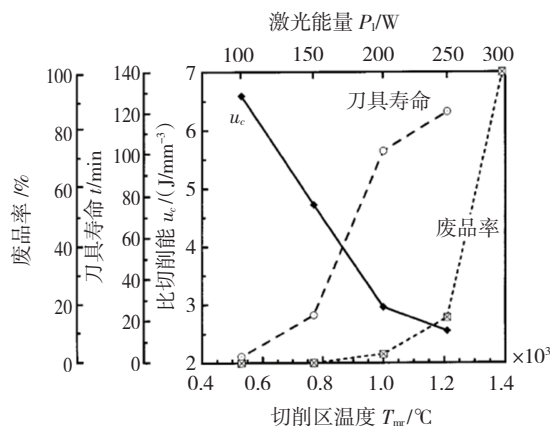


图15 氧化锆陶瓷温度与结果的关系

表2 不同材料合适的材料去除温度

材料	温度范围/°C	材料	温度范围/°C
氮化硅	1 270 ~ 1 490	P550 钢	120 ~ 340
氧化锆	900 ~ 1 100	Ti-6Al-4V	250 ~ 400
莫来石	1 043 ~ 1 215	蠕墨铸铁	250 ~ 400
Inconel 718	550 ~ 650		

通过温度场仿真模型可以得到工艺参数对切削区温度的影响规律,找到合理的参数范围,以此为依据进行试验. Tian^[43]在温度场模型的基础上,以保证切削区域温度达到要求,并且激光入射区温度小于烧蚀温度的目标,优化激光能量参数,实现了复杂形状零件的LAM加工. Pfeifferkorn^[49]引入比热能、最小预热能量与预热效率来衡量加热辅助切削中的热量传递,这些物理量可以用来优化参数,提高加热效率从而降低加工成本.

Chang^[50]采用正交试验方法对LAM氧化铝材料的加工参数进行优化,通过分析发现切削速度是

影响表面质量的主要参数,其次是进给量与切削深度,激光频率影响最小,最终给出得到最佳表面质量的最优参数组合. Wiedenmann^[51]等人建立了加热辅助切削Ti-6Al-4V的热-机械耦合模型,并且通过切削力的测量验证了模型的准确性,最终得到了适合不同切削深度的激光功率,可以在达到软化效果的前提下保证工件的性能.

3.4 加工经济型的研究

在加工质量、加工效率得到保证的同时,有学者就LAM的经济性进行了研究. Anderson^[44]对LAM Inconel 718材料进行了加工经济性分析,考虑设备运转费用、激光使用费用及刀具费用计算加工成本,结果表明加工1m长的Inconel 718材料,在切削速度为3m/s时与传统采用硬质合金刀具加工相比费用节省66%,与陶瓷刀具相比也节省了50%,如图16所示.同时对P550不锈钢进行了LAM试验研究,得到良好加工质量的同时,加工费用也可以节省20%~50%^[54].

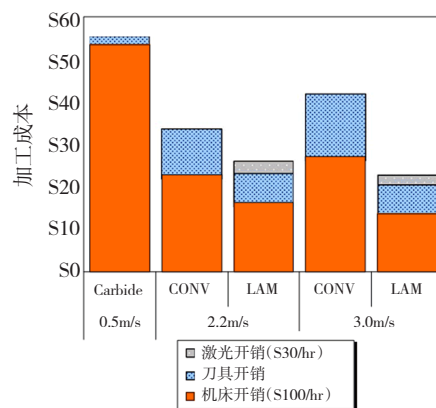


图16 加工1m的Inconel 718材料的费用对比

激光加热辅助切削技术可以降低刀具磨损、提高加工效率,从结果上考虑与常规加工相比对环境的影响更小,然而由于激光的使用,消耗了更多的电能.如果要考量其对环境的影响方面与常规加工的比较,需要进行全方位的评估.生命周期评估是对产品从原料开采、加工到最终再循环或废弃处理的一种评价方法,旨在源头预防和减少环境问题. Zhao^[52]等对激光加热辅助切削蠕墨铸铁进行了生命周期评估,采用ISO-14040系列标准,对环境的影响类别包括全球变暖、酸化、人身健康等九项, LAM可以在其中七项影响降低50%,对环境造成的负担要小于干式车削. 其它的两项是在使用增加激光吸收率涂层时所带来的富营养化与臭氧消耗,如果采用较短波长的激光而不需要涂层, LAM对环

境影响将全面超越干式切削. 从成本方面考虑, 投入的激光器资金可以在三年内得到回报.

4 激光加热辅助切削技术的发展方向

4.1 LAM 技术在新材料、新产品的应用

新材料技术是促进技术发展的重要支柱, 同时对加工技术来说也是一个挑战. 目前随着复合材料技术的发展, 逐渐从军事国防向诸多领域扩展其商业化应用. 尤其是金属基复合材料(MMC)在陆上运输、航空航天、电子等领域的应用保持着持续增长. 金属基复合材料的可加工性能很差, 采用常规加工方法, 刀具磨损严重, 加工效率较低.

Bejjani^[17]对Tic颗粒增强钛基复合材料进行了LAM加工试验, 切削速度为100 m/min, 表面温度为500°C时, 刀具寿命与常规加工相比较提高1.8倍. 复合材料中的一部分颗粒在刀具的作用下进入了软化的基体材料, 缺少了颗粒断裂对刀具的冲击作用, 从而提高了刀具寿命. 但是有一部分碎裂的颗粒进入了软化的基体, 表面粗糙度增加了15%. Dandekar^[53]采用LAM技术对氧化铝纤维增强铝基复合材料进行了加工试验研究, 在相同的切削用量下, 将切削区域温度提高至300°C, 相比常规切削刀具磨损、表面粗糙度与比切削能都降低约65%, 并且纤维损伤有所降低, 常规切削与LAM加工结果比较如图17所示.

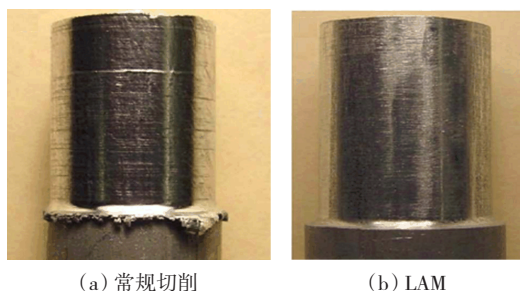


图17 常规切削与LAM加工纤维增强铝基复合材料结果比较

4.2 LAM 工艺改进

随着激光、材料技术的发展, LAM技术也在向提高激光加热效率、降低加工成本方向不断进步. 在车削加工中激光通常垂直入射在工件表面上, 其优点是系统安装方便, 但由于激光是表面热源, 导致沿厚度方向温度梯度较大, 切削深度通常较小. 激光束可以修改为倾斜入射在过渡表面上, 在不改变激光能量的情况下提高切削区温度, 降低切削力. Sun^[57]

采用激光倾斜入射方式, 进行了LAM钛金属试验, 激光入射位置如图18所示, 当入射角度为40°时, 切削力减少量相比垂直入射时增加7%~10%, 并且材料已加工表面的组织不会发生变化.

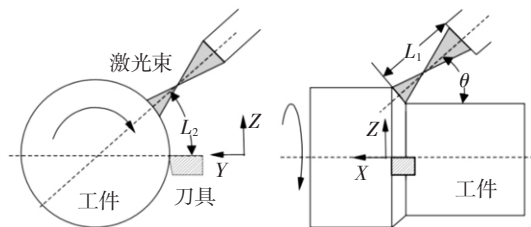


图18 激光与刀具相对位置

LAM加工往往需要较高的切削区温度, 但同时会提高刀具温度, 降低刀具寿命. 如果在不改变切削区温度的前提下降低刀具的温度, 将提高刀具寿命, 减少加工成本. Dandekar^[54]等在LAM装置上增加了液氮冷却系统, 试验装置如图19所示, 可以在加工中降低前刀面的温度, 从而保证刀具的强度与硬度, 达到提高刀具寿命的目的. 在加工钛合金Ti-6Al-4V的加工中, 刀具寿命在切削速度为107 m/min时与常规加工相比可以提高1.7倍, 采用冷却系统后可以提高2倍. 使用TiAlN涂层刀具后, 加工成本可以降低40%, 与不采用冷却系统时相比成本降低15%.

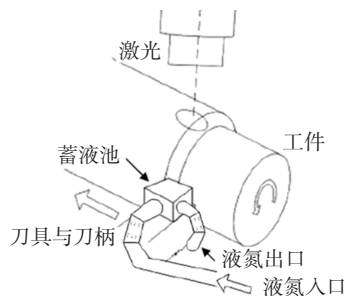


图19 带有冷却装置的LAM系统

4.3 系统集成

将激光加热装置整合进入加工系统是一项挑战性的工作, 要求激光入射位置容易调整, 维护方便, 并且在过程中与机床不会产生碰撞. 尤其是加热辅助铣削机床, 通常的做法是将激光束直接照射在工件即将要去除的位置上, 但仅能加工简单的平面或沟槽, 无法满足复杂零件的加工需求. Wu^[55]提出了激光聚焦头与铣刀相对固定的激光加热辅助铣削复杂轨迹加工方法, 将工件装夹在旋转工作台上, 通过改变激光束与工件的相对位置实现任意轨迹的加工, 其原理示意图如图20所示. Christian^[56]提出一

种将光束引导装置整合在机床主轴中的方法,主轴示意图如图 21 所示,并将主轴集成在 5 轴的加工机床中,开发了激光参数控制系统.在此加工系统上进行了氮化硅陶瓷的加工试验,切削力降低了 73% ~ 90%,刀具磨损得到了明显的减小.

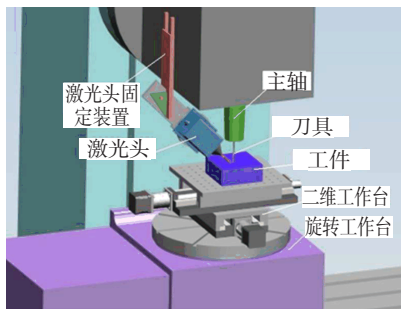


图 20 加热辅助铣削装置示意图

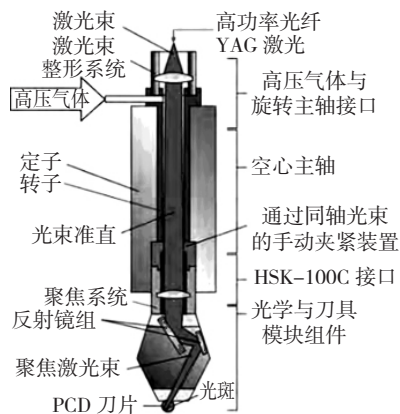


图 21 激光加热辅助铣削系统主轴示意图

4.4 微细加工

微细加工技术在光学,电子与微小模具加工上应用广泛,近年出现的机械微切削技术由于可直接快速制造小型金属零件而受到关注.将激光加热辅助切削与微切削技术相结合,克服了机械加工中刀具低刚度与低弯曲强度的缺点,摆脱了激光微细加工尺度的限制.

Jeon^[57] 将 LAM 技术应用在微铣削 6061-T6 铝合金和 1018 钢材料上,在激光的辅助作用下降低了切削力,减小了比切削能,提高了加工效率,但是会增加表面粗糙度,毛刺现象更加明显.还有学者对 A2 工具钢 (62HRC)^[58]、Ti-6Al-4V、Inconel 718^[59] 等难加工金属材料进行了激光加热辅助微铣削研究. Kumar^[60] 进行了激光加热微磨削氮化硅陶瓷的试验研究,磨削力与不采用激光加热相比降低 43.2%,刀具磨损减小,可以保证表面粗糙度的情况下提升加工效率.

Patten^[61] 在激光的辅助作用下对 Si 与 SiC 材料进行了刻划,在激光的作用下, Si 材料降低了脆性,使切削力减小,划痕深度增加,金刚石刀尖与在 Si 材料上的划痕如图 22 所示.

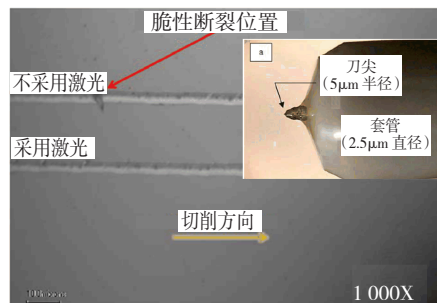


图 22 激光加热辅助微加工金刚石刀尖与划痕

Singh^[62] 采用激光辅助加工与微细加工相结合的方法建立了混合微加工系统,如图 23 所示,对 H-13 模具钢进行切槽实验研究,在微刀具切削前采用激光束照射,将高硬度材料软化后进行加工.轴向推力可减少 17%,并且使工作台挠度与刀具热膨胀对沟槽深度造成的影响降低,沟槽加工尺寸精度提高.

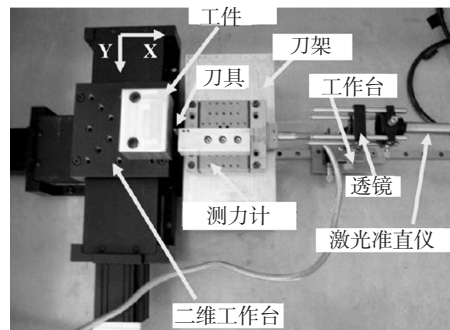


图 23 激光加热辅助微加工系统

5 结语与展望

激光辅助切削技术作为加工难加工材料的一种有效方法,由于其加工效率高,表面质量好,刀具磨损小等优点,受到越来越多的关注.本文对激光加热辅助切削在近几年的研究进行了综述:仿真研究方面,建立的瞬态温度场模型可以准确预测温度场的分布,仿真切削过程,以此为依据优化加工工艺参数,为实现高质量加工提供保障;实验研究方面,激光加热辅助切削技术可以应用在各种金属、陶瓷、复合材料等难加工材料上,在保证加工质量的同时提高刀具寿命,增加生产率,降低加工成本.

然而目前 LAM 技术多数研究局限于试验室,在

工业应用方面的研究很少,鲜有成功的经验.为推动激光加热辅助切削技术的发展,应用于新材料、新产品与新领域,设备商品化是重要的途径.同时也需要在以下几个方面进行更深入的研究:

1) 选择高效光源.激光作为热源的一个不足是受到工件表面吸收的限制,不同材料、不同表面状态对吸收率的影响很大,尤其是金属材料,吸收率低,提高了加工成本.选择工件吸收效率高、成本低,穿透深度大的热源将更有效的提升 LAM 技术的竞争力.

2) LAM 系统整合.商用的 LAM 加工系统不仅需要光束在不产生干涉的前提下引导至加热区域,还需要可控性好,调整简单,维护保养方便.此外还需要与之配套的参数选择优化、在线监测控制等软件方面的解决方案.

3) 加工模型与工艺参数优化.目前研究集中在工件的温度场模型研究上,但是求解速度较慢并且零件较为简单,因此需要建立快速、准确、通用性强的温度场模型,为选择合适的工艺参数提供理论参考.此外,需要建立切削过程预测模型,用来理解加工机理,优化刀具与切削工艺参数.

4) LAM 技术应用评价.结合目前实际应用,从加工成本、加工效率与对环境影响等多方面评估 LAM 技术的可应用性与实际价值,使技术的推广更有说服力.

随着材料技术与高性能零件的应用,激光加热辅助切削技术的改进及其设备的发展,在难加工材料加工及微细加工领域将有更广阔的应用空间.

参考文献:

- [1] TIPNIS V A, RAVIGNANI G L, MANTEL S J. Economic Feasibility of Laser Assisted Machining (LAM) [C] //Manufacturing Engineering Transactions, 1981:547-552.
- [2] RAJAGOPAL S, PLANKENHORN D J, HILL V L. Machining Aerospace Alloys with the Aid of a 15 kW Laser [J]. Journal of Applied Metalworking, 1982, V 2(N 3): 170-184.
- [3] DUMITRESCU P, KOSHY P, STENEEKES J, et al. High-power Diode Laser Assisted Hard Turning of AISI D2 Tool Steel [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(15): 2009-2016.
- [4] KIM J, LEE S, SUH J. Characteristics of Laser Assisted Machining for Silicon Nitride Ceramic According to Machining Parameters [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25(4): 995.
- [5] KIM J, LEE S, PARK S, et al. Variation of Microstructure on the Fracture Surface of Dense Silicon Nitride by Laser Power in LAM [J]. Metals and Materials International, 2011, 17(3): 515.
- [6] KONIG W, ZABOKLICKI A K. Laser-assisted Hot Machining of Ceramics and Composite Materials [C] //International Conference on Machining of Advanced Materials, Tokyo: 1993(847): 455-463.
- [7] YANG B, LEI S. Laser-Assisted Milling of Silicon Nitride Ceramic: A Machinability study [J]. Int. J. Mechatronics and Manufacturing Systems, 2008, 1(1): 116-130.
- [8] TIAN Y, WU B, ANDERSON M, et al. Laser-Assisted Milling of Silicon Nitride Ceramics and Inconel 718 [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2008, 130(3): 31013-31019.
- [9] CHANG C W, KUO C P. An Investigation of Laser-assisted Machining of Al_2O_3 Ceramics Planing [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2007, 47(3-4): 452-461.
- [10] TIAN Y, SHIN Y C. Laser-assisted Burnishing of Metals [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2007, 47(1): 14-22.
- [11] JEN T C, CHEN Y M, TUCHOWSKI F. Experimental and Numerical Studies of Laser-assisted Drilling processes [C] //Charlotte, NC. United states: American Society of Mechanical Engineers, 2004:1015-1023.
- [12] LEI S, SHIN Y C, INCROPERA F P. Deformation Mechanisms and Constitutive Modeling for Silicon Nitride Undergoing Laser-assisted Machining [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(15): 2213-2233.
- [13] REBRO P A, SHIN Y C, INCROPERA F P. Laser-Assisted Machining of Reaction Sintered Mullite Ceramics [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2002, 124(4): 875-885.
- [14] PFEFFERKORN F E, SHIN Y C, TIAN Y, et al. Laser-assisted machining of magnesia-partially-stabilized zirconia [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 2004, 126(1): 42-51.
- [15] 王扬,杨立军,齐立涛. Al_2O_3 颗粒增强铝基复合材料激光加热辅助切削的切削特性 [J]. 中国机械工程, 2003(4): 344-346.
- [16] WANG Y, YANG L J, WANG N J. An investigation of laser-assisted machining of Al_2O_3 particle reinforced aluminum matrix composite [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1-3): 268-272.
- [17] BEJJANI R, SHI B, ATTIA H, et al. Laser assisted turning of Titanium Metal Matrix Composite [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 61-64.
- [18] ROZZI J C, INCROPERA F P, SHIN Y C. Transient, Three-dimensional Heat Transfer Model for the Laser Assisted Machining of Silicon Nitride: II. Assessment of Parametric Effects [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(8): 1425-1437.
- [19] ROZZI J C, PFEFFERKORN F E, INCROPERA F P, et al. Transient, Three-dimensional Heat Transfer Model for the Laser Assisted Machining of Silicon Nitride: I. Comparison of Predictions with Measured Surface Temperature Histories [J]. Interna-

- tional Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(8) : 1409 – 1424.
- [20] REBRO P A, SHIN Y C, INCROPERA F P. Design of Operating conditions for crackfree Laser-assisted Machining of mullite [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(7 – 8) : 677 – 694.
- [21] PFEFFERKORN F E, INCROPERA F P, SHIN Y C. Heat Transfer Model of Semi-transparent Ceramics Undergoing Laser-assisted Machining [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(10) : 1999 – 2012.
- [22] SKVARENINA S, SHIN Y C. Laser-assisted Machining of Compacted Graphite Iron [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2006, 46(1) : 7 – 17.
- [23] TIAN Y, SHIN Y C. Thermal Modeling for Laser-Assisted Machining of Silicon Nitride Ceramics With Complex Features [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2006, 128(2) : 425 – 434.
- [24] YANG J, SUN S, BRANDT M, et al. Experimental Investigation and 3D Finite Element Prediction of the Heat Affected Zone During Laser Assisted Machining of Ti6Al4V Alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(15) : 2215 – 2222.
- [25] WU X F, ZHANG H Z, WANG Y, et al. Simulation and Experimental Study on Temperature Fields for Laser Assisted Machining of Silicon Nitride [J]. Key Engineering Materials, 2010, 419 – 420: 521 – 524.
- [26] HO C Y, WEN M Y, HO J E, et al. Temperature History for Cutting of Ceramics Preheated by a CO₂ Laser [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007(192 – 193) : 525 – 531.
- [27] 王扬,马丽心,谢大纲,等. 陶瓷材料激光加热辅助切削温度场分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001, 33(06) : 785 – 788.
- [28] 鄢铨,李力钧,金湘中,等. Al₂O₃ 热压陶瓷激光辅助切削温度场分布与切削深度 [J]. 中国有色金属学报. 2008, 18(02) : 254 – 259.
- [29] SHEN X, LEI S. Thermal Modeling and Experimental Investigation for Laser Assisted Milling of Silicon Nitride Ceramics [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 2009, 131(5) : 510071 – 5100710.
- [30] SHEN X, LEI S. Experimental Study on Operating Temperature in Laser-assisted Milling of Silicon Nitride Ceramics [J]. Int J Adv Manuf Technol, 2010, 52(1) : 143 – 154.
- [31] ZAEH M F, WIEDENMANN R, DAUB R. A Thermal Simulation Model for Laser-assisted Milling [J]. Physics Procedia Laser Assisted Net Shape Engineering 6, Proceedings of the LANE. 2010, 5(Part 2) : 353 – 362.
- [32] SHEN X, YANG B, LEI S. Distinct Element Modeling of Laser Assisted Milling of Silicon Nitride Ceramics [J]. Journal of Manufacturing Processes. 2010, 12(1) : 30 – 37.
- [33] TIAN Y, SHIN Y C. Multiscale Finite Element Modeling of Silicon Nitride Ceramics Undergoing Laser-Assisted Machining [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007, 129(2) : 287 – 295.
- [34] GERMAIN G, DAL S P, LEBRUN J L. Comprehension of chip Formation in Laser Assisted Machining [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2011, 51(3) : 230 – 238.
- [35] OZEL T, PFEFFERKORN F. Pulsed Laser Assisted Micromilling for Die/Mold Manufacturing [C]. //Proceedings of the ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference 2007. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2007: 337 – 342.
- [36] ANDERSON M C, SHIN Y C. Laser-assisted Machining of an Austenitic Stainless Steel: P550 [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2006, 220(12) : 2055 – 2067.
- [37] SUN S, HARRIS J, BRANDT M. Parametric Investigation of Laser-assisted Machining of Commercially Pure Titanium [J]. Advanced Engineering Materials, 2008, 10(6) : 565 – 572.
- [38] MASOOD S H, ARMITAGE K, BRANDT M. An Experimental Study of Laser Assisted Machining of Hard-to-wear White Cast Iron [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, In Press, Accepted Manuscript.
- [39] ROZZI J C, PFEFFERKORN F E, SHIN Y C, et al. Experimental Evaluation of the Laser Assisted Machining of Silicon Nitride Ceramics [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2000, 122(4) : 666 – 670.
- [40] 吴雪峰,王扬,张宏志. 激光加热辅助切削氮化硅陶瓷实验研究 [J]. 宇航学报, 2010(05) : 1457 – 1462.
- [41] 鄢铨. 激光加热辅助切削 Al₂O₃ 工程陶瓷理论与试验研究 [D]. 湖南大学, 2008.
- [42] LEI S, SHIN Y C, Incropera F P. Experimental Investigation of Thermo-Mechanical Characteristics in Laser-Assisted Machining of Silicon Nitride Ceramics [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, 123(4) : 639 – 646.
- [43] TIAN Y, SHIN Y C. Laser-assisted Machining of Damage-free Silicon Nitride Parts With Complex Geometric Features Via In-process Control of Laser Power [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2006, 89(11) : 3397 – 3405.
- [44] ANDERSON M, PATWA R, SHIN Y C. Laser-assisted Machining of Inconel 718 With an Economic Analysis [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(14) : 1879 – 1891.
- [45] DING H, SHIN Y C. Laser-assisted Machining of Hardened Steel Parts with Surface Integrity Analysis [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(1) : 106 – 114.
- [46] PFEFFERKORN F E. Laser-assisted Machining of Zirconia Ceramics [D]. Purdue University, 2002.
- [47] KLOCKE F, BERGS T. Laser-Assisted Turning of Advanced Ceramics [C]. //Proceedings of SPIE: Rapid Prototyping and Flexible Manufacturing, 1997: 120 – 130.
- [48] YANG B, SHEN X, LEI S. Mechanisms of Edge Chipping in Laser-assisted Milling of Silicon Nitride Ceramics [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(3 – 4) : 344 – 350.
- [49] PFEFFERKORN F E, LEI S, JEON Y, et al. A Metric for Defi-

- ning the Energy Efficiency of Thermally Assisted Machining [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(5): 357–365.
- [50] CHANG C W, KUO C P. Evaluation of Surface Roughness in Laser-assisted Machining of Aluminum Oxide Ceramics with Taguchi Method [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(1): 141–147.
- [51] WIEDENMANN R, LANGHORST M, ZAEH M F. Computer-ized Optimization of the Process Parameters in Laser-Assisted Milling [J]. Physics Procedia, 2011, 12(Part 1): 607–616.
- [52] ZHAO F, BERNSTEIN W Z, NAIK G, et al. Environmental Assessment of Laser Assisted Manufacturing: Case Studies on Laser Shock Peening and Laser Assisted Turning [J]. Journal of Cleaner Production, 2010, 18(13): 1311–1319.
- [53] DANDEKAR C R, SHIN Y C. Laser-Assisted Machining of a Fiber Reinforced Metal Matrix Composite [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2010, 132(6): 61004.
- [54] DANDEKAR C R, SHIN Y C, BARNES J. Machinability Improvement of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V) Via LAM and Hybrid Machining [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(2): 174–182.
- [55] WU X F, WANG Y, ZHANG H Z. System Design for Laser Assisted Milling of Complex Parts [C] //2010. 36th MATADOR Conference, Manchester, 2010: 577–580.
- [56] BRECHER C, ROSEN C J, EMONTS M. Laser-assisted Milling of Advanced Materials [J]. Physics Procedia Laser Assisted Net Shape Engineering 6, Proceedings of the LANE 2010, 2010, 5(Part 2): 259–272.
- [57] JEON Y, PFEFFERKORN F. Effect of Laser Preheating the Workpiece on Micro-end Milling of Metals [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2008, 130(1): 011004–1–9.
- [58] MELKOTE S, KUMAR M, HASHIMOTO F, et al. Laser Assisted Micro-Milling of Hard-to-machine Materials [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2009, 58(1): 45–48.
- [59] DING H, SHEN N, SHIN Y C. Thermal and Mechanical Modeling Analysis of Laser-assisted Micro-milling of Difficult-to-machine Alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, In Press, Accepted Manuscript.
- [60] KUMAR M, MELKOTE S, LAHOTI G. Laser-assisted Micro-grinding of Ceramics [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 367–370.
- [61] JOHN A. PATTEN M K G S. The Effects of Laser Heating on the Material Removal Process in Si and SiC [C] //Proceedings of 2011 NSF Engineering Research and Innovation Conference, Atlanta, GA, 2011: 075733901–075733911.
- [62] SINGH R, MELKOTE S N. Characterization of a Hybrid Laser-assisted Mechanical Micromachining (LAMM) Process for a Difficult-to-machine Material [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(7–8): 1139–1150.

(编辑: 关毅)