

引文格式:董志刚,程吉瑞,高尚,等.潮湿颗粒电解质电化学机械抛光铜工件的接触特性研究[J].航空制造技术,2023,66(13):38-45,72.
DONG Zhigang, CHENG Jirui, GAO Shang, et al. Study on contact characteristics of moist particle electrolyte electrochemical mechanical polishing of copper workpiece[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(13): 38-45, 72.

潮湿颗粒电解质电化学机械抛光铜工件的接触特性研究*

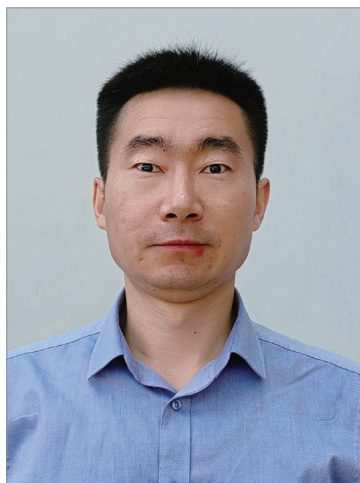
董志刚,程吉瑞,高尚,康仁科

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室,大连 116024)

[摘要] 潮湿颗粒电解质电化学机械抛光(Moist particle electrolyte electrochemical mechanical polishing, MPE-ECMP)作为新兴技术,仍存在难以获得高表面质量的问题。为解决该问题,深入研究电解质颗粒与工件的接触特性,采用离散元仿真软件 Altair EDEM 探究了工件倾斜角、转速对接触数量、接触力的影响规律,并进行 MPE-ECMP 工艺试验。研究表明,倾斜角为 30° 时,单位时间内电解质颗粒与工件的接触数量最多,且切向力最大,为 3.38 mN;在 90° 时,切向力最小,为 1.21 mN。随着工件转速增大,单位时间内电解质颗粒与工件的接触数量变少,电解质颗粒与工件接触的法向力、切向力呈增大趋势。当抛光电位(vs. Hg/Hg₂SO₄)为 0.8 V,工件倾斜角为 30°,抛光 1 h,表面粗糙度从 S_a433.51 nm 降低到 S_a22.43 nm,降低了 94.8%。结果证明了工件倾斜角、转速的调整可有效提高 MPE-ECMP 的抛光精度,表面粗糙度的降低是由接触数量及接触力共同决定的,EDEM 可有效模拟电解质颗粒运动的流态特性,为 MPE-ECMP 的进一步研究奠定了基础。

关键词: 潮湿颗粒电解质电化学机械抛光(MPE-ECMP);离散元法;流场轨迹;接触特性;表面质量

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.13.038



董志刚

教授,主要从事航空难加工材料高效加工技术、精密超精密加工技术研究工作。

铜及铜合金因具备高热导率、高延展性、高电导率等优异特性^[1-4],被广泛应用于航空航天精密零件^[5-8]、表面技术^[9]、集成电路^[10-13]等领域。为了满足服役性能,对纯铜的表面质量提出了更高的要求。

为了使纯铜达到超精密表面,常需对其进行抛光加工。传统的抛光方法有机械抛光、化学抛光及电化学抛光。机械抛光是采用高速旋转的抛光轮黏附抛光膏消除工件表面粗糙峰而达到表面光洁的抛光方法。该方法通常采用大型设备或者人工抛光,加工费用昂贵,易对工件

表面形成机械划擦,产生应力变形的现象^[14]。化学抛光使用具有腐蚀性的抛光液对工件表面的粗糙峰腐蚀溶解,该方法抛光液配比复杂,工件表面易形成过腐蚀^[15]。电化学抛光是通过施加极化电位使阳极工件表面粗糙峰溶解的光整加工方法,电化学抛光具有抛光效率高、设备简单等优点。如 Huang 等^[16]研究了电化学抛光中不同电解液配比对纯铜表面质量的影响,试验表明,纯磷酸电解抛光 50 s 后,铜表面粗糙度由 R_a6.92 nm 明显降低到 R_a0.82 nm。但电化学抛光使用的电解液多数使用有害

* 基金项目:国家自然科学基金面上项目(51975095);大连市高层次人才创新支持计划(2020RD02);辽宁省“兴辽英才计划”杰出人才项目(XLYC2001004)。

成分制备,会对环境造成一定的破坏^[17]。基于上述现状,潮湿颗粒电解质电化学机械抛光(Moist particle electrolyte electrochemical mechanical polishing, MPE-ECMP)作为一种新型环保的表面抛光技术逐渐被研究。MPE-ECMP加工原理如图1所示(其中 $w_1\sim w_5$ 为角速度; $v_1\sim v_5$ 为线速度)。该技术通过采用潮湿电解质颗粒代替传统的液体电解质,结合机械旋转控制游离的电解质颗粒与工件进行随机接触。在外加电场的作用下,固体电解质导通阳极工件与阴极,并对阳极工件的粗糙峰进行选择性地去除。

MPE-ECMP技术是一项新型抛光方法,且MPE-ECMP是耦合电化作用与机械作用的抛光方法,期望被用于航空航天领域的涡轮叶片、薄壁板筋等结构的表面光整工艺。目前,研究学者对MPE-ECMP的研究进展主要集中在电化作用的电解质配置及电压参数选择等方面。如Bai等^[18]研究了MPE-ECMP抛光电压、抛光时间对316L不锈钢的表面粗糙度的影响规律,探究使用质量分数1%硫酸的树脂作为电解质,将316L不锈钢表面粗糙度从 R_a12100 nm降低到 R_a800 nm。Cheng等^[19]将硫酸-甲醇-氟化铵电解液加入树脂作为电解质,利用MPE-ECMP抛光了钛合金Ti-6Al-4V,探究抛光电压、时间对钛合金表面形貌及电化性能的影响,抛光1 h表面粗糙度由 S_a316 nm降低到 S_a198 nm。Min等^[20]通过向树脂颗粒中添加体积分

数40%磷酸电解液的方式,研究了MPE-ECMP对H65黄铜的表面质量的改善情况,结果表明,在抛光电压1.5 V时,随着抛光时间的延长,表面粗糙度由 S_a764 nm降低到 S_a218 nm;在抛光电压2.0 V时,表面粗糙度由 S_a764 nm降低到 S_a252 nm。但是对于机械旋转过程中电解质与工件的接触特性,研究相对较少,且主要定性表征电解质颗粒的机械作用。如Bai等^[18]的研究表明,电解质颗粒在MPE-ECMP抛光过程中,会去除工件表面形成的氧化膜,使工件露出新的表面,其抛光机理是原始表面生成氧化膜被去除的过程。

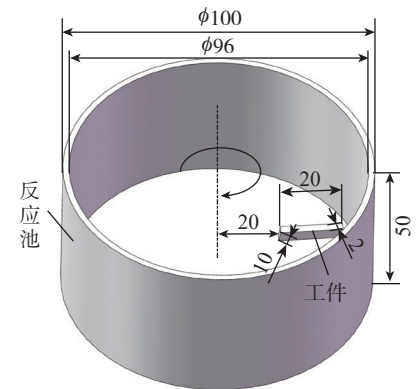
MPE-ECMP的电解质颗粒与工件的接触特性主要影响因素为接触数量^[21]及接触力^[22]。这两个因素与工件表面质量息息相关。接触数量增多提高了工件表面氧化膜被去除的部位数量,工件新表面露出面积增加,提高了工件的表面质量。接触力影响着电解质对纯铜接触时的接触状态,法向力及切向力的分布关系着表面氧化膜的去除方式。然而,在试验过程中,电解质颗粒与工件之间的接触数量每时每刻都在变化,想要测量记录十分困难。同时,由于电解质颗粒的尺寸限制,测量电解质颗粒与工件之间的接触力同样也是一件困难的事情。因此,本文采用EDEM仿真软件进行离散元法仿真,实现了对工件与电解质颗粒接触数量的监测及电解质颗粒流场轨迹和速度的分析。探究了不同工件倾斜角、工件

转速对接触数量、接触力的影响规律,并结合MPE-ECMP试验,探究了接触数量及接触力对表面粗糙度的影响规律,最终获得了较高的表面质量,为MPE-ECMP的高质量表面加工提供了应用指导。

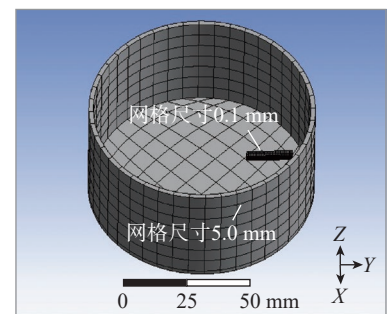
1 试验及方法

1.1 仿真模型设计

试验装置采用直立斜叶浆式搅拌机,筒体直径为100 mm,工件采用纯铜片,尺寸为10 mm×20 mm×1 mm,纯铜片安装在夹具上。为了减少仿真时计算机的计算量,对搅拌器的电机、筒体的底座及工件的夹具等不会对试验结果产生影响的结构采取了省略设计且采用单个纯铜叶片搅拌模型。使用Solidworks三维建模软件对试验设备建模,并通过Ansys Workbench仿真软件细化了网格的划分,如图2所示。



(a) Solidworks建模及尺寸(mm)



(b) Ansys Workbench网格划分

图2 MPE-ECMP试验装置三维建模及网格划分

Fig.2 3D modeling and meshing of MPE-ECMP experimental device

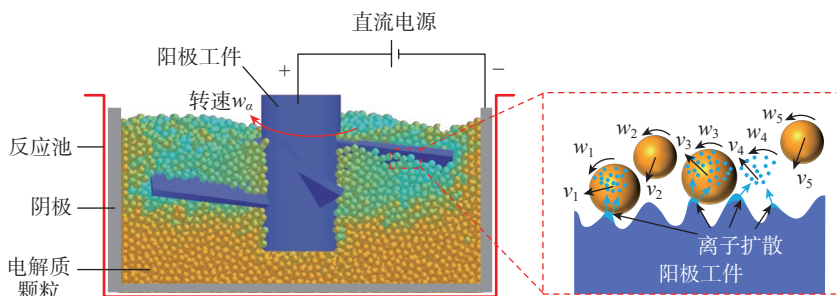


图1 MPE-ECMP加工原理

Fig.1 Principle of MPE-ECMP

1.2 仿真参数设置

采用离散单元法数值模拟软件 EDEM 对潮湿电解质颗粒及纯铜的参数进行合理的设置。潮湿电解质颗粒与纯铜接触模型采用 Hertz-Mindlin (no slip) 接触模型 (图 3)。其中,法向接触力采用 Hertz 理论模型,切向接触力采用 Mindlin 接触理论模型^[23]。Hertz-Mindlin 接触模型表示了法向力、切向力的作用情况。其中,根据经典的 Hertz 公式计算法向力 F_n^c 为

$$F_n^c = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^* \delta_n^3} \quad (1)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \quad (2)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} + \frac{(1-\nu_j^2)}{E_j} \quad (3)$$

式中, E^* 为等效杨氏模量; R^* 为等效半径; δ_n 为法向重叠量; E_i 和 E_j 、 ν_i 和 ν_j 、 R_i 和 R_j 分别为互相接触的两个颗粒介质的弹性模量、泊松比和半径。切向接触力 F_t^c 由 Mindlin 公式表示为

$$F_t^c = -S_t \delta_t \quad (4)$$

$$S_t = 2G^* \sqrt{R^* \delta_t} \quad (5)$$

$$\frac{1}{G^*} = \frac{(2-\nu_i^2)}{G_i} + \frac{(2-\nu_j^2)}{G_j} \quad (6)$$

式中, S_t 为切向刚度; δ_t 为切向重叠量; G^* 为等效剪切模量。设置颗粒和工件的物性参数^[24],以及颗粒与颗粒、颗粒与工件的接触参数,并考虑颗粒的潮湿特性对参数进行校正,相关参数设置如表 1 和 2 所示^[24]。搅拌筒内部填充大约 30000 个球形聚合物电解质颗粒,颗粒粒径设置为

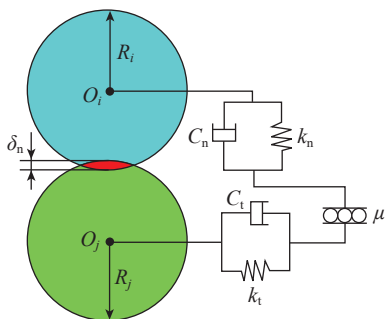


图 3 Hertz-Mindlin 接触模型

Fig.3 Hertz-Mindlin contact model

0.5 mm,与试验颗粒粒径保持一致,采用 EDEM 预设的颗粒工厂生成颗粒。初始阶段颗粒保持静止状态,铜片在 0.01 s 开始以恒定转速绕搅拌筒中心轴旋转。由于电解质颗粒运动具有周期性,每个周期内电解质颗粒运动轨迹基本一致,所以仿真时间设置为 1 s,研究两个旋转周期内电解质颗粒的运动轨迹、运动速度,以及随着工件倾斜角、叶片转速工艺参数的变化,工件与电解质颗粒的接触数量、接触力的变化规律。

1.3 工艺试验及表面形貌观测

仿真结束后,保持工件倾斜角、转速与仿真一致,进行相应的 MPE-ECMP 试验,试验装置如图 4 所示。设计不同的夹具夹持铜片,使铜片保持倾斜角为 0°、30°、60°、90°、120°、150°。电解质颗粒采用离子交换树脂,颗粒平均粒径为 0.5 mm。辰华 CHI660E 电化学工作站提供直流电源,不锈钢作阴极,参比电极为 Hg/Hg₂SO₄,测量 LSV 极化曲线。选取钝化电位为抛光电位,进行 MPE-ECMP 抛光,抛光时间为 1 h,并通过电化学工作站记录抛光电流变化。选取倾斜角为 30° 的工件进行不同转速的 MPE-ECMP 抛光,抛光时间为 1 h。通过扫描电镜 (SU5000,日

表 1 潮湿电解质颗粒和纯铜的物性参数^[24]
Table 1 Physical properties of moist particle electrolytes and pure copper^[24]

项目	泊松比	密度/ (kg · m ⁻³)	剪切模量/ GPa
颗粒	0.35	1200	8.9
铜	0.37	8900	46.8

表 2 潮湿电解质颗粒和纯铜的接触参数^[24]
Table 2 Contact parameters between moist particle electrolytes and pure copper^[24]

项目	恢复系数	静摩擦系数	动摩擦系数
颗粒-颗粒	0.45	0.6	0.05
颗粒-铜	0.45	0.4	0.05

立 HITACHI) 观察工件抛光前后表面形貌,使用 3D 表面光学轮廓仪 (Zygo 9000, ZYGO Corporation) 测量工件表面的 3 点表面粗糙度,采用平均值表示工件表面的整体粗糙度值,采用标准差衡量表面粗糙度的测量误差。

2 结果与讨论

2.1 倾斜角对电解质颗粒运动轨迹与运动速度的影响规律

设置工件转速为 100 r/min。设置工件倾斜角 α 为与工件旋转运动方向分别呈 0°、30°、60°、90°、120°、150°,倾斜角示意图如图 5 所示。观察在不同倾斜角下电解质颗粒的运动轨迹及运动速度。

观察仿真开始 0.05 s、0.50 s、1.00 s 时电解质颗粒运动轨迹及运动速度,从图 6 可以看出,工件在不同的倾斜角下转动时电解质颗粒的运动轨迹基本呈现 U 形分布。在仿真 0.05 s 时,电解质颗粒运动幅度较小,这是因为运动初期工件对电解质颗粒作用时间较短,使得电解质颗粒具有较少的动能。0.50 s 和 1.00 s 电解质

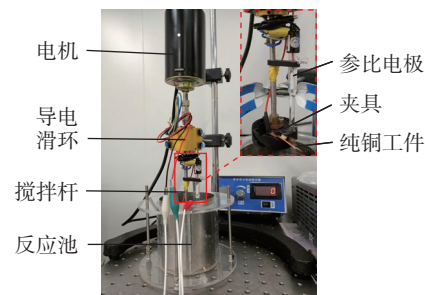


图 4 MPE-ECMP 工艺试验装置

Fig.4 Process test device of MPE-ECMP

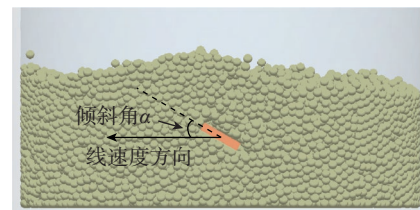


图 5 工件倾斜角示意图

Fig.5 Schematic diagram of workpiece tilt angle

颗粒运动轨迹基本一致,表明电解质颗粒在 0.50 s 后运动轨迹基本趋于稳定。在纯铜的全部上表面/全部前表面有一个上升的运动轨迹;而在后表面电解质颗粒呈现回落到工件表面的运动轨迹。这是因为工件在旋转过程中接触电解质颗粒时,工件对电解质颗粒有一个沿着工件运动速度方向的推力。使得在工件附

近的电解质颗粒内部形成力链。

从图 6 可以看出,与工件表面直接接触的电解质颗粒的运动速度最大,且随着电解质颗粒与工件距离的增大速度逐渐减小。这是由于电解质颗粒的运动遵循牛顿第二定律,当工件给电解质颗粒的作用力大时,电解质颗粒运动的加速度及速度也会相应地变大。随着电解质颗粒与

工件距离逐渐增大,力链逐渐衰减,所以电解质颗粒的速度及加速度也会变小。当电解质颗粒回落时,由于电解质颗粒只受到重力作用及相邻颗粒的压力,所以在距离工件表面越近时,电解质颗粒运动时间越长,速度越大。

图 6 中的 0.05 s 时,不同倾斜角下工件与电解质颗粒的接触状态不

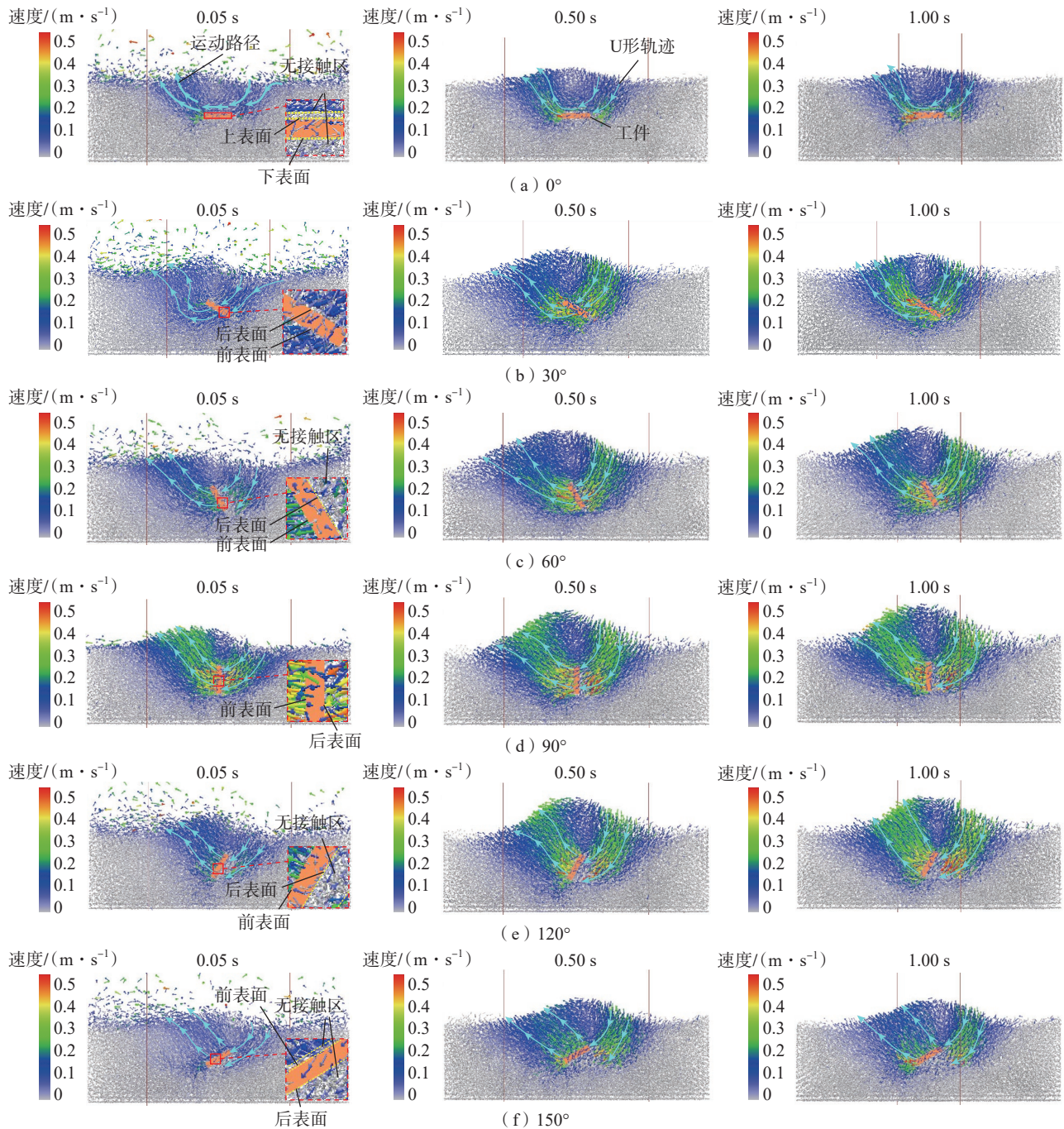


图 6 不同工件倾斜角下电解质颗粒的运动轨迹及运动速度仿真

Fig.6 Simulation of movement track and velocity of electrolyte particles at different workpiece tilt angles

同。可以发现,在工件倾斜角为 0° 时,工件前后表面与电解质颗粒形成了空隙,空隙中工件与电解质颗粒处于随机接触状态,为便于描述,称该区域为“无接触区”;在工件倾斜角为 60° 、 120° 、 150° 时,工件的后表面同样出现了“无接触区”,这与电解质与工件的相对位移轨迹有关。为了进一步解释“无接触区”现象,在仿真开始

前选取 $17\text{ mm} \times 17\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 的长方体范围内电解质颗粒,使工件整体被包围在颗粒内,观察 $0.01\sim 0.07\text{ s}$ 电解质颗粒相对工件表面的位移情况,如图7所示。试验结果表明,在工件倾斜角为 0° 时,电解质颗粒在工件运动时与工件的上表面接触,随着工件的转动,电解质颗粒滚磨工件的上表面,工件下表面与电解质颗粒接触较

少,且出现了“无接触区”;在工件倾斜角为 30° 时,可以看到随着工件的旋转,工件的上下全部表面都与电解质颗粒相接触,且随着工件的旋转,工件表面的电解质颗粒都沿着工件表面切向滑移,工件前后表面均没有形成“无接触区”;在工件倾斜角为 60° 时,随着工件的旋转,工件的前表面与电解质颗粒相接触,工件

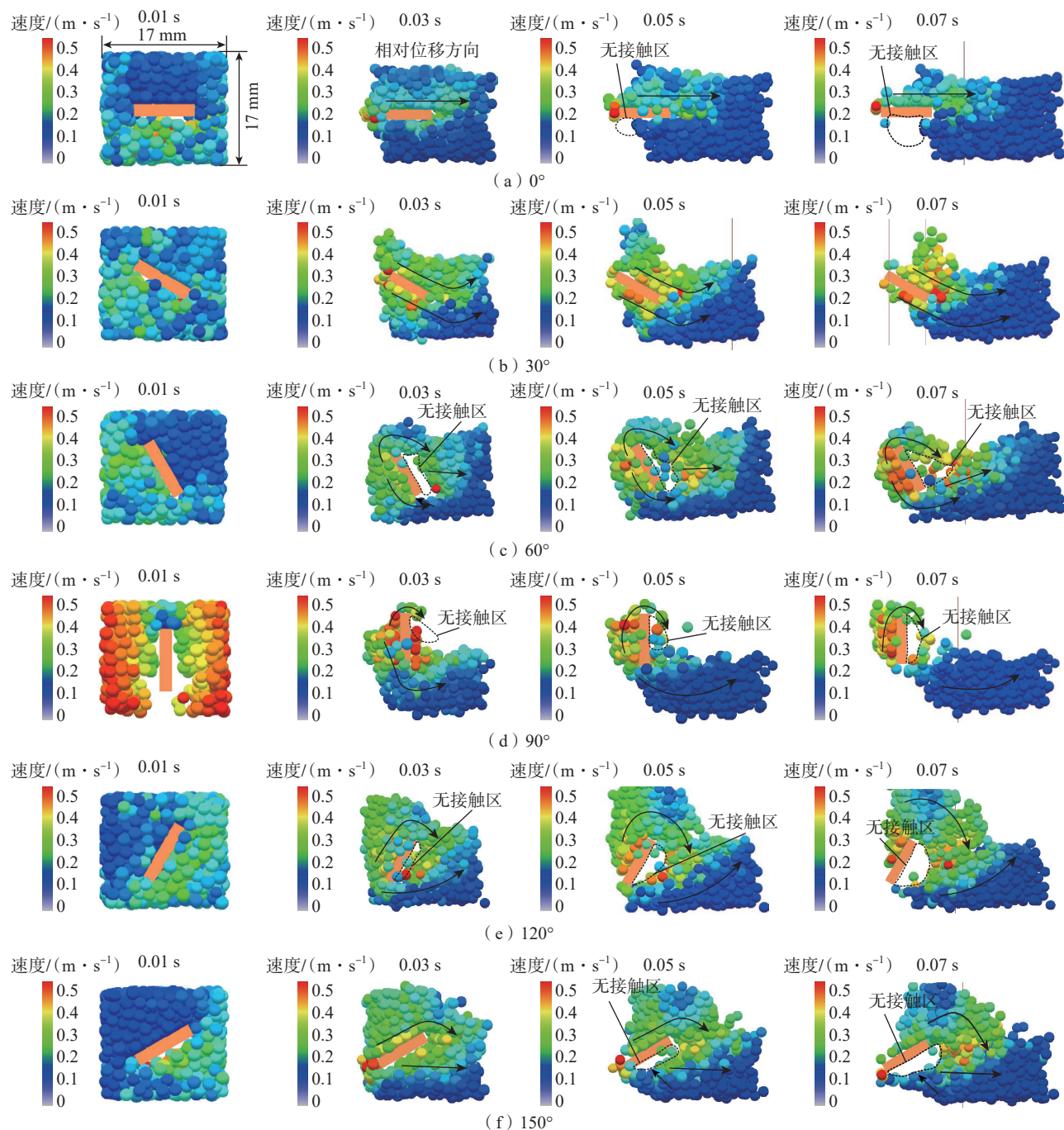


图7 不同工件倾斜角下电解质颗粒与工件相对位移仿真

Fig.7 Simulation of relative displacement between electrolyte particles and workpiece at different workpiece tilt angles

后表面与电解质颗粒之间产生“无接触区”,接触较少;随着工件的旋转,电解质颗粒在工件的表面分上下两部分滑移到工件后方,当工件倾斜角为 90° 时,电解质颗粒与工件接触情况与工件倾斜角为 60° 时基本一致;当工件倾斜角为 120° 和 150° 时,电解质颗粒主要与工件前表面接触,且随着工件的转动,电解质颗粒沿着工件的表面由下而上滑移到工件后方,且在工件的后表面形成了“无接触区”。

2.2 倾斜角对电解质颗粒与工件接触数量及接触力的影响规律

对仿真过程中每 0.01 s 内电解质颗粒与工件全部表面接触数量及接触力进行统计分析,采用平均值来代表接触数量及接触力的值,采用标准差来衡量接触数量及接触力的稳定性,研究工件倾斜角对电解质颗粒与工件全部表面的接触数量及接触力的影响规律,结果如图8所示。从图8(a)可以看到,随着工件的倾斜角的增大,工件与电解质颗粒的接触数量呈非线性的变化趋势。在工件倾斜角为 30° 时,工件与电解质颗粒的接触数量最多,为36颗;在工件倾斜角为 90° 时,电解质颗粒与工件接触数量最少,为27颗。这是因为工件倾斜角为 30° 时,电解质颗粒可以同时接触到工件的上下表面,增加了接触面积;当工件倾斜角为 90° 时,电解质颗粒只能接触到工件的前端面,且在 90° 时,电解质颗粒的运动速度最大,减少了电解质颗粒与工件接触的时间。

图8(b)为在不同工件倾斜角下,电解质颗粒与工件全部表面法向及切向接触力的变化规律曲线。可以看到,电解质颗粒在与工件接触过程中,法向力要大于切向力,在工件倾斜角为 0° 时,法向力与切向力之间的差值最小;在工件倾斜角为 90° 时,法向力与切向力之间的差值最大。在工件倾斜角为 0° 时,法向力

最小,为 4.66 mN ;在工件倾斜角为 $0\sim 90^\circ$ 时,法向力呈增大趋势,在 90° 达到最大值,为 12.69 mN ;在工件倾斜角为 $90^\circ\sim 150^\circ$ 时,法向力呈减小的趋势。在工件倾斜角为 30° 时,工件与电解质颗粒之间的切向力最大,为 3.38 mN ;在工件倾斜角为 90° 时,切向力最小,为 1.21 mN 。

2.3 转速对电解质颗粒与工件接触数量及接触力的影响规律

选取工件倾斜角为 30° ,探究转速对电解质颗粒与工件全部表面接触数量及接触力的影响规律,如图9所示。由图9(a)中可以看到,当工件转速为 80 r/min 时,电解质颗粒与工件之间的接触数量最多,且随着工件转速的增大,电解质颗粒与工件的接触数量变少。这是因为当工件转速增大时,电解质颗粒与工件接触瞬间受到的推力增大,减少了再次与工件接触的频率。此外,电解质颗粒的离心力增加,电解质颗粒会向反应池的内壁运动,脱离旋转中心。如图9

(b)所示,当工件转速为 80 r/min 时,电解质颗粒与工件之间的接触数量最少,且随着工件转速的增加,电解质颗粒与工件的法向接触力以及切向接触力基本呈线性增加,且法向力增加的速率大于切向力增加的速率。随着工件转速增加,法向力和切向力值的标准差数值变大,说明工件与电解质颗粒接触力的稳定性变差,不利于工件表面精密抛光。

2.4 MPE-ECMP 试验验证及表面质量表征

LSV 极化曲线与电流-时间曲线如图10所示。图10(a)显示了电位在 $0\sim 2\text{ V}$ 变化过程中,阳极纯铜的电流变化情况,可以看到,电位在 $0\sim 0.33\text{ V}$ 时电流呈上升趋势,这一过程为铜电极表面发生了溶解;电位在 $0.33\sim 0.8\text{ V}$ 时电流呈下降趋势,且在 0.8 V 达到了极小值,这一过程为工件表面形成了富含 Cu^{2+} 的黏性液膜,增加了工件表面的阻抗,电流值变小;电位在 $0.8\sim 2\text{ V}$ 这一过程中,电流值增

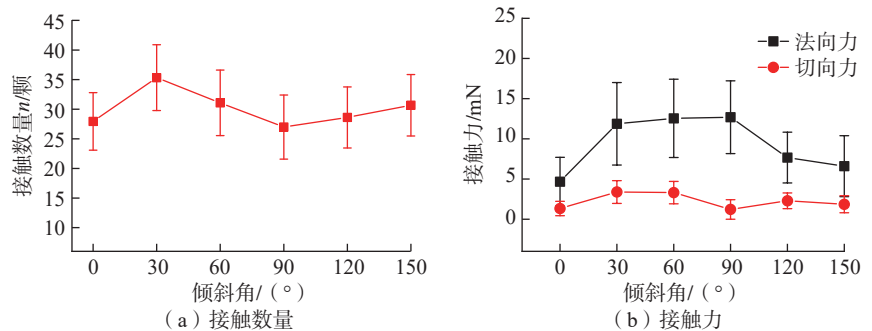


图8 工件倾斜角对电解质颗粒接触数量及接触力的影响规律曲线

Fig.8 Influence curves of the workpiece tilt angle on the contact quantity and contact force of electrolyte particles

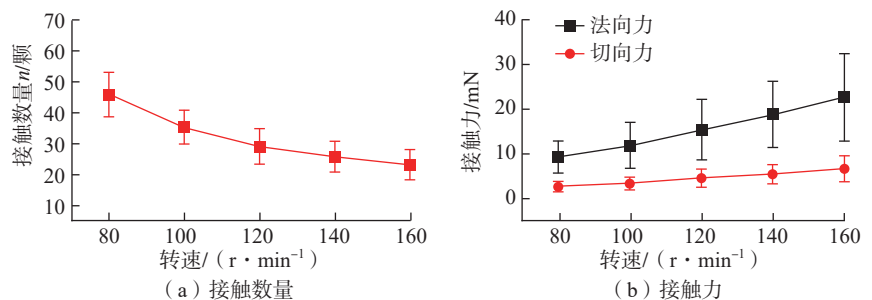


图9 工件转速对电解质颗粒的接触数量及接触力的影响规律曲线

Fig.9 Influence curves of workpiece rotation speed on the contact quantity and contact force of electrolyte particles

大,是因为在这一过程中,电解质颗粒会吸附 Cu^{2+} ,使工件表面 Cu^{2+} 浓度变小。在 0.8 V 时,工件表面 Cu^{2+} 浓度最高,纯铜表面发生钝化,选取 0.8 V 为抛光电压。图 10 (b) 为在倾斜角 30° 、转速 120 r/min 时,工件表面经 0.8 V 抛光电压抛光 1 h 的电流变化曲线。可以看到,在抛光 0~270 s 时,电流呈上升趋势,这是因为工件在抛光过程中,原始表面发生了溶解,表面原始的油脂及氧化物被去除;在 270 s 之后,电流整体呈下降趋势,这是因为电化学抛光过程中发生式 (7) 所示的化学反应。随着电化学反应的进行,潮湿电解质颗粒内部的水分逐渐减少,使得电解质电导率降低,电流逐渐下降。

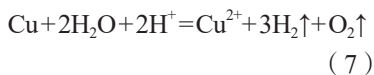


图 11 (a) 为工件在不同倾斜角下 MPE-ECMP 抛光 1 h 后的表面粗糙度变化,可以看到,在倾斜角为 30° 和 90° 时,工件表面平均粗糙度明显小于倾斜角为 0° 、 60° 、 120° 、 150° 的表面粗糙度。倾斜角为 30° 时工件表面平均粗糙度为 $S_a 35.79 \text{ nm}$,而在 90° 时工件表面平均粗糙度为 $S_a 45.65 \text{ nm}$ 。结合图 8 仿真试验数据可以分析得到,在工件倾斜角为 30° 时,电解质颗粒与工件表面接触数量最多,而在 90° 时,电解质颗粒与工件法向接触力最大,由此可以初步验证,离散元仿真模型是准确的,并且发现工件表面平均粗糙度是由电解质颗粒与工件的接触数量以及接触力两个接触参数共同决定的。选取倾斜角为 30° 的工件探究不同转速下 MPE-ECMP 抛光后表面粗糙度的变化情况,如图 11 (b) 所示。可以看到,在倾斜角为 30° 时,工件表面平均粗糙度整体偏低,且随工件转速的增加呈振荡趋势,振荡范围为 $S_a 22.16 \sim 38.98 \text{ nm}$ 。在转速为 120 r/min 时获得最低表面平均粗糙度,为 $S_a 22.16 \text{ nm}$;在转速为 140 r/min 时表面平均粗糙度最

高,为 $S_a 38.98 \text{ nm}$ 。由图 9 仿真试验数据可知,随着工件转速的增大,电解质颗粒与工件接触数量减少,接触力增大,而工件的表面粗糙度由接触数量与接触力共同决定,导致表面粗糙度呈振荡变化。

通过扫描电镜以及 Zygo 9000 观测了抛光前工件的初始表面形貌和

粗糙度,以及在倾斜角 30° 、转速 120 r/min 下抛光后的表面形貌及粗糙度。从图 12 (a) 和 (b) 可以看出,抛光前工件表面存在明显划痕,通过 Zygo 9000 观察到工件原始表面的面粗糙度为 $S_a 433.51 \text{ nm}$ 。经过 1 h 的 MPE-ECMP 抛光后,在图 12 (c) 中可以看到工件表面已无明显划痕,经

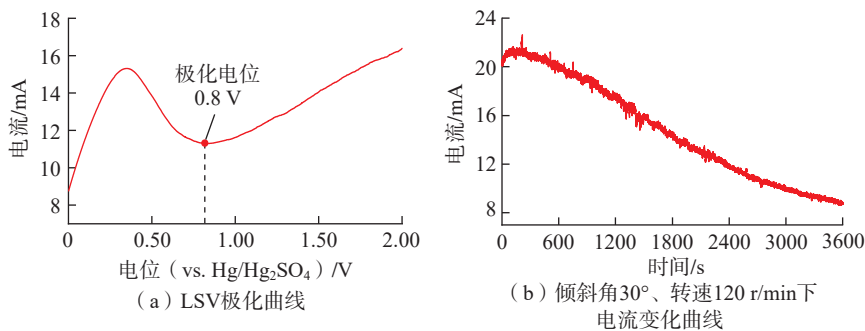


图 10 MPE-ECMP 极化曲线
Fig.10 MPE-ECMP polarization curves

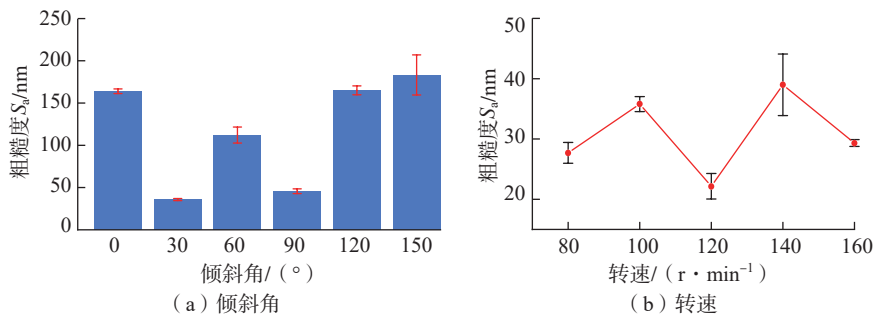


图 11 不同倾斜角及转速下的表面粗糙度
Fig.11 Surface roughness at different tilt angles and speeds

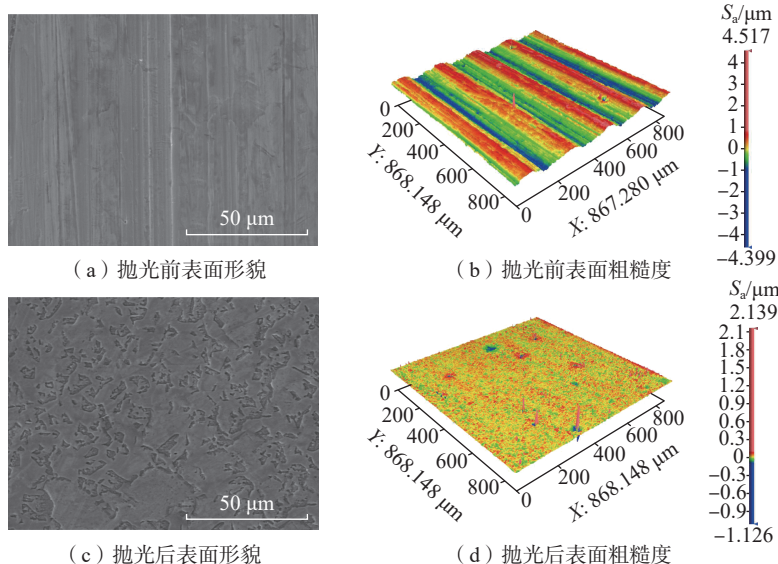


图 12 纯铜工件表面抛光前后的表面形貌和表面粗糙度

Fig.12 Surface morphology and surface roughness of copper surface before and after polishing

过抛光后表面仍残留少量点状坑,整体表面形貌具有明显的改善。Zygo 9000 观测抛光后的工件表面,可以发现粗糙峰被明显去除,表面粗糙度为 $S_a 22.43 \text{ nm}$,如图 12(d)所示,表面粗糙度降低了 94.8%。

3 结论

(1) 工件不同倾斜角下电解质颗粒基本呈 U 形运动轨迹,与工件距离越远的电解质颗粒运动速度越慢。工件倾斜角为 30° 时,电解质颗粒与工件之间的接触数量最多;工件转速为 80 r/min 时,电解质颗粒与工件之间的接触数量最多,接触力最小。

(2) 在工件表面存在“无接触区”,影响工件表面抛光的稳定性。工件倾斜角为 30° 时,可以有效避免“无接触区”的产生。工件转速的增加减少了工件与电解质颗粒的接触数量,增加了法向以及切向接触力。

(3) MPE-ECMP 试验中工件表面粗糙度由接触数量及接触力共同调控,在倾斜角 30° 、转速 120 r/min 下,获得最佳的铜工件的表面粗糙度,表面粗糙度由初始的 $S_a 433.51 \text{ nm}$ 降低到 $S_a 22.43 \text{ nm}$,降低了 94.8%,验证了倾斜角和转速的调控对表面粗糙度具有降低效果。

参考文献

- [1] CHO Y C, LEE S, AJMAL M, et al. Copper better than silver: Electrical resistivity of the grain-free single-crystal copper wire[J]. *Crystal Growth & Design*, 2010, 10(6): 2780–2784.
- [2] PAK V N, GOLOV O V. Formation and electrical conductivity of low-dimensional copper structures in porous glass[J]. *Russian Journal of General Chemistry*, 2015, 85(4): 786–789.
- [3] YAO G C, MEI Q S, LI J Y, et al. Hard copper with good electrical conductivity fabricated by accumulative roll-bonding to ultrahigh strains[J]. *Metals*, 2016, 6(5): 115.
- [4] FATEH A, ALIOFKHAZRAEI M, REZVANIAN A R. Review of corrosive environments for copper and its corrosion inhibitors[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2020, 13(1): 481–544.
- [5] MISRA J P, JAIN N K, JAIN P K. Investigations on precision finishing of helical gears by electrochemical honing process[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2010, 224(12): 1817–1830.
- [6] DATHU K P M Y V, HARIHARAN R. Design of wind turbine blade material for higher efficiency[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 33: 565–569.
- [7] 张海洲,白洁,马瑞,等.激光选区熔化成形技术在航空航天发动机制造领域的研究与应用现状[J]. *推进技术*, 2023, 44(3): 6–21.
- [8] 侯亚娟,毕凯,董礼,等.大推力氢氧发动机铜合金内壁数控加工技术[J]. *工具技术*, 2021, 55(3): 72–75.
- [9] HOU Yajuan, BI Kai, DONG Li, et al. NC machining technology for copper alloy inner wall of high thrust oxy-hydrogen engine[J]. *Tool Engineering*, 2021, 55(3): 72–75.
- [10] KIM S M, HSU A, LEE Y H, et al. The effect of copper pre-cleaning on graphene synthesis[J]. *Nanotechnology*, 2013, 24(36): 365602.
- [11] 王彩玲. 300 mm 硅片化学机械抛光设备及其关键技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [12] WANG Cailing. Research on chemical mechanical polishing equipment and its key technologies for 300 mm silicon wafer[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [13] 李亚强,马晓川,张锦秋,等.芯片制程中金属互连工艺及其相关理论研究进展[J]. *表面技术*, 2021, 50(7): 24–43, 164.
- [14] LI Yaqiang, MA Xiaochuan, ZHANG Jinqiu, et al. Research progress of metal interconnection technology and related theory in chip fabrication[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(7): 24–43, 164.
- [15] CIDECIYAN R D, GUSTLIN M, LI M P, et al. Next generation backplane and copper cable challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 51(12): 130–136.
- [16] OSBORN T, HUNTER LIGHTSEY C, KOHL P A. Low- k compatible all-copper flip-chip connections[J]. *Microelectronic Engineering*, 2009, 86(3): 379–386.
- [17] TURLEY D M, SAMUELS L E. The nature of mechanically polished surfaces of copper[J]. *Metallography*, 1981, 14(4): 275–294.
- [18] 张婕,梁成浩,王鹏,等.铜及其合金的化学抛光工艺研究[J]. *表面技术*, 2006, 35(6): 43–45.
- [19] ZHANG Jie, LIANG Chenghao, WANG Peng, et al. Research on chemical polishing of copper and its alloy[J]. *Surface Technology*, 2006, 35(6): 43–45.
- [20] HUANG J C, WENG Y J, WENG Y C, et al. Effects of electrolyte formulas on electrochemical polish planarization of pure copper[J]. *Key Engineering Materials*, 2010, 447–448: 159–163.
- [21] KOROLYOV A, BUBULIS A, VĚŽYS J, et al. Electrolytic plasma polishing of NiTi alloy[J]. *Mathematical Models in Engineering*, 2021, 7(4): 70–80.
- [22] BAI Y C, ZHAO C L, YANG J, et al. Dry mechanical-electrochemical polishing of selective laser melted 316L stainless steel[J]. *Materials & Design*, 2020, 193: 108840.
- [23] CHENG Y H, WANG L S, YU S W, et al. Studies on the electro-mechanical polishing effects of titanium alloy with ion-exchange resin solid particles[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 854: 157269.
- [24] MIN R, WANG L S, CHENG Y H, et al. Dry electrochemical polishing of copper alloy in a medium containing ionexchange resin[J]. *RSC Advances*, 2021, 11(57): 35898–35909.
- [25] 张勇强,汪久根,洪玉芳.磨粒磨损的模型化分析[J]. *润滑与密封*, 2017, 42(11): 13–18, 63.
- [26] ZHANG Yongqiang, WANG Jiugen, HONG Yufang. Modeling analysis of abrasive wear[J]. *Lubrication Engineering*, 2017, 42(11): 13–18, 63.
- [27] 王娜,杨胜强,曹波,等.主轴式滚磨光整加工接触力修正系数研究[J]. *机械设计与制造*, 2020(4): 131–136.
- [28] WANG Na, YANG Shengqiang, CAO Bo, et al. Research on contact force correction coefficient of spindle rolling finishing[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2020(4): 131–136.
- [29] CLEARY P W, SINNOTT M D. Assessing mixing characteristics of particle-mixing and granulation devices[J]. *Particology*, 2008, 6(6): 419–444.
- [30] 宣颖.粉体机械搅拌过程数值模拟及搅拌特性研究[D].常州:常州大学,2021.
- [31] XUAN Ying. Numerical simulation of powder mechanical stirring process and research on stirring characteristics[D]. Changzhou: Changzhou University, 2021.

通讯作者: 康仁科,教授,主要从事精密和超精密加工技术、半导体制造工艺与装备、特种和复合加工技术及数字化制造装备等研究工作。

(下转第 72 页)

Review on Weld Formation and Defect Control of Energy Field Assisted Laser Welding

CAI Chuang, CHEN Zilin, LI Zhenxin, YU Jie

(Key Laboratory of Advanced Technologies of Materials, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

[ABSTRACT] The laser welding is a high-efficiency joining technique with high energy density, narrow heat affected zone and small workpiece deformation. However, problems still exist in laser welding, such as high cooling speed, cracks, pores, etc. Spatters and pores were effectively inhibited by adding suitable gas or using oscillating laser. The joint defect was reduced and the welding process stability was effectively improved by using arc assisted laser welding. Laser welding assisted by ultrasonic, magnetic and electric fields can improve joint performance by refining grain, reducing element segregation and crack sensitivity. The review on laser welding was summarized from three perspectives, namely process optimization, auxiliary heat source and auxiliary energy field. Finally, problems existing in the research of energy field assisted laser welding were analyzed and its development prospect was forecasted.

Keywords: Laser welding (LW); Energy field assistance; Weld formation; Defect control; Problems and prospects

(责编 阳光)

(上接第 45 页)

Study on Contact Characteristics of Moist Particle Electrolyte Electrochemical Mechanical Polishing of Copper Workpiece

DONG Zhigang, CHENG Jirui, GAO Shang, KANG Renke

(Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

[ABSTRACT] Moist particle electrolyte electrochemical mechanical polishing (MPE-ECMP) is an emerging technology that has difficulties in obtaining high-surface quality workpieces. In order to solve this problem, the contact characteristics of the workpiece and electrolyte particles were investigated, and the discrete element simulation software Altair EDEM was used to explore the influence of workpiece inclination angle and speed on the number of contacts and contact force. The results show that when the inclination angle is 30° , the contact number between electrolyte particles and the workpiece per unit time is the largest, and the tangential force is the largest, which is 3.38 mN. The tangential force is the smallest at 90° , 1.21 mN. As the rotational speed of the workpiece increases, the number of electrolyte particles in contact with the workpiece per unit of time becomes less, and the normal and tangential forces of electrolyte particles in contact with the workpiece tend to increase. When the polishing potential (vs. $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{SO}_4$) is 0.8 V and the workpiece is tilted at 30° for 1 h, the surface roughness is reduced from $S_a 433.51$ nm to $S_a 22.43$ nm, and the surface roughness is reduced by 94.8%. The results demonstrate that the adjustment of workpiece tilt angle and rotational speed can effectively improve the polishing accuracy of MPE-ECMP, the reduction of surface roughness is jointly determined by the number of contacts and contact force, and EDEM can effectively simulate the flow characteristics of electrolyte particle motion, which lays the foundation for further research of MPE-ECMP.

Keywords: Moist particle electrolyte electrochemical mechanical polishing (MPE-ECMP); Discrete element method; Flow field trajectory; Contact characteristics; Surface quality

(责编 阳光)