

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.09.014

曾舜柯, 翟彦博, 彭和, 等. 铝合金仿生非光滑 MAO-HDTM 复合膜的构建及减黏脱附研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(9): 142-152.

铝合金仿生非光滑 MAO-HDTM 复合膜的构建及减黏脱附研究

曾舜柯, 翟彦博, 彭和, 魏子伟, 张毅, 胡小骞

西南大学 工程技术学院/丘陵山区农业装备重庆市重点实验室, 重庆 400715

摘要: 铝合金是农业机械潜在的主要轻量化材料之一, 但是硬度低, 耐磨、耐腐蚀性差, 土壤黏附现象严重等问题限制了其在现代农业机具中的应用. 该文以 6061 铝合金为研究对象, 首先采用微弧氧化(MAO)技术对其进行表面处理, 构建硬度、耐磨和耐腐蚀性能较好的非光滑膜层, 然后借鉴仿生理论, 使用十六烷基三甲氧基硅烷(HDTM)水浴法对其疏水改性, 获得了 MAO-HDTM 复合膜. 对复合膜微观形貌、显微硬度、疏水性及土壤黏附进行了测试与分析. 形貌检测结果显示: MAO-HDTM 复合膜与 MAO 膜表面形貌相似, 均存在类似荷叶表面的仿生凹凸结构. 元素分析结果和傅里叶变换红外光谱(FT-IR)图谱显示: HDTM 改性剂负载至 MAO 膜表面及孔隙之中, 完成了疏水改性处理. 硬度测试结果显示: 铝合金基体硬度值为 59.94 HV50, 而 MAO 膜和 MAO-HDTM 复合膜硬度值分别为 893.4 HV50 和 914.4 HV50, 硬度得到较大提升. 静态接触角测量结果显示: MAO 膜为 68° , 而 MAO-HDTM 复合膜为 147.3° , 接近超疏水状态. 土壤黏附测试结果显示: 在 20%, 25% 和 30% 含水率的土壤中 MAO-HDTM 复合膜黏附力值分别低于 MAO 膜测试值的 5%, 8% 和 4%. 采用微弧氧化技术与 HDTM 疏水改性技术相结合构建的仿生非光滑 MAO-HDTM 复合膜, 不但具有高硬度的力学特性, 还具有减黏脱附的功能特性, 可以为铝合金运用于农业机械轻量化设计提供一种新思路.

关键词: 仿生非光滑; 减黏脱附; 微弧氧化; 铝合金

中图分类号: TU395; S220.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2023)09-0142-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Construction and Viscosity Desorption Research of Biomimetic Non-Smooth MAO-HDTM Film of Aluminum Alloy

ZENG Shunke, ZHAI Yanbo, PENG He, WEI Ziwei,
ZHANG Yi, HU Xiaoqian

收稿日期: 2022-03-31

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(cstc2020jcyj-msxm0417).

作者简介: 曾舜柯, 硕士研究生, 主要从事金属表面处理研究.

通信作者: 翟彦博, 副教授.

College of Engineering and Technology, Southwest university/Chongqing Key Laboratory of Agricultural Equipment in Hilly Mountainous Areas, Chongqing 400715, China

Abstract: Aluminum alloy is one of the main potential lightweight materials for agricultural machinery, but problems such as low hardness, poor wear resistance, poor corrosion resistance, and serious soil adhesion limit the its application in modern agricultural machinery. In view of this, this study took 6061 aluminum alloy as the research object, firstly used micro-arc oxidation (MAO) technology to build a non-smooth film on the test sample with better hardness, wear resistance and corrosion resistance, and then, based on the theory of bionics, constructed the MAO-HDTM composite film by hydrophobic modification of Hexadecyl trimethoxy silane change (HDTM) in water bath. On this basis, the microstructure, micro-hardness, hydrophobicity and soil adhesion of the composite films were tested and analyzed. Morphological test results show that the surface morphology of MAO-HDTM composite film and MAO film are similar, and both have bionic concave-convex structures similar to the surface of lotus leaf. Elemental analysis results and FT-IR spectra showed that HDTM modifier was loaded on the surface and pores of MAO membrane, and the hydrophobic modification was completed. The hardness test results show that the aluminum alloy matrix is 59.94 HV50, while the hardness values of the MAO film and the MAO-HDTM composite film are 893.4 HV50 and 914.4 HV50, respectively, and the hardness is greatly improved. The static contact angle measurement results show that the MAO film is 68° , while the MAO-HDTM composite film is 147.3° , which is close to the superhydrophobic state. The results of soil adhesion test show that the adhesion value of MAO-HDTM film in soil with 20%, 25% and 30% moisture content was lower than 5%, 8% and 4% of the test value of MAO film, respectively. Based on the above results, the biomimetic non-smooth MAO-HDTM composite film constructed by the combination of micro-arc oxidation technology and HDTM hydrophobic modification technology not only has high hardness mechanical properties, but also has the functional properties of reducing adhesion and desorption. This study provides a new idea for the lightweight design of agricultural machinery by using aluminum alloys.

Key words: biomimetic non-smooth; adhesion reduction and desorption; micro-arc oxidation; aluminum alloy

农业机械在农业生产和收获中发挥着较大作用,但机械的能源有效利用率较低,大部分能源被消耗在克服机械自重及土壤对工作件的黏附和摩擦作用中,其中农业机械克服土壤黏附和摩擦力所消耗的能源占整个生产环节的 30%~50%^[1].降低土壤黏附和采用轻量化材料是农业机械节能降耗的有效途径^[2-3],而有望在耕种机械中最大量使用的轻量化材料就是铝合金.但是,铝合金的硬度低、耐磨和耐蚀性差,与土壤黏附现象严重.如何改善这些不足,是铝合金能否应用于耕种机械的关键.

微弧氧化(简称 MAO)作为近 10 多年发展起来针对铝、镁、钛等阀金属的一种表面改性新技术,具有工艺简单、污染小、效率高和实用性强的特点. MAO 处理的方法为:将作为阳极的被处理件与阴极浸入特定电解液中,施加外部电压使被处理件产生钝化膜,随着电压上升钝化膜被击穿,熔融状态基体氧化物随通道喷发,当接触到外部温度较低的电解液后熔融状态氧化物遇冷沉淀至表面形成陶瓷膜层,膜层提高了基体材料的硬度、耐磨和耐蚀性能.曹国平等^[4]对 ADC12 高硅铝合金进行恒流-恒压微弧氧化处理,获得的膜层厚度为 25 μm ,摩擦系数最小为 0.78,耐蚀性得到提高;焦志彬等^[5]制备了不同电流密度下的 7075 铝合金微弧氧化膜层,通过研究发现在电流密度为 10 A/dm^2 情况下微弧氧化膜的平均显微硬度为 1 069 HV0.2,并且其耐磨性能最好.根据前述研究结果可知,MAO 技术可以有效提高铝合金的力学性能和耐磨耐蚀性能,同时由于陶瓷膜层的形成机理使得膜层与基体间结合紧密不易因外部摩擦而脱落,为铝合金应用于农业耕种机械奠定了基础.

经 MAO 处理后的膜层虽然力学性能等得到较大提升,但是膜层疏松并且直径约 $5\ \mu\text{m}$ 的圆形孔洞(放电通道)和类似“火山坑”状的孔洞分布在表面,孔洞周围形成大量的圆形堆积物类似乳突状结构.通过对比荷叶表面发现,经过 MAO 技术处理后的膜层具有与荷叶相似的非光滑表面.荷叶是超疏水自清洁功能表面的典型代表,荷叶具有超疏水性能的主要原因在于其表面由乳突状的表皮细胞组成微米尺度的非光滑结构,乳突表面又分泌着蜡质的低表面能物质,从而形成超疏水自清洁表面^[6].结合土壤黏附机理可知,土壤黏附力主要依靠土壤黏粒表面水膜对材料表面的界面黏附力^[7],故提升材料表面疏水性可有效降低土壤黏附作用,为此广大科研工作者提出了仿生改形^[8-11]和表面材料改性^[12-14]两种解决土壤黏附问题的办法.其中,仿生技术运用最为广泛,通过以蚯蚓、鼯鼠和荷叶等土壤动物和植物非光滑表面形貌为模板设计和优化农业机械工作部件,使工作部件表面呈现特定形状进而减少土壤黏附.鉴于此,本研究拟结合荷叶仿生技术制备铝合金仿生非光滑复合膜并讨论其减黏脱附效果,为铝合金轻量化材料运用于农业耕种机械提供一种新思路.试验首先通过 MAO 处理技术提升铝合金表面硬度和耐腐蚀性,并获得仿生非光滑表面,随后以十六烷基三甲氧基硅烷(HDTM)溶液为改性剂对 MAO 膜进行疏水改性,完成 MAO-HDTM 复合膜的制备,最后测试铝合金 MAO-HDTM 复合膜的硬度、疏水性和在不同含水率土壤中的减黏脱附效果.

1 材料与方法

1.1 试验材料与试样制备

图 1 为铝合金、铝合金 MAO 膜和铝合金 MAO-HDTM 复合膜试样图片.试验选用 6061 铝合金并切成尺寸为 $40\ \text{mm} \times 20\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$ (长 \times 宽 \times 厚)的试样(图 1a).将基体材料依次用 400 Cw, 600 Cw, 800 Cw 和 1 000 Cw 水磨砂纸打磨至光滑,然后使用超声波清洗(无水乙醇),干燥后备用.表 1 为本次试验中 6061 铝合金的化学成分.

表 1 6061 铝合金化学成分百分比

元素	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Si	Fe	Al
百分比/%	0.15~0.4	0.15	0.8~1.2	0.25	0.04~0.35	0.15	0.4~0.8	0.7	余量

1.2 复合膜的制备与性能测定

1.2.1 仿生非光滑铝合金微弧氧化膜层制备

仿生非光滑铝合金微弧氧化膜层制备如下:称取硅酸钠 16 g、六偏磷酸钠 12 g、氢氧化钠 4 g,加入 1 L 去离子水中常温下搅拌配置成微弧氧化电解液.将铝合金试样作为阳极与碳棒阴极共同浸入电解液中,设置电源参数如下:恒流输出模式,占空比 30%,频率 800 Hz,电流密度 $15\ \text{A}/\text{dm}^2$,微弧氧化处理 20 min,获得的基础膜简称 MAO 膜(图 1b).

1.2.2 疏水改性试验

疏水改性处理试验如下:将 HDTM 溶液、无水乙醇和去离子水按照体积比为 3:87:10 的比例配置处理溶液,置于水浴锅中以 $35\ ^\circ\text{C}$ 恒温水解 28 h;将经 MAO 处理后的试样浸泡至水解完成的溶液中,加热温度至 $60\ ^\circ\text{C}$ 、时间为 15 min;最后将试样置于干燥箱中以 $80\ ^\circ\text{C}$ 干燥 4 h 完成疏水改性试验,获得的膜简称 MAO-HDTM 复合膜(图 1c).图 2 为铝合金仿生非光滑 MAO-HDTM 复合膜制备过程示意图.

1.2.3 试样性能测定

1) 试样的形貌检测和化学键测定.使用 JEOL 生产的 JSM-7800F10100 热场发射扫描电子显微镜扫描观察 MAO 膜和 MAO-HDTM 复合膜表面和截面并记录扫描成像图;使用 Nicolet 670 傅里叶变换红外光谱仪(简称 FT-IR)测定 MAO-HDTM 复合膜的红外光谱图.

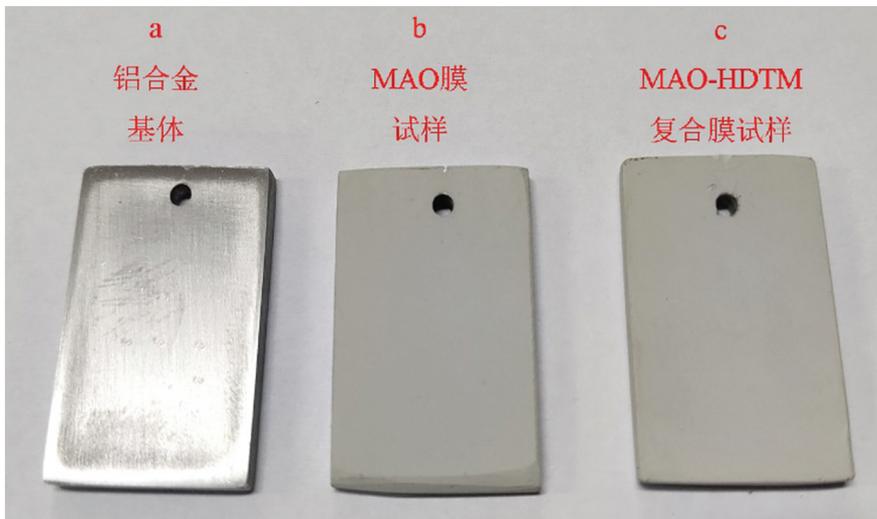


图1 铝合金基底(a)、铝合金 MAO 膜(b)和铝合金 MAO-HDTM 复合膜(c)试样图片

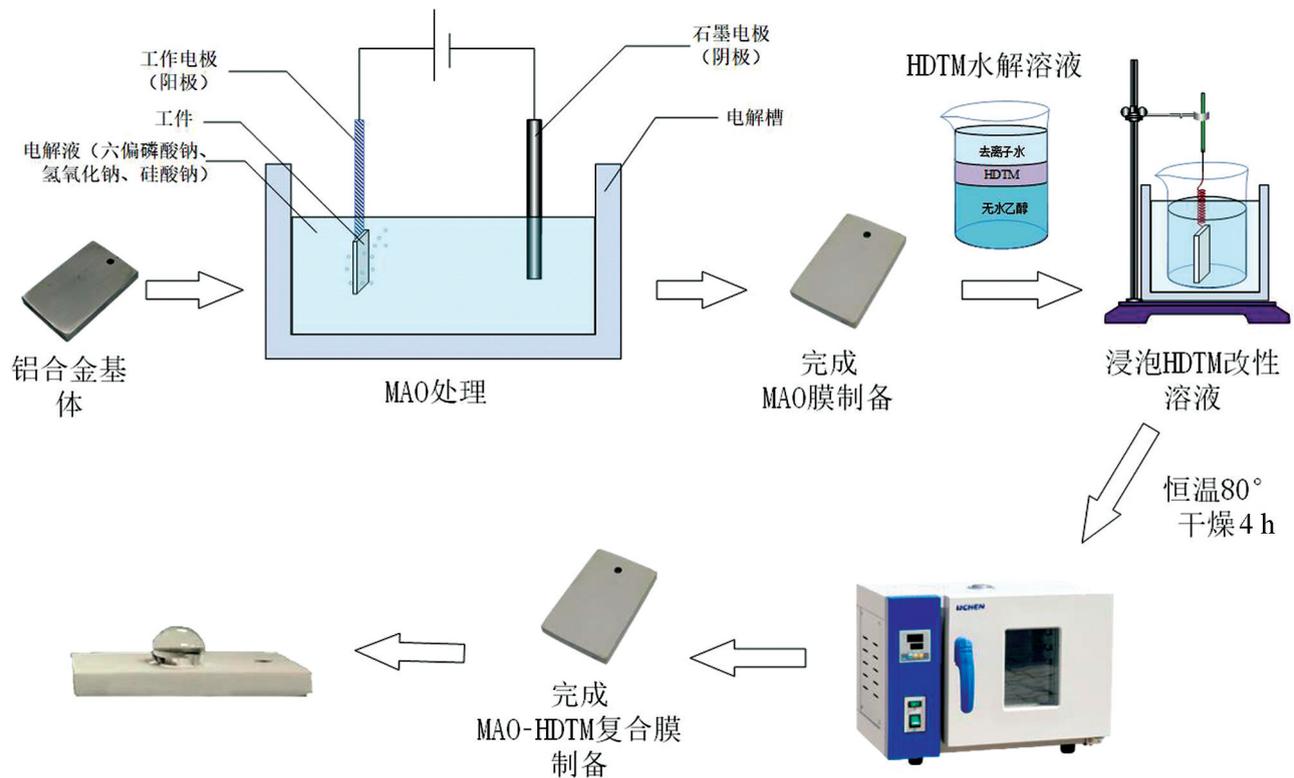


图2 铝合金仿生非光滑 MAO-HDTM 复合膜制备过程示意图

2) 试样的显微硬度测定. 使用里博新仪精密电子生产的显微硬度计进行硬度测试, 设置载荷为 50 kgf, 保压时间 10 s, 在试样表面进行 5 次硬度测试并计算平均值作为试样硬度值.

3) 试样的静态接触角测定. 采用静滴法, 使用克吕士生产的 DSA10030700 型接触角测量仪测量 MAO 膜和 MAO-HDTM 膜表面接触角. 常温下, 在试样表面滴入 5 μL 的去离子水, 待液体稳定后采用 Laplace-Young 算法对水滴形状进行模拟并测量接触角.

4) 试样的减黏脱附效果测试. 采用东莞市智取精密仪器公司生产的 ZQ-990 型拉伸机测试试样在不同含水率土壤中的减黏脱附效果. 将试样固定至测试夹头处并以恒定速度插入不同含水率土壤中, 通过拉伸机读取黏附力数值, 每组样本不间断重复试验 10 次, 计算黏附力平均值并拍照记录每次试验中试样表明的黏附土壤状况.

2 结果与分析

2.1 膜层表征与分析

2.1.1 疏水改性前后膜层 SEM 形貌的对比分析

图 3 为 MAO 膜(图 3a、图 3b)以及 MAO-HDTM 复合膜(图 3c、图 3d)表面和截面扫描电镜(SEM)对比图。表面 SEM 图显示,改性后的 MAO-HDTM 复合膜与 MAO 膜表面形貌相似:膜层表面疏松崎岖并有“火山口”状凸起结构,直径约 $5\ \mu\text{m}$ 的微孔均匀分布在表面(图 3a、图 3c);截面 SEM 图显示,基体与膜层间存在明显分界(图 3b、图 3d 中白色线标记处),MAO 膜层厚约 $20\ \mu\text{m}$,且同样存在微孔(图 3b、图 3d)。SEM 图中的微孔为 MAO 处理产生的放电通道。

根据 MAO 膜和 MAO-HDTM 复合膜表面和截面 SEM 形貌对比分析结果可知,MAO 处理后的膜层厚约 $20\ \mu\text{m}$,具有疏松崎岖的非光滑表面,且表面分布直径约 $5\ \mu\text{m}$ 的孔隙,与文献[15]关于 MAO 处理后表面形貌的描述一致,HDTM 疏水改性处理并未改变膜层的形貌。

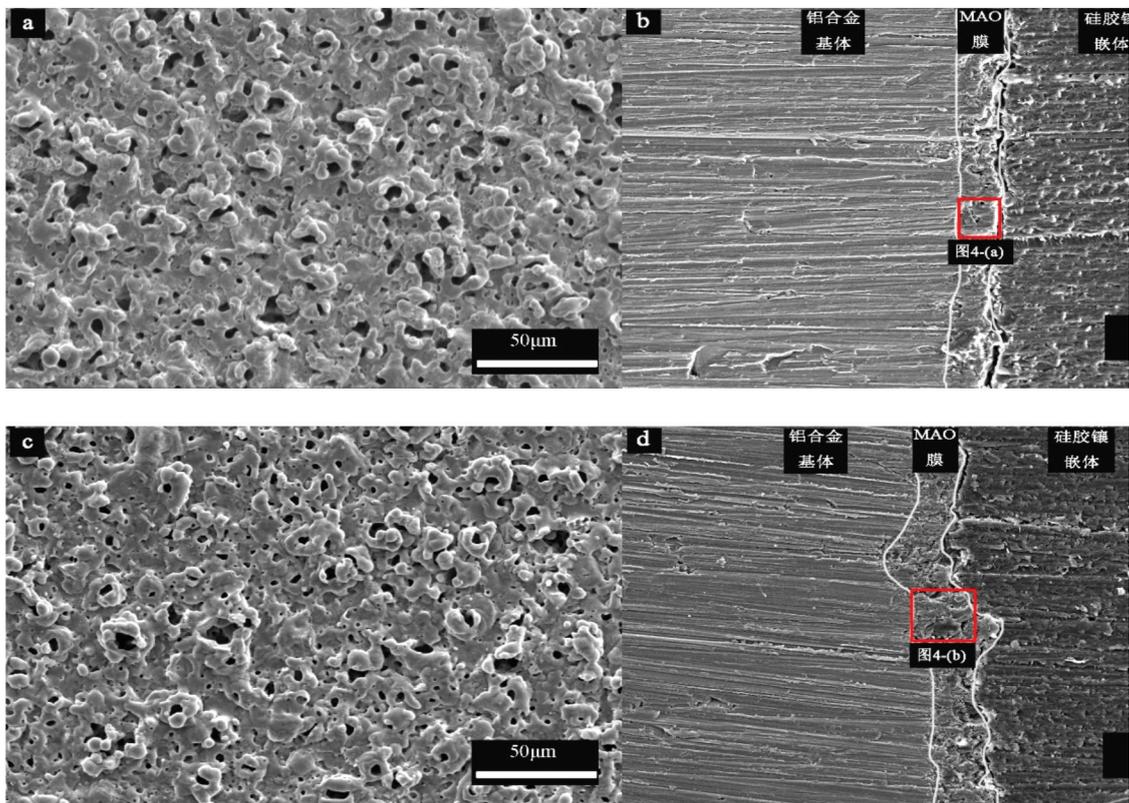


图 3 MAO 膜和 MAO-HDTM 复合膜表面和截面 SEM 图

2.1.2 疏水改性前后膜层截面的能谱对比分析

图 4a、图 4b 分别为图 3 MAO 膜(图 3b)和 MAO-HDTM 复合膜(图 3d)截面 SEM 图中红色方框处放大 SEM 形貌的能谱分析对比图,表 2 为两者能谱分析结果数据。

1) MAO-HDTM 复合膜截面处 C 元素集中分布在膜层处,而 MAO 膜截面处 C 元素分布较为分散。两者 O 和 Si 元素分布范围均集中在膜层处,密集程度相近。

2) MAO-HDTM 复合膜和 MAO 膜组成的元素以 Al 和 O 为主,前者 C 元素的原子百分比为 39.70% 高于后者的 26.15%,Si 元素的原子百分比相近分别为 1.78% 和 1.96%。

根据 MAO 膜和 MAO-HDTM 复合膜截面的能谱对比分析结果可知,经改性后的膜层表面及内部 C 元素的百分比高于未改性的膜层。

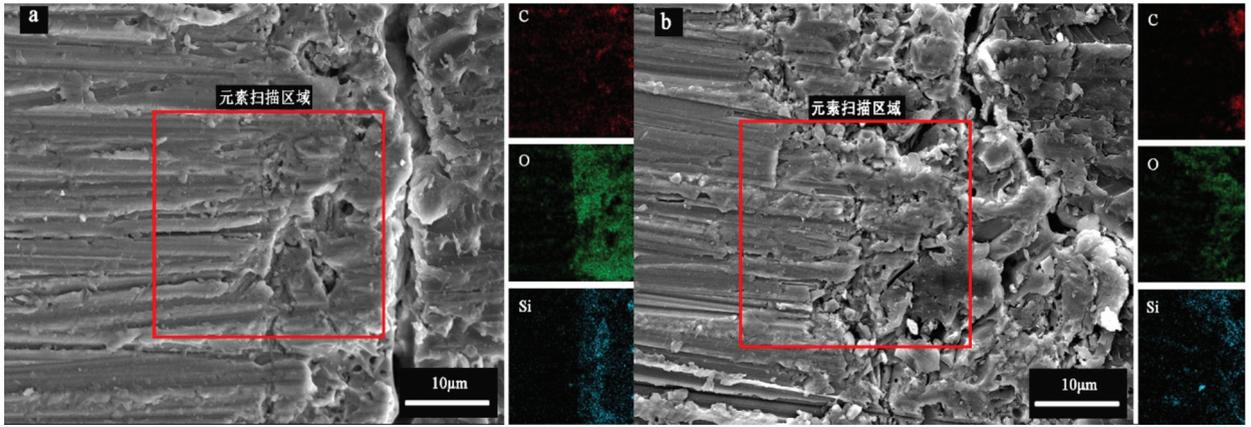


图 4 MAO 膜(a)和 MAO-HDTM 复合膜(b)截面 SEM 图中红色圆圈处的能谱分析图

表 2 MAO 膜和 MAO-HDTM 复合膜截面能谱分析结果

元素	原子百分比/%	元素	原子百分比/%
C	26.15	C	39.70
O	27.67	O	19.56
Al	44.22	Al	38.96
Si	1.96	Si	1.78
MAO		MAO-HDTM	

2.1.3 疏水改性后膜层的红外光谱分析

图 5 为 MAO-HDTM 复合膜的傅里叶变换红外光谱图, 光谱显示:

1) 2856 cm^{-1} , 2925 cm^{-1} 处为十六烷基三甲氧基硅烷上 $-\text{CH}_2-$ 的对称和不对称伸缩振动, 此吸收峰证明膜表面存在 HDTM 功能团;

2) 1047 cm^{-1} 处为 Si-O-Al 的吸收峰, 此吸收峰证明 HDTM 有效地负载至铝合金 MAO 膜表面;

3) 1116 cm^{-1} 处为 Si-O-Si 的吸收峰, 此吸收峰证明在负载反应中 HDTM 的硅烷有效地交联在一起;

4) 3446 cm^{-1} 处为 Si-OH 的吸收峰, 此吸收峰证明在 MAO-HDTM 膜中还存在尚未发生水解反应的羟基;

5) 570 cm^{-1} 处存在一个较强吸收峰, 此吸收峰证明含有铝合金氧化物。

改性后的红外光谱图与文献 16 所呈现的图谱相同, 因此证明 HDTM 有机功能团已经负载至改性后的膜层表面及内部, 同时验证了能谱分析中改性后的膜层 C 元素百分比高于未改性膜层的结果。

综合改性膜层前后 SEM 形貌和能谱对比分析结果可知, MAO 处理后基体获得了厚度约为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的非光滑表面膜层; 使用 HDTM 对其进行改性处理后, 非光滑表面形貌并未改变且 HDTM 有机功能团负载至 MAO 表面和微孔内部。

2.2 MAO 处理前后表面硬度对比分析

表 3 为铝合金基体、MAO 膜和 MAO-HDTM 复合膜试样的表面硬度测试值。表格显示铝合金基体的

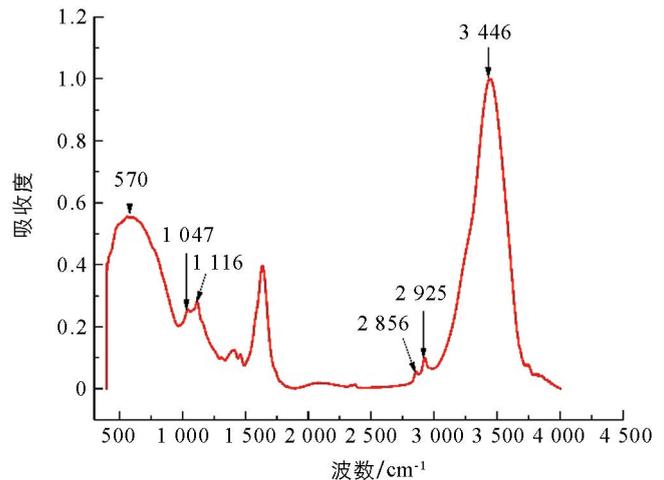


图 5 MAO-HDTM 复合膜红外光谱图

显微硬度平均值为 59.94 HV50, 而经过 MAO 处理后的 MAO 膜和 MAO-HDTM 复合膜表面显微硬度平均值分别为 893.4 HV50 和 914.4 HV50, 相比于铝合金基体, 后两者的表面硬度有所提升, 而疏水改性处理并没有对 MAO 膜的硬度产生影响。

表 3 铝合金基体、MAO 膜和 MAO-HDTM 复合膜试样的表面硬度测试值

试样	表面硬度测试值/ HV50					平均值/ HV50
	铝合金基体	60	59.5	61	58	61.2
MAO 膜试样	987	954	918	843	765	893.4
MAO-HDTM 复合膜试样	1 056	899	884	871	862	914.4

2.3 疏水改性前后表面疏水性对比分析

十六烷基三甲氧基硅烷(简称 HDTM)其分子式为 $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$. HDTM 常用作玻璃防雾剂和硅烷偶联剂, 因其与金属及非金属材料表面易组装, 常常作为疏水研究的重要材料, 且疏水效果较为明显, 详细研究结果见文献[16-19]. 图 6a、图 6b 为 MAO 膜和 MAO-HDTM 复合膜表面接触角测试结果. 结果显示: 铝合金 MAO 膜表面接触角为 68° , 呈现亲水性, 水滴为半球状; 而 MAO-HDTM 复合膜表面接触角为 147.3° 时呈现疏水性, 水滴为完整球状. 根据接触角测试标准, 当静态接触角小于 90° 时此材料为亲水性材料, 而当接触角大于 90° 时为疏水性材料, 尤其当接触角大于 150° 时为超疏水材料. 经过改性后的 MAO 膜已近似于超疏水状态, 此结果主要源于 HDTM 改性剂和它与表面的负载方式.

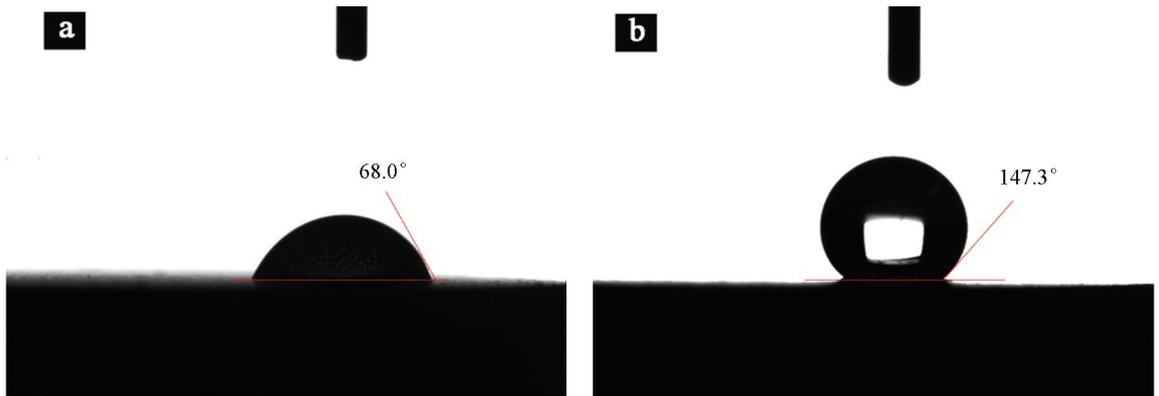


图 6 MAO 膜(a)和 MAO-HDTM 膜(b)表面接触角测试结果

图 7 为 HDTM 在金属氧化表面的负载示意图. HDTM 在乙醇溶液中水解产生硅醇, 而当经 MAO 处理后的试样浸入其中时, 硅醇分子在氢键和范德华力驱动下于金属氧化物表面均匀排列, 硅原子上连接的 3 个羟基或其他硅醇上的羟基在氢键作用下靠近而聚集, 在外部简单加热条件下, Si-OH 与 SiVOH 及 Si-OH 与氧化物表面羟基之间发生脱水反应生成 Si-O-Si 及 Si-O-R(R 为金属基体)共价键, 完成硅烷在金属氧化物表面的负载^[16]. 图 7 结合图 4 中 MAO-HDTM 复合膜截面处能谱分析结果可知, HDTM 有机功能团不仅负载至 MAO 膜表面, 更负载至膜层微孔内. 因此相比于其他的改性手段, 水浴法使得 HDTM 有机功能团可以更充分地膜层非光滑表面凸起结构及微孔内部进行反应结合, 且由于负载方式主要依靠分子键结合, 因此其结合强度较大不易分离. 因膜表面各处负载了大量的 HDTM 有机功能团, 所以使改性后的膜层接触角增大了 79.3° , 提升了膜层的疏水性能.

2.4 疏水改性前后减黏脱附测试对比分析

图 8 为 MAO 膜和 MAO-HDTM 复合膜减黏脱附测试设备示意图. 测试主要依靠实验室的拉伸机进行, 使用夹具固定测试样本并以恒定速度插入不同含水率的土壤中. 在同一含水率的土壤测试中控制土壤变形量相同, 记录土壤每变形 1 mm 显示的黏附力数值, 每次试验结束后不清理样件表面黏附土壤, 重新

选取土壤测试处重复测试 10 次, 模拟农业机械工作部件插入和拔出土壤的工作过程. 样本插入土壤过程中, 除需克服土壤阻力和摩擦力外, 还有土壤对样本四周的黏附力、为尽可能减小土壤对样本的阻力和摩擦力, 配置的测试土壤含水率取土壤塑限和液限之间, 且接近液限处, 使土壤接近黏滞性流体状态, 减少了测试过程中的土壤阻力和摩擦力. 本次测试使用土壤取自重庆市北碚区缙云山水土保持基地的紫色土, 其液限和塑限分别为 34.32% 和 19.51%^[20-23], 因此选择配置含水率为 20%, 25% 和 30% 的土壤进行测试, 对 10 次测试中黏附力平均值和第 1, 4, 7, 10 次测试后样本表面黏附土壤图片进行对比分析.

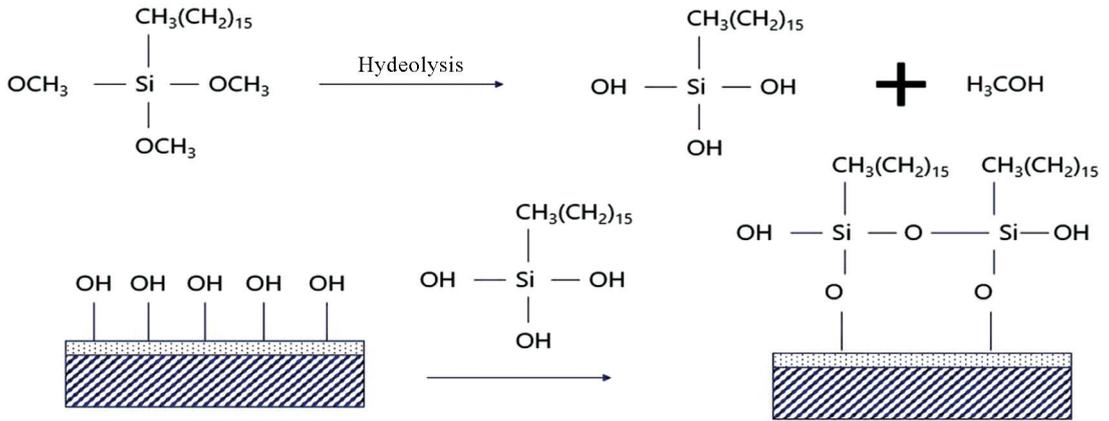


图 7 HDTM 在金属氧化表面的负载示意图

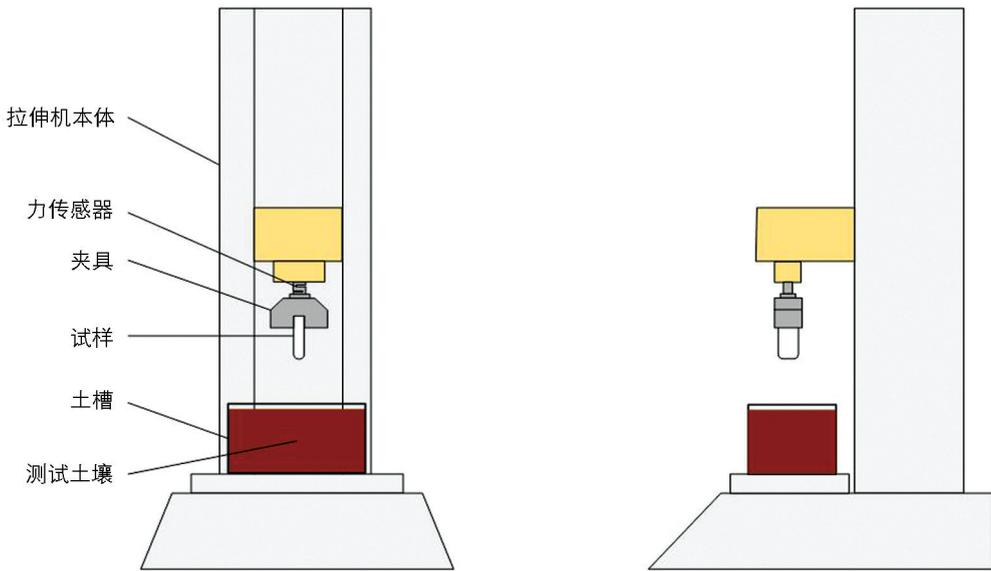


图 8 MAO 膜和 MAO-HDTM 复合膜减黏脱附测试设备示意

图 9 和图 10 分别为 MAO 膜和 MAO-HDTM 复合膜在含水率为 20%, 25% 和 30% 土壤中测试的黏附力平均值和第 1, 4, 7 和 10 测试后表面黏附泥土图片.

图 9a 和图 10a 分别为土壤含水率为 20% 的平均黏附力曲线和测试中表面黏附土壤图片. 结果显示: MAO-HDTM 复合膜的平均黏附力稍低于 MAO 膜, 与后者相比, 前者的平均黏附力降低了约 5%; 前者表面黏附的土壤明显少于后者, 且随着试验次数增加, 表面土壤最后集中在样本表面上部, 而后者表面黏附的土壤随着插入试验次数增加, 土壤黏附至表面所有区域.

图 9b 和图 10b 分别为土壤含水率为 25% 的平均黏附力曲线和测试中表面黏附土壤图片. 结果显示: MAO-HDTM 复合膜的平均黏附力明显低于 MAO 样本, 与后者相比, 前者的平均黏附力降低了约 8%; 在进行 10 次试验之后, 前者表面上部分区域黏附了一些土壤, 其余区域仅黏附较少土壤, 而后者表面大

部分区域黏附了土壤,且黏附量较多.

图 9c 和图 10c 分别为土壤含水率为 30% 的平均黏附力曲线和测试中表面黏附土壤图片. 结果显示: MAO-HDTM 复合膜的平均黏附力稍低于 MAO 样本,与后者相比,前者的平均黏附力降低了约 4%;在试验前期,前者表面黏附较少土壤,随着试验进行样本表面黏附了较多土壤,而后者的表面在整个试验中均黏附较多土壤.

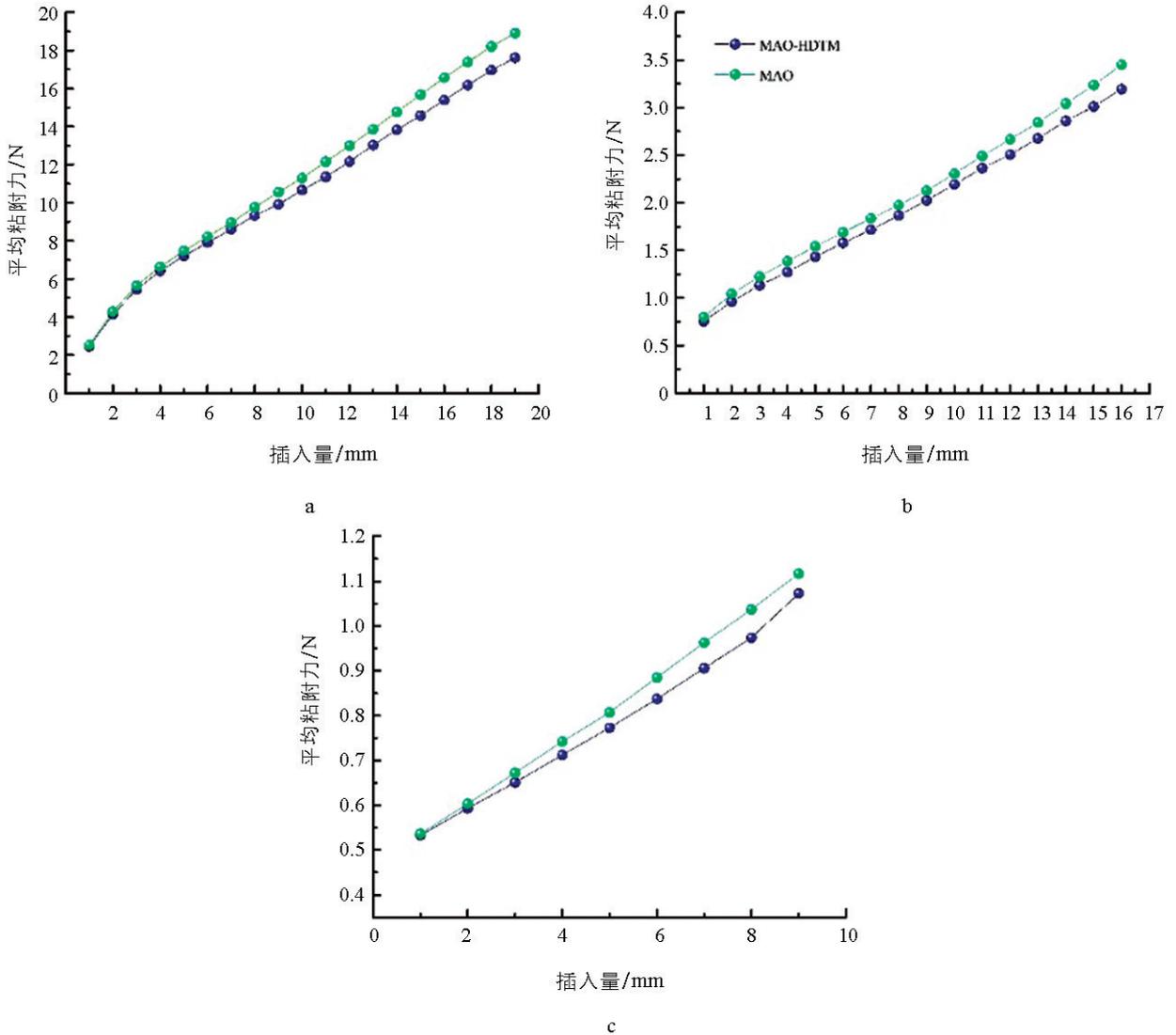


图 9 含水率为 20% (a)、25% (b) 和 30% (c) 的土壤黏附力测试平均值

MAO-HDTM 复合膜在含水率为 20%、25% 和 30% 的土壤试验中平均黏附力均低于 MAO 膜;且在不同含水率的土壤黏附力测试后,前者表面黏附的土壤明显少于后者,尤其是在 25% 含水率土壤测试中 MAO-HDTM 复合膜在经过 10 次测试后,表面黏附的泥土量远少于 MAO 膜测试后的泥土量. 结合黏附力测试结果和土壤黏附机理推测造成此结果的原因为:在不同含水率土壤中,土壤黏粒被不同体积水膜包裹,当进行测试时土壤黏粒表面水膜与材料表面接触并形成界面水膜,水膜与材料表面间的界面黏附力是土壤黏附力的主要组成部分. 而 MAO 膜和 MAO-HDTM 复合膜仿生非光滑表面上的凹凸结构使黏粒表面水膜与材料表面接触面积降低,界面水膜呈不连续状态,降低了水膜的界面黏附力,进而降低了土壤的黏附作用. 由于 MAO 膜的表面自由能高于 MAO-HDTM 复合膜,因此不连续水膜的界面黏附力同样大于后者,因此经过 10 次测试后前者表面黏附的土壤量和平均黏附力均大于后者.

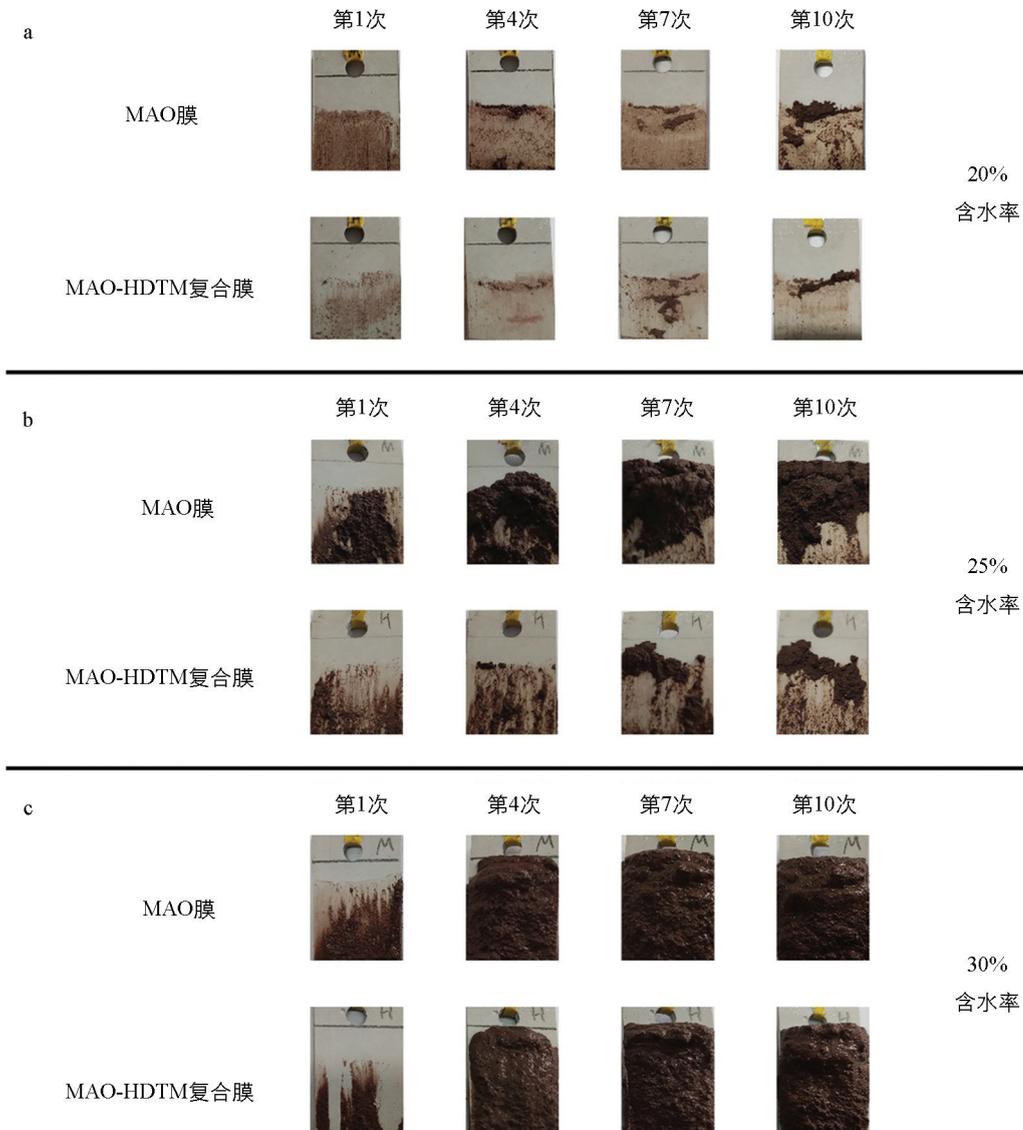


图 10 MAO 膜和 MAO-HDTM 复合膜在不同含水率土壤测试中表面黏附泥土图片

3 结论

本文以农机轻量化材料 6061 铝合金为基体, 利用微弧氧化技术和 HDTM 水浴改性的简单方法制备了仿生非光滑膜层, 获得了 MAO-HDTM 复合膜。使用 SEM, EDS 和 FT-IR 检测设备对 MAO 膜和 MAO-HDTM 复合膜表面形貌、物相和化学键进行了分析, 确定了 HDTM 功能团的成功负载; 然后使用显微硬度计和角接触测量仪测试了两者的表面硬度值和静态接触角; 最后使用拉伸机测试并探讨了两者在不同含水率土壤中的减黏脱附效果, 得到如下结论:

1) 利用微弧氧化技术和水浴法制备了 MAO-HDTM 复合膜, 为简单制备仿生非光滑表面提供了一种新思路;

2) 经过 HDTM 疏水改性后的 MAO-HDTM 复合膜表面硬度值与 MAO 膜测试值相似, 静态接触角为 147.3° , 相比于 MAO 膜 (68°) 疏水性能得到较大提升;

3) MAO 膜和 MAO-HDTM 复合膜在不同含水率土壤黏附力测试中, 后者黏附力测试值均低于前者, 且后者在测试过程中表面所黏附的土壤量少于前者, 由此说明 MAO-HDTM 复合膜对土壤具有一定的减黏脱附效果, 为铝合金轻量化材料运用于农业机具提供了一种新思路。

参考文献:

- [1] 郑侃. 耕整机械土壤减粘脱附技术研究现状与展望 [J]. 安徽农业大学学报, 2019, 46(4): 728-736.
- [2] 才胜, 罗颖辉, 李青林. 农业机械轻量化技术研究现状与发展趋势 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(17): 35-52.
- [3] 张广生, 丁伟国, 姜波, 等. 电源模式对 ADC12 高硅铝合金微弧氧化膜层组织与性能的影响 [J]. 装备环境工程, 2020, 17(8): 97-103.
- [4] 曹国平, 宋若希, 卢俊鹏, 等. 电流密度对 7075 铝合金微弧氧化膜层组织与性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2021, 50(8): 77-80.
- [5] 焦志彬. 仿荷叶减反射自清洁复合涂层的设计制备与性能研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [6] 任露泉. 土壤粘附力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [7] 王晓阳, 潘睿, 强华, 等. 仿生几何结构表面深松铲铲尖设计与试验 [J]. 中国农机化学报, 2022, 43(1): 1-6.
- [8] 姚久元. 基于蚯蚓波纹润滑体表的仿生开沟器优化研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [9] MASSAH J, RAHMANI FARD M, AGHEL H. An Optimized Bionic Electro-Osmotic Soil-Engaging Implement for Soil Adhesion Reduction [J]. Journal of Terramechanics, 2021, 95: 1-6.
- [10] TOROTWA I, DING Q S, MAKANGE N R, et al. Performance Evaluation of a Biomimetically Designed Disc for Dense-Straw Mulched Conservation Tillage [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 212: 1-10.
- [11] MEHRANG MARANI S, SHAHGHOLI G, MOINFAR A. Effect of Nano Coating Materials on Reduction of Soil Adhesion and External Friction [J]. Soil and Tillage Research, 2019, 193: 42-49.
- [12] BARZEGAR M, HASHEMI S J, NAZOKDAST H, et al. Evaluating the Draft Force and Soil-Tool Adhesion of a UH-MW-PE Coated Furrower [J]. Soil and Tillage Research, 2016, 163: 160-167.
- [13] GUAN C S, FU J J, CUI Z C, et al. Evaluation of the Tribological and Anti-Adhesive Properties of Different Materials Coated Rotary Tillage Blades [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 209: 1-9.
- [14] 宋仁国, 孔德军, 宋若希. 微弧氧化技术与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [15] 罗和义, 王芳, 王景刚, 等. 铝合金表面有机硅烷超疏水膜的制备及其耐蚀性 [J]. 材料保护, 2011, 44(5): 64-65, 85.
- [16] ZHANG Z B, XUE F X, BAI W X, et al. Superhydrophobic Surface on Al Alloy with Robust Durability and Excellent Self-Healing Performance [J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 410: 126952.
- [17] 杨雪, 苏静, 王鸿博. 基于 HDTMS 的一步法构筑棉织物超疏水表面 [J]. 材料导报, 2020, 34(S1): 542-547.
- [18] 王媛媛. 镁合金表面微弧氧化复合膜层的制备及其性能研究 [D]. 桂林: 桂林理工大学, 2015.
- [19] 沈泰宇, 李贤, 汪时机, 等. 微生物固化砂质黏性紫色土的三轴抗剪强度与浸水抗压强度 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 135-143.
- [20] 谢均强, 史东梅, 张兵, 等. 紫色丘陵坡地不同用地类型土壤理化特征分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2008, 30(9): 108-112.
- [21] 翁昊璐, 慈恩, 连茂山, 等. 重庆市酸性紫色土成因及其对发生分类的意义 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(9): 32-39.
- [22] 王帅, 赵敬坤, 王洋, 等. 重庆花椒种植区主要类型土壤剖面的肥力特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(11): 40-47.
- [23] 李建桥, 田丽梅. 地面机械仿生减粘降阻技术 [C] // 农业机械化与新农村建设. 镇江: 中国农业机械学会 2006 年学术年会论文集(上册), 2006.