

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20220512001

# 脱合金法在 TC4 钛合金磁粒研磨 光整加工中的应用\*

张祥<sup>1</sup> 马小刚<sup>1</sup> 张亮<sup>2</sup> 杨诗瑞<sup>2</sup> 解志文<sup>1</sup>

(1. 辽宁科技大学机械工程与自动化学院 鞍山 114051;  
2. 北京动力机械研究所 北京 100074)

**摘要:** 为解决 TC4 钛合金表面材料的定量去除问题, 提高 TC4 钛合金磁粒研磨光整加工的效率, 采用电化学脱合金法对不同浓度的 NaOH 溶液进行分析, 得出最佳电解液浓度为 1.5 mol/L; 利用动电位和恒电位极化确定脱合金临界电压为 2.1 V。在 1.5 mol/L NaOH 溶液中, 2.1 V 电压下进行脱合金试验, TC4 钛合金表面获得连续均匀的纳米多孔结构。脱合金 3、6、9 h 后, 工件表面纳米多孔层的维氏硬度分别降低 29.4%、39.5%、46.7%。摩擦磨损试验中, 磨球穿透纳米多孔层的时间分别为 11、21、35 min, 纳米多孔层厚度分别达到 2.2、3.8 和 6.2 μm。对 TC4 钛合金和脱合金工件进行磁粒研磨光整加工, 研磨加工 165 min 后, TC4 钛合金表面 6.2 μm 厚度的磨痕得到有效去除; 研磨加工 45 min 后, 脱合金工件表面 6.2 μm 厚度的纳米多孔层被有效去除, 研磨效率提升 72.7%。使用脱合金-磁粒研磨复合加工的方法, 实现了 TC4 钛合金表面材料的定量去除, 而且降低了表面材料的维氏硬度, 提高了磁粒研磨的加工效率。

**关键词:** TC4 钛合金; 电化学脱合金; 纳米多孔结构; 维氏硬度; 磁粒研磨; 定量去除

中图分类号: TG176

## Application of the Dealloying Method to the Grinding and Finishing of TC4 Titanium Alloy Magnetic Particles

ZHANG Xiang<sup>1</sup> MA Xiaogang<sup>1</sup> ZHANG Liang<sup>2</sup> YANG Shirui<sup>2</sup> XIE Zhiwen<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China;  
2. Beijing Power Machinery Research Instituted, Beijing 100074, China)

**Abstract:** This study attempted to solve the problem of quantitative removal of TC4 titanium alloy surface material and improve the efficiency of the lapping finishing process for TC4 titanium alloy magnetic particles by employing the electrochemical dealloying and magnetic particle lapping methods. The electrochemical dealloying method was used to analyze the corrosion range of the TC4 titanium alloy in 0.5, 1, and 1.5 mol/L NaOH solutions, and it was determined that when the electrolyte concentration was 1.5 mol/L, the corrosion interval was large and the corrosion and dissolution of the Al element was obvious. In electrochemical dealloying experiments, the dealloying behavior was characterized by potentiodynamic and potentiostatic polarization. The range of critical voltage determined by potentiodynamic polarization is 0.5–2.3 V. The influence of the scanning rate was then excluded by potentiostatic polarization, and the accurate critical voltage of dealloying was determined to be 2.1 V. Electrochemical dealloying experiments were conducted on TC4 titanium alloy workpieces in 1.5 mol/L of NaOH solution at 2.1 V. Scanning electron microscopy revealed that a nanoporous structure with large pores and continuous uniformity was prepared on the surface of the TC4 titanium alloy after electrochemical dealloying. With the prolongation of the electrochemical dealloying test time, the Al element

\* 国家自然科学基金(51775258)、辽宁省自然科学基金重点(20170540458)和精密与特种加工教育部重点实验室基金(B201703)资助项目。

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51775258), Natural Science Foundation Plan Key Projects of Liaoning Province (20170540458), and Key Laboratory Fund of Ministry of Precision and Special Processing Education (B201703).

20220512 收到初稿, 20220915 收到修改稿

continued to dissolve rapidly and continuously. The dealloying process penetrated deep into the interior of the TC4 titanium alloy, and the thickness of the nanoporous layer also increased. After electrochemical dealloying of the TC4 titanium alloy for 3, 6, and 9 h, the Vickers hardness of the nanoporous layer on the surface was detected by a microhardness tester under the same test conditions. Results showed that, compared with the TC4 titanium alloy, the Vickers hardness of the nanoporous layer on the surfaces of the workpieces after dealloying was reduced by 29.4%, 39.5%, and 46.7%, respectively. A friction test using a friction and wear tester was performed on the workpieces after dealloying and revealed that the grinding ball penetrated the nanoporous layers prepared on the workpiece surfaces after dealloying for 3, 6, and 9 h, and the times for the friction factor to jump were 11, 21, 35 min, respectively. The thickness of the nano-porous layer on the surfaces of the dealloyed workpieces was measured using a step instrument. The measurement data showed that the thickness of the nano-porous layer on the surface of the TC4 titanium alloy could reach 2.2, 3.8, and 6.2  $\mu\text{m}$  after 3, 6, and 9 h of dealloying, respectively. Finally, the TC4 titanium alloy and dealloyed workpieces were subjected to magnetic particle grinding and finishing tests. After 165 min of magnetic particle grinding, the 6.2- $\mu\text{m}$ -thick wear scars on the surface of the TC4 titanium alloy were effectively removed; after 45 minutes, the 6.2  $\mu\text{m}$  thick wear scar on the surface of the dealloyed workpiece was effectively removed, the nano porous layer was quantitatively removed, and the magnetic particle grinding efficiency was improved by 72.7%. In addition, a comparison of the Vickers hardnesses of the workpiece surfaces before and after grinding showed that the dealloying reaction corroded and dissolved the surface layers of the workpieces, which decreased the surface hardnesses of the workpieces but did not affect the performance of the TC4 titanium alloy matrix. Thus, dealloying-magnetic particle grinding composite processing enables the quantitative removal of the surface material of the TC4 titanium alloy, and the processing efficiency of magnetic particle grinding can be improved by reducing the Vickers hardness of the surface material. This processing technology can provide a reference for the quantitative removal of surface materials while ensuring the grinding efficiency of cemented carbide.

**Keywords:** TC4 titanium alloy; electrochemical dealloying; nanoporous structure; vickers hardness; magnetic particle grinding; quantitative removal

## 0 前言

钛合金以其良好的比强度、耐高温、耐腐蚀性等优异性能,广泛应用于国防工业、医疗设备等重要领域<sup>[1-3]</sup>。随着钛合金零件结构的复杂化,其表面形状和型腔结构也越来越复杂,在对钛合金工件进行加工时,传统的机械加工方法越来越不能满足其加工要求。磁粒研磨因其磁性磨粒所特有的仿形性和柔性,加工过程中可以不受工件表面形状和型腔结构的限制,在复杂表面加工中的应用越来越广泛<sup>[4-6]</sup>。但在钛合金这类高硬度材料的加工中,磁粒研磨压力较小,材料去除量少,加工效率比较低,并且无法准确确定去除厚度。如何在提高加工效率的同时,实现微量的定量去除也是人们一直以来探究的问题。

现有提高钛合金工件磁粒研磨加工效率的方法,主要有振动辅助磁粒研磨、电解-磁粒复合研磨两种。为提高钛合金工件的加工效率,焦安源等<sup>[7]</sup>采用超声波振动辅助磁粒研磨的复合加工方案提高研磨压力,对钛合金锥孔进行加工,使得材料去除量是传统磁粒研磨的1.6倍。马付建等<sup>[8]</sup>在钛合金磁粒研磨光整加工的过程中引入超声进行辅助,增大了切削力和材料去除率。许召宽等<sup>[9]</sup>采用电解复合磁力研磨的方法,在钛合金表面电解生成相对基体

质软的钝化膜,再利用磁力研磨将其去除,降低了工件表面材料维氏硬度,提高单位时间材料去除量。王金山等<sup>[10]</sup>在对复杂型面金属零件的光整加工过程中,提出一种高速磨粒流动辅助电解加工的方法,通过电解在工件表面生成因硬度较低的钝化膜,再通过磨粒高速流动的微切削作用,提高单位时间内材料去除量,获得较好的加工效果。TILEY等<sup>[11]</sup>采用脉冲电化学反应配合机械振动去除钝化膜的加工方法,对钛合金扫描电子显微镜试样进行加工,不仅提高了加工效率而且还获得了良好的加工效果。根据上述几种加工方案可以看出,现有钛合金研磨加工方法主要为振动提高研磨压力、生成质软的钝化膜以及在这两种方法的基础上进行创新,虽明显提高了钛合金工件磁粒研磨加工效率,但均无法实现工件表面材料的定量去除。

本文在现有振动辅助磁粒研磨、电解-磁粒复合研磨两种提高钛合金磁粒研磨加工效率的方法之外,提出脱合金-磁粒研磨相结合的方法,对TC4钛合金进行光整加工。为了利用电化学脱合金法,以NaOH溶液为电解液,在TC4钛合金材料表面制备纳米多孔层,降低TC4钛合金表面材料的维氏硬度。通过摩擦磨损试验在纳米多孔层表面制备微米级磨痕,最后通过磁粒研磨来对摩擦磨损试验后的工件进行光整加工,通过磨痕是否去除来表征纳米多孔层的定量去除。

## 1 试验原理

电化学脱合金是利用电化学腐蚀溶解的方法, 根据合金中不同组分元素间化学活泼性的差异, 将一种或多种活泼元素从合金母体中选择性地溶解的过程, 剩余的惰性金属元素通过表面扩散与自组装过程, 形成多孔结构<sup>[12-13]</sup>。在脱合金过程中合金工件的初始形状保持不变。

在 NaOH 碱性溶液中, Ti-6Al-4V (TC4) 前驱体合金中的 Al 和 Ti、V 的标准电极电位差很大, Al 作

为活泼金属元素优先与电解液反应, Ti、V 作为惰性金属元素则保留下来, 形成纳米多孔结构。TC4 钛合金脱合金过程如图 1 所示, 其中图 1a 为 TC4 前驱体合金的示意图。在脱合金过程中, 合金/电解液界面位置上的活泼金属元素 Al 优先开始溶解 (图 1b), 在界面形成空位; 惰性金属元素 Ti、V 得以保留, 并发生表面迁移重组 (图 1c); 随着脱合金化的进行, 惰性金属元素不断进行迁移、聚集形成韧带和孔隙 (图 1d); 最终因惰性金属元素的迁移, 活泼金属元素被暴露于界面上, 开始溶解, 形成新的空位, 形成连通的纳米多孔结构并直至脱合金化完成 (图 1e)。

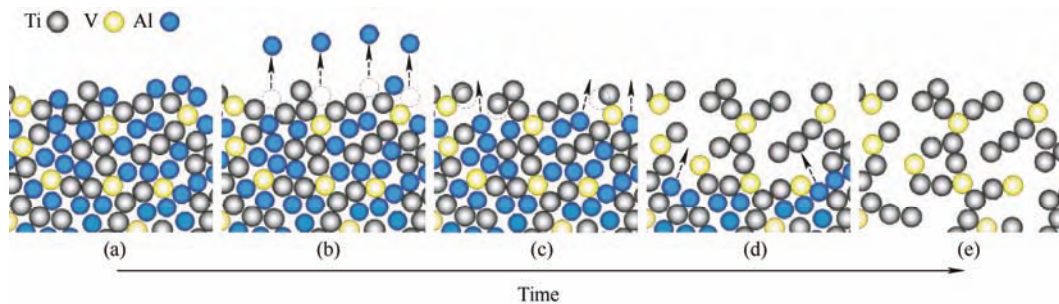


图 1 TC4 钛合金脱合金过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dealloying process of TC4 titanium alloy

经过电化学脱合金处理后, TC4 钛合金表面形成一层纳米多孔层, 与钛合金基体相比纳米多孔层的硬度显著下降, 密度和材料组分也发生明显变化。

磁粒研磨光整加工原理如图 2 所示, 在磁粒研磨对 TC4 钛合金光整加工过程中, 钛合金硬度较高,

由于磁粒研磨压力较小, 材料去除量少, 导致加工效率比较低。经过电化学脱合金处理后, TC4 钛合金工件表面大幅降低, 再利用磁粒研磨微量去除的特性, 将脱合金后的纳米多孔层定量去除。这样既可以有效提高加工效率、降低加工力, 又能够实现 TC4 钛合金表面微米厚度的定量去除。

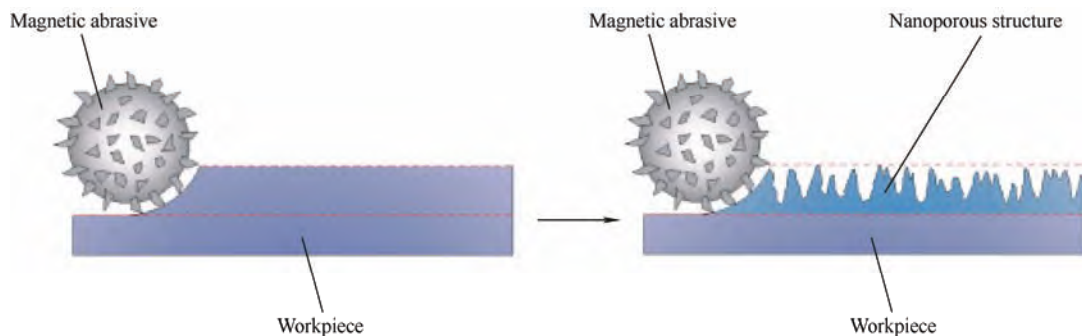


图 2 加工原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of processing principle

## 2 电化学脱合金试验分析

临界电压是脱合金体系最重要的特征之一, 对于特定前驱体合金而言, 寻找合金从钝化到腐蚀溶解状态的临界电压, 是电化学脱合金制备纳米多孔结构的关键<sup>[14]</sup>。确定临界电压的方法主要有动电位极化、恒

电位极化两种。动电位极化无法排除扫描速率对极化曲线的影响, 但能够较为快速地得到临界电压的大概范围。恒电位极化可以排除扫描速率对极化曲线的影响, 得到准确的临界电压, 但要在不同电压下逐一进行试验, 工作量过大。因此, 试验先采用动电位极化找出临界电压的大致位置, 再通过恒电位极化准确地得到 TC4 钛合金在 NaOH 溶液中的临界电压。

将3 mm厚的TC4钛合金片,用砂纸打磨抛光,然后用绝缘胶密封只留20 mm×20 mm的区域,浸NaOH溶液中,电化学脱合金试验前溶液用氩气纯化30 min。TC4钛合金样品在无水乙醇中清洗烘干用作工作电极,石墨电极为对电极,饱和甘汞电极为参比电极<sup>[15]</sup>。利用电化学工作站测量动态电势极化曲线(扫描速率2 mV/s)和恒电位极化曲线。利用扫描电镜表征脱合金电压对纳米多孔结构形貌及特征孔径的影响<sup>[16]</sup>。

## 2.1 动态电势极化

图3是TC4钛合金在25℃不同浓度NaOH溶液中的动态电势极化曲线。由图3a中可以看出,TC4钛合金在0.5 mol/L NaOH溶液中处于持续钝化状态,没有出现Al元素的腐蚀溶解。图3b是TC4钛合金在1 mol/L NaOH溶液中的动态电势极化曲线,在0.5~1.2 V,随着电压增加,电流缓慢增加,但是腐蚀区间较小,Al元素腐蚀溶解不够明显。

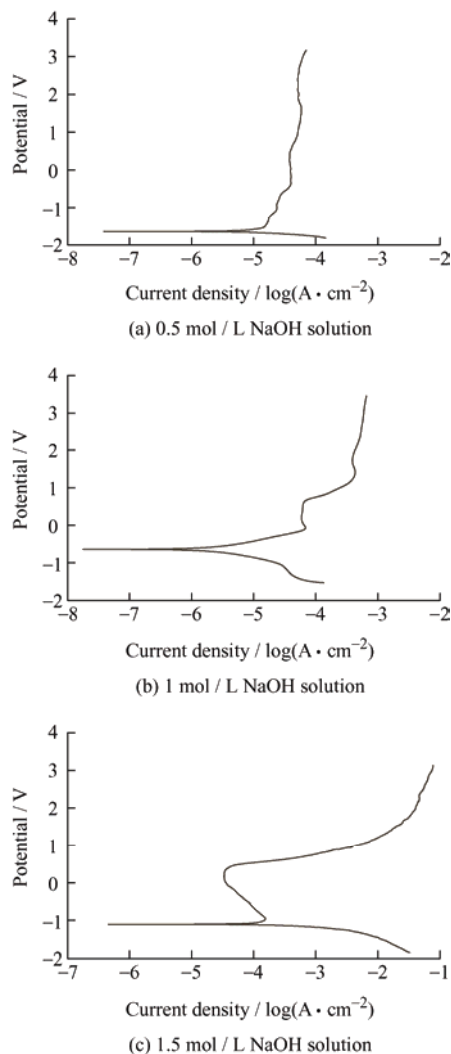


图3 不同浓度NaOH溶液中TC4阳极极化曲线  
Fig. 3 Anodic polarization curves of TC4 in different concentrations of NaOH solution

图3c是TC4钛合金在1.5 mol/L NaOH溶液中的动态电势极化曲线,在0.5~2.3 V,随着电压增加,电流显著增加,腐蚀区间大,Al元素腐蚀溶解明显。从0.5 V开始阳极极化电流显著增加,这是因为合金中Al元素被快速腐蚀溶解,形成三维纳米多孔结构。2.3 V以后电流密度增幅减小,这是因为在较高电压下,钛氧化形成的氧化钛附着在合金表面,使合金导电性下降。由图3c可以看出,TC4钛合金在1.5 mol/L NaOH溶液中的腐蚀区间为0.5~2.3 V。但是由于扫描速率的影响,无法准确确定临界电压值。为了准确获得临界电压值,试验在1.5 mol/L NaOH溶液中选择0.6、0.9、1.2、1.5、1.8、2.1 V进行静态恒电位极化。

## 2.2 静态恒电位极化

图4是TC4钛合金在1.5 mol/L NaOH溶液中的恒电位极化曲线。从下至上分别是TC4钛合金在0.6、0.9、1.2、1.5、1.8、2.1 V保持3.6 ks的恒电位极化曲线。从图中可以看出,当脱合金电位在0.6、0.9 V时电流密度主要处于1 mA/cm<sup>2</sup>的较低范围之内,这是因为较低的脱合金电位,使TC4钛合金表面有一部分仍处于钝化状态,合金表面的Al元素溶解不充分,造成局部成分波动或者局部脱合金。当脱合金电位升高到1.2和1.5 V时,电流密度显著增加,Al元素腐蚀溶解加快,合金表面Al元素得到充分溶解。当脱合金电位升高到1.8 V时,电流密度相比于1.2和1.5 V上升明显,并且长时间维持在恒定值,这是因为高电压下反应快速进行,Al元素被持续溶解,电流密度得以维持在恒定值不衰减。当脱合金电位升高到2.1 V时,电流密度先是快速下降,再缓慢增加到峰值后保持恒定,这表明Al元素的腐蚀溶解不断向合金内部进行,表面Al元素溶解后形成的纳米多孔结构,有效增加了溶解面积,Al元素的腐蚀溶解更快。

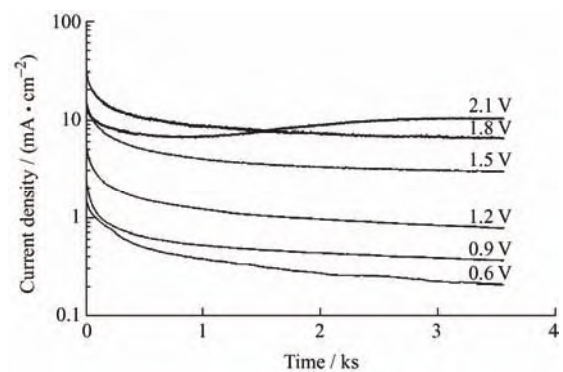


图4 TC4钛合金在1.5 mol/L NaOH溶液中恒电位极化曲线  
Fig. 4 Potentiostatic polarization curve of TC4 titanium alloy in 1.5 mol/L NaOH solution

图 5 是 TC4 钛合金在 1.5 mol / L NaOH 溶液中脱合金 3.6 ks 后的表面形貌, 图中 5a~5f 分别为电压在 0.6、0.9、1.2、1.5、1.8、2.1 V 脱合金 3.6 ks 后 TC4 钛合金的表面形貌。由图 5a 中可以看出, 在电压为 0.6 V 时, TC4 钛合金表面发生局部脱合金, 大部分区域仍然处于钝化状态, 只有较少的纳米孔, 没有形成连续的纳米孔结构。由图 5b 可以看出, 由于 0.9 V 的脱合金电位较低, 钛合金表面 Al 元素初步溶解, 脱合金形成的孔洞较小且分布不均匀。由图 5c、5d 可以看出, 当电压升高到 1.2 和 1.5 V 时, Al 元素的腐蚀溶解加

快, 合金表面出现典型的双连续的纳米孔结构, 且韧带和孔洞分布更均匀, 但脱合金过程没有继续向合金内部深入进行。这与图 4 中 1.2 和 1.5 V 电压下电流密度随着时间逐渐减小的规律相符。由图 5e、5f 可以看出, 当电压升高到 1.8 和 2.1 V 时, Al 元素的腐蚀溶解进一步加快, TC4 钛合金表面出现连续均匀的纳米孔结构, 而且随着时间的延长, 脱合金过程一直向合金内部深入进行。与 1.8 V 相比 2.1 V 脱合金后的纳米孔分布更加均匀且孔径更大, 这表明在 2.1 V 下 Al 元素腐蚀溶解更加快速和充分。

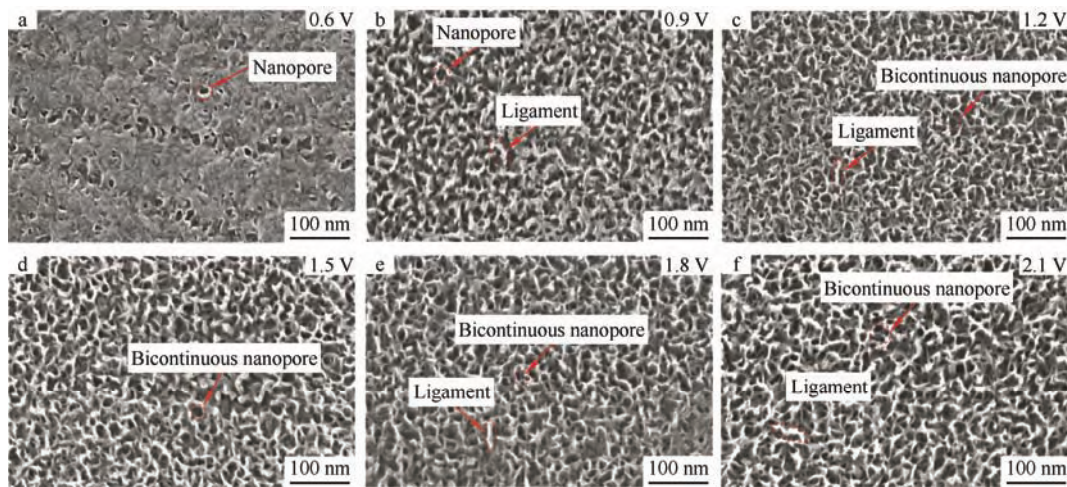


图 5 1.5 mol / L NaOH 溶液中脱合金 3.6 ks 后 TC4 钛合金表面形貌

Fig. 5 Surface morphology of TC4 titanium alloy after dealloying in 1.5 mol / L NaOH solution for 3.6 ks

### 2.3 维氏硬度测量

通过 HV-1000 显微硬度计, 在 2 N 试验力、10 s 保荷时间的条件下, 对 2.1 V 电压下脱合金 3、6、9 h 得到的纳米多孔层表面, 随机取三点进行维氏硬度检测, 并与 TC4 钛合金工件硬度进行对比, 试验中列出的维氏硬度值均为三点取平均值的结果, 结果如图 6 所示。TC4 钛合金的硬度为 343.4 HV, 脱合金 3 h 的工件硬度为 242.6 HV, 与 TC4 钛合金相比, 脱合金 3 h 工件硬度降低 29.4%。这是因为随着脱合金反应的进行, TC4 钛合金表面的铝元素初步腐蚀溶解, 表面出现连续均匀的纳米孔结构, 材料密度降低, 从而使纳米多孔层的维氏硬度明显降低。脱合金 6 h 工件的硬度为 207.9 HV, 与 TC4 钛合金相比硬度降低 39.5%。这是因为随着脱合金的进行, 脱合金过程一方面继续向合金内部深入, 纳米多孔层厚度进一步增加。另一方面 3 h 时残留在表层的 Al 元素得到更充分的腐蚀溶解, 纳米孔结构的孔径进一步扩大, 分布更加均匀, 硬度进一步降低。脱合金 9 h 工件的硬度为 183.1 HV, 与 TC4 钛合金相

比硬度降低 46.7%, 这是因为随着脱合金反应时间的进一步加长, 脱合金过程更进一步地向合金内部深入, 纳米多孔层厚度进一步增加, 但因为残留在表层的 Al 元素已在之前得到充分地腐蚀溶解, 纳米孔孔径无法继续扩大, 所以下降幅度比 3~6 h 有所降低。

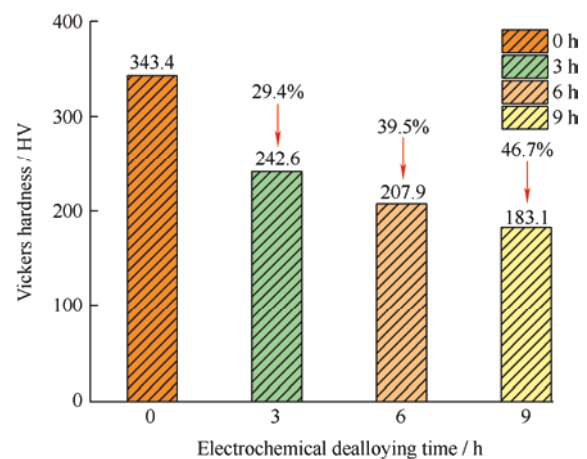


图 6 维氏硬度变化图

Fig. 6 Vickers hardness change diagram

### 3 摩擦磨损试验分析

电化学脱合金后 TC4 钛合金表面被腐蚀溶解出一层微米级厚度的纳米多孔层, 由于纳米多孔层和 TC4 钛合金在硬度、密度和材料性质等方面有显著的不同。因此二者在摩擦磨损试验中的摩擦因数也会有所不同。摩擦磨损试验过程中, 纳米多孔层被磨穿深入到 TC4 钛合金基体时, 摩擦因数会产生明显的变化。通过摩擦磨损试验在纳米多孔层生成磨痕, 形成台阶, 利用台阶仪可以准确测量出纳米多孔层的厚度。

通过对比脱合金前后工件表面摩擦因数的变化, 来探究纳米多孔层性质, 进而通过测量磨痕深度来准确测量纳米多孔层厚度。摩擦磨损试验使用 MS-T3001 型摩擦磨损试验仪进行, 试验参数见表 1。

表 1 摩擦磨损试验条件

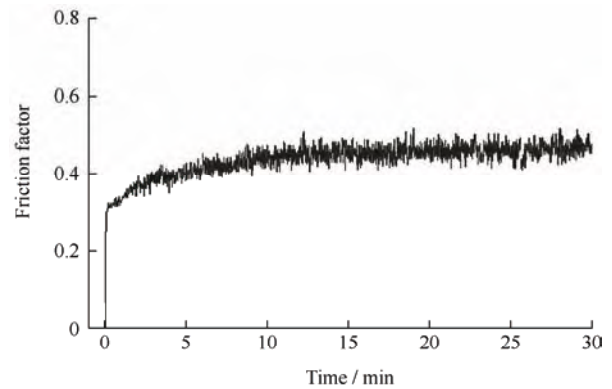
Table 1 Friction and wear test conditions

Rotating speed / ( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )	Load / g	Rotation radius / mm	Grinding ball radius / mm
200	150	3	3

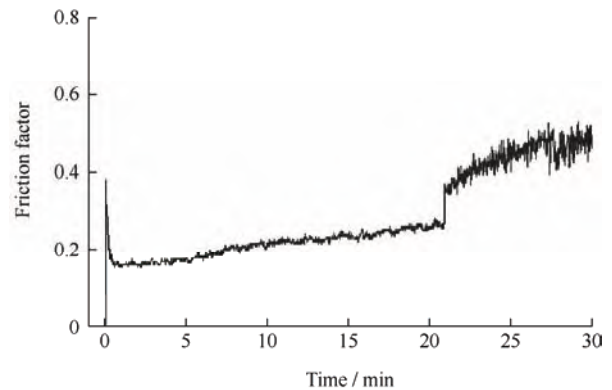
图 7 是在载荷为 150 g、转速为 200 r/min 时 TC4 钛合金和脱合金 6 h 工件摩擦因数曲线。由图 7a 中 TC4 钛合金摩擦因数曲线可以看出, TC4 钛合金在摩擦磨损的前 5 min 属于跑和过程, 摩擦因数逐渐上升。这是因为摩擦试验刚开始时, TC4 钛合金和磨球表面粗糙度较小, 摩擦力也较小。随着摩擦试验时间的增加, 表面粗糙度逐渐增大, TC4 钛合金和磨球的接触面积也逐渐增加, 因此摩擦力逐渐升高, 摩擦因数也随之增大<sup>[17]</sup>。试验进行 5 min 后进入稳定磨损阶段, 摩擦因数的变化趋于平缓, 数值在 0.45 附近上下波动。这是因为 TC4 钛合金与磨球之间的接触面积, 不再发生大幅变化。摩擦力趋于稳定, 摩擦因数也随之稳定。

由图 7b 中脱合金 6 h 后工件摩擦因数曲线可以看出, 脱合金工件前 1 min 属于跑和过程, 摩擦因数迅速下降。这是因为纳米多孔层硬度较小, 施加载荷后纳米多孔层发生塑性变形, 摩擦过程中易产生磨屑, 在摩擦表面形成润滑膜, 起到了减摩作用, 摩擦因数迅速下降<sup>[18]</sup>。1~21 min 属于稳定磨损阶段, 随着时间的增加, 摩擦因数呈现整体上升趋势。这是因为纳米多孔层在摩擦过程中产生的磨屑, 经过不断堆积碾压形成一定厚度的润滑膜, 附着在对磨球和试样上, 避免金属微凸起之间产生直接接触, 其摩擦因数较低且平稳增加<sup>[19]</sup>。21 min 时摩擦因数产生跃升, 由 0.25 上升到 0.35, 与 TC4 钛合金跑和

阶段的摩擦因数相同。这是因为 21 min 时, 磨球磨头已经磨穿脱合金后生成的纳米多孔层, 进而深入 TC4 钛合金基体内部结构层, 摩擦表面层的组织结构及其性能发生变化<sup>[20]</sup>。21~26 min, 随着磨球和 TC4 钛合金基体摩擦时间的增加, 接触面粗糙度逐渐增大, 摩擦力逐渐升高, 摩擦因数也随之增大。26 min 之后, 磨球与 TC4 钛合金基体之间接触面积和粗糙度都不再大幅变化, 摩擦因数稳定在 0.45 左右。



(a) TC4 titanium alloy workpiece



(b) Dealloying workpiece

图 7 TC4 钛合金和脱合金工件摩擦因数曲线

Fig. 7 Friction factor curve of TC4 titanium alloy and dealloyed workpiece

通过以上两组摩擦磨损试验可以看出, TC4 钛合金基体和纳米多孔层摩擦因数有明显的不同, 磨球磨头在磨穿纳米多孔层与 TC4 钛合金基体摩擦时, 摩擦因数存在明显跃升。摩擦磨损试验可以在脱合金工件表面的纳米多孔层上产生明显磨痕, 形成台阶, 方便台阶仪准确测量纳米多孔层厚度。

#### 3.1 摩擦因数分析

图 8 是在载荷为 150 g、转速为 200 r/min 时电化学脱合金 3、6 和 9 h 后的工件摩擦因数曲线。由图 8a、8b、8c 中摩擦因数曲线可以看出, 脱合金后工件前 1 min 属于跑和过程, 摩擦因数迅速下降。1 min 后脱合金工件进入稳定磨损阶段, 随着时间的增加, 摩擦因数呈现整体上升趋势。其中电化学脱

合金 3、6、9 h 工件分别在 11、21、35 min 时摩擦因数产生跃升, 由 0.25 上升至 TC4 钛合金跑和阶段的初始值 0.35 左右。这表明电化学脱合金 3、6、9 h 工件表面的纳米多孔层, 分别在 11、21、35 min 时被磨穿, 并产生明显磨痕, 形成台阶。并且通过摩擦因数产生跃升的时间对比, 可以得知 3、6、9 h 工件表面的纳米多孔层厚度有所不同, 随着脱合金时间的延长, 纳米多孔层厚度逐渐增加。

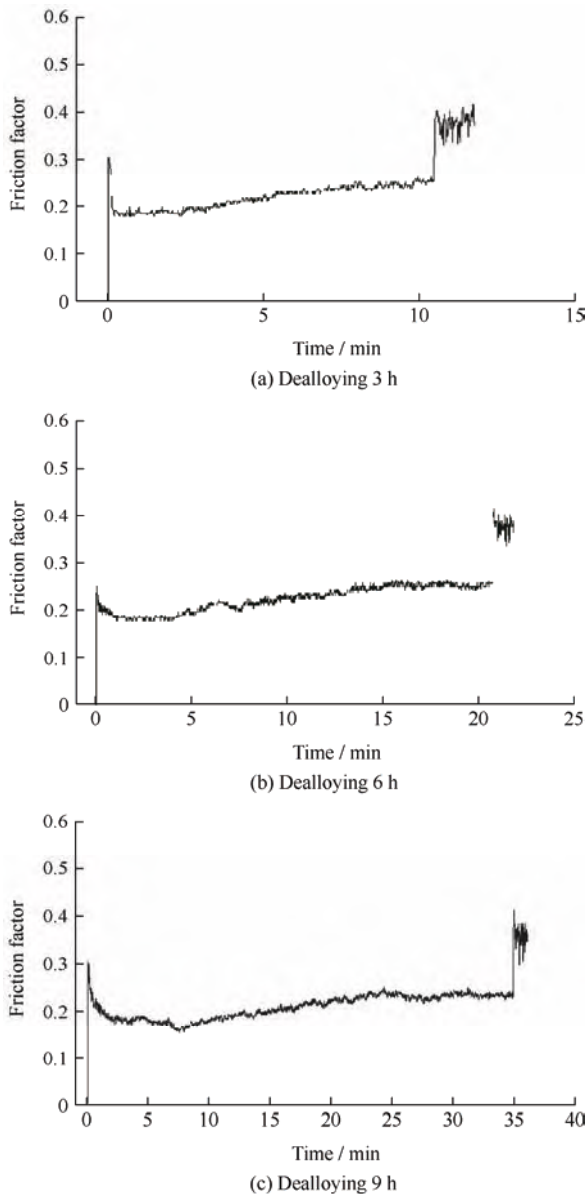


图 8 不同脱合金时间工件的摩擦因数曲线  
Fig. 8 Friction coefficient curves of workpieces with different dealloying times

### 3.2 磨痕轮廓分析

为了进一步研究纳米多孔层厚度与电化学脱合金时间的关系, 准确测量不同脱合金时下纳米多孔厚度, 通过台阶仪对磨痕轮廓进行测量。图 9 显示了电化学脱合金 3、6 和 9 h 后工件磨痕区域的轮廓图, 能够准确表征纳米多孔层厚度。由图 9 可以看到, 电化

学脱合金 3、6 和 9 h 后工件的磨痕深度分别为 2.2、3.8 和 6.2  $\mu\text{m}$ , 这与摩擦磨损试验中纳米多孔层磨穿时间规律相符, 随着脱合金时间的延长, 纳米多孔层厚度逐渐增加。并且由磨痕区域的轮廓曲线可见, 纳米多孔层的磨痕区域凹凸不平, 有许多沟壑存在, 说明纳米多孔层摩擦过程中产生的磨屑, 使表面发生了磨粒磨损, 磨屑经过不断堆积碾压形成一定厚度的润滑膜, 附着在对磨球和试样上, 起到了减摩作用, 使得纳米多孔层的摩擦因数低于相同条件下 TC4 钛合金的摩擦因数。

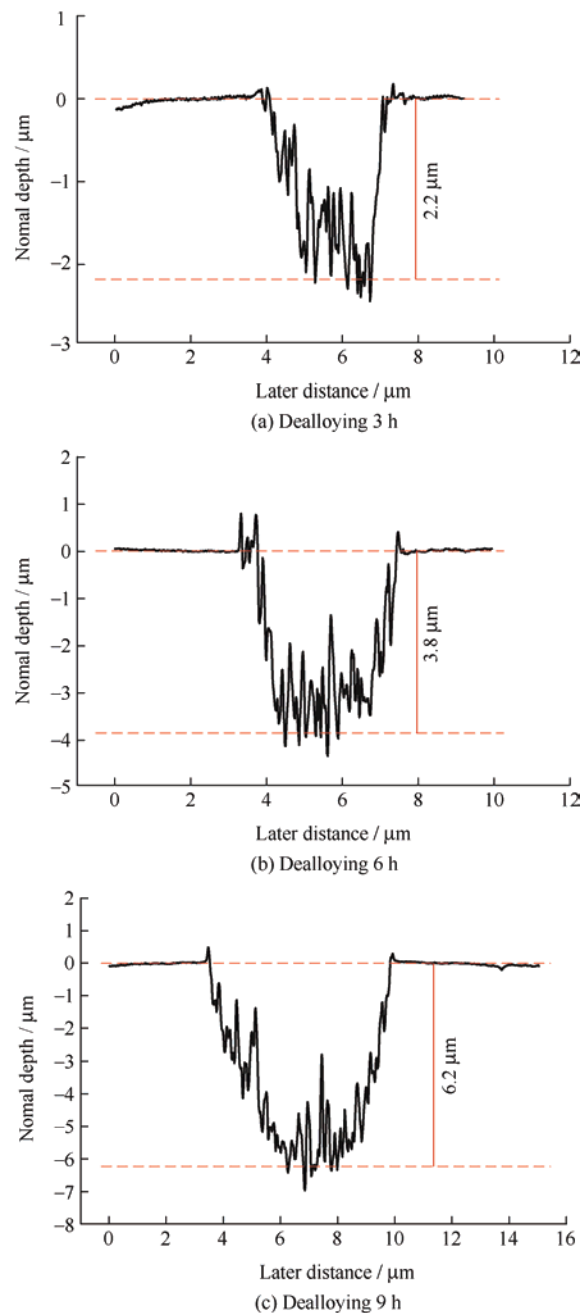


图 9 不同脱合金时间工件的磨痕轮廓曲线图  
Fig. 9 Curves of wear scar profiles of workpieces at different dealloying times

## 4 磁粒研磨定量去除

磁粒研磨定量去除试验条件见表 2, 采用  $\phi 8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  的钕铁硼磁极进行试验, 选取磁极转速为  $800 \text{ r/min}$ , 磁性磨粒为 Fe (铁磁相) 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (研磨相) 按 2:1 比例混合烧结而成。为保证良好的加工效果并尽量避免磨料的堆积现象, 加工间隙选择为  $2 \text{ mm}$ 。为减少磁极转速过高、发热量较大带来的影响, 研磨液选择为水基研磨液。磁粒研磨过程中随着研磨时间的推进, 磁性磨粒会因为磨钝、切削刃断裂、研磨相脱落等逐渐失去研磨能力, 为保证加工过程持续有效, 得到较高的、均匀的加工质量, 试验过程中每  $30 \text{ min}$  更换一次磁性磨料。使用 JB-8E 触针式表面粗糙度测量仪进行截面形状检测, 使用 HV-1000 显微硬度计对工件表面维氏硬度进行检测, 使用 VHX-500F 超景深 3D 电子显微镜对工件研磨前后磨痕区域的表面形貌进行观测<sup>[21-22]</sup>。

表 2 试验条件

Table 2 Experimental conditions

Item	Experimental parameter
Workpiece ( $l \times w \times h$ ) / (mm $\times$ mm $\times$ mm)	20 $\times$ 20 $\times$ 3
Magnetic pole $D$ / mm	Nd-Fe-B: $\phi 8 \times 20$
Magnetic pole speed $n$ / ( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )	800
Working gap $H$ / mm	2
Feed rate $f$ / ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	2
Average abrasives size $d$ / $\mu\text{m}$	250
Magnetic abrasive particles $m$ / g	10
Grinding fluid $V$ / mL	5

试验分为两组, 分别对脱合金磨痕深度  $6.2 \mu\text{m}$  的工件, 和同样磨痕深度  $6.2 \mu\text{m}$  的 TC4 钛合金工件进行磁粒研磨定量去除试验。通过磁粒研磨试验, 探究脱合金工件和 TC4 钛合金工件, 在相同加工条件下, 定量去除  $6.2 \mu\text{m}$  磨痕时的变化, 验证以上分析的可靠性。图 10、11 为加工前后工件的横截面形状对比图, 通过图 10a、11a 可以看出磁粒研磨光整加工前, TC4 钛合金和脱合金工件存在明显的高度差, 表面轮廓最大高度差在  $6.2 \mu\text{m}$  左右, 与台阶仪测得的数据基本一致。由图 10b 可以看出, TC4 钛合金磁粒研磨光整加工  $165 \text{ min}$  后, 工件表面轮廓没有明显的高度差存在, 表明工件表层被定量去除掉  $6.2 \mu\text{m}$  厚度的一层材料。由图 11b 可以看出, 脱

合金工件磁粒研磨光整加工  $45 \text{ min}$  后, 工件表面轮廓高度差得到有效去除, 表明工件表面  $6.2 \mu\text{m}$  厚度的纳米多孔层被定量去除, 与 TC4 钛合金相比, 脱合金工件的研磨效率提升  $72.7\%$ , 单位时间内的材料去除效率显著提升。

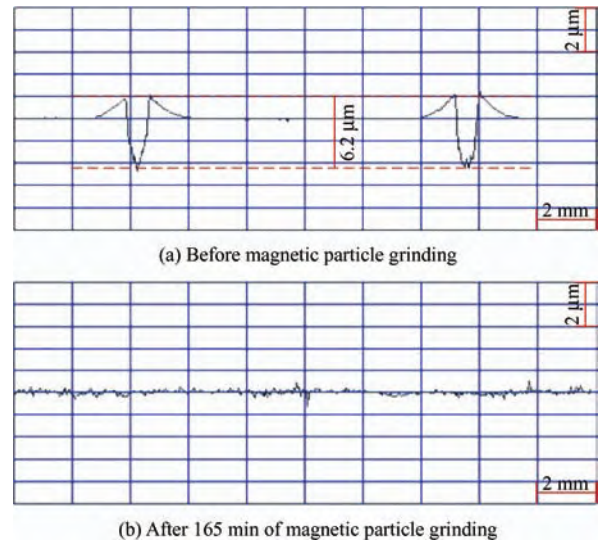


图 10 TC4 钛合金研磨前后横截面形状对比图

Fig. 10 Comparison of cross-sectional shapes of TC4 titanium alloy before and after grinding

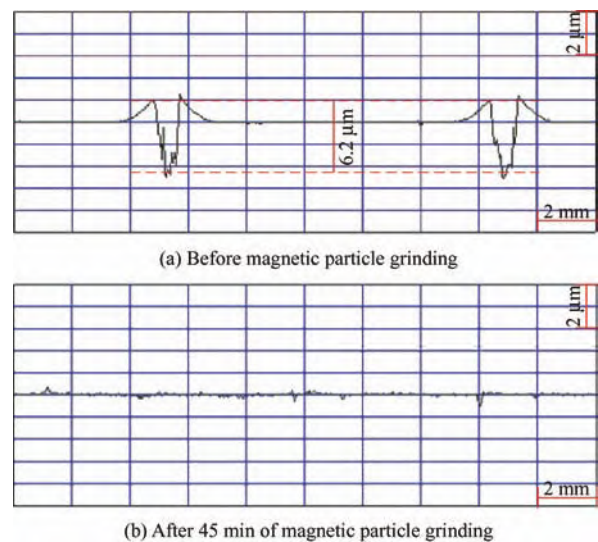


图 11 脱合金工件研磨前后横截面形状对比图

Fig. 11 Comparison of the cross-sectional shape of the dealloyed workpiece before and after grinding

图 12、13 为加工前后的表面形貌对比图, 通过图 12a、13a 可以看到, 磁粒研磨加工前 TC4 钛合金和脱合金工件表面均存在明显的磨痕轮廓, 图中虚线两侧与中间位置存在明显的  $6 \mu\text{m}$  左右的高度差, 与图 10a、11a 中截面形状的高度差基本一致。由图 12b、13b 可以看到, TC4 钛合金工件经过



165 min 磁粒研磨光整加工, 脱合金工件经过 45 min 磁粒研磨光整加工后, 磨痕区域明显变窄, 虚线内区域与左右两侧没有明显的高度差存在, 磨痕得到有效的去除, 同时脱合金工件表面的纳米多孔层被定量 去除。

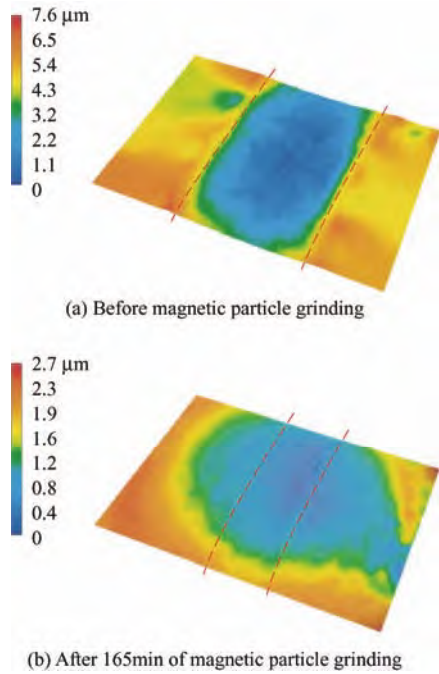


图 12 TC4 钛合金研磨前后表面形貌对比图  
Fig. 12 Comparison of surface morphologies of TC4 titanium alloy before and after grinding

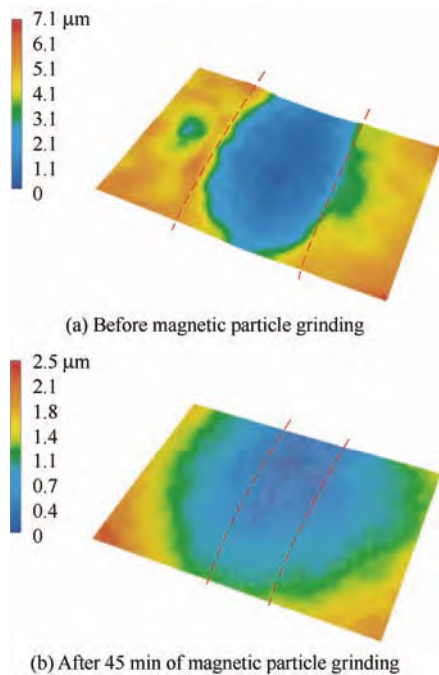


图 13 脱合金工件研磨前后表面形貌对比图  
Fig. 13 Comparison of surface morphologies of dealloyed workpieces before and after grinding

图 14 为工件研磨加工前后工件的维氏硬度对比图, 从图中可以看出, 相较于工件的原始硬度, 磁粒研磨光整加工后 TC4 钛合金的维氏硬度达到 348.6 HV, 提高了 1.5%, 这归因于磁粒研磨对工件表面微弱的强化作用。通过与原始和脱合金 9 h 后工件的维氏硬度对比可以看出, 磁粒研磨光整加工定量去除纳米多孔层后, TC4 钛合金基体的硬度并没有下降, 且同样因为磁粒研磨对工件表面微弱的强化作用, 维氏硬度达到 347.8 HV, 提高 1.3%。这表明脱合金反应对工件表层腐蚀溶解, 导致工件表层硬度下降的同时, 并未对 TC4 钛合金基体的性能造成影响。

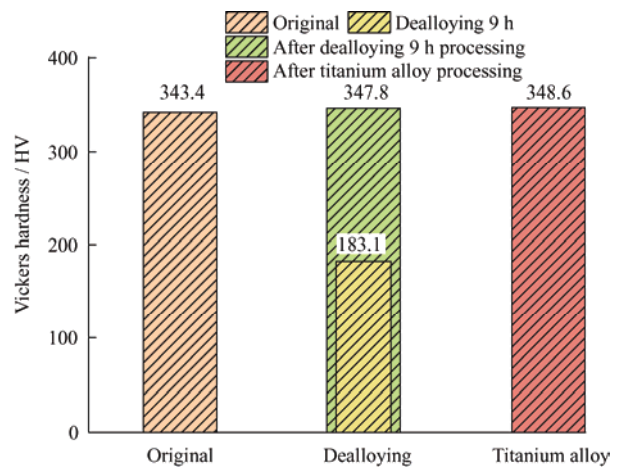


图 14 维氏硬度对比图

Fig. 14 Vickers hardness comparison chart

## 5 结论

(1) 在 NaOH 碱性溶液中进行电化学脱合金试验, 采用 1.5 mol/L 的 NaOH 溶液, 电压为 2.1V 时, Al 元素快速持续溶解, 脱合金效果最好。TC4 钛合金表面能够得到纳米孔分布均匀且孔径较大的纳米多孔层, 并且随着脱合金反应的进行, 纳米多孔层厚度逐渐增加, 纳米多孔层的维氏硬度显著降低。

(2) 通过摩擦磨损试验中脱合金工件的摩擦因数是否产生跃升, 可以准确观测到磨球穿透纳米多孔层的时间。测量摩擦磨损试验在工件表面产生的磨痕深度, 可以准确得到脱合金工件表面的纳米多孔层厚度。

(3) 磁粒研磨光整加工过程中, 通过检测工件表面磨痕是否去除, 可以准确表征工件表面磨痕深度的纳米多孔层的定量去除。与 TC4 钛合金相比, 脱合金工件在相同条件下去除 6.2 μm 厚度材料时, 加工效果和加工效率更好, 研磨效率提升 72.7%。

## 参 考 文 献

- [1] 李秀红, 李文辉, 王程伟, 等. TC4 钛合金滚磨光整加工的表面完整性与抗疲劳性能[J]. 中国表面工程, 2018, 31(1): 15-25.  
LI Xiuhong, LI Wenhui, WANG Chengwei, et al. Surface integrity and anti-fatigue performance of TC4 titanium alloy mass finishing[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(1): 15-25. (in Chinese)
- [2] 吕春兰. 离心研磨加工钛合金表面粗糙度的试验研究[J]. 表面技术, 2016, 45(6): 213-217.  
LÜ Chunlan. Experimental research on surface roughness of titanium alloy by centrifugal grinding process[J]. Surface Technology, 2016, 45(6): 213-217. (in Chinese)
- [3] 王筱冬, 张娇. 研磨光整处理 Ti-6Al-4V 钛合金表面组织及疲劳性能[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(4): 30-31, 49.  
WANG Xiaodong, ZHANG Jiao. Research on surface tissue and fatigue properties of Ti-6Al-4V titanium alloy under grinding and finishing[J]. Machinery Manufacturing and Automation, 2019, 48(4): 30-31, 49. (in Chinese)
- [4] YAMAGUCHI H, SHINMURA T. Study of an internal magnetic abrasive finishing using a pole rotation system: discussion of the characteristic abrasive behavior[J]. Precision Engineering, 2000, 24(3): 237-244.
- [5] 韩冰, 刘立鑫, 陈燕. 磁力研磨法加工弯管内表面的工艺参数优化[J]. 中国机械工程, 2015, 26(6): 814-817.  
HAN Bing, LIU Lixin, CHEN Yan. Optimization of process parameters on magnetic abrasive finishing to inner surface of bending pipe[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(6): 814-817. (in Chinese)
- [6] LIN C T, YANG L D, CHOW H M. Study of magnetic abrasive finishing in free-form surface operations using the taguchi method[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 34(1-2): 122-130.
- [7] 焦安源, 全洪军, 陈燕, 等. 超声磁力复合研磨钛合金锥孔的试验研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 114-119.  
JIAO Anyuan, QUAN Hongjun, CHEN Yan, et al. Experimental research of titanium alloy taper hole by ultrasonic magnetic abrasive finishing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 114-119. (in Chinese)
- [8] 马付建, 栾诗宇, 罗奇超, 等. 超声辅助磁性磨料光整加工工艺对钛合金表面完整性的影响[J]. 中国表面工程, 2019, 32(2): 128-136.  
MA Fujian, LUAN Shiyu, LUO Qichao, et al. Effects of ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing on surface integrity of titanium alloy[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(2): 128-136. (in Chinese)
- [9] 许召宽, 韩冰, 陈燕, 等. 基于电解-磁力复合研磨法的表面光整加工[J]. 电镀与精饰, 2018, 40(12): 7-10.  
XU Zhaokuan, HAN Bing, CHEN Yan, et al. Surface finishing based on electrolysis-magnetic force composite grinding method[J]. Electroplating and Finishing, 2018, 40(12): 7-10. (in Chinese)
- [10] 王金山, 徐正扬, 徐广超. 磨粒高速流动电解机械复合光整加工方法研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2018, 38(5): 50-55.  
WANG Jinshan, XU Zhengyang, XU Guangchao. Research on flow electrochemical mechanical hybrid finishing using high-speed abrasive particles flow[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2018, 38(5): 50-55. (in Chinese)
- [11] TILEY J, SHIVELEY I K, VISWANATHAN G B, et al. Novel automatic electrochemical-mechanical polishing (ECMP) of metals for scanning electron microscopy[J]. Micron, 2010, 41(6): 615-621.
- [12] ZHAO C, ZHEN Q, WANG X, et al. Fabrication and characterization of monolithic nanoporous copper through chemical dealloying of Mg-Cu alloys[J]. Corrosion Science, 2009, 51(9): 2120-2125.
- [13] 杨亚苹. 脱合金化法制备 Ru (Fe, Co) 系纳米多孔合金及其催化性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.  
YANG Yaping. Preparation and catalytic properties of nanoporous Ru(Fe, Co) alloys by dealloying[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [14] 李亚宁, 李广忠, 张文彦, 等. 脱合金法制备纳米多孔泡沫钛合金[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(10): 2197-2200.  
LI Yaning, LI Guangzhong, ZHANG Wenyan, et al. Nanoporous foamed titanium alloy prepared by dealloying method[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(10): 2197-2200. (in Chinese)
- [15] 李亚宁, 康新婷, 汤慧萍, 等. 电化学脱合金法在 FeCrAl 纤维毡表面制备纳米自组装结构[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(5): 905-908.  
LI Yaning, KANG Xinting, TANG Huiping, et al. Nano-self-assembled structures on FeCrAl fiber felt surfaces prepared by electrochemical dealloying method[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(5): 905-908. (in Chinese)
- [16] 杨玉林, 穆张岩, 范铮, 等. 电化学脱合金制备纳米多

- 孔 Ag 及其甲醛检测性能[J]. 金属学报, 2019, 55(10): 1302-1310.
- YANG Yulin, MU Zhangyan, FAN Zheng, et al. Nanoporous silver via electrochemical dealloying and Its superior detection sensitivity to formaldehyde[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 55(10): 1302-1310. (in Chinese)
- [17] 宫浩严, 王博, 肖江鹏, 等. 网状结构 TiBw / TC4 复合材料摩擦磨损行为研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(16): 136-139, 143.
- GONG Haoyan, WANG Bo, XIAO Jiangpeng, et al. Research on friction and wear behavior of TiBw / TC4 composites with mesh structure[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(16): 136-139, 143. (in Chinese)
- [18] 蔡佳琨, 吴集思, 李晓阳, 等. SiC 和 WS<sub>2</sub> 颗粒协同改性铜 / 聚酰亚胺树脂基复合材料的摩擦磨损性能[J]. 机械工程材料, 2022, 46(3): 19-24.
- CAI Jiakun, WU Jisi, LI Xiaoyang, et al. Friction and wear properties of copper / polyimide resin matrix composite coordinated modified by SiC and WS<sub>2</sub> particles[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2022, 46(3): 19-24. (in Chinese)
- [19] 王玉飞, 张延彬, 于琦, 等. 不同工况下镍基自润滑材料的摩擦磨损性能[J]. 轴承, 2022(8): 26-31.
- WANG Yufei, ZHANG Yanbin, YU Qi, et al. Friction and wear properties of nickel-based self-lubricating materials under different working conditions[J]. Bearings, 2022(8): 26-31. (in Chinese)
- [20] 郑超, 魏世丞, 梁义, 等. 钛金属材料干摩擦磨损特性研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(4): 44-50.
- ZHENG Chao, WEI Shicheng, LIANG Yi, et al. Dry friction wearing characteristics of titanium materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(4): 44-50. (in Chinese)
- [21] 孙岩, 兰勇, 杨海吉, 等. 双向复合振动辅助磁力研磨加工的试验研究[J]. 表面技术, 2018, 47(7): 125-131.
- SUN Yan, LAN Yong, YANG Haiji, et al. Experimental study on two-way compound vibration assisted magnetic abrasive processing[J]. Surface Technology, 2018, 47(7): 125-131. (in Chinese)
- [22] 张龙龙, 焦安源, 陈燕, 等. 磁粒复合研磨 SUS304 不锈钢孔道的机理与试验研究[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 259-266.
- ZHANG Longlong, JIAO Anyuan, CHEN Yan, et al. Mechanism and experimental study of SUS304 stainless steel hole by magnetic particle compound grinding[J]. Surface Technology, 2018, 47(11): 259-266. (in Chinese)
- 
- 作者简介: 张祥, 男, 1998 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为精密加工与特种加工。  
E-mail: 2567366219@qq.com
- 马小刚, 男, 1988 年出生, 博士, 硕士研究生导师。主要研究方向为精密加工与特种加工。  
E-mail: mxg\_fy@163.com