

模具钢微细蚀刻速率的研究

宋卿, 张永俊, 于兆勤, 王冠

(广东工业大学 机电学院, 广州 510006)

摘要: **目的** 研究模具钢微细蚀刻中, 蚀刻速率的变化规律。 **方法** 采用蚀刻液喷淋加工方式, 对掩膜的模具钢表面进行蚀刻, 考察掩膜间隙、蚀刻液喷淋压力、蚀刻液温度对蚀刻速率的影响。 **结果** 蚀刻速率随掩膜间隙尺寸的增大而增加, 当掩膜尺寸大于 $150\ \mu\text{m}$ 时, 蚀刻速率增长较快; 较大的喷淋压力有利于蚀刻液的更新和蚀刻产物的排除, 使得蚀刻反应充分, 蚀刻速率较高; 温度在一定范围内升高, 蚀刻液活性增大, 蚀刻效率提高, 蚀刻速率增大。 **结论** 最佳工艺条件为: 掩膜间隙尺寸 $150\sim 200\ \mu\text{m}$, 蚀刻液喷淋压力 $1.0\sim 1.4\ \text{MPa}$, 蚀刻液温度 $35\sim 40\ ^\circ\text{C}$ 。在此加工条件下, 模具钢的蚀刻速率高, 加工效率高, 同时可以保证较好的蚀刻尺寸精度。

关键词: 微细蚀刻; 模具钢; 蚀刻速率

中图分类号: TG176

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2013)06-0040-04

Study on Etching Rate of Die Steel in Micro-etching

SONG Qing, ZHANG Yong-jun, YU Zhao-qin, WANG Guan

(Institute of Mechatronics, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

ABSTRACT: **Objective** The variation of etching rate in micro-etching on the die steel was studied. **Methods** Spray etching was used in etching the surface of the die steel with mask processing. The impact of the mask gap width, spray pressure and etchant temperature on the etching rate was investigated. **Results** The etching rate increased with the increasing mask gap width, when the mask gap was wider than $150\ \mu\text{m}$, the etching rate increased rapidly. Larger spray pressure was benefit for updating the etchant and excluding the etching product, when the reaction was sufficient, the etching rate increased. When the etchant temperature elevated within a certain range, the etchant activity increased, so as the etching efficiency and the etching rate. **Conclusion** The optimal condition was a mask gap width of $150\sim 200\ \mu\text{m}$, a spray pressure of $1.0\sim 1.4\ \text{MPa}$, and an etchant temperature of $35\sim 40\ ^\circ\text{C}$. Under this condition, the etching rate and the processing efficiency were both high. Meanwhile, it helped to ensure a higher dimensional accuracy.

KEY WORDS: micro-etching; die steel; etching rate

化学蚀刻技术与其它成形方法相比, 具有操作简单、效率高、加工精度高、成本低等优点, 广泛应用于PCB板印刷、精密电磁元件、微电子机械系统等领

域^[1-4]。大多数蚀刻加工材料的腐蚀具有各向同性, 蚀刻在深度方向进行的同时, 也在宽度方向上进行, 侧向的金属也被蚀除^[5]。蚀刻产品会出现形貌特征发生

收稿日期: 2013-06-20; 修订日期: 2013-07-04

Received: 2013-06-20; Revised: 2013-07-04

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(U1134003); 国家青年科学基金资助项目(51205066); 广东省自然科学基金资助项目(s2012010009022)

Fund: Supported by the Key Project of National Natural Science Foundation of China(U1134003), the National Youth Science Fund Project(51205066) and the Guangdong Province Natural Science Fund Project(s2012010009022)

作者简介: 宋卿(1988—), 男, 安徽人, 硕士生, 主要研究方向为特种加工工艺。

Biography: SONG Qing (1988—), Male, from Anhui, Master, Research focus: non-traditional processing technology.

偏差、尺寸精度变差、图形发生变形等问题,这制约了蚀刻加工的精度^[6]。为了提高蚀刻加工的精度,可以提高蚀刻加工速率,从而缩短蚀刻流程的时间,减小非周期性加工的影响。蚀刻速率则会受到蚀刻方式、蚀刻液特性、温度等因素的影响^[7]。文中研究蚀刻速率随掩膜间隙尺寸、蚀刻液喷淋压力和温度的变化情况,并初步得出蚀刻速率较高的工艺条件,对提高微细蚀刻的效率和加工精度具有重要的指导意义。

1 实验

1.1 设备与材料

采用喷淋式蚀刻机,型号为 XDH-2013BO308。该蚀刻机具有液压循环系统,通过溢流阀调节蚀刻液的喷淋压力,为保证蚀刻加工效果的均匀性,采用旋转式工作台面。

蚀刻材料为直径 40 mm 的模具钢圆块,表面抛光,粗糙度 ≤ 1.6 ,以满足表面掩膜的附着要求。掩膜材料为感光蓝油,成分是树脂型油墨,光固化和热固化后,耐化学性较好,耐酸碱性较强,与工件粘附力很好,能满足蚀刻工艺的要求。掩膜块呈方形,掩膜块之间未涂覆的区域为掩膜间隙,该区域宽度为掩膜间隙尺寸。

1.2 方法

工艺流程如下:加工面除油(丙酮清洗)→清水冲洗→去氧化膜(酸洗)→烘干,称重→掩膜→曝光,显影→烘干→蚀刻→脱膜,清洗→烘干,称重。

对掩膜处理的模具钢样件进行喷淋蚀刻,改变掩膜间隙尺寸、蚀刻液的喷淋压力和蚀刻液温度等参数,测定模具钢微细蚀刻的蚀刻速率,蚀刻时间为 4 min。蚀刻速率通过质量损失法进行计算^[8]:

$$u = (m \times 10^3) / (\rho \cdot A \cdot t) \quad (1)$$

式中: u 为蚀刻速率($\mu\text{m}/\text{min}$),即单位时间内的蚀除厚度; m 为蚀除质量(mg); ρ 为模具钢密度, $\rho = 7.85 \text{ g}/\text{cm}^3$; A 为蚀刻面积(mm^2); t 为蚀刻时间(min)。

模具钢蚀刻加工表面呈连续凸凹起伏的微观结构,凹坑截面呈圆弧过渡,凸起为四棱状结构,形貌特征的均一性好,微结构尺寸偏差较小,表面局部微观结构如图 1 所示。

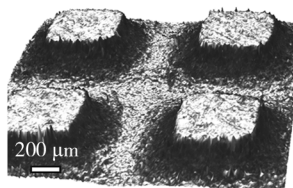


图 1 蚀刻效果微观放大

2 结果与分析

2.1 掩膜间隙尺寸对蚀刻速率的影响

设定蚀刻液喷淋压力为 0.6 MPa,温度为 40 ℃,蚀刻时间 4 min。图 2 为模具钢蚀刻速率随掩膜间隙尺寸增大的变化趋势。掩膜间隙尺寸不同即优先发生蚀刻反应的面积不同,蚀刻液的接触面积不同,蚀除量和蚀除速率也不同。

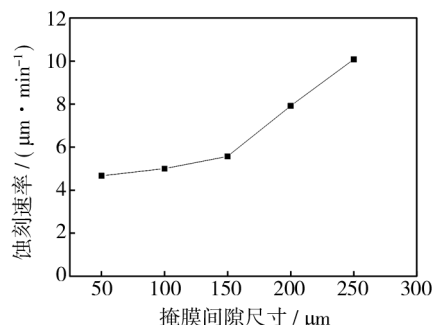


图 2 蚀刻速率随掩膜间隙尺寸的变化

Fig. 2 Variation of the etching rate with the mask gap width

由图 2 可以看出,模具钢表面掩膜间隙尺寸小于 150 μm 时,蚀刻速率随掩膜间隙尺寸的增大而不断增加,但增加趋势平缓;掩膜间隙尺寸大于 150 μm 时,蚀刻速率的增加趋势增大。这是因为蚀刻从间隙区域的金属表面开始,蚀刻液与模具钢发生氧化反应而去除金属,掩膜间隙尺寸较小时,蚀刻液更新困难,反应不充分,蚀刻速率较低;掩膜间隙尺寸增加,在相同喷淋加工的条件下,蚀刻反应更充分,蚀刻液更新容易,使得间隙尺寸对蚀刻速率的影响增大,这与 Bailey 的分析^[9]一致。此外,O. Cakir^[10]分析认为,温度是影响蚀刻的一个重要因素,掩膜间隙尺寸增大,蚀刻反应面积增大,蚀刻反应放热增多,使间隙内的蚀刻液温度升高加快,蚀刻速率提高。本研究中,掩膜间隙尺寸在 150 ~ 250 μm 范围内,蚀刻速率较大。

2.2 蚀刻液喷淋压力对蚀刻速率的影响

设定加工样件掩膜间隙尺寸为 150 μm ,蚀刻液温度为 40 ℃,蚀刻时间 4 min。图 3 为模具钢蚀刻速率随蚀刻液喷淋压力增大的变化趋势。

由图 3 可以看出,喷淋压力对蚀刻速率的影响非常明显。蚀刻速率先随喷淋压力的增大而增加。这是因为喷淋压力增大,蚀刻液更新频率加快,蚀刻反应充分;同时较大压力的冲刷作用有利于蚀刻产物排除,促进蚀刻反应的继续进行;因此蚀刻保持较大的增长速率。这与 McClean^[11]关于铜蚀刻的研究结果相似。随着喷淋压力的继续增加,蚀刻液更新频率进一步加快,

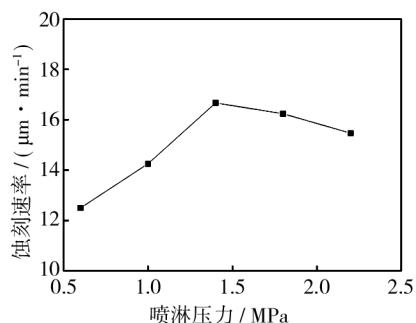


图3 蚀刻速率随喷淋压力的变化

Fig. 3 Variation of the etching rate with the spray pressure

会减少蚀刻液在蚀刻表面的驻留时间,蚀刻液对模具钢的有效蚀刻时间减少;同时,蚀刻液对加工面的作用力增大,喷淋的蚀刻液弹回,蚀刻反应无法充分进行;因此,蚀刻速率在一定程度上降低。这与 Takechi 等^[12]对喷淋条件下蚀刻速率的研究分析一致。此外,从蚀刻系统的液压系统考虑,蚀刻机的压力调节范围有限,长时间的大压力工作环境会对设备产生不良影响。所以,蚀刻液喷淋压力应控制在 0.6 ~ 1.4 MPa 范围内。

2.3 蚀刻液温度对蚀刻速率的影响

设定加工样件掩膜间隙尺寸为 250 μm,蚀刻液喷淋压力为 0.6 MPa,蚀刻时间 4 min。图 4 为模具钢蚀刻速率随蚀刻液温度升高的变化趋势。

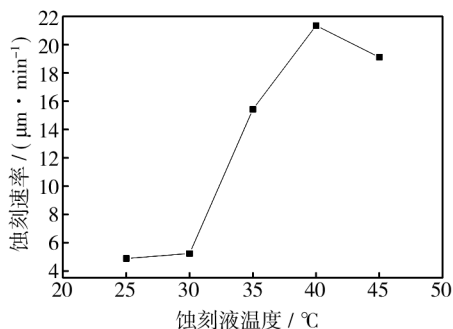


图4 蚀刻速率随蚀刻温度的变化

Fig. 4 Variation of the etching rate with the etchant temperature

由图 4 可以看出,当蚀刻液温度低于 30 °C 时,蚀刻速率较小;当温度高于 30 °C 时,蚀刻速率随温度的升高不断增加,增加幅度较大;当温度高于 40 °C 时,蚀刻速率反而下降。分析其原因,温度升高使得蚀刻液的黏度降低,流动性增强,因此蚀刻速率提高,这与 Noor 等^[13]对蚀刻温度研究的结果一致。孙从征等人^[14]也经分析认为,温度升高有利于提高反应物和生成物的扩散速率,消除扩散对反应的限制。温度继续升高,则会造成蚀刻液产生高聚物,工件蚀层被破坏,导致蚀刻速率降低。此外,朱绒霞研究发现^[15],蚀刻温度过高会影响掩膜的附着,使得蚀刻加工的光洁度

变差,蚀刻液的挥发损失也会增加;莫凌等经实验发现^[16],蚀刻机箱体和输送管道使用的是 PVC 材料,其软化变形的温度大约为 55 ~ 65 °C。综合考虑,适宜的蚀刻加工温度为 30 ~ 40 °C。

实验中还发现,随着蚀刻液温度的升高,模具钢加工表面的颜色逐渐变为深褐色,光洁度变差,加工面的粗糙度也变大。这是因为在过高的蚀刻液温度下,蚀刻反应剧烈,金属蚀除均匀性变差,蚀刻产物在表面附着并无法及时排除,造成加工的效果变差。

2.4 蚀刻加工最佳工艺条件

通过以上分析可知,在 FeCl₃ 基蚀刻液对模具钢的微细蚀刻加工中,加工材料的掩膜间隙尺寸、蚀刻液喷淋压力和温度对蚀刻加工的影响很大。针对这三个独立因素,以蚀刻速率作为评判标准,进行三因素三水平的正交试验,拟确定这三个因素的最佳值。因素水平取值见表 1,实验方案及结果见表 2。

表1 因素水平表

Tab. 1 Table of factors and levels

水平	因素		
	掩膜间隙尺寸/μm	喷淋压力/MPa	蚀刻液温度/°C
1	100	0.6	30
2	150	1.0	35
3	200	1.4	40

表2 正交试验设计及结果

Tab. 2 Result and design of orthogonal experiments

实验 编号	各因素水平值			蚀刻速率/ (μm·min ⁻¹)
	掩膜间隙尺寸	喷淋压力	蚀刻液温度	
1	1	1	1	4.72
2	1	2	2	7.83
3	1	3	3	12.76
4	2	1	3	12.50
5	2	2	2	14.13
6	2	3	1	14.74
7	3	1	3	7.92
8	3	2	1	8.37
9	3	3	2	15.57
<hr/>				
K_1 /(μm·min ⁻¹)	8.44	8.38	9.28	
K_2 /(μm·min ⁻¹)	13.79	10.11	12.51	
K_3 /(μm·min ⁻¹)	10.62	14.38	11.06	
R /(μm·min ⁻¹)	5.35	5.98	3.23	

分析表 2 数据可知,对蚀刻速率而言,喷淋压力的影响最大,掩膜间隙尺寸次之,蚀刻液温度的影响最小。综合考虑实验设备条件和加工过程中对蚀刻速率的要求,确定蚀刻加工工艺的最佳条件为:蚀刻液的喷淋压力 1.0 ~ 1.4 MPa,温度 35 ~ 40 °C,表面的掩膜间隙尺寸 150 ~ 200 μm。在该工艺条件下,蚀刻速率可保持较大值,有利于蚀刻加工的高效进行。

在掩膜间隙尺寸 200 μm 、蚀刻液喷淋压力 1.0 MPa、蚀刻液温度 40 $^{\circ}\text{C}$ 、蚀刻时间 4 min 的条件下进行了 3 次验证实验,蚀刻速率依次为 21.89, 22.24, 21.71 $\mu\text{m}/\text{min}$ 。可见在适宜的工艺参数范围内,蚀刻速率较高,大于 20 $\mu\text{m}/\text{min}$,满足蚀刻工艺高效的加工要求。同时在实验分析中还发现,在该工艺条件下,模具钢喷淋蚀刻加工的尺寸精度高,微结构的尺寸和形貌特征偏差小,应无应力存在,无毛刺,表面光洁度好,符合微细蚀刻加工高精度、高效率的要求。

3 结论

1) 蚀刻速率随掩膜间隙尺寸的增大而增加,当掩膜尺寸大于 150 μm 时,蚀刻速率增长较快。这是由于掩膜间隙尺寸增大造成蚀刻液的驻留面积增大,单位时间的蚀除量增加;同时反应放热增加,蚀刻液温度升高,进一步提高了蚀刻速率。

2) 较大的喷淋压力有利于蚀刻液的更新和蚀刻产物的排除,蚀刻反应充分,蚀刻速率较高。温度在一定范围内升高,蚀刻液活性增大,蚀刻效率提高,蚀刻速率增大。

3) 适宜的工艺参数范围为:蚀刻液的喷淋压力 1.0 ~ 1.4 MPa,温度 35 ~ 40 $^{\circ}\text{C}$,表面的掩膜间隙尺寸 150 ~ 200 μm 。

参考文献

- [1] 刘飘,堵永国,张为军,等. 三氯化铁溶液中影响铁镍合金蚀刻速率的因素[J]. 腐蚀与防护, 2007, 28(5): 238—241.
LIU Piao, DU Yong-guo, ZHANG Wei-jun, et al. Influencing Factors on Etching Rates of Iron Nickel Alloy Foils in Ferric Chloride Solution [J]. Corrosion and Protection, 2007, 28(5): 238—241.
- [2] 陈永生,汪建华. 多晶硅的 ECR 等离子体刻蚀[J]. 武汉化工学院学报, 2003, 25(1): 64—67.
CHEN Yong-sheng, WANG Jian-hua. Poly-Si Etching by CF_4 in Electron Cyclotron Resonance Plasma [J]. Journal of Wuhan Institute of Chemical Technology, 2003, 25(1): 64—67.
- [3] CZERWINSKI F, SZPUNARJ A, ERB U. Structural and Magnetic Characterization of Nanocrystalline Ni-20% Fe Permalloy Films [J]. Materials in Electronics, 2000, 11: 243—251.
- [4] TAKASHI M. The Processing Map and Optimization of Hot Workability of Ti53311S Titanium Alloy [C]//Transducers and Eurosensors '03. Boston: Actuators and Microsystems, 2003: 1542—1545.
- [5] LIU Jing-wei, FEDDERL Gary K. Silicon Undercut Characterization in a CMOS-MENS Process [C]//Transducers and Eurosensors '07. Lyon, France: Solid-state Sensors, Actuators and Microsystems, 2007: 505—508.
- [6] 李春甫. 蚀刻和侧蚀[J]. 网印工业, 2007(8): 36—37.
LI Chun-pu. Etching and Undercut [J]. Screen Printing Industry, 2007(8): 36—37.
- [7] 田波. 微带蚀刻工艺影响因素探讨[J]. 表面技术, 2004, 33(2): 50—51.
TIAN Bo. Study on Influencing Factors of the Etching Techniques of Microstrip [J]. Surface Technology, 2004, 33(2): 50—51.
- [8] 王建华,鄢捷年,李志勇. 邻菲罗啉分光光度法测试腐蚀速率[J]. 腐蚀与防护, 2007, 28(2): 93—96.
WANG Jian-hua, YAN Jie-nian, LI Zhi-yong. Phenanthroline Spectroscopic Analysis to Determine the Corrosion Rate [J]. Corrosion and Protection, 2007, 28(2): 93—96.
- [9] BAILEY III A D, VAN DE SANDEN M C M. Scaling of Si and GaAs Trench Etch Rates with Aspect Ratio, Feature Width and Substrate Temperature [J]. Microelectronics and Nanometer Structures, 1995, 13: 92—104.
- [10] CAKIR O. Chemical Etching of Aluminium [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 199: 337—340.
- [11] MCCLEAN J L. Etchant with Increased Etch Rate: US, 4462 861 [P]. 1984-07-31.
- [12] TAKECHI K, KANO H, OTSUKI S. Very High Rate and Uniform Glass Etching with HF/HCl Spray for Transferring Thin-film Transistor Arrays to Flexible Substrates [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2006, 45: 6008.
- [13] NOOR M M, BAIS B, MAJLIS B Y. The Effects of Temperature and KOH Concentration on Silicon Etching Rate and Membrane Surface Roughness [C]//Proceedings ICSE 2002. Penang, Malaysia: Semiconductor Electronics, 2002: 524—528.
- [14] 孙从征,管从胜. 不锈钢模具板化学蚀刻、抛光和电镀铬研究[J]. 电镀与精饰, 2006, 28(1): 14—17.
SUN Cong-zheng, GUAN Cong-sheng. Study on the Chemical-etching, Chemical-polishing and Chromium-electroplating of Stainless Steel Mould [J]. Plating and Finishing, 2006, 28(1): 14—17.
- [15] 朱绒霞. 铜表面化学蚀刻的研究[J]. 应用化工, 2005, 34(5): 277—279.
ZHU Rong-xia. Study on Chemistry Etching of Brass Superficial [J]. Applied Chemical Industry, 2005, 34(5): 277—279.
- [16] 莫凌,李德良,杨焰,等. 碱性蚀刻液影响因素的研究[J]. 表面技术, 2009, 38(1): 54—56.
MO Ling, LI De-liang, YANG Yan, et al. Study on Influencing Factors of Alkaline Etching Solution [J]. Surface Technology, 2009, 38(1): 54—56.