文章编号:1674-2974(2024)04-0071-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024172

可降解软磨料对再制造水射流清洗性能影响因素研究

柴彤山[1,2],黄呈棋[1,2],李红钢[3],程怀玉[2],武子全[4],龙新平[1,2†]

[1. 武汉大学 动力与机械学院,湖北 武汉 430072;
2. 水射流理论与新技术湖北省重点实验室,湖北 武汉 430072;
3. 武汉第二船舶设计研究所,湖北 武汉 430064;
4. 为加智能装备(重庆)有限责任公司,重庆 401122]

摘 要:提出一种新型可降解软磨料用于磨料水射流清洗技术,分析对比不同硬度磨料水射流清洗再制造零部件的清洗性能和表面损伤规律.采用石榴石硬磨料水射流、核桃壳软磨料水射流和纯水射流3种射流方式,开展清洗零部件污垢的对比试验;在不同清洗方式下,分析清洗速率、比能耗、清洗后表面粗糙度、最大坑深等4个方面的差异,并从宏观和微观层面分析不同清洗模式下基体损伤情况.结果表明,核桃壳软磨料能够有效去除表面污垢和杂质,降低比能耗,提高清洗速率,同时又不会对基体表面产生较大的损伤,在再制造业清洗或对表面粗糙度要求高的场合下,是一种较为理想的选择.

关键词:磨料;可降解;水射流清洗;再制造业

中图分类号:TB4 **文献标志码**:A

Research on Influencing Factors of Degradable Soft Abrasive Water Jet on Remanufacturing Cleaning Performance

CHAI Tongshan[1,2], HUANG Chengqi[1,2], LI Honggang[3], CHENG Huaiyu[2],
WU Ziquan[4], LONG Xinping[1,2†]

[1. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Key Laboratory of Hubei Province for Waterjet Theory & New Technology, Wuhan 430072, China;
3. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430064, China;
4. Forplus Intelligent Equipment (Chongqing) Co., Ltd, Chongqing 401122, China]

Abstract: This study proposes a novel degradable soft abrasive for abrasive water jet cleaning technology and analyzes and compares the cleaning performance and surface damage patterns of remanufactured components treated with the abrasive water jet of varying hardness. Furthermore, the study conducts comparative experiments on the cleaning of component dirt using three different jet methods: garnet hard abrasive water jet, walnut shell soft abrasive water jet, and pure water jet. The study analyzes the differences in cleaning rate, specific energy

* **收稿日期**:2023-10-22
基金项目:国家自然科学基金资助项目(12072243), National Natural Science Foundation of China(12072243);中国博士后面上项目(2022T150490), China Postdoctoral Science Foundation (2022T150490)
作者简介:柴彤山(1998—),男,甘肃金昌人,武汉大学博士研究生
† 通信联系人,E-mail: xplong@whu.edu.cn

consumption, surface roughness after cleaning, and maximum pit depth among different cleaning methods, and investigates the matrix damage under different cleaning modes from both macro and micro perspectives. The results show that the walnut shell soft abrasive demonstrates superior cleaning efficacy, reduced specific energy consumption, improved cleaning speed, and negligible substrate surface damage. Consequently, the walnut shell soft abrasive is regarded as an ideal cleaning choice in remanufacturing industries or for applications that demand high surface roughness standards.

Key words: abrasives; degradable; water jet cleaning; remanufacturing

再制造是机械产品资源化循环利用的最佳途径之一,其中清洗环节在再制造工艺中起到至关重要的作用[1-2].随着国家及社会对低碳环保的日益重视,再制造清洗技术需要趋向于绿色化、高效化和物理化.理想的再制造清洗应彻底清洗零部件表面的各种污垢[3],以满足再制造工艺对表面清洁度的要求,并且应尽量减小清洗方法可能对基体材料表面造成的损伤.质量良好的零部件经清洗并通过检测分析后可直接进入装配环节,避免不必要的修复步骤,降低成本[4].

高压水射流清洗技术契合当前可持续发展理念,在再制造零部件清洗工艺中已经成为一个流行趋势[5-7].但纯水射流清洗速率较低,对再制造零部件上的顽固污垢清洗不够彻底,比能耗偏高.磨料水射流技术因其适应能力强、效率高、成本低、无热影响等优点[8-9],目前在表面污垢清洗等方面得到了广泛应用.众多学者对涂层、锈蚀等表面污垢的磨料水射流去除机理和应用进行了研究,取得了一定的成果[10-11].Wibowo[12]提出了将多种工艺参数一同关联的混合方法,包括射流压力、靶距、进给速度、磨料粒径和磨料质量分数等,提出了预测模型,用以估算磨料水射流清洗加工后的表面粗糙度.Long等[13]采用欧拉-拉格朗日方法,对磨料水射流喷嘴内部流场和磨料颗粒运动进行模拟分析,并运用离散颗粒模型计算磨料颗粒的轨迹.研究结果表明,较长的收缩管能够有效减少颗粒圆周运动,从而确保颗粒在离开喷嘴时不会出现显著的圆周速度,为磨料水射流和喷嘴的设计提供指导.袁瑞甫等[14]通过水晶玻璃切割试验研究了不同冲击角下磨料水射流的切割运动过程,发现对靶件破坏起主导作用的是垂直向及水平向射流分量(与推进方向同向),与推进方向反向的水平向射流分量则对已形成切缝起二次冲蚀及抛光作用.邓乾发等[15]为实现浸没环境下的表面高效加工,开发了一种浸没式自激脉冲磨料水射流抛光装置,并通过试验和数值模拟验证了装置的有效性.

传统硬质磨料容易对零部件表面造成划痕、坑蚀等损伤,影响表面粗糙度,降低清洗质量.有学者提出使用新型环保磨料替代传统的硬质石榴石磨料.Peng等[10]提出纳米颗粒喷射技术,将纳米颗粒作为射流抛光的去除磨料,通过纳米颗粒表面的羟基与吸附在工件表面的羟基发生键合作用.王星[16]通过采用SiO_2胶体磨料替代硬质磨料,处理后的K9玻璃表面粗糙度从5.233 nm变为1.649 nm;进一步地,通过将纳米胶体射流抛光与空化技术相结合,加工效率提高了约20%.郭鹏等[17]采用氯化钠、蔗糖和木糖醇3种可溶性晶体颗粒为磨料,探究不同物性的可溶性晶体作为磨料时水射流对生物骨切削性能的影响.这些新型磨料的制备、储存较为困难,成本偏高;同时应用场景较为局限,导致无法得到广泛的应用.

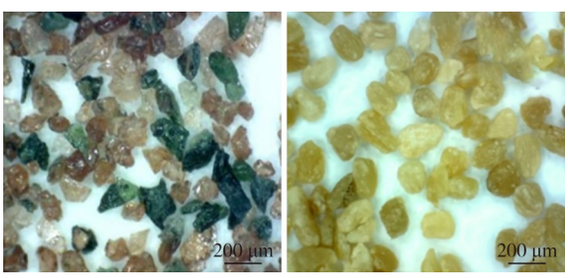
核桃壳是一种可降解的软磨料,具有绿色环保、易于获得等优点,将其替代传统硬质磨料加入水射流清洗技术,有望应用于再制造零部件的清洗过程中,解决上述难题,目前尚未有相关报道.为此本文设计对照试验探究软硬磨料水射流清洗性能,结合试验现象和试验结果验证软磨料水射流清洗的可行性与优势.

1 磨料种类和试样制备

1.1 磨料种类

在磨料水射流技术中,石榴石因为其硬度较高,

在清洗过程中可以更好地去除腐蚀、氧化层等较难清洗的杂质而被广泛使用.核桃壳磨料是一种可降解的软磨料,与传统的硬磨料相比,核桃壳具有质地轻、密度低、硬度适中、不易损伤被清洗材料表面等独特性质.此外,由于核桃壳磨料是一种天然的生物质材料,在清洗过程中产生的废弃物可以被自然降解和利用,具有较好的环保性.图1为石榴石和核桃壳形貌对比,两者均具有不规则的形状和棱角,但核桃壳磨料相对圆润.石榴石和核桃壳相关性质如表1所示.



(a)石榴石　　(b)核桃壳

图1　石榴石和核桃壳形貌对比

Fig.1　Comparison of morphology between garnet and walnut shell

表1　石榴石和核桃壳相关性质

Tab.1　Properties of garnet and walnut shell

名称	主要成分	密度/($g\cdot cm^{-3}$)	吸附性	莫氏硬度
石榴石	Al_2O_3等	3.6~4.2	无	7.5
核桃壳	纤维素、木质素等	1.3~1.6	吸附油污等	2.5~3.0

1.2　试样制备

本文的研究对象是再制造零部件表面的污物清洗,因此选用此类零部件中常用的Q235结构钢作为基体材料,其尺寸(长×宽×高)为100 mm×50 mm×1 mm.

再制造零部件表面需要清洁的成分较为复杂,可能包括油漆、锈蚀、油污和积碳等的一种或多种,本文以油漆作为典型污垢代表作为研究对象.

目前市面上各项性质最优的涂料为氟碳漆,其主要成分氟碳树脂中含有大量的F—C键,其键能为485 kJ/mol,是所有化学键中最强的.由于其F—C键很难在热和光的作用下断裂,表现出优秀的耐热性和耐腐蚀性.

为了能够更好地让工业涂料附着在基体表面上,首先将样品表面清洁干净,去除表面污垢.在预处理之后的基材上均匀喷刷3层氟碳漆,每层喷漆间隔30 min,漆层总厚度约为150 μm.样本放置在自然条件下固化至少3个月,这样能让样品表面的污垢更接近实际情况.通过电子天平测量样品喷漆前、后质量,得到每个样品的漆面质量,选取漆面质量为1.3~1.5 g的样本进行实验,确保漆层的厚度基本一致.

2　试验设计

2.1　试验与测试设备

本文采用沈阳奥拓福科技股份有限公司的APW2016BA-18数控高压水射流加工机床,该机床为后混合磨料水射流系统;采用德国NanoFocus uscan 3D激光扫描轮廓仪测量表面粗糙度、三维形貌等;采用MIRA3扫描电子显微镜进行微观形貌观察与对比.

2.2　工艺参数选择与设计

在磨料水射流试验中,有很多因素会影响磨料水射流清洗性能,如表2所示.

表2　影响磨料水射流清洗性能的因素

Tab.2　Factors affecting the cleaning performance of abrasive water jet

类别	影响因素
流体因素	流量、射流压力、喷嘴直径
混合因素	混合方式、混合管直径、混合管长度
加工因素	进给速度、靶距、射流角度、横向进给量、清洗次数
磨料因素	磨料质量分数、磨料粒径、磨料硬度、磨粒形状
污垢层因素	污垢硬度、强度、与基体的附着力

为保证试验的准确性和可重复性,需要在试验装置和清洗污垢种类选定后,尽可能缩小变量范围.以上大部分参数,在试验装置、清洗污垢类型等选定后就已经确定,具体而言,选定清洗喷嘴直径为0.33 mm,砂管直径为1.02 mm,射流角度为90°,使用后混合磨料水射流清洗系统,磨料粒径选用最常用且目前效果最佳的198 μm.

本次试验研究的主要参数包括磨料粒子种类、水射流压力P、进给速度u、靶距S及磨料质量分数M_a.其中射流压力及靶距影响射流对清洗面上作用力的强弱;磨料质量分数和进给速度影响作用在局部的射流时间长短和磨料颗粒数.

根据现有的试验条件和水射流试验设备的特点,针对不同硬度磨料对清洗速率、比能耗、表面粗糙度和清洗后基体损伤的影响进行试验研究.采用

控制变量法,对试样进行试验后,使用3D激光扫描轮廓仪测量清洗后表面粗糙度、基体损伤坑深及表面形貌.除磨料种类外每组工艺参数选取4个水平,与此同时每组试验重复3次,排除试验偶然性,并求其平均值减小误差.共计44组试验,132次.不同硬度磨料清洗试验的工艺参数如表3所示.

表3 不同硬度磨料清洗试验的工艺参数

Tab.3 Process parameters of abrasive cleaning experiments with different hardness

工艺参数	取值
磨料种类	石榴石、核桃壳、纯水
A—水射流压力 P/MPa	50、100、150、200
B—靶距 S/mm	10、20、50、80
C—磨料质量分数 M_a/%	4、8、12、16
D—进给速度 u/(m·min^{-1})	0.5、1.0、1.5、2.0

3 不同硬度磨料清洗性能的对比

本节探究传统硬磨料(石榴石)、可降解软磨料(核桃壳)、纯水对再制造零部件清洗速率、比能耗、清洗后金属表面粗糙度、基体损伤的影响.本节通过调节射流压力、靶距、磨料质量分数和进给速度等工艺参数来分析不同类型磨料的清洗性能.

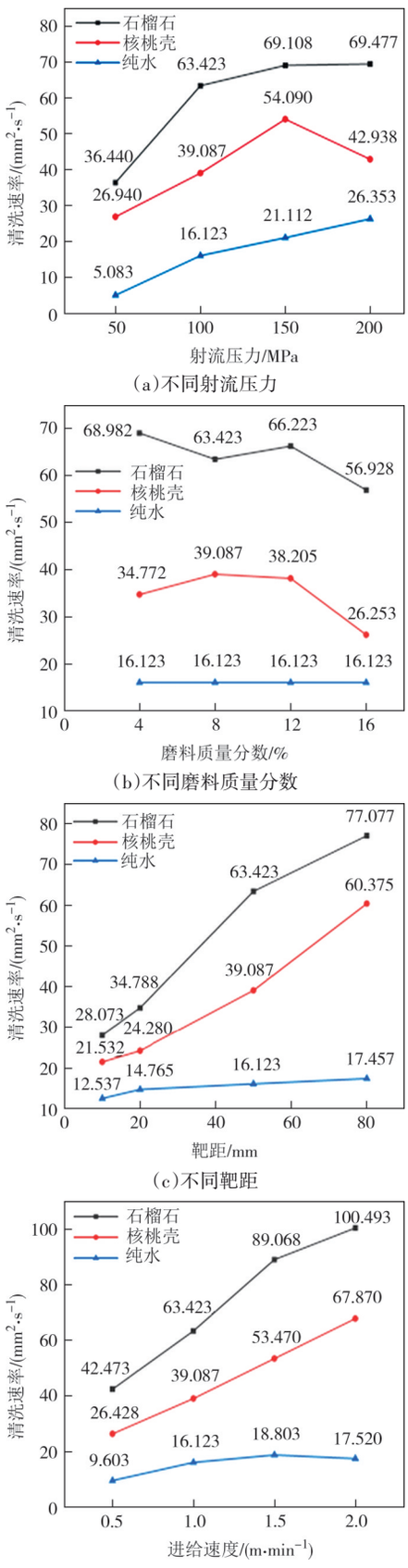
3.1 不同硬度磨料清洗速率对比

污垢清洗速率ε是单位时间内清洗的污垢面积.

$$\varepsilon = \frac{A}{T} \tag{1}$$

式中:T为清洗时间,s;A为清洗面积,mm^2.

图2为石榴石、核桃壳及纯水清洗速率对比.使用传统石榴石硬磨料和核桃壳软磨料进行水射流清洗可以有效地提高清洗速率.通过调整射流压力、磨料质量分数、靶距和进给速度,发现软、硬磨料对清洗速率的影响规律基本一致.随着射流压力的增加,清洗速率不断增大,达到极值后略微下降;磨料质量分数的增加对清洗速率的影响稍有不同,这是由于磨料硬度和密度的差异导致的;靶距的增大使得射流宽度增加,从而增大清洗速率,但当靶距增大到一定值时,会出现下降的情况;进给速度的增加也能让清洗速率增大.然而,如果只使用纯水射流,则除了增大射流压力能够有效提升清洗速率以外,增大靶距或者进给速度都不能显著提高清洗速率.这是由于纯水射流去除污垢的能力较差,即便提高单位时间的作用面积也无法有效进行清洗.此外,试验结果还表明,石榴石磨料的清洗速率比核桃壳高出2倍,



(a)不同射流压力

(b)不同磨料质量分数

(c)不同靶距

(d)不同进给速度

图2 石榴石、核桃壳及纯水清洗速率对比

Fig.2 Comparison of rates on surfaces cleaned with garnet, walnut shell, and pure water

但核桃壳磨料的清洗速率比纯水高出5倍.因此,加入这2种软、硬磨料均能有效改善清洗速率.

3.2　不同硬度磨料清洗比能耗对比

比能耗是指在磨料水射流加工中,每单位能量消耗所能清洗的表面积,通常用kW·h/m²来表示.它的意义在于,通过该指标可以评估不同清洗方法的清洗性能和经济性能.较低的比能耗表示清洗性能好,经济性能高,即以较少的能量消耗可以清洗更多的表面.比能耗的公式如下:

$$N=\frac{P_{\mathrm{w}}T}{S}=\frac{\frac{PQ}{60}\cdot T}{D(u\cdot 60)T}=\frac{PQ}{3\,600Du} \tag{2}$$

式中:N为比能耗,kW·h/m²;P_{w}为高压水射流有效功率,kW;T为清洗时间,s;S为有效清洗面积,m²;P为高压水射流压力,MPa;D为清洗有效作业平均宽度,m;Q为高压水射流流量,L/min;u为清洗水喷嘴模块的进给速度,m/min.

图3为石榴石、核桃壳及纯水清洗比能耗对比.石榴石清洗比能耗略低于核桃壳的清洗比能耗,两者差距不大,但石榴石、核桃壳磨料清洗比能耗远低于纯水射流,大致是其的1/3,说明在相同的参数条件下,加入磨料相比于纯水清洗更加节能.石榴石的硬度和密度较高,在高速水流中,能获得更多的冲蚀动能,可以更好地发挥磨料的作用,从而减少清洗所需的能量和时间.相比之下,核桃壳的硬度较低,在清洗过程中会有磨损,同时对污垢的去除能力较石榴石磨料略差,需要较多的软磨料才能完成同样的清洗任务,这会导致清洗比能耗增加.随着这些参数的变化,软、硬磨料对清洗比能耗的影响规律基本一致,比能耗随着射流压力的增加而增加,随着磨料质量分数的增大先减小后增大,随着进给速度和靶距的增大而减小.总的来说,加入软、硬磨料能显著降低清洗使用的能耗.

3.3　不同硬度磨料表面粗糙度对比

表面粗糙度R_{a}指清洗部件表面在微观形态下波谷及波峰的不平度,用以表征磨料水射流清洗质量.表面粗糙度由3D激光扫描轮廓仪测量得出.为了获得准确的结果,选取每个样品距离间隔相同的4个点进行测量,避免因表面上的局部不均匀性而导致的误差.同时为了获得更好的结果,对每个位置进行3次以上的测量,并计算平均值,减小误差,以确保结果的可靠性.

图4为石榴石、核桃壳及纯水清洗表面粗糙度对比.不同硬度的磨料清洗后表面粗糙度存在巨大

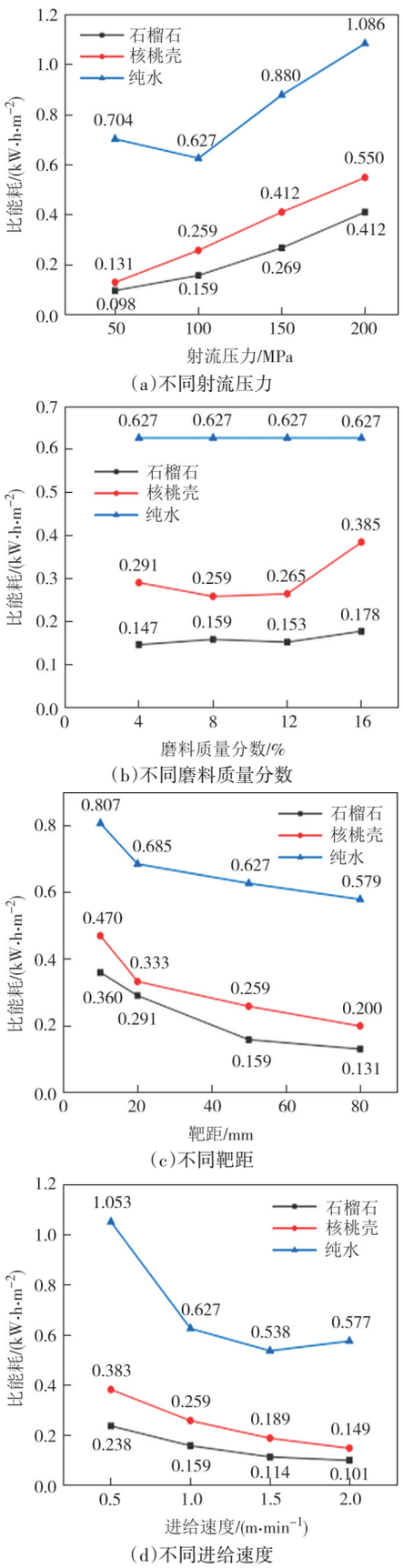
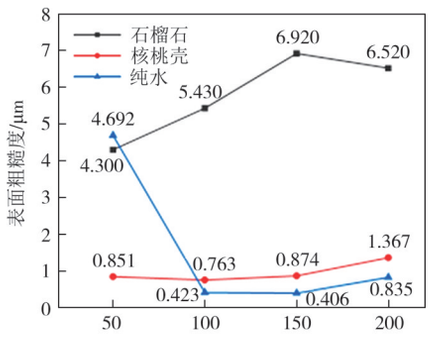
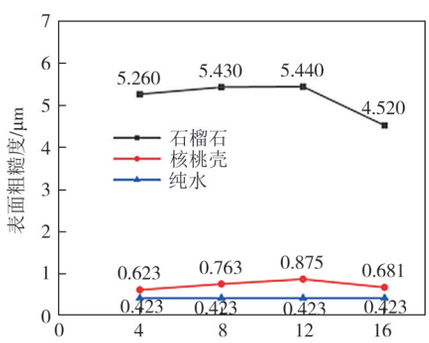


图3　石榴石、核桃壳及纯水清洗比能耗对比

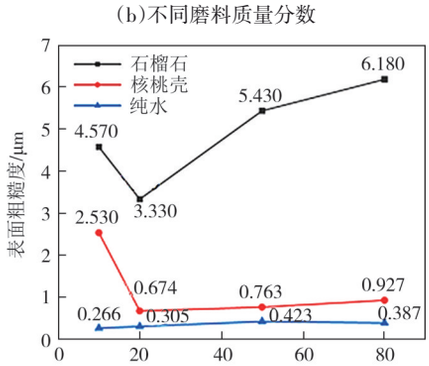
Fig.3　Comparison of specific energy consumption on surfaces cleaned with garnet, walnut shell, and pure water



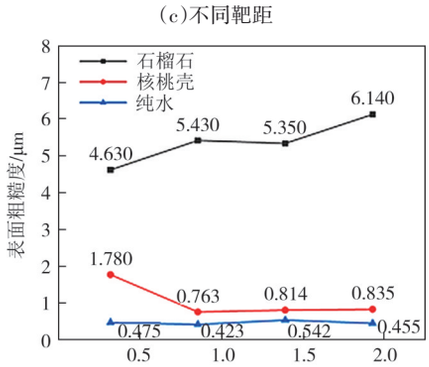
(a)不同射流压力



(b)不同磨料质量分数



(c)不同靶距



(d)不同进给速度

图4 石榴石、核桃壳及纯水清洗表面粗糙度对比

Fig.4 Comparison of surface roughness on surfaces cleaned with garnet, walnut shell, and pure water

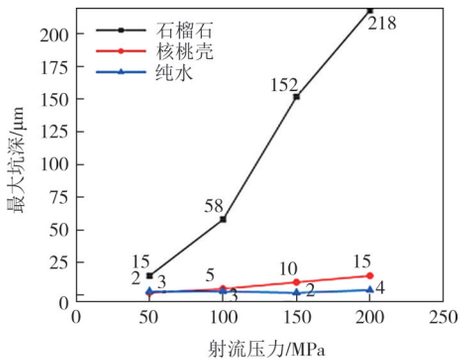
差异,石榴石磨料清洗后表面粗糙度远大于核桃壳和纯水清洗,而核桃壳和纯水清洗后表面粗糙度能保持在较低水平.由于石榴石是一种硬度较高的磨料,其清洗后表面粗糙度较大,主要是由于其磨削作用过于强烈,不仅能将污垢快速清理,基体表面也会被切割和切削,产生了大量的微观凹坑和凸起.而核桃壳是一种硬度较低的磨料,其磨削作用相对较弱,只能去除物体表面附着的污垢,不会对零部件基体表面造成较大的损伤.当射流压力为50~200 MPa、磨料质量分数为4%~16%、靶距为20~80 mm、进给速度为0.5~2.0 m/min时,均能较为稳定地将表面粗糙度保持在低水平.纯水清洗则是一种不使用磨料的清洗方式,其清洗后表面粗糙度最小,利用高压水流对物体表面进行冲刷和冲洗,不会对物体表面造成明显的磨削和切削,但纯水清洗存在一定的局限,在压力为50 MPa或更小时,它无法将基体污垢表面清洗彻底,导致表面粗糙度明显增大.

3.4 不同硬度磨料表面最大坑深对比

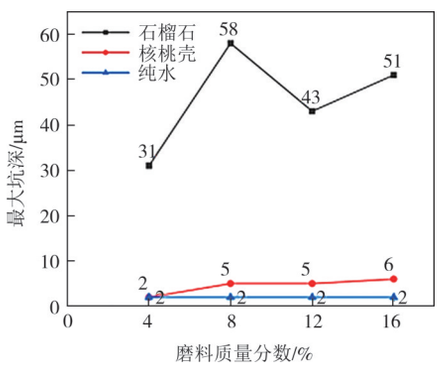
表面最大坑深是指从样品表面到坑底的最大垂直距离,用以衡量磨料水射流清洗技术对零部件表面的磨损程度,该指标由3D激光扫描轮廓仪直接测量得出.图5为石榴石、核桃壳及纯水清洗表面最大坑深对比.在清洗过程中,石榴石硬磨料对基体表面的损伤程度较大,核桃壳软磨料对基体表面损伤极小,几乎与纯水一致.这是因为不同硬度的磨料对基体表面的损伤程度不同.石榴石的硬度较高,在清洗过程中会对基体表面造成更大的冲击力和磨损,导致表面坑蚀较大.而核桃壳软磨料的硬度较低,对基体表面的冲击力和磨损较小,因此对基体表面无损伤.纯水清洗表面也无损伤,这是因为纯水中不含有任何磨料,在目前所选的射流压力、靶距、进给速度下,纯水对基体表面的冲击力无法对基体造成损伤.由图5可知,当射流压力达到200 MPa时,此时最大坑深为218 μm,且这一数据将会随射流压力的增大不断变大.故当射流压力较大、磨料质量分数适中、进给速度较低或靶距适中的情况下,石榴石磨料对基体表面损伤极大,然而在本文所选参数范围内,核桃壳磨料对基体几乎不会造成损伤.

4 不同硬度磨料基体损伤形貌对比

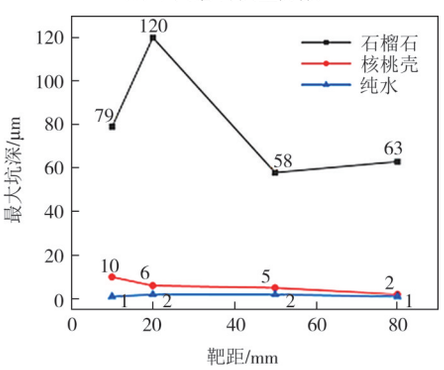
清洗试验完成后,通过化学除漆法去除样品表



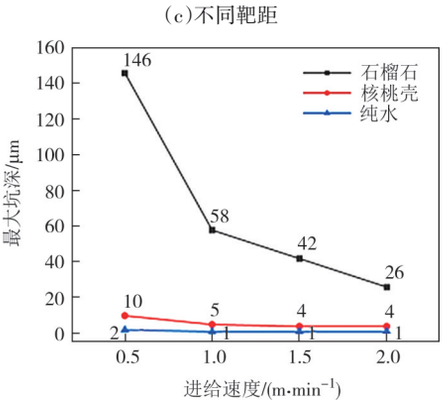
(a)不同射流压力



(b)不同磨料质量分数



(c)不同靶距



(d)不同进给速度

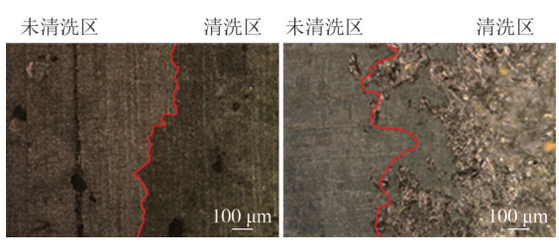
图 5　石榴石、核桃壳及纯水清洗表面最大坑深对比

Fig.5　Comparison of maximum pit depth on surfaces cleaned with garnet, walnut shell, and pure water

面未被射流清洗的氟碳漆,所使用的溶解剂不会对基体表面形貌产生任何影响,也不会对基体有任何损伤.去除后通过对比表面宏观和微观形貌,进一步观察不同硬度磨料清洗对基体的损伤情况.

4.1　清洗后的基体表面形貌

图 6 展示了使用核桃壳和石榴石磨料进行清洗后样品交界处宏观形貌.由图 6(a)可知,在采用核桃壳作为磨料清洗后,基体表面的形貌与未清洗区域基本保持一致,核桃壳磨料并没有对基体表面造成明显的影响,清洗后的表面仍然保持较低粗糙度和较高的完整性.这是因为核桃壳相对柔软,不容易对基体表面造成损伤.从图 6(b)可以看出,石榴石清洗后的基体表面凹凸不平,出现了较深的坑洞和划痕,露出了金属内部光泽,表面粗糙度极大,影响了表面的完整性,基体有明显的破损现象.这是因为石榴石磨料具有较高的硬度和较锋利的材质,容易对基体表面造成严重的损伤.由此可见,不同硬度的磨料对基体表面质量产生显著影响.

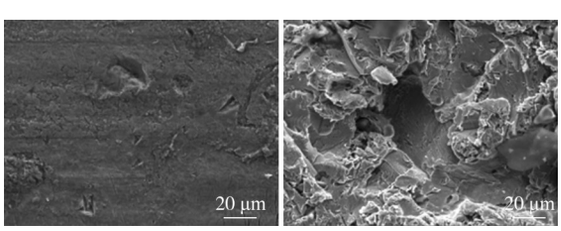


(a)核桃壳清洗　　(b)石榴石清洗

图 6　清洗后样品交界处宏观形貌

Fig.6　Macro morphology of the specimen junction after cleaning

使用 MIRA3 扫描电子显微镜分别对石榴石作为磨料和核桃壳作为磨料清洗样品后的表面进行观察,放大 2 000 倍,结果如图 7 所示.由图 7 可以明显观察到,以石榴石为磨料清洗后的基体表面凹凸不平,表面粗糙度较大,有明显磨削的坑蚀、裂痕、划痕等,破损严重;以核桃壳为磨料清洗后的基体表面平整度高,与石榴石清洗后的基体表面相比,基本无损伤.



(a)核桃壳清洗　　(b)石榴石清洗

图 7　清洗后样品表面的微观形貌

Fig.7　Micro morphology of the specimen surface after cleaning

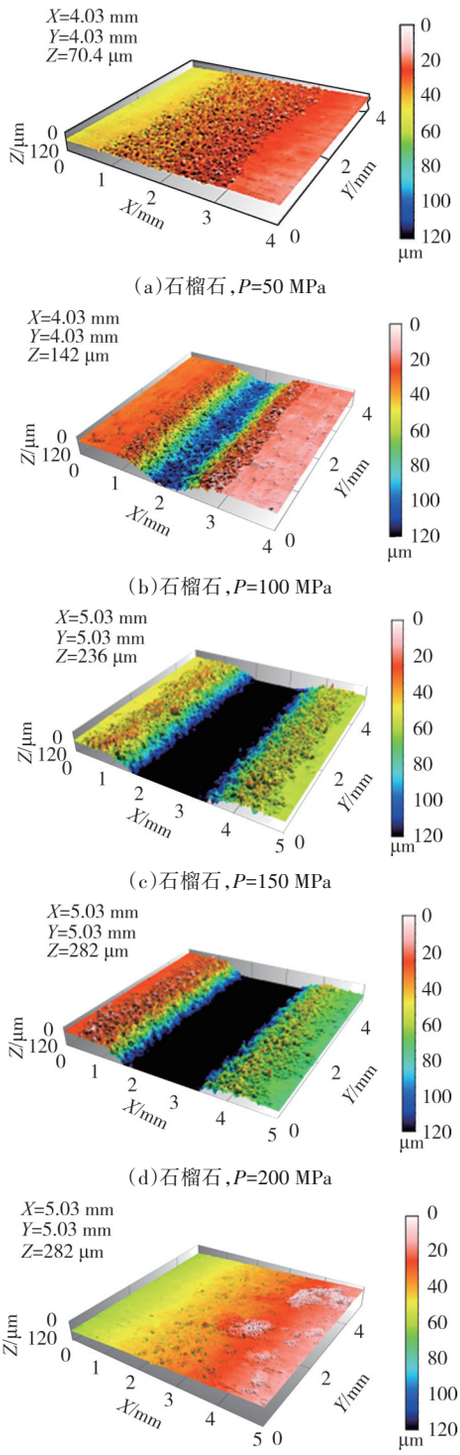
4.2 清洗后的基体表面3D形貌

使用3D激光扫描轮廓仪测量清洗后基体局部表面,得到去除氟碳漆的样品表面的精确三维结构和表面粗糙度,为了方便比较损伤效果,将标尺统一设置为120 μm.由于使用核桃壳作为磨料清洗后的样品表面基本无损伤,故每组工艺参数下,只选择损伤最严重的一组与石榴石磨料进行比较.

图8为不同压力下清洗后基体表面3D形貌,可以看出,在其余工艺参数不变的情况下,随着压力的增大,石榴石磨料对零部件基体的损伤越严重,磨削深度从15 μm加深到218 μm,沟槽宽度也不断增大到2 cm.当压力为50 MPa时,未出现明显沟槽,但可以观察到表面坑蚀严重,此时表面粗糙度为4.30 μm.而采用核桃壳为磨料,压力为200 MPa时进行清洗,对基体损伤最严重,如图8(e)所示,表面出现少量较浅坑蚀,最深为15 μm,表面粗糙度仅为1.367 μm,两项指标均远小于石榴石磨料.

在不同靶距下清洗后的样品表面3D形貌有所不同.不同靶距下清洗后基体表面3D形貌如图9所示,由图9(a)~(d)可知,在其余工艺参数不变的情况下,靶距为20 mm时,水射流能量最集中,对样品表面造成了很深的沟槽,达120 μm.随着靶距增大,水射流对表面冲蚀能量降低,但作用面积变大,因石榴石的硬度较高,对样品表面造成损伤的严重性较大,此时表面粗糙度为6.18 μm.相比之下,在采用核桃壳为磨料,靶距为10 mm时进行清洗,对基体损伤最严重.如图9(e)所示,在靶距为10 mm时,样品表面仅出现了连续的较浅的坑蚀,最大坑深仅10 μm,在此靶距下表面粗糙度较大,达到2.53 μm.随着靶距的增大,核桃壳磨料作用在样品表面的能量逐渐降低,无法对表面产生损伤,表面粗糙度随之下降.因此,当靶距较小时,尽管核桃壳硬度不高,仍能对样品表面造成一定的损伤,但较之石榴石磨料,损伤可忽略不计.

不同磨料质量分数下清洗后的样品表面3D形貌也有所不同.在石榴石为磨料的试验中,可以观察到在其余工艺参数不变的情况下,只要加入了石榴石磨料,就会对表面造成显著损伤.图10为不同磨料质量分数下清洗后基体表面3D形貌.由图10(a)~



(a)石榴石,P=50 MPa

(b)石榴石,P=100 MPa

(c)石榴石,P=150 MPa

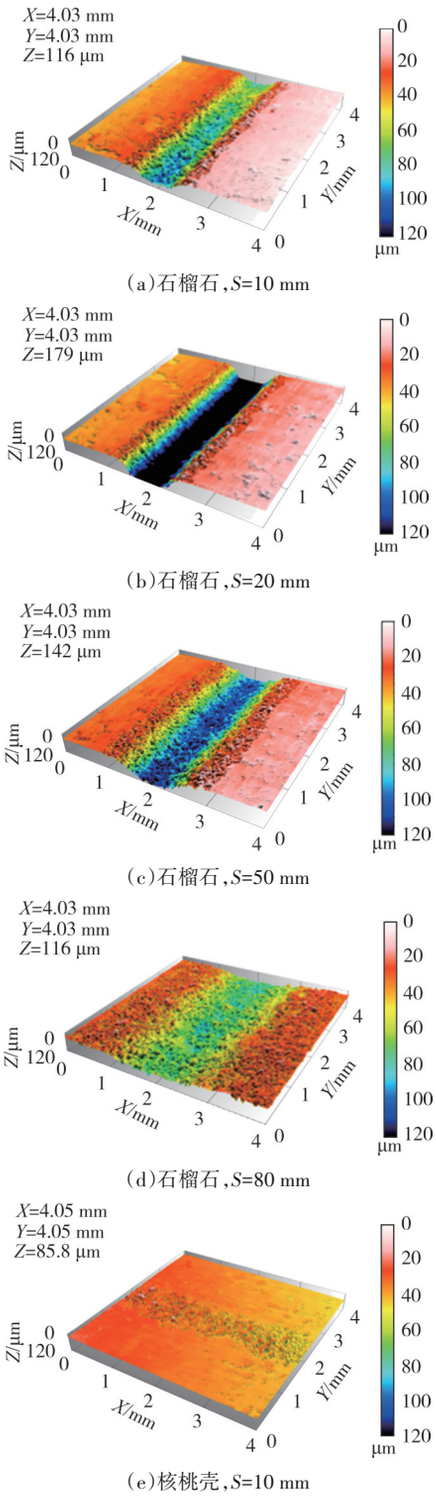
(d)石榴石,P=200 MPa

(e)核桃壳,P=200 MPa

图8 不同压力下清洗后基体表面3D形貌

Fig.8 3D morphology of substrate surface after cleaning under different pressures

(d)可知,水射流作用的区域,表面粗糙度明显增大,凹凸不平,此时样品表面粗糙度均在5 μm左右.相比之下,以核桃壳为磨料时,对基体造成的损伤几乎无法看出,表面粗糙度较小,平均为0.7 μm.在不同



(a)石榴石,S=10 mm

(b)石榴石,S=20 mm

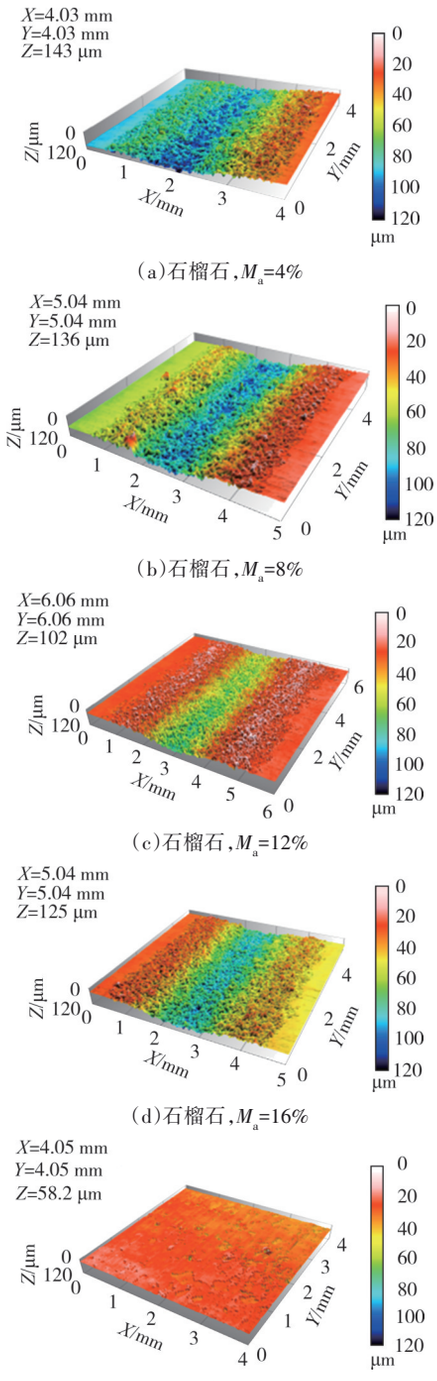
(c)石榴石,S=50 mm

(d)石榴石,S=80 mm

(e)核桃壳,S=10 mm

图 9　不同靶距下清洗后基体表面 3D 形貌

Fig.9　3D morphology of substrate surface after cleaning under different target distances



(a)石榴石,M_a=4%

(b)石榴石,M_a=8%

(c)石榴石,M_a=12%

(d)石榴石,M_a=16%

(e)核桃壳,M_a=12%

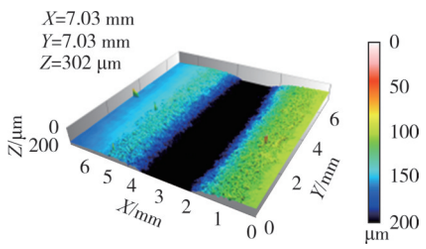
图 10　不同磨料质量分数下清洗后基体表面 3D 形貌

Fig.10　3D morphology of substrate surface after cleaning under different mass fraction

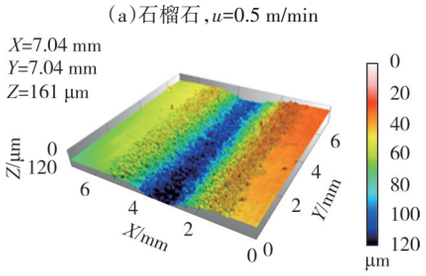
磨料质量分数下,核桃壳磨料清洗后的表面与未受到作用的区域一致,如图 10(e)所示.

不同进给速度下清洗后基体表面 3D 形貌如图 11 所示.由图 11(a)~(d)可知,在其余工艺参数不变的情况下,当进给速度为 0.5 m/min 时,样品最大沟槽深度为 146 μm,表面粗糙度为 4.1 μm,这是因为射流对样品的冲击作用时间相对较长,样品受到总的冲蚀能量大,此时样品表面沟槽很深;随着进给速度的增大,对表面冲蚀能量降低,沟槽变窄变浅,但石榴石的硬度使得表面粗糙度增大至 6.14 μm.而采用核桃壳为磨

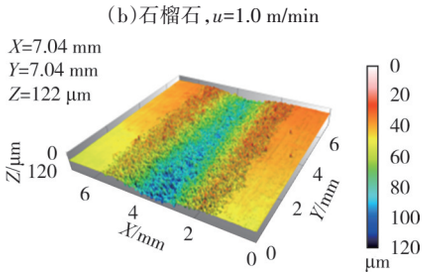
料清洗时,同样在进给速度为0.5 m/min时,对基体损伤最严重,如图11(e)所示,此时表面仅出现连续的较浅坑蚀,最深为11 μm,表面粗糙度有所增加,达到1.78 μm;当进给速度持续增大时,水射流对样品的平均作用时间变短,冲蚀能量减少,无法对表面产生损伤,最大坑深和表面粗糙度均降低至正常水平.



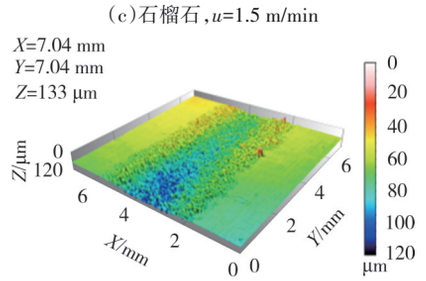
(a)石榴石,u=0.5 m/min



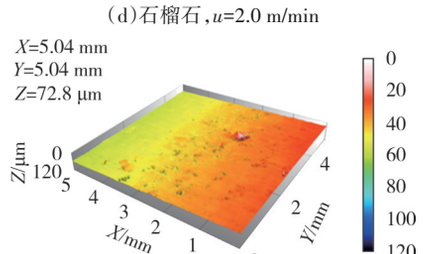
(b)石榴石,u=1.0 m/min



(c)石榴石,u=1.5 m/min



(d)石榴石,u=2.0 m/min



(e)核桃壳,u=0.5 m/min

图11 不同进给速度下清洗后基体表面3D形貌

Fig.11 3D morphology of substrate surface after cleaning under different feed rates

5 结 论

1)采用石榴石磨料清洗样品时,除了能清洗掉污物,还会造成基体的损伤,增大表面粗糙度;相比之下,核桃壳软磨料具有较低的硬度,能够有效去除表面污垢和杂质,降低比能耗、提高清洗速率,同时又不会对基体表面产生严重的损伤.因此,在再制造清洗或对表面粗糙度要求高的场合下,使用核桃壳磨料清洗是一种较为理想的选择.

2)在本文试验条件下,清洗速率的排序为:石榴石>核桃壳>纯水,核桃壳的清洗速率均居于石榴石磨料和纯水之间,石榴石磨料的清洗速率比核桃壳高出2倍,但核桃壳磨料的清洗速率比纯水高出5倍.因此,加入这2种软、硬磨料均能有效改善清洗速率.

3)清洗比能耗大小的排序为:纯水>核桃壳>石榴石,纯水清洗的比能耗在各条件下大致为核桃壳磨料的3~4倍,核桃壳磨料与石榴石磨料比能耗均较低,差别较小.

4)在本文试验条件下,基体的损伤情况如下,表面粗糙度大小的排序为:石榴石>核桃壳>纯水,纯水清洗和核桃壳磨料均保持极低的表面粗糙度,两者差别较小.石榴石磨料清洗后表面粗糙度较之增大5~6倍;表面最大坑深的排序为:石榴石>核桃壳>纯水,纯水清洗和核桃壳磨料均未出现明显沟槽或冲蚀坑.

参考文献

[1] 林琳, 何周伟, 胡涛, 等. 磨料水射流抛光技术进展综述[J]. 液压与气动, 2022, 46(1): 74-91.
LIN L, HE Z W, HU T, et al. Review on technology of abrasive water jet polishing[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2022, 46(1): 74-91.(in Chinese)

[2] MATSUMOTO M, YANG S S, MARTINSEN K, et al. Trends and research challenges in remanufacturing[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2016, 3(1): 129-142.

[3] 谭清泽. 基于高压磨料水射流的钢轨修复工艺研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
TAN Q Z. Research on rail repair technology based on high-pressure abrasive water jet[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.(in Chinese)

[4] 韩杰, 杨士敏, 蔡顶春. 工程机械零部件再制造清洗技术研

究[J]. 机械工程与自动化, 2013(2): 222-224.
HAN J, YANG S M, CAI D C. Part cleaning technologies in engineering machinery remanufacturing [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2013(2): 222-224.(in Chinese)

[5] 刘立秋. 高压水射流清洗技术在柴油机清洗的应用前景[J]. 铁道机车与动车, 2017(3): 36-37.
LIU L Q. Application prospect of high pressure water jet cleaning technology in diesel engine cleaning[J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2017(3): 36-37.(in Chinese)

[6] 夏金霖, 胡志威, 况群意. 高压水射流清洗技术在脱脂处理线中的应用[J]. 轧钢,2017,34(2):38-40.
XIA J L, HU Z W, KUANG Q Y. Application of high pressure water jet cleaning technology in strip degreasing line[J]. Steel Rolling,2017,34(2):38-40.(in Chinese)

[7] 宋加会, 刘昌林, 许胜涛, 等. 高压水射流清洗技术及其在管道除垢中的应用[J]. 化工设备与管道,2014,51(5):79-82.
SONG J H, LIU C L, XU S T, et al. Cleaning technique with high pressure water jet and its application in removing scale in piping[J]. Process Equipment & Piping, 2014, 51(5): 79-82.(in Chinese)

[8] 徐洋. 高压水射流清除道路标线的仿真分析与试验研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2021.
XU Y. Simulation analysis and experimental study on high-pressure water jet clearing road markings[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2021.(in Chinese)

[9] 管金发, 肖栋, 瞿德刚, 等. 去除管道3PE防腐层的轴向扇形喷嘴数值模拟[J]. 表面技术, 2021, 50(6): 306-316.
GUAN J F,XIAO D,QU D G,et al. Numerical simulation of axial fan nozzle removing 3PE anti-corrosive coating of pipeline[J]. Surface Technology,2021,50(6):306-316.(in Chinese)

[10] PENG W Q, LI S Y, GUAN C L, et al. Improvement of magnetorheological finishing surface quality by nanoparticle jet polishing[J]. Optical Engineering,2013,52(4):043401.

[11] 万亮, 钱亦楠, 涂翊翔, 等. 磨料水射流单次铣削钛合金截面轮廓特征预测[J]. 机械工程学报, 2022, 58(23): 296-305.
WAN L, QIAN Y N, TU Y X, et al. Prediction of the profile features of titanium alloy milled by abrasive waterjet with a single pass[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(23): 296-305.(in Chinese)

[12] WIBOWO A. A note of hybrid GR-SVM for prediction of surface roughness in abrasive water jet machining[J]. Meccanica, 2017, 52(8): 1989-1991.

[13] LONG X P, RUAN X F, LIU Q, et al. Numerical investigation on the internal flow and the particle movement in the abrasive waterjet nozzle[J]. Powder Technology, 2017, 314: 635-640.

[14] 袁瑞甫,秦博,董卓,等.磨料水射流冲击角对砂岩切割性能影响的试验研究[J/OL]. 煤炭学报:1-12 (2023-05-16)[2023-10-22]. https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0301.
YUAN R F, QIN B, DONG Z, et al. Experimental study on the effect of abrasive water jet impact angle on the cutting performance of sandstone[J/OL]. Journal of China Coal Society: 1-12 (2023-05-16)[2023-10-22]. https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0301.(in Chinese)

[15] 邓乾发, 汪杨笑, 吕冰海, 等. 自激脉冲特性磨料水射流浸没式抛光数值分析与有效性实验验证[J]. 表面技术, 2022, 51(1): 161-173.
DENG Q F, WANG Y X, LÜ B H, et al. Numerical analysis and experimental verification on self-excited pulse characteristics abrasive water jet submersion polishing[J]. Surface Technology, 2022, 51(1): 161-173.(in Chinese)

[16] 王星. 纳米胶体空化射流抛光及其关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
WANG X. Study on the key technology of nanoparticle colloid hydrodynamic cavitation jet polishing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.(in Chinese)

[17] 郭鹏,赵韡,郝宇聪,等. 可溶性晶体性质对生物骨材料切削质量影响因素探究[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2023,43(2): 144-150.
GUO P, ZHAO W, HAO Y C, et al. Influence factors of soluble crystal properties on cutting quality of biological bone materials[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2023, 43(2): 144-150.(in Chinese)