文章编号:1674-2974(2024)04-0090-09 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024174

医用钛合金海尔贝克磁场阵列化学磁流变抛光研究

张祥雷[1],陈卓杰[1],廖煜晖[1],周芬芬[2],冯铭[1†]
(1. 温州大学 机电工程学院,浙江 温州 325035;
2. 台州学院 智能制造学院,浙江 台州 318000)

摘 要:为了提高医用钛合金(TC4)抛光中的精度以及效率,采用基于海尔贝克磁场阵列的化学磁流变抛光方法加工医用钛合金.利用海尔贝克磁场阵列强化磁场强度,将过氧化氢溶液作为氧化剂来进行抛光加工.通过仿真模拟对比海尔贝克磁场阵列与常规N-S磁场阵列,改变羰基铁粉的活性来验证实验可行性,研究了加工间隙、主轴转速以及磨粒粒径对工件表面粗糙度以及接触角的影响规律.结果表明,海尔贝克磁场阵列比常规N-S磁场阵列有更高的磁场强度;采用本文方法抛光的医用钛合金表面粗糙度比单一纯磁流变抛光降低80%;当加工间隙为0.8 mm,主轴转速为400 rad/min,磨粒粒径为1 μm时,可使工件表面达到光滑效果,表面粗糙度最优可达15.5 nm,同时测量出实验组钛合金表面接触角数值多数小于90°.应用该方法抛光医用钛合金可以得到超光滑表面,表面具有亲水性,符合医用钛合金标准.

关键词:医用钛合金;表面粗糙度;接触角;化学磁流变抛光;海尔贝克磁场阵列
中图分类号:TG580.692 **文献标志码**:A

Study on Chemical Magnetorheological Polishing of Medical Titanium Alloy by Halbach Magnetic Field Array

ZHANG Xianglei[1], CHEN Zhuojie[1], LIAO Yuhui[1], ZHOU Fenfen[2], FENG Ming[1†]
(1. College of Mechanical Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China;
2. School of Intelligent Manufacturing, Taizhou University, Taizhou 318000, China)

Abstract: In this paper, a chemical magnetorheological polishing method based on the Halbach magnetic field array is utilized to enhance the precision and efficiency of polishing medical titanium alloy (TC4). Strengthening the magnetic field strength is used for the Halbach magnetic field array, and hydrogen peroxide solution is incorporated as an oxidant in the polishing process. Firstly, the Halbach magnetic field array is compared with the conventional N-S magnetic field array through simulation. Subsequently, the activity of carbonyl iron powder is adjusted to verify the experimental feasibility. The effects of working gap, main shaft speed, and abrasive particle size on surface roughness and contact angle of workpiece surface are then investigated. The results demonstrate that the Halbach magnetic field array exhibits higher magnetic-field strength than the conventional N-S magnetic field array.

* **收稿日期**:2023-10-20
基金项目:浙江省教育厅一般科研项目(Y202249064),Scientific Research Fund of Zhejiang Provincial Education Department (Y202249064);温州市重大科技创新攻关项目(ZG2022029), Major Science and Technology Innovation Project in Wenzhou(ZG2022029);浙江省自然科学基金资助项目(LQ22E050008,LQ19E050010),Natural Science Foundation of Zhejiang Province(LQ22E050008,LQ19E050010)
作者简介:张祥雷(1987—),男,浙江温州人,温州大学副教授,博士
† 通信联系人,E-mail: fming@wzu.edu.cn

Moreover, the surface roughness of the medical titanium alloy polished using this method is 80% lower than that achieved through single pure magnetorheological polishing. Optimal smoothing of the workpiece surface is achieved at a working gap of 0.8 mm, a main shaft speed of 400 rad/min, and an abrasive particle size of 1 μm, resulting in an optimal R_a value of 15.5 nm. The surface contact angle measurements indicate that the majority of contact angle values for the titanium alloy surface in the experimental group are less than 90°. In conclusion, the application of this method for polishing medical titanium alloy yields an ultra-smooth surface and enhances its hydrophilicity, thereby meeting the standards required for medical titanium alloys.

Key words: medical titanium alloy; surface roughness; contact angle; chemical magnetorheological polishing; Halbach magnetic field array

钛合金凭借其良好的生物相容性、高强度、低密度等诸多优点,成为医用材料的主要选择[1].但是,由于钛合金是一种典型的难加工材料,其热传导率低、耐磨性差的特点使得钛合金在加工过程中易产生切削痕迹、表面点蚀、残余应力等加工缺陷,缩短了零件的使用寿命,需要通过一系列精加工工艺使生产零件达到使用标准[2].因此,为了克服钛合金在生产中的这些缺点,后续的抛光工序是必不可少的.目前医用钛合金主要采用电化学抛光、化学机械抛光、磁流变抛光进行加工.医用钛合金表面应无明显凹凸、毛刺、氧化皮等缺陷,表面粗糙度应小于0.1 μm且表面应无污染和其他有害物质[3].

阎秋生等[4]在不同氯离子浓度的醇基电解液浓度下对激光增材制造TC4合金试样进行了抛光处理,结果表明,在0.4 mol/L氯离子电解液中得到了最佳电解抛光表面,表面粗糙度降低了75.04%.虽然电化学抛光材料去除效率高效,但是工件的形状精度改善程度非常有限.Beers等[5]通过化学机械抛光在钛基植入物上制造出纳米结构,以增强植入物的耐腐蚀性,但其表面会残留抛光液.Ozdemir等[6]采用CMP清洁钛植入物的表面,并证实使用质量分数为3% H_2O_2的CMP产生了最佳的表面质量.Yang等[7]以H_2O_2、金刚石微粉、纳米金刚石和Cu-Fe层状双氢氧化物(ND/LDH)的合成产物、草酸和去离子水为原料,研制了一种新型抛光液,经2 h CMP后,单晶金刚石表面粗糙度从231 nm减小至3 nm.可见,采用化学机械抛光对钛合金材料进行加工,有着很高的加工精度.但通常化学机械抛光液呈现强酸强碱特性,对环境和设备都将造成一定程度的破坏,因此生产成本较大.所以,越来越多学者考虑对环境的保护,将H_2O_2溶液加入抛光液中,取代强酸强碱溶液.

近年来,由于磁流变抛光只通过微量的机械去除便可获得光滑无损伤的表面,故被认为是最有潜力的医用合金抛光方法.但目前国内还未针对医用合金材料开展系统性的磁流变抛光研究.赵言[8]采用动态磁场集群磁流变技术对医用TC4合金进行系统的抛光实验,获得了表面粗糙度为2.87 nm的光滑表面.Sidpara等[9]使用球状磁流变抛光头对马蹄形人工关节进行全域抛光,表面粗糙度可达28 nm,形状精度获得了快速提升.Parameswari等[10]研究了磁流变抛光工艺对Ti-6Al-4V表面粗糙度变化百分比和光洁度的影响,发现磨料浓度和抛光盘转速越大,材料去除率越大,加工30 min后可获得最小表面粗糙度为95 nm的表面.Barman[11]用含金刚石磨粒的磁流变液抛光钛合金,研究了抛光盘转速、加工间隙和抛光时间对钛合金工件表面的影响,在抛光盘转速为1 200 r/min、加工间隙为1 mm,抛光时间为6.5 h的条件下可以获得最佳的表面光洁度,表面粗糙度可从120 nm减小为10 nm.然而,传统磁流变抛光采用电磁场作为磁场发生装置,其结构比较复杂,所用的磁场也是单一N-S磁场排布,没有在磁场设置中提出新的排列方式.同时,磁流变液会出现沉降现象,会降低抛光效率及剪切应力,使得磁流变液失效,甚至出现无效的抛光.袁亚强等[12]设计了新型双层海尔贝克(Halbach)永磁体阵列,使得磁吸附力提高了50.25%.葛研军等[13]设计了一种基于Halbach充磁阵列的双摆线式永磁齿轮,在磁场阵列的作用下更适合于低速大转矩传动系统.因此,在磁流变抛

光中,改变磁场的排列分布有望达到提升抛光效率的效果.

本文采用一种新型磁场阵列排布复合环保化学反应的磁流变抛光方法,对医用钛合金进行以机械去除为主,化学反应为辅的柔性抛光,研究了化学活性因素对表面质量的影响,同时探究了加工间隙、主轴转速以及磨粒粒径对钛合金表面质量及其表面接触角的影响规律,获得医用TC4钛合金光滑加工表面.

1 实验原理和设计

1.1 实验原理

海尔贝克阵列是一种用最少的磁铁在单边获得原理上具有最大磁场强度的磁场的特殊类型的磁体阵列,广泛应用于高效电机、粒子加速器、磁悬浮列车等与磁能相关的领域.Halbach阵列可以极大地扩展磁场影响区域和增强磁场强度,因此可以显著提高磁力抛光的效率[13-15].所用抛光工具如图1所示.本文的加工原理如图2所示,磁流变液在Halbach磁场阵列作用下在工件表面与抛光刀具之间形成柔性抛光垫.氧化剂通过蠕动泵被抽送至磁流变液与工件接触的位置,与工件表面进行化学反应.微观去除机理如图3所示,Fe^{2+}与H_2O_2发生芬顿反应生成氧化性极强的羟基自由基·OH,同时反应中Fe^{2+}与Fe^{3+}循环生成,铁离子不会被消耗.羟基自由基·OH与钛合金表面反应生成较软、易去除的钛氧化物,其主要反应式为:

$$Fe^{2+}+H_2O_2+Ti \rightarrow Ti_xO_y+H_2O+Fe^{3+} \quad (1)$$

$$Fe^{3+}+H_2O_2 \rightarrow Fe^{2+}+\cdot OOH+H^+ \quad (2)$$

同时磁流变液中的磁性颗粒在外加磁场的作用下形成链串结构,磨粒约束在链串中随着主轴转动对加工区域进行材料去除[16].

1.2 实验设计

图4为化学磁流变抛光加工实验装置.实验使用10 mm×10 mm ×1 mm的TC4钛合金方片,初始样件经过人工抛光,表面粗糙度不统一,有较明显划痕.为提高工艺参数验证的准确性,需要对试样进行预处理加工.先用粒径5 μm的植绒白砂纸将试样表层氧化层去除,统一表面粗糙度为90~110 nm. 再使

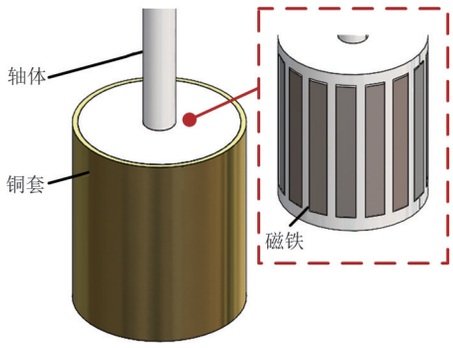


图1 抛光工具

Fig.1 Polishing tool

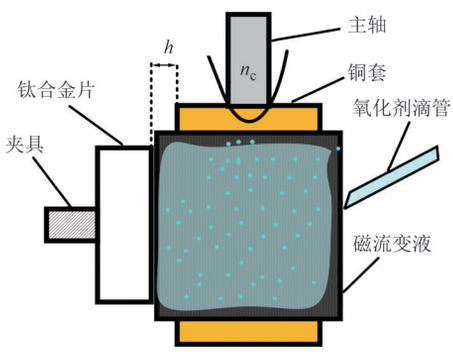


图2 加工原理

Fig.2 Processing principle

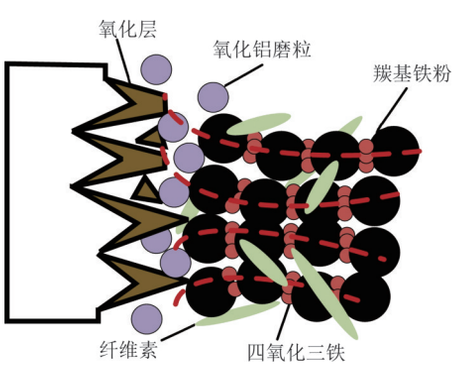


图3 微观去除机理

Fig.3 Microscopic removal mechanism

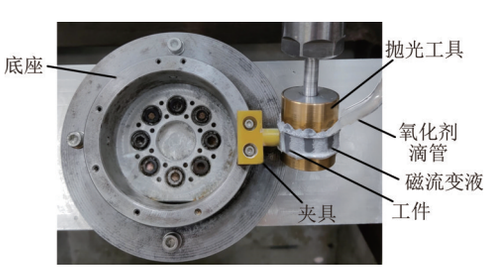


图4 实验装置

Fig.4 Experimental setup

用无水乙醇浸泡工件2~3 min,去除表面杂质.使用激光共聚焦显微镜OLYMPUS OLS4100以及表面粗糙度仪(西安威而信CH80)对试样加工区域表面粗

糙度进行测量,加工区域自上而下等距离测量5处表面粗糙度值,并求平均值作为初始表面粗糙度值R_a. 将试样待抛光面背部通过双面胶或胶枪粘在实验台上,通过调整机床来控制加工间隙.实验所用试剂组分如表1所示,实验工艺参数如表2所示,每组实验加工时间为10 min. 实验完成后使用超声波清洗机清理表面杂质,之后重新对加工区域自上而下等距离测量5处表面粗糙度值,并求平均值作为抛光加工后表面粗糙度值R_a',并用表面张力检测仪通过控制滴入等量去离子水,等待20 s使液滴形状稳定后测量工件表面抛光前、后的接触角,在同一样品表面等间隔测量4个位置,取平均值作为被测件表面润湿性结果. 通过对抛光前、后表面纹理、表面粗糙度、表面润湿性进行分析,对比加工效果.

表1　试剂组分

Tab.1　Reagent components

氧化剂	磁流变液组分	质量分数/%
质量分数为0.37%的过氧化氢溶液	羰基铁粉	61.76
	氧化铝磨粒	10.20
	丙三醇	0.81
	纤维素	0.27
	去离子水	26.85
	催化剂(四氧化三铁)	0.11

表2　实验工艺参数

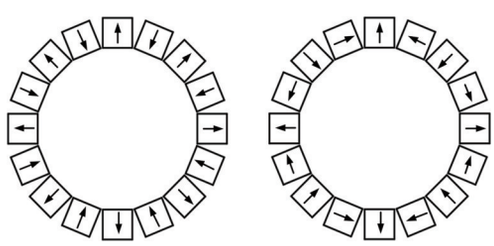
Tab.2　Experimental process parameters

序号	羰基铁粉种类	磨粒粒径/μm	加工间隙/mm	主轴转速/(rad·min^{-1})
1	纯水/活性铁粉/硅胶包裹铁粉	1	0.8	400
2	活性铁粉	1	0.4、0.6、0.8、1.0、1.2	300
3	活性铁粉	1	0.8	100、200、300、400、500
4	活性铁粉	1、3、5、7	0.8	400

2　结果与讨论

2.1　磁场仿真分析

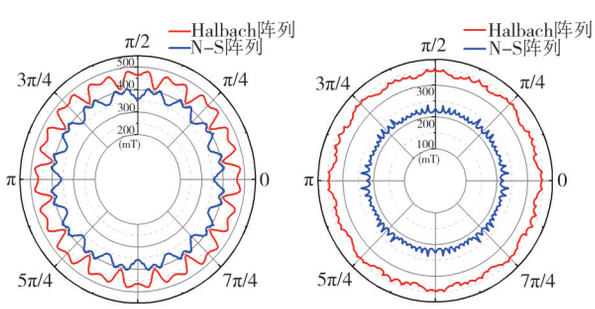
在COMSOL仿真软件中,模拟常规N-S磁场阵列排布与Halbach磁场阵列排布,如图5所示(箭头指向为N至S极). 对距离磁铁外表面2 mm处和1 mm处的环形区域进行磁通密度的仿真计算,仿真结果如图6所示. 由图6可知,在距离磁铁表面1 mm处,N-S排列磁铁和Halbach阵列排列磁铁产生磁场的磁通密度值相近,在400 mT以上,Halbach阵列排列磁铁比N-S排列磁铁的磁通密度要高60 mT左右. 随着与磁铁表面的距离增大,在2 mm处Halbach阵列排列磁铁的磁场衰减程度要明显低于N-S排列磁铁的磁场衰减程度,在此距离下,Halbach阵列排列磁铁依旧可以产生近368 mT的磁场,而N-S排列磁铁的磁通密度已经降低至220 mT,结果证明了Halbach阵列排列磁场在空间中有更高的磁场梯度,在强磁场及其梯度的作用下,磁流变液会表现出更强的磁流变效应,形成更硬的磁流变液带,可以显著提高抛光效率.



(a)N-S阵列　　(b)Halbach阵列

图5　两种磁场排布

Fig.5　Two types of magnetic field arrangement



(a)1 mm处磁场强度　　(b)2 mm处磁场强度

图6　磁铁表面磁场强度仿真

Fig.6　Simulation of magnetic field strength on the surface of magnets

2.2　可行性实验分析

为验证在磁流变抛光中加入化学反应的可行性,仅将氧化剂变为纯水,仅改变羰基铁粉的活性,其余加工参数保持一致.可行性实验结果如图7所示.表面润湿性是评价生物相容性的一个重要指标,表面润湿性可用接触角大小进行评判[17-18]. 在接触角测量方面,利用纯水试剂替代氧化剂做抛光实验后,其接触角为85°;使用硅胶包裹铁粉的抛光实验

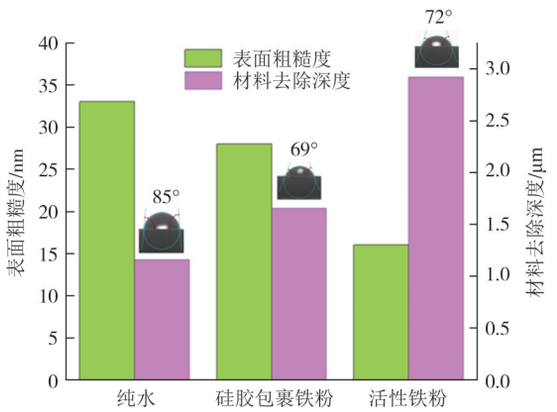
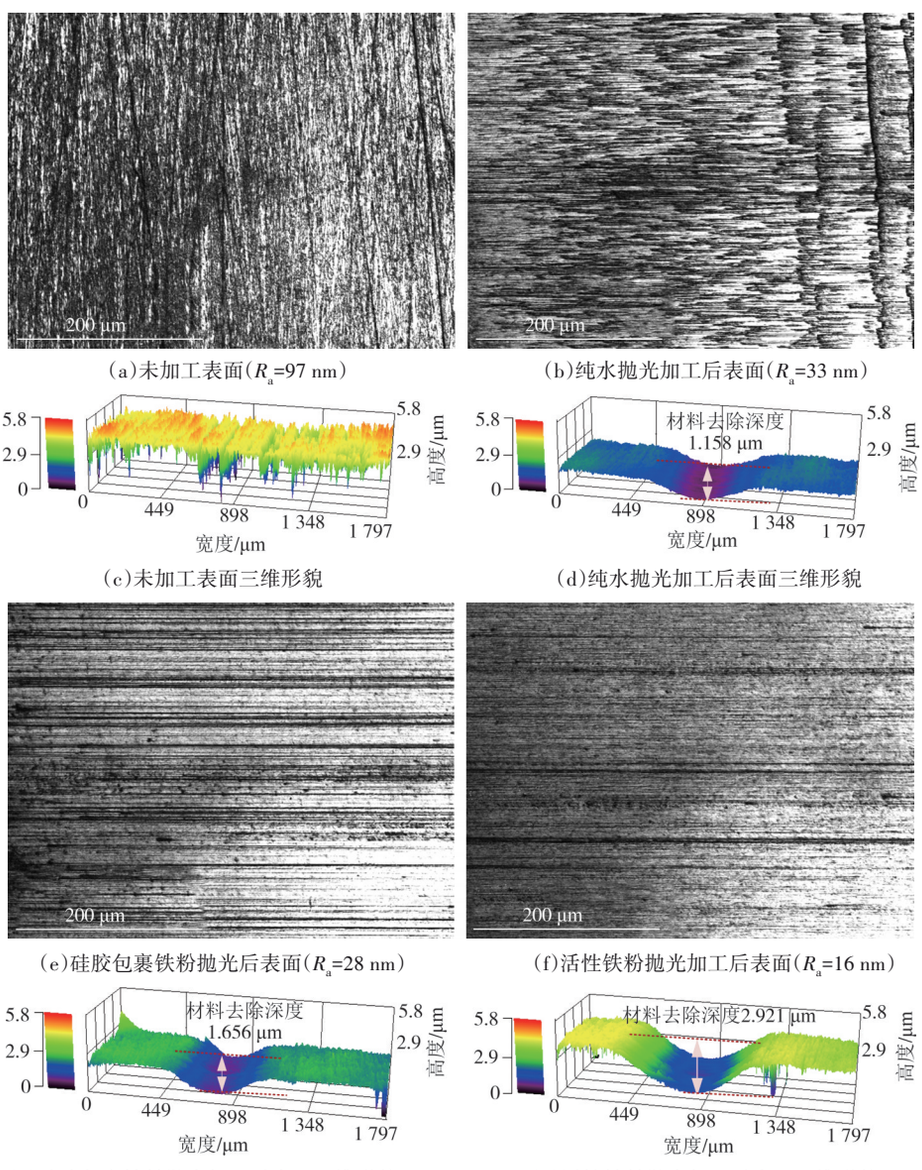


图 7 可行性实验结果

Fig.7 Results of feasibility experiments

组,其接触角为 69°;使用活性铁粉的抛光实验组,其接触角为 72°.在材料去除深度方面,使用活性铁粉的抛光实验组,其材料去除深度最大.可行性实验工件表面轮廓与表面形貌如图 8 所示,由图 8 可知,纯水抛光加工相当于只有机械去除效果,加工区域有明显的抛光痕迹.用硅胶包裹的羰基铁粉进行化学磁流变抛光,由于硅胶的保护作用,使得羰基铁粉的活性下降,不容易电离出 Fe^{2+},其加工区域的抛光痕迹略少于纯水抛光加工,这说明磁流变抛光中加入化学反应,对抛光表面质量有一定的提升.采用活性的羰基铁粉进行实验,其加工表面的抛光痕迹明显少于前两者,这说明抛光中加入化学反应的机制确实使工件表面反应生成更容易去除的氧化层,从而提升抛光效率.



(a)未加工表面(R_a=97 nm) (b)纯水抛光加工后表面(R_a=33 nm)

(c)未加工表面三维形貌 (d)纯水抛光加工后表面三维形貌

(e)硅胶包裹铁粉抛光后表面(R_a=28 nm) (f)活性铁粉抛光加工后表面(R_a=16 nm)

(g)硅胶包裹铁粉抛光加工后表面三维形貌 (h)活性铁粉抛光加工后表面三维形貌

图 8 可行性实验工件表面轮廓与表面形貌

Fig.8 Surface contour and morphology of feasibility experiment workpiece

综上可知,利用本文化学辅助磁流变抛光方法进行医用钛合金抛光,其材料去除效率比单一磁流变抛光提高将近一倍. 同时在抛光时间进行至10 min时,利用本文方法抛光的医用钛合金表面粗糙度比单一纯磁流变抛光降低80%. 虽然抛光后测得的工件表面接触角未与控制的实验变量呈单调线性变化的趋势,但其测得的接触角数值均小于90°,证明运用该方法抛光后的钛合金工件表面有着良好的亲水性.

2.3　加工间隙的影响

图9为加工间隙对表面粗糙度和接触角的影响. 由图9可知,当加工间隙为0.8 mm时,加工的表面粗糙度效果最好;加工间隙为0.4~0.8 mm时,表面粗糙度随加工间隙增大而减小;加工间隙为0.8~1.2 mm时,表面粗糙度随加工间隙增大而增大. 加工间隙主要影响磁场强度与磁流变抛光液体积,当加工间隙在0.4~0.8 mm之间增大时,可以保持一定的磁场强度,同时随着间隙增大,抛光刀具与工件之间的磁流变液体积增大,磁链串的数量也随之增加,所以羰基铁粉对磨粒的束缚在加工间隙为0.4~0.8 mm时较强,有利于磨粒对工件进行材料去除. 但继续增大加工间隙时,虽然工件刀具之间的磁流变液体积在增大,但工件表面的磁场强度随着刀具的远离逐渐减弱,造成磁链串松散,使之对磨粒的夹持能力减弱,进而导致抛光垫的加工性能变差[19].

在不同加工间隙下抛光后,工件表面接触角为69.9°~79.0°<90°. 抛光前、后工件表面接触角如图10所示,当加工间隙为0.4 mm时,其接触角约为73°,表面呈亲水性. 经过复合抛光加工可使初始呈疏水

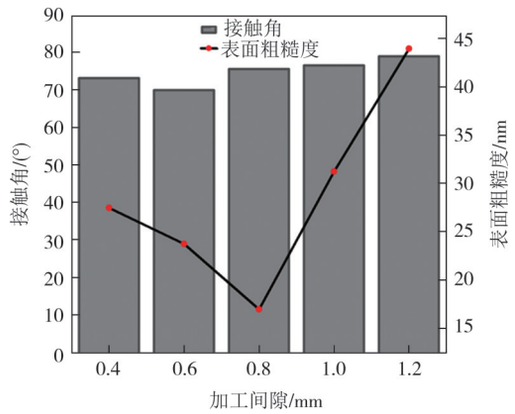
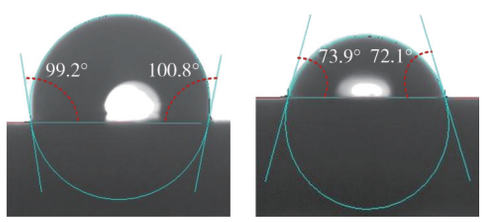


图9　加工间隙对表面粗糙度和接触角的影响

Fig.9　The influence of working gap on surface roughness and contact angle

性的表面转变为亲水性,加工后工件表面润湿性良好,提高了血液相容性,可以适应半永久性植入体内的使用环境.

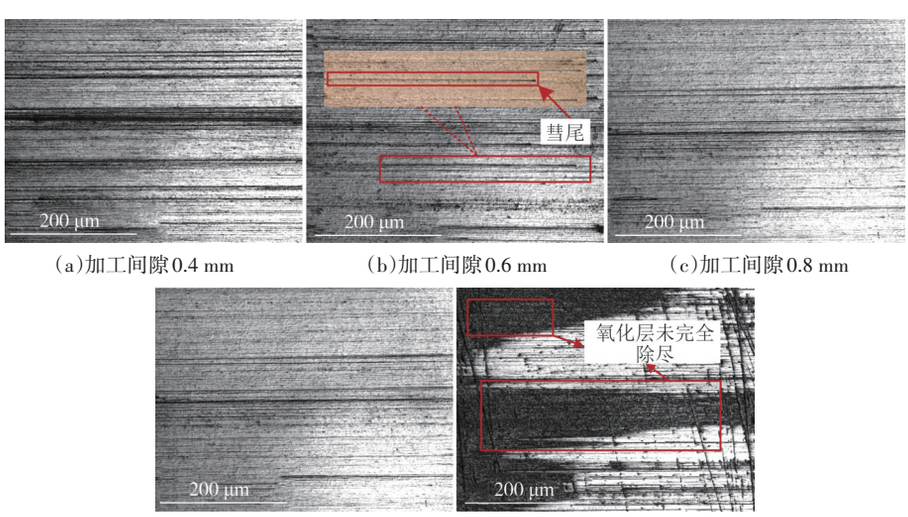


(a)加工前　　(b)加工后

图10　抛光前、后工件表面接触角(加工间隙为0.4 mm)

Fig.10　Contact angle of workpiece surface before and after polishing (working gap is 0.4 mm)

不同加工间隙下医用钛合金的表面形貌如图11所示. 在加工间隙分别为0.4 mm和0.6 mm时,会出现机械去除效果过于明显的情况,有磁流变抛光特有



(a)加工间隙0.4 mm　(b)加工间隙0.6 mm　(c)加工间隙0.8 mm

(d)加工间隙1.0 mm　(e)加工间隙1.2 mm

图11　不同加工间隙下医用钛合金的表面形貌

Fig.11　Surface morphology of medical titanium alloys under different working gaps

的“彗尾”抛光痕迹[20].当加工间隙为 0.8 mm时,机械去除效果和表面氧化效果趋于平衡状态,表面形貌趋于平整,无明显的抛光痕.当加工间隙为 1.0 mm时,抛光的机械去除效果逐渐弱于表面氧化的效果,表面氧化层开始出现不能去除的现象,加工区域呈现点状氧化层.当加工间隙达到1.2 mm时,抛光的机械去除效果明显弱于氧化的效果,加工区域出现大片氧化层不能完全除尽的现象.

2.4 主轴转速的影响

图 12 为主轴转速对表面粗糙度和接触角的影响.由图12可知,随着主轴转速的增加,工件表面粗糙度呈现出先减小后增大的规律,当主轴转速在400 rad/min时,其表面粗糙度最优,可达15.5 nm.

在不同主轴转速下抛光后,工件表面接触角在84.6°~105.4°范围内波动,可见接触角对主轴转速较加工间隙更敏感.转速分别为200 rad/min和500 rad/min时,工件表面接触角分别为99.2°和105.4°,在这2个转速下加工后,工件表面呈疏水状态.其余转速条件下,加工后工件表面接触角均小于90°,例如图13中,当主轴转速为100 rad/min时,其表面接触角为85.5°,表面呈亲水性.

当主轴转速较低(低于400 rad/min)时,随着转速的增加,工件与磁流变液之间的相对速度增加,可使磨料的切向剪切力增强,提高机械去除效果.但主轴转速继续增加(高于400 rad/min),施加在磁链串结构上的离心力超过磁链串结构之间的磁相互作用力,磁链串结构会变得不稳定,出现磁流变抛光液逃逸现象,造成加工区域参加抛光的磨料数量减少,导致加工性能变差.不同主轴转速下医用钛合金的表面形貌如图14所示,由图14可知,主轴转速过低时(主轴转速在100 rad/min左右),会出现工件氧化层不能去除的现象.

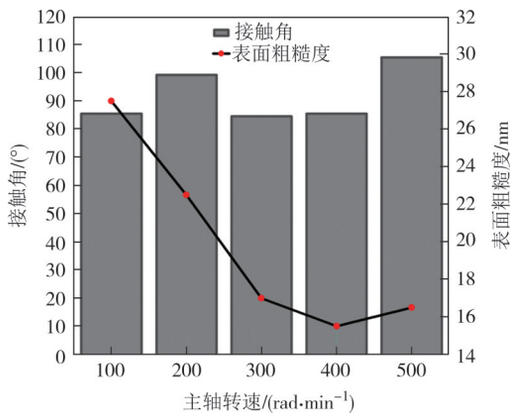
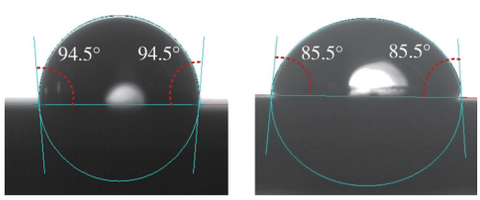


图 12 主轴转速对表面粗糙度和接触角的影响

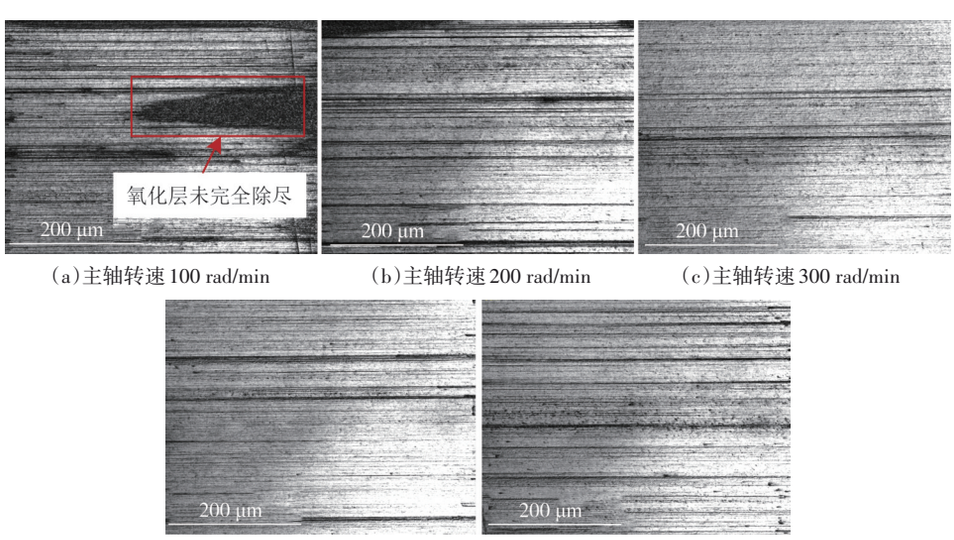
Fig.12 The influence of main shaft speed on surface roughness and contact angle



(a)加工前 (b)加工后

图 13 抛光前、后工件表面接触角(主轴转速为 100 rad/min)

Fig.13 Contact angle of workpiece surface before and after polishing (main shaft speed is 100 rad/min)



(a)主轴转速 100 rad/min (b)主轴转速 200 rad/min (c)主轴转速 300 rad/min

(d)主轴转速 400 rad/min (e)主轴转速 500 rad/min

图 14 不同主轴转速下医用钛合金的表面形貌

Fig.14 Surface morphology of medical titanium alloys under different main shaft speeds

2.5　磨粒粒径的影响

图 15 为磨粒粒径对表面粗糙度和接触角的影响.由图 15 可知,工件表面粗糙度随着磨粒粒径的增大而增大.在采用不同磨粒粒径抛光后,工件表面接触角均小于90°,例如图 16 中,当磨粒粒径为 1 μm 时,其表面接触角约为 86°,表面呈亲水性.图 17 为不同磨粒粒径下医用钛合金的表面形貌,由图 17 可知,因为小粒径磨粒更容易附着在工件表面上,而大粒径磨粒很难深入比自身更小的微坑中,所以采用小粒径磨粒进行抛光加工,可以尽可能使磨粒附着在工件表面进行微切削,增加了磨粒与工件有效的相对运动机会,从而使其表面更加平整.

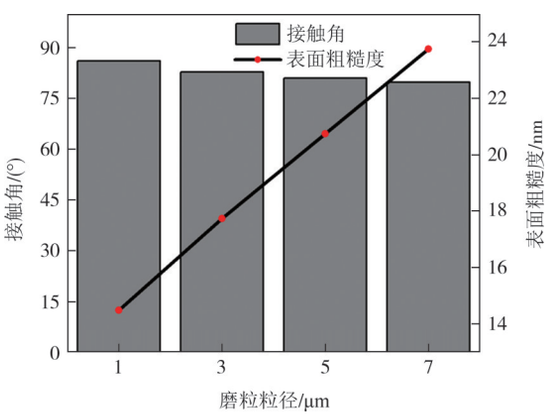
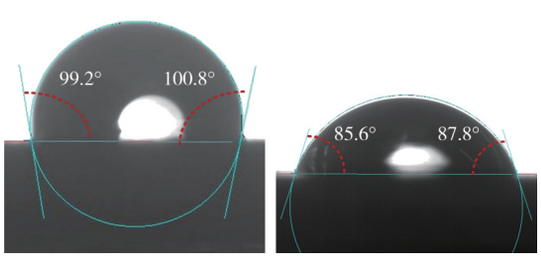


图 15　磨粒粒径对表面粗糙度和接触角的影响

Fig.15　The influence of abrasive particle size on surface roughness and contact angle



(a)加工前　　(b)加工后

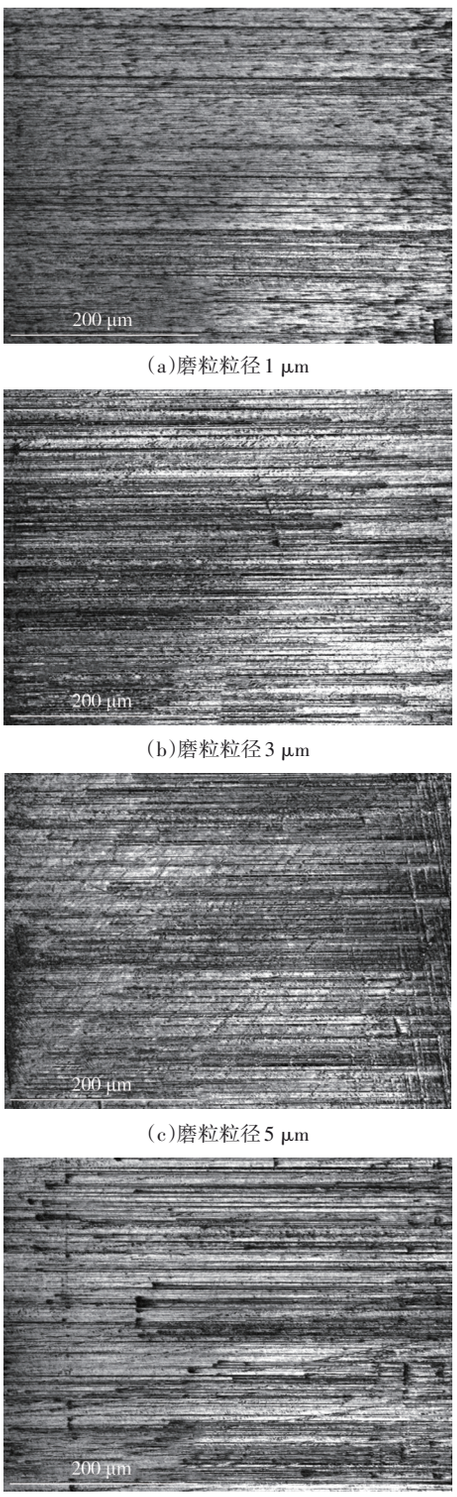
图 16　抛光前、后工件表面接触角(磨粒粒径为 1 μm)

Fig.16　Contact angle of workpiece surface before and after polishing (abrasive particle size is 1μm)

综上,在表面接触角方面,通过上述实验可看出,工件表面接触角与表面粗糙度没有很强的相关性,但只要在抛光加工中,控制合适的加工参数,可使工件表面呈现亲水性.

3　结 论

本文提出了一种采用海尔贝克磁场阵列,并利用 Fe^{2+}、·OH 与钛合金表面反应的化学磁流变抛光方法,对自主研制的抛光刀具进行内部磁场仿真,揭示了两种磁场阵列的分布特性;通过对 10 mm×10 mm×1 mm 的 TC4 钛合金方片进行抛光实验,研究了海尔



(a)磨粒粒径 1 μm

(b)磨粒粒径 3 μm

(c)磨粒粒径 5 μm

(d)磨粒粒径 7 μm

图 17　不同磨粒粒径下医用钛合金的表面形貌

Fig.17　Surface morphology of medical titanium alloys under different abrasive particle sizes

贝克阵列和磁流变液中的化学活性对化学辅助磁流变抛光的影响,并证明了该工艺有助于改善钛合金表面形貌并提升加工效率,得到了如下结论:

1)利用COMSOL仿真软件,验证了Halbach磁场阵列较常规N-S磁场阵列在空间中有更高的磁场梯度,可以显著提高抛光效率.

2)验证了基于Halbach磁场阵列下的化学磁流变抛光的可行性,实验结果表明该方法较常规磁流变抛光方法有着更高的表面去除效率与更高的精度.

3)研究了医用钛合金在利用基于Halbach磁场阵列下的化学磁流变抛光方法下,加工间隙、主轴转速、磨粒粒径对工件表面的表面粗糙度与接触角的影响.在单因素实验下,当加工间隙为0.8 mm,主轴转速为400 rad/min,磨粒粒径为1μm时,工件表面可达到光滑效果,表面粗糙度最优可达到15.5 nm.医用钛合金在该方法下,工件表面接触角多数在90°以内,呈现亲水性,抛光后工件表面具有良好的生物相容性.

参考文献

[1] 尹东芳, 黄一飞. 医用钛合金的生物相容性研究[J]. 医学研究杂志, 2008, 37(10): 96-97.
YIN D F, HUANG Y F. Study on the biocompatibility of medical titanium alloys [J]. Journal of Medical Research, 2008, 37(10): 96-97. (in Chinese)

[2] HOURMAND M, SARHAN A A D, SAYUTI M, et al. A comprehensive review on machining of titanium alloys [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46(8): 7087-7123.

[3] ZHANG Y F, LI J Z, CHE S H, et al. Electrochemical polishing of additively manufactured Ti-6Al-4V alloy [J]. Metals and Materials International, 2020, 26(6): 783-792.

[4] 阎秋生, 赵言, 梁智镔, 等. 医用钛合金动态磁场集群磁流变抛光加工研究[J]. 表面技术, 2021, 50(9):322-332.
YAN Q S, ZHAO Y, LIANG Z B, et al. Study on cluster magnetorheological finishing of medical titanium alloy with dynamic magnetic fields[J]. Surface Technology, 2021, 50(9): 322-332. (in Chinese)

[5] BEERS K, SUR D, BASIM G B. Chemical mechanical surface nano-structuring (CMNS) implementation on titanium based implants to enhance corrosion resistance and control biocompatibility [J]. Materials Research Society Journals and Archives, 2020, 5(43): 2209-2219.

[6] OZDEMIR Z, OZDEMIR A, BASIM G B. Application of chemical mechanical polishing process on titanium based implants [J]. Materials Science and Engineering: C, 2016, 68: 383-396.

[7] YANG H P, JIN Z J, NIU H, et al. A novel visible-light catalyzed assisted single crystal diamond chemical mechanical polishing slurry and polishing mechanism [J]. Materials Today Communications, 2022, 33: 104249.

[8] 赵言. 医用合金材料磁流变超光滑抛光加工研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
ZHAO Y. Study on magnetorheological ultra-smooth polishing of medical alloy materials [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021. (in Chinese)

[9] SIDPARA A, JAIN V K. Analysis of forces on the freeform surface in magnetorheological fluid based finishing process [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 69: 1-10.

[10] PARAMESWARI G, JAIN V K, RAMKUMAR J, et al. Experimental investigations into nanofinishing of Ti_6Al_4V flat disc using magnetorheological finishing process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100(5): 1055-1065.

[11] BARMAN A, DAS M. Toolpath generation and finishing of bio-titanium alloy using novel polishing tool in MFAF process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100(5): 1123-1135.

[12] 袁亚强, 王战中, 赵童. 新型双层Halbach永磁单元建模与仿真研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2021, 34(4): 95-102.
YUAN Y Q, WANG Z Z, ZHAO T. Study on modeling and simulation of new double-layer halbach permanent magnet adsorption unit [J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2021, 34(4): 95-102. (in Chinese)

[13] 葛研军, 权世成, 王建帅. 基于Halbach双摆线永磁齿轮设计与参数分析[J]. 机械传动, 2022, 46(7): 62-69.
GE Y J, QUAN S C, WANG J S. Design and parameter analysis of double cycloid permanent magnetic gears based on Halbach[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2022, 46(7): 62-69. (in Chinese)

[14] WANG Y Q, YIN S H, HUANG H, et al. Magnetorheological polishing using a permanent magnetic yoke with straight air gap for ultra-smooth surface planarization [J]. Precision Engineering, 2015, 40: 309-317.

[15] LUO H, GUO M J, YIN S H, et al. An atomic-scale and high efficiency finishing method of zirconia ceramics by using magnetorheological finishing[J]. Applied Surface Science, 2018, 444: 569-577.

[16] PAN J S, YU P, YAN Q S, et al. An experimental analysis of strontium titanate ceramic substrates polished by magnetorheological finishing with dynamic magnetic fields formed by rotating magnetic poles[J]. Smart Material Structures, 2017, 26(5): 055017.

[17] 梁华卓. 单晶SiC磁流变化学复合抛光机理研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
LIANG H Z. Research on the mechanism of single crystal SiC magnetorheological chemical composite polishing[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019. (in Chinese)

[18] ZHAO X W, LI L J, SHANG B, et al. Deep understanding of the dependence between Cu surface wettability and C-adsorption/desorption[J]. Applied Surface Science, 2023, 626: 157230.

[19] 刘赫男. 半球谐振子磁流变抛光的关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
LIU H N. Research on key technologies of magnetorheological polishing of hemispherical harmonic oscillator [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)

[20] SHI F, QIAO S, TIAN Y, et al. The generation mechanism and suppression method of the "comet tail" defect on the single-crystal silicon surface polishing with magnetorheological [J]. Ceramics International, 2022, 48(12): 17621-17631.