

Cr12MoV 钢电火花辅助铣削实验研究

李常平¹ 黄磊¹ 李树健¹ 李鹏南¹ 高泰祖²

(1 湖南科技大学 机电工程学院,湘潭 411201)

(2 韩国岭南大学 机械工程学院,大邱 38541)

文 摘 以典型难切削金属材料Cr12MoV 模具钢为研究对象,使用 ABAQUS 对其在电火花放电条件下温度场进行数值模拟,在不同进给率下对其进行传统铣削和电火花辅助铣削对比试验。借助高速摄像机、扫描电镜和测力计等设备,对其切削力特征、表面形貌和刀具磨损进行了对比分析研究。结果表明,电火花辅助铣削的切削力比传统铣削降低 28.57%~51.47%,表面粗糙度降低 2/3。与传统铣削相比,电火花辅助铣削在降低切削力、提高表面质量和减少刀具磨损方面具有显著优势。

关键词 Cr12MoV 钢,电火花辅助铣削,温度场,切削力,表面形貌,刀具磨损

中图分类号:V261.94

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2022.06.006

Experimental Study on EDM-assisted Milling of Cr12MoV Steel

LI Changping¹ HUANG Lei¹ LI Shujian¹ LI Pengnan¹ KO Tae Jo²

(1 School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

(2 School of Mechanical Engineering, Yeungnam University Dae-dong, South Korea 38541)

Abstract In this paper, the typical hard-to-cut Cr12MoV die steel is taken as the research object. ABAQUS is used to conduct numerical simulation of the temperature field under electric spark discharge. Experimental results of the traditional milling and electric spark assisted milling are compared under different feed rates. By means of a high-speed camera, scanning electron microscope and dynamometer, the characteristics of cutting force, surface morphology and tool wear are analyzed and studied. The results show that the cutting force of EDM-assisted milling is 28.57%~51.47% lower than that of traditional milling, and the surface roughness is reduced by 2/3. Compared with traditional milling, EDM-assisted milling has significant advantages in reducing cutting force, improving surface quality and reducing tool wear.

Key words Cr12MoV steel, EDM-assisted milling, Temperature field, Cutting force, Surface topography, Tool wear

0 引言

Cr12MoV 模具钢具有极高的硬度、强度和耐磨性,良好的抗氧化性,淬火和抛光后良好的耐腐蚀性,在高温下保持较高的硬度等优势,被广泛用于汽车模具、航空航天等领域^[1-2]。鉴于其特殊的冶金和材料特性,Cr12MoV 模具钢被归类为难切削材料,采用传统加工技术(车削、铣削、磨削等)很难对其进行高质高效加工。

随着现代加工技术的发展,硬切削^[3]和电火花加工^[4]等工艺广泛应用于 Cr12MoV 模具钢等淬硬性材料的加工。目前 Cr12MoV 模具钢硬切削研究主要通过优选刀具材料、改善切削环境、优化工艺参数等方

法提高其切削性能。硬切削可以在一定程度上有效提高材料去除率^[5-7],但会产生较大的切削力和机械振动,而机械振动是导致刀具磨损严重、工件表面完整性差的主要原因,因此硬切削需要使用高性能刀具,但产生的成本较高。电火花加工不受材料硬度和强度的限制,可以加工任何导电金属材料^[8],因此电火花加工比较适应于 Cr12MoV 模具钢等淬硬性材料。现有研究主要针对电火花加工效率低、表面完整性差等问题展开。研究者们通过优选电极材料、改善放电环境、优化放电参数等方法^[9-11]在一定程度上改善了电火花加工在加工效率与表面质量上的不足,但其加工效率低、加工质量差等缺点仍然存在,

收稿日期:2021-03-10

基金项目:国家自然科学基金(51905169,51775184,51975208)

第一作者简介:李常平,1986年出生,博士,副教授,主要研究领域为电火花辅助加工。E-mail:15073200235@163.com

难以满足现代工业高效加工的要求。

热辅助加工技术通过对待加工表面进行可控的预热处理,使待切削层软化,从而降低切削载荷,实现材料的高质高效加工^[12-13]。与上述工艺相比,其在提高加工效率、改善表面质量等方面存在明显优势,是Cr12MoV 模具钢高效精密加工的有效解决方案。XAVIERAROCKIARAJ 等^[14]研究了 SKD11 (Cr12MoV)模具钢的激光辅助加工过程中的切削力和表面粗糙度,与传统加工相比,切削力降低了40%,表面粗糙度提高了50%。LI 等^[15]对 STD11 (Cr12MoV)模具钢进行了电火花端铣复合加工,发现该方法可以有效改善表面粗糙度,加工效率是传统电火花加工的14.4倍。上述热辅助加工技术在加工效率和表面质量上有明显提升,但在激光辅助切削加工中,刀具和非加工区域易受到激光高温的影响,降低刀具寿命^[16]。电火花端铣复合加工在高能量下,后刀面会产生较大损耗^[17]。基于铣削和电火花加工的优势,LI 等^[18]提出了电火花辅助铣削技术,并设计专用刀具,实验结果表明电火花辅助铣削钛合

金可以有效减少刀具磨损、降低切削力、可有效避免放电对切削刀片的影响,显著改善加工表面质量。但是,电火花辅助后温度场变化规律还尚未明确。

本文以典型难切削金属材料Cr12MoV 模具钢为研究对象,使用ABAQUS 对其在电火花放电条件下温度场进行数值模拟,在不同进给率下对其进行传统铣削和电火花辅助铣削对比试验,对其切削力特征、表面形貌和刀具磨损进行了对比分析研究。

1 加工原理

电火花辅助铣削技术是通过放电辅助使待加工区域材料发生高温软化,随后对变性层及部分基体进行精密铣削,可大幅降低切削载荷,实现材料高效精密去除的一种新型热辅助加工技术。刀具采用放电电极与铣削刀片分别单独设计的思想,避免铣削和放电过程相互影响,以及放电能量造成切削刃电蚀损耗。电火花辅助铣削原理见图1,加工过程中所使用刀具由放电电极、切削刀片、绝缘垫片和固定螺栓等组成,铜为电极材料,碳化钨硬质合金为切削刀片材料,放电和切削交替进行,实现材料的高效去除。

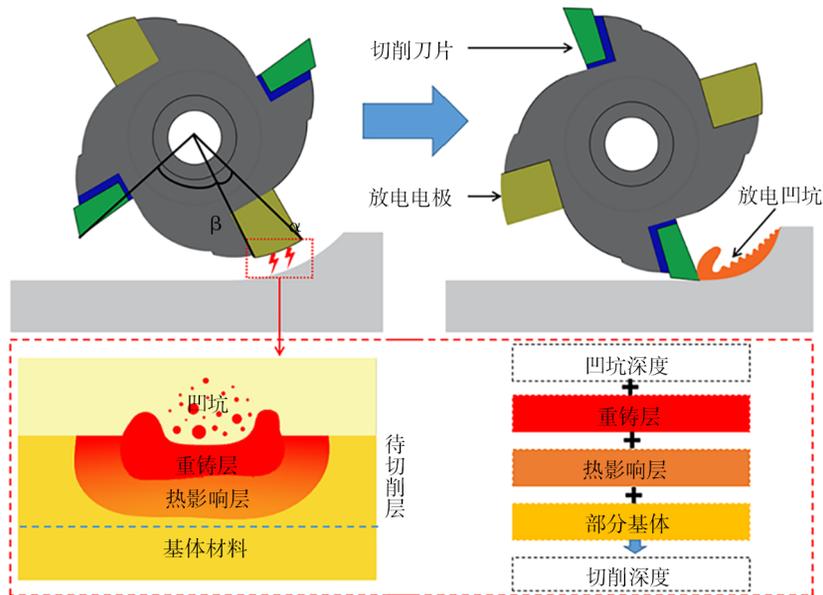


图1 电火花辅助铣削原理图

Fig. 1 Schematic diagram of EDM-assisted milling

2 电火花放电温度场数值模拟

2.1 热传导控制方程

由于电火花放电温度分布与时间和空间有关,属于瞬态温度场,其瞬态热传导有限元模拟控制方程可以表示为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (1)$$

式中, c 为电极材料的比热容; ρ 为电极材料的密度; λ 为热导率; T 为温度; t 为传热时间; x, y, z 为笛卡尔坐

标系下坐标。

2.2 材料参数

实验选用的材料为Cr12MoV 模具钢,密度7 850 kg/m³,弹性模量为0.21 MPa,泊松比为0.3,熔点为1 000~1 150 °C,热导率和比热容使用随温度变化参数如表1所示。电火花放电过程对材料影响区域较小,为简化仿真模型,减少仿真计算时间,选取长×宽为0.5 mm×0.5 mm的二维矩形模型进行仿真分析。单元类型为DC2D4,采用均匀网格划分,每个网格单元长度为2 μm。

表1 Cr12MoV钢的热物理性能参数^[19]

Tab. 1 Thermophysical properties of Cr12MoV steel

序号	温度 $T/^\circ\text{C}$	热导率 $\lambda/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	比热容 $c/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$
1	25	46.18	466
2	100	43.94	484
3	200	41.85	508
4	300	39.97	534
5	400	38.08	567
6	500	36.23	614
7	600	33.86	685
8	700	30.74	823
9	800	26.96	707
10	900	28.66	642
11	1000	27.87	664

2.3 热源模型

电火花放电加工热源符合高斯分布,本文采用的热源模型为高斯热源,只需确定热源中心最大热流密度 q_m 和放电通道半径 R 便可确定热流密度。热流密度公式^[20]如下:

$$q(r) = q_m \exp\left[-4.5 \times \left(\frac{r}{R}\right)^2\right] \quad (2)$$

最大热流密度:

$$q_m = \frac{4.45 \times \eta \times U \times I}{\pi R^2} \quad (3)$$

放电通道半径:

$$R = 788 t^{0.75} \quad (4)$$

使用示波器测得电火花放电过程中电压 $U=220$ V, 电流 $I=3$ A, 取0.4。通过编写DFLUX子程序对工件表面施加热流密度边界条件, 以实现电火花加工瞬时温度场的数值模拟。

2.4 初始条件和边界条件

初始温度条件为热传导计算时间的起始温度, 假定热源作用前工件内部温度梯度为0, $T_0=25^\circ\text{C}$, 放电加工过程中边界条件如图2所示。

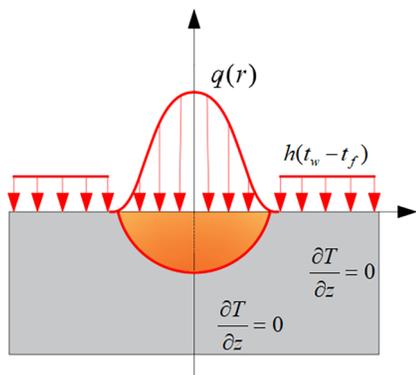


图2 单脉冲放电边界条件

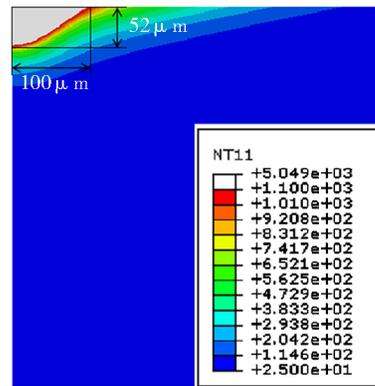
Fig. 2 Boundary conditions of single pulse discharge

$$k \frac{\partial T}{\partial z} = \begin{cases} h(t_w - t_f) & r > R \\ q(r) & r \leq R \\ 0 & \infty \end{cases} \quad (5)$$

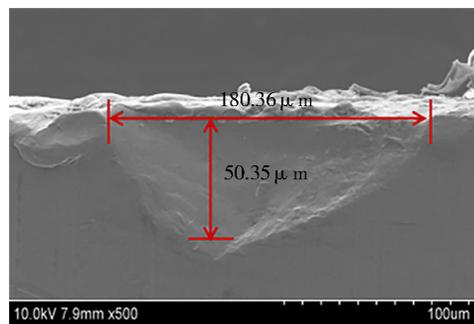
式中, h 为对流换热系数; 电介质为煤油, 故取值为 $800 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; k 为修正系数。

2.5 温度场计算结果

在加工过程中, 当主轴转速为 $3\ 000 \text{ r}/\text{min}$ 时, 每半个周期放电加热时间和冷却时间为 5 ms , $\angle\alpha:\angle\beta=1/4$, 脉冲频率 50% 。使用 ABAQUS 对其进行连续 5 次放电加热以及冷却过程数值模拟, 第一次放电结束温度场云图见图 3(a), 设置材料熔点 ($1\ 000^\circ\text{C}$) 为边界, 单脉冲放电结束后电蚀坑半径约为 $100 \mu\text{m}$, 深度约为 $52 \mu\text{m}$ 。图 3(b) 为单脉冲放电试验结果, 其电蚀坑半径和深度略小于仿真结果, 这是由于电火花放电结束后有少量熔融工件材料在电蚀坑内壁凝固的结果。



(a) 第一次放电结束温度场云图



(b) 单脉冲放电实验结果

图3 仿真结果与实验验证

Fig. 3 Experimental verification of the simulation result

连续 5 次放电加热温度场计算结果如图 4 所示, 图 4(a)~(e) 为连续 5 次放电结束后温度分布结果, (f) 为放电冷却至 5 ms 时温度分布情况。放电加热后, 工件表面放电处温度迅速升高, 放电结束后, 在电介质和空气的作用下工件表面温度不断下降。在电火花放电加热的作用下, 工件表面的温度可提升至 466.6°C 。

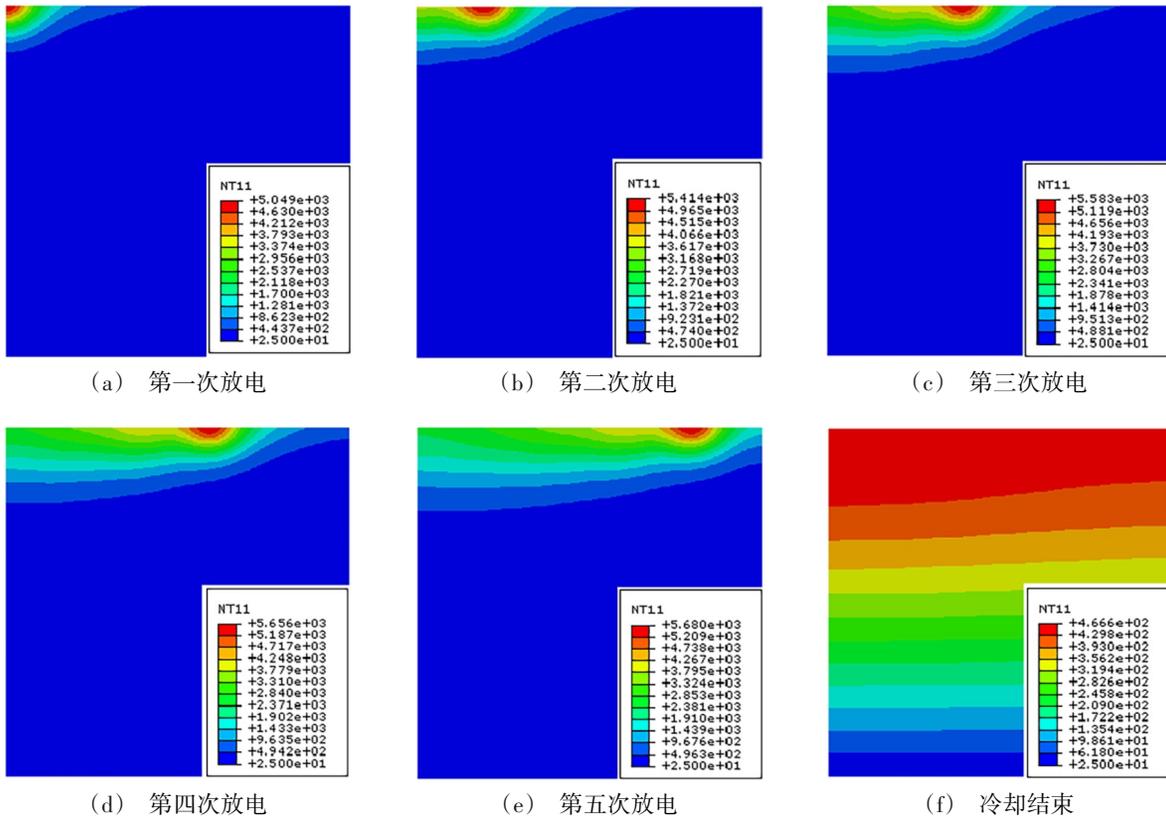


图4 温度场计算结果

Fig. 4 Calculation results of the temperature field

将工件距离表面0.1 mm处沿 x 方向结点温度导出,温度分布曲线如图5所示,在连续放电条件下,温度场不断叠加,第一次放电处温度略高于其他放电处温度,因此沿 x 方向温度分布呈下降趋势。当切削刀片对工件进行切削时,工件表面温度较放电前有明显提高,待切削层温度可提高至419.21~437.67°C。图6为不同温度下STD11(Cr12MoV)工件表面显微硬度^[21],随着温度升高,工件表面硬度不断下降,因此电火花放电辅助对待切削层可以起到一个良好的预热软化效果。

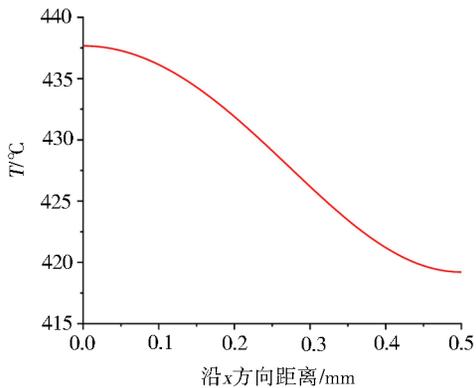


图5 0.1 mm处沿 x 方向温度分布曲线

Fig. 5 Temperature distribution curve along x direction at 0.1mm

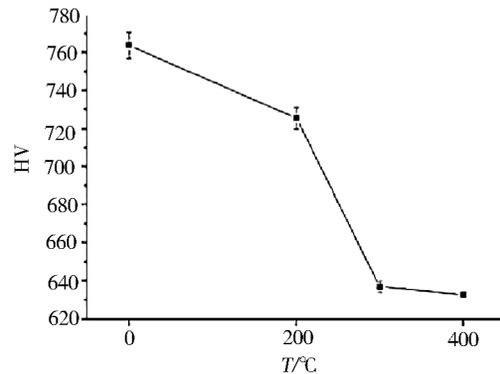


图6 不同温度下工件表面显微硬度^[21]

Fig. 6 Surface microhardness of workpiece at different temperatures

3 试验

3.1 实验设计

对Cr12MoV模具钢进行传统铣削和电火花辅助铣削对比试验,观察电火花辅助铣削方法时的切削性能。本实验所使用电火花铣削加工设备为自主研发设备,电火花辅助铣削机床系统见图7,由用于电火花加工的RC电源,3轴微型台式机床和液体排放循环系统组成,用火花油作为电介质。当电火花放电电源打开时,加工是电火花辅助铣削,电源关闭时,加工为传统铣削。

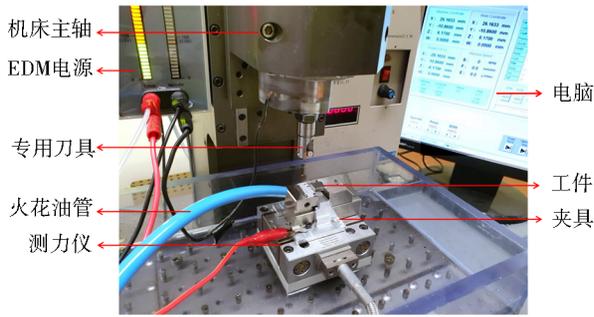
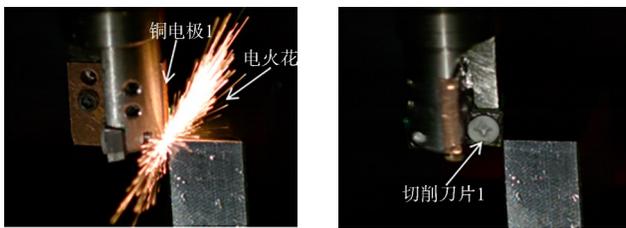


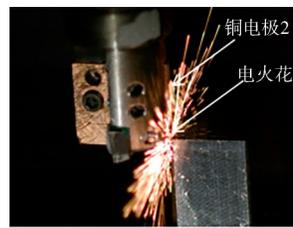
图7 电火花辅助铣削系统
Fig. 7 EDM-assisted milling system

由于高的放电能量会使工件产生厚的表面改性层,在该实验中,选择工艺参数为电容 10 nF,放电电压 220 V,主轴转速 3 000 r/min^[18]。刀具材料选取牌号为 SPMX050204SM 的 WC 硬质合金,其具体参数为:前角 0°、后角 11°、刀具直径 13 mm、刀尖圆弧半径 0.5 mm。为研究不同进给率下电火花辅助铣削



(a) 铜电极1放电

(b) 切削刀片1切削



(c) 铜电极2放电

(d) 切削刀片2切削

图8 高速相机拍摄的放电和切削瞬间

Fig. 8 Discharge and cutting instants captured by a high speed camera

电火花辅助铣削后放电表面形貌 SEM 图像如图 9 所示,加工后铜电极表面覆盖了致密的重铸层,这说明在加工过程中铜电极放电均匀,产生均匀的损耗,实验方案可行。

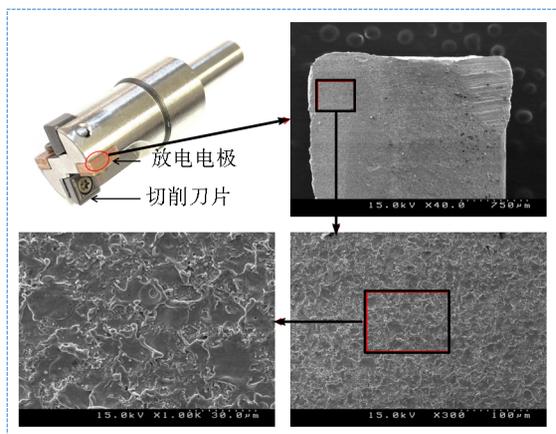


图9 加工后电极表面形貌

Fig. 9 Surface morphology of the electrode after processing

4 结果与分析

4.1 切削力

图 10 为不同进给率下,传统铣削和电火花辅助铣削在进给方向上的切削力。在加工过程中,切削

Cr12MoV 模具钢切削力、表面形貌和刀具磨损,在加工过程中保持纵向切深 0.1mm、轴向切深 1 mm,进给率分别采用 1、2、5、10、15 mm/min。

使用高速相机(C110, Phantom Miro)观察放电和切削的瞬时过程。使用小型多分量测力计(9256C1, Kistler)测量加工过程中的切削力。使用基于白光扫描干涉仪(WSI)的 3D 光学表面轮廓仪(NV-2000, Nano system)观察加工后的三维表面形貌和表面粗糙度。使用扫描电镜(SEM)(S-4200, HITACHI)观察刀具,工件和电极的二维表面形态。

3.2 实验过程

在实验过程中,使用高速相机拍摄放电和切削瞬间,如图 8 所示。当电极靠近工件时,可见大量明显火花,而切削过程不会产生火花,切削刀片和刀柄之间绝缘可行,该刀具可有效实现放电和切削交替进行,并且放电过程不会影响破坏硬质合金刀片。

力随着进给率增大而增加。在相同切削参数下,传统铣削的切削力约为电火花辅助铣削的 1.5~2 倍。这是由于工件材料因加热而产生软化效果,使得电火花辅助铣削切削力低于传统铣削。

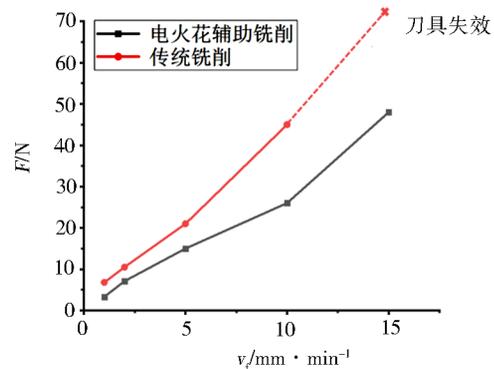


图 10 不同进给率下传统铣削与电火花辅助铣削进给方向切削力

Fig. 10 Cutting forces in feed direction of conventional and EDM-assistant milling under different feed rates

从整体上看,进给率的增大会减小电火花辅助铣削的切削力改善效果。其原因为进给率的提高会减少单位切削区域内放电时间,进而减弱放电高温

的软化效果,使得软化层变薄。因此在较低进给率下,电火花辅助铣削可以有效降低切削力。但是,当传统铣削的进给速度超过 10 mm/min 时,刀具崩断失效,无法加工。

4.2 表面形貌

进给率为 2 mm/min 时,传统铣削和电火花辅助铣削三维形貌和 SEM 图像如图 11 所示。观察两种

加工方法下的三维形貌可知,传统铣削加工后的表面存在有许多未被切除材料残余凸起,加工表面较差,而电火花辅助铣削加工表面较平整。传统铣削的表面粗糙度为 1.79 μm ,约为电火花辅助铣削表面粗糙度的 3 倍,与传统铣削相比,电火花辅助铣削能显著提高工件表面加工质量。

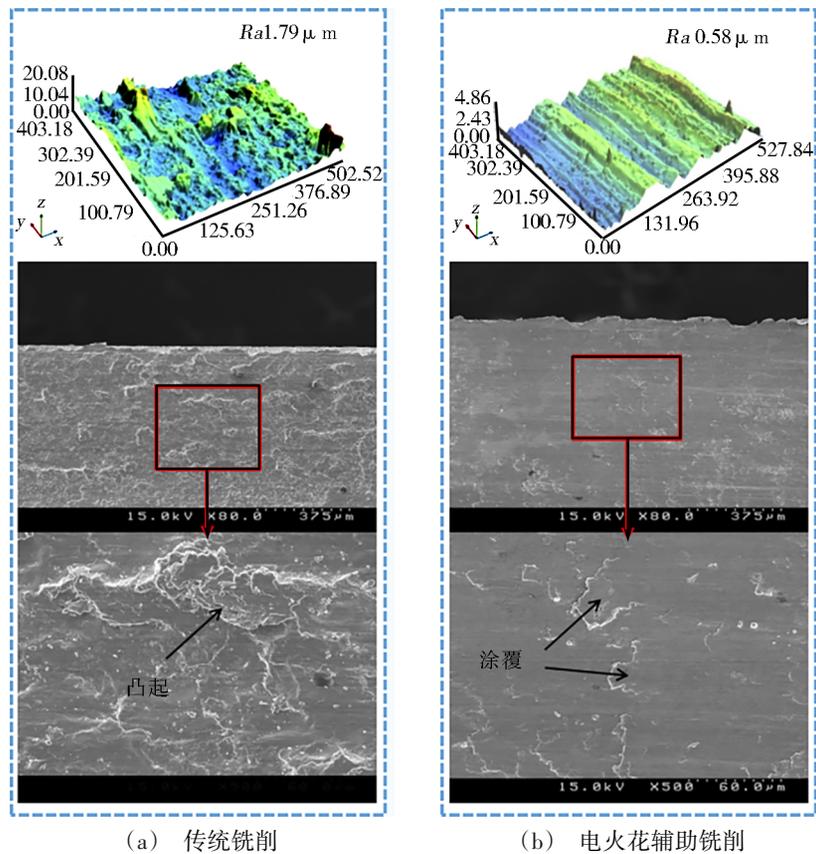


图 11 进给率 2 mm/min 时传统铣削和电火花辅助铣削三维形貌和 SEM 图像

Fig. 11 3-D topography and SEM images of surfaces cut by conventional milling and EDM-assistant milling at a feed rate of 2 mm/min

通过观察已加工表面 SEM 图像,传统铣削表面有大量未被切除的材料凸起。这是由于 Cr12MoV 模具钢在机加工过程中,工件和刀具之间存在反复的冲击载荷和不稳定的摩擦,切削力较大,刀具产生振动,无法完全去除待切削层材料,表面质量较差。电火花辅助铣削后,放电高温软化了待切削层,在切削过程中会降低切削力,有利于去除工件材料。但由于待切削层较软,在加工过程中还存在少量的软化材料涂覆在工件表面。

4.3 已加工表面硬度

用显微硬度测试仪 (MMT-X7B, MATSUZAWA) 测量工件未加工表面、传统铣削加工表面和电火花辅助铣削加工表面的显微硬度,如图 12 所示。3 个表面显微硬度相差较小,传统铣削加工表面和电火花辅助铣削加工表面硬度几乎一致,因此可以说明在电火花辅助铣削过程中,电火花放电形成的变性

层在铣削过程中已完全去除。

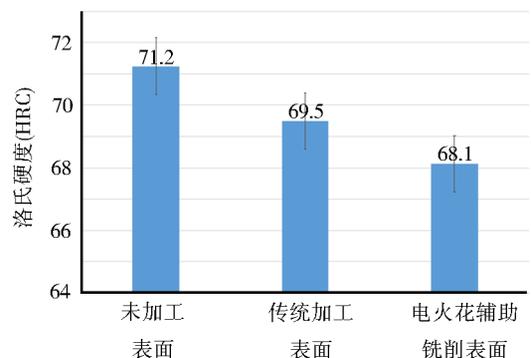


图 12 表面硬度

Fig. 12 Surface hardness comparison

4.4 已加工表面成分分析

对传统铣削和电火花辅助铣削已加工表面进行 EDX 成分分析,结果见图 13。在电火花辅助铣削加工表面可看到有少量的铜元素,由于在电火花放电

过程中铜电极会有损耗,部分融化或汽化的铜随电介质的冲洗而残留在工件表面。两种加工表面均存在少量的钨元素,这是由于在加工过程中刀具产生磨损,刀具材料中的钨元素扩散到工件表面所致。

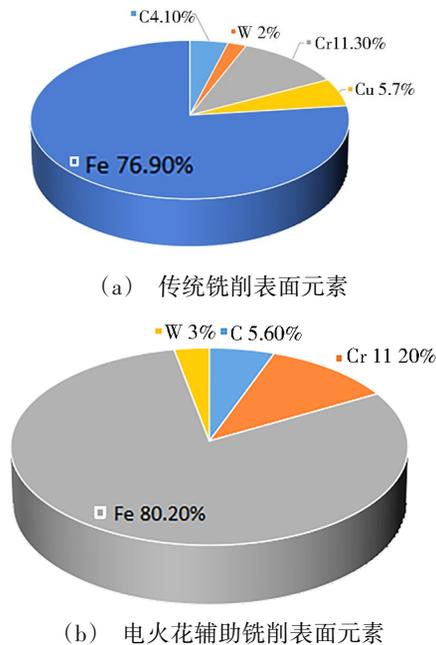


图 13 传统铣削和电火花辅助铣削加工表面元素组成
Fig. 13 Element composition analysis of cutting surface by conventional milling and EDM assisted milling

4.5 刀具磨损

图 14 比较了传统铣削和电火花辅助铣削 Cr12MoV 模具钢 50 mm 后硬质合金刀片磨损形态。传统铣削时,刀具的主要磨损形式为涂层剥落。这是由于 Cr12MoV 模具钢具有高硬度和强度等特性,在铣削过程中切削温度和切削力很高,切削刃及前后刀面受到切屑摩擦和切削冲击,切削刀具和工件之间振动剧烈,随着循环次数的增加,在热力耦合的作用下,涂层剥落现象逐渐出现,使切削刀片逐渐失去切削能力影响表面粗糙度。

电火花辅助铣削刀具的主要磨损形式为扩散磨损,高速铣削时,工件材料和切削刀具材料中的 W, Co 等元素在高温的作用下逐渐扩散成碎片。随着扩散磨损的不断进行,刀具表面的化学成分发生变化,使切削刀具产生磨损。在刀具的磨损表面上,扩散磨损通常为平坦而光滑的磨损面[图 14(a)]。电火花辅助铣削由于放电产生高温使待切削层变软,在铣削过程中切削力较低,切削刃和前后刀面受到切屑摩擦和切削冲击较小,切削刀具和工件之间振动也较低。与传统铣削相比,电火花辅助铣削可有效降低刀具磨损。在电火花辅助铣削后的刀具表面粘附了少量碎屑,这是由于同时在放电高温和切削热的作用下切屑会由于高温而熔化,从而黏附在前刀面。

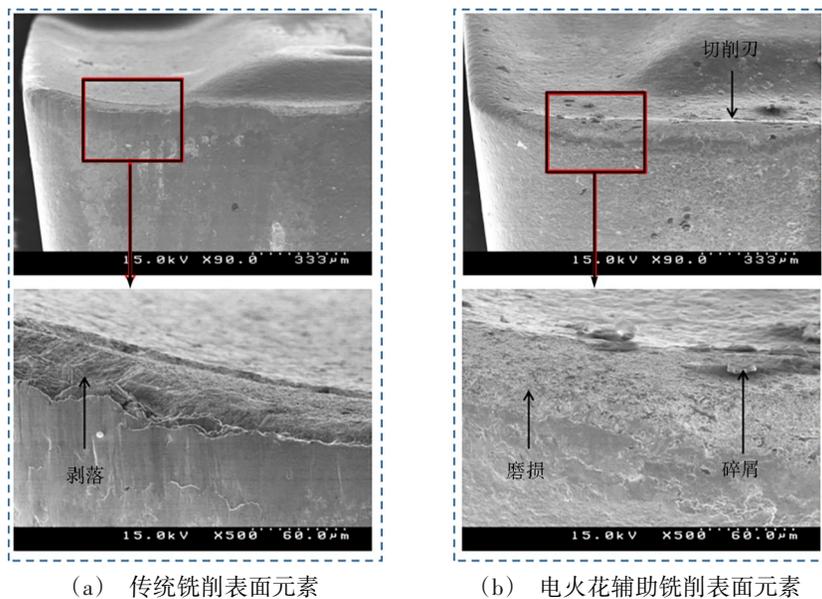


图 14 切削 50 mm 后刀具 SEM 图像

Fig. 14 SEM images of the cutter after cutting 50 mm

5 结论

以 Cr12MoV 模具钢为研究对象,使用 ABAQUS 对其在电火花放电条件下温度场进行数值模拟,在不同加工参数下,对其进行传统铣削以及电火花辅助铣削对比实验研究,得出以下结论。

(1) 基于 ABAQUS 温度场仿真结果,电火花辅助加

工时能提高工件温度,对待切削层起到预热的效果。

(2) 与传统铣削相比,电火花放电辅助能有效降低待切削层硬度和强度。在相同进给率下,传统铣削的切削力约为电火花辅助铣削的 1.5~2 倍。在较低进给率下,电火花辅助铣削能显著降低切削力。

(3) 与传统铣削相比,电火花辅助铣削后的表面

粗糙度有明显提高,进给率2 mm/min时,传统铣削的表面粗糙度约为电火花辅助铣削表面粗糙度的3倍。

(4)工件硬度对刀具磨损形式有重要影响,传统铣削以涂层剥落为主,电火花辅助铣削以扩散磨损为主。通过电火花放电产生高温,能有效改善Cr12MoV模具钢的可切削性。

参考文献

[1] 景璐璐,陈明,安庆龙. SKD11硬切削锯齿形切屑形成机理试验研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(23): 3151-3154, 3159.

JING L L, CHEN M, AN Q L. Experimental research on the formation mechanism of serrated chips in SKD11 hard cutting [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(23): 3151-3154, 3159.

[2] 黄为民,赵军,艾兴,等. 高速球铣路径对淬硬钢SKD11表面摩擦特性的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(03): 58-65.

HUANG W M, ZHAO J, AI X, et al. Effect of high speed ball milling path on surface friction characteristics of hardened steel SKD11 [J]. China Surface Engineering, 2017, 30(03): 58-65.

[3] WANG C, DING F, TANG D, et al. Modeling and simulation of the high-speed milling of hardened steel SKD11 (62 HRC) based on SHPB technology [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 108: 13-26.

[4] DAS R, PRADHAN M K, DAS C. Prediction of surface roughness in electrical discharge machining of SKD 11 tool steel using recurrent elman networks [J]. JJMIE, 2013, 7(1).

[5] GUO Y D. Wear rule of TiAlN coated cutting tool when milling material with high hardness at high speed [C]//Key Engineering Materials, Trans Tech Publications Ltd, 2011, 458: 106-112.

[6] HUANG W T, WU D H, LIN S P, et al. A combined minimum quantity lubrication and MWCNT cutting fluid approach for SKD 11 end milling [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(5-8): 1697-1704.

[7] CHEN M, JING L, LI X. The surface integrity in machining hardened steel SKD11 for die and mold [J]. Machining Science and Technology, 2007, 11(1): 99-116.

[8] 陈龙海,刘志东,邱明波,等. TC4钛合金电火花诱导可控烧蚀复合车削技术研究[J]. 航空学报, 2013, 11: 2626-2634.

CHEN L H, LIU Z D, QIU M B, et al. Research on EDM induced controlled ablation composite turning technology of TC4 titanium alloy [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 11: 2626-2634.

[9] MING W, ZHANG Z, WANG S, et al. Investigating the energy distribution of workpiece and optimizing process

parameters during the EDM of Al6061, Inconel718, and SKD11 [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(9-12): 4039-4056.

[10] ZENG Y F, CHEN F C. Investigation into some surface characteristics of electrical discharge machined SKD-11 using powder-suspension dielectric oil [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 170(1-2): 385-391.

[11] WU K L, YAN B H, HUANG F Y, et al. Improvement of surface finish on SKD steel using electro-discharge machining with aluminum and surfactant added dielectric [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(10): 1195-1201.

[12] BRECHER C, EMONTS M, ROSEN C J, et al. Laser-assisted milling of advanced materials [J]. Physics Procedia, 2011, 12: 99-606.

[13] KIM M Y, I C P, IM J H, et al. Machining characteristics of the hybrid machining system comprising of EDM and end milling [J]. Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 2016, 15(3): 86-92.

[14] XAVIERAROCKIARAJ S, KUPPAN P. Investigation of cutting forces, surface roughness and tool wear during laser assisted machining of SKD11 Tool steel [J]. Procedia Engineering, 2014, 97: 1657-1666.

[15] LI C P, KIM M Y, ISLAM M M, et al. Mechanism analysis of hybrid machining process comprising EDM and end milling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 237: 309-319.

[16] BERMINGHAM M J, SIM W M, KENT D, et al. Tool life and wear mechanisms in laser assisted milling Ti - 6Al - 4V [J]. Wear, 2015, 322: 151-163.

[17] KIM M Y, LI C P, KURNIAWAN R, et al. Experimental investigation of burr reduction during EDM end-milling hybrid process [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(6): 2847-2853.

[18] LI C P, XU M R, YU Z, et al. Electrical discharge-assisted milling for machining titanium Alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020: 116785.

[19] 谭真,郭广文. 工程合金热物性[M]. 北京:冶金工业出版社, 1994: 94.

TAN Z, GUO G W. Thermophysical properties of engineering alloys [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994: 94.

[20] 王续跃,胡辉,梁延德,等. 钛合金小孔电火花加工有限元仿真研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(13): 1738-1742, 1748.

WANG X Y, HU H, LIANG Y D, et al. China Mechanical Engineering, 2013, 24(13): 1738-1742, 1748.

[21] Kim J E, Ju Y H, Jang W Y. Quantitative analysis of metallographic characteristics with austenitizing temperature in STD 11 Steel [J]. Journal of the Korean Society for Heat Treatment, 2017, 30(5): 215-221.