

含双氧水磨液对铝合金滚磨光整加工的影响

石慧婷^{1,2}, 杨胜强^{1,2}, 李秀红^{1,2}, 高志森^{1,2}, 王嘉明^{1,2}

(1.太原理工大学 机械与运载工程学院, 太原 030024;

2.精密加工山西省重点实验室, 太原 030024)

摘要: **目的** 探索含双氧水磨液对铝合金试件滚磨光整加工后表面质量的影响及作用机理。**方法** 在相同条件下, 配制含不同浓度双氧水的磨液作为液体介质, 对铝合金试件进行滚磨光整加工实验及摩擦磨损实验, 测量铝合金试件滚磨光整加工前后的表面粗糙度值, 并表征铝合金试件滚磨光整加工前后的表面形貌以及摩擦磨损实验后的磨痕形貌。分析摩擦磨损实验后, 铝合金试件表面元素的变化情况, 以及滚磨光整加工后, 铝合金试件硬度随表面深度的变化情况。**结果** 含双氧水磨液作用下的试件的表面粗糙度值下降率大于去离子水条件下的值, 且其摩擦系数和磨损量明显小于去离子水及干式摩擦磨损作用下的值。试件表面初始粗糙度值较小时, 含双氧水磨液对滚磨光整加工铝合金试件的作用明显, 其中双氧水体积分数为 0.3% 的磨液作用下 Ra 从未加工时的 $0.220\ \mu\text{m}$ 减小到 $0.055\ \mu\text{m}$, 表面粗糙度值下降率为 74%。**结论** 含双氧水的磨液对较低初始表面粗糙度值的铝合金试件滚磨光整加工后的表面质量具有重要作用。由于磨液对铝合金的吸附、润湿作用, 使得其在滚磨光整加工中具有一定的润滑性、清洗性, 并且摩擦作用下会使铝合金表面发生一定的摩擦化学反应。磨液中的双氧水加快了铝合金表面的腐蚀氧化反应, 并将氧化产物以颗粒的形式拔出表面。滚磨光整加工作用硬化了铝合金表面, 提高了其机械性能。

关键词: 滚磨光整加工; 双氧水; 铝合金; 磨液; 表面质量; 硬度

中图分类号: TG580 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)04-0038-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.04.005

Influence of Grinding Liquid Containing Hydrogen Peroxide on Aluminium Alloy in Barrel Finishing

SHI Hui-ting^{1,2}, YANG Sheng-qiang^{1,2}, LI Xiu-hong^{1,2}, GAO Zhi-sen^{1,2}, WANG Jia-ming^{1,2}

(1.College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2.Shanxi Key Laboratory of Precision Machining, Taiyuan 030024, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the effect and mechanism of grinding fluid containing hydrogen peroxide on the surface quality of aluminium alloy specimen in barrel finishing. Under the same conditions, grinding fluid containing different

收稿日期: 2020-02-24; 修订日期: 2020-03-23

Received: 2020-02-24; Revised: 2020-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(51875389, 51975399); 山西省自然科学基金(201701D121073); 山西省重点自然科学基金(201801D111002)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51875389, 51975399), Natural Science Foundation of Shanxi Province of China (201701D121073) and Key Natural Funds of Shanxi Province (201801D111002)

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 (1992—), 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

引文格式: 石慧婷, 杨胜强, 李秀红, 等. 含双氧水磨液对铝合金滚磨光整加工的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 38-46.

SHI Hui-ting, YANG Sheng-qiang, LI Xiu-hong, et al. Influence of grinding liquid containing hydrogen peroxide on aluminium alloy in barrel finishing[J]. Surface technology, 2020, 49(4): 38-46.

concentrations of hydrogen peroxide were prepared as liquid media to carry out barrel finishing and friction and wear experiments on aluminium alloy specimens. The surface roughness of aluminium alloy specimens before and after processing was measured. The surface morphology of aluminium alloy specimens before and after barrel finishing was characterized. The wear scar morphology of aluminium alloy specimens after friction and wear experiments was also characterized. The changes of surface elements on the specimens after friction and wear experiments were analyzed. The changes of hardness of aluminium alloy specimens with surface depth after barrel finishing was also analyzed. The decrease rate of surface roughness under the action of hydrogen peroxide was greater than that under the action of deionized water. The friction coefficient and wear amount under the action of hydrogen peroxide were obviously smaller than those under the action of deionized water and dry condition. When the initial surface roughness of the specimen was small, the effect of the grinding liquid containing hydrogen peroxide on aluminium alloy specimen was obvious in barrel finishing. Under the action of the grinding liquid containing 0.3% hydrogen peroxide, R_a decreased from 0.220 μm to 0.055 μm , and the decrease rate of the surface roughness was 74%. As a result, the grinding fluid containing hydrogen peroxide can effectively improve the surface quality of aluminium alloy specimens with lower initial roughness after barrel finishing. Because of the adsorption and wetting effect of grinding liquid on aluminium alloy, the aluminium alloy has a certain lubricity and cleanliness in the barrel finishing, and the friction effect will cause a certain tribochemical reaction on the surface of aluminium alloy. The hydrogen peroxide in the grinding fluid accelerates the corrosion oxidation reaction on the surface of aluminium alloy and pulls the oxidation products out of the surface in the form of particles. Barrel finishing hardens the surface of aluminium alloy and improves its mechanical properties.

KEY WORDS: barrel finishing; hydrogen peroxide; aluminium alloy; grinding fluid; surface quality; hardness

铝合金广泛应用于航空航天、汽车工业、电子、手机等领域^[1-5]。其中, 铝-锌-镁合金由于具有良好的比强度和比刚度, 其在结构、金属力学、运输和航空工业中具有很强的吸引力^[6]。7075 铝合金作为铝-锌-镁合金, 能够满足高比强度、耐碰撞、长寿命的要求^[7]。金属表面微观形貌能够影响金属表面硬度, 从而影响金属表面的耐磨损性及其寿命^[8]。因此, 表面质量越来越受到人们的重视, 而且表面粗糙度也已成为制造过程中质量和精度的重要指标, 被认为是工业上最重要的参数之一。

现今, 常用表面光整技术来改善金属的表面质量。滚磨光整加工技术作为表面光整技术之一, 以其低成本、易操作的特点, 广泛应用于金属零件加工领域。滚磨光整加工是一种将零件置于加工介质(磨块、磨液)中, 通过零件与加工介质之间形成复杂的相对运动进行光整加工的工艺^[9-10]。同轧制、磨削和车削等机械加工工艺中应用的金属加工液一样, 滚磨光整加工工艺中使用的磨液也具有提高工艺稳定性、工件质量和磨具寿命的重要作用, 被广泛应用于金属加工操作中。实际生产应用中, 磨液的使用类型与设备类型、操作类型、易处置性、易使用性和成本等紧密相关^[11]。因此, 需针对特定滚磨光整加工设备、被加工材质进行相关磨液的进一步研发。

铝合金材料的加工工艺常使用水溶性金属加工液。双氧水具有无毒、无害、高纯度等优点, 是一种很好的氧化剂, 常被添加在抛光液中。Wang^[12]在化学机械抛光工艺的碱性抛光液中添加双氧水, 对硅片进行表面抛光, 发现随着双氧水的加入, 抛光表面与抛光液之间的接触角不断减小, 表明随着 Si-OH

增加, 硅片表面形成了钝化层, 粗糙度明显下降。Manivannan^[13]研究了化学机械抛光工艺中双氧水对含不同磨料的抛光液的抛光性能的影响, 发现由于双氧水的加入, 含有氧化锆和氮化硅磨料的抛光液对晶片表面的抛光率增加。Duan^[14]研究表明, 环境介质对高熵合金的摩擦学性能有重要影响, 润滑油条件下, AlCoCrFeNiCu/Si₃N₄ 的耐磨性较高, 稳定阶段时, 90%双氧水溶液下的 AlCoCrFeNiCu/Si₃N₄ 的摩擦系数较低。Wang^[15]研究发现, 添加双氧水会导致铝的硬度降低, 增加磨料与铝基的接触半径, 降低临界能量势垒, 促使接触面的 Al 原子与 O 原子发生应力辅助化学反应。黄华栋^[1]利用过氧化氢和十二烷基硫酸钠的协同作用抛光 7003 铝合金, 研究发现, 低浓度作用下的双氧水会加速铝合金表面氧化速度, 促进材料的去除, 并减轻抛光后的铝合金表面橘皮缺陷现象。

滚磨光整加工工艺中, 加工铝合金试件使用的磨液是由油性剂和表面活性剂构成的水基金属加工液。一方面, 磨液在固体表面形成吸附膜, 起到一定的润滑作用; 另一方面, 磨液通过润湿和卷离作用, 将磨屑从固体表面分离, 从而达到清洗效果。磨液中的化学剂成分需为易降解成分, 避免废液排放而污染水资源。双氧水作为添加剂, 仅含 H、O 元素, 绿色环保, 广泛应用于表面抛光工艺中, 可考虑将其用于滚磨光整加工工艺中, 以达到提高光整加工效率、优化表面质量的目的。此外, 绿色制造成为了近年来制造业发展的大趋势。实施绿色新政、推动绿色增长、发展绿色经济是全球主要经济体的共同选择, 资源能源利用效率成为衡量国家制造业竞争力的重要因素^[16]。磨液作为影响滚磨光整加工工艺的主要因素之一, 需要对

其绿色化发展进行更深一步的研究。因此,本文以滚磨光整加工工艺为基础,针对 7075 铝合金材质,以去离子水为基液,配制了可用于铝合金材质的磨液,并探究磨液对滚磨光整工艺的加工效果的影响及其作用机理,以期滚磨光整工艺中磨液的研发与研究奠定一定的理论基础。

1 实验

1.1 滚磨光整加工实验设备

采用 BJL-LL05 立式离心式滚磨光整机对试件进行滚磨光整加工实验,滚磨光整加工设备及介质如图 1 所示。加工设备中放置有 4 个滚筒,由磨块构成的固体介质与磨液添加在滚筒中形成加工介质,4 个滚筒既绕固定轴公转,又绕自身轴逆向自转,形成行星运动。在离心力作用下,工件和磨块产生相对滑移运动,从而达到试件光整的目的。设备参数如表 1 所示。

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/L	1.25×4
Revolution/(r·min ⁻¹)	300
Radius of revolution/mm	138.5

表 2 试件表面初始粗糙度值及相应液体介质主要成分

Tab.2 Initial roughness value of specimen surface and main components of corresponding liquid medium

Specimen	Initial surface roughness value/ μm	Composition of liquid medium			
		Deionized water/mL	$\text{C}_{24}\text{H}_{47}\text{NO}_4/\text{mL}$	$\text{C}_{18}\text{H}_{29}\text{NaO}_3\text{S/g}$	$\text{H}_2\text{O}_2/\text{mL}$ (Volume percentage)
A0	0.202	400.0	0	0	0
A1	0.214	382.0	18	1.3	0
A2	0.198	381.8	18	1.3	0.2 (0.05%)
A3	0.199	381.4	18	1.3	0.6 (0.15%)
A4	0.220	380.8	18	1.3	1.2 (0.3%)
A5	0.201	380.2	18	1.3	1.8 (0.45%)
B0	1.156	400.0	0	0	0
B4	1.179	380.8	18	1.3	1.2

1.4 测试方法

采用 M2 粗糙度仪检测滚磨光整后铝合金试件的表面粗糙度值,该设备轮廓分辨率为 12 nm,测量精度 $\leq \pm 5\%$,扫描长度为 5.6 mm。加工时,每隔 10 min 记录试件表面粗糙度 R_a ,每个位置测量 7 次,并去掉最大和最小值后取平均值。采用 HSR-2M 往复式摩擦磨损实验仪记录干、湿式状态下试件表面(未进行滚磨光整加工)摩擦系数随时间的变化情况,其中加

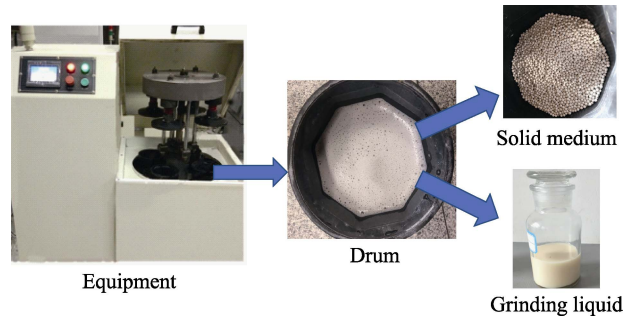


图 1 立式离心式滚磨光整加工设备及加工介质

Fig.1 Vertical centrifugal barrel finishing equipment and processing medium

1.2 滚磨光整加工介质

加工介质包括滚抛磨块和液体介质两部分。滚抛磨块选用直径为 4 mm 的白陶瓷磨块,装入量为 700 mL。液体介质是总体积为 400 mL 的去离子水,或以去离子水、油酸三乙醇胺、十二烷基苯磺酸钠、双氧水(体积分数分别为 0%、0.05%、0.15%、0.3%、0.45%)为主要成分,并添加少量助剂配制的总体积为 400 mL 的复合磨液。

1.3 滚磨光整加工实验试件

试件材料为铝合金 7075,大小为 20 mm×20 mm×5 mm,表面经砂纸打磨至初始粗糙度为(0.200±0.020)、(1.170±0.020) μm ,并用 A0、A1、A2、A3、A4、A5、B0、B4 表示。不同试件的初始表面粗糙度值和滚磨光整加工中液体介质的使用情况如表 2 所示。

载载荷为 1 N,行程距离为 5 mm,速度为 600 次/min,实验时间为 10 min,对磨材料为滚磨光整加工中使用的固体介质(直径为 4 mm 的白陶瓷磨块)。采用 UB200i 光学显微镜、TANSCAN VAGA3 型 SEM 扫描电子显微镜,表征铝合金试件滚磨光整加工前后以及摩擦磨损实验后的表面形貌,采用 OXFORD 能谱仪分析铝合金试件摩擦磨损实验后表面的元素含量。采用 UNHT 纳米压痕仪表征滚磨光整后,铝合金试件(A4)中心位置处硬度随表面深度的变化规律,该

设备载荷分辨率为 $0.003\ \mu\text{N}$ ，位移率分辨为 $0.003\ \text{nm}$ 。

2 结果与讨论

2.1 液体介质对铝合金表面粗糙度的影响

图 2 为含不同浓度双氧水磨液的滚磨光整作用下，试件表面粗糙度值随时间的变化情况。从图 2 中可以看出，仅由去离子水作为磨液对试件进行滚磨光整加工时，加工 40 min 后，表面粗糙度值由初始的 $0.202\ \mu\text{m}$ 下降到 $0.120\ \mu\text{m}$ ；但加工 50 min 后，表面粗糙度值出现明显增大现象。用不含双氧水的磨液对试件滚磨光整加工 50 min 后，表面粗糙度值由初始的 $0.214\ \mu\text{m}$ 下降到 $0.072\ \mu\text{m}$ 。用含 0.05%、0.15%、0.3%、0.45% 双氧水的磨液对试件滚磨光整加工 50 min 后的表面粗糙度值相接近，但均优于不含双氧水的磨液作用下的情况。仅由去离子水作为磨液进行滚磨光整加工时，表面粗糙度值变化最小。可见由多种化学成分配制而成的磨液进行滚磨光整加工时，未添加双氧水的磨液作用下的表面粗糙度值变化小于其他添加有双氧水的磨液作用下的表面粗糙度值变化情况。因此，在滚磨光整加工中，磨液中的化学成分能够改善铝合金试件的表面粗糙度，其中双氧水对试件表面粗糙度具有明显作用。

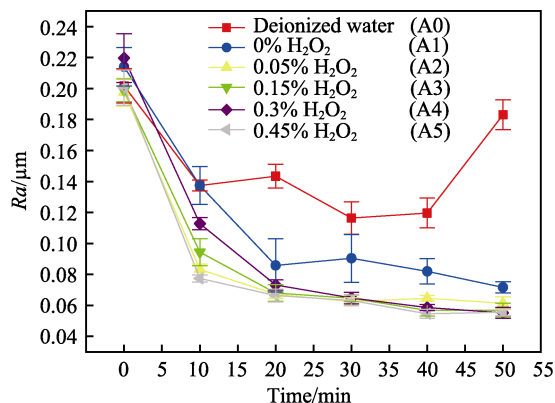


图 2 不同磨液作用下试件表面粗糙度值的变化情况
Fig.2 Variation of surface roughness of specimens under different grinding fluids

图 3 为不同试件滚磨光整加工 40 min 后的表面粗糙度值下降率（加工前后表面粗糙度的差值相对加工前表面粗糙度值的变化率）。A0 与 A4 为初始表面粗糙度值较低情况下加工的试件，B0 与 B4 为初始表面粗糙度值较高情况下加工的试件。A0 与 B0 仅由去离子水作用，A4 与 B4 由双氧水体积分数为 0.3% 的磨液作用。如图 3 所示，试件表面粗糙度值较低时，含双氧水磨液的作用（表面粗糙度值下降率为 74%）明显高于去离子水（表面粗糙度值下降率为 40%）。当初始表面粗糙度较高时，去离子水与含双氧水磨液对滚磨光整加工后试件的表面粗糙度值的影响较为接

近，没有明显的差异。即试件表面粗糙度较低时，磨液中的化学剂对试件表面的助磨抛光作用更为明显。

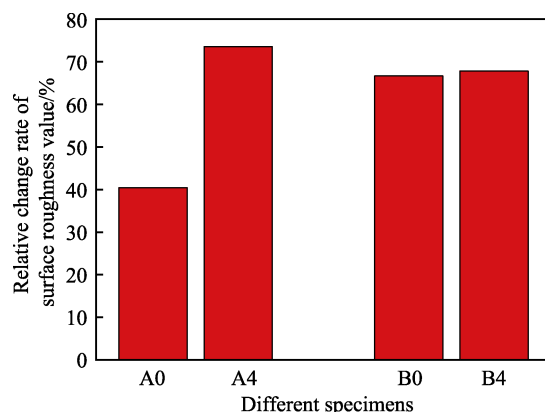


图 3 滚磨光整加工后的表面粗糙度值下降率
Fig.3 Decrease rate of surface roughness value after barrel finishing

铝合金试件表面在去离子水中会形成水合氧化物，该结构疏松多孔，易于去除^[17]。而铝合金试件表面在双氧水的作用下，抛光表面与液体介质之间的接触角会有一定程度的减小^[8]，使得 $\text{Al}-\text{OH}$ 增加，从而使试件表面更易形成氧化层，且该氧化层的机械强度相对于去离子水作用下产生的氧化层更低，易于去除。因此，相比去离子水作用，在含双氧水的磨液作用下的表面粗糙度值下降率更大。当磨块与试件在液体介质中相互靠近时，这两种固体表面之间可能会同时受到长程力和短程力，长程力可能是两表面之间的范德华力或者是双层静电排斥力，短程力可能是由液体附着在固体表面的分子相互作用而产生的溶剂化力^[18-19]。当试件表面初始粗糙度值较低时，微观表面较为平坦，接触面积较大，短程力较大，含双氧水的磨液与试件表面的作用也相对较大，使其对试件表面的光整作用更为明显。因此可知，滚磨光整加工中，试件初始表面粗糙度较低时，磨液中的双氧水能起到更明显的助磨抛光作用。

2.2 液体介质对铝合金表面形貌及光亮度的影响

图 4 为试件滚磨光整加工 50 min 后的表面形貌，图 5 为试件加工 50 min 后的表面亮度。如图 4 所示，较低初始表面粗糙度值的试件（A0、A4）经滚磨光整加工后，试件表面均无沟犁状磨痕；较高初始表面粗糙度值的试件（B0、B4）经滚磨光整加工后，试件表面存在沟犁状磨痕。如图 5 所示，试件 A0、B0 表面倒映的字母模糊不清，且金属为灰黑色；而试件 A4、B4 表面倒映的字母清晰可见，具有良好的镜面效果。去离子水作用下的试件（A0、B0）表面亮度明显低于磨液作用下的试件（A4、B4）。试件初始表面形貌对试件表面光亮度的影响作用小于滚磨光整加工中液体介质种类对试件表面光亮度的影响作用。

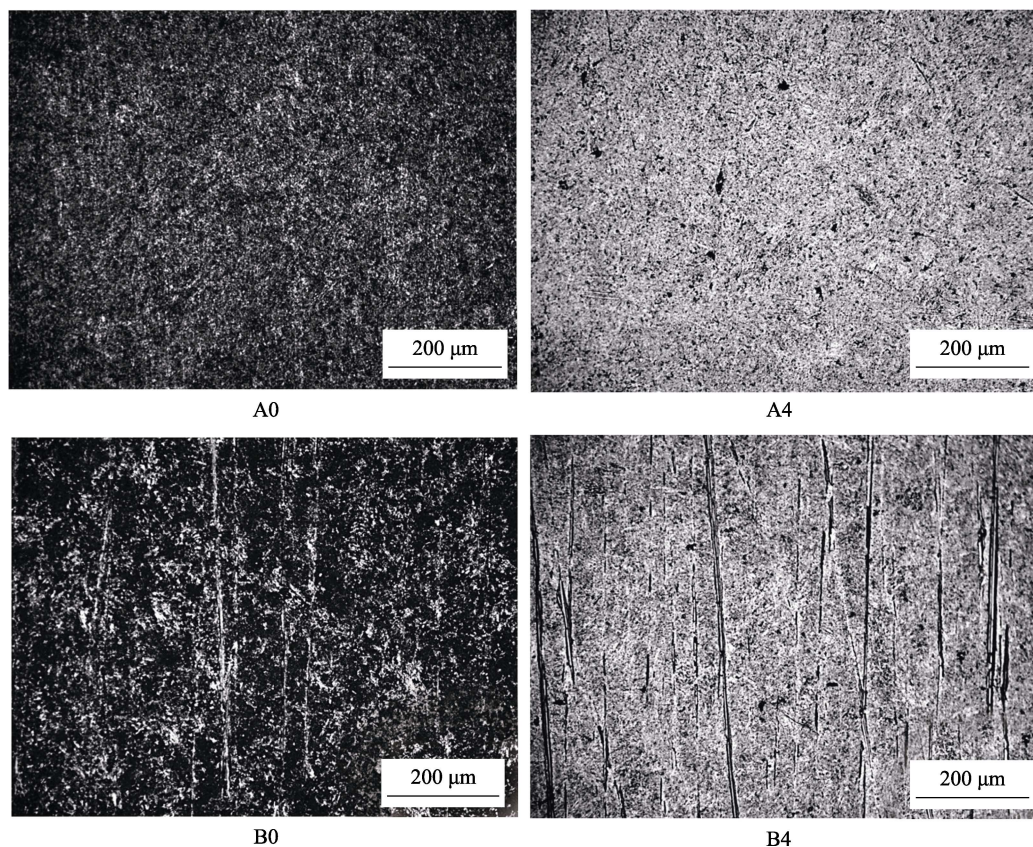


图4 滚磨光整加工 50 min 后的表面形貌
Fig.4 Surface morphology after barrel finishing for 50 min

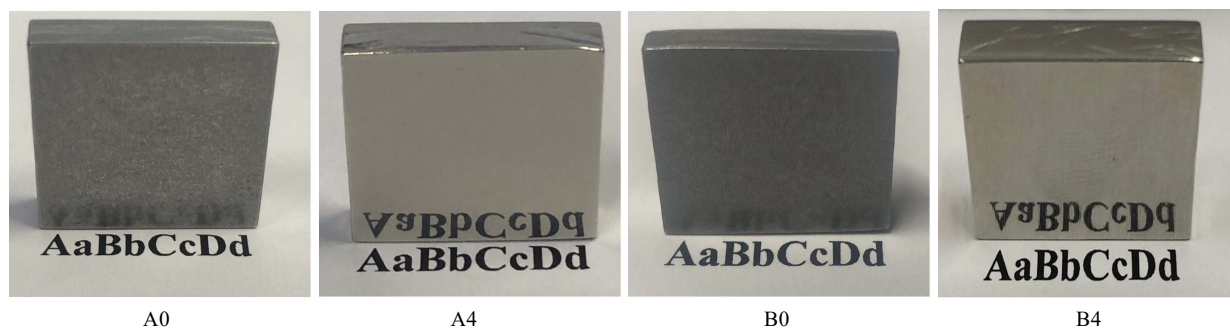


图5 滚磨光整加工 50 min 后的表面光亮度
Fig.5 Surface brightness after barrel finishing for 50 min

磨液中含有作为阴离子表面活性剂的十二烷基苯磺酸钠和作为非离子表面活性剂的油酸三乙醇胺,其均具有一定的乳化、清洗、降温的作用。表面活性剂能吸附各种污染物粒子,并在工件表面形成吸附膜,如油酸三乙醇胺中含有的一COOH、—NH₂等吸附力大的极性基团,极易在试件表面形成分子定向吸附润滑膜,起到了一定的润滑作用^[20]。并且表面活性剂能够降低磨屑和磨液之间的表面能,通过润湿、渗透作用,将磨屑从磨块和试件表面分离开来,将其随磨液带走,并通过渗透作用将磨屑沉降下来,从而达到一定的清洗作用。正由于这种润滑作用与清洗作用的相互平衡,使得磨液作用下的铝合金试件表面的光亮度更高。

2.3 液体介质对摩擦磨损行为的影响

图6为摩擦磨损实验时,摩擦系数随时间变化的情况。由图可知,仅在去离子水作用下的摩擦系数最大,双氧水体积分数为0.3%的磨液作用下的摩擦系数最低,但非常平稳,而干润滑与去离子水作用下的摩擦系数有明显的上升趋势。将含不同体积分数的双氧水(0%、0.05%、0.15%、0.3%、0.45%)的磨液作为液体介质进行摩擦磨损实验(如图7所示),从图7中可以看出,试件平均摩擦系数非常接近。图8为摩擦磨损实验后试件表面的光学显微形貌图。由图8可知,双氧水含量越高,磨痕表面黑色区域所占比例越大,磨痕宽度随着双氧水含量的增加,先增大后减小。图9分别为去离子水作用下、不含双氧水的磨液

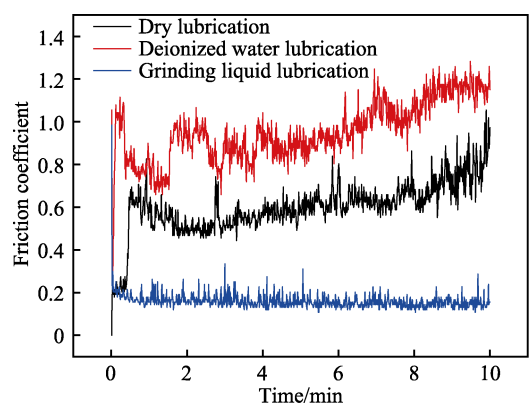


图 6 摩擦系数随时间的变化情况
Fig.6 Variation of friction coefficient with time

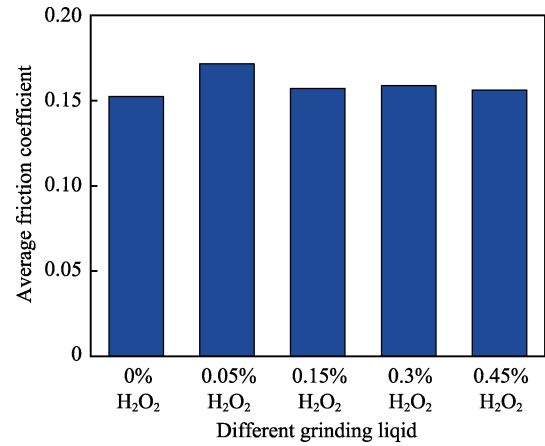


图 7 含不同体积比双氧水磨液作用下的平均摩擦系数
Fig.7 Average friction coefficient under grinding liquid containing different volume ratios of hydrogen peroxide grinding liquid

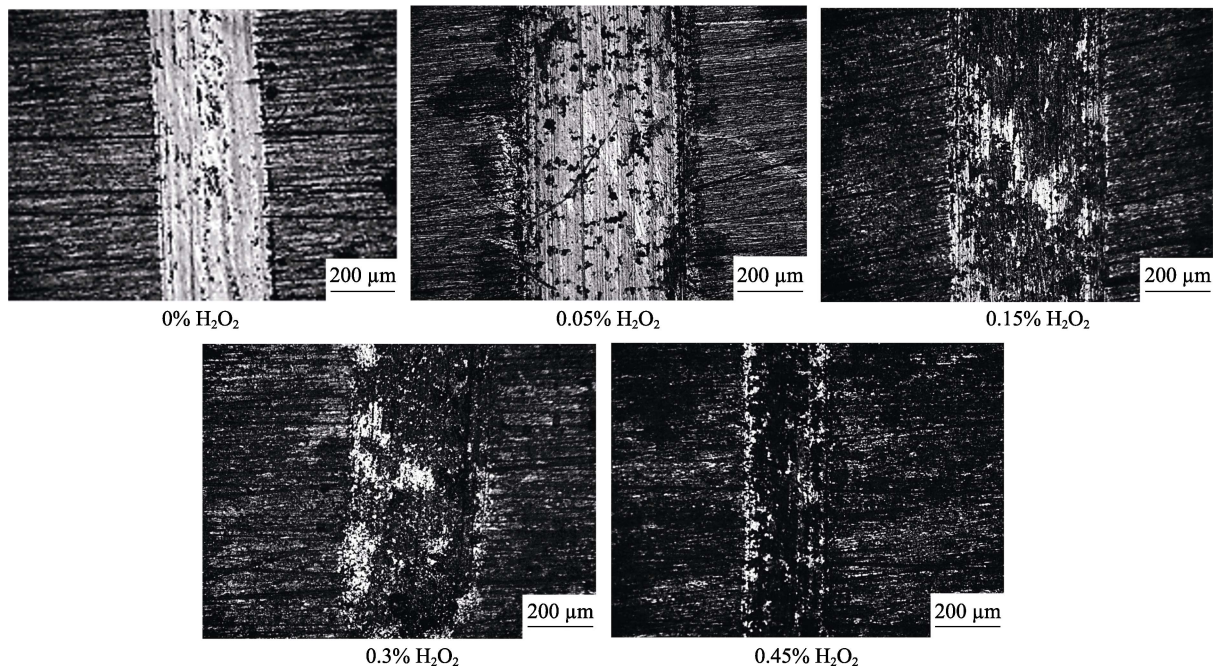


图 8 含不同体积比双氧水磨液作用下的摩擦磨损形貌
Fig.8 Friction and wear morphology under grinding liquid containing different volume ratios of hydrogen peroxide

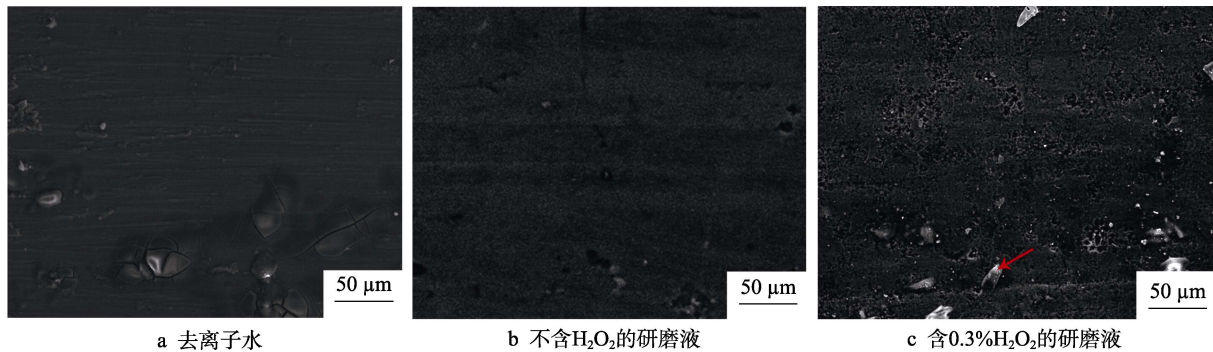


图 9 摩擦磨损实验后磨痕位置扫描电镜图
Fig.9 SEM photographs of wear scar after friction and wear test: a) deionized water; b) grinding fluid with 0% H_2O_2 ; c) grinding fluid with 0.3% H_2O_2

作用下、双氧水体积分数为 0.3% 的磨液作用下摩擦磨损实验后, 试件表面磨痕处的扫描电镜形貌图。由图 9 可知, 在去离子水作用下, 试件表面经摩擦磨损后呈明显犁犁状, 且试件表面部分位置凸起, 并伴有裂纹; 在不含双氧水的磨液作用下摩擦磨损后, 试件表面少许部分位置出现凹坑; 但在双氧水体积分数为 0.3% 的磨液作用下摩擦磨损后, 试件表面呈现出密集凹坑的现象, 并在表面附着有一定量的碎小颗粒。图 10 为图 9c 中箭头处颗粒位置的 EDS 分析, 此颗粒物质 O 含量较高, Al 元素含量远低于 7075 铝合金中 Al 元素的含量, S、Cl、K、Ca 等杂质元素富集。

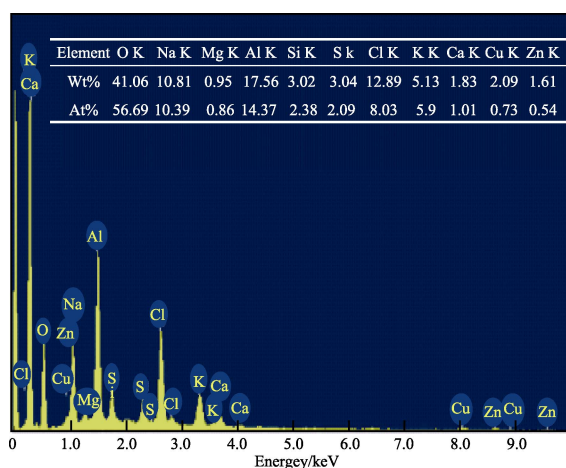


图 10 图 9c 中箭头处 EDS 分析
Fig.10 EDS analysis at arrow in Fig.9c

白陶瓷磨块的表面镶嵌有氧化铝磨粒, 较硬的氧化铝颗粒在软表面滑动时产生的塑性变形或断裂会引起表面损伤。干润滑状态下, 滑动开始时为两体磨损, 一段时间后, 磨屑粘附在铝合金表面, 形成一层致密的覆盖膜, 由磨屑构成的这层膜具有一定的固体润滑作用。水润滑状态时, 由于水分的冲洗作用, 磨屑不容易粘附在铝合金表面, 表面出现由撕裂损伤造成的凹坑, 呈现出粗糙不平, 导致摩擦系数保持在一个比较大的值。磨液润滑状态时, 磨液与铝合金表面在摩擦过程中发生化学反应, 机械作用下, 铝合金试件表面形成干净的新生表面, 且形成活性源, 新生表面发射出低能电子, 在微凸体的顶部形成带正电的区域, 磨液中的润滑成分形成阴离子, 被发射的电子与润滑剂分子相互作用, 在摩擦表面形成负离子和自由基, 并与金属表面发生反应, 在表面形成一层具有润滑性的薄膜, 保护摩擦表面不受磨损^[21]。此外, 在磨液润滑状态下, 磨块对试件表面提供了较低的切削力, 这是由于磨液相对于去离子水, 可以较好地传递磨块切削试件表面的能量^[22], 导致其切削力减小。因此, 磨液作用下的摩擦系数、磨损量明显小于去离子水作用和干润滑作用下的值。

铝及其合金化学性质比较活泼, 在中性水溶液中就会发生腐蚀, 产生铝的溶解和氧气的溶解。在阳极

发生的腐蚀反应为 $\text{Al}-3\text{e}^{-}\rightarrow\text{Al}^{3+}$, 在阴极发生的腐蚀反应为 $\text{H}_2\text{O}+1/2\text{O}_2+2\text{e}^{-}\rightarrow2\text{OH}^{-}$ 。去离子水作用下, 所需化学活化能较高, 水分子与铝原子的作用相对较慢^[23]。然而, 在双氧水作用下, 化学活化能大大降低, 导致氧原子侵入试件表面。双氧水浓度越高, 氧原子的含量也越高, 侵入试件表面的能力也略微增加。磨液对试件表面具有一定的腐蚀作用, 在双氧水的作用下, 更易使磨液与试件表面产生化学作用, 促进金属键的断裂, 磨液中的非金属原子与金属原子键合形成氧化产物, 随后在摩擦力与化学力的耦合作用下产生摩擦化学作用, 将这些氧化产物以颗粒的形式拔出试件表面, 使得试件表面形成一定数量的凹坑。

2.4 滚磨光整加工对铝合金硬度的影响

图 11 为初始粗糙度值为 $0.220\ \mu\text{m}$ 的试件 (A4) 经滚磨光整加工 50 min 后, 其表面硬度随深度的变化情况。加工后试件表面粗糙度值约为 $0.06\ \mu\text{m}$, 距离试件表面 15~130 nm 范围内的硬度明显增大。距离试件表面 130~500 nm 范围内, 硬度呈现出先略减小后逐渐递增的变化情况。距离试件表面 500~800 nm 范围内, 硬度呈现出逐渐递减后趋于平稳的现象。

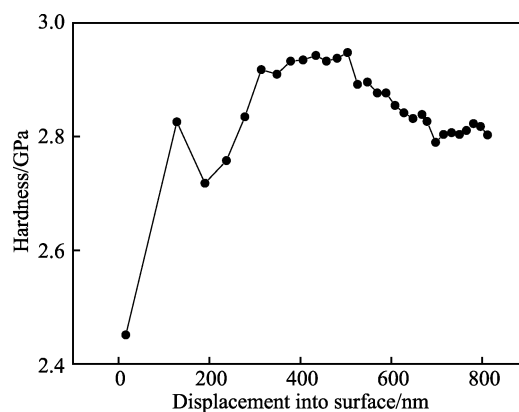


图 11 硬度随表面深度的变化情况
Fig.11 Variation of hardness with surface depth

试件为易氧化的铝合金板件, 且液体介质中含有的氧化剂双氧水加速试件表面的氧化作用, 使得试件表面形成一定的氧化层, 导致其硬度会随着试件表面深度的增加而增加^[24]。由于滚磨光整加工中的液体介质对试件表面具有一定的腐蚀作用, 且作为固体介质的磨块对试件表面具有滚压、磨削作用, 从而导致试件表面产生了局部塑性变形。腐蚀和局部塑性变形的结合减轻了应力, 导致净表面压应力的减小 (压应力的减小随距表面距离的增加而减小)^[25]。这种局部塑性变形更会使试件表面产生加工硬化, 导致硬度随试件表面深度的增加而减小。

2.5 滚磨光整加工的作用机理

磨块与试件表面发生碰撞, 在接触应力的作用下会产生一些微过程, 如摩擦、粘附、破碎、磨损以及

表面侵蚀。磨块对试件表面的每一次碰撞,都会使压力在极短时间内积累起来,导致撞击点处产生局部塑性变形,试件表面就会发生微凸体磨损,产生热量,进而形成能量耗散。同时又由于受到周围材料的约束,试件表面会产生压缩残余应力,减少滚磨光整加工过程中磨液对铝合金试件表面的冲蚀作用,提高铝合金试件的表面粗糙度等级。磨液能够降低磨块与试件的活化能,提高摩擦化学反应的效率,其中双氧水可明显增强铝合金试件表面的氧化反应,使得试件表面较软的氧化产物的去凸能力增强。滚磨光整加工作用使得铝合金试件表面发生晶格畸变,晶粒尺寸略微减小,提高了试件表面的光洁度。磨液中含有大量的羟基,可导致试件整体固有塑性增加^[26],减小表面加工损伤的几率。并且在一定程度的塑性变形作用下,试件表面的硬度和均匀性得到了提高。

3 结论

1) 在添加有双氧水的磨液作用下,较低初始表面粗糙度值的7075铝合金试件经滚磨光整加工作用后,表面粗糙度值 Ra 下降至 $0.06\ \mu\text{m}$ 以下,表面无划痕现象,达到镜面效果。且试件具有较低初始表面粗糙度值时,磨液中的化学添加剂对试件表面的作用明显高于水分子对试件表面的作用。

2) 采用滚磨光整工艺对7075铝合金试件进行光整加工,磨液中的极性基团吸附在铝合金试件表面,对试件起到一定的润滑作用;磨液中表面活性剂与双氧水的使用增强了磨液对试件表面的润湿性,对试件起到一定的清洗作用;双氧水增强了对铝合金表面的氧化作用,提高了对铝合金表面的平坦化能力;磨液作用下,试件受磨块切向力作用,形成摩擦力化学作用,促进了试件表面的光整加工效果。

3) 铝合金试件经磨液作用下的滚磨光整加工后,表面能够形成一定的硬化层,机械性能得到一定程度的提高。

参考文献:

- [1] 黄华栋, 闵鹏飞, 仲亚男, 等. 双氧水体系抛光液中7003铝合金的化学机械抛光[J]. 轻金属, 2016(5): 49-52.
HUANG Hua-dong, MIN Peng-fei, ZHONG Ya-nan, et al. Chemical mechanical polishing of 7003 aluminum alloy in hydrogen peroxide system polishing slurry[J]. Light metals, 2016(5): 49-52.
- [2] ABRAHAMS R, MIKHAIL J, FASIHI P. Effect of friction stir process parameters on the mechanical properties of 5005-H34 and 7075-T651 aluminium alloys[J]. Materials science & engineering, 2019, 751: 363-373.
- [3] 李晓敏. 我国汽车铝合金轮毂发展现状[J]. 轻合金加工技术, 2003, 31(9): 12-13.
- [4] 甘卫平, 陈招科, 杨伏良, 等. 高硅铝合金轻质电子封装材料研究现状及进展[J]. 材料导报, 2004, 18(6): 79-82.
GAN Wei-ping, CHEN Zhao-ke, YANG Fu-liang, et al. Research status and development of high silicon aluminium alloy for light weight electronic package materials[J]. Materials review, 2004, 18(6): 79-82.
- [5] 关佳亮, 张孝辉, 马新强, 等. 铝合金手机外壳超精密镜面加工工艺的实验研究[J]. 制造技术与机床, 2014(2): 21-23.
GUAN Jia-liang, ZHANG Xiao-hui, MA Xin-qiang, et al. Research on ultra precision mirror machining technology for aluminum alloy mobile phone shell[J]. Manufacturing technology & Machine tool, 2014(2): 21-23.
- [6] REYNA-MONTOYA J S, GARCIA-RENTERIA M A, CRUZ-HERNANDEZ V L. Effect of electromagnetic interaction on microstructure and corrosion resistance of 7075 aluminium alloy during modified indirect electric arc welding process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(3): 473-484.
- [7] DEJAN T, BRANKO N, MATEJ V, et al. Low-cycle fatigue life of thin-plate auxetic cellular structures made from aluminium alloy 7075-T651[J]. Fatigue & fracture of engineering materials & structures, 2019, 42(5): 1022-1036.
- [8] VRCEK A, HULTQVIST T, BAUBET Y, et al. Micro-pitting damage of bearing steel surfaces under mixed lubrication conditions: Effects of roughness, hardness and ZDDP additive[J]. Tribology international, 2019, 138: 239-249.
- [9] YANG Sheng-qiang, LI Wen-hui. Surface finishing theory and new technology[M]. Berlin: Springer Press, 2018.
- [10] 杨胜强, 李文辉, 李秀红, 等. 高性能零件滚磨光整加工的研究进展[J]. 表面技术, 2019, 48(10): 13-24.
YANG Sheng-qiang, LI Wen-hui, LI Xiu-hong. Research development of mass finishing for high-performance parts[J]. Surface technology, 2019, 48(10): 13-24.
- [11] MOHAMED O, AMARPREET S, RASHMI W, et al. Recent developments and performance review of metal working fluids[J]. Tribology international, 2017, 114: 389-401.
- [12] WANG Hai-bo, SONG Zhi-tang, LIU Wei-li, et al. Effect of hydrogen peroxide concentration on surface micro-roughness of silicon wafer after final polishing[J]. Microelectronic engineering, 2011, 88(6): 1010-1015.
- [13] MANIVANNAN R, RANMANATHAN S. The effect of hydrogen peroxide on polishing removal rate in CMP with various abrasives[J]. Applied surface science, 2009, 255(6): 3764-3768.
- [14] DUAN Hai-tao, WU Yong, HUA Meng, et al. Tribological properties of AlCoCrFeNiCu high-entropy alloy in hydrogen peroxide solution and in oil lubricant[J]. Wear, 2013, 297(43467): 1045-1051.

- [15] WANG Yong-guang, ZHU Yu-guang, ZHAO Dong, et al. Nanoscratch of aluminum in dry, water and aqueous H_2O_2 conditions[J]. Applied surface science, 2019, 464: 229-235.
- [16] 漆萍. 中国加快推进工业产品生态绿色设计与制造进程[J]. 炼油技术与工程, 2019, 49(1): 39.
QI Ping. China speeds up the process of eco-green design and manufacturing of industrial products[J]. Petroleum refinery engineering, 2019, 49(1): 39.
- [17] UNDERHILL P R, RIDEER A N. Hydrated oxide film growth on aluminium alloys immersed in warm water[J]. Surface and coatings technology, 2005, 192(2-3): 199-207.
- [18] LOPES R A, SEGADAES A M. The influence of solid type and content on the rheological behaviour of coagulated slurries and their bearing on the consolidation by pressure filtration[J]. Journal of the European Ceramic Society, 1997, 17(2): 339-343.
- [19] INTYRE J R M, GOMBA J M, PERAZZO C A, et al. Thermocapillary migration of droplets under molecular and gravitational forces[J]. Journal of fluid mechanics, 2018, 847: 1-27.
- [20] 杨宏. 油酸在水基金属加工液中的应用研究[J]. 润滑与密封, 2004(5): 71-72.
YANG Hong. Study on application of oleic acid in water base cutting fluid[J]. Lubrication engineering, 2004(5): 71-72.
- [21] KAJDAS C, LIU W. Tribochemistry of aluminium and aluminium alloy systems lubricated with liquids containing alcohol or amine additive types and some other lubricants—A review[J]. Lubrication science, 2004, 16(3): 267-292.
- [22] GLASSE B, ASSENHAIMER C, GUARDANI R, et al. Analysis of the stability of metal working fluid emulsions by turbidity spectra[J]. Chemical engineering and technology, 2013, 36(7): 1202-1208.
- [23] 于非, 何紫演, 邹水林, 等. 6063 铝合金在氟化钠溶液中的电化学行为[J]. 广东化工, 2017, 44(22): 3-4.
YU Fei, HE Zi-yan, ZOU Shui-lin, et al. The electrochemical behavior of aluminum alloy 6063 in sodium fluoride solution[J]. Guangdong chemical industry, 2017, 44(22): 3-4.
- [24] KAWAGUCHI K, ITO H, KUWAHARA T, et al. Atomistic mechanisms of chemical mechanical polishing of a Cu surface in aqueous H_2O_2 : Tight-binding quantum chemical molecular dynamics simulations[J]. ACS applied materials & interfaces, 2016, 8(18): 11830.
- [25] GRINSPAN A S, GNANAMOORTHY R. A novel surface modification technique for the introduction of compressive residual stress and preliminary studies on Al alloy AA6063[J]. Surface and coatings technology, 2006, 201(3-4): 1768-1775.
- [26] TSYNTSARU N, KAVAS B, SORT J, et al. Mechanical and frictional behaviour of nano-porous anodised aluminium[J]. Materials chemistry and physics, 2014, 148(3): 887-895.

(上接第 29 页)

- [7] WANG X, LU C, HONG T. Applying TRIZ for optimization formulation of sapphire precision lapping[J]. Digital design and manufacturing technology, 2010, 102-104: 564-567.
- [8] 周传强, 韩冰, 胡玉刚. 基于灰关联理论的磁力研磨工艺参数优化[J]. 电镀与精饰, 2019, 41(3): 15-21.
ZHOU Chuan-qiang, HAN Bing, HU Yu-gang. Optimization of magnetic grinding process parameters based on grey relational theory[J]. Electroplating & finishing, 2019, 41(3): 15-21.
- [9] 黄志辉. 人工神经网络优化算法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
HUANG Zhi-hui. Artificial neural network optimization algorithm[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [10] 陈仲铭, 彭凌西. 深度学习原理与实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2018: 29-40.
CHEN Zhong-ming, PENG Ling-xi. Principles and practice of deep learning[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2018: 29-40.
- [11] 马永杰, 云文霞. 遗传算法研究进展[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(4): 1201-1206.
MA Yong-jie, YUN Wen-xia. Research progress of genetic algorithm[J]. Computer application research, 2012, 29(4): 1201-1206.
- [12] 余文, 李人厚. 遗传算法对约束优化问题的研究综述[J]. 计算机科学, 2002, 29(6): 98-101.
- YU Wen, LI Ren-hou. A review of genetic algorithms for constrained optimization problems[J]. Computer science, 2002, 29(6): 98-101.
- [13] 司景萍, 马继昌, 牛家骅, 等. 基于模糊神经网络的智能故障诊断专家系统[J]. 振动与冲击, 2017, 36(4): 164-171.
SI Jing-ping, MA Ji-chang, NIU Jia-hua, et al. Intelligent fault diagnosis expert system based on fuzzy neural network[J]. Journal of vibration and shock, 2017, 36(4): 164-171.
- [14] 郝兴斌. 智能节水决策支持系统设计与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
HAO Xing-bin. Design and implementation of intelligent water saving decision support system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [15] 陈文伟. 决策支持系统及其开发[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014: 106-108.
CHEN Wen-wei. Decision support system and its development[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014: 106-108.
- [16] 王新志, 曹爽, 丁海勇. VB 调用 MATLAB 神经网络工具箱在测绘软件设计中的应用[J]. 测绘通报, 2011(11): 59-62.
WANG Xin-zhi, CAO Shuang, DING Hai-yong. Application of VB call MATLAB neural network toolbox in surveying soft-ware design[J]. Bulletin of surveying and mapping, 2011(11): 59-62.