文章编号:1674-2974(2024)04-0064-07 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024171

# 磨料水射流切削皮质骨断面形貌特征研究

杨焘[1,2],赵韡[1,2†],祝锡晶[1,2],陈俊伟[1,3],潘浩宇[1,2]
(1. 中北大学 机械工程学院,山西 太原 030051;
2. 山西省先进制造技术重点实验室,山西 太原 030051;
3. 山西航天清华装备有限责任公司,山西 长治 046000)

**摘 要**:为探索磨料水射流切削过程中对皮质骨材料的切削机理,提高切削断面质量,分别以石榴石、氯化钠为磨料对皮质骨进行切削,对比不同切削方向下断面粗糙度变化规律以及微观划痕特征.实验结果表明,断面粗糙度数值均呈现先减小后增大的特点,依据表面粗糙度数值将断面分为初始区、光滑区、粗糙区3部分.当使用磨料为氯化钠,切削方向垂直于骨单元时,断面粗糙度平均值分别是切削方向平行和横向于骨单元时断面粗糙度平均值的1.74倍和1.70倍.当使用磨料为石榴石,切削方向垂直于骨单元时,断面粗糙度平均值分别是切削方向平行和横向于骨单元时断面粗糙度平均值的1.41倍和1.55倍.切削过程中断面形成大量微米级划痕,对比氯化钠、石榴石2种磨料对断面划痕特征的影响,与石榴石相比,当使用磨料为氯化钠时,皮质骨切削断面划痕尺寸偏大,长度、宽度值跨度相近,划痕深度值跨度较大.

**关键词**:水射流;磨料;皮质骨;表面粗糙度;微观形貌
**中图分类号**:TG664;R318.08 **文献标志码**:A

# Study on Surface Morphology of Cortical Bone Cut Section by Abrasive Water Jet

YANG Tao[1,2],ZHAO Wei[1,2†],ZHU Xijing[1,2],CHEN Junwei[1,3],PAN Haoyu[1,2]
(1. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Shanxi Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Taiyuan 030051, China;
3. Shanxi Aerospace Qinghua Equipment Co., Ltd, Changzhi 046000, China)

**Abstract**: To explore the cutting mechanism of cortical bone material during abrasive water jet cutting and improve the quality of cutting surfaces in the abrasive jet cutting process, sodium chloride and garnet were used as abrasives to cut cortical bone. The changes in surface roughness under different cutting directions and the microscopic scratch characteristics were compared. The experimental findings demonstrate a characteristic pattern in which the roughness values of the cutting section initially decrease and then increase. Based on these roughness values, the section can be divided into three distinct regions: initial region, smooth region, and rough region. When using sodium chloride as the abrasive, the average roughness values of the cutting surface in the direction perpendicular to

* **收稿日期**:2023-10-19
**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(51905499),National Natural Science Foundation of China(51905499);中国博士后科学基金资助项目(2019M661067), China Postdoctoral Science Foundation(2019M661067);中北大学第十八届研究生科技项目(20221810), 18th Graduate Science and Technology Project of North University of China (20221810)
**作者简介**:杨焘(1998—),男,山西古交人,中北大学博士研究生
† 通信联系人,E-mail: weizhao1987@nuc.edu.cn

the bone unit are 1.74 times and 1.70 times those in the directions parallel and traverse to the bone unit, respectively. When using garnet as the abrasive, the average roughness values of the cutting surface in the direction perpendicular to the bone unit are 1.41 times and 1.55 times those in the directions parallel and traverse to the bone unit, respectively. Numerous micrometer-scale scratches are formed on the cutting surface during the cutting process. The impact of sodium chloride and garnet abrasives on the scratch characteristics of the cutting surface was compared. Compared with garnet, when using sodium chloride as the abrasive, the dimensions of the cortical bone cutting surface scratches are too large, with similar length and width values; the range of scratch depth values is greater.

**Key words**: water jet; abrasives; cortical bone; surface roughness; micromorphology

骨骼具有支撑、保护、运动等基本功能,承担着日常活动中的主要载荷,是人体的重要组成部分[1].骨材料是一种生物复合材料,具有密度大、结构致密等特点,皮质骨由于自身的硬脆特性,在剧烈运动中容易受到损伤,随着人口老龄化逐步加剧,各类骨科疾病患者不断增加.皮质骨切削作为临床中常见的辅助治疗手段,广泛应用于骨外科、口腔科、神经外科等手术中[2-3].目前手术中常规的切削方式有钻、锯、铣等,切削过程中伴随着大量热量产生,容易造成皮质骨热损伤以及目标切削区域周围生物学环境不可逆的破坏,直接影响手术质量以及患者术后恢复[4-5].

磨料水射流技术具有污染小、无热损伤等独特优势,已逐步发展到生物医疗、精密加工等领域.Papachristou等[6]首次通过生理盐水射流对肝脏进行选择切除,切削区域内毛细血管被破坏,其余组织均保存完好.Bach等[7]使用磨料水射流技术对皮质骨进行钻孔,研究发现骨材料在切削过程中产生损伤较小.Honl等[8]总结了磨料水射流技术在骨科假体修复手术中的应用效果,验证了射流切削过程中的选择性,在达到预期切削效果的同时,可以最大化减小目标区域在切削过程中所受的损伤.Den等[9]使用磨料水射流技术对股骨进行钻孔,通过调整工艺参数得出了钻孔深度的预测方程,证明射流技术可用于外科手术中深度可控的钻孔.

磨料水射流技术中常用磨料有石榴石、白刚玉等,具有硬度高、强度大等特点.切削过程中磨粒容易嵌入目标组织内,去除难度大,降低了切削断面质量,且残留颗粒对生物组织有毒害作用,不利于术后愈合.Wang等[10]以食盐颗粒为磨料通过水射流技术对牛骨进行切削,相比于纯水射流切削,此时切削深度明显增加,证明了氯化钠颗粒作为磨料结合水射流技术进行皮质骨切削的可能性.同时,氯化钠射流成分与人体生物学环境相近,切削过程中不会对切削区域内神经、血管等其他组织造成额外损伤,同时对切口具有清洁作用,有利于提高手术质量[11].皮质骨切削断面质量、生物组织损伤程度是评价手术质量的重要指标,且与术后组织愈合、人工假体与骨组织的配合精度等密切相关.此外,不同类型的手术对于皮质骨切削断面质量的要求不同,一定的切削断面粗糙度有助于提升假体放置的稳定性.因此,分析氯化钠晶粒射流切削皮质骨的断面质量对于磨料水射流技术逐渐应用于生物医疗领域、提高相关外科手术质量具有重要意义.

本文通过切削断面形貌特征对切削过程中磨料水射流对皮质骨的切削机制进行分析,探究切削断面形貌特征的形成原因以及分布规律,为提高磨料水射流切削皮质骨断面质量提供理论基础.

## 1　实验方案

### 1.1　实验材料

目前生物力学领域中对于皮质骨的实验研究常采用牛股骨皮质骨,牛骨与人骨生物力学特性极为相似,且容易获得、便于实验研究,选取新鲜牛股骨皮质骨作为实验材料.人皮质骨与牛皮质骨性能对比如表1所示,其中$\mu$为泊松比[12-14].

实验中通过磨料水射流在牛股骨上取样,然后对皮质骨进行抛光处理,得到实验所用皮质骨样品,

**表1　人皮质骨与牛皮质骨性能对比**

**Tab.1　Comparison of performance between human cortical bone and bovine cortical bone**

| 材料名称 | 拉伸强度/MPa | 压缩强度/MPa | $\mu$ | 剪切模量/MPa | 密度/($kg\cdot m^{-3}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| 人皮质骨 | 130~200 | 40~145 | 0.40 | 3 | 1 800~2 000 |
| 牛皮质骨 | 140~250 | 45~150 | 0.33 | 3 | 1 950~2 100 |

抛光参数如表2所示.样品尺寸为20 mm×8 mm×4 mm,将样品进行低温冷冻保存,皮质骨取样过程示意图如图1所示.

**表2 抛光参数**

**Tab.2 Polishing parameters**

| 转速/(r·min$^{-1}$) | 砂纸粒度/μm | 抛光盘直径/mm |
|---|---|---|
| 1 400 | 62.5 | 203 |

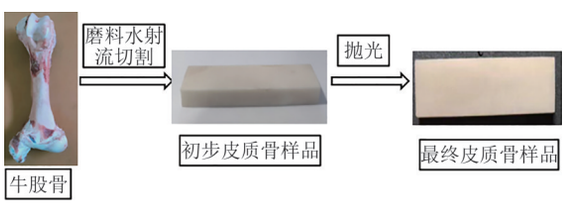
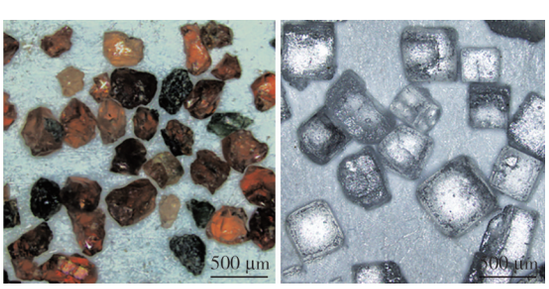



图1 皮质骨取样过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of cortical bone sampling procedure

为了分析磨料类型对水射流切削皮质骨切削断面形貌特征的影响,实验中选取一种常见的矿物磨料和一种可溶性磨料,分别为石榴石和氯化钠[15].石榴石和氯化钠微观形貌示意图如图2所示.石榴石颗粒形态各异,氯化钠晶粒形状较为规则.2种磨料均便于获取,利于开展实验.




(a)石榴石 (b)氯化钠

图2 石榴石和氯化钠微观形貌示意图

Fig.2 Schematic diagram of microscopic morphology of sodium chloride and garnet

### 1.2 实验设备

本次切削实验采用高压水射流实验系统,主要由超高压增压器、冷却泵、三坐标切割平台、磨料供料系统等组成.该系统最大水压为380 MPa,采用后混合磨料混合方式.对皮质骨切削断面微观形貌特征的观测通过LEXTOLS5000三维测量激光显微镜以及扫描电子显微镜完成.实验过程示意图如图3所示,磨料水射流切削参数如表3所示.

### 1.3 切削方向

皮质骨结构复杂,具有生物活性且各向异性,用于断面形貌特征分析的切削实验样本分别从3个特征切削方向获取,分别是:垂直于骨单元方向(磨料水射流切削方向与骨单元轴向方向垂直)、平行于骨单元方向(磨料水射流切削方向与骨单元轴向方向平行)、横向于骨单元方向(磨料水射流切削方向与骨单元径向方向垂直)3个方向.磨料水射流切削方向示意图如图4所示.在相同工艺参数下分别沿3个方向对皮质骨样品进行切削,然后对不同切削断面微观形貌特征进行观测分析.

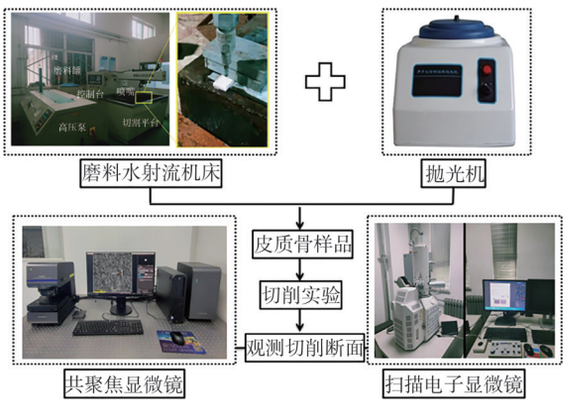



图3 实验过程示意图

Fig.3 Schematic diagram of experimental procedure

**表3 磨料水射流切削参数**

**Tab.3 Abrasive water jet cutting parameters**

| 压力/MPa | 喷头移速/(mm·min$^{-1}$) | 靶距/mm |
|---|---|---|
| 280 | 50 | 2 |

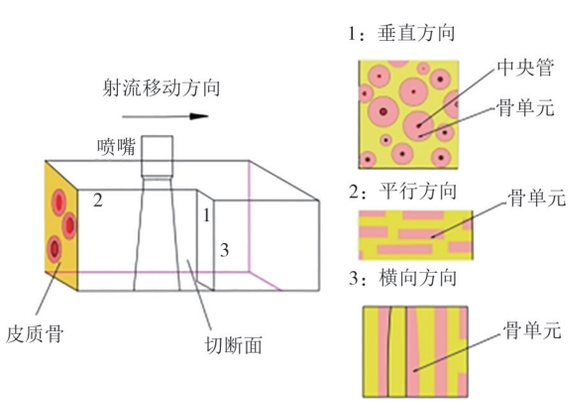



图4 磨料水射流切削方向示意图

Fig.4 Schematic diagram of abrasive water jet cutting direction

## 2 实验结果

### 2.1 切削方向对表面粗糙度的影响

表面粗糙度是衡量表面质量的重要标准之一,沿皮质骨断面切削深度方向选取等间距的11个位置,利用激光共聚焦显微镜对不同位置粗糙度进行测量.粗糙度测量位置示意图如图5所示,不同切削方向下断面粗糙度随切削深度变化规律如图6所示.

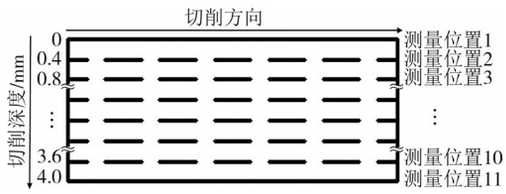
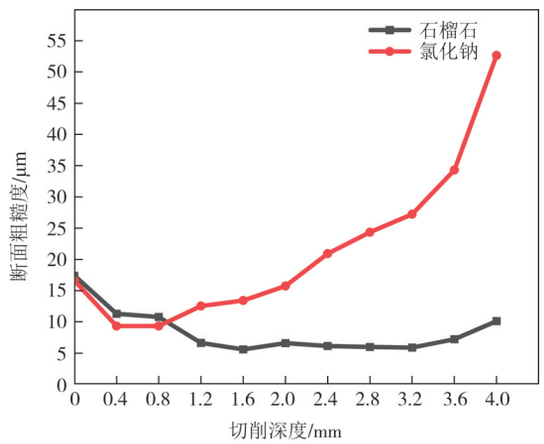
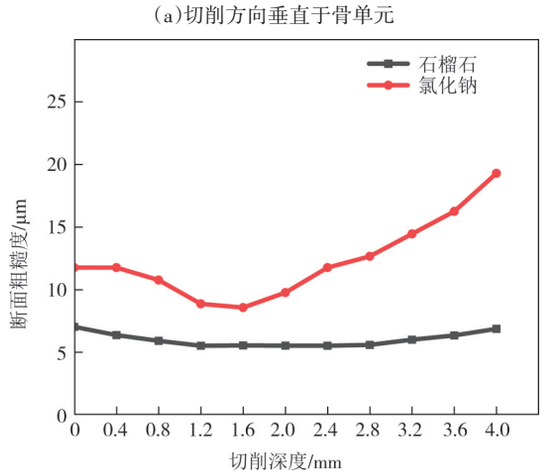



图 5　粗糙度测量位置示意图

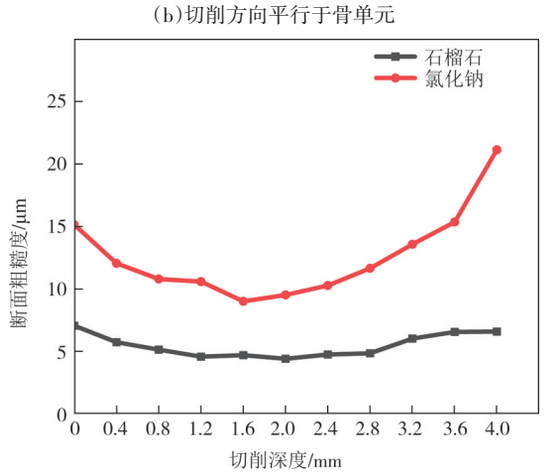
Fig.5　Schematic diagram of roughness measurement positions




(a)切削方向垂直于骨单元




(b)切削方向平行于骨单元

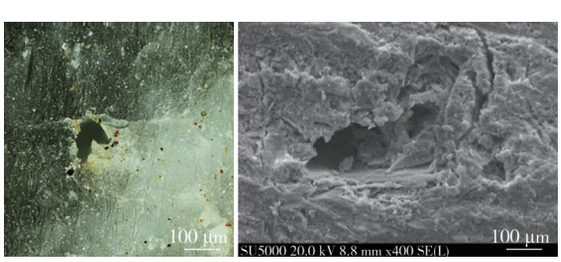



(c)切削方向横向于骨单元

图 6　不同切削方向断面粗糙度数值变化规律

Fig.6　Variation law of surface roughness values in different cutting directions

由图 6 可知,当切削方向垂直于骨单元时,切削断面粗糙度数值最大.当使用磨料为氯化钠,切削方向垂直于骨单元时,断面粗糙度平均值分别是切削方向平行和横向于骨单元时断面粗糙度平均值的 1.74 倍和 1.70 倍.当使用磨料为石榴石,切削方向垂直于骨单元时,断面粗糙度平均值分别是切削方向平行和横向于骨单元时断面粗糙度平均值的 1.41 倍和 1.55 倍.由于皮质骨结构特殊,当切削方向垂直于骨单元时,切削断面存在许多空腔结构,磨料对骨单元产生周向冲击,共聚焦显微镜和扫描电镜下观察切削断面,得到切削断面空腔结构示意图如图 7 所示.受到空腔结构影响,切削方向垂直于骨单元时断面粗糙度数值整体大于切削方向平行和横向于骨单元时的断面粗糙度数值.此外,当切削方向平行和横向于骨单元时,切削断面粗糙度数值大小以及变化规律相似.因此,分析切削方向对于磨料水射流切削骨材料断面微观形貌特征的影响时,研究垂直于骨单元与平行于骨单元两个方向即可.




(a)共聚焦显微镜观察结果　　(b)扫描电镜观察结果

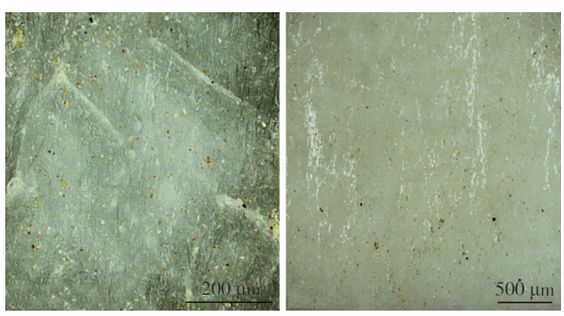
图 7　切削断面空腔结构示意图

Fig.7　Schematic diagram of cutting section cavity structure

## 2.2　磨料种类对表面粗糙度的影响

根据图 6 中切削断面粗糙度数值随切削深度的变化情况,按照断面粗糙度数值相对大小将切削断面大致分为 3 个区域:初始区、光滑区、粗糙区.当所用磨料为石榴石,切削深度为 0~1.2 mm 时为初始区,磨料水射流刚从喷嘴喷出时,携带能量最大,远大于破坏样品材料所需临界能量.图 8 为皮质骨切削断面微观形貌特征(石榴石).由图 8(a)可知,磨料水射流接触到骨样后,少部分磨料沿骨样做切向运动,在断面上造成许多微小划痕;同时喷嘴处射流稳定程度较差,因此该区域断面粗糙度数值较大.切削深度在 1.2~3.2 mm 时为光滑区,随着切削深度的增加,射流所携带能量逐渐减弱,磨粒切削作用随之减弱.由于此时射流携带能量仍然大于骨样破坏所需临界能量,射流正常去除材料.此外,该区域内射流较为稳定,因此形成一段表面相对光滑的区域,断面

粗糙度数值大小较为稳定,波动较小.切削深度在3.2~4.0 mm时为粗糙区,随着切削深度进一步增加,射流所携带能量小于工件材料被破坏所需临界能量,切削作用减弱,材料去除过程不均匀.由图8(b)可知,磨粒动能较小后在此区域内存在堆积情况,使得该区域表面较为粗糙.切削断面各区域内均有部分磨粒嵌入,残留的磨粒较难去除且无法分解,影响后续与假体等植入物配合的稳定性,不适合应用于临床中进行皮质骨切削.




(a)初始区 (b)粗糙区

图8 皮质骨切削断面微观形貌特征(石榴石)

Fig.8 Microscopic morphological characteristics of cortical bone cutting section (garnet)

使用磨料为氯化钠时,皮质骨切削断面粗糙度变化规律大致相同.切削深度在0~1.2 mm时为初始区,由于氯化钠具有溶解性,随着切削深度增加,氯化钠小幅溶解,磨料切削能力有所下降.因此,与石榴石相比,此时切削断面光滑区长度有所下降,大致为1.2~2.4 mm;粗糙区长度相应增大,大致为2.4~4.0 mm.粗糙区内氯化钠颗粒溶解程度增大,磨料与水共同完成对材料的切削,增大了材料去除过程中的不均匀性,导致此区域断面粗糙度数值急剧增大.

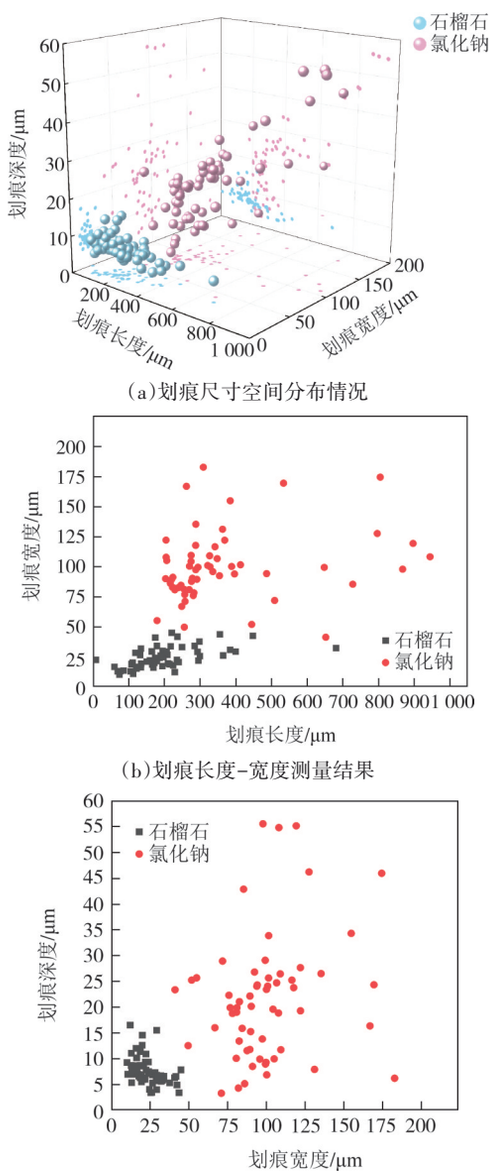
氯化钠作为磨料时,切削断面内无磨料残留,且溶解的磨料成分与人体生物学环境相近,对人体无任何副作用,不影响后续治疗.此时切削断面内初始区、光滑区断面粗糙度数值相对较小,可以通过调整射流工艺参数进一步降低切削断面粗糙度数值,达到更高的表面质量.

综上所述,使用磨料为石榴石时,切削断面粗糙度数数值分布规律为:初始区>粗糙区>光滑区.使用磨料为氯化钠时,切削断面粗糙度数值分布规律为:粗糙区>初始区>光滑区.

### 2.3 不同切削断面划痕特征分析

表面粗糙度数值并不能全面反映切削断面的微观形貌特征,磨料水射流对骨样进行切削时,磨料和水不断划擦材料表面,在去除材料的同时使切削断面形成划痕.划痕的尺寸可以客观反映出磨料水射流切削时去除材料的过程,其分布规律也是评价切削断面微观形貌特征的重要依据.本文通过激光显微镜观察不同切削方向下的断面划痕分布特征,分别对切削方向垂直和平行于骨单元时切削断面划痕特征进行观察,观察时调节显微镜放大倍数为10倍,单次扫描截面尺寸为1 280 μm×1 280 μm,依次沿射流切削方向扫描,每个切削断面分别测量60条划痕的长度、宽度以及深度.

切削方向垂直于骨单元时切削断面划痕测量结果如图9所示.使用磨料为石榴石时,皮质骨切削断




(a)划痕尺寸空间分布情况

(b)划痕长度-宽度测量结果

(c)划痕宽度-深度测量结果

图9 切削方向垂直于骨单元时切削断面划痕测量结果

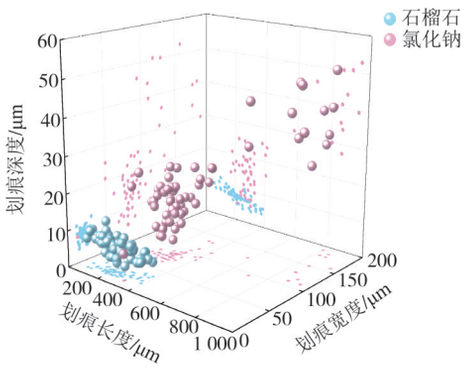
Fig.9 Results of section scratch measurement when the cutting direction is perpendicular to the bone unit

面内划痕长度主要分布在 50~250 μm,少量分布在 250~700 μm;划痕宽度分布在 10~50 μm;划痕深度分布在 2~15 μm.使用磨料为氯化钠时,皮质骨切削断面内划痕长度主要分布在 200~400 μm,少量分布在 400~1 000 μm;划痕宽度主要分布在 75~125 μm,少量分布在 125~175 μm;划痕深度主要分布在 2~30 μm,少量分布在 30~60 μm.

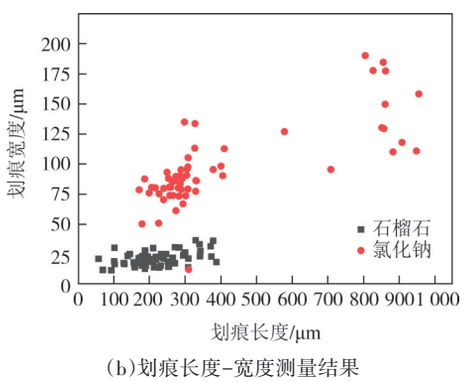
由图 9 可知,与石榴石相比,当使用磨料为氯化钠时,切削断面划痕长度值偏大,但长度跨度相近;划痕宽度值偏大、跨度相近;划痕深度值偏大,且跨度较大.石榴石形状不规则,与高速射流混合后,通过锋利棱角不断冲击划擦材料表面完成切削;氯化钠颗粒形状规则,近似于长方体结构,切削时磨粒与材料表面撞击区域更大,因此皮质骨切削断面上划痕尺寸较大.切削过程中初始区内磨粒与材料接触角度较大,光滑区和粗糙区磨粒与材料接触角度较小,因此切削断面划痕深度随着切削深度的增加逐渐减小.氯化钠在水中具有溶解性,虽然射流经过高压加速后与磨料混合完成材料切削过程耗时很短,但是随着切削深度的增加,氯化钠颗粒仍存在一定程度的溶解.此时射流切削能力进一步下降,导致划痕深度值降低程度增大、跨度变大.

切削方向平行于骨单元时切削断面划痕测量结果如图 10 所示.使用磨料为石榴石时,切削断面内划痕长度主要分布在 100~400 μm,划痕宽度分布在 10~40 μm,划痕深度分布在 3~10 μm.使用磨料为氯化钠时,皮质骨切削断面内划痕长度主要分布在 200~400 μm,少量分布在 400~900 μm;划痕宽度主要分布在 50~125 μm,少量分布在 125~200 μm;划痕深度主要在分布在 5~25 μm,少量分布在 25~55 μm.由图 9 和图 10 可知,切削方向垂直和平行于骨单元时,切削断面划痕尺寸以及分布特征整体相近.

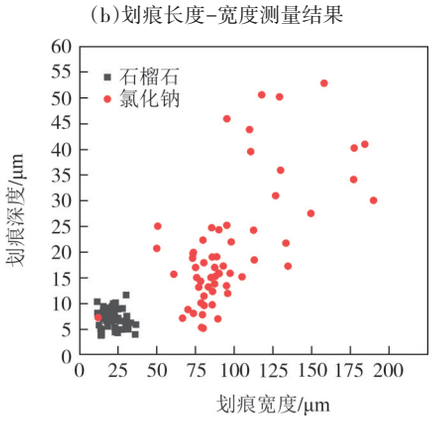
综上所述,当外科手术以切削断面粗糙度数值为主要质量指标时,应选择石榴石作为磨料.此时切削断面内有磨料颗粒残留,生物组织损伤程度较大.当外科手术以切削断面生物组织损伤程度为主要质量指标时,应选择氯化钠作为磨料.此时切削断面内粗糙度数值较大,但无磨料残留,生物组织损伤程度较小.此外,当外科手术质量需要兼顾切削断面粗糙度数值与生物组织损伤程度时,通过调整射流压力等工艺参数可以有效降低皮质骨切削断面粗糙度.随着压力增加,射流动能随之增大,切削能力增强,切削断面质量有所提高.但是,射流压力提升导致手术过程中切削应力增大,更容易产生骨裂纹,且对医疗设备的性能提出了更高的要求.因此,外科手术中应该根据预期质量指标灵活选择磨料类型.



(a)划痕尺寸空间分布情况



(b)划痕长度-宽度测量结果



(c)划痕宽度-深度测量结果

图 10　切削方向平行于骨单元时切削断面划痕测量结果

Fig.10　Results of section scratch measurement when the cutting direction is parallel to the bone unit

## 3　结 论

1)皮质骨切削断面按照断面粗糙度数值相对大小可分为初始区、光滑区、粗糙区.磨料为石榴石时,切削断面粗糙度数值初始区>粗糙区>光滑区;磨料为氯化钠时,切削断面粗糙度数值粗糙区>初始区>光滑区.

2)3种切削方向下,皮质骨切削断面粗糙度变化规律相似,且切削方向垂直于骨单元时切削断面粗糙度数值最大.切削方向平行和横向于骨单元时,皮质骨切削断面粗糙度变化规律相似.

3)与石榴石相比,当使用磨料为氯化钠时,皮质骨切削断面划痕尺寸偏大,长度、宽度值跨度相近,划痕深度值跨度较大.

## 参考文献


[1] 柏伟,潘鹏飞,舒利明,等. 骨组织超声辅助切削切屑形成与裂纹扩展机理[J]. 机械工程学报,2021,57(11):69-77.
BAI W,PAN P F,SHU L M,et al. Mechanism of chip formation and crack propagation in ultrasonically assisted cutting of bone tissue[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(11): 69-77.(in Chinese)

[2] 王成勇,陈志桦,陈华伟,等. 生物骨材料切除理论研究综述[J]. 机械工程学报,2021,57(11):2-32.
WANG C Y,CHEN Z H,CHEN H W,et al. A review on cutting mechanism for bone material [J]. Journal of Mechanical Engineering,2021,57(11):2-32.(in Chinese)

[3] 万宏强,贾娟娟,李凡聪. 骨材料切削过程中切削力及切削温度分析[J]. 西安工业大学学报,2020,40(6):617-622.
WAN H Q,JIA J J,LI F C. Analysis of cutting force and cutting temperature in bone material cutting process[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2020, 40(6): 617-622.(in Chinese)

[4] 弓永军. 磨料水射流切割技术研究现状及其发展趋势[J]. 液压与气动,2016(10):1-5.
GONG Y J. Research status and development trend of abrasive water jet cutting technology [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics,2016(10):1-5.(in Chinese)

[5] 张李阳,王浩,刘小莹,等. 基于各向异性皮质骨模型的斜向骨钻削机理研究[J]. 工具技术,2021,55(9):74-80.
ZHANG L Y, WANG H,LIU X Y, et al. Study on oblique bone drilling mechanism based on anisotropic cortical bone model[J]. Tool Engineering, 2021, 55(9): 74-80.(in Chinese)

[6] PAPACHRISTOU D N, BARTERS R. Resection of the liver with a water jet[J]. British Journal of Surgery, 2005, 69(2): 93-94.

[7] BACH F W, BISKUP C, KREMER G, et al. Investigation of the AWIJ-drilling process in cortical bone [C]//Proceedings of the 2007 American WJTA Conference and Expo. Houston, United States: Water Jet Technology Association, 2007: 19-21.

[8] HONL M, RENTZSCH R, SCHWIEGER K, et al. The water jet as a new tool for endoprosthesis revision surgery: an in vitro study on human bone and bone cement[J]. Bio-Medical Materials and Engineering, 2003, 13(4): 317-325.

[9] DEN DUNNEN S, DANKELMAN J, KERKHOFFS G M M J, et al. How do jet time,pressure and bone volume fraction influence the drilling depth when waterjet drilling in porcine bone? [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2016, 62:495-503.

[10] WANG J, SHANMUGAM D K. Cutting meat with bone using an ultrahigh pressure abrasive waterjet[J]. Meat Science, 2009, 81(4): 671-677.

[11] 郝宇聪,赵韡,杨焘,等. 射流束切削时在边壁约束下的直径增大变形及加工表面质量研究[J]. 中国机械工程,2022,33(17):2029-2037.
HAO Y C,ZHAO W,YANG T,et al. Study on diameter increase deformations and machined surface quality under constraints of side wall during jet cutting[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(17): 2029-2037.(in Chinese)

[12] 林贻泽,郑清春,陈先念,等. 骨手术中皮质骨铣削力的有限元仿真研究[J]. 机床与液压,2021,49(20):141-144.
LIN Y Z, ZHENG Q C, CHEN X N, et al. Finite element simulation of cortical bone milling force in bone surgery [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49 (20) : 141-144.(in Chinese)

[13] ZHENG Q C, XIA L, ZHANG X, et al. Reduction thermal damage to cortical bone using ultrasonically-assisted drilling[J]. Technology and Health Care: Official Journal of the European Society for Engineering and Medicine,2018,26(5):843-856.

[14] 陈启森,刘宇,石秋香. 球头铣刀骨铣削力有限元建模与试验验证[J]. 工具技术,2020,54(5):12-17.
CHEN Q S, LIU Y, SHI Q X. Finite element modeling and experimental verification of bone milling force using spherical milling cutter[J]. Tool Engineering, 2020, 54(5): 12-17.(in Chinese)

[15] 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)