

文章编号 1004-924X(2014)05-1251-09

逐层微细电阻滑焊工艺制备三维微结构

徐斌^{1,3}, 伍晓宇^{1*}, 雷建国¹, 罗烽¹, 龚峰¹, 杜晨林², 阮双琛², 王振龙³

(1. 深圳大学机电与控制工程学院 深圳市模具先进制造技术重点实验室, 广东深圳 518060;

2. 深圳大学电子科学与技术学院 深圳市激光工程重点实验室, 广东深圳 518060

3. 哈尔滨工业大学机电工程学院 微系统与微结构制造教育部重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要:采用飞秒激光切割和微细电阻滑焊组合的方法制备了高深宽比的三维微结构。为了提高每层二维微结构的叠加精度和连接强度,用逐层微细电阻滑焊对每层二维微结构进行滑焊以获得较好的工艺参数。对上述工艺参数所制备的微结构进行了抗剪切能力测试,测试结果显示:随着滑焊放电次数的增加,微结构的极限剪切力由 8.04 N 逐渐增加至 65.97 N。而后,通过能量分散光谱仪(EDS)对电极的沉积效应进行了研究。最后,在 120 mW 的飞秒激光,50 $\mu\text{m/s}$ 的切割速度,0.21 V 的焊接电压,0.2 MPa 的焊接压强,100 ms 的预压时间,10 ms 的焊接时间以及 160 次的滑焊放电次数等工艺参数下制备了基本尺寸为 50 $\mu\text{m}\times 50 \mu\text{m}$ 的微方孔阵列以及微齿轮结构。实验结果表明:通过逐层微细电阻滑焊制备的微结构表面质量良好,各层微结构之间叠加较好,显示逐层微细电阻滑焊可以较好地保证三维微结构中各层二维微结构的连接强度和叠层精度。

关键词:三维微结构;飞秒激光切割;逐层微细电阻滑焊;沉积效应

中图分类号:TG661;TG485 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142205.1251

Fabrication of 3D microstructure with layer-by-layer micro-electric resistance slip welding

XU Bin¹, WU Xiao-yu^{1*}, LEI Jian-guo¹, LUO Feng¹, GONG Feng¹, DU Chen-lin²,
RUAN Shuang-chen², WANG Zhen-long³

(1. Shenzhen Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology for Mold & Die, College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

2. Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

3. Key Laboratory of Micro-systems and Micro-structures Manufacturing of the Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: wuxy@szu.edu.cn

Abstract: A 3D microstructure with a high depth-to-width ratio was fabricated by combining femtosec-

收稿日期:2013-12-09;修订日期:2014-01-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51175348, 51375315);广东省教育厅重点实验室开放基金资助项目(No. 201002)

ond laser cutting and micro-electric resistance slip welding. To improve laminated precision and connection strength of every layer 2D microstructure, the layer-by-layer micro-electric resistance slip welding was used for every layer 2D microstructure to obtain a better technological parameters. Under above process parameters, the anti-shear ability of 3D microstructure was tested. The test results indicate that with the number of the slip welding discharges increasing, the yield shear stress of microstructure increases from 8.04 N to 65.97 N. Then, the deposition effect of the tungsten bar electrode produced during layer-by-layer micro-electric resistance slip welding was also studied through the Energy Dispersive Spectrometer(EDS)analysis. Finally, micro array square holes with a size of $50\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$ and a micro-gear cavity were processed after 160 time's slip welding discharge under a femto-second laser power of 110 mW, a cutting speed of $50\ \mu\text{m}/\text{s}$, a welding voltage of 0.21 V, welding time of 10 ms, and a welding pressure of 0.2 MPa. The fabrication results show that the 3D microstructures processed by the layer-by-layer micro-electric resistance slip welding have good surface quality and the superposition between the layers of microstructure. Therefore, layer-by-layer micro-electric resistance slip welding can guarantee the connection strength and laminated precision of every layer 2D microstructure.

Key words: 3D micro-structure; femtosecond laser cutting; layer-by-layer micro-electric resistance slip welding; deposition effect

1 引言

近几年,随着微机械系统(Micro-Electro-Mechanical Sysytes, MEMS)的发展和应用,微型零件广泛地应用于各工业领域中。在此背景下,微型零件的制备成为各国学者研究的热点。为了获得用于加工微孔阵列的微电极, T. A. Fofonoff 等将微细电火花线切割(Wire Cut Electrical Discharge Machining, WCEDM)和化学腐蚀相结合获得了微电极阵列^[1-2]; K. Takahata 等通过光刻、电铸、注塑(Lithographie, Calvanofornung, Abformung, LIGA)技术制备了直径为 $20\ \mu\text{m}$ 的圆柱形微电极阵列,并用该微电极阵列在厚为 $50\ \mu\text{m}$ 的不锈钢板上加工出了直径为 $30\ \mu\text{m}$ 的微孔阵列^[3];通过微细电解加工(Electro Chemical Machining, ECM), Tsuneo Kurita 等以直径为 $500\ \mu\text{m}$ 的镍丝为原料加工出了基本尺寸为 $200\ \mu\text{m}$ 的棱柱形微电极,并用此电极在厚度为 $200\ \mu\text{m}$ 的镍板上加工出了微方孔结构^[4];

B. Ekmekci 等通过微细电火花加工技术制备出直径为 $250\ \mu\text{m}$ 的盲孔,并对微盲孔制备过程中微电极的损耗机理进行了研究^[5];为了避免微孔制备过程中的电解腐蚀, Do Kwan Chung 等在微细电火花加工工艺中使用了高频双极脉冲和去离子水,并通过上述工艺制备出了表面质量良好的微结构^[6-7];为了提高微结构的表面粗糙度, Jung-Chou Hung 等提出了通过微细电火花加工与电解抛光相结合制备微结构并通过该工艺制备出了表面粗糙度 R_a 为 $0.69\ \mu\text{m}$ 的微结构^[8];为了提高微结构的表面质量和加工精度, Minh Dang Nguyen 等提出了通过微细电火花加工结合微细电解加工来制备微结构^[9-10]。

国内学者也对微型零件的制备进行了深入研究。哈尔滨工业大学的赵万生等以微细电火花加工为基础制备出了微型脸谱、IC 插座以及球冠等具有复杂结构的三维微结构^[11-12]。大连理工大学的贾振元等则通过微细电火花技术制备出了深径比超过 10 的微小孔^[13]。为了获得含有曲面特征的真三维微结构,大连理工大学的杜立群等提出

了一种基于 UV-LIGA 技术的新工艺来制备三维微结构^[14]。为了获取超高微细金属微细阵列电极, 南京航空航天大学的朱荻等以 UV-LIGA 技术为基础制备出了高度为 900 μm 的柱型和人字型金属微细阵列电极结构^[15]。

以上述研究为基础, 本文采用微型化双工位金属箔叠层制造方法 (Micro Double-staged Laminated Object Manufacturing, Micro-DLOM) 来制备三维微结构。该工艺以分层实体制造工艺 (LOM) 为基础, 分为飞秒激光切割和微细电阻滑焊两个工位^[16-17]。

为了保证三维微结构中各层二维微结构的连接强度和叠层精度, 采用钨电极和铜电极的逐层微细电阻滑焊对多层二维微结构进行连接, 并对逐层微细电阻滑焊过程中电极的沉积效应进行了研究。

2 制作工艺

2.1 制作工艺

基于逐层微细电阻滑焊的 Micro-DLOM 的工艺过程如图 1 所示: (1) 在电阻焊工位, 通过若干个焊点将不锈钢箔固定在模具基体上。这些焊点是为了防止不锈钢箔的水平窜动从而提高飞秒激光的切割精度 (图 1a); (2) 将工作台移至飞秒激光工位, 由聚焦后的飞秒激光束切割不锈钢箔从而获得单层二维微结构 (图 1b); (3) 为了提高各层二维微结构的连接强度和叠层精度, 微细电极对每层二维微结构进行滑焊 (图 1c); (4) 通过点焊将新的一层不锈钢箔固定在模具基体上并且模具基体要下降一个步距 (图 1d); (5) 重复上述工艺过程 (图 1f 和图 1g), 最终通过多层二维微结构的叠加拟合从而获得所需的三维微结构 (图 1h)。

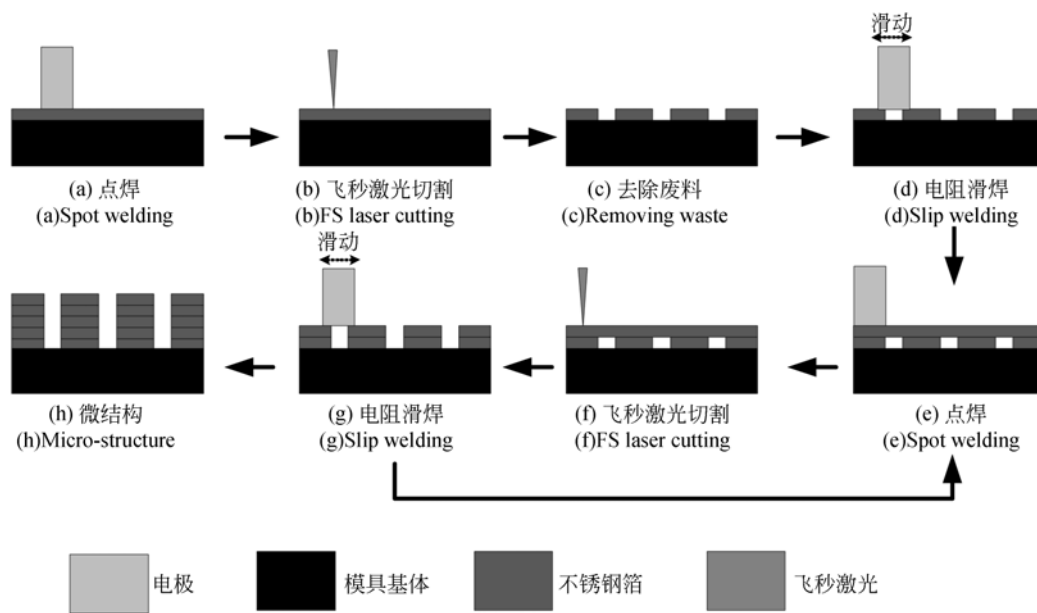


图 1 基于逐层微细电阻滑焊的 Micro-DLOM

Fig. 1 Micro-DLOM based on layer-by-layer micro-electric resistance slip welding

2.2 实验设备

飞秒激光器采用美国 COHERENT 公司生产的掺钛蓝宝石飞秒激光器, 振荡级型号为 Mira900, 放大级型号为 RegA9000, 最大能量为 4 μJ , 脉宽为 200 fs, 中心波长为 800 nm, 脉

冲重复频率为 250 kHz; 微型电阻焊机采用深圳韦伯特光电设备有限公司生产的逆变式直流电阻焊机 (型号: UF25B), 其焊接电压为 0.2~5 V; XYZ 运动平台为德国 PI 公司生产的高精密微纳米运动平台 (型号: M511. DD), 运动精

度为 $0.2 \mu\text{m}$; 实验材料为德国 Pincog 公司生产的 0Cr18Ni9 不锈钢箔, 其厚度为 $10 \mu\text{m}$; 采用日本 JEOL 公司生产的 JSM6490 扫描电子显微镜观察微结构的表面形貌并测量微结构的水平尺寸; 采用 EDS 功能对电极的沉积效应进行检测; 采用德国 Zwick/Roell 公司生产的万能拉伸机(型号: Z050)对逐层微细电阻滑焊后的微结构进行剪切试验获得微结构的极限剪切力。

3 微方孔阵列的制备

3.1 微结构制备的工艺参数

基于逐层微细电阻滑焊的 Micro-DLOM 工艺参数主要包括飞秒激光切割参数和逐层微细电阻滑焊参数。通过本文作者在文献[16]的研究可知: 当激光功率为 120 mW , 切割速度为 $100 \mu\text{m/s}$ 时, 飞秒激光切割所获得的二维微结构具有较好的切割边缘。

通过飞秒激光切割获得的单层微结构仅通过若干个焊点与钢箔连接, 这些焊点不可能完成各层微结构的完全连接, 因此各层微结构之间不可避免地存在间隙, 需要通过微细电阻滑焊来消除。制备叠层较少的微结构时, 为保证微结构的成型效率, 可以采用先点焊后滑焊的方法消除各层微结构之间的间隙^[16]。当制备叠层较多的微结构时, “先点焊最后滑焊”的连接方式不能有效地消除各层微结构之间的间隙, 此时微结构的连接强度和叠层精度便会受到影响。因此, 为保证微结构的叠层精度和连接强度, 采用逐层微细电阻滑焊工艺来完成多层微结构的连接。逐层微细电阻滑焊是在较小焊接电压的作用下, 通过微细电极对微结构进行逐层滑焊从而完成各层微结构之间的连接, 其原理图如图 2 所示。

使用直径为 $500 \mu\text{m}$ 的微细电极对单层微结构进行滑焊。进行滑焊时, 微细电极在空压机的作用下轻轻压在单层微结构的表面。在运动平台的作用下, 微细电极在微结构表面均匀滑动。在此过程中, 微结构的滑焊区域会产生

均匀的热量。最终, 在均匀热量的作用下, 各层微结构之间的间隙被逐渐消除, 从而实现各层二维微结构之间的完全连接。

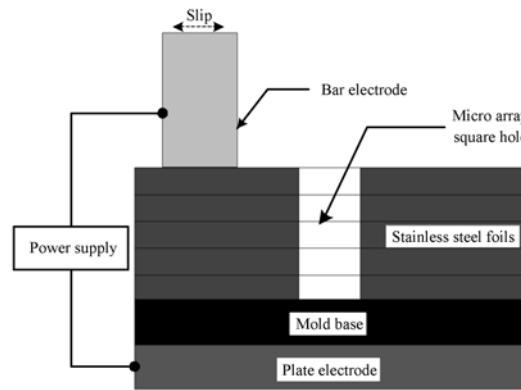


图 2 逐层微细电阻滑焊工艺的原理图

Fig. 2 Schematic diagram of layer-by-layer micro-electric resistance slip welding

微细电阻滑焊的工艺参数包括焊接电压、焊接压强、预压时间、放电时间、冷却时间逐层滑焊放电次数。在微细电阻滑焊过程中, 由于焊接压强、预压时间以及冷却时间对焊接效果的影响不大, 因此将这些参数设为正常值: 焊接压强 0.2 MPa , 预压时间 100 ms , 冷却时间 10 ms 。焊接电压和放电时间是指电阻焊机对微结构进行滑焊时, 施加在微细电极上的电压和微细电极放电一次的时间。焊接电压和放电时间越大越容易形成熔核, 熔核会对三维微结构的形状精度产生影响。因此, 为了保证三维微结构的形状精度, 这两个参数应该越小越好。通过实验设定焊接电压为 0.21 V , 焊接时间为 10 ms 。

逐层滑焊放电次数是微细电极在每层钢箔上热扩散焊接所施加的电脉冲个数。在上述参数确定的情况下, 该值对滑焊的结果影响最大。为获得合适的滑焊放电次数, 采用不同的滑焊放电次数对设计高度为 $50 \mu\text{m}$ 微方孔阵列进行了逐层微细电阻滑焊, 并对滑焊后微方孔阵列的高度进行测量, 测量结果如图 3 所示。通过实验结果可知, 随着滑焊放电次数由 50 次增加

至 200 次, 微方孔阵列的高度从 $65.3 \mu\text{m}$ 逐渐变为 $48.4 \mu\text{m}$ 。分析上述实验结果认为: 在逐层微细电阻滑焊过程中, 当逐层滑焊放电次数较小时, 焊接所产生的热量也较小, 这个热量不足以完成各层二维微结构的连接。随着放电次数的增加, 焊接所产生的热量得到逐渐累积, 在逐渐累积的热量作用下, 二维微结构之间通过热扩散焊接的方式连接, 各层二维微结构之间的间隙也被逐渐消除。由图 3 的实验结果还可以知道: 当滑焊放电次数为 160 次时, 可以获得高度方向上尺寸精度最佳的微方孔阵列 ($50.2 \mu\text{m}$)。

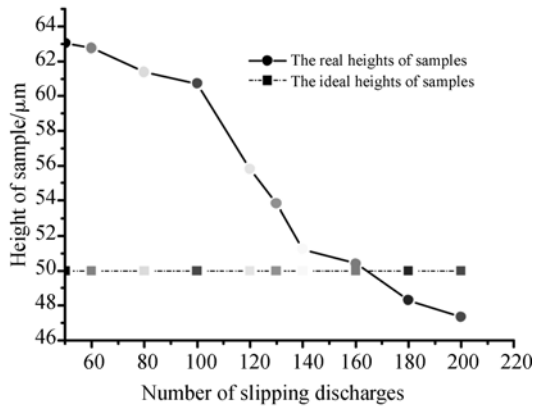


图 3 微结构高度随滑焊放电次数的变化

Fig. 3 Variation of micro cavity heights with different number of slip welding discharges

抗剪切能力能够反映各层二维微结构的连接强度。各层微结构所承受的极限剪切力越大, 说明各层微结构的连接强度越好。为了检测微细电阻滑焊的质量, 在不同滑焊放电次数下使用铜电极和钨电极分别进行逐层微细电阻滑焊, 并对滑焊后的三维微结构进行剪切试验, 试验结果如图 4 所示。通过实验结果可知: 当钨电极对微结构进行逐层微细电阻滑焊时, 随着滑焊放电次数由 20 次逐渐增加至 160 次, 微结构的极限剪切力由 8.04 N 逐渐增加至 65.97 N ; 当铜电极对微结构进行逐层微细电阻滑焊时, 随着滑焊放电次数由 20 次逐渐增加至 160 次, 微结构的极限剪切力由 10.99 N 逐渐增加至 58.2 N 。通过上述实验结果可知: 使用铜电极或钨电极对微结构进行滑焊, 滑焊后微结构的极限剪切力相差不大。

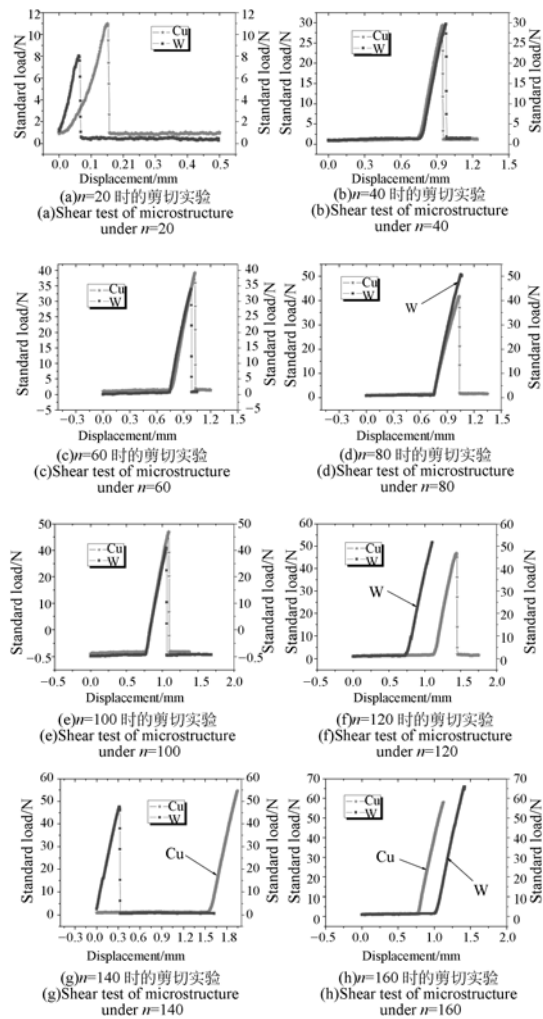


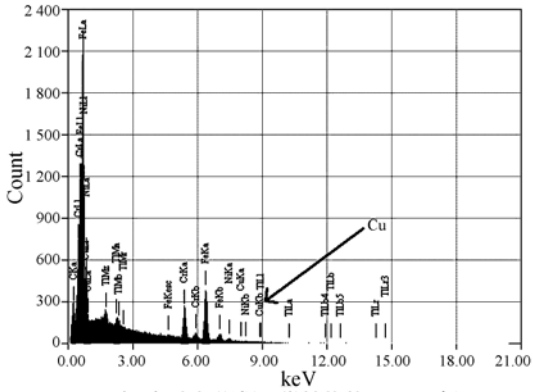
图 4 不同滑焊放电次数下微结构的剪切实验

Fig. 4 Shear tests of microstructure under different number of slip welding discharges

3.2 电极在逐层微细电阻滑焊过程中的沉积效应

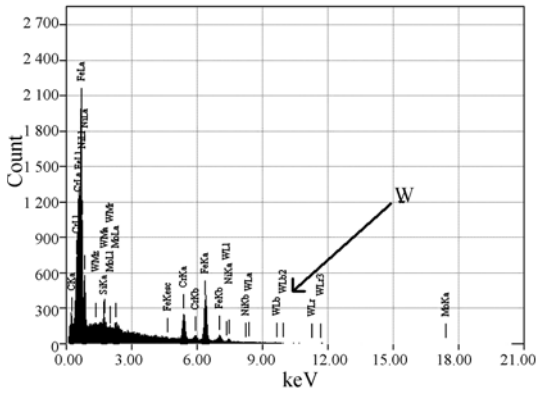
采用电极对微结构进行微细电阻滑焊的过程中, 电极会产生微小的损耗。在焊接热量的作用下, 这些损耗会附着在微结构表面, 将这种现象称为电极的沉积效应。电极的沉积会对微结构的表面形貌和机械性能产生影响。为了考察铜电极和钨电极的沉积效应, 分别采用这两种电极对微结构进行逐层微细电阻滑焊并对滑焊后微方孔阵列截面的不同位置进行能量分散光谱 (EDS) 分析, 分析结果如图 5、图 6 所示。由图 6 可知, 采用铜电极和钨电极滑焊后的现象基本相同: 沿微结构高度方向, 钨电极产生了沉积且沉积在微结

构上的钨元素呈波浪状分布;每层微结构的滑焊表面存在钨元素,滑焊表面的上方和下方区域也存在微量的钨元素,且下方区域的钨元素含量要高于上方区域;铜电极沉积的分布形式基本与钨电极一致。



(a) 采用铜电极滑焊后微结构的 EDS 分析

(a)EDS analysis of microstructure welded by copper electrode



(b) 采用钨电极滑焊后微结构的 EDS 分析

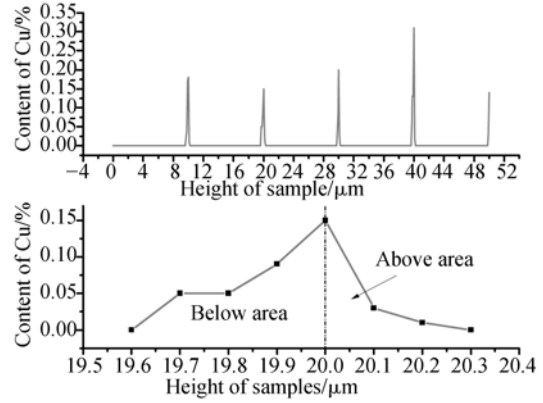
(b)EDS analysis of microstructure welded by tungsten electrode

图 5 微结构的 EDS 分析

Fig. 5 EDS analysis of microstructure

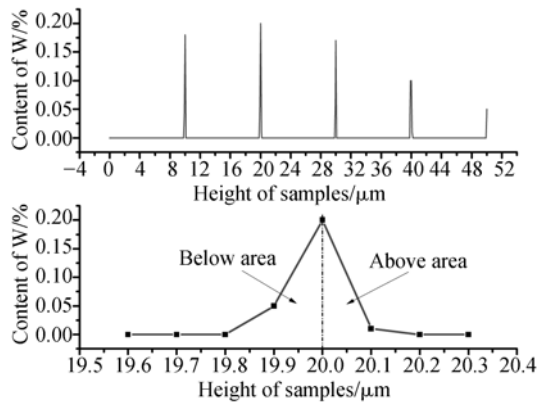
分析上述实验结果认为:在电极滑焊的过程中电极会产生微量的损耗,这些损耗会附着在微结构表面,因此每层微结构的滑焊表面会有钨元素(铜元素)的存在;每次滑焊会产生电阻热,在电阻热的影响下,附着在滑焊表面的钨元素(铜元素)会通过原子扩散作用向滑焊表面的上方区域和下方区域扩散,因此滑焊表面的上方区域和下方区域也会存在微量的钨元素(铜元素),造成了沿微方孔阵列高度方向钨元素或铜元素呈波浪状分布的现象;在微细电阻滑焊的作用下,钨元素(铜元素)在自身原子重力的作用下更趋向于向

滑焊表面的下方区域扩散,因此下方区域的钨元素(铜元素)含量要高于上方区域的钨元素(铜元素)。



(a) 微结构截面的铜元素含量分布

(a) Distribution of Cu in the cross section of microstructure



(b) 微结构截面的钨元素含量分布

(b) Distribution of W in the cross section of microstructure

图 6 微结构截面上钨元素和铜元素含量分布

Fig. 6 Distributions of W and Cu in the cross sections of microstructure

通过表 1 的试验数据可知:使用铜电极进行滑焊时,滑焊表面最高的铜元素含量为 0.31%,滑焊表面上方区域最高的铜元素含量为 0.03%,滑焊表面下方区域最高的铜元素含量为 0.17%,上方区域的厚度为 0.2 μm ,下方区域的厚度为 0.4 μm ;使用钨电极进行滑焊时,滑焊表面最高的钨元素含量为 0.2%,滑焊表面上方区域最高的钨元素含量为 0.01%,滑焊表面下方区域最高的钨元素含量为 0.1%,上方区域的厚度为 0.1 μm ,下方区域的厚度为 0.2 μm 。

分析上述试验数据认为:与铜电极相比,钨

电极具有较高机械性能和熔点。因此, 在相同的滑焊条件下, 钨电极在滑焊的过程中产生的损耗更少, 造成在滑焊区域内钨元素的沉积量比铜元素的沉积量小; 在电阻热的作用下, 熔点更低的铜元素的原子扩散比钨元素剧烈, 造成铜元素沉

积区域比钨元素沉积区域宽。沉积的铜元素或钨元素均会对微结构的机械性能产生影响, 因此铜元素或钨元素的沉积应越小越好。为了较好地保证微结构的机械性能, 应采用沉积更小的钨电极对微结构进行滑焊。

表 1 微结构截面的钨元素和铜元素含量分布

Tab. 1 Contents of W and Cu in the cross sections of microstructure

		第 5 层							第 4 层						
高度/ μm		50	49.9	49.8	49.7	40.3	40.2	40.1	40	39.9	39.8	39.7	39.6	30.2	30.1
Cu/%		0.14	0.03	0	0	0	0	0.02	0.31	0.13	0.13	0.06	0	0	0.03
W/%		0.05	0	0	0	0	0	0.01	0.1	0.1	0	0	0	0	0
		第 3 层							第 2 层						
高度/ μm		30	29.9	29.8	29.7	20.3	20.2	20.1	020	19.9	19.8	19.7	19.6	10.2	10.1
Cu /%		0.2	0.09	0.04	0	0	0.01	0.03	0.15	0.09	0.05	0.05	0	0	0.01
W/%		0.17	0.06	0	0	0	0	0.01	0.2	0.05	0	0	0	0	0
		第 1 层													
高度/ μm		10		9.9		9.8		9.7		9.6		0.1		0	
Cu/%		0.18		0.17		0.04		0.03		0		0		0	
W/%		0.18		0.04		0		0		0		0		0	

4 实验结果

以上述研究为基础, 通过钨电极的逐层微细电阻滑焊制备了微齿轮型腔和微方孔阵列, 结果如图 7 所示。其中单级微齿轮型腔的齿顶圆直径为 1 mm, 二级微齿轮型腔的齿顶圆直径为 1.8 mm, 三级微齿轮型腔的齿顶圆直径为 3 mm, 微方孔的水平尺寸为 $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$, 高度为 $50\ \mu\text{m}$ 。

通过扫描电子显微镜 (SEM) 对微结构的表面形貌进行观察, 结果表明微结构的表面质量好; 采用 SEM 中的 EDS 分析功能检测微方孔阵列截面的钨元素 (如图 5、图 6 所示), 测试结果显示: 在直径为 $500\ \mu\text{m}$ 的钨电极的逐层滑焊的作用下, 滑焊表面最高的钨元素含量为 0.2%, 滑焊表面上方区域最高的钨元素含量为 0.01%, 滑焊表面下方区域最高的钨元素含量为 0.1%, 这些微量的钨元素不足以影响微结构的整体机械性能和表面形貌; 采用万能拉伸机对微结构的抗剪切实验进行测试, 由测试结果可知微结构的极限剪切力为 65.97N。

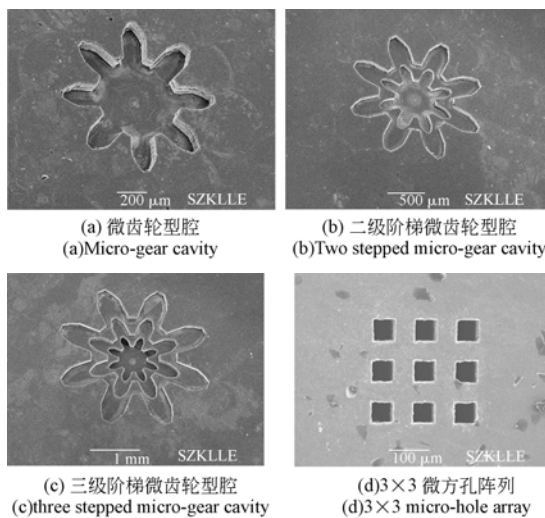


图 7 通过 micro-DLOM 获得的微结构 SEM 图
Fig. 7 SEM photograph of micro-structure fabricated by micro-DLOM

5 结 论

为了提高微结构的连接强度和叠层精度, 提出了逐层微细电阻滑焊工艺, 并通过微齿轮型腔和微方孔阵列的制备验证了该工艺的可行性。通

过对该工艺的详细研究发现:

(1)在飞秒激光功率为 120 mW, 切割速度为 50 $\mu\text{m/s}$, 焊接电压为 0.21 V, 焊接压强为 0.2 MPa, 预压时间为 100 ms, 焊接时间为 10 ms, 逐层滑焊放电次数为 160 次的工艺参数下获得了表面质量良好, 极限剪切力为 65.97 N 的微结构。

2)在逐层滑焊的过程中, 钨电极会产生微小的损耗并且这些损耗会附着在微结构表面。在焊

接热量的作用下, 这些钨电极的损耗会向钢箔中沉积, 因此钨元素的沉积在沿微结构高度方向呈波浪状分布。通过 EDS 分析钨元素的沉积结果发现:滑焊表面最高的钨元素含量为 0.2%, 滑焊表面上方区域最高的钨元素含量为 0.01%, 滑焊表面下方区域最高的钨元素含量为 0.1%, 上方区域的厚度为 0.1 μm , 下方区域的厚度为 0.2 μm 。本文的工作可较好地保证三维微结构中各层二维微结构的连接强度和叠层精度。

参考文献:

- [1] FOFONOFF T, MARTELLS S, HUNTER I. Assembly-ready brain microelectrode arrays [C]. *Proceedings of the 25th Annual International Conference of the IEEE EMBS*, 2003, 2:17-21.
- [2] FOFONOFF T, MARTELLS S, NICHOLAS G, et al. Microelectrode array fabrication by electrical discharge machining and chemical etching [J]. *IEEE Transaction on Biomedical Engineering*, 2004, 6(51):890-895.
- [3] TAKAHATA K, YOGESH B. Batch mode micro-electro-discharge machining [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2002, 11(2):102-110.
- [4] TSUNEO K, KUNIO C, SHINICHIROU K, et al. A study of three-dimensional shape machining with an EC μ M system [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, 46(12-13):1311-1318.
- [5] EKMEKCI B, ATAKAN S. Debris and consequences in micro electric discharge machining of micro-holes [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2013, 65(2):58-67.
- [6] DO K C, HONG S S, CHONG N C. Modeling and experimental investigation for electrolytic corrosion prevention in high frequency micro EDM using deionized water [J]. *Microsyst Technol.*, 2012, 18(6):703-712.
- [7] DO K C, HONG S S, BO H K, et al. Surface finishing of micro-EDM holes using deionized water [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, 19:1-7.
- [8] HUNG J C, YAN B H, LIU H S, et al. Micro-hole machining using micro-EDM combined with electropolishing [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16:1480-1486.
- [9] NGUYEN M D, MUSTAFIZUR R, WONG Y S. Modeling of radial gap formed by material dissolution in simultaneous micro-EDM and micro-ECM drilling using deionized water [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2013, 66(3):95-101.
- [10] NGUYEN M D, MUSTAFIZUR R, WONG Y S. Simultaneous micro-EDM and micro-ECM in low-resistivity deionized water [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2012, 54-55(3-4):55-65.
- [11] 赵万生, 李志勇, 王振龙, 等. 微三维结构电火花铣削关键技术研究[J]. *微细加工技术*, 2003, 9:49-55.
ZHAO W SH, LI ZH Y, WANG ZH L, et al. Research on key techniques of 3D micro-EDM milling[J]. *Micro-fabrication Technology*, 2003, 9:49-55. (in Chinese)
- [12] 王振龙, 赵万生, 刘光壮. 基于分层制造原理的微细电火花加工技术研究[J]. *机械工程学报*, 2002, 2(38):22-26.
WANG ZH L, ZHAO W SH, LIU G ZH. Research on laminated removal micro-EDM [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 2(38):22-26. (in Chinese)
- [13] 贾振元, 任小涛, 刘巍, 等. 大深径比微小孔快速电火花加工系统[J]. *光学 精密工程*, 2009, 12(17):3055-3061.
JIA ZH Y, REN X T, LIU W, et al. Rapid EDM systems for micro and small holes with high-aspect-ratio[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 12(17):3055-3061. (in Chinese)
- [14] 杜立群, 莫顺培, 张余升, 等. UV-LIGA 和微细电火花加工技术组合制作三维金属微结构[J]. *光学*

精密工程, 2010, 18(2):363-368.

DU L Q, MO SH P, ZHANG Y SH, *et al.*. Fabrication of 3D metal microstructure based on UV-LIGA and micro-EDM technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2):363-368. (in Chinese)

- [15] 胡洋洋, 朱荻, 李寒松, 等. UV-LIGA 制作超高微细阵列电极技术[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3):670-675.

HU Y Y, ZHU D, LI H S, *et al.*. Fabrication of ultra-high metal micro electrode array using UV-LIGA technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3):670-675. (in Chinese)

- [16] 徐斌, 伍晓宇, 凌世全, 等. 飞秒激光切割与微细

电阻滑焊组合制备三维金属微结构[J]. 光学精密工程, 2012, 20(8):1312-1324.

XU B, WU X Y, LING SH Q, *et al.*. Fabrication of 3D metal micro-structure based on fs laser cutting and micro electric resistance slip welding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8):1312-1324. (in Chinese)

- [17] XU B, WU X Y, LING SH Q, *et al.*. Study on tungsten electrode deposition effect of 3D metal micro-mold during laminated slip welding [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 67:2529-2536.

作者简介:



徐 斌(1985—), 男, 山东临沂人, 博士后, 2013 年于深圳大学获得博士学位, 现为哈尔滨工业大学博士后, 主要从事飞秒激光精密加工, 微细加工技术, 微模具制造方面的研究。E-mail: xubin_szu@163.com



伍晓宇(1963—), 男, 四川仁寿县, 教授, 博士生导师, 1995 年于华中科技大学获博士学位, 主要从事激光快速成形、微成形与微模具方面的研究。E-mail: wuxy@szu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)