

基于平面抛光的回收QFN芯片引脚氧化层批量去除一致性仿真分析

肖旭, 罗晓龙, 晏慧敏, 周海

江西农业工程职业学院机电工程学院, 江西 宜春

收稿日期: 2025年9月10日; 录用日期: 2025年10月2日; 发布日期: 2025年10月10日

摘要

针对回收的QFN芯片, 本文首次提出采用平面抛光方式实现引脚氧化层的批量去除。通过对单颗磨粒相对工件的运动轨迹的研究, 得出了抛光工装正弦偏摆时磨粒相对于工装的运动方程。利用MATLAB对抛光参数进行仿真分析。仿真结果表明工装初始相位 β 对抛光轨迹均匀性无显著影响。偏心轴与抛光盘中心距 e 对抛光轨迹均匀性的影响较为有限, 但是会影响加工效率, 且 e 越大加工效率越高。偏心轴与工装中心距 q 对抛光轨迹均匀性具有显著影响, 增大 q 能够有效提升抛光轨迹的均匀性, 当 $q = 15 \text{ mm}$ 时均匀性最好。小数速比的轨迹均匀性要明显优于整数速比, 有限小数和无限循环小数速比对非均匀性系数的影响无明显差异。因此在实际加工过程中应将速比设置为小数。

关键词

芯片回收, 平面抛光, 磨粒轨迹, 小数速比, 轨迹均匀性

Simulation Analysis of Batch Removal Consistency for Oxide Layers on Reclaimed QFN Chip Pins Based on Planar Polishing

Xu Xiao, Xiaolong Luo, Huimin Yan, Hai Zhou

School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi Agricultural Engineering Vocational College, Yichun Jiangxi

Received: September 10, 2025; accepted: October 2, 2025; published: October 10, 2025

Abstract

For recycled Quad Flat No-leads (QFN) chips, this paper proposes, for the first time, a plane polishing

文章引用: 肖旭, 罗晓龙, 晏慧敏, 周海. 基于平面抛光的回收 QFN 芯片引脚氧化层批量去除一致性仿真分析[J]. 机械工程与技术, 2025, 14(5): 583-592. DOI: 10.12677/met.2025.145059

method for the batch removal of the oxide layer on the leads. By studying the motion trajectory of a single abrasive particle relative to the workpiece, the equation of motion for the particle relative to the fixture was derived for a sinusoidal swing motion of the polishing fixture. MATLAB was used to simulate and analyze the polishing parameters. The simulation results indicate that the initial phase of the fixture has no significant impact on the uniformity of the polishing trajectory. The distance between the eccentric shaft and the center of the polishing plate (denoted as “ e ”) has a limited effect on the trajectory uniformity. However, it influences machining efficiency, with a larger “ e ” leading to higher efficiency. The distance between the eccentric shaft and the center of the fixture (denoted as “ q ”) significantly affects the trajectory uniformity. Increasing this distance effectively improves the uniformity, with the best uniformity achieved when $q = 15$ mm. A decimal speed ratio yields better trajectory uniformity than an integer speed ratio. Furthermore, there is no significant difference in the effect on the non-uniformity coefficient between finite decimal and infinite repeating decimal speed ratios. Therefore, in practical machining applications, the speed ratio should be set to a decimal value.

Keywords

Chip Reclamation, Planar Polishing, Abrasive Particle Trajectory, Decimal Speed Ratio, Trajectory Uniformity

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2024 年 3 月 20 日, 国际电信联盟(ITU)和联合国训练研究所(UNITAR)共同发布的《2024 年全球电子垃圾监测》报告显示, 2022 年全球共产生电子垃圾 6200 万吨, 按目前发展趋势, 预计到 2030 年将达到 8200 万吨; 但是全球电子垃圾回收率反而从 2022 年的 22.3%降至 20% [1]。废弃电子产品如果处理不当, 将产生严重的环境污染问题。如果对其进行资源回收再利用, 不但可以回收其中的各种稀有金属元素, 还能回收其中的高价值芯片。研究数据表明, 合格的二手电子元件一般都可以达到新品的质量, 而它们的价格仅为新品的 40%~80% [2]。因此, 对芯片进行回收利用不仅可以降低对环境的污染, 还能提高资源利用率, 降低制造成本, 同时对缓解“芯片荒”也能起到一定的作用[3]。



Figure 1. Reclaimed QFN chips

图 1. 回收的 QFN 芯片

本课题来源于一家芯片回收企业, 该企业主要回收一种 QFN (Quad Flat No-lead Package, 方形扁平

无引脚封装)芯片。该芯片封装类型为 QFN56, 外形尺寸为 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$, 引脚共面性要求小于 0.05 mm 。芯片从废弃电路板上拆解后, 引脚上会残留许多氧化物如图 1 所示(引脚上灰色物质)。如果不去除这些氧化物, 芯片可焊性变差, 容易出现虚焊。勉强装联后, 可靠性也无法保证, 存在质量隐患。因此, 必须对回收芯片引脚上的氧化物进行去除。

目前主要采用手工方式去除回收 QFN 芯片引脚氧化物, 还未实现批量生产, 不但效率低下而且存在质量隐患。常用的元器件引脚去氧化方法有橡皮擦除法、吸锡器搪锡法、助焊剂活性法、除氧化皮清洗剂清洗法[4]。橡皮擦除法是指用橡皮擦通过机械摩擦的方式去除引脚上的氧化层, 该方法常用于维修时手工去除引脚氧化层, 去除效果不佳且芯片尺寸较小时不便操作。吸锡器搪锡法是指使用吸锡器加热元器件引脚进行搪锡处理, 并借助吸锡头将引脚上的氧化物蹭掉[4][5]。因为每个引脚加热次数和温度是有限制的, 且引脚间距较小时容易造成引脚连锡, 采用该方法芯片质量可能受到影响[6]。助焊剂活性法和除氧化皮清洗剂清洗法是指用化学试剂将氧化层腐蚀掉, 但是回收芯片引脚表面的氧化层分布不均匀, 且腐蚀时无氧化层的地方更易反应, 导致清洗后零件引脚共面性变差, 影响焊接质量。

目前, 针对回收 QFN 芯片引脚批量去除氧化层同时保证引脚共面性的方法暂未见文献报道。这严重制约了 QFN 芯片的回收。

2. 批量去除方式的选择

如图 2 所示为平面抛光原理, 常用于蓝宝石、单晶硅等半导体材料的高精密加工, 具有很好的面形加工精度和表面质量。将其用于回收 QFN 芯片引脚氧化层的批量去除, 关键在于保证安装在工装上的多颗回收芯片的去氧化一致性。因此, 有必要对用于回收 QFN 芯片的平面抛光设备的抛光均匀性影响因素进行分析。

平面抛光根据抛光时工装的旋转中心与抛光盘的旋转中心距是否发生变化, 可分为定偏心式和不定偏心式两种[7]。图 2 所示平面抛光装置, 当偏心轴不旋转时或者偏心轴与工装的中心距为 0 时即为定偏心式, 当偏心轴旋转且偏心轴与工装的中心距不为零时为不定偏心式, 因此, 可将两者合并研究。

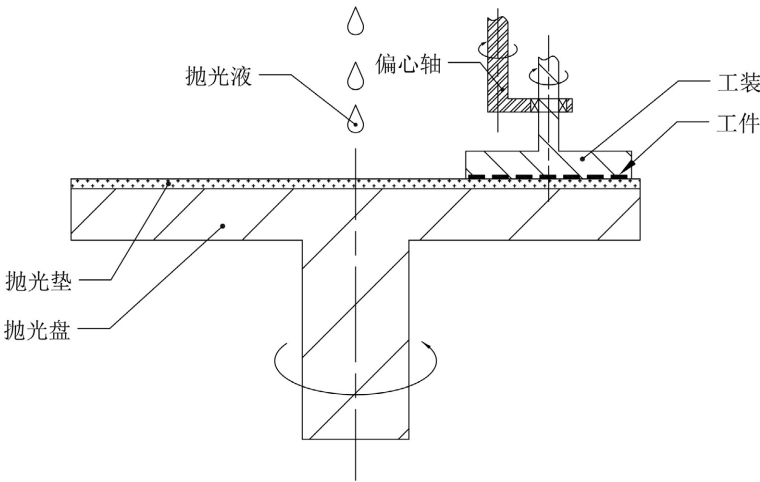


Figure 2. Planar polishing fundamentals
图 2. 平面抛光原理

3. 抛光轨迹建模

为保证工装上各芯片氧化层去除一致性, 必须研究抛光的均匀性。通过磨粒抛光轨迹分布的均匀性

来研究抛光的均匀性是目前使用比较多的方法[7]-[10]。首先应建立单颗磨粒的抛光轨迹方程。图 2 所示平面抛光原理，回收 QFN 芯片均匀分布安装在工装内并随工装一起运动进行抛光。其运动简图如图 3 所示。抛光盘半径为 R ，以角速度 ω_1 绕旋转中心 O 转动，工装以角速度 ω_2 绕旋转中心 o 转动并在偏心轴的带动下进行摆动。偏心轴的旋转中心与抛光盘中心的距离为 e ，偏心轴与工装中心距为 q ，工装的初始相位为 β ，偏心轴的转速为 ω_3 。抛光盘上任意一磨粒 P ，距离抛光盘中心 O 的距离为 R_p ，磨粒初始相位为 θ 。

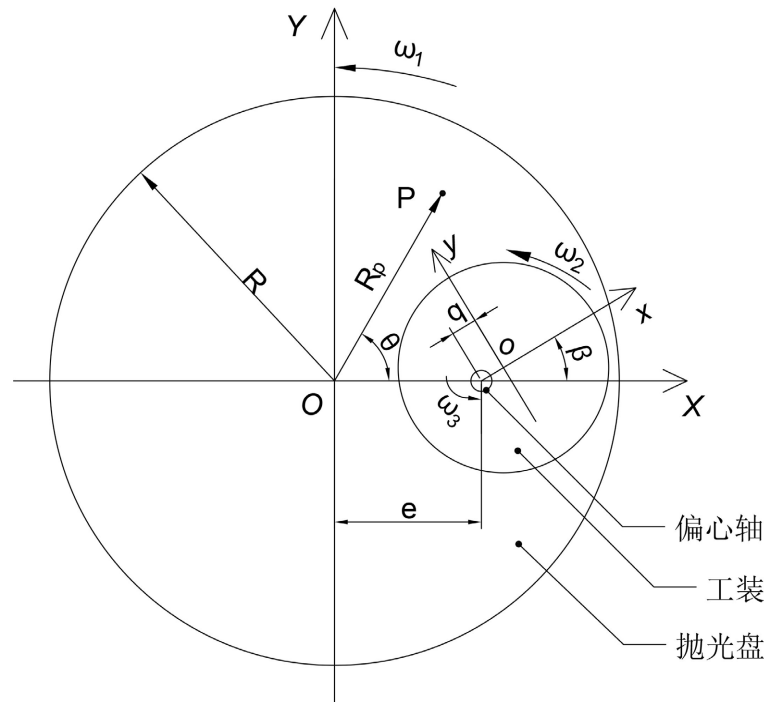


Figure 3. Planar polishing motion schematics

图 3. 平面抛光运动简图

以抛光盘中心点 O 建立坐标系 XOY ，以工装中心点 o 建立坐标系 xoy ， xoy 固结于工装并随工装旋转，工装中心点 o 在 XOY 坐标系下的运动方程为

$$\begin{cases} X_w = e + q \cos(\beta + \omega_3 t) \\ Y_w = q \sin(\beta + \omega_3 t) \end{cases} \quad (1)$$

任意一磨粒 P 在 XOY 坐标系下的运动方程为

$$\begin{cases} X_p = R_p \cos(\theta + \omega_1 t) \\ Y_p = R_p \sin(\theta + \omega_1 t) \end{cases} \quad (2)$$

假设磨粒 P 在 xoy 坐标系下的坐标为 (x_p, y_p) ，根据坐标变换原理， (X_p, Y_p) 可由 (x_p, y_p) 旋转后再平移后获得，用矩阵表示两者的关系为

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_2 t) & -\sin(\omega_2 t) \\ \sin(\omega_2 t) & \cos(\omega_2 t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \end{bmatrix}$$

通过矩阵运算可以得出磨粒 P 在 xoy 坐标系下的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_2 t) & \sin(\omega_2 t) \\ -\sin(\omega_2 t) & \cos(\omega_2 t) \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \end{bmatrix} \right)$$

代入式(1)和式(2)可得

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_2 t) & \sin(\omega_2 t) \\ -\sin(\omega_2 t) & \cos(\omega_2 t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_p \cos(\theta + \omega_1 t) - e - q \cos(\beta + \omega_3 t) \\ R_p \sin(\theta + \omega_1 t) - q \sin(\beta + \omega_3 t) \end{bmatrix}$$

通过上述矩阵可以求出磨粒 P 的轨迹方程为

$$\begin{cases} x_p = R_p \cos(\theta + \omega_1 t - \omega_2 t) - e \cos(\omega_2 t) - q \cos(\omega_2 t - \beta - \omega_3 t) \\ y_p = R_p \sin(\theta + \omega_1 t - \omega_2 t) + e \sin(\omega_2 t) + q \sin(\omega_2 t - \beta - \omega_3 t) \end{cases} \quad (3)$$

4. 影响因素分析

对于轨迹均匀性分析目前主要有两种分析方法[7]-[10]。方法一是轨迹分布观察法,将公式(3)用计算软件(如 MATLAB)绘制成曲线,然后通过观察曲线的分布情况,来评价抛光轨迹的均匀性。这种方法比较直观,但是随着仿真磨粒颗数的增加或者仿真时间的增长,轨迹分布错综复杂,很难通过肉眼观察得出轨迹分布均匀性的结论。方法二是轨迹长度统计法,通过比较各区域内轨迹线的总长度来评价轨迹分布的均匀性。由于某一区域内轨迹线长度可以反映该区域的磨削量,而所有轨迹线的长度和可以用区域内所有轨迹线上的采样点个数近似代替[8]。首先利用计算软件(如 MATLAB)将公式(1)按一定时间间隔分化成一个个点,然后将抛光工装均匀划分成若干网格,然后统计每一网格内采样点的总数量 $N(i)$,再利用统计学方法计算 $N(i)$ 的标准差来评价每个网格中数的离散程度,从而反应其均匀性。但是采用标准差评价存在一个问题,同一种加工参数,随着数据采集量的增加(如增加磨粒颗数,或者增加仿真时间)其标准差也会逐渐增大,这就导致很难对各种加工方案进行比较。因此,文献[7]引入离散系数 CV,文献[8]引入非均匀性系数 NUT,其实质都是将标准差除以各区域统计值 $N(i)$ 的均值 m 。计算方法如式(4)。非均匀性系数 NUT 可以很好的解决数据量增大对均匀性评价的影响。方法二可以更客观的评价多颗磨粒和仿真时间较长的情况。因此,本项目拟采用方法二进行多颗磨粒的轨迹均匀性评价。

$$\text{NUT} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N(i) - m)^2}}{m} \quad (4)$$

在现有文献中对多颗磨粒仿真时多假定各磨粒按一定规律均匀分布[7]-[10],然而在实际加工过程中磨粒的分布更倾向于随机均匀分布,而且每次加工磨粒的分布情况都会发生变化,这将使仿真结果存在一定程度的失真。为减小这种失真,本文仿真采用 10000 颗磨粒随机均匀分布在半径 R 为 100 mm 抛光盘上,如图 4 所示,同时对同一组参数进行多次仿真,每次仿真时磨粒都重新随机分布,然后取多次仿真的 NUT 均值 $\overline{\text{NUT}}$ 对抛光均匀性进行评价。工装统计网格按照 QFN 芯片实际布置情况划分,每一个芯片作为一个统计网格。工装半径 30 mm,总共 57 个网格,如图 5 所示。

QFN 芯片上的氧化层比较薄,且易于通过抛光去除,因此,抛光盘的转速、工装的转速和偏心轴的转速不宜太快且加工时间不能太长。假定一组基本加工参数,即抛光盘转速 $\omega_1 = 50$ r/min,工装转速 $\omega_2 = 31$ r/min,偏心轴转速 $\omega_3 = 13$ r/min,抛光盘与偏心轴中心距 $e = 50$ mm,工装初始相位 $\beta = 0$ 。偏心轴与工装中心距 $q = 10$ mm,仿真时间分别取 120 s,取样时间间隔 0.01 s。利用 MATLAB 采用单因素法进行分析。

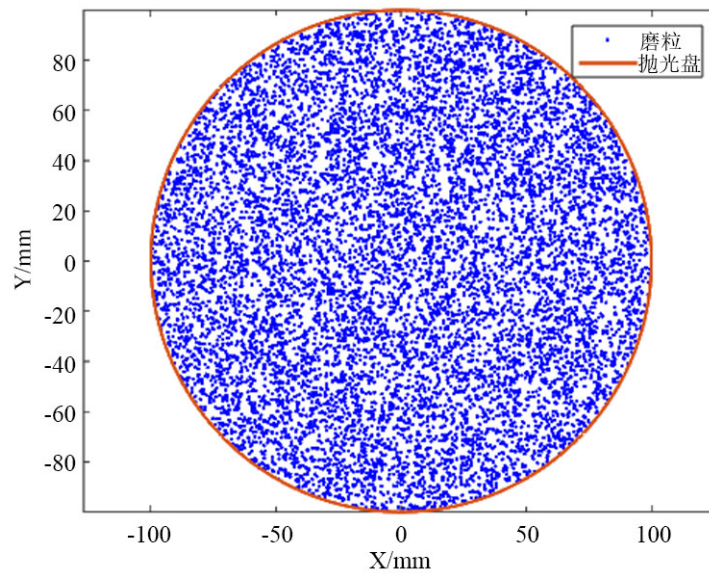


Figure 4. Andom uniform distribution of abrasive particles
图 4. 磨粒随机均匀分布

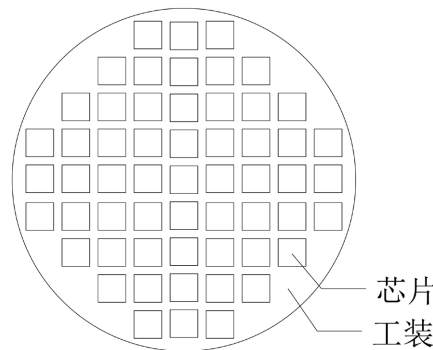


Figure 5. Chips arrangement
图 5. 芯片布置

4.1. 工装初始相位 β 的影响

工装初始相位 β 分别取 0° 、 60° 、 120° 、 180° 、 240° 、 300° ，其他参数与上文中基本加工参数一致。仿真 5 次，每次仿真磨粒重新随机均匀分布于抛光盘。其非均匀性系数 NUT 数据如表 1 所示，从表中数据可知不同 β 值其 NUT 值相同。这表明工装初始相位 β 值对轨迹分布均匀性无显著影响。由于磨粒随机均匀分布在抛光盘，工装处于不同的初始相位时，工装上每颗芯片的接触的磨粒数量是相当的。因此，对轨迹均匀性无明显影响，仿真结果也与此相符。加工时可以将工装置于任意起始相位。这样可以节约安装时间，提升工作效率。

Table 1. Effect of initial phase β on non-uniformity coefficient
表 1. 起始相位 β 对非均匀性系数的影响

β	0°	60°	120°	180°	240°	300°
NUT	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
	0.007	0.006	0.004	0.007	0.006	0.004

续表

	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
	0.007	0.006	0.008	0.007	0.006	0.008
	0.006	0.007	0.006	0.006	0.007	0.006
$\overline{\text{NUT}}$	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007

4.2. 偏心轴与抛光盘中心距 e 的影响

偏心轴与抛光盘中心距 e 分别取 40 mm、45 mm、50 mm、55 mm、60 mm，其他参数与上文中基本加工参数一致。仿真 5 次，每次仿真磨粒重新随机均匀分布于抛光盘。其非均匀性系数 NUT 数据如表 2 所示，从表中数据可知不同 e 值其 $\overline{\text{NUT}}$ 值相当，这表明偏心轴与抛光盘中心距对轨迹分布均匀性影响较为有限。如图 6 所示 O_1 和 O_2 为 2 种不同的 e 值对应的偏心轴位置，偏心轴位置不同时，其工装的运动范围不同，这不影响轨迹分布的均匀性，但是会影响抛光的去除效率。 e 越大抛光盘和工装的相对运动速度越大，加工效率越高。

Table 2. Effect of center distance e on non-uniformity coefficient
表 2. 偏心轴与抛光盘中心距 e 对非均匀性系数的影响

e	40 mm	45 mm	50 mm	55 mm	60 mm
NUT	0.008	0.007	0.005	0.006	0.007
	0.007	0.007	0.008	0.008	0.006
	0.010	0.006	0.007	0.009	0.005
	0.008	0.006	0.009	0.010	0.010
	0.008	0.007	0.007	0.009	0.005
$\overline{\text{NUT}}$	0.008	0.007	0.007	0.009	0.007

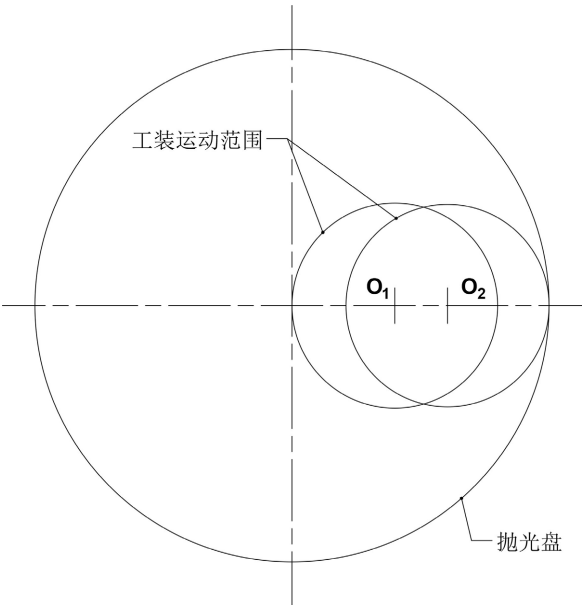


Figure 6. Range of motion for tooling with different e values
图 6. 不同 e 值工装运动范围

4.3. 偏心轴与工装中心距 q 的影响

q 分别取 0 mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 其他参数与上文中基本加工参数一致。仿真 5 次, 每次仿真磨粒重新随机均匀分布于抛光盘。其非均匀性系数 $\overline{NUT}$ 数据如表 3 所示。将 $\overline{NUT}$ 值绘制成折线图如图 7 所示。从数据和折线图可知, $\overline{NUT}$ 值随着 q 值增大而逐渐减小, $q = 15$ mm 时 $\overline{NUT}$ 值最小, 轨迹的均匀性最好。 $q = 0$ mm 时, 即为定偏心式抛光, $\overline{NUT}$ 值最大。由此可知, 不定偏心式抛光的轨迹均匀性要优于定偏心式。

Table 3. Effect of center distance q on non-uniformity coefficient
表 3. 偏心轴与工装中心距 q 对非均匀性系数的影响

q	0 mm	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm
NUT	0.018	0.012	0.007	0.007	0.005
	0.014	0.008	0.007	0.007	0.006
	0.023	0.018	0.011	0.005	0.008
	0.007	0.006	0.006	0.007	0.008
	0.015	0.009	0.009	0.006	0.006
$\overline{NUT}$	0.015	0.011	0.008	0.006	0.007

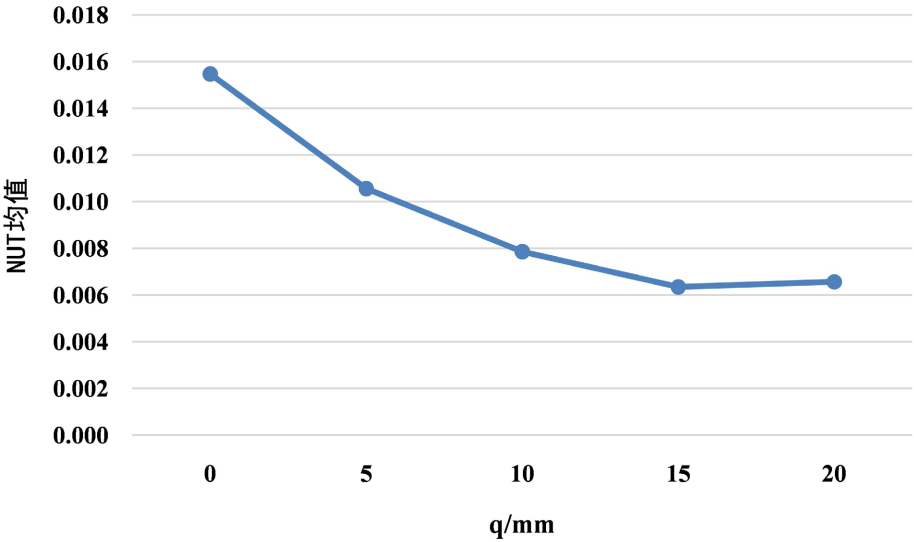


Figure 7. Effect of center distance q on non-uniformity coefficient
图 7. 不同 q 值对非均匀性系数的影响

4.4. 速比的影响

由文献[8]可知, 当抛光盘与工装的速比为无理数时单颗磨粒在工装上的运动轨迹是不重复的开放曲线, 当该速比为有理数时单颗磨粒在工装上的运动轨迹是重复的封闭曲线, 轨迹将周期性重复。轨迹开放不重复时有利于抛光轨迹的均匀分布, 抛光一致性更好。多颗磨粒仿真时无理数速比抛光轨迹均匀性也要优于有理数速比。但是在实际生产过程中 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 一般设定为整数, 其速比为有理数。也就是说在实际生产过程中无理数速比很难获得。因此本文只对有理数速比进行讨论。在此将有理数速比分为整数、有限小数、无限循环小数 3 种情况。由于偏心轴、工装和抛光盘的运动都会影响抛光轨迹, 因此在

设置速比时要求 ω_1/ω_2 、 ω_2/ω_3 和 ω_1/ω_3 属于同种类型。

ω_1 、 ω_2 、 ω_3 的取值如表 4，其中组别 1 和组别 2 为整数速比，组别 3 和组别 4 为有限小数速比，组别 5 和组别 6 为无限循环小数速比。其他参数与上文中基本加工参数一致。仿真 5 次，每次仿真磨粒重新随机均匀分布于抛光盘。其非均匀性系数 NUT 数据如表 4 所示。将 $\overline{\text{NUT}}$ 值绘制成折线图如图 8 所示。从数据和折线图可知，小数速比的非均匀性系数要优于整数速比，有限小数和无限循环小数速比对非均匀性系数的影响无明显差异。因此在实际加工过程中应将速比设置为小数。

Table 4. Effect of speed ratio on non-uniformity coefficient

表 4. 速比对非均匀性系数的影响

组别	1	2	3	4	5	6
ω_1	60	48	50	35	53	51
ω_2	30	24	20	28	31	31
ω_3	15	12	8	8	13	13
NUT	0.021	0.018	0.007	0.006	0.009	0.005
	0.020	0.020	0.006	0.005	0.010	0.005
	0.025	0.024	0.009	0.009	0.009	0.008
	0.023	0.023	0.013	0.011	0.014	0.011
	0.021	0.020	0.009	0.006	0.009	0.004
$\overline{\text{NUT}}$	0.022	0.021	0.009	0.007	0.010	0.006

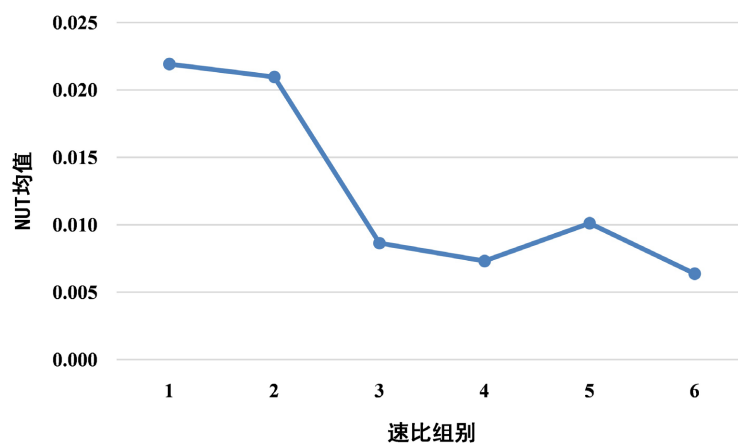


Figure 8. Effect of speed ratio on non-uniformity coefficient

图 8. 速比对非均匀性系数的影响

5. 总结

回收 QFN 芯片引脚氧化层批量去除方法暂无文献报道，本文首次提出将平面抛光技术用于解决该问题。批量去除氧化层的关键在于保证工装上芯片抛光一致性。本文采用 MATLAB 对抛光轨迹的均匀性影响因素进行仿真分析。为减小现有文献常用的磨粒数量少和按规律均匀分布带来的失真，采用更接近实际加工情况的多磨粒随机均匀分布，同时针对同一组参数进行多次仿真，每次仿真磨粒都重新均匀分布，然后通过非均匀性系数均值 $\overline{\text{NUT}}$ 对抛光一致性进行评价。

仿真结果表明工装初始相位 β 对抛光轨迹的均匀性无明显影响，加工时可以在任意相位安装工装，

有利于提升安装效率。偏心轴与抛光盘中心距 e 对抛光均匀性影响较为有限,但是会影响抛光的去除效率。 e 越大抛光盘和工装的相对运动速度越大,加工效率越高。偏心轴与工装中心距 q 的增大有利于抛光轨迹均匀性,当 $q = 15 \text{ mm}$ 时 $\overline{\text{NUT}}$ 值最小,轨迹的均匀性最好。 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 的速比为小数时抛光轨迹比速比为整数时更加均匀,加工时宜采用小数速比。通过对上述影响因素的分析可以为后续抛光设备的设计和加工参数的设定提供理论基础。

需要注意的是,本文只对抛光过程中的运动参数进行了分析,根据现有文献和加工经验,抛光液的浓度、磨粒的粒径大小及均匀性、抛光垫的材质和加工压力分布等因素对抛光过程都有影响,后续在研究过程中也需要关注这些因素对回收 QFN 芯片引脚氧化层批量去除一致性的影响。

基金项目

江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2208003)。

参考文献

- [1] United Nations Institute for Training and Research and International Telecommunication Union (2024) Global E-Waste Monitor 2024. <https://api.globalewaste.org/publications/file/297/Global-E-waste-Monitor-2024>
- [2] 刘志峰, 朱一, 宋守许, 等. 废弃电路板双列直插式封装的集成电路芯片回收的经济性分析[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(3): 6-10.
- [3] 张译元. 可回收芯片的缺陷视觉检测方法及分选系统研制[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- [4] 王光耀. 元器件引脚去氧化工艺研究[J]. 电脑知识与技术, 2016, 12(3): 265-267.
- [5] 李瑶, 袁飞, 周晓冬, 等. SOP 封装 IC 引脚去氧化新工艺[J]. 电子技术与软件工程, 2019(15): 74-75.
- [6] 张芸, 吴晓悦, 皮秀国, 等. SMD 器件翼型引脚氧化问题的研究与解决[J]. 电子工艺技术, 2016, 37(4): 213-216.
- [7] 赵萍, 陶黎, 王志伟, 等. 平面研磨抛光轨迹研究[J]. 航空精密制造技术, 2009, 45(2): 1-6.
- [8] 姬孟托, 洪滔, 文东辉, 等. 无理数转速比下的平面研磨轨迹均匀性研究[J]. 机电工程, 2016, 33(5): 532-536.
- [9] Nguyen, N.Y., Zhong, Z.W. and Tian, Y. (2015) An Analytical Investigation of Pad Wear Caused by the Conditioner in Fixed Abrasive Chemical-mechanical Polishing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77, 897-905. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6490-3>
- [10] 严振, 方从富, 刘冲. 偏摆式平面研磨抛光轨迹的理论研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2018, 38(4): 77-82.