

基于混合粒径的 TC4 钛合金 低粗糙度磁力研磨研究

陈晓明^{1,2}, 徐成宇¹, 季冬锋¹, 刘宁¹, 朱永伟^{1*}

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016;

2. 江苏海事职业技术学院, 南京 211100)

摘要: **目的** 获得更低粗糙度的 TC4 钛合金零件表面。**方法** 采用黏结法制备不同粒径的磁性磨料, 依次运用粒径为 150~250 μm 和 63~106 μm 的磁性磨粒以及这两种粒径的混合磨料进行磁力研磨对比实验, 分析基于混合粒径的 TC4 钛合金低粗糙度磁力研磨可行性。基于磁性颗粒动力模型, 根据最小能量原理分析了混合粒径磁力链的微结构, 并利用体式显微镜对单粒径和混合粒径磁力链进行对比分析。**结果** 单粒径和混合粒径磁力研磨在 12 min 时钛合金工件表面粗糙度均约为 0.11 μm , 此时单一粒径趋于平衡, 而混合粒径磁力研磨的表面粗糙度继续下降, 在 16 min 左右达到最低, 为 0.084 μm , 比单一粒径降低了 20%, 工件表面初始划痕和凹坑得到了更好的去除, 加工后表面纹理更为致密。大粒径磁力链颗粒能量最小, 约为 -3.6×10^{-13} J, 其次是混合粒径磁力链结构, 颗粒能量约为 -2.1×10^{-13} J, 而小粒径磁力链结构颗粒能量约为 -0.45×10^{-13} J, 是大粒径和混合粒径磁力链的 5~9 倍, 这说明小粒径颗粒不易形成单独磁力链。**结论** 混合粒径磁力链中, 小粒径颗粒不易形成单独磁力链, 而是吸附在大粒径磁力链间隙中, 提高了磁力刷的刚性和密度, 不同粒径的磨粒同时参与研磨, 从而在混合粒径磁力研磨 TC4 钛合金中能够有效的降低表面粗糙度。

关键词: 混合粒径; 磁力研磨; 表面粗糙度; 磁力链

中图分类号: TG356.28 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2023)12-0112-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.12.010

Research on Low Roughness Magnetic Grinding of TC4 Titanium Alloy Based on Mixed Particle Size

CHEN Xiao-ming^{1,2}, XU Cheng-yu¹, JI Dong-feng¹, LIU Ning¹, ZHU Yong-wei^{1*}

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China; 2. Jiangsu Maritime Institute, Nanjing 211100, China)

ABSTRACT: To obtain a lower roughness surface of TC4 titanium alloy parts, magnetic abrasives with different particle sizes were prepared by the bonding method in this paper. Abrasives with particle sizes of 150-250 μm , 63-106 μm , and mixed abrasives of both sizes were successively used for magnetic abrasive finishing (MAF) comparison experiments, and the feasibility of low roughness MAF of TC4 titanium alloy based on mixed-size abrasives (MSA) was analyzed. Based on the dynamic model of magnetic abrasives, the microstructure of the

收稿日期: 2023-09-28; 修订日期: 2023-11-07

Received: 2023-09-28; Revised: 2023-11-07

引文格式: 陈晓明, 徐成宇, 季冬锋, 等. 基于混合粒径的 TC4 钛合金低粗糙度磁力研磨研究[J]. 表面技术, 2023, 52(12): 112-118.

CHEN Xiao-ming, XU Cheng-yu, JI Dong-feng, et al. Research on Low Roughness Magnetic Grinding of TC4 Titanium Alloy Based on Mixed Particle Size[J]. Surface Technology, 2023, 52(12): 112-118.

*通信作者 (Corresponding author)

magnetic chains in MSA was analyzed by the minimum energy principle, and the magnetic chains of single-size abrasives (SSA) and MSA were compared by the stereomicroscope. Results showed that the surface roughness R_a of the titanium alloy workpiece processed by SSA and MSA was both about $0.11\text{ }\mu\text{m}$ at 12 minutes, but it would continue to decrease in the MSA finishing. The lowest roughness R_a in MSA finishing was $0.084\text{ }\mu\text{m}$ at 16 minutes, which was 20% lower than that of SSA finishing. The initial scratches and pits on the workpiece surface were better removed and the surface texture was denser after MSA finishing. In the observation experiment, it was found that the magnetic chain formed by the single-size particles had more bifurcations and voids, which were relatively loose, while the bifurcations and voids of the magnetic chain formed by the mixed-size particles were significantly reduced, and the combination was closer with the decrease of the particle size ratio. Besides, the particle energy of the magnetic chain formed by large-size particles was the smallest, which was about $-3.6\times 10^{-13}\text{ J}$, and then followed by mixed particle size magnetic chain structure with particle energy of approximately $-2.1\times 10^{-13}\text{ J}$. According to the principle of minimum energy, the smaller the energy is, the more stable the structure is. The magnetic chain structure of small-size particles with particle energy of approximately -0.45×10^{-13} was hard to form, because the particle energy in the small-size magnetic chain was 5-9 times higher than that in the large-size and mixed-size. Obviously, the single-chain and double-chain structures formed by large-size particles were the most stable, and then followed by the double-chain formed by mixed-size particles. In the SSA, due to the large grinding pressure and diamond particles, the scratches on the workpiece surface were prominent in the MAF with large-size particles. Furthermore, it was difficult to obtain a lower surface roughness in the MAF with small-size particles attributed to its low grinding pressure and weak cutting ability. In the MSA, the small-size particles did not form a separate magnetic chain but were adsorbed in the gap of the large-size magnetic chains, which contributed to the rigidity and density of the magnetic brush. The large particle size abrasives had a strong cutting ability, and the small particle size abrasives helped to eliminate the scratches generated by the large particle size abrasives. Due to the synergistic processing of the different abrasive sizes, the surface roughness of the TC4 titanium alloy was significantly improved.

KEY WORDS: mixed particle size; magnetic abrasive finishing; surface roughness; magnetic chain

TC4 钛合金具备比强度高、耐腐蚀、热强性好等优良特性,被广泛应用于航空航天、生物医学等领域的关键零部件^[1-3],这些零部件对表面粗糙度有着较高的要求。而 TC4 钛合金材料的摩擦性能差、导热系数低、化学活性高和表面硬度高等特点,使其成为典型的难加工材料^[4]。同时由于钛合金工件的表面形状和型腔结构不断复杂化,尤其是窄槽、薄壁、曲面、台阶、小曲率半径根部等结构特征,传统加工方法已经无法满足其加工要求,而磁力研磨由于磁性磨粒的随形性和柔性,广泛应用于钛合金弯管、镍基合金异形管等复杂工件的光整加工^[5-8]。

磁力研磨是利用磁性磨料在磁场中形成具有一定刚性的“磁力刷”,在研磨压力作用下研磨工件表面的光整加工工艺^[9],目前磁力研磨研究中主要以单一粒径磁性磨粒为主,其中磁性磨粒粒径是影响磁力研磨加工效率和加工质量的主要因素之一,许多学者^[10-13]研究发现:磁性磨粒的粒径较大时,其“弹性研磨刷”刚性较大,研磨压力较大,加工效率高,但同时因其研磨相颗粒较大,容易产生耕犁而划伤工件

表面,加工质量下降;而粒径较小时研磨压力较小,研磨效率降低。肖阳等^[14-15]等学者因此提出“先粗后精”方法即先用大粒径磨粒再用小粒径进行分级磁力研磨,从而在保证效率的同时提高加工质量。为了进一步降低表面粗糙度,许多学者研究了复合磁力研磨方法^[16-22],将电解、电化学以及超声等加工方法与磁力研磨复合光整钛合金零件,其表面粗糙度远低于单纯磁力研磨,但复合加工会使零件加工工艺变得更加复杂,成本提高,同时电化学磁力研磨容易对环境造成污染。

本文结合磁性磨粒粒径对磁力研磨效果的影响,提出混合粒径磁力研磨方法,进行混合粒径与单一粒径的钛合金磁力研磨对比实验研究,分析其表面粗糙度的变化;同时基于磁性颗粒动力模型,根据最小能量原理分析了不同磁力链在磁场中的能量和稳定性,建立了混合粒径磁力链模型,根据最小能量原理分析混合磁粒在磁场中形成的磁力链微结构,并进行观察实验验证,从理论上分析混合粒径磁力研磨的特点,为基于混合粒径的 TC4 钛合金低粗糙度磁力研磨研究提供理论依据。

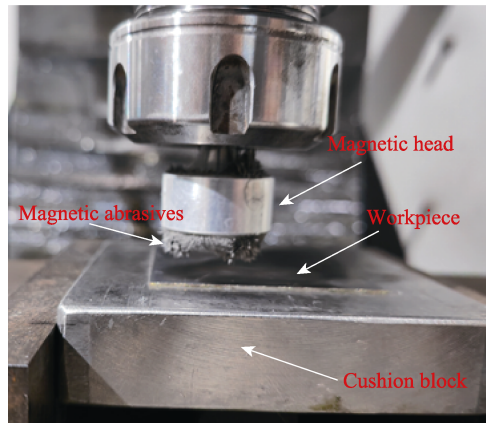
1 实验设计

1.1 磁力研磨实验

研磨实验对象为 Ti-6Al-4V 的钛合金, 样件尺寸为 50 mm×50 mm×1 mm, 初始表面粗糙度为 0.35 μm , 研磨实验在数控铣床 XK7124 上进行, 磁性磨粒采用金刚石磁性磨料, 其采用黏结法制备^[23], 其工艺参数见表 1, 经筛分得到粒径分别为 150~250 μm 和 63~106 μm 的磁性磨粒。研磨工具采用钕铁硼永磁材料制备的平头磁极研磨工具, 磁性磨粒吸附在磁极头上形成磁力刷, 随着主轴旋转对工件进行划擦和切削作用, 实验装置及加工原理如图 1 所示, 分别进行单

表 1 金刚石磁性磨料制备工艺参数
Tab.1 Technical parameters of diamond magnetic abrasive preparation

Components and parameters	parameter values
Particle size of iron powder	37-50 μm , 120-130 μm
Particle size of diamond powder	12-22 μm , 34-44 μm
Agglomerant	Epoxy resin
Mixing method	Mixer mixing 20 min
Curing method	Electric blast drying oven 3-4 h
Pressing pressure	3 MPa



一粒径和混合粒径磁力研磨实验 (见表 2), 每组实验总加工时间为 24 min, 试验前需重新称取磁性磨料 2 g 进行更换, 添加油性研磨液 0.2 g, 每组实验分 6 次进行, 每线性往复一次后使用粗糙度测试仪选取钛合金表面 6 处测量表面粗糙度 (加工起点、中段和末端各两次), 取平均值, 加工完成后使用显微镜观察其表面微观形貌, 具体实验参数见表 3。

表 2 磁力研磨的磁性磨粒参数
Tab.2 Magnetic particle parameters of magnetic grinding

Number	Magnetic abrasive	Weight of iron powder/g
#1	150-250 μm	2
#2	63-106 μm	2
#3	63-106 μm	1.33
	150-250 μm	0.67

1.2 磁力链微结构观察实验

本实验为探索混合磨粒的磁力链微观结构, 采用不同粒径的铁粉代替磁性磨粒, 将铁粉按一定比例混合后 (总质量固定 0.5 g) 吸附在长方体永磁体磁 (图 2), 在体视显微镜 SZ6100 下从正面和侧面观察磁铁中心的磁力链结构。具体实验参数见表 4。

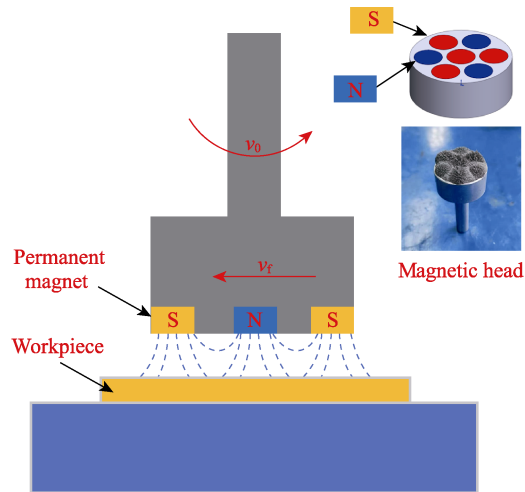


图 1 磁力研磨实验原理图
FIG.1 Experimental principle diagram of magnetic abrasive finishing

表 3 磁力研磨实验加工参数
Tab.3 Processing Parameters of MAF Experiment

Processing parameters	Machining gap d/mm	Abrasive filling amount m/g	Grinding liquid	Speed of the magnetic pole $v_0/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	Feed speed $v_1/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	Grinding time t/min
Parameter value	2	2	Oily grinding fluid	800	20	24



图 2 铁粉在永磁铁上的分布
Fig.2 Distribution of iron powder on permanent magnet

表 4 磁力链微结构观察实验参数
Tab.4 Experimental parameters of magnetic chain microstructure observation

Number	Particle size of iron powders/ μm	Weight of iron powder/g
#1	125	0.5
#2	125	0.28
	60	0.22
#3	125	0.43
	30	0.07

2 实验结果

2.1 工件表面粗糙度

在相同参数下分别采用混合粒径和单一粒径磁粒研磨钛合金工件 24 min, 得到表面粗糙度随时间变化曲线, 如图 3 所示。在前 5 min 内, 工件表面粗糙

度下降速率较大, 其后随着研磨时间的延续而减缓; 在 12 min 左右, 工件表面粗糙度下降至 0.11 μm 附近, 此时单一粒径磁力研磨基本达到最低值, 而混合磁粒磁力研磨工件表面粗糙度随着研磨时间增加而继续降低, 在 20 min 左右时达到最低值, 为 0.084 μm ; 其后随着研磨时间的增加, 工件表面粗糙度值变化不大。

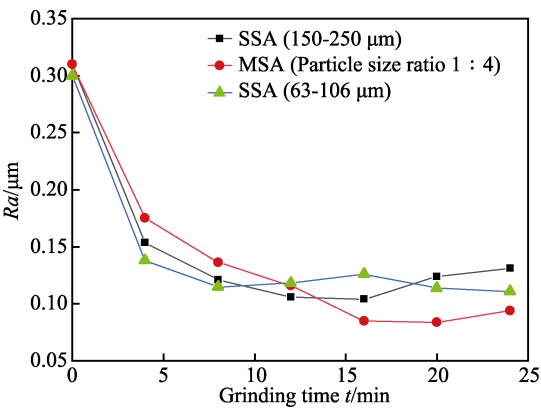


图 3 单一粒径与混合磁粒对表面粗糙度的影响
Fig.3 Effect of single particle size and mixed magnetic particles on surface roughness

2.2 工件表面形貌

图 4 为磁力研磨前后钛合金工件的表面微观形貌。从图中可以看到, 钛合金工件初始表面有比较明显的划痕、凸起和凹坑 (图 4a); 经过单一粒径磁粒研磨后, 原始表面存在的划痕和凹坑已被大量去除,

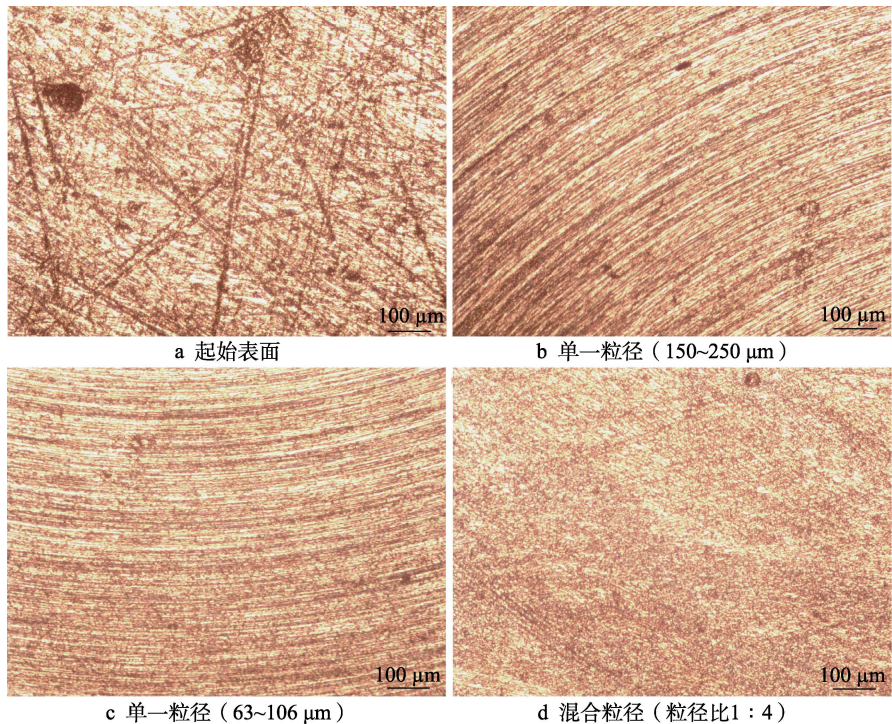


图 4 研磨前后钛合金表面的微观形貌
Fig.4 Microscopic morphology of titanium alloy surface before and after finishing: a) pristine surface; b) SSA (150-250 μm); c) SSA (63-106 μm); d) MSA (Particle size ratio 1 : 4)

但工件表面出现明显规律的新划痕,见图4b和图4c,其中大粒径单一磁力研磨较为明显(150~250 μm);而混合粒径磁力研磨后的钛合金工件表面,初始存在的划痕和凹坑均得到了较好的去除,同时未产生较为明显的新划痕,表面纹理致密。

2.3 磁力链微结构

磁铁中心微观结构见图5,单一粒径形成的独立

磁力链数量有30多条,但每磁力链的宽度较小,见图5a。混合粒径形成的磁力链数量较少,只有10条左右,但宽度很大,其紧密程度较高,见图5b和图5c。

磁铁中心磁力链微结构中,单一粒径形成的磁力链分叉和空隙较多,较为疏松,见图6a,而混合粒径形成的磁力链分叉和空隙明显减少,且随着粒径比的减少而结合更为紧密,见图6b和图6c。

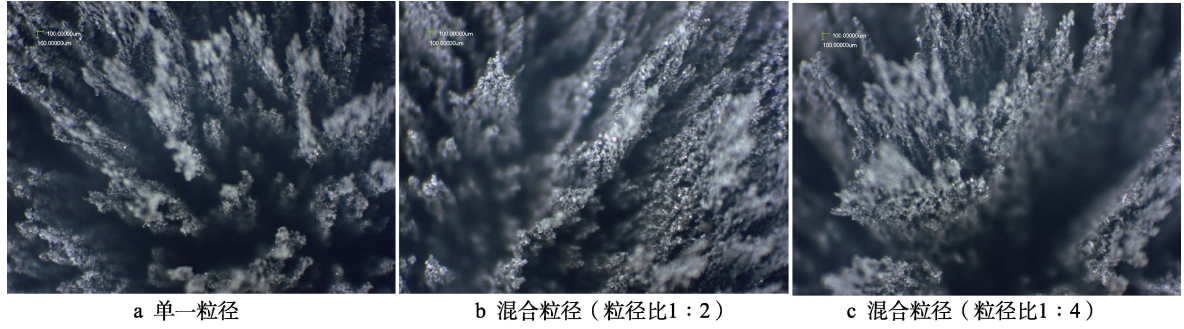


图5 磁铁中心的磁力链微观形貌(俯视)

Fig.5 Microscopic morphology of the magnetic chain at the center of the magnet (top view):

a) SSA; b) MSA (Particle size ratio 1 : 2); c) MSA (Particle size ratio 1 : 4)

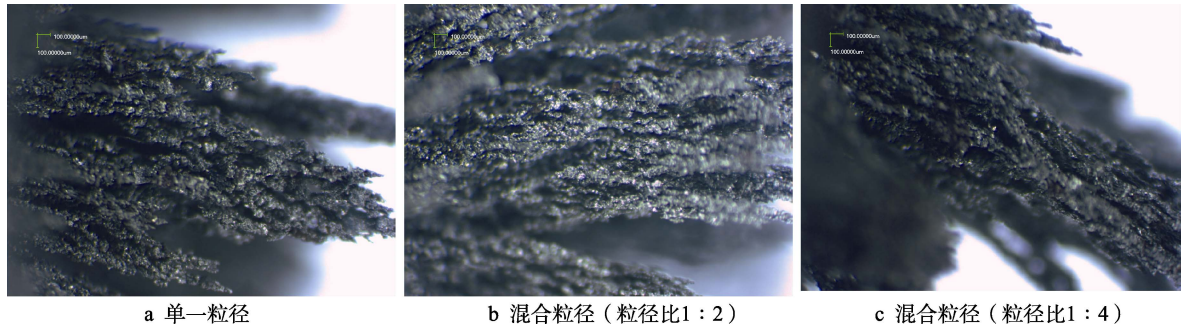


图6 磁铁中心的磁力链微观形貌(侧视)

Fig.6 Microscopic morphology of the magnetic chain at the center of the magnet (side view):

a) SSA; b) MSA (particle size ratio 1 : 2); c) MSA (particle size ratio 1 : 4)

3 讨论

3.1 磁性磨粒动力模型

由磁物理学可知磁场强度 H 和磁感应强度 B 间满足:

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; M 为磁化强度。

磁性颗粒在磁场下磁化受到的磁矩可以表示为^[24-25]:

$$m = VM = \frac{4}{3} \pi r^3 \chi H \quad (2)$$

式中: V 表示单个磁性颗粒的体积; r 为颗粒半径; M 为颗粒的磁化强度,且 $M = \chi H$; χ 为颗粒的磁化率; H 表示外加磁场强度。

颗粒 j 在颗粒 i 处产生的附加磁感应强度^[24-25]为:

$$B_j = -\frac{\mu_0 m_j}{4\pi r_{ij}^3} + \frac{3\mu_0}{4\pi r_{ij}^5} (m_j \cdot r_{ij}) r_{ij} \quad (3)$$

式中: r_{ij} 表示颗粒 i 和颗粒 j 间的相对位置。

外加磁场不强时忽略颗粒被磁化后产生的磁场对周围的颗粒磁场的扰动,颗粒在磁场中的磁势能 W^m 为^[26]:

$$W^m = -\mu_0 m \cdot H = -m \cdot B \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可以得到磁偶极子 i 在磁偶极子 j 产生的磁场中所具有的能量^[26]:

$$W_{ij}^m = -\frac{\mu_0 m_j}{4\pi r_{ij}^3} [3(m_i \cdot \hat{r}_{ij})(m_j \cdot \hat{r}_{ij}) - m_i \cdot m_j] =$$

$$\frac{\mu_0 m_j}{4\pi r_{ij}^3} (m_i \cdot m_j) - \frac{\mu_0 m_j}{4\pi r_{ij}^5} m_{ir} \cdot m_{jr} \quad (5)$$

式中: \hat{r}_{ij} 表示从颗粒 i 指向颗粒 j 的方向矢量; m_{ir} 和 m_{jr} 分别代表磁矩 m_i 和 m_j 沿 \hat{r}_{ij} 方向的分量的

大小, 即:

$$m_{ir} = m_i \cdot \hat{r}_{ij} \tag{6}$$

$$m_{jr} = m_j \cdot \hat{r}_{ij} \tag{7}$$

则颗粒在磁场中总的磁势能^[26]为:

$$W^T = \sum_{j=1}^N \sum_{i=j+1}^N W_{ij}^m \tag{8}$$

式中: N 为铁磁性颗粒数。

3.2 混合粒径磁力链微结构

针对不同粒径的典型密排结构胞元 (见图 7), 计算在外加磁场中不同微结构系统的磁势能。

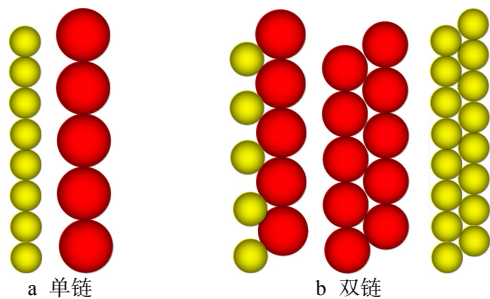


图 7 磁力链微结构模型
Fig.7 Microstructure model of magnetic chain:
a) single chain; b) double chains

取两种颗粒, A 半径 $r_1=5\text{ }\mu\text{m}$, B 半径 $r_2=2.5\text{ }\mu\text{m}$, 磁力链长为 $500\text{ }\mu\text{m}$, 磁场强度 $H=75.0\text{ kA/m}$, 磁化率 $\chi=1.0$ 。根据公式 (8) 计算出不同磁力链的总能量以及单颗粒能量, 结果如表 5 所示。

表 5 相同长度下不同微结构中单个颗粒的平均能量
Tab.5 The average energy of a single particle in different microstructures at the same length

Structure	Particle category	Particle number	Total energy/ (10^{-10} J)	Single particle energy/ (10^{-13} J)
Single chain	A	A50	-0.180 3	-3.606 6
Single chain	B	B100	-0.045 71	-0.457 1
Double chains	A+A	A100	-0.384 8	-3.848 2
Double chains	B+B	B200	-0.092 02	-0.460 1
Double chains	B+A	A50B50	-0.210 9	-2.109

比较不同微结构中单个颗粒的平均能量大小可以看出, 单一粒径形成的微结构胞元能量随颗粒的直径变大而减小, 根据能量最小原理, 能量越小结构越稳定, 显然大粒径形成的单链和双链结构最稳定, 其颗粒能量分别约为 $-3.6\times10^{-13}\text{ J}$ 和 $-3.848\,2\times10^{-13}\text{ J}$, 其次是小粒径和大粒径颗粒混合形成的双链结构, 颗粒能量约为 $-2.1\times10^{-13}\text{ J}$, 而小粒径形成的单链和双链结构颗粒能量约为 $-0.45\times10^{-13}\text{ J}$, 是大粒径磁力链和混合粒径磁力链的 5~9 倍。这就说明混合磁粒在磁场作

用下, 更易形成大粒径磁力链, 而小粒径颗粒不易单独形成磁力链, 而是被吸附在大粒径的颗粒磁力链中 (图 8), 其间隙和分叉容易被小粒径填充, 从而形成的磁力链数量会变少, 且更加紧密, 这与观察实验结果一致。

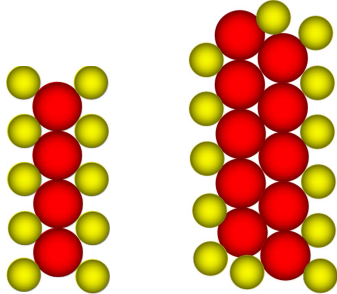


图 8 混合磨粒磁力链微结构模型
Fig.8 Microstructural model of mixed abrasive magnetic chain

3.3 混合粒径磁力研磨对表面粗糙度的影响

由钛合金工件表面粗糙度值变化规律可知, 混合粒径磁力研磨钛合金工件表面粗糙度值可降低至 $0.084\text{ }\mu\text{m}$, 比单一粒径降低了 20%。加工间隙相同时, 磨粒的粒径越大其相对磁导率越高^[12], 则大粒径磁力研磨的研磨压力会较大, 金刚石颗粒较大, 其划擦工件表面的痕迹过于明显, 见图 4b, 研磨一定时间后工件表面粗糙度难以降低; 而小粒径磨粒研磨压力较小, 且包覆在铁粉表面的金刚石数量相对较少, 切削能力较弱, 也难得到较低的表面粗糙度。采用混合粒径磁力研磨时研磨压力适中, 小粒径磨粒吸附在大粒径颗粒磁力链间, 磁力链更为紧密, 其刚性和强度更高, 大小粒径磨粒同时对工件表面进行研磨 (图 9), 大粒径磨粒切削能力强, 而小粒径磨粒有助于消除大粒径磨粒产生的划痕, 见图 4d, 加工后表面纹理致密。



图 9 混合粒径的研磨状态
Fig.9 finishing state of mixed particle size

4 结论

1) 小粒径磁力链结构颗粒能量约为 $-0.45\times10^{-13}\text{ J}$, 是大粒径和混合粒径磁力链的 5~9 倍, 这说明混合粒径磁力链中, 小粒径颗粒不易形成单独磁力链, 而是吸附在大粒径磁力链间隙中, 磁力链更加紧密, 提高了磁力刷的刚性和密度, 从而在混合粒径磁力研磨 TC4 钛合金中能够有效的降低表面粗糙度。

2) 基于混合粒径的磁力研磨能够明显降低钛合金工件表面粗糙度, 达到 $0.084\ \mu\text{m}$, 比单一粒径降低了 20%, 混合磁粒研磨后的钛合金表面, 初始存在的划痕和凹坑得到了较好的去除, 未产生较为明显的新划痕, 加工后表面纹理致密。

3) 混合粒径和单粒径磁力研磨钛合金工件时其工件表面粗糙度达 $0.11\ \mu\text{m}$ 所需时间都在 12 min 左右, 此时单粒径磁力研磨趋于稳定, 而混合粒径磁力研磨的表面粗糙度继续下降, 在 16 min 左右趋于稳定。

参考文献:

- [1] NOCHOVNAYA N A, PANIN P V, ALEKSEEV E B, et al. Modern Sparingly Alloyed Titanium Alloys: Application and Prospects[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2017, 58(9): 520-526.
- [2] 王欣, 罗学昆, 宇波, 等. 航空航天用钛合金表面工程技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(4): 14-24.
WANG Xin, LUO Xue-kun, YU Bo, et al. Research Progress on Surface Engineering Technology of Aerospace Titanium Alloys[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(4): 14-24.
- [3] 于振涛, 余森, 程军, 等. 新型医用钛合金材料的研发和应用现状[J]. 金属学报, 2017, 53(10): 1238-1264.
YU Zhen-tao, YU Sen, CHENG Jun, et al. Development and Application of Novel Biomedical Titanium Alloy Materials[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(10): 1238-1264.
- [4] 杨海吉, 邓祥伟, 韩冰, 等. 超声波辅助磁力研磨 TC4 薄壁细长管内表面研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(2): 30-33.
YANG Hai-ji, DENG Xiang-wei, HAN Bing, et al. Study on the Inner Surface of TC4 Thin-Walled Tube by Ultrasonic Vibration Assisted MAF[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2018(2): 30-33.
- [5] YAMAGUCHI H, SHINMURA T. Study of an Internal Magnetic Abrasive Finishing Using a Pole Rotation System[J]. Precision Engineering, 2000, 24(3): 237-244.
- [6] 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 Li-xin, 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.
- [7] LIN C T, YANG L D, CHOW H M. Study of Magnetic Abrasive Finishing in Free-Form Surface Operations Using the Taguchi Method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 34(1): 122-130.
- [8] 陈燕, 曾加恒, 胡玉刚, 等. 超声复合磁力研磨加工镍基合金 GH4169 异形管[J]. 中国表面工程, 2018, 31(6): 118-124.
CHEN Yan, ZENG Jia-heng, HU Yu-gang, et al. Special-Shaped Pipe of Nickel Based Alloy GH4169 by Ultrasonic Assisted Magnetic Abrasive Finishing[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(6): 118-124.
- [9] WANG Yan, HU De-jin. Study on the Inner Surface Finishing of Tubing by Magnetic Abrasive Finishing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(1): 43-49.
- [10] 姜林志, 张桂香, 秦璞, 等. 磁性磨料和磨粒相粒径对磁力研磨效率的影响[J]. 电镀与涂饰, 2019, 38(4): 157-160.
JIANG Lin-zhi, ZHANG Gui-xiang, QIN Pu, et al. Effects of Particle Size and Core Size of Magnetic Abrasive on Efficiency of Magnetic Abrasive Finishing[J]. Electroplating & Finishing, 2019, 38(4): 157-160.
- [11] 孙岩, 潘明诗, 王杰, 等. 仿形组合磁极研磨增材制造复杂表面工艺研究[J]. 表面技术, 2023, 52(6): 361-368.
SUN Yan, PAN Ming-shi, WANG Jie, et al. Technology of Grinding Complex Surfaces Obtained by Additive Manufacturing with Profiling Combined Magnetic Pole[J]. Surface Technology, 2023, 52(6): 361-368.
- [12] 任泽, 朱永伟, 董彦辉, 等. 弹性磁极磨头磁力研磨 TC4 钛合金的工艺优化[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2023, 43(2): 257-264.
REN Ze, ZHU Yong-wei, DONG Yan-hui, et al. Process Optimization of Magnetic Grinding TC4 Titanium Alloy with Elastic Magneticpole Grinding Head[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2023, 43(2): 257-264.
- [13] PASHMFOROUSH F, RAHIMI A. Nano-Finishing of BK7 Optical Glass Using Magnetic Abrasive Finishing Process[J]. Applied Optics, 2015, 54(9): 2199-2207.
- [14] 肖阳, 孙友松, 陈光忠. 永磁场磁力研磨 TC11 钛合金的实验研究[J]. 表面技术, 2017, 46(2): 229-234.
XIAO Yang, SUN You-song, CHEN Guang-zhong. Experimental Study of Magnetic Abrasive Finishing of TC11 Titanium Alloy in Permanent Magnetic Field[J]. Surface Technology, 2017, 46(2): 229-234.
- [15] 严正伟, 陈燕, 刘顺, 等. 基于正交试验的 Ti8 弯管内表面精密研磨工艺参数研究[J]. 现代制造工程, 2018(11): 95-100.
YAN Zheng-wei, CHEN Yan, LIU Shun, et al. Study on Parameters of Precise Grinding Ti8 Elbow Inner Surface Based on Orthogonal Test[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2018(11): 95-100.
- [16] 康璐, 陈燕, 钱之坤, 等. 电解磁力复合加工对磁性磨粒性能的影响[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2018, 38(1): 78-81.
KANG Lu, CHEN Yan, QIAN Zhi-kun, et al. Effect of Electrolytic Magnetic Composite Machining on Properties of Magnetic Abrasive Particles[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2018, 38(1): 78-81.

(下转第 159 页)