

表面质量控制及检测

三乙醇胺对铝合金试件滚磨光整加工作用的影响分析

石慧婷^{a,b}, 李秀红^{a,b}, 杨胜强^{a,b}, 李永刚^{a,b}, 高志森^{a,b}

(太原理工大学 a.机械工程学院 b.精密加工山西省重点实验室, 太原 030024)

摘要: **目的** 探索三乙醇胺 (TEA) 在铝合金试件滚磨光整加工中的作用机理。**方法** 在相同条件下, 利用不同浓度三乙醇胺溶液, 对铝合金表面进行滚磨光整加工实验。采用粗糙度测量仪测试试件加工前后的表面粗糙度值的变化。采用电子天平测试试件加工前后的质量变化, 通过计算得出试件的材料去除率。采用 X 射线衍射仪 (XRD) 分析试件表面的晶格畸变。采用扫描电子显微镜 (SEM) 分析试件的表面形貌。采用能谱仪 (EDS) 分析试件表面元素的变化情况。**结果** 在加工初期, 未添加三乙醇胺时, 表面粗糙度值的变化率和材料去除率最小, R_a 从 $1.245\ \mu\text{m}$ 减小到 $0.934\ \mu\text{m}$, MRR 为 $0.223\ \text{mm}^3/\text{min}$; 添加体积分数为 9% 的三乙醇胺时, 表面粗糙度值的变化率最大, R_a 从 $1.184\ \mu\text{m}$ 减小到 $0.558\ \mu\text{m}$; 添加体积分数为 5% 的三乙醇胺时, 材料去除率最大, MRR 为 $0.445\ \text{mm}^3/\text{min}$ 。晶格畸变量的最大值为 0.0045, 最小值为 0.0008。加工后试件表面富集 Si 元素。**结论** 在加工初期, 三乙醇胺提高了铝合金试件的滚磨光整加工效率。在液体介质和磨块对试件的耦合作用下, 固体表面活性提高, 试件表面产生晶格畸变, 引起机械力化学效应。Si 颗粒保护了 Al 基, 使得在加工后期的微量磨削作用减弱, 材料的去除率和表面粗糙度保持相对恒定状态。

关键词: 滚磨光整加工; 三乙醇胺; 铝合金; 液体介质; 晶格畸变; 机械力化学

中图分类号: TG178 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)10-0295-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.10.040

Discussion on Influence of Triethanolamine to Aluminum Alloy Specimen in Barrel Finishing

SHI Hui-ting^{a,b}, LI Xiu-hong^{a,b}, YANG Sheng-qiang^{a,b}, LI Yong-gang^{a,b}, GAO Zhi-sen^{a,b}

(a.School of Mechanical Engineering, b.Shanxi Key Laboratory of Precision Machining,
Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the mechanism of triethanolamine (TEA) in the barrel finishing of aluminum alloy specimens. Barrel finishing experiments were carried out on aluminum alloy surface with different concentrations of triethanolamine solution under the same conditions. Changes in roughness value of specimen before and after finishing were tested by a roughness measuring instrument. Changes in mass of specimen before and after finishing were tested by an electronic balance,

收稿日期: 2018-07-03; 修订日期: 2018-09-20

Received: 2018-07-03; **Revised:** 2018-09-20

基金项目: 国家自然科学基金 (U1510118, 51345010); 山西省自然科学基金 (201701D121073)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (U1510118, 51345010) and Natural Science Foundation of Shanxi Province of China (201701D121073)

作者简介: 石慧婷 (1992—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为精密表面光整加工技术。

Biography: SHI Hui-ting (1991—), Female, Doctor, Research focus: finishing technology of the precision surface.

通讯作者: 杨胜强 (1964—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精密表面光整加工技术。邮箱: tutysq@263.net.cn

Corresponding author: YANG Sheng-qiang (1964—), Male, Doctor, Professor, Research focus: finishing technology of the precision surface.
E-mail: tutysq@263.net.cn

and the material removal rates were calculated. The lattice distortion of the specimen surface was analyzed by X-ray diffractometer (XRD). The morphology of the specimen surface was analyzed by scanning electron microscope (SEM). The changes of the surface elements of the specimen were analyzed by energy dispersive spectrometer (EDS). At the initial stage of processing, the minimum variation ratio of roughness and the minimum material removal rate without the effect of triethanolamine were obtained. R_a value decreased from initial $1.245\text{ }\mu\text{m}$ to $0.934\text{ }\mu\text{m}$ and MRR was $0.223\text{ mm}^3/\text{min}$. The maximum variation ratio of roughness was obtained with the effect of triethanolamine of which the volume concentration ratio was 9%. R_a value decreased from initial $1.184\text{ }\mu\text{m}$ to $0.558\text{ }\mu\text{m}$. The maximum material removal rate was obtained with the effect of triethanolamine of which volume concentration ratio was 5%. The material removal rate was $0.445\text{ mm}^3/\text{min}$. The maximum value of lattice distortion was 0.0045 and the minimum value of lattice distortion was 0.0008. After processing, the Si element was enriched on the specimen surface. At the initial stage of processing, the triethanolamine can improve the processing efficiency of aluminum alloy specimen. The surface activity of solids can be increased under the coupling effect by the liquid medium and the solid medium to the specimen, and the lattice distortion is produced on the specimen surface. Therefore, the mechano-chemistry effect is caused. The Si particles protects the Al base, and this phenomenon weakens the micro-grinding in the later processing. Therefore, the material removal rate and surface roughness keep constant value respectively.

KEY WORDS: barrel finishing; triethanolamine; aluminium alloy; liquid medium; lattice distortion; mechano-chemistry

光整加工技术旨在提高零件表面质量。滚磨光整加工技术是一种典型的光整加工技术,加工过程中主要是以碰撞作用、滚压作用、微量磨削作用、液体介质作用等综合实现光整加工目的。依托太原理工大学的零件表面光整加工技术山西省科技创新重点团队,针对滚磨光整加工技术研发与推广应用持续了 30 余年,重点是各类设备开发及相关几何参数和运动参数的优化、针对不同加工需求研究合理工艺过程及工艺参数、不同颗粒加工介质的特性分析及制备等。课题组近年来主要针对磨块的运动状态、材料特性,从提高加工效率的角度进行了深入的分析与探究,但针对液体介质对滚磨光整加工作用方面的具体研究相对空缺。目前针对液体介质对滚磨光整加工的作用的研究与分析相对较少^[1]。

随着表面质量的要求越来越高,许多制造方法及工艺都使用特定的液体介质,改进了很多类型的机械加工方法^[2],在化学机械抛光、研磨抛光等光整技术中,液体介质中化学物质的作用已有较为深入的研究。通过对实际生产的调研,发现液体介质对滚磨光整加工的影响程度不低于固体介质,因而借鉴研磨抛光光整加工过程中有关磨液作用的研究。如 Y. Tomita 利用三种不同成分的磨液对铝合金工件进行加工,以工件表面去除率和表面粗糙度为标准,以乳浊液浓度、维持加工性能的强弱、研磨石表面铝氧化物颗粒的附着情况为影响因素,阐述了磨液对研磨加工的作用^[3]。李鹏鹏等^[4]利用高速研磨抛光系统,将三乙醇胺浓度设为工艺参数,分析其对蓝宝石圆片的去除率、表面粗糙度以及表面形貌的影响。李军等^[5]在研磨液中添加适量的三乙醇胺,延长了抛光机中研磨垫的使用寿命,提高了工件的表面质量。王占奎等^[6]利用研磨抛光系统,分析了三乙醇胺和去离子水对镁铝尖晶石产生的化学作用,并从化学组分及键价结构角

度探讨了三乙醇胺的作用机理。上述研究表明,在研磨抛光系统中,磨液可以提高加工效率,并且三乙醇胺作为研磨液的主要成分之一,对工件表面加工起着至关重要的作用,而三乙醇胺也为滚磨光整加工中液体介质的主要成分,所以可从三乙醇胺对滚磨光整加工效率的影响为切入点,分析液体介质对滚磨光整加工的影响机理。

为解决能源危机问题和环境污染问题,新能源汽车成为国家战略发展的重点。而动力电池组是新能源汽车组成的核心部件,其电池外壳常以 1060 铝合金制造。为保证动力电池的使用寿命,可利用滚磨光整加工技术提高铝合金的表面质量。本文从三乙醇胺水溶液能够与 1060 铝合金表面产生化学作用及新表面层的角度出发,探讨在三乙醇胺的作用下,采用滚磨光整加工技术,分析试件表面化学成分、键合作用的变化原因,以期为进一步研究液体介质对滚磨光整加工的作用机理提供理论依据及实践参考。

1 实验

实验材料为铝合金 1060,大小为 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 。试件由激光切割形成,上下表面经过砂纸打磨。实验采用直径为 3 mm 的球形棕刚玉磨块作为固体介质。液体介质由去离子水和三乙醇胺配比组成,三乙醇胺的体积分数为 0%、1%、3%、5%、7%、9%。采用 BJL-LL05 型立式离心式滚磨光整加工设备,设备主要参数如表 1 所示。

在转速为 300 r/min 、磨液体积为 300 mL 、磨块体积为 600 mL 的参数下进行加工实验。每隔 1 min 记录试件表面粗糙度 R_a 和质量 m ,考察不同浓度的三乙醇胺溶液对铝合金件的材料去除量、表面粗糙度的影响。实验结束后,利用失重法计算加工 1、5 min

表 1 BJL-LL05 实验设备主要参数
Tab.1 Main parameters of BJL-LL05 experimental equipment

Parameters	Values
Power/kW	1.5
Transmission ration	-1
Volume of the drum	1.25 L×4
Revolution/(r·min ⁻¹)	300

后的材料去除率（MRR，单位 mm³/min）：

$$MRR = \frac{m_1 - m_2}{t \times \rho} \tag{1}$$

式中： m_1 和 m_2 分别为工件加工前后的质量； t 为研磨时间； ρ 为试件密度。

2 测试

2.1 制备待测试件

将未进行加工的铝合金试件选定为待测试件 1。在 500 mL 的烧杯中配制 5%（体积分数）的三乙醇胺溶液 100 mL，将铝合金试件浸泡在烧杯中 4 h，而后取出自然风干，将其定为待测试件 2。选择 5%（体积分数）的三乙醇胺溶液作为液体介质，利用立式离心式滚磨光整加工设备，添加直径为 3 mm 的球形棕刚玉磨块，在转速为 300 r/min 的情况下分别加工 1、3、5 min，由此制备检测所需的试件 3、试件 4、试件 5。

2.2 测试设备

采用 SEM 扫描电子显微镜分析所有试件的表面形貌。采用 X-out/INCA150 能谱仪分析所有试件表面元素含量。采用 XRD 衍射仪分析试件 1 和试件 5 的表面物相与晶格畸变情况。

2.3 晶格畸变分析方法

由于试件加工前后，衍射峰产生少量的位移，并且晶格的畸变会引起峰形展宽的现象，所以利用峰形展宽来计算畸变量 ε ^[7]：

$$\varepsilon = \frac{\beta}{4 \times 57.3 \times \tan \theta} \tag{2}$$

式中： β 为谱峰的积分宽度； θ 为衍射角。

利用 Jade 软件进行峰形拟合，其形状用 Voigt 函数 $V(x)$ 近似描述，通过软件计算并读取试件的半高宽（FWHM） $2\omega_v$ 与积分宽度 β_v ，谱峰的形状因子用 $2\omega_v/\beta_v$ 来表示（Voigt 函数的形状因子在 0.636 62~0.939 49 之间）。通过 Voigt 函数中 β_{GS} 经验公式（式（3））可计算出谱峰的 Gauss 积分宽度，并且分别计算试件加工前后的 Gauss 积分宽度^[8-9]，利用公式（4）计算谱峰的展宽度 $\Delta\beta$ ，最后由公式（2）计算出平均畸变量 ε ，其中衍射角 θ 取加工前试件的值。

Voigt 函数中 β_{GS} 经验公式为：

$$\frac{\beta_{GS}}{\beta_v} = b_0 + b_{0.5} \sqrt{\left(\frac{2\omega_v}{\beta_v} - \frac{2}{\pi}\right)} + b_1 \frac{2\omega_v}{\beta_v} + b_2 \left(\frac{2\omega_v}{\beta_v}\right) \tag{3}$$

展宽度为：

$$\Delta\beta = \sqrt{\beta_{FGS}^2 - \beta_{BGS}^2} \tag{4}$$

其中， $b_0=0.6420$ ， $b_{0.5}=1.4187$ ， $b_1=-2.2043$ ， $b_2=1.8706$ 。

3 结果与讨论

3.1 不同浓度三乙醇胺溶液对表面粗糙度的影响

图 1 为不同浓度的三乙醇胺溶液作用下试件的表面粗糙度值随加工时间的变化情况。从图 1 可以看出，试件在添加有三乙醇胺的溶液中加工 1 min 后，表面粗糙度值明显下降。其中添加了 9% 的三乙醇胺时，表面粗糙度值的变化率最大， R_a 从 1.184 μm 减小到 0.558 μm ；在 2 min 到 5 min 的加工时间内，表面粗糙度值变化不明显，仅为上下波动。工件在未添加三乙醇胺的溶液中加工 1 min 后，表面粗糙度值下降， R_a 从 1.245 μm 减小到 0.934 μm ，但其下降速率低于其余添加有三乙醇胺作用下的下降速率。

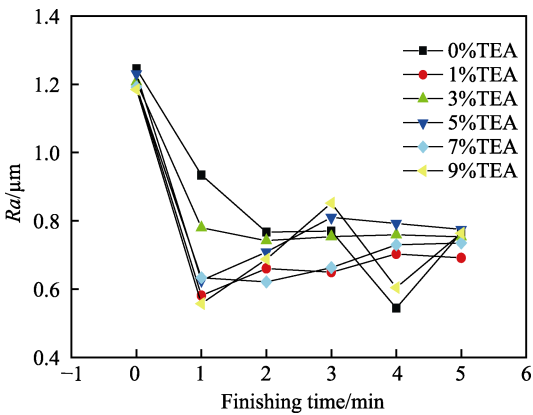


图 1 不同浓度三乙醇胺溶液对表面粗糙度值的影响曲线
Fig.1 Influence curves of triethanolamine solution in different concentrations on surface roughness

由图 1 可知，加工 1 min 后，试件在三乙醇胺作用下的表面粗糙度值明显低于未添加三乙醇胺作用下的表面粗糙度值，表现出在加工初期，三乙醇胺具有提高滚磨光整加工效率的作用，即在加工的第 1 min 内，液体介质产生了较为明显的作用。由于试件表面有凸起、凹坑，凸起部分的相对活性较大，且与三乙醇胺优先产生化学作用，加快了削凸的作用，使得表面粗糙度值明显下降。但是在随后时间的加工中，这种优势并未持续体现，反而随着加工的进行，表面粗糙度值略微增大且保持在一定范围内。这表明，三乙醇胺提高试件表面光整的效率作用仅在实验初期明显体现出来。

3.2 不同浓度三乙醇胺溶液对材料去除率的影响

图2为不同浓度三乙醇胺溶液作用下分别加工1、5 min后的材料去除率。加工1 min后,未添加三乙醇胺情况下的材料去除率明显低于其余添加了三乙醇胺情况下的材料去除率,未添加三乙醇胺情况下的MRR为 $0.223 \text{ mm}^3/\text{min}$ 。所有添加了三乙醇胺溶液的5组实验的材料去除率相对较接近,其中添加了5%的三乙醇胺情况下的材料去除率最大,其MRR为 $0.445 \text{ mm}^3/\text{min}$,随三乙醇胺浓度的增加,呈现出先略微递增后趋于平缓的趋势。加工5 min后,未添加三乙醇胺情况下的材料去除率仍略低于其余添加了三乙醇胺情况下的材料去除率,但差值缩小。

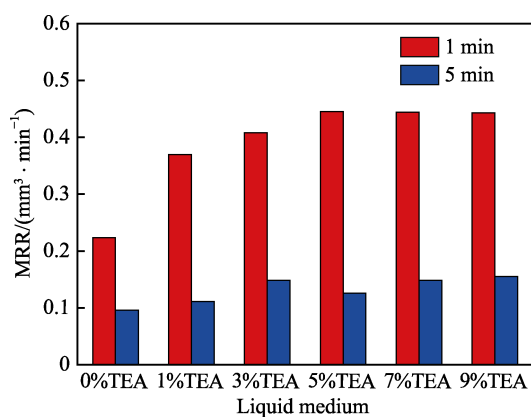


图2 不同浓度三乙醇胺溶液加工不同时间的材料去除率对比

Fig.2 Comparison of material removal rates of triethanolamine solution in different concentrations for different processing time

在加工初期,三乙醇胺与试件产生化学作用,将试件表面软化,促进了磨块对试件的微量磨削作用,使其将试件表面的凸起处快速去除,使得材料的去除率较大。但随着加工时间的增加,三乙醇胺与试件产生的化学作用的影响效应大大降低,使得未添加三乙醇胺情况下的材料去除率与其余添加了三乙醇胺情况下的材料去除率相接近,缩小了差值。

3.3 三乙醇胺作用下试件表面物相和晶格畸变情况

图3为试件在5%TEA作用下滚磨光整加工前后的XRD图谱。经Jade软件分析为Al相的峰谱图,加工前试件的择优取向晶面为(200)面,加工后晶面(111)与(200)对应峰的强度明显增强,并且表面的择优取向晶面从(200)变为了(111)。显然,这与滚磨光整加工作用必然有关。表2是通过计算得到的经过滚磨光整加工后的试件表面的平均晶格畸变量。虽然滚磨光整加工前后衍射峰的位移很小,但可以观察到峰位有略微的移动,峰的半高宽也发生了明显改变,不同晶面也发生了一定的畸变。其中,晶面(111)的晶格

畸变量最大,为0.0045;晶面(311)的晶格畸变量最小,为0.0008。晶粒受机械力作用,发生晶格畸变,原子间距发生变化,并会伴随着产生晶格畸变能。晶格畸变会使化学平衡和活化能等发生改变,并且使得体系处于活性状态,使其活性增高。

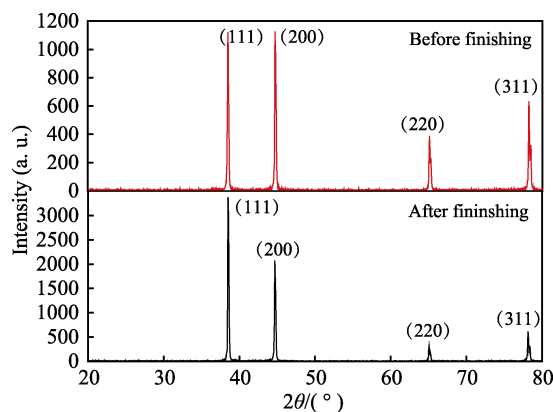


图3 5%TEA作用下滚磨光整加工前后的XRD图谱
Fig.3 XRD of 5% TEA before and after barrel finishing

表2 试件表面晶格畸变量
Tab.2 Lattice distortion of specimen surface

Specimen	Peak parameter	(111)	(200)	(220)	(311)
Before finishing	2θ	38.390	44.634	64.908	78.032
	$2\omega_v$	0.130	0.132	0.142	0.144
	β_v	0.166	0.166	0.178	0.189
	$2\omega_v/\beta_v$	0.7831	0.7952	0.7978	0.7619
	β_{BGS}	0.7215	0.7468	0.7522	0.6762
After finishing	2θ	38.410	44.602	64.891	77.992
	$2\omega_v$	0.122	0.132	0.129	0.147
	β_v	0.148	0.163	0.160	0.191
	$2\omega_v/\beta_v$	0.8243	0.8098	0.8063	0.7696
	β_{HGS}	0.8072	0.7773	0.7699	0.6928
Lattice distortion	ε	0.0045	0.0023	0.0011	0.0008

滚磨光整加工是在机械力的作用下,使液体介质和固体介质对试件产生耦合作用。试件在机械力的作用下,通过液体介质、固体颗粒施加机械能(即摩擦磨损),使得试件表面晶格产生畸变,固体物质的活性提高,并可以诱发瞬间的化学反应^[10-13]。又由于机械力对试件表面施加微量磨削作用,使得反应产物不断被带走并脱离试件表面,所以可以维持反应的进行,并使得试件表面的键合作用和表面能持续发生变化。

3.4 三乙醇胺作用下试件表面形貌及元素含量的变化

图4为试件表面的微观形貌。由图4a可见,试件表面有明显的沟犁状磨痕。经过三乙醇胺溶液浸泡的试件,如图4b可见,磨痕变浅且变窄。经过滚磨

光整加工的试件，如图 4c、d、e 可见，沟犁状磨痕随着加工时间的增长呈现出消失不见的情况。对比图 4a、b 可知，三乙醇胺溶液优先与试件表面凸起处产

生化学作用，并将试件表面的物质溶解于三乙醇胺溶液中，使得试件表面平坦化。

如图 5 所示，未加工的试件 1 表面含 Al、O 元

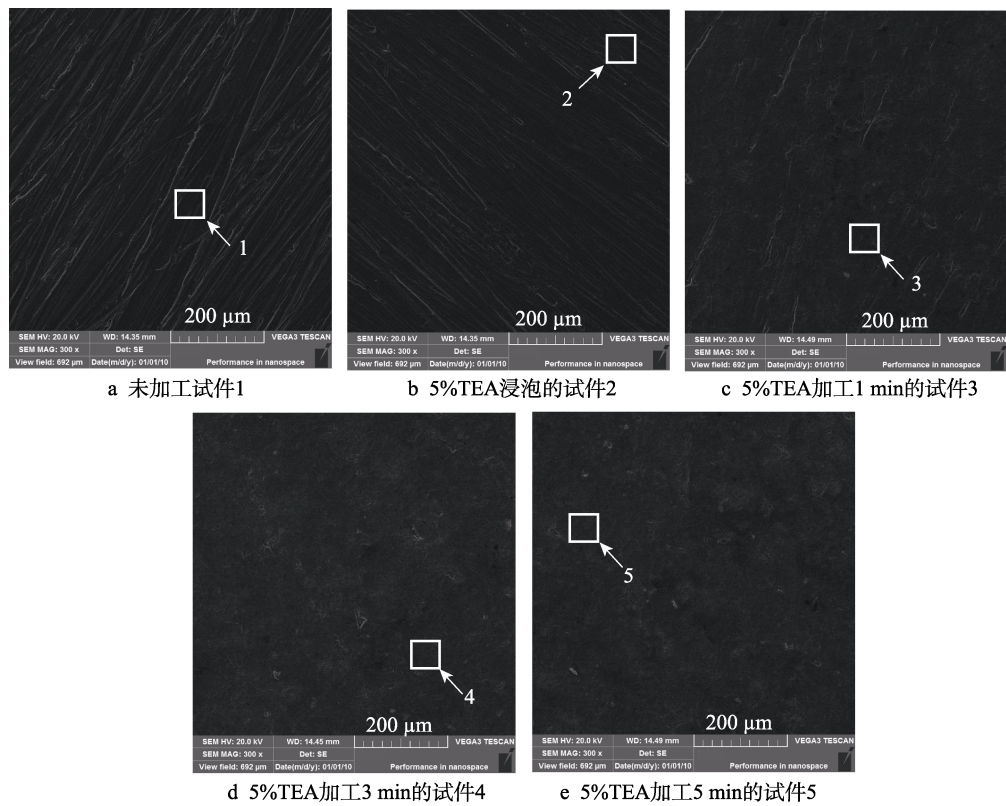


图 4 试件的表面形貌

Fig.4 SEM of different specimen surfaces: a) before finishing, b) deep in 5% TEA, 5% TEA barrel finishing after 1 min (c), 3 min (d) and 5min (e)

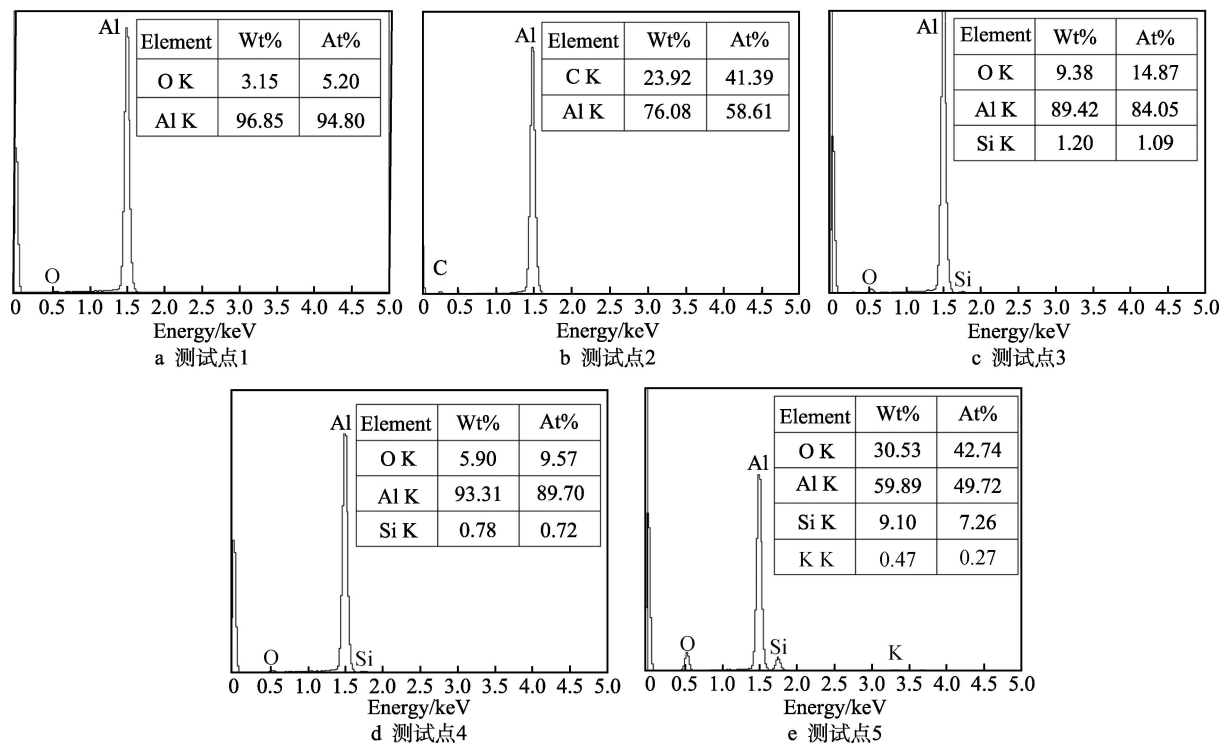


图 5 图 4 中各点的 EDS 分析

Fig.5 EDS analysis of a) point 1, b) point 2, c) point 3 and d) point 4 in Fig.4

素,且Al原子所占的比例高达94.80%;浸泡后的工件表面含Al、C元素,且C原子所占比例高达41.39%;添加有三乙醇胺溶液进行滚磨光整加工1、3、5 min后,工件表面均含有Al、O、Si元素,并且在加工5 min后表面出现微量的K元素。试件1表面检测出少量O元素,表明其表面含有一定比例的杂质,即其化学成分并不均匀,而三乙醇胺溶液属于碱性溶液,含有 OH^- ,在试件的局部表面会产生一定的腐蚀微电池效应,Al相作为阳极而发生电化学溶解 $\text{Al}=\text{Al}^{3+}+3\text{e}^{-[14]}$ 。将试件浸泡在三乙醇胺溶液中时,试件表面明显产生气泡,浸泡后试件表面并未检测出O元素,但C元素含量明显增多,可能是三乙醇胺与试件产生化学作用,O元素则以气体的形式被置换出表面。

进行滚磨光整加工后的试件表面未检测出C元素,而是在Al、O元素的基础上增加了Si元素。滚磨光整加工中使用的磨块的主要成分是棕刚玉,其中含有Si元素。滚磨光整加工过程可以将其描述为施加于固体、液体、气体物质上多种形式的机械能作用过程,这种作用过程可以引起一定物质的物理化学变化现象。在这种特殊的机械力化学作用的效应下,导致滚磨光整加工后的试件表面元素与直接浸泡在三乙醇胺溶液中的表面元素以及未进行任何加工的试件表面元素均不一致。

3.5 三乙醇胺对铝合金表面的作用机理分析

加工初期,三乙醇胺与试件表面产生腐蚀作用,在试件表面形成腐蚀微电池,Al失去电子后变成带正电荷的离子溶于液体介质中,使得试件表面软化。在磨块的碰撞、滚压、划擦作用下,该软化层更易被去除,并且随着该软化层的去除,试件表面产生了新生表面,从而提高了材料的去除率及表面粗糙度。但随着加工时间的增加,在机械力化学的作用下,不仅会使得试件表面与三乙醇胺溶液的反应活性增大,也会使得磨块表面的活性增大,使得来自于磨块中Si—O键断裂后产生新的Si—Si键,并以Si颗粒的形式键合在试件表面。当试件表面产生摩擦磨损作用时,会在Si/Al交界面产生应力集中,使得Si颗粒从Al基上脱落^[15-16]。而经过机械力化学作用后,试件表面键合的Si颗粒可能以球状形态键合在Al基上,其键合力相对较大,应力集中情况相对较弱,使得Si颗粒难以脱落,且Si颗粒与三乙醇胺未产生化学作用并阻碍了三乙醇胺与Al的腐蚀作用,从而对Al基形成了微观保护作用,宏观上表现出切削力作用减弱、材料去除率变低、表面粗糙度值不再明显变化的现象,使得三乙醇胺对铝合金试件在加工后期的影响效应大大降低。随着化学反应动态平衡,铝合金表面形成相对稳定的状态。

4 结论

1) 三乙醇胺溶液在加工初始阶段与铝合金试件

产生化学作用,有效提高铝合金试件表面的材料去除率,并加快降低了表面粗糙度值。

2) 经过滚磨光整加工工艺使得铝合金试件表面产生了晶格畸变,诱发了机械力化学作用,使得铝合金试件表面及磨块表面活性提高,并使得液体介质与铝合金试件表面、固体磨块表面与铝合金试件表面产生界面化学作用,最终在铝合金试件表面形成新的表面层。

3) Si颗粒键合在Al基上形成微观保护作用,使得材料去除率降低,表面粗糙度值不再明显变化。

参考文献:

- [1] YANG Sheng-qiang, LI Wen-hui. Surface finishing theory and new technology[M]. Berlin: Springer Press, 2018.
- [2] KENTON A F. Wet vs dry finishing[J]. Finishing today, 2007, 83(4): 42-45.
- [3] TOMITA Y, EDA H. Influence of grinding fluid on ultra precision processing of high purity aluminium alloy by grinding stone[J]. Wear, 1997, 212: 183-187.
- [4] 李鹏鹏, 李军, 王建彬, 等. 固结磨料研磨蓝宝石衬底的工艺研究[J]. 人工晶体学报, 2013, 42(11): 2258-2263.
LI Peng-peng, LI Jun, WANG Jian-bin, et al. Study on the lapping process of sapphire substrate through fixed abrasive[J]. Journal of synthetic crystals, 2013, 42(11): 2258-2263.
- [5] 李军, 夏磊, 王小明, 等. 三乙醇胺浓度对固结磨料研磨垫自锐性能的影响[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3287-3292.
LI Jun, XIA Lei, WANG Xiao-ming, et al. Effect of triethanolamine concentration on self-sharpening performance of fixed abrasive pad[J]. Optics and precision engineering, 2014, 22(12): 3287-3292.
- [6] 王占奎, 朱永伟, 朱琳, 等. 三乙醇胺在镁铝尖晶石固结磨料研磨中的作用[J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 1034-1043.
WANG Zhan-kui, ZHU Yong-wei, ZHU Ling, et al. Effect of triethanolamine in lapping spinel using fixed abrasive pad[J]. Optics and precision engineering, 2015, 23(4): 1034-1043.
- [7] 向鑫, 陈长安, 蒋春丽. XRD研究Fe、C掺杂对He离子注入Al表面晶格畸变的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(9): 1610-1615.
XIANG Xin, CHEN Chang-an, JIANG Chun-li. The effect of Fe and C doping on lattice distortion of He ion implanted Al surface[J]. Rare metal materials and engineering, 2011, 40(9): 1610-1615.
- [8] 李瑞华. 材料X射线衍射分析实用方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994: 93-97.
LI Rui-hua. Practical method for X-ray diffraction analysis of materials[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994: 93-97.
- [9] 陈长安. 铝和不锈钢中氦行为研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2003.
CHEN Chang-an. Behavior of helium in aluminum and stainless steel[D]. Beijing: China Institute of Engineering

- Physics, 2003.
- [10] 陈鼎, 陈振华. 机械力化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
CHEN Ding, CHEN Zhen-hua. Mechanochemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [11] MI G M, SAITO F, HANADA M. Mechanochemical synthesis of tobermorite by wet grinding in a planetary ball mill[J]. Powder technology, 1997, 93(1): 77-81.
- [12] KHODAKOV G S, KADRYAVTSEVA N S. Relation between cement activity and grinding characteristics[J]. Journal of applied chemistry, 1970, 43(7): 1453-1457.
- [13] DI L M, BAKKER H, TAMMINGA Y, et al. Mechanical attrition and magnetic properties of CsCl-structure Co-Ga[J]. Physical review, 1991, 44(6): 2444-2451.
- [14] 张永君, 李文芳. 高硅压铸 Al 合金 ADC12 的微弧氧化表面改性[J]. 金属学报, 2005, 41(12): 1289-1292.
- ZHANG Yong-jun, LI Wen-fang. Surface modification of die casting Al alloy ADC12 with high Si content by micro-arc oxidization[J]. Acta metallurgica sinica, 2005, 41(12): 1289-1292.
- [15] XU Zhen, ZHAO Zhi-hao, HAN Dong-yue, et al. Effects of Si content and aging temperature on wear resistance of surfacing layers welded with 4043 aluminum welding wires[J]. Rare metal materials and engineering, 2016, 45(1): 71-74.
- [16] 王萍, 周立果, 李建平, 等. Si 含量对 Al-xSi 合金表面 PEO 陶瓷层形成过程及性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(2): 521-529.
- WANG Ping, ZHOU Li-guo, LI Jian-ping, et al. Effect of Si content on the formation process and properties of PEO ceramic layer on Al-xSi alloy surface[J]. Rare metal materials and engineering, 2018, 47(2): 521-529.