

激光加热辅助切削技术

Technology of Laser Assisted Machining

哈尔滨工业大学机电工程学院 王 扬 吴雪峰 张宏志



王 扬

教授, 博导, 哈尔滨工业大学机电工程学院航空宇航制造工程系主任, 省模具制造和刀具技术协会副理事长, 中国机械工程学会高级会员。主要研究领域包括激光加工技术、机械制造与装备、红外无损检测技术等。承担过省重大攻关、“863”国家自然科学基金、国家重大专项和国防基础科研重点等 10 多项科研课题, 获国家和省部级奖 3 项, 市级奖 1 项。发表论文 150 余篇, 其中 30 余篇论文被 SCI 和 EI 检索。

随着航空航天工业、兵器工业、化学工业、电子工业等行业的发展, 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

采用激光加热辅助切削技术可实现氮化硅陶瓷工件外圆、平面及复杂沟槽加工, 表面质量好, 不产生裂纹, 并且加工后材料没有发生相变化。充分展现了激光加热辅助切削技术在难加工材料, 尤其是在复合材料加工中的应用前景。

如高温合金在高温下具有优良的热强度性能、热稳定性及热疲劳性能, 常温下加工刀具磨损严重、表面质量差。工程陶瓷强度高、耐磨损、抗腐蚀, 目前通常采用磨削加工, 生产效率低、成本高、加工几何形状受限。近年来出现的加热辅助切削技术是解决难加工材料加工的一种有效方法。目前常用的热源有等离子电弧、氧乙炔焰和激光等。与其他热源相比, 激光光斑尺寸小、能量密度高, 并在能量分布和时间特性上有很好的可控性, 在加热辅助加工上得到越来越广泛的应用。

激光加热辅助切削技术

激光加热辅助切削(Laser Assisted Machining, LAM)是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将局部加热到很高的温度, 使材料的切削性能在高温下发生改变, 从而可以采用普通刀具进行加工。通过对工件

加热, 提高材料的塑性, 降低切削力, 减小刀具磨损, 减小振动。对硬脆材料可将其脆性转化为延展性, 使屈服强度降低到断裂强度以下, 避免加工中出现裂纹, 从而达到提高加工效率、降低成本、提高表面质量的目的。激光加热辅助切削的示意图如图 1 所示。

激光加热辅助切削技术研究现状

激光加热辅助切削技术最早出现于 20 世纪 70 年代, 作为一种提高难加工材料生产率的方法, 用于镍合金、钛合金和淬硬钢的加工。虽然 LAM 的可行性得到了验证, 但对激光能量、光束位置等影响因素没有进行系统的研究, 受金属材料吸收率低、激光技术发展等因素限制导致加工成本高、加工经济性差, 使 LAM 的研究陷入停滞状态。而到 90 年代, 由于陶瓷等复合材料技术的发展, 性能好、加工难度大的材料出现及激光

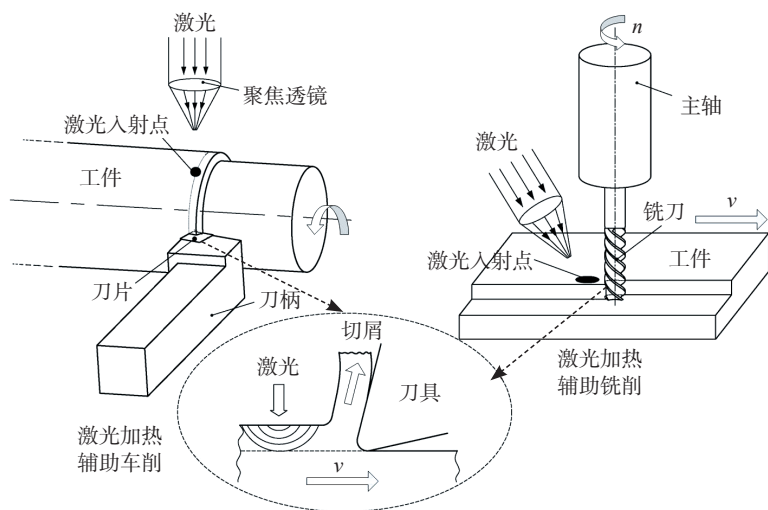


图1 激光加热辅助切削示意图

设备价格降低, LAM 技术逐渐回到了研究者的视线。目前,采用激光加热辅助切削方法加工的材料见表 1。

采用 LAM 技术对金属材料加工可以有效降低切削力与刀具磨损,并提高加工效率。Sun 等^[1]对钛金属进行了 LAM 试验研究,发现切削力可以降低 20%~50%,较低的动态切削力与加工表面附近的低硬度提高了加工表面质量。Anderson 等^[2]对 Inconel 718 材料进行了 LAM 加工,研究了工艺参数对工件表面质量、材料去除率、刀具磨损、切削力、表面粗糙度与切削比能的影响。结果表明,采用 LAM 技术加工可以降低 25% 的切削比能,表面粗糙度降低,使陶瓷刀具的寿命增加 200%~300%。Anderson 等^[3]采用 LAM 方法加工了不锈钢 P550。随着加工区域温度的升高,比切削能降低 25%。材料强度降低使刀具寿命提高 1 倍。工件表面组织没有发生变化,硬度与传统加工的硬度相同,并可以使加工时

间节省 20%~50%。工程陶瓷材料由于其塑性变形能力差、脆性高、断裂韧性低及强度高特点使加工难度加大,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。Purdue 大学的 Rozzi、Lei 等对氮化硅、氧化锆、莫来石等陶瓷材料的 LAM 进行了深入研究^[4-7]。加工结果表明,切削力与刀具磨损随加工温度的升高而降低,比切削能小,加工后表面没有裂纹产生,并且可以高效加工复杂形状零件。Tian 等^[8]通过激光辅助三维瞬态传热模型得到了最优化加工工艺参数的方法,通过实时改变激光能量,成功地在氮化硅材料上加工出复杂形状的工件,并且没有产生亚表面裂纹与热损伤。

激光加热辅助铣削(LAML)加工过程复杂,是间歇切削过程,对刀具与工件的冲击大,因此关于此方面的研究相对较少。König 对钨铬钴

合金进行了 LAML 研究,证明了加热辅助铣削的可行性。Yang 等^[9-10]进行了激光加热辅助铣削陶瓷的研究,通过试验证明了辅助铣削的可行性,结果表明激光加热辅助铣削可以显著降低切削力,切屑连续,得到良好的加工表面。Tian 等^[11]建立了 LAML 三维温度场模型,并通过试验验证了模型的准确性。成功采用 TiAlN 涂层硬质合金刀具对氮化硅材料进行了加工试验,以磨损极限 $VB=0.3\text{mm}$ 计算,刀具寿命可以达到 260mm。采用 LAML 技术明显提高了 Inconel 718 的加工性能,切削温度达到 520℃ 时切削力降低 40%~50%,刀具寿命提高 1 倍,表面粗糙度降低到原来的 1/2。

激光加热辅助切削技术在氮化硅陶瓷加工上的应用

氮化硅陶瓷具有优良的热物理性能,能在恶劣的工作环境下保持高强度、耐腐蚀、抗磨损的性能,但其脆性与高硬度决定了加工难度大、加工成本高,是一种典型的难加工材料。当氮化硅陶瓷温度超过 1000℃ 时,玻璃相开始软化,强度与硬度都有明显的下降,此时将软化的材料去除,可以达到加热辅助切削的目的。

1 激光加热辅助切削工艺参数选择方法

激光加热辅助切削应用中影响加工结果的参数很多,包括激光能量、激光光斑直径、激光入射位置、切削深度、激光移动速度与进给量等激光参数与切削参数。选择合适的工艺参数是解决加热辅助切削加工的首要问题。切削区域温度是加热辅助切削首要满足条件之一,可作为制定工艺参数的依据。

参数选择原则是切削区域温度达到材料的软化温度,加热过程中产生的热应力不产生裂纹,并且激光加热不会对加工后表面质量与工件性能带来影响。参数选择流程见图 2。

表1 采用激光加热辅助切削技术加工的材料

材料种类	材料名称
工程陶瓷	氮化硅、氧化铝、氧化锆、莫来石
金属	AISI D2 工具钢、1018/1040 钢、420/316/320/P550 不锈钢、Inconel 718、钛、Ti-6Al-4V、蠕墨铸铁
复合材料	Al_2O_3 颗粒增强铝基材料、SiC/SiC 陶瓷基复合材料

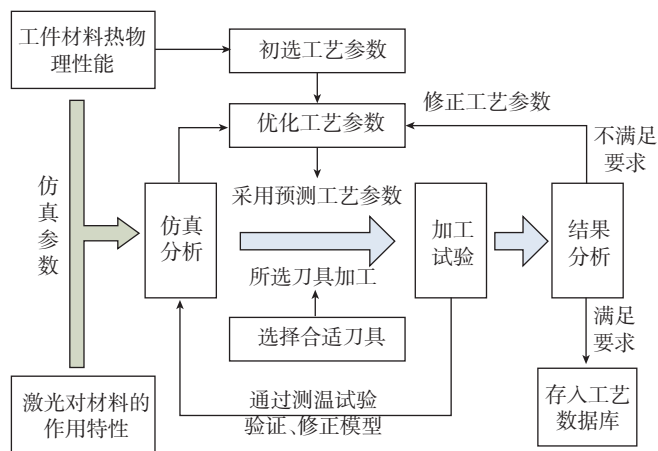


图2 激光加热辅助切削参数选择流程

首先通过材料性能分析、理论传热计算及切削参数经验初选工艺参数范围,利用材料的热物理参数与材料吸收激光参数结合热传导控制方程建立有限元模型。分析初选工艺参数对切削区域温度、激光引起热应力的影响规律,再结合切削用量的选择原则,选择合适的加工参数。采用所选的加工参数进行工艺试验,分析表面质量、刀具磨损、加工效率等加工结果,进一步修正加工参数,最终得到高效率、高质量加工的工艺参数。

2 激光加热辅助车削氮化硅陶瓷

经过参数选择分析,试验中采用的参数为:激光能量 $P_l=220\text{W}$,激光光斑直径 $D_l=3\text{mm}$,主轴转速 $N=630$,激光移动速度 $V_l=12.6\text{mm}/\text{min}$,激光光斑中心距离刀具轴向距离 $L_l=1\text{mm}$,切削深度 $a_p=0.2\text{mm}$,预热时间 $t_p=15\text{s}$ 。工件尺寸为 $\phi 10 \times 40\text{mm}$,激光与刀具的圆周角度为 60° 。采用机卡式车刀,刀片为PCBN材料,刀片型号为SNGN120408。

加工得到的切屑喷金后SEM照片如图3所示。当切削区域温度达到脆性-塑性转变温度后,晶界玻璃相发生粘滞流动,刀具与晶粒相互作用,重新分布,产生如传统金属切削相似的卷曲半连续切屑,表明此时是塑性切削过程。随着切削区域温度

降低,材料软化程度下降,材料由切削区流出后即在刀具的作用下断裂,切屑会明显减小,逐渐变为针状切屑。加工7.5min后刀具仅在刀尖处出现很薄的磨损带,磨损很小($VB_{\max}=0.05\text{mm}$)。采用基准加工参数得到的表面与基体表面SEM照片如图4所示。从LAM加工后的表面可以看见明显的走刀痕迹。由于玻璃相的软化及在刀具作用下的重分布,可以看到由于晶粒脱离产生的空腔及玻璃相材料下的晶粒,表明加工后的表面是在刀具塑性挤压作用下形成的,表面粗糙度 $R_a=0.85\mu\text{m}$ 。基体是磨削形成的表面,由金刚石砂轮与脆性材料相互作用,形成磨削光滑区、塑性沟槽、涂敷

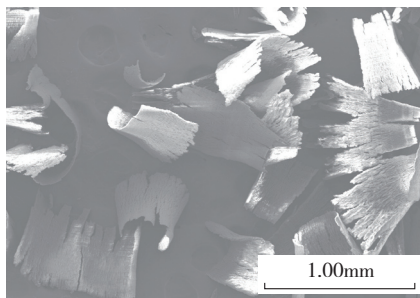
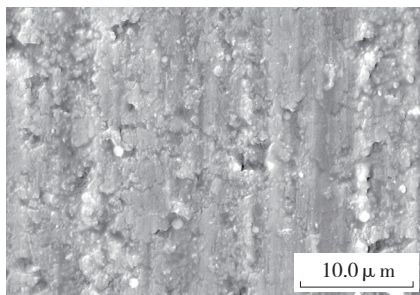
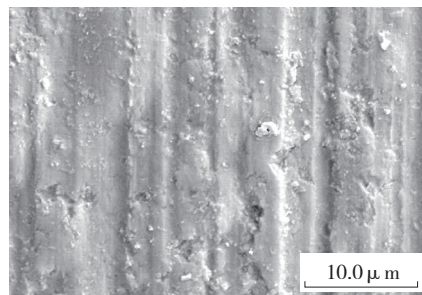


图3 加工得到切屑的SEM照片



(a) LAM加工表面



(b) 基体表面

图4 LAM加工表面与基体表面SEM照片

区和脆性断裂区。

加工后工件经金刚石锯片切开,抛光后截面的SEM图片见图5。工件内部不受激光与刀具作用影响,加工后表面内部没有微裂纹产生。

3 激光加热辅助铣削氮化硅陶瓷

经过参数选择分析,试验中采用的参数为:激光能量 $P_l=140\text{W}$,激光光斑直径 $D_l=4\text{mm}$,切削速度 $v_c=59.3\text{m}/\text{min}$,进给速度 $V_f=11.8\text{mm}/\text{min}$,进给量 $f=0.02\text{mm}/\text{r}$,激光光斑中心距离刀具的距离 $L_l=3.5\text{mm}$,切削深度 $a_p=0.25\text{mm}$ 。工件尺寸为 $17\text{mm} \times 10\text{mm} \times 4\text{mm}$,刀具直径为 32mm ,片型号为APMN160404。激光入射角度为 53° ,预热时间 $t_p=15\text{s}$ 。加工得到的工件如图6所示。

加工中同样得到了与激光加热辅助车削中相似的塑性连续切屑,见图7,表明加工过程中的材料在激光加热作用下由脆性转变成成为塑性。

加工平面的长度达到 105mm 后刀具磨损如图8所示, $VB_{\max}=0.21\text{mm}$ 。在工件对刀具间断的冲击作用下,刀具磨损与加热辅助车削试验中的刀具磨损相比明显增大。受高斯分布光束引起热应力的限制,切削区域温度没有提高至更理想的温度。系统改进后,随切削区域温度的升高,刀具磨损可以降低到能够接受的范围中。

激光加热辅助铣削得到的工件表面SEM照片见图9,在加工表面可以看到明显的走刀痕迹,表面质量好,没有裂纹产生。软化的晶间玻璃

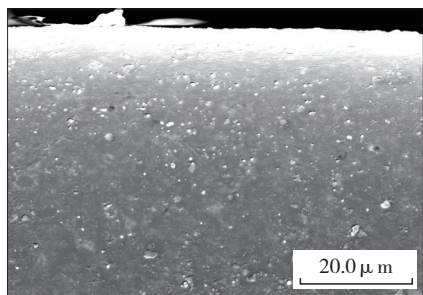


图5 LAM加工后工件截面的SEM图片

相在刀具作用下附着在加工后工件的表面,工件冷却后均匀分布在工件表面,下面有明显的晶粒突起,还有由于晶粒脱离而形成的空腔。采用表面粗糙度轮廓仪测量工件表面的粗糙度,其值为 $R_a=0.21\mu\text{m}$ 。晶粒间的玻璃相在高温下是流动的,加工后冷却填充了加工过程中由于晶粒

抛出而形成的空腔并在刀具挤压作用下留在工件表面,从而改善了加工效果,表面粗糙度较小。

采用XRD分析LAML加工后的工件与基体材料物相组成以研究激光加热对表面带来的影响,结果如图10所示。 $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ 是工件的主要组成成分,并且加工后的物相组成与基体相同。由于加工时氮化硅晶粒在刀具的作用在软化的玻璃相中发生流动,晶粒重新分布,并在冷却的过

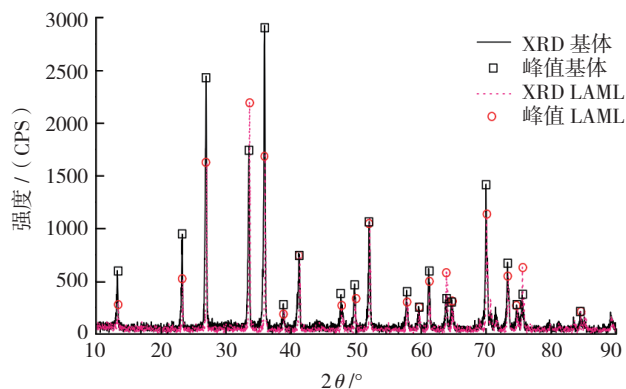


图10 氮化硅陶瓷基体与加工工件X射线衍射分析图

程中被玻璃相覆盖,导致加工后样品表面 $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ 晶粒的取向与基体不同,检测得到的峰值略有些不同。

通过建立的连续轨迹LAML加工系统,加工后的工件没有表面裂纹产生,表面质量良好,直线轨迹工件的粗糙度 $R_a=0.13\mu\text{m}$,曲线轨迹工件的粗糙度 $R_a=0.12\mu\text{m}$ 。由此证明了采用激光加热辅助铣削技术加工连续轨迹的可行性,在此基础上可以实现复杂形状陶瓷材料零件的高效加工。

结束语

高性能材料的发展是航空航天产业发展的关键因素,同时促进着高效率、高质量加工技术的进步。氮化硅陶瓷是一种应用日益广泛的典型高硬度、高脆性的高性能材料,采用激光加热辅助切削技术可实现氮化硅陶瓷工件外圆、平面及复杂沟槽加工,表面质量好,不产生裂纹,并且加工后材料没有发生物相变化。充分展现了激光加热辅助切削技术在难加工材料,尤其是在复合材料加工中的应用前景。随着激光技术、加热辅助切削技术及成套装备的出现,激光加热辅助切削技术将在未来难加工材料加工的应用中占有重要的位置。

本文共有参考文献11篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 良辰)

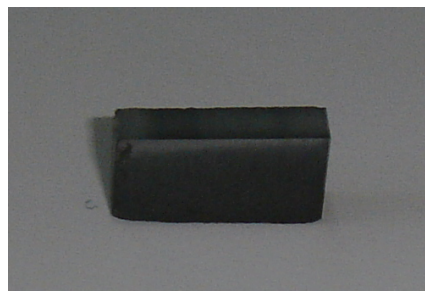


图6 激光加热辅助铣削得到的氮化硅工件

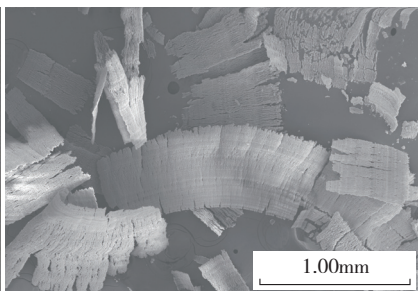
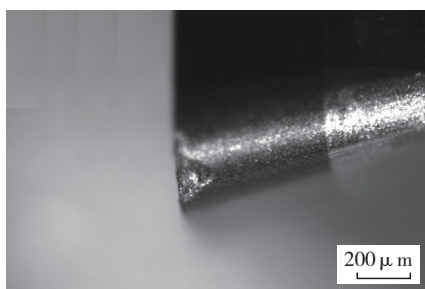
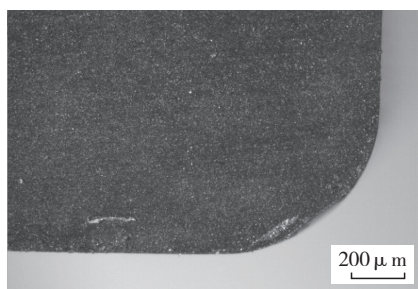


图7 加工得到切屑的SEM照片



(a) 前刀面



(b) 后刀面

图8 LAML加工过程中的刀具磨损

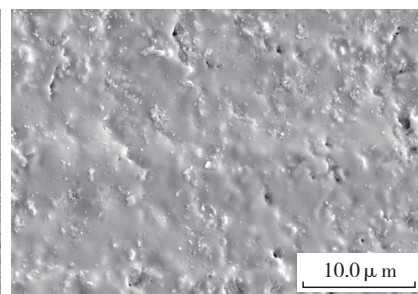
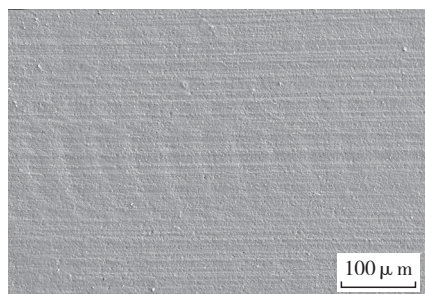


图9 LAML加工工件表面SEM照片