

精密与超精密加工

基于静电微量润滑的 AlSi7Mg 铝合金 高速铣削能量消耗研究

林铁宇¹, 徐锦泐¹, 李超², 安庆龙¹, 明伟伟¹, 陈明¹, 时轮^{1,2}

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240;

2. 上海交大智邦科技有限公司, 上海 200120)

摘要: **目的** 通过开展 AlSi7Mg 铝合金高速铣削实验, 研究静电微量润滑 (Electrostatic Minimal Quantity Lubrication, EMQL) 条件下不同的铣削参数对铣削过程中能量消耗的影响规律。**方法** 采用 AlSi7Mg 铝合金板材, 在 PT50A 加工中心开展 EMQL 条件下不同铣削参数 (切削速度、进给量和铣削深度) 的正交实验, 以及 4 种润滑条件 (干式、传统浇注润滑、微量润滑和 EMQL) 下的对比实验, 监测不同铣削条件下机床功率 P 情况, 并对功率进行曲线拟合, 再依据拟合函数积分求解不同条件下铣削过程的材料去除能量 E_k , 进而换算出相同材料去除体积下 (即单位深度下) 消耗的能量 E' , 然后根据功率求解铣削比能 E_k 。根据实验结果分析不同铣削参数和润滑条件对 4 种能量消耗指标 (P 、 E 、 E' 和 E_k) 的影响规律, 并将依据 4 种指标选出的正交实验优化参数应用于缸盖加工中。**结果** 尽管切削速度 v 和进给量 f 各有不同, 当铣削深度 a_p 取最小值 (0.4 mm) 时, 功率曲线水平以及材料去除能量 E 均位于各数据组的最低水平。在实验 11 加工过程中, 每毫米切削深度的材料去除能量 E' 为最小值。不论 a_p 值如何变化, 铣削比能均随着 f 的增大而逐渐减小。EMQL 与传统润滑在功率、材料去除能量及铣削比能的结果上均较为接近。根据 4 种指标结果选出了优化铣削参数, $v=1\ 800\text{ m/min}$, $f=0.16\text{ mm/r}$, $a_p=0.4\text{ mm}$ 。**结论** 铣削深度对功率及材料去除能量的影响较显著, 进给量对铣削比能的影响更为突出, 而切削速度对 E' 值的影响较明显。此外, EMQL 对传统润滑具有较好的替代性。

关键词: 静电微量润滑; AlSi7Mg 铝合金; 能量消耗; 材料去除能量; 铣削比能

中图分类号: TG54 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)06-0317-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.06.030

Energy Consumption of High-Speed Milling of AlSi7Mg Aluminum Alloys under the Electrostatic Minimum Quantity Lubrication

LIN Tie-yu¹, XU Jin-yang¹, LI Chao², AN Qing-long¹, MING Wei-wei¹, CHEN Ming¹, SHI Lun^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Smart State Technology Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

收稿日期: 2022-01-10; 修订日期: 2022-02-15

Received: 2022-01-10; Revised: 2022-02-15

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFB2010600)

Fund: National Key Research and Development Program of China (2020YFB2010600)

作者简介: 林铁宇 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为清洁加工技术。

Biography: LIN Tie-yu (1996-), Male, Master graduate student, Research focus: Clean Manufacturing Technology.

通讯作者: 徐锦泐 (1987—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为先进制造技术。

Corresponding author: XU Jin-yang (1987-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: Advanced Manufacturing Technology.

引文格式: 林铁宇, 徐锦泐, 李超, 等. 基于静电微量润滑的 AlSi7Mg 铝合金高速铣削能量消耗研究[J]. 表面技术, 2022, 51(6): 317-326.
LIN Tie-yu, XU Jin-yang, LI Chao, et al. Energy Consumption of High-Speed Milling of AlSi7Mg Aluminum Alloys under the Electrostatic Minimum Quantity Lubrication[J]. Surface Technology, 2022, 51(6): 317-326.

ABSTRACT: In this paper, the effects of different milling parameters on the energy consumption of AlSi7Mg alloys under the EMQL conditions were studied by carrying out the high-speed milling experiments. The orthogonal experiments under the EMQL conditions and the comparative tests between different lubrication conditions were conducted on the PT50A machining center. Three milling parameters, including the cutting speed v , the feed rate f and the milling depth a_p , and four lubrication conditions, including dry milling, traditional lubrication, MQL and EMQL, were considered in the milling experiments. The v was set to 600, 1 200, 1 800 and 2 400 m/min; the f was set to 0.08, 0.12, 0.16 and 0.2 mm/r; the a_p was set to 0.4, 0.7, 1.0 and 1.3 mm. The power P situation in the machining process was measured, and the curve fitting was carried out according to the power data. Then, the material removal energy E of the milling process under different conditions is calculated according to the integral of the fitting function, and the energy consumed under the same material removal volume is converted to the material removal energy per unit depth E' . Besides, the specific milling energy E_k is calculated based on the power data. According to the experimental results, the influence laws of different milling parameters and lubrication conditions on the four energy consumption indexes (P , E , E' and E_k) were analyzed, and the optimal parameters of the orthogonal experiments were selected according to the four indexes and applied to the cylinder head machining. The results show that, although the cutting speed v and the feed rate f are different, the P and the E are at the lowest level of each data set when the milling depth a_p remains the minimum value of 0.4 mm. According to the results in experiment 11, the E' values in the machining process are at the lowest level. The traditional lubrication and EMQL methods yield the better E and E' values. It can be found that no matter how the a_p varies, the E_k gradually decreases with the elevation of the f . Both the EMQL and traditional lubrication are similar in the results of P , E , E' and E_k . According to the P , E , E' and E_k results, the optimal milling parameters are $v = 1\ 800$ m/min, $f = 0.16$ mm/r, $a_p = 0.4$ mm. The milling depth has a significant impact on the power and material removal energy, the feed rate has a more prominent impact on milling specific energy, while the cutting speed has a significant impact on the E' value. Additionally, the EMQL can be a better alternative to the traditional lubrication methods.

KEY WORDS: EMQL; AlSi7Mg aluminum alloy; energy consumption; material removal energy; specific milling energy

近年来,绿色发展已成为时代主题。为了解决绿色发展中的技术难题、实现零污染,出现了许多新工艺、新加工技术。从清洁的切削、铣削等机械加工工艺^[1],清洁的涂装等表面工程技术^[2],再到绿色电镀等清洁化学工艺^[3],新式清洁加工技术在制造行业不同领域获得了广泛应用。在机械加工中,我国机械制造业规模庞大且中低端产业比例高,传统加工工艺仍是主流。

在传统金属加工工艺中,为了降低切削温度、减轻刀具磨损等会使用大量的切削液,这样易危害劳动者的身心健康,且提高了零件的生产成本^[4],因此在生产中需要一种切削液少或无切削液的技术。许多新润滑冷却技术在不同的工艺下表现良好,其中包括微量润滑技术(Minimal Quantity Lubrication, MQL)。该技术利用压缩空气使切削液雾化,再对加工接触区进行冷却润滑。许多学者将 MQL 技术与其他技术结合,实现了冷却润滑的增效^[5-7]。其中,静电微量润滑技术(Electrostatic Minimal Quantity Lubrication, EMQL)利用静电使切削液为荷电状态,并在气动力和静电力的作用下将切削液雾化成微米级的荷电液滴,喷向工件/刀具接触面,对切削加工区进行润滑和冷却。与一般 MQL 技术相比,EMQL 具有以下优势:有效降低液滴的表面张力,提高液滴在接触区的润

湿及渗透性能;有效减小液滴尺寸,提高气雾的均匀性;有效增强切削液活性,促进加工区域润滑膜的形成。由此可见,EMQL 技术能有效提高润滑冷却性能,减小工件表面的粗糙度,降低加工场所中油雾的浓度^[8]。

EMQL 技术是将静电喷雾技术结合微量润滑技术,从而实现技术效用的提升。国内外学者针对静电 MQL 的应用效果开展了许多研究。Leeuwenburgh 等^[9]的研究指出,静电喷雾技术使得喷雾的沉积性能和渗透性能得以提升,改善了液滴的利用率,从而提升了液体的雾化效果。闻建龙等^[10]在实验中发现,液滴雾化荷电后,其表面的静电荷相互排斥,静电力与表面张力相抵抗,从而提升了液滴粒径的均匀性。高全杰和王家青^[11]在研究中发现,经充电的荷电雾滴在受到重力、静电场力及其他外力联合作用时,可快速、定向地吸附在目标物上。汪朝晖等^[12]通过理论及实验研究了液滴破碎的理论临界电场,实验结果表明,雾滴粒径随着电压的增大而减小,以粒径为优化目标得出的优化电压为 65 kV,此时雾化效果良好。罗惕乾等^[13]通过开展实验证明,采用使液体处于荷电状态及增大内外压力差等方式均有利于液体的雾化,而液体荷电时可有效降低其表面张力。

针对 EMQL 技术在不同工艺和材料下的加工效果,国内外学者也开展了相关的研究。Shah 等^[14]通

过进行 15-5PHSS 的车削实验,采用优化电压对 MQL 和 EMQL 技术环境下的刀具磨损进行试验,结果证明,在切削长度为 2 400 mm 时,采用优化静电电压的 EMQL 技术比 MQL 能够有效降低 38% 的刀具磨损。目前,在国内开展此项研究的单位主要为浙江工业大学。其中,黄水泉^[15]基于高压静电荷电的技术特点,开发了静电辅助微量润滑新技术,并通过实验验证了该技术在雾化、润滑和冷却性能上的显著效果;高翔^[16]通过开展实验进行 MQL 切削液配方优化,并通过铣削实验证实了新配方的加工性能;吕涛等^[17]通过开展实验研究 EMQL 条件下,荷电电压对润滑油液滴粒径、分布、润湿性和沉积性的影响,揭示了 EMQL 切削加工时的工作机制。

经过多年的发展,高速切削加工技术研究已具有系统性,形成了刀具、加工工艺、机床、工件、监控与测试以及切削理论等 6 个研究方向^[18-19]。众多学者开展了铝合金材料的高速铣削研究,研究内容从温度场分析、残余应力预测,再到切屑形成机理等,涵盖范围较广,研究较为成熟^[20-22]。相比之下,有关铝合金高速铣削过程中能量消耗的研究较少。

综上所述,国内外学者对 EMQL 的技术原理已开展了广泛的研究,而研究该技术的应用和优化相对较少。此外,有关 EMQL 技术对高速铣削铝合金的能量耗散的研究亦十分匮乏。为此,文中将基于 EMQL 设备,对 AlSi7Mg 铝合金工件高速铣削过程

的能量耗散进行研究,分析不同铣削参数和润滑方式下铣削过程的功率、材料去除能量及铣削比能的情况,根据实验结果选取优化的铣削参数,并将其应用于生产线缸盖加工。文中主要创新之处在于将静电微量润滑技术应用于铝合金高速铣削,对铣削过程的功率数据进行函数拟合,通过积分求解出材料去除能量,并换算出相同材料去除体积下的能量消耗。

1 静电微量润滑原理

静电微量润滑设备内部的功能模块主要分为雾化和荷电 2 个部分。如图 1 所示,在设备工作时,首先是 EMQL 设备内部储液箱的冷却润滑液流至气液汇流板处,在气泵作用下将液体雾化成小液滴;其次,高压静电发生器工作使得电极荷电,在气雾通过荷电管道时接触电极对输液管中的冷却润滑液气雾荷电;最后,以微米级荷电液滴的形式通过喷嘴喷向切削加工区,对刀具和工件进行冷却和润滑。由图 1 左侧图可知,带电切削液在压缩空气作用下在喷嘴位置变成带电微小液滴,随着压缩空气的释放,并喷向目标区域。在静电 MQL 条件下加工,静电喷雾喷向工件和刀具,静电液滴吸附在二者表面。在喷雾充分扩散的区域,二者表面可形成完整的切削液吸附层;在喷雾未充分扩散的区域,二者表面呈现零散的吸附液滴,如图 2 所示^[15]。在刀-屑接触过程中,吸附液滴

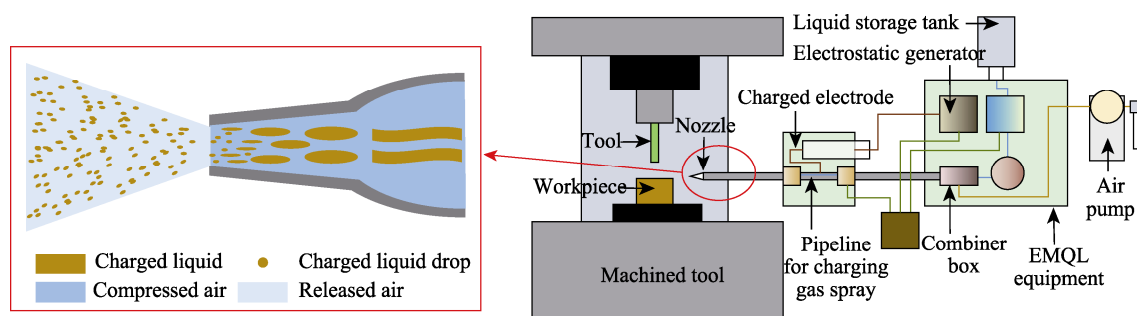


图 1 EMQL 工作原理
Fig.1 The working principles of EMQL

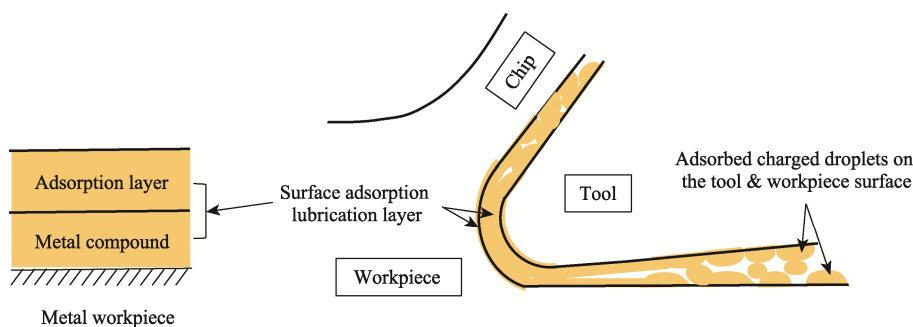


图 2 静电微量润滑机理^[15]
Fig.2 The lubrication mechanisms of EMQL^[15]

受到摩擦挤压会在表面铺展开,形成局部小吸附层。相较于传统润滑,雾化液滴增大了接触区的氧气含量。由于加工生热,局部的高温环境使工件表面与氧气快速形成金属氧化物膜,与吸附层一起形成混合润滑环境,降低了刀具磨损,进一步提升了润滑效果^[15]。

2 实验条件与方法

实验所采用的工件材料为 AlSi7Mg 铝合金,工件尺寸为 450 mm×165 mm×60 mm,其力学性能如表 1

表 1 AlSi7Mg 铝合金的力学性能
Tab.1 Mechanical and physical properties of AlSi7Mg aluminum alloys

Melting point $t_m/^\circ\text{C}$	Thermal Conductivity $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	Density $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	Poisson's ratio ν	Young's modulus E/MPa
555~615	139.1	2.685	0.3	71 700
Elongation $\delta/\%$	Tensile strength R_m/MPa	Shear strength τ/MPa	Fatigue strength σ_{-1}/MPa	Yield Strength σ_s/MPa
3.5	228	180	60	165

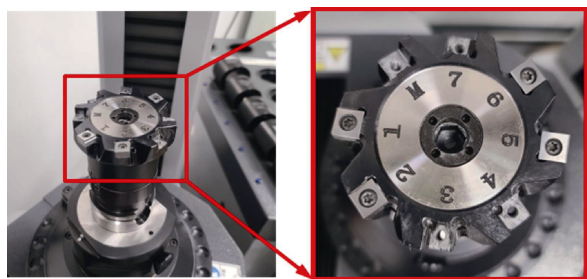


图 3 在铣削加工中使用的铣刀
Fig.3 The utilized tool in milling experiments

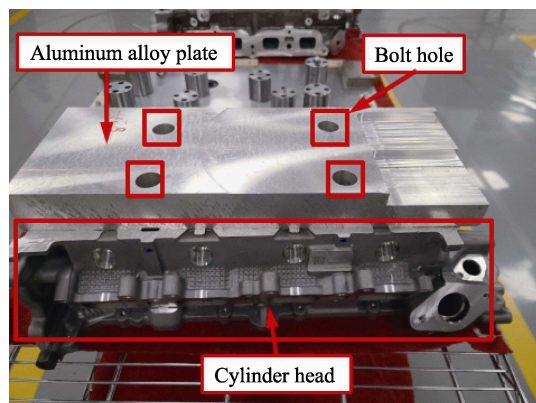


图 4 铝合金板材与缸盖的螺栓连接
Fig.4 The used bolt connection between the aluminum alloy plate and cylinder head

实验采用的加工方式为高速铣削,4种润滑条件为干式、传统润滑、MQL、静电 MQL。传统润滑铣削的切削液流量为 30 L/min,气压为 7 MPa。2种微量润滑流量为 120 mL/h,气压为 0.6 MPa。机床内置的润滑模块提供传统润滑功能,2种微量润滑功能都通过外部设备与机床连接使用而实现。其中,EMQL

所示。实验刀具采用缸盖加工生产线上常用的镶片盘式铣刀,刀具直径为 80 mm。由于在工件材料中铝合金材料的硬度相对较小,因此刀片部分采用硬质合金材料。实验采用八齿刀盘,在每把刀的 1、2、5、6号齿上均安装硬质合金切削刀片,如图 3 所示。

高速铣削实验在 PT50A 五轴联动机床上进行。该实验的装夹方案为:通过在铝合金板材上开螺栓孔,再利用螺栓将铝合金板材固定在缸盖上,最后通过机床夹具固定于缸盖,达到装夹铝合金工件的目的,如图 4 所示。

设备的喷嘴喷射方向与主轴轴向的夹角约为 60° ,喷嘴距离铣刀刀片约 5 cm。EMQL 设备与机床的连接情况如图 5 所示。

文中实验包括 EMQL 条件下的变参数铣削实验,以及 4 种润滑条件下的对比实验。在 EMQL 条件下的铣削参数优化实验采用三因素四水平正交表设计实验参数,共需 16 次实验,见表 2 中的 1—16 号实验。在实验 17—20 中,每个实验分别采用 4 个进给量模拟实际加工中铣削参数的变化。实验中每把铣刀的总行程为 640 mm。实验内容包括 4 个部分:在铝合金板材上分别进行不同参数下的铣削实验;记录铣削实验中的功率数据;在铣削完成后对功率数据进行处理,包括进行功率曲线拟合,积分求解材料去除能量,求解铣削比能;对功率、材料去除能量和铣削比能进行分析,并得出优化的铣削参数。

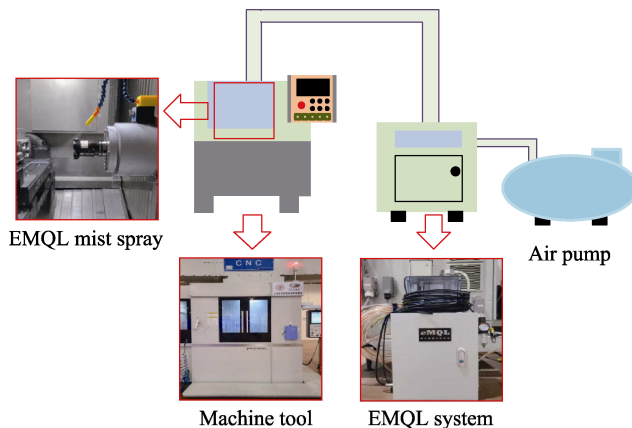


图 5 EMQL 设备与机床连接示意图
Fig.5 Schematic diagram of the connection between the EMQL system and the machine tool

表 2 实验用铣削参数
Tab.2 Milling parameters of the experiments

No.	Cutting speed $v/(m \cdot min^{-1})$	Feed rate $f/(mm \cdot r^{-1})$	Axial depth of cut p/mm	Radial depth of cut a_p/mm	Lubrication methods	Tool
1	600	0.08	0.4			1
2	600	0.12	0.7			
3	600	0.16	1			2
4	600	0.2	1.3			
5	1 200	0.08	0.7			3
6	1 200	0.12	0.4			
7	1 200	0.16	1.3			4
8	1 200	0.2	1			
9	1 800	0.08	1		EMQL	5
10	1 800	0.12	1.3			
11	1 800	0.16	0.4	End milling (80)		6
12	1 800	0.2	0.7			
13	2 400	0.08	1.3			7
14	2 400	0.12	1			
15	2 400	0.16	0.7			8
16	2 400	0.2	0.4			
17	2 400	0.08,			Dry	9
18	2 400	0.12,			Traditional	10
19	2 400	0.16,	1		MQL	11
20	2 400	0.2			EMQL	12

3 结果与讨论

3.1 功率

对实验 1—16 号加工过程中的功率信号进行处理, 将各功率信号按照不同的切削速度进行分组, 得到不同进给量和铣削深度下功率随时间的变化曲线, 如图 6 所示。由图 6a 可知, 当切削速度为 600 m/min 时, 采用大进给量和大铣削深度的铣削加工过程中, 材料去除需要消耗较大的功率; 采用小进给量时, 进给速度的降低会造成加工时间的增加, 因此曲线较长。由图 6b 可知, 当切削速度为 1 200 m/min 时, 功率曲线在 $f=0.16\text{ mm/r}$, $a_p=1.3\text{ mm}$ 时达到最高水平; 在 $f=0.12\text{ mm/r}$, $a_p=0.4\text{ mm}$ 时降至最低, 且低于 800 W。对比图 6a 曲线可发现, 铣削深度对功率曲线水平高低的影响较明显, 当 $f=0.08\text{ mm/r}$ 和 $f=0.12\text{ mm/r}$ 时, 采用最小的铣削深度 (0.4 mm) 均使得功率曲线位于同组数据的最低水平。由图 6c 可知, 当切削速度为 1 800 m/min 时, 功率曲线在 $f=0.12\text{ mm/r}$, $a_p=1.3\text{ mm}$ 时达到最高水平, 超过 1 800 W; 在 $f=0.16\text{ mm/r}$, $a_p=0.4\text{ mm}$ 时, 功率降至最低。由图 6d 可知, 当切削速度为 2 400 m/min 时, 功率曲线在 $f=0.12\text{ mm/r}$, $a_p=1\text{ mm}$ 时达到最高水平, 不过与 $f=0.08\text{ mm/r}$, $a_p=1.3\text{ mm}$ 时的水平十分接近; 当 $f=0.2\text{ mm/r}$, $a_p=0.4\text{ mm}$ 时, 曲线水平降至最低, 不过此时的最低水平也达到了 1 200 W。由此可知, 即使进给量取最大值, 当铣

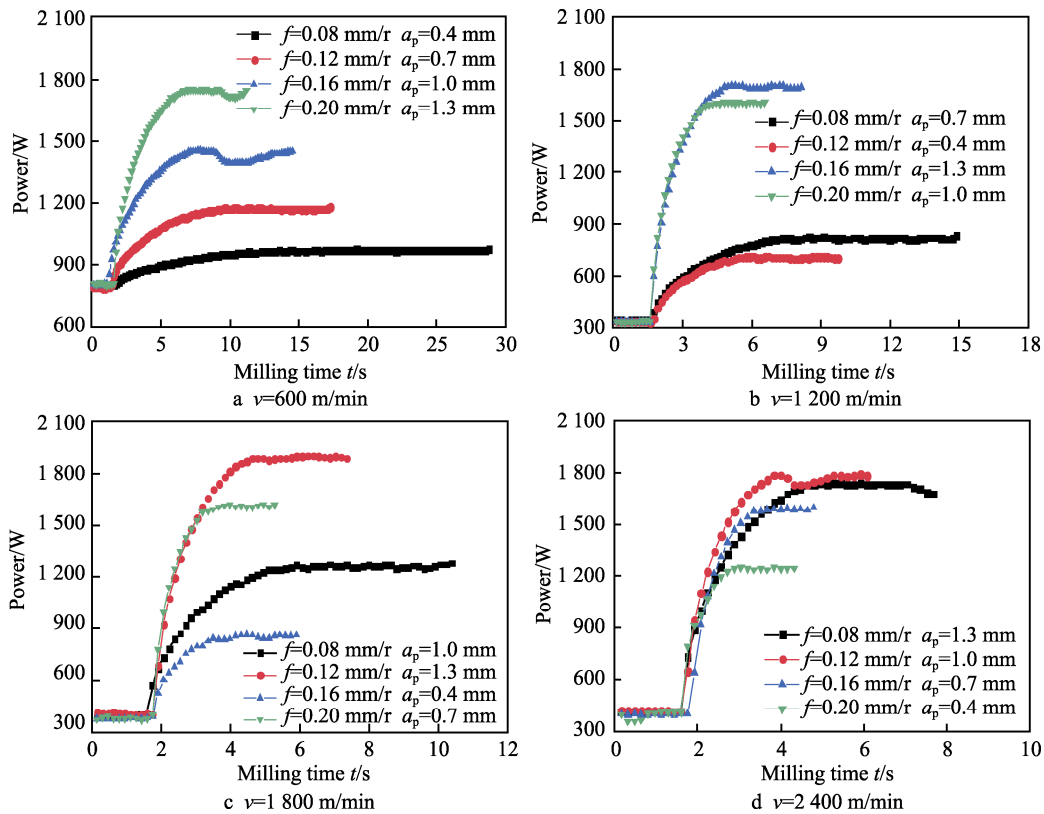


图 6 正交实验加工过程功率变化曲线
Fig.6 Power change curves of the orthogonal experimental machining process

削深度取最小值时,功率曲线水平仍为同组数据中的最低水平。综合2个功率曲线图来看,在不同切削速度数据组中,尽管进给量各不相同,当铣削深度取最小值时,功率曲线水平均取得了各数据组的最小值,进一步证实铣削深度对功率水平的影响显著。

为了对比不同润滑方式下功率曲线的水平及变化情况,对实验17—20号加工过程中的功率信号进行处理,选择 $f=0.12$ mm/r时的数据进行对比,不同润滑方式下的功率-时间曲线如图7所示。观察各曲线的最高水平可发现,当切削速度为2 400 m/min,进给量为0.12 mm/r,铣削深度为1 mm时,在干式条件下进行高速铣削时的加工功率达到最大。这是因为当不采用润滑液时,刀-屑间的摩擦作用会增强,相互作用力增大,完成材料去除需要更大的铣削力及消耗更多的能量,因此在相同参数下不采用润滑液进行加工需要更大的功率,使得功率曲线水平上升。采用润滑液时发现,在3种润滑方式下的功率曲线整体较为接近。在功率曲线进入最高水平后,发现EMQL条件下的曲线波动明显,一度处于4种润滑条件下最低水平,后又上升与MQL条件下的曲线水平几乎重合。传统充分润滑与MQL的曲线水平较为稳定,在加工后段,传统充分润滑的优势显现出来,功率曲线水平处于4种润滑条件下的最低水平。充分的润滑有效降低了刀-屑间的摩擦,减少了材料去除所需铣削力,使得材料更易被去除,因此加工中消耗的功率更低。

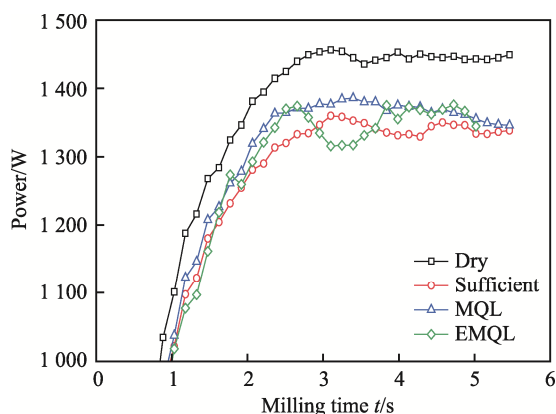


图7 不同润滑条件下加工过程功率变化曲线
($v=2\ 400$ m/min, $f=0.12$ mm/r, $a_p=1$ mm)

Fig.7 Power change curves of the machining processes under different lubrication conditions
($v=2\ 400$ m/min, $f=0.12$ mm/r, $a_p=1$ mm)

3.2 材料去除能量

由于不同进给量下的加工时间不同,不同铣削深度下材料的去除体积也不同,因此为了分析不同加工参数下铣削所消耗的能量,对功率数据进行函数拟合,并进行积分求解能量,再换算出相同材料去除体积下消耗的能量。如图8所示,对加工测量得到的功率数据进行函数拟合后,加工时间从 t_1 到 t_2 范围内积

分出的能量值为加工总能量值。为了求解用于材料去除部分的能量,需要减去空载消耗的能量,同时将材料去除能量 E 换算成铣削深度1 mm(a_{p0})下的材料去除能量(E'),其中 $E'=E \cdot a_{p0}/a_p$ 。实验1—16的功率数据拟合后的函数关系如表3所示。为了使拟合具有较高的可信度,各函数均采用六次多项式,所有拟合函数 R^2 均在0.98以上。

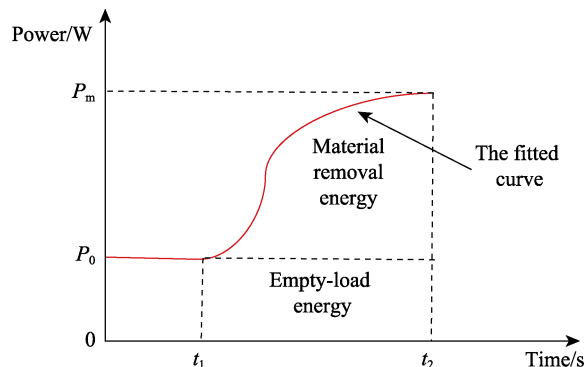


图8 材料去除能量求解示意图
Fig.8 Schematic diagram of material removal energy solution

为了清晰地比较实验1—16中不同参数下材料消耗能量 E 及材料去除能量 E' 的情况,将2种能量数据用柱状图呈现,如图9—10所示。由图9可知,当采用最低铣削深度0.4 mm时,在4组切削速度的结果中有3组材料去除能量取得最小值;各组材料去除能量的最大值都在最大铣削深度1.3 mm时取得,可见在不同的切削速度和进给量下,铣削深度对材料去除能量极值的影响显著。在切削速度为2 400 m/min时,随着进给量的增大及铣削深度的减小,材料去除能量逐渐减小,在该组实验中,采用最大的进给量和最小的铣削深度获得了最小的材料去除能量。对比实验5和实验8发现,采用较大的进给量和铣削深度时的 E 值反而比采用较小的进给量和铣削深度时小。采用较大进给量会造成加工过程中冲击作用的增大,会消耗更多能量,不过在进给量较大的情况下加工时间会缩短,从而减小了能量的消耗。

当各实验中的材料去除能量全部换算成铣削深度1 mm时的能量发现,单位深度材料的去除能量 E' 随着各项参数的变化情况与材料去除能量 E 有显著不同。如图10所示,当进给量和切削速度分别取最小值时,单位深度材料去除能量达到了最大值,这与低进给量和切削深度下加工时间的延长有关。在切削速度为2 400 m/min、进给量为0.16 mm/r、铣削深度为0.7 mm时,加工过程的单位深度材料去除能量降至最低水平,因此采用该参数进行铣削加工可显著降低加工消耗能量。观察前3组切削速度中的数据发现,在最小的进给量和铣削深度下,单位深度材料去除能量均取得最大值,其他3个实验的单位深度材料去除能量数值较为接近。随着切削速度的增大,各组

表 3 实验 1—16 功率曲线拟合函数
Tab.3 Power curve fitting function of experiments 1-16

No.	Power Curve Fitting Formula	R ²
1	$y=0.000\ 01x^6-0.000\ 9x^5+0.031\ 5x^4-0.473\ 1x^3+2.109\ 5x^2+19.678x+786.23$	0.994 1
2	$y=0.000\ 3x^6-0.013\ 6x^5+0.212\ 6x^4-1.284\ 3x^3-2.644\ 7x^2+74.694x+888.84$	0.995 7
3	$y=0.000\ 8x^6+0.049\ 2x^5+1.158\ 2x^4-12.034x^3+42.827x^2+97.08x+739.81$	0.990 6
4	$y=0.041\ 2x^6-1.548\ 5x^5+22.743x^4-162.54x^3+549.29x^2-540.42x+926.03$	0.994 2
5	$y=0.003\ 2x^6-0.159\ 2x^5+3.106\ 3x^4-28.874x^3+120.03x^2-96.155x+346.29$	0.993 7
6	$y=0.013\ 4x^6-0.542\ 8x^5+8.599x^4-65.894x^3+235.85x^2-248.3x+387.94$	0.991 1
7	$y=0.055\ 9x^6-2.758\ 1x^5+46.175x^4-347.72x^3+1\ 175.1x^2-1\ 184.5x+594.89$	0.990 5
8	$y=-1.072\ 6x^6+19.301x^5+115.13x^4+198.11x^3+308.44x^2-596.42x+481.72$	0.987 8
9	$y=0.057\ 5x^6-2.081\ 1x^5+29.48x^4-202.87x^3+658.19x^2-645.11x+538.63$	0.993 2
10	$y=-0.668\ 9x^6+13.471x^5-90.311x^4+179.73x^3+267.04x^2-609.41x+584.89$	0.988 3
11	$y=-1.494\ 9x^6+27.392x^5-184.56x^4+541.53x^3-608.81x^2+224.96x+361.95$	0.987 1
12	$y=-10.04x^6+171.03x^5-1\ 091.7x^4+3\ 161.3x^3-3\ 934.4x^2+1\ 887.4x+132.57$	0.988 2
13	$y=0.056\ 2x^6-2.873\ 2x^5+47.779x^4-353.43x^3+1\ 169.4x^2-1\ 148.9x+659.62$	0.988 9
14	$y=-2.924\ 5x^6+53.733x^5-354.2x^4+957.27x^3-772.8x^2+11.456x+475.51$	0.988 2
15	$y=-12.377x^6+206.29x^5-1\ 299.1x^4+3\ 760x^3-4\ 792.5x^2+2\ 397.2x+62.581$	0.989 4
16	$y=-18.492x^6+269.68x^5-1\ 479.5x^4+3\ 705.2x^3-4\ 040.2x^2+1\ 737.6x+163.31$	0.981 8

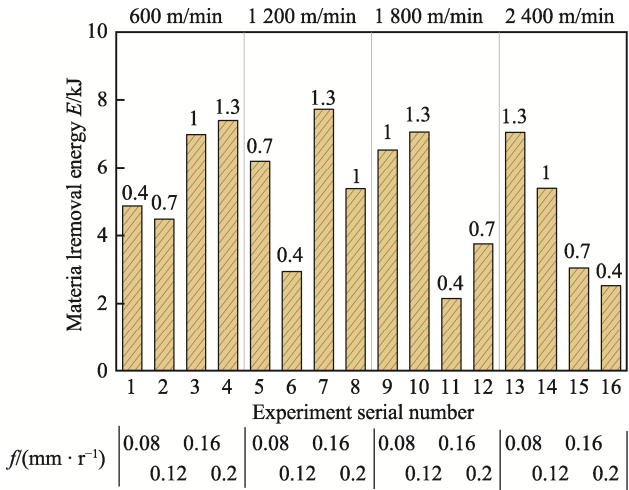


图 9 实验 1—16 加工过程材料去除能量
Fig.9 Material removal energy of experiments 1-16 during processing

Note: The numbers (0.4/0.7/1/1.3) represent milling depth (a_p , mm).

实验中单位深度材料去除能量的整体水平和最大值均逐渐下降。为了降低加工过程的单位深度材料去除能量,可适当采用较大的进给量和切削速度。由此可知,在文中实验设置的高速切削速度范围内,增大切削速度,使得单位深度材料去除能量降低,这对于降低加工能耗、节约加工成本具有参考意义。

对不同润滑方式下实验的功率数据进行函数拟合。由于不同润滑方式的实验初始空载功率差距明显,因此为了便于对比,分别将实验 17—20 中各自的测量功率数据减去各自的平均空载功率,得出实际的材料去除部分功率,再对该部分功率数据进行函数拟合。在 4 个实验下的拟合函数 R^2 均在 0.99 以上,

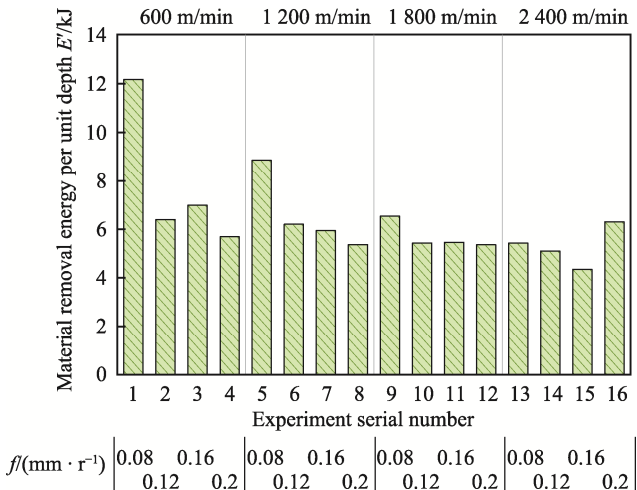


图 10 实验 1—16 加工过程单位深度材料去除能量
Fig.10 Material removal energy per unit depth of experiments 1-16 during processing

可信度较高。由于实验 17—20 中的铣削深度均为 1 mm,因此材料去除能量与单位深度材料去除能量数值相同。在切削速度为 2 400 m/min、进给量为 0.16 mm/r、铣削深度为 0.7 mm 时,各拟合函数以及 $E(E')$ 情况如表 4 所示。当切削速度为 2 400 m/min、进给量为 0.16 mm/r、铣削深度为 0.7 mm 时,选择传统充分润滑条件加工得到的 $E(E')$ 值最低,为 7 030.60 J;在 EMQL 条件下加工效果与前者相近, $E(E')$ 值为 7 090.05 J,相比传统充分润滑,能量仅增大了 0.85%,二者具有较高的可替换性;在 MQL 条件下加工, $E(E')$ 值增大至 7 329.01,不过相较于干式条件,消耗的材料去除能量下降了约 5.4%。在 2 种微量润滑条

表 4 实验 17—20 功率曲线拟合函数及 $E(E')$ 值
Tab.4 Power curve fitting function and $E(E')$ values of experiments 17-20

No.	Power Curve Fitting Formula	R^2	$E(E')/J$
17	$y = -1.4521x^4 + 30.579x^4 - 238.32x^2 + 813.24x + 291.43$	0.997 6	7 744.61
18	$y = -1.453x^4 + 29.984x^4 - 229.74x^2 + 772.24x + 238.19$	0.997 2	7 030.60
19	$y = -1.5682x^4 + 31.766x^4 - 242.28x^2 + 814.87x + 240.17$	0.998 1	7 329.01
20	$y = -1.0671x^6 + 20.221x^5 - 149.27x^4 + 557.44x^3 - 1196.4x^2 + 1669.4x + 7.272$	0.99 3	7 090.05

件下加工,虽然切削液用量仅为传统润滑方式的 0.007%,但是由于微量润滑时切削液以雾化形式参与润滑,提高了使用效果,因此在节省了切削液用量的同时保证了较好的润滑性能。此外,在 EMQL 条件下,静电的使用进一步提升了微量润滑的雾化液滴附着性能,使得刀-屑界面间润滑层更加稳定地发挥作用,减轻了刀-屑间的摩擦作用,因此材料去除时消耗的能量进一步降低,与传统充分润滑的使用效果进一步拉近。综合来看,采用 EMQL 进行加工相较于一般 MQL,材料去除能量降低了 3.3%;相较于传统充分润滑,材料去除能量相差较小,具有较好的替代性。

3.3 铣削比能

为了综合分析加工过程能耗和加工效率的问题,通过材料去除功率(P_c, W)和材料去除率($v', mm^3/s$)计算铣削比能($E_k, J/mm^3$),铣削比能的计算见式(1) [23-24]—(2) [25]。

$$E_k = \frac{P_c}{v'} \quad (1)$$

$$v' = \frac{1000}{60} \times \frac{v}{\pi d} \times z \times f_z \times a_p \times a_e \quad (2)$$

式中: v 为切削速度, m/min ; d 为铣刀刀刃直径, mm ; z 为铣刀的刃数; f_z 为每齿进给量, mm ; a_p 为铣削深度, mm ; a_e 为铣削宽度, mm 。

将 EMQL 条件下的正交实验以及不同润滑条件下的铣削比能进行对比,通过柱状图呈现,如图 11—12 所示。由图 11 可知,在不同的切削速度组中,不同参数实验下的铣削比能随着进给量的增大均有所下降。从整体上看,切削速度的增大使得各组铣削比能稳步下降,在切削速度为 600 m/min 、进给量为 0.08 mm/r 、铣削深度为 0.4 mm 时,铣削比能达到最大值,为 27.44 J/cm^3 ;当切削速度为 1 800 m/min 、进给量为 0.16 mm/r 、铣削深度为 0.4 mm 时,铣削比能达到最小值,为 13.02 J/cm^3 。值得注意的是,正交实验的铣削比能的最大值、最小值均在铣削深度为 0.4 mm 时取得,可见铣削深度对铣削比能的影响相对于切削速度和进给量而言较小。此外,通过观察实验 1—4 及实验 13—16 可发现,不论铣削深度逐渐递增还是逐渐递减,铣削比能均随着进给量的增大而逐渐减小,这进一步证实进给量对铣削比能的影响十分显著,相比之下铣削深度对其影响较小。由图 12 可

知,当切削速度为 2 400 m/min 、进给量为 0.12 mm/r 、铣削深度为 1 mm 时,采用传统充分润滑和 EMQL 方式进行加工时,其铣削比能值相对最低;其次是采用一般 MQL 进行加工;当不采用切削液加工时,铣削比能达到最大值,为 15.78 J/cm^3 。在实验 17—20 的不同润滑条件下加工,此时的铣削参数相同,即材料去除率相同。由此,根据式(1)可知:润滑条件的不同主要影响加工过程中消耗的功率,导致铣削比能发生变化。由前面可知,充分有效的润滑降低了刀-屑间的摩擦作用,减小了材料去除所需的铣削力,使得

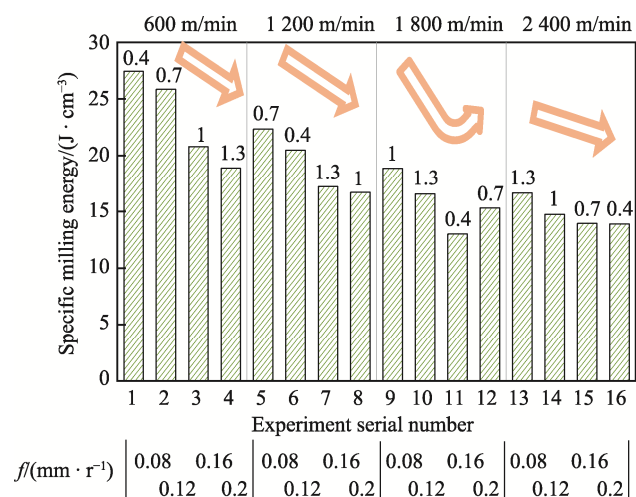


图 11 实验 1—16 加工过程铣削比能

Fig.11 Specific milling energy of experiments 1-16 during processing

Note: The numbers (0.4/0.7/1/1.3) represent milling depth (a_p , mm).

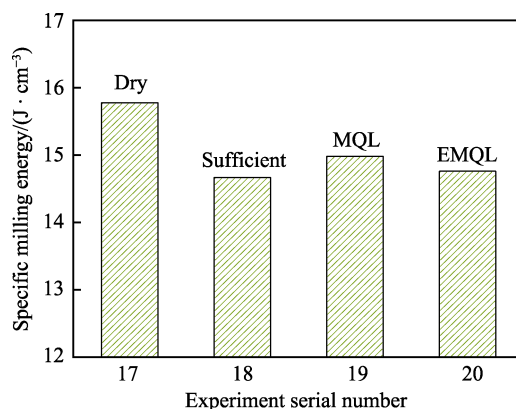


图 12 实验 17—20 不同润滑条件下的铣削比能
Fig.12 Specific milling energy of experiments 17-20 under different lubrication conditions

材料更易被去除, 加工中消耗的功率值更低, 因此在相同材料去除率下铣削比能就更低。

3.4 优化参数的选取和验证

由于文中实验的参数最终将应用于生产线加工, 因此需衡量工件已加工表面的质量情况。故测量了实验 1—16 中工件的已加工表面平均粗糙度, 得到的平均粗糙度结果见图 13。文中主要根据实验 1—16 中的功率、材料去除能量、单位深度材料去除能量、铣削比能和表面平均粗糙度等数据选取优化参数, 具体步骤: 将 16 个实验的 5 种结果分别进行优劣排序, 记录每种结果较优的前 8 个实验, 选择 5 种结果均排列前 8 的实验, 以保证实验结果整体较优; 随后确定材料去除率较大的实验, 选取该实验的参数作为优化的铣削参数。根据实验结果发现只有实验 11 符合要求, 因此在 EMQL 正交实验条件下优化的铣削参数为: 切削速度 1 800 m/min, 进给量 0.16 mm/r, 铣削深度 0.4 mm。将优化的参数应用到生产线缸盖铣削加工中, 并对加工过程的功率进行记录。生产线上铝合金缸盖零件进行面铣削的区域如图 14 所示。由于实际的缸盖表面与实验的铝合金板材形状不同, 铣削路径也不同, 功率和材料去除能量的数据不能与实验 11 直接进行对比。不过在缸盖铣削过程中部分位置的铣削宽度可以达到铣刀直径 80 mm, 此时的铣削参数与实验 11 相同, 且此铣削宽度下功率基本上处于该铣削过程的最高水平。通过功率的最大水平求解出的铣削比能与实验 11 的铣削比能存在可比性。与前面铣削比能的计算方法和过程相同, 缸盖铣削过程得到的铣削比能为 13.67 J/cm^3 , 与实验 11 的铣削比能结果 (13.02 J/cm^3) 较为接近, 前者仅比后者大 5% 左右。此外, 经过对已加工表面进行测量, 可知缸盖优化实验的工件表面平均粗糙度为 $0.117 \mu\text{m}$, 而实验

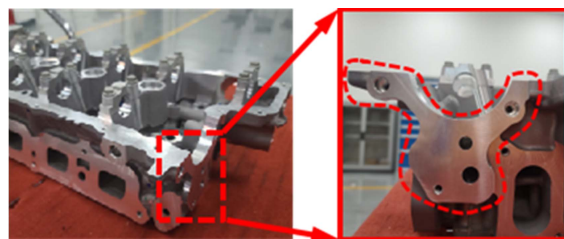


图 14 验证实验中缸盖面铣削区域
Fig.14 Milling area of the cylinder head face in the validation experiment

11 的工件表面平均粗糙度为 $0.110 \mu\text{m}$, 前者仅比后者增大约 6.4%。由此可见, 文中的优化铣削参数在铝合金缸盖的加工应用上有效。

4 结论

通过开展 EMQL 条件下的铝合金高速铣削正交实验和不同润滑条件下的对比实验, 探究不同铣削参数及润滑条件下的能量消耗情况, 主要得出以下结论。

1) 在正交实验的不同切削速度数据组中, 铣削深度对功率水平的影响显著。在不同润滑方式下铣削过程的功率曲线水平较为接近。

2) 在不同的切削速度和进给量下, 铣削深度对材料去除能量极值的影响显著, 为了获得较小的材料去除能量 E 值, 加工中可采用较小的铣削深度; 为了降低加工过程中单位深度材料去除能量 E' , 可适当采用较大的进给量和铣削深度。

3) 在正交实验中, 铣削比能整体上随着切削速度和进给量的增大而出现明显下降的趋势, 而铣削深度对铣削比能的影响较小。根据不同润滑方式对比实验结果发现, EMQL 和传统润滑方式下的铣削比能较优, 且二者数值较为接近。

4) 根据 P 、 E 、 E' 、 E_k 和 Ra 的结果选出了优化铣削参数: 切削速度 1 800 m/min, 进给量 0.16 mm/r, 铣削深度 0.4 mm。将该优化参数应用于生产线的缸盖加工中, 发现铣削比能结果仅比实验 11 大 5% 左右, 说明该优化参数应用于生产线铣削加工中有效。

参考文献:

- [1] 郝福安, 张红, 王耀辉. 清洁生产与机械工业可持续发展[J]. 中国机械工程, 2002, 13(19): 1621-1624.
HAO Fu-an, ZHANG Hong, WANG Yao-hui. Clean Production & Sustainable Development of Machinery Industry[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(19): 1621-1624.
- [2] 魏立安. 表面涂装工程清洁生产技术[J]. 表面技术, 1997, 26(6): 31-32.
WEI Li-an. Cleaner Production Technology in Surface Coating Engineering[J]. Surface Technology, 1997, 26(6): 31-32.
- [3] 李军. 绿色电镀与清洁生产[J]. 表面技术, 2003, 32(6):

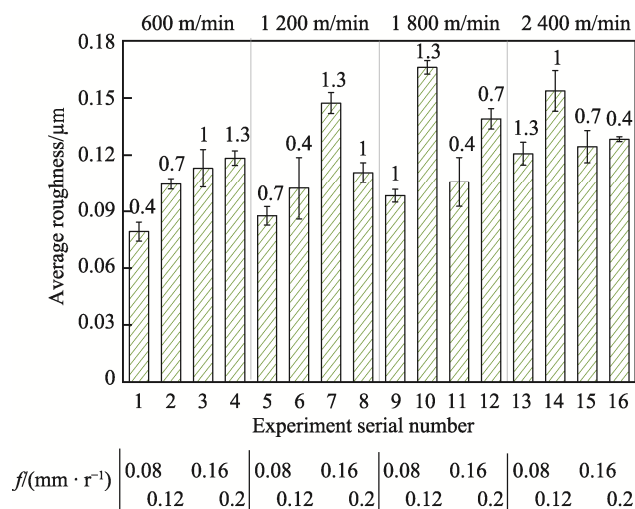


图 13 实验 1—16 中工件已加工表面平均粗糙度

Fig.13 Average roughness Ra of the machined surfaces in experiments 1-16

Note: The numbers (0.4/0.7/1/1.3) represent milling depth (a_p , mm).

- 11-13.
LI Jun. Green Electroplating and Clean Production[J]. Surface Technology, 2003, 32(6): 11-13.
- [4] 胡世军, 杨奎, 王园. 切削液在清洁生产中的主要作用及选择[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2007(8): 94-96.
HU Shi-jun, YANG Kui, WANG Yuan. The Main Function of Cutting Compound in Clean Production and Its Selection[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2007(8): 94-96.
- [5] GAJRANI K K. Assessment of Cryo-MQL Environment for Machining of Ti-6Al-4V[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 60: 494-502.
- [6] VENUGOPAL K A, PAUL S, CHATTOPADHYAY A B. Tool Wear in Cryogenic Turning of Ti-6Al-4V Alloy[J]. Cryogenics, 2007, 47(1): 12-18.
- [7] CHIFFRE L, ANDREASEN J L, LAGERBERG S, et al. Performance Testing of Cryogenic CO₂ as Cutting Fluid in Parting/Grooving and Threading Austenitic Stainless Steel[J]. CIRP Annals, 2007, 56(1): 101-104.
- [8] XU Xue-feng, HUANG Shui-quan, WANG Ming-huan, et al. A Study on Process Parameters in End Milling of AISI-304 Stainless Steel under Electrostatic Minimum Quantity Lubrication Conditions[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(1): 979-989.
- [9] LEEUWENBURGH S, WOLKE J, SCHOONMAN J, et al. Electrostatic Spray Deposition (ESD) of Calcium Phosphate Coatings[J]. Journal of Biomedical Materials Research, 2003, 66A(2): 330-334.
- [10] 闻建龙, 王军锋, 张军, 等. 柴油高压静电雾化燃烧的研究[J]. 内燃机学报, 2003, 21(1): 31-34.
WEN Jian-long, WANG Jun-feng, ZHANG Jun, et al. Research on High Voltage Electrostatic Spraying Combustion of Diesel Oil[J]. Transactions of CSICE, 2003, 21(1): 31-34.
- [11] 高全杰, 王家青. 梁板电极电场中油液荷电雾化理论分析[J]. 钢铁研究, 2002, 30(5): 25-27.
GAO Quan-jie, WANG Jia-qing. Theoretical Analysis of Oil Charged Atomization in Beam-Plate Electrode Field [J]. Research on Iron and Steel, 2002, 30(5): 25-27.
- [12] 汪朝晖, 廖振方, 高全杰, 等. 静电喷涂中油液的电晕荷电及雾化试验研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 636-640.
WANG Zhao-hui, LIAO Zhen-fang, GAO Quan-jie, et al. Study on Oil Corona Discharge and Atomization Experiment with Electrostatic Spray[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 636-640.
- [13] 罗惕乾, 王泽, 杨诗通, 等. 静电喷雾植保机具环状电极充电电场的模型与计算[J]. 农业工程学报, 1994, 10(4): 91-95.
LUO Ti-qian, WANG Ze, YANG Shi-tong, et al. Model and Calculation of the Charging Electric Field of the Annular Electrode for Electrostatic Spraying Plant Protection Equipment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1994, 10(4): 91-95.
- [14] SHAH P, GADKARI A, SHARMA A, et al. Comparison of Machining Performance under MQL and Ultra-High Voltage EMQL Conditions Based on Tribological Properties [J]. Tribology International, 2021(153), 106595.
- [15] 黄水泉. 静电微量润滑的润滑冷却机理及其切削加工特性研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2018: 10-12, 41-44.
HUANG Shui-quan. A Study on Lubrication-Cooling Mechanisms and Machining Characteristics of Electrostatic Minimum Quantity Lubrication (EMQL)[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2018: 10-12, 41-44.
- [16] 高翔. 基于静电微量润滑的绿色切削液配方及加工性能研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017: 8-9.
GAO Xiang. Study on Formulation and Processability of Green Water Based Cutting Fluid Based on Electrostatic Micro-Lubrication[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017: 8-9.
- [17] 吕涛, 黄水泉, 胡晓冬, 等. 静电微量润滑气雾特性及其切削加工性能研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(1): 129-138.
LYU Tao, HUANG Shui-quan, HU Xiao-dong, et al. Study on Aerosol Characteristics of Electrostatic Minimum Quantity Lubrication and Its Turning Performance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(1): 129-138.
- [18] 张伯霖, 杨庆东, 陈长年. 高速切削技术及应用[J]. 机电工程技术, 2003, 32(4): 85-86.
ZHANG Bo-lin, YANG Qing-dong, CHEN Chang-nian. High Speed Cutting Technology and Its Application[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2003, 32(4): 85-86.
- [19] WANG Bing, LIU Zhan-qiang, SONG Qing-hua, et al. Proper Selection of Cutting Parameters and Cutting Tool Angle to Lower the Specific Cutting Energy during High Speed Machining of 7050-T7451 Aluminum Alloy[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 129: 292-304.
- [20] 张庆阳. 6061 铝合金高速铣削过程温度场及残余应力场研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014: 3-7.
ZHANG Qing-yang. Study on Temperature Field and Residual Stress Distribution for 6061 Aluminium Alloy during High-Speed Milling Process[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014: 3-7.
- [21] 武永甫. 航空铝合金高速铣削表面残余应力预测与实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013: 2-11.
WU Yong-fu. Surface Residual Stress Prediction and Experimental Research for High-Speed Milling of Aerospace Aluminum Alloy[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013: 2-11.
- [22] 殷继花, 林有希, 孟鑫鑫, 等. 航空铝合金 7075-T651 高速铣削锯齿形切屑的形成机理研究[J]. 表面技术, 2019, 48(5): 275-285.
YIN Ji-hua, LIN You-xi, MENG Xin-xin, et al. Formation Mechanism of Sawtooth Chip in High Speed Milling of Aeronautical Aluminum Alloy 7075-T651[J]. Surface Technology, 2019, 48(5): 275-285.
- [23] JIA Shun, TANG Ren-zhong, LYU Jing-xiang. Therblig-Based Energy Demand Modeling Methodology of Machining Process to Support Intelligent Manufacturing[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2014, 25(5): 913-931.
- [24] BALOGUN V A, MATIVENGA P T. Modelling of Direct Energy Requirements in Mechanical Machining Processes [J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 41: 179-186.
- [25] 吕景祥. 面向低碳制造的数控机床能量供给建模研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 11-12.
LYU Jing-xiang. Research on Energy Supply Modeling of CNC Machine Tools for Low-Carbon Manufacturing[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014: 11-12.