

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20211206001

基于离散单元法 (DEM) 研究镀桶截面形状对机械镀过程物料运动的影响^{*}

郝朝阳 王胜民 赵晓军 高 凯

(昆明理工大学材料科学与工程学院 昆明 650093)

摘要: 镀桶的截面形状对机械镀过程的影响受限于机械镀设备等原因, 相关研究较少。为研究不同截面形状的镀桶对机械镀过程中桶内物料运动规律的影响, 采用离散元模拟软件 EDEM 建立不同形状 (四边形、六边形、八边形、圆形) 下镀桶内物料的运动模型, 并从碰撞区域、碰撞频率、碰撞接触力和碰撞能量四个方面对桶内物料间的碰撞情况进行研究。结果表明: 镀桶的截面形状对机械镀过程中桶内物料的碰撞和运动规律产生很大影响, 在相同模拟条件下, 八边形镀桶内物料运动的惰性区域最小; 通过对不同形状镀桶内物料间碰撞频率、碰撞接触力和碰撞能量的对比分析, 八边形镀桶中的物料运动规律最有利于机械镀工艺过程中镀层的形成和增厚, 八边形为最优镀桶截面形状。另外, 通过计算机数值模拟的方法探讨镀桶截面形状对机械镀过程中物料运动规律的影响规律, 为机械镀设备发展和工艺优化提供理论依据。

关键词: 机械镀; 离散单元法; 镀桶形状; 碰撞; 波动性

中图分类号: TG174

Influence of Section Shape of Plating Barrel on the Movement of Materials in Mechanical Plating Process Based on DEM

HAO Chaoyang WANG Shengmin ZHAO Xiaojun GAO Kai

(Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The influence of the cross-sectional shape of the plating barrel on the mechanical plating process is limited by mechanical plating equipment and other reasons, and there are few related studies. In order to study the influence of plating barrels with different cross-sectional shapes on the motion law of materials in the barrel during the mechanical plating process, the discrete element simulation software EDEM is used to establish the materials in the plating barrels under different shapes (quadrilateral, hexagonal, octagonal, and circular). The collision between the materials in the barrel is studied from the four aspects of the collision area, the collision frequency, the collision contact force and the collision energy. The results show that the cross-sectional shape of the plating barrel has a great influence on the collision and motion of the material in the barrel during the mechanical plating process. Under the same simulation conditions, the inert area of the material movement in the octagonal plating barrel is the smallest. Comparative analysis of the collision frequency, collision contact force and collision energy between materials in the plating barrel, the motion law of the material in the octagonal coating barrel is most conducive to the shape and thickness of the coating during the mechanical plating process, and the octagon is the best plating barrel section shape. In addition, the influence of the section shape of the plating barrel on the movement of the material in the process of mechanical plating is discussed through the method of computer numerical simulation, which provides a theoretical basis for the development of mechanical plating equipment and process optimization.

Keywords: mechanical plating; discrete element simulation; barrel shape; collision; volatility

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (52161013)。

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (52161013).

20211206 收到初稿, 20220118 收到修改稿

0 前言

机械镀是使金属微粉经过物理、化学吸附和沉积作用,在机械碰撞力作用下形成镀层并致密化的一种表面处理工艺^[1-3]。目前典型的机械镀锌的工艺流程是:试样前处理(高温脱脂、酸洗除锈)→调整镀液环境→建立基层→镀层增厚(循环加入活化剂沉积剂和锌粉)→水抛光→出料→干燥^[4-7]。相比于传统的热浸镀和电镀等工艺,机械镀工艺过程中不会发生高温冶金反应和电化学效应,所得镀层具有厚度易控制、无氢脆、成本低等优点^[8-13],并且施镀过程所产生的镀液经过简单处理后即可循环利用,实现零排放^[14-15]。日本学者研究了以钢球为冲击介质,在干式环境下,强载荷反复冲击过程中介质的运动轨迹,但未见相关技术成果的应用。本文所研究的机械镀工艺,采用玻璃基介质进行冲击(包括正碰和摩擦),使吸附在基体表面的金属颗粒发生形变或致密化,属于小载荷连续冲击,镀桶内的固体介质主要存在有三种:冲击介质(玻璃珠)、金属粉末和基体。冲击介质、基体和金属粉末的运动决定了冲击介质之间、冲击介质和基体之间以及冲击介质和桶壁之间的碰撞强度和频率。由于金属颗粒比冲击介质粒径小太多,所以在进行力学分析时可以忽略金属粉末颗粒对碰撞接触特性的影响^[16]。

离散单元法(DEM, Discrete element method)用于模拟碰撞、分离等介质之间的非连续现象^[17],从宏观角度分析机械镀工艺过程中物料之间的运动规律。例如, KHASENOVA等^[18]通过离散元方法研究机械镀过程冲击介质与基体之间的碰撞及物料运动,得出镀层表面粗糙度与球体粒径之间的关系规律。另外,王胜民^[19]也研究机械镀锌镀桶中物料的运动形式,发现泻落式运动最有利于机械镀锌过程中镀锌层的形成与增厚;宋丹等^[20]研究机械镀锌过程中锌粉的受力及运动,发现锌粉的紧实变形和镶嵌成层主要依靠机械碰撞力。

但机械镀过程的影响因素众多,如镀桶转速、镀桶半径、冲击介质的颗粒半径、冲击介质的材质、金属颗粒的粒径及材质等^[21-24],从不同角度对机械镀镀桶内物料运动规律的研究对改进机械镀工艺和提高镀层质量具有重要意义。而镀桶形状研究的目的在于分析设备运转时镀桶内介质的运动以及镀层形成的受力状态^[25],使机械镀的设备能够满足机械

镀工艺的使用要求,最终可形成良好的镀层。目前,运用离散元方法研究不同镀桶形状对桶内物料运动规律的影响尚未有明确结论。鉴于此,本文采用 EDEM 工具结合离散单元法研究镀桶截面形状对机械镀过程中物料的运动、受力及能量的影响及规律。

1 模型建立

为了更加直观地观察机械镀过程中冲击介质的运动状态,以通用机械镀设备为例,以内切圆直径为 200 mm 的多边形镀桶切片代替整体的机械镀设备进行模拟仿真,纵向长度为 100 mm;在模拟过程中,颗粒若从镀桶的前方或后方流出,会以相同的运动状态从另一截面进入镀桶。基于机械镀设备的实际,基体材料选用 Q235 钢,冲击介质采用玻璃珠,镀桶内衬材料为橡胶。模拟过程中所需冲击介质、基体、镀桶的材料本征参数见表 1。EDEM 软件中涉及的材料基本接触参数包括恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数,物料之间的基本接触参数如表 2 所示。

表 1 材料的本征参数

Table 1 Intrinsic material parameters

Material	Poisson's ratio	Shear modulus E / GPa	Density ρ_m / (kg · m ⁻³)
Impact medium	0.25	1.96	2 456
Plated barrel	0.47	2.90	1 300
Substrate	0.30	70	7 800

表 2 材料的基本接触参数

Table 2 Basic material contact parameters

Collision method	Recovery factor	Static friction factor	Dynamic friction factor
Impact medium-impact medium	0.6	0.9	0.05
Impact medium-substrate	0.6	0.7	0.05
Impact medium-plated barrel	0.6	0.6	0.04

图 1 显示了镀桶填充率为 50%时镀桶内物料的初始运动状态。机械镀过程,冲击介质、基体和锌粉颗粒的运动决定了冲击介质之间、冲击介质和基体之间以及冲击介质和桶壁之间的碰撞强度和频率;与冲击介质相比,锌粉颗粒要小的多(前者为毫米级,后者为微米级),且锌粉颗粒的受力及变形主要为锌粉吸附沉积于基体表面之上

的力学作用,故模拟分析时可以忽略锌粉颗粒对碰撞接触特性的影响。结合实际工况考虑,镀桶内加入直径为 3 mm 的玻璃珠 1.2 万个,尺寸为 40 mm×30 mm×6 mm 的基体 1 个,基体在 EDEM 软件中采用球形颗粒进行填充(设置有低碳钢物性特征),模型如图 2 所示。模拟仿真中,结合机械镀锌过程物料运动实际状态分析,接触模型选用 Hertz-Mindlin (No slip) 接触模型,总仿真时间为 5 s,时间步长设置为瑞利时间步长的 15%。

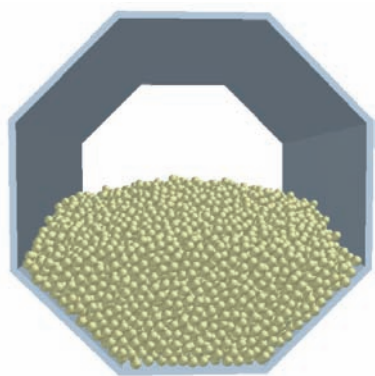


图 1 镀桶内物料的初始运动状态

Fig. 1 Initial movement state of the material in the plating barrel

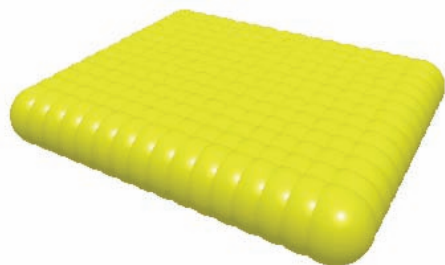


图 2 基体模型

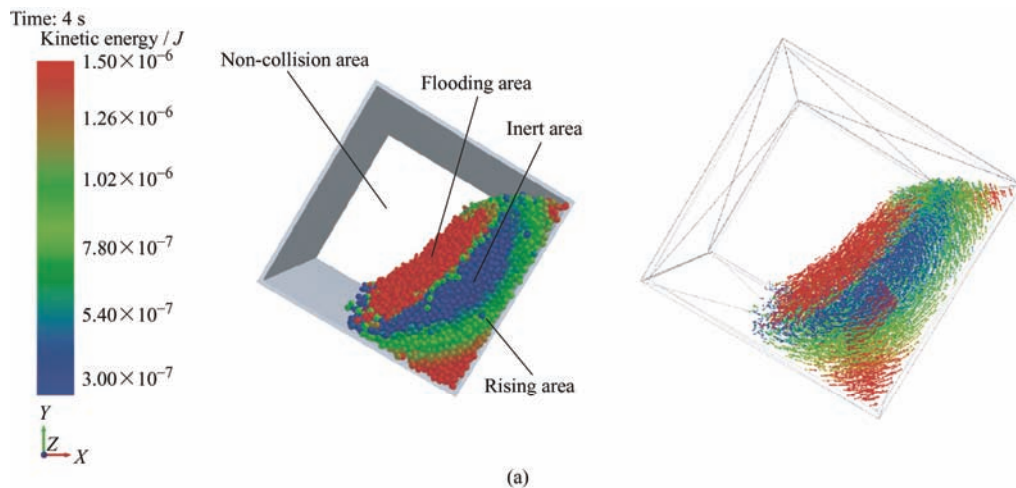
Fig. 2 Matrix model

2 结果与讨论

2.1 碰撞区域特征分析

机械镀过程中,镀桶内物料随镀桶旋转沿圆形轨道上升,至一定高度后沿物料表层自由滑落,物料呈“泻落式”运动;另外,运动物料的中心区域会形成一肾形内核,此区域内冲击介质运动缓慢、冲击力较弱。由此,本文分析过程根据镀桶内颗粒的动能分布情况将镀桶内空间分为 4 个区域:非工作区,该区域不存在冲击介质,不发生碰撞;泻落区,该区域位于物料表层,碰撞能量大,冲击能量强,冲击介质由物料运动区域的上半部分滑落至下半部分,带动基体翻转和位移,对镀层形成起主要作用;惰性区,该区域位于运动区内核部分,区域内碰撞能量较小,冲击作用较弱,不利于镀层的形成;上升区,该区域的冲击介质间的冲击能量小于泻落区的冲击能量,主要是镀桶旋转带动冲击介质运动至物料运动区域顶部,然后由泻落区落下。结合实际工况,模拟仿真时镀桶转速设置为 50 r/min,选取相同的时间步时。图 3 所示为不同截面形状下的镀桶内物料的碰撞动能分布,为便于观察基体(红色块状)的位置,将镀桶虚化,并将冲击介质进行速度矢量化处理。

可以看出,不同截面形状下镀桶内冲击介质的运动方式不同,四类截面的镀桶内物料运动过程都存在明显的四个分区,基体均可以在镀桶内实现上升、下落和翻转运动。对泻落区的分析发现,镀桶截面不同时该区均分布在物料的表层,泻落区的冲击介质具有高的碰撞能量,四边形镀桶内的高能量冲击介质在镀桶桶壁的拐角处存在留滞聚集,如图 3a 四边形镀桶中下方的红色区域,留滞聚合区的冲击介质靠近镀桶边缘,无法参与到与基体的碰撞作用



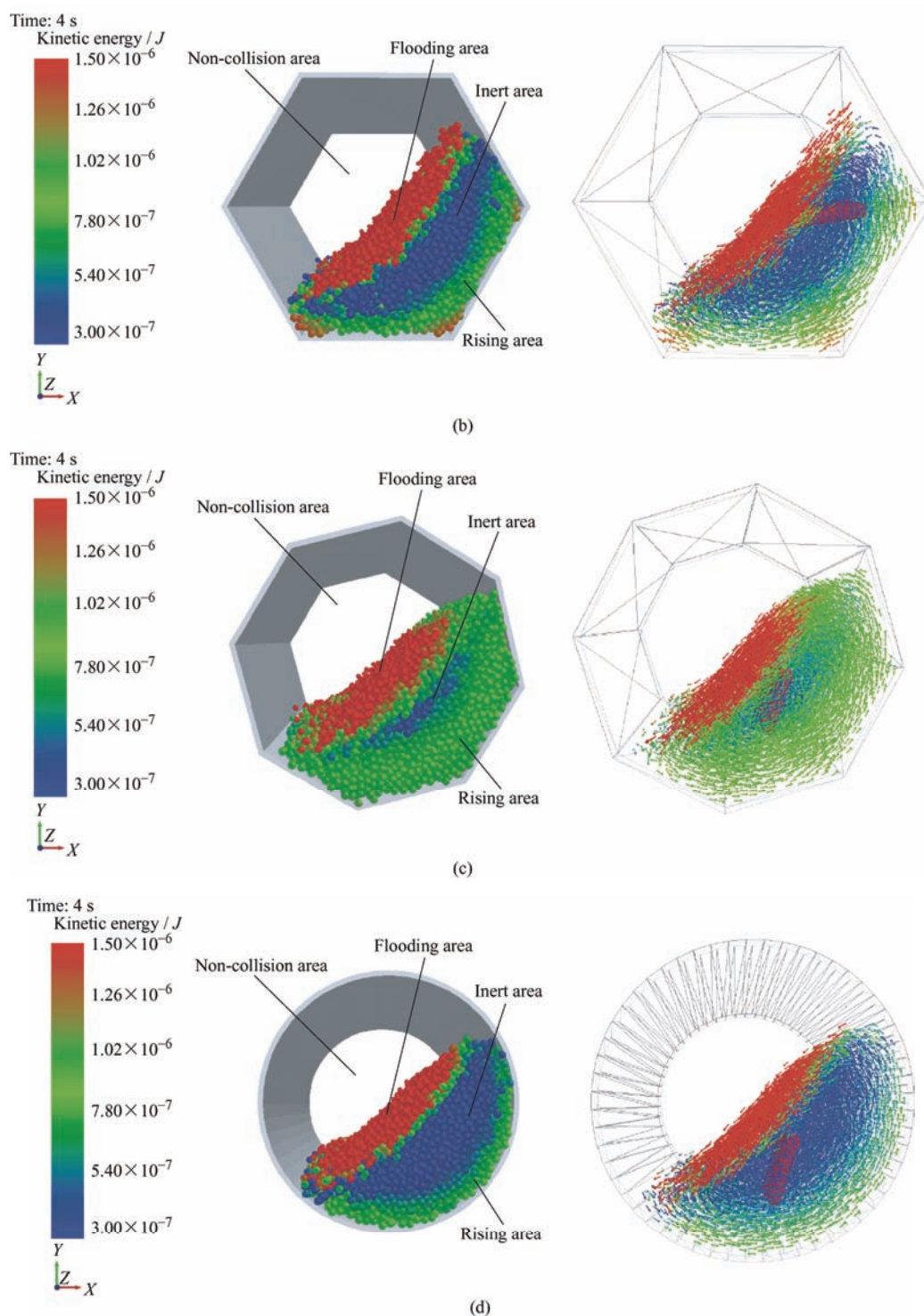


图3 不同截面形状下的碰撞动能分布

Fig. 3 Collision kinetic energy distribution under different cross-sectional shapes

中, 所以也无法对镀层的形成过程起到作用, 但这种现象随着镀桶截面边数的增加会逐渐消失, 如图 3b 和 3c, 当镀桶截面为八边形时, 已没有高碰撞能冲击介质的留滞聚集现象。对惰性区的分析发现, 不同截面的镀桶运动过程均存在一个惰性区, 且基体会运动至惰性区, 如图 3 所示, 四边形、六边形和圆形截面镀桶存在明显的分布区域较大的

惰性区, 八边形镀桶的惰性区最小, 几乎消失, 且八边形惰性区内和上升区的冲击介质具有较高的碰撞能量。

2.2 碰撞频率分析

图 4 为 50 r/min 转速时不同镀桶截面形状时基体与冲击介质之间碰撞次数的变化。模拟设置镀桶从 0.5 s 开始旋转, 图中可以看出, 碰撞在 1.2 s 时

逐渐趋于稳定的状态,之后碰撞次数呈现出周期性的波动变化规律,将稳定后的碰撞变化示意图区域性放大,可以明显看到四边形镀桶中物料的碰撞次数波动性最大。统计碰撞稳定后(1.2~5 s)不同形状镀桶中的总碰撞频率:四边形镀桶稳定态碰撞频率约为 16.2

万次/s;六边形镀桶稳定态碰撞频率约为 17.3 万次/s;八边形镀桶稳定态碰撞频率约为 17.7 万次/s;圆形镀桶稳定态碰撞频率约为 18.4 万次/s。可以得出,随着镀桶截面边数的增加,碰撞次数的波动性逐渐减小,达到稳定状态后碰撞频率逐渐增加。

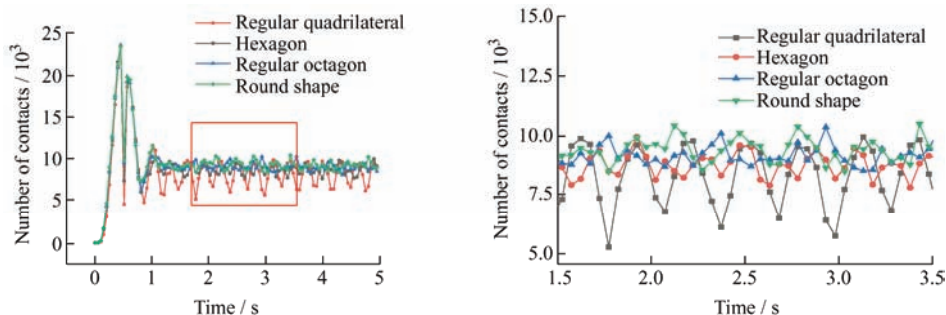


图4 基体与冲击介质之间碰撞次数的变化

Fig. 4 Changes in the number of collisions between the substrate and the impact medium

模拟过程中镀桶里的碰撞主要存在五种形式:冲击介质-冲击介质、冲击介质-基体、冲击介质-镀桶、基体-基体、基体-镀桶,在建模过程中只生成一个基体,因此不存在基体与基体之间的碰撞,基体与镀桶在旋转稳定后也未发生碰撞,因此忽略这两种碰撞。另外,为使模拟结果更加准确,新增一组镀桶截面为十边形时的模拟数据。如图5所示为不同截面形状下镀桶内各类碰撞的碰撞频率变化,横轴上12边形为镀桶截面为圆形时的数据,由图中可以看出,在模拟仿真过程中,随着镀桶边数的增加,镀桶截面形状更趋于圆形时,总碰撞频率、冲击介质-冲击介质之间的碰撞频率出现显著增加,冲击介质-镀桶之间的碰撞频率缓慢降低,冲击介质-基体之间的碰撞频率缓慢增加。

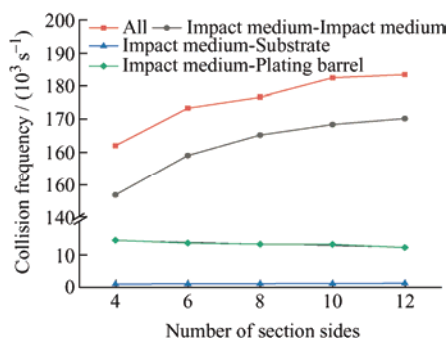


图5 不同形状镀桶内各类碰撞的碰撞频率
Fig. 5 Collision frequency of various collisions in plating barrels of different shapes

冲击介质-基体之间的碰撞促使金属颗粒在基体表面堆积并逐渐致密,因此这类碰撞为有效碰撞;冲击介质-冲击介质、冲击介质-镀桶之间的相互碰撞对镀层形成的增厚过程不起作用,这类碰撞为无

效碰撞。图6为不同截面形状下镀桶内有效碰撞占比示意图,由图中可以看出,随镀桶截面边数的增加,有效碰撞占比总体呈现增加的趋势;四边形和六边形镀桶中有效碰撞占比较低,八边形和十边形镀桶中有效碰撞占比较高,圆形镀桶中有效碰撞占比最高。

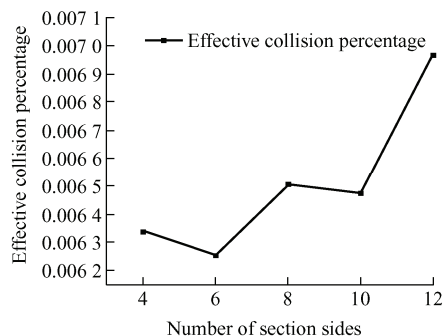


图6 不同截面形状下镀桶内有效碰撞占比

Fig. 6 Proportion of effective collisions in the plating barrel under different cross-sectional shapes

机械镀过程中,碰撞次数波动范围小,碰撞频率高,有效碰撞占比高的情况下更有助于镀层的形成和增厚。所以,机械镀的过程中镀桶截面形状应该选择八边形或圆形。

2.3 碰撞接触力变化

机械镀镀层形成过程是通过冲击介质的碰撞将金属颗粒压实在基体表面并致密化。冲击介质与基体之间的接触力有两种形式,法向接触力(F_N)和切向接触力(F_T),如图7所示为冲击介质与基体之间的作用力示意图。法向力的锤击作用使金属颗粒周期性的堆积嵌入在基体表面,形成松散的镀层并逐

步实现堆积体的致密化, 其过程致使部分锌粉颗粒发生形变; 切向接触力会周期性地摩擦镀层最外表面的金属颗粒, 促使金属颗粒发生位移至最有利于镶嵌的位置, 并在镀层增厚完成后起到研磨表面的作用。图7中红色虚线框部分, 即为金属颗粒在冲

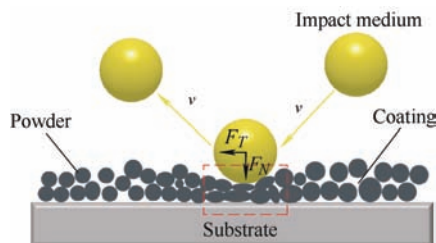
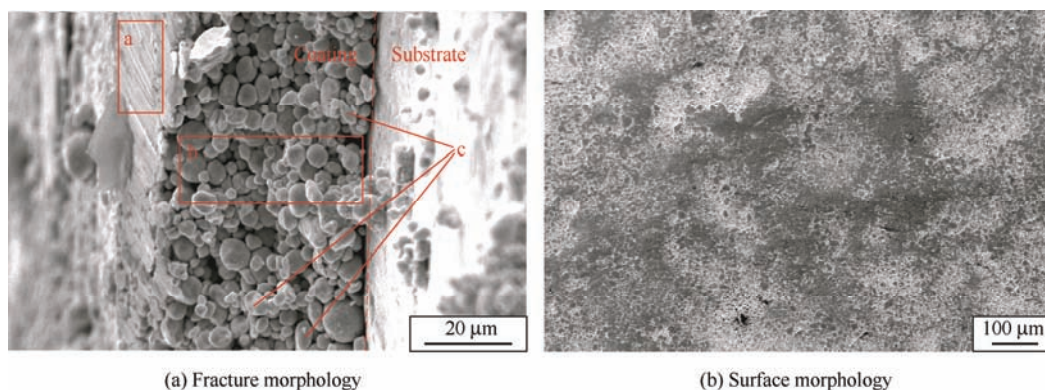


图7 接触力作用示意图

Fig. 7 Schematic diagram of contact force

击介质提供的接触力的作用下发生形变与位移, 镀层逐渐趋于致密化的区域。

如图8所示为机械镀锌层断面与表面SEM形貌图。在图8a中, a区域为镀层表面, 可以看到切向接触力对镀层表面进行研磨, 镀层表面在微观显示下存在划痕, 有一定的表面粗糙度, 而在图8b宏观显示下镀层相对光滑平整; 图8a中8b区域所示为镀锌层主体, 在镀层形成过程与增厚过程中, 在法向接触力和切向接触力的共同作用下, 金属锌粉产生位移和变形, 保证了镀锌层结合强度和致密化的产生; 图8a中8c所示为在法向接触力的锤击作用下, 发生变形的锌粉颗粒。



(a) Fracture morphology

(b) Surface morphology

图8 机械镀锌层断面形貌和表面形貌

Fig. 8 Fracture morphology and surface morphology of mechanical zinc coating

机械镀过程中各个时间步内冲击介质与基体之间的碰撞接触力大小模拟分析统计如图9所示。分析发现, 镀桶从0.5 s开始旋转, 随后在1.2 s时碰撞达到稳定状态, 碰撞接触力开始出现周期性的变化规律。物料运动的过程中, 基体与冲击介质之间法向接触力的大小一直高于切向接触力, 两种接触力随时间的变化规律基本相同。四边形镀桶中法向接触力大小分布在0.006~0.119 N, 切向接触力的大小分布在0.001~0.056 N; 六边形镀桶中法向接触力分布在0.008~0.068 N, 切向接触力分布在0.003~0.021 N; 八边形镀桶中法向接触力分布在0.005~0.049 N, 切向接触力分布在0.002~0.020 N; 圆形镀桶中法向接触力分布在0.007~0.053 N, 切向接触力分布在0.002~0.029 N。可以得出, 随着镀桶截面边数的增加, 更趋于圆形时, 法向接触力的波动范围在减小, 接触力的变化更加规律性。四边形镀桶内

接触力的波动变化范围明显要高于其他截面形状的镀桶, 但在机械镀过程中, 过大的接触力会造成已附着在基体表面的金属颗粒脱落, 影响镀层的增厚效率; 八边形和圆形镀桶中接触力的分布规律较为接近, 对比分析1.5~5 s时间段内这两种不同截面形状镀桶中的接触力的波动规律, 发现镀桶为八边形时, 接触力的波动更加频繁, 如图9c中, 接触力共出现9次波动, 而在圆形镀桶(图9d)中只出现5次波动。镀层形成过程中, 基体与冲击介质之间的接触力不论是过大还是过小都会影响镀层的增厚, 接触力需要在一定的时间周期区内频繁变化。对比图3圆形镀桶中碰撞动能的分布, 惰性区域较大, 基体与冲击介质之间的碰撞不活跃, 接触力变化频率较低, 不利于镀层增厚。八边形镀桶中接触力一直呈现规律性周期性的变化, 呈现小载荷连续冲击的特征, 最有利于镀层形成和增厚。

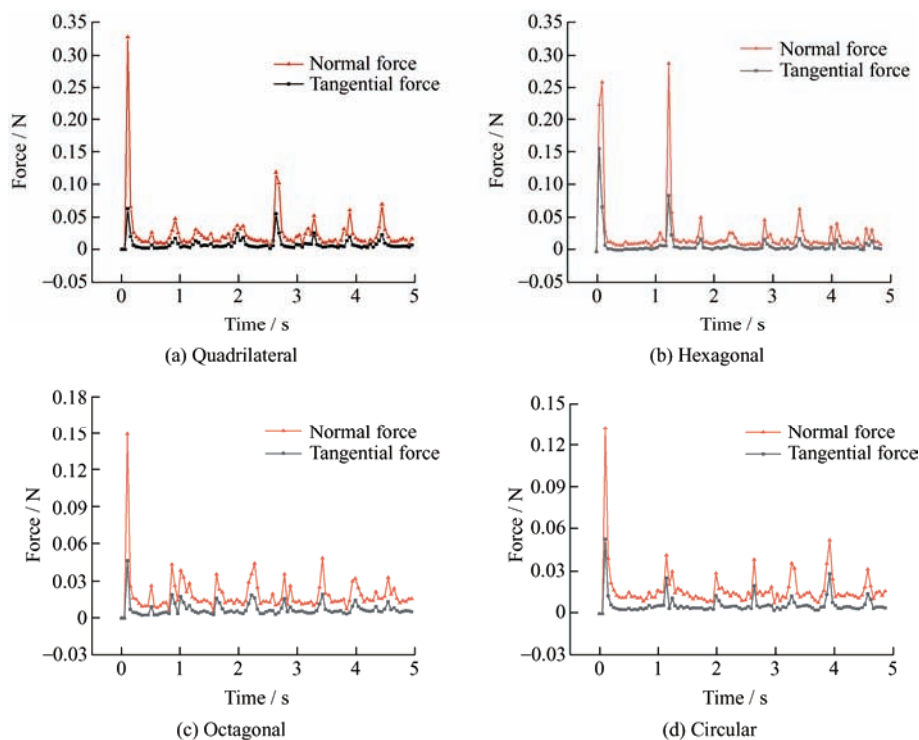


图9 不同截面形状下镀桶内冲击介质与基体的接触力

Fig. 9 Contact force between impact medium and substrate in the plating barrel under different cross-sectional shapes

2.4 碰撞能量的分析

镀桶截面形状不同时, 物料之间的碰撞能量也会发生变化, 无关碰撞与有效碰撞的占比也不相同, 无关碰撞的碰撞能量虽不影响镀层的形成过程, 但玻璃基或陶瓷基(实际中多为玻璃基)介质的无关碰撞会降低冲击介质的使用寿命, 因此要通过分析碰撞能量的变化来确定最优的镀桶截面形状。图10所示为不同截面形状时冲击介质-基体间平均碰撞

动能变化, 分析发现四边形镀桶内碰撞能量最大, 约为 $1.3 \mu\text{J}$, 波动性也最强; 圆形镀桶中碰撞能量最小, 约为 $0.8 \mu\text{J}$, 波动性较强; 六边形镀桶和八边形镀桶中碰撞能量大小相近, 碰撞能量大小约为 $1 \mu\text{J}$, 波动性较小, 在碰撞过程中能量较为稳定。综上, 六边形和八边形镀桶内物料碰撞能量适中, 变化的波动性较弱, 比较适合机械镀过程中镀层的形成和增厚。

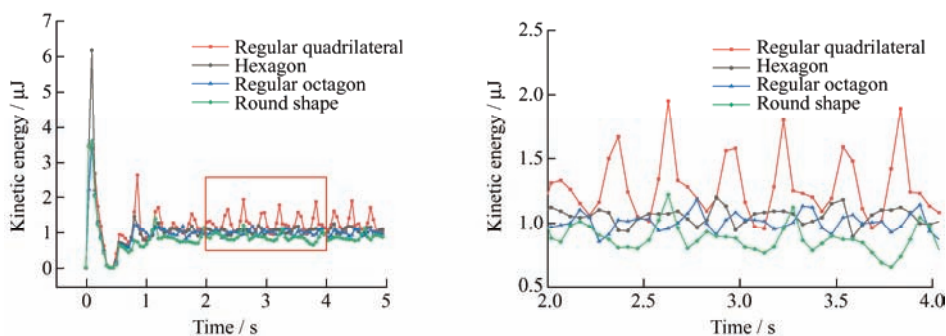


图10 不同截面形状下镀桶内物料碰撞动能变化

Fig. 10 Changes in the kinetic energy of collision of materials in the plating barrel under different cross-sectional shapes

3 结论

采用离散元模拟软件 EDEM 建立了四种不同镀桶形状下机械镀工艺过程的离散元模型, 并从碰

撞区域、碰撞频率、碰撞接触力和碰撞能量四个方面对物料碰撞规律进行了分析。有以下结论:

(1) 通过计算机数值模拟的方法探讨了镀桶截面形状对机械镀过程中物料运动的影响规律, 为机械镀设备发展和工艺优化提供了理论依据。

(2) 模拟结果表明镀桶的截面形状对机械镀过程中桶内物料的碰撞和运动规律产生很大影响。在相同的模拟条件下,八边形镀桶内介质运动的惰性区域最小。

(3) 分析不同镀桶内介质间的碰撞频率、碰撞接触力和碰撞能量,表明八边形镀桶中的介质运动规律最有利于机械镀工艺过程中镀层的形成和增厚。

参 考 文 献

- [1] WANG S M, HE M Y, ZHAO X J. Bonding mechanism of mechanically deposited coating / substrate[J]. *Physics Procedia*, 2013, 50, 315-321.
- [2] 李泽民, 王胜民, 张俊, 等. 氧化石墨烯掺杂对机械镀锌层腐蚀性能的影响[J]. *中国表面工程*, 2019, 32(6): 81-89.
LI Zemin, WANG Shengmin, ZHANG Jun, et al. Effects of GO doping on corrosion performance of mechanical galvanized plating [J]. *China Surface Engineering*, 2019, 32(6): 81-89. (in Chinese)
- [3] 刘琳丽, 季雨婷, 杜明明, 等. 机械镀的研究现状[J]. *南方农机*, 2018, 49(3): 157, 160.
LIU Linli, JI Yuting, DU Mingmin, et al. Research status of mechanical plating[J]. *Nanfang Agricultural Machinery*, 2018, 49 (3): 157, 160. (in Chinese)
- [4] 张俊, 王胜民, 赵晓军. 机械镀 Zn-Ti 复合镀层的组织及性能[J]. *材料保护*, 2021, 54(1): 94-99.
ZHANG Jun, WANG Shengmin, ZHAO Xiaojun. Microstructure and properties of mechanical Zn-Ti composite coating[J]. *Material Protection*, 2021, 54(1): 94-99. (in Chinese)
- [5] 邵珠恒. 湿法超声机械镀锌-铝-稀土实验研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2017.
SHAO Zhuheng. Experimental study on wet ultrasonic mechanical galvanizing aluminum rare earth [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [6] 徐明玉. 湿法超声机械镀锌—铝技术研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2015.
XU Mingyu. Study on wet ultrasonic mechanical galvanizing aluminum technology[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [7] 赵宗祥, 李健. 湿法超声波机械镀 Zn、Zn-5%Al 及 Al 层的形貌与耐蚀性研究[J]. *电镀与环保*, 2018, 38(3): 47-49.
ZHAO Zongxiang, LI Jian. Study on Morphology and corrosion resistance of Zn, Zn-5% Al and Al coatings by wet ultrasonic mechanical plating [J]. *Electroplating and Environmental Protection*, 2018, 38(3): 47-49. (in Chinese)
- [8] 侯云波, 王胜民, 赵晓军, 等. 机械沉积 Cd 镀层的制备及性能研究[J]. *表面技术*, 2019, 48(9): 218-223, 229.
HOU Yunbo, WANG Shengmin, ZHAO Xiaojun, et al. Preparation and properties of mechanically deposited Cd coatings[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(9): 218-223, 229. (in Chinese)
- [9] 李继锋, 裴和中, 王胜民, 等. 机械镀 Cu-Zn 合金的研究[J]. *电镀与环保*, 2016, 36(2): 9-11.
LI Jifeng, PEI Hezhong, WANG Shengmin, et al. Study on mechanical plating of Cu-Zn alloy[J]. *Electroplating & Pollution Control*, 2016, 36(2): 9-11. (in Chinese)
- [10] 王胜民, 刘丽, 何明奕. 机械镀锌过程中先导金属的研究[J]. *表面技术*, 2003, 32(4): 37, 39, 43.
WANG Shengmin, LIU Li, HE Mingyi. Study on driving metal in mechanically zinc deposited process[J]. *Surface Technology*, 2003, 32(4): 37, 39, 43. (in Chinese)
- [11] 王胜民, 何明奕, 赵晓军. 机械镀锌技术现行标准解析[J]. *电镀与涂饰*, 2014, 33(4): 173-176.
WANG Shengmin, HE Mingyi, ZHAO Xiaojun. Analysis on current standard specifications for mechanical zinc plating technology[J]. *Electroplating & Finishing*, 2014, 33(4): 173-176. (in Chinese)
- [12] 王胜民, 赵晓军, 何明奕. 机械镀锌技术的现状及发展[J]. *材料导报*, 2017, 31(5): 117-122.
WANG Shengmin, ZHAO Xiaojun, HE Mingyi. Research status and development of mechanical plating [J]. *Materials Review*, 2017, 31(5): 117-122. (in Chinese)
- [13] KASAI, NAOYA, KAKU, et al. Mechanism for corrosion prevention by a mechanical plating of uniform zinc-Iron alloy[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, 25(11): 4680-4685.
- [14] 刘银庭, 王胜民. 机械镀锌工艺过程的零废液排放研究[J]. *电镀与涂饰*, 2019, 38(7): 317-320.
LIU Yinting, WANG Shengmin. Study on zero discharge of waste liquids during mechanical zinc plating process[J]. *Electroplating & Finishing*, 2019, 38(7): 317-320. (in Chinese)
- [15] 王胜民, 刘丽, 赵晓军, 等. 机械镀锌工艺的清洁生产[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003(11): 83-85.
WANG Shengmin, LIU Li, ZHAO Xiaojun, et al. Cleaner production of mechanical galvanizing process[J]. *Environmental Pollution Control Technology and*

- Equipment, 2003(11): 83-85. (in Chinese)
- [16] KHAASENOVA R S, KOMAROV S V, ZADOROZHNYI V Y. Mechanical plating of Al / CNT composite coatings on aluminum substrates[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 707: 238-244.
- [17] 何建成, 卢世杰, 周宏喜, 等. 基于离散单元法立式螺旋搅拌磨机内介质运动学研究进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(1): 90-93, 110.
- HE Jiancheng, LU Shijie, ZHOU Hongxi, et al. Research progress of medium kinematics in vertical screw stirred mill based on discrete element method[J]. Nonferrous Metals (Beneficiation), 2018 (1): 90-93, 110.
- [18] KHAASENOVA R S, KOMAROV S V, ISHIHARA S, et al. Discrete element method simulations of mechanical plating of composite coatings on aluminum substrates[J]. Surface & Coatings Technology, 2018, 349, 949-958.
- [19] 王胜民. 机械镀锌形层机理的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2002.
- WANG Shengmin. Study on mechanism of mechanical galvanizing layer formation[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2002. (in Chinese)
- [20] 宋丹, 何明奕, 王胜民, 等. 机械镀锌过程中锌粉的受力及运动分析[J]. 钢铁研究, 2010, 38(1): 34-37.
- SONG Dan, HE Minyi, WANG Shengmin, et al. Force and motion analysis of zinc powder in mechanical galvanizing process[J]. Research on Iron and Steel, 2010, 38(1): 34-37. (in Chinese)
- [21] 王胜民, 刘丽, 赵晓军, 等. 机械镀锌层的结构分析[J]. 材料保护, 2003(10): 24-26.
- WANG Shengmin, LIU Li, ZHAO Xiaojun, et al. Structure analysis of mechanical deposited zinc coating[J]. Journal of Materials Protection, 2003, 36(10): 24-26. (in Chinese)
- [22] 王兆华, 杨瑞嵩, 张鹏, 等. 机械镀锌成膜机理探讨[J]. 材料保护, 2013, 46(8): 52-56.
- WANG Zhaohua, YANG Ruisong, ZHANG Peng, et al. Research progress of film formation mechanism of mechanical galvanizing[J]. Materials Protection, 2013, 46(8): 52-56. (in Chinese)
- [23] 袁训华, 何明奕, 王胜民, 等. 机械镀无结晶镀层致密化分析[J]. 材料保护, 2007, 40(2): 14-16, 3.
- YUAN Xunhua, HE Minyi, WANG Shengmin, et al. Analysis of densification of mechanically plated amorphous zinc coating[J]. Journal of Materials Protection, 2007, 40(2): 14-16, 3. (in Chinese)
- [24] 王胜民, 何明奕, 赵晓军, 等. 机械沉积无结晶锌镀层的致密性研究[J]. 功能材料, 2007, 38(1): 151-153.
- WANG Shengmin, HE Minyi, ZHAO Xiaojun, et al. Analysis on packing density of mechanically deposited non-crystalline zinc coating[J]. Journal of Functional Materials, 2007, 38(1): 151-153. (in Chinese)
- [25] 蔺璿. 机械镀锌主机设计及滚筒内固体介质的运动学动力学研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2009.
- LIN Jin. Design of mechanical galvanizing machine and study on kinematics and dynamics of solid medium in drum[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
-
- 作者简介: 郝朝阳, 男, 1996 年出生, 硕士。主要研究方向为金属表面工程。
E-mail: 1132673649@qq.com
- 王胜民(通信作者), 男, 1977 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为金属表面工程。
E-mail: wsmkm2000@sina.com