

磨料水射流冲击角对砂岩切割性能影响的试验研究

袁瑞甫^{1,2}, 秦博¹, 董卓¹, 程高宇¹, 李孟卓¹, 邓浩坤¹, 解帅帅³

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454003; 3. 河南理工大学 工商管理学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 磨料水射流是一种高效的切割技术, 通过砂岩切割试验对岩石类材料的最佳冲击角和倾斜切割机理等问题展开研究, 在对切缝内壁进行宏观和微观观测的基础上, 开展水晶玻璃切割试验, 探究不同冲击角下磨料水射流的切割运动过程, 揭示了不同切割压力及冲击角下的切缝深度、切缝内壁特征、磨料颗粒运动轨迹与晶体破坏类型等变化规律。试验结果表明: 平均切缝深度随切割压力的增加逐渐增大, 同时改变冲击角能明显改变射流的切割能力, 在75°冲击角获得的切割效果最佳; 随切缝深度增加在切缝内壁逐渐出现弯曲射流轨迹纹理, 且在其底部均形成典型的冲蚀坑与拖尾现象; 切缝内壁主要表现为穿晶断裂、沿晶断裂、切槽或凹坑、胶结物覆盖等4类破坏特征, 值得注意的是, 不同冲击角下4类破坏特征在切缝中出现的位置不同, 该种现象主要是因为射流的偏转情况、反射流的运动方向、冲击波和膨胀波的反射作用改变; 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, 但不同冲击角下的作用程度不同; 结合切缝表面观测和射流切割过程观察结果, 建立了磨料水射流切割过程的宏观模型。

关键词: 磨料水射流; 冲击角; 切割机理; 切缝深度; 晶体破坏

中图分类号: TD324 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)S1-0208-12

Experimental study on the effect of abrasive water jet impact angle on the cutting performance of sandstone

YUAN Ruifu^{1,2}, QIN Bo¹, DONG Zhuo¹, CHENG Gaoyu¹, LI Mengzhuo¹, DENG Haokun¹, XIE Shuaishuai³

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. State Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean-efficiency Utilization, Jiaozuo 454003, China; 3. School of Business Administration, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Abrasive water jet is a highly efficient cutting technology. Through some sandstone cutting tests, the research on the optimal impact angle and inclined cutting mechanism of rock-like materials is carried out. Based on the macroscopic and microscopic observation of the cut's inner wall, crystal glass cutting experiments are conducted to investigate the cutting motion process of abrasive water jet under different impact angles, revealing the variation laws of cutting depth, the characteristics of the cut's inner wall, the trajectory of abrasive particles and the type of crystal destruction under dif-

收稿日期: 2023-03-06 修回日期: 2023-04-16 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0301

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52174109); 河南省高校科技创新团队支持计划资助项目(22IRTSTHN005); 河南省高等学校重点科研资助项目(22A440010)

作者简介: 袁瑞甫(1977—), 男, 河北定州人, 博士, 教授。Tel: 0391-3987244, E-mail: yrf@hpu.edu.cn

通讯作者: 董卓(1988—), 男, 河南南阳人, 博士, 讲师。Tel: 0391-3987244, E-mail: dzlut@163.com

引用格式: 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]. 煤炭学报, 2024, 49(S1): 208-219.

YUAN Ruifu, QIN Bo, DONG Zhuo, et al. Experimental study on the effect of abrasive water jet impact angle on the cutting performance of sandstone[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(S1): 208-219.



移动阅读

ferent cutting pressures and impact angles. The test results show that the average cutting depth gradually increases with the increase of cutting pressure, while changing the impact angle can significantly change the jet's cutting ability, and the best cutting effect is obtained at an impact angle of 75° . With the increase of the cut depth, the curved jet trajectory texture gradually appears in the cut's inner wall, and in its bottom there are typical erosion pits and trailing phenomenon. The cut's inner wall is mainly characterized by four types of damage features such as fracture through the crystal, fracture along the crystal, cut grooves or pits, and cement coverage, etc. It is worth noting that the four types of damage features appear at different locations in the cut at different impact angles, and this phenomenon is mainly caused by the deflection of jet, the direction of reflected flow movement, and the change in the reflection of shock wave and expansion wave. The vertical and horizontal jet components (in the same direction as the direction of propulsion), which play a dominant role in the destruction of the target, and the horizontal jet component, which is opposite to the direction of propulsion, play a secondary role in the erosion and polishing of the formed cut, but the degree of action varies under different impact angles. The macroscopic model of the abrasive water jet cutting process is established by combining the trajectory texture of cut's inner wall and the observation results of the jet cutting process. The research results can provide a technical reference for further improving the efficiency of abrasive water jet cutting.

Key words: abrasive water jet; impact angle; cutting mechanism; depth of cut; crystal destruction

随着我国经济的高速发展,对煤炭资源的需求依旧保持快速增长的趋势;同时易于开采煤炭资源的逐渐枯竭,导致将面临更多复杂地质条件下的开采作业,冲击地压和矿井瓦斯是影响煤矿高效生产及矿井安全的 2 种重要灾害^[1]。目前已经通过各种不同的技术手段进行相应灾害的治理,并取得了较好的预防及治理效果^[2-4]。高压水射流作为一种典型的冷切割技术,非常适用于煤矿井下切割作业,成为防治冲击地压及瓦斯增透防突的重要研究方向^[5-7]。近年来,通过研究切割压力、靶距、速度、磨料类型及粒径等因素的影响,对磨料水射流的切割性能进行了一系列研究^[8-9]。但是还面临着磨料水射流倾斜切割最佳冲击角及破岩机理尚不清晰等问题,因此,针对上述问题展开研究对进一步认识磨料水射流切割技术的作用机理及获得更好的工程效果具有十分重要的意义。

研究表明磨料水射流切割过程一般可分为 3 个阶段^[10];其中在第 2 阶段中,随着切割深度的增加,磨料颗粒的运动轨迹产生变化,导致冲蚀动能逐渐减小^[11],靶件表面形态由较小和较大冲击角共同完成。需要指出的是,射流的偏转导致其冲蚀机理发生改变,如较小冲击角时射流主要起磨削作用,而较大冲击角时射流则主要起变形磨削作用。磨料射流对靶件表面的冲蚀作用主要受磨料射流垂直分量的影响^[12]。另外,叶启立等^[13]的研究表明切割过程中的反射磨料颗粒对靶件仍具有冲击能力而使切缝内壁产生变形(凹坑)。YUAN 等^[14]指出反射磨料颗粒可携带大量能量但对该能量的利用相对有限,而改变冲击角将对磨料颗粒的运动轨迹产生显著影响,从而有利于提高磨料射流能量的利用率。WANG 等^[15-16]通过对射流垂

直切割过程的研究表明,磨料水射流的冲蚀过程与冲击角之间有显著的依赖关系。因此,国内外研究者针对冲击角的影响进行了较多研究。HASHISH M 等^[17]通过有机玻璃及复合材料的冲蚀试验表明在 80° 冲击角时能够获得较好的切割深度。YUVARAJ 等^[18]通过铝合金材料倾斜切割试验表明,改变射流冲击方向可以减缓切割过程中的射流偏转而起到提高切割能力的作用,另外 70° 冲击角时它对铝合金材料的切割效果最佳。黄璐云等^[19]通过数值模拟方法研究了靶距及冲击角对超高压水射流动力学性能的影响,结果表明当靶距较小时,最佳冲击角会随靶距的变化而变化,基本呈减小的趋势;当靶距较大时,最佳冲击角则相对稳定。

另外,国内外研究者针对岩石类材料的磨料水射流切割机理同样进行了大量研究。聂百胜等^[20]进行了前混合磨料水射流切割岩石的实验及机理研究,结果表明磨料水射流切割岩石类脆性材料主要靠坚硬磨料的高速碰撞、冲蚀、磨削等作用导致它们在拉应力或应力波作用下发生脆性破坏。WANG 等^[21]通过建立磨料水射流冲击数学模型,得到了切割过程中岩石不同位置的应力分布及破坏类型,其结果为研究磨料水射流冲击作用下岩石的微观破坏机理提供了新思路。HUANG 等^[22]通过进行高压磨料水射流页岩破碎试验研究了射流与层理夹角对页岩破碎的影响,结果表明较大的夹角导致页岩中形成较深的射孔,而较小的夹角使页岩更加破碎;同时利用页岩试验的 SEM 图像进一步分析了磨料水射流的破岩机理。另外, MIRANDA 等^[23]进行了不同岩石类磨料水射流试验并从微观上研究了其晶体破坏类型,结果表明材料的

去除主要由穿晶裂纹扩展、晶粒分离和方解石的解离形成,而在石灰石中则主要表现为晶粒间开裂和材料沿着泥质基质及泥质基质和钙质颗粒间滑动造成破坏。HU 等^[24]指出页岩在磨料水射流作用下主要形成穿晶与沿晶断裂,同时由于页岩内含更多的脆性矿物,导致其破坏主要受磨料冲蚀和剥落基质的控制。

针对岩石类材料磨料水射流切割机理的研究主要是在垂直射流条件下进行的,导致对磨料水射流最佳冲击角的研究较缺乏。因此,在上述研究的基础上,本文通过进行砂岩及水晶玻璃磨料水射流切割试验,并结合数码显微及高速摄像技术对岩石类材料的最佳冲击角和倾斜切割机理等问题展开研究,揭示了不同切割压力及冲击角下的切缝深度、切缝内壁特征、

磨料颗粒运动轨迹与晶体破坏类型等变化规律,为进一步理解磨料水射流的切割机理提供一定的参考依据。

1 试验条件

1.1 试验系统与观测设备

采用如图 1 所示的磨料水射流切割系统研究它对岩石类试样的切割效果。该系统主要包括镇江长城注浆设备有限公司生产的 ZBYSB210/33-75 型高压砂浆泵(最大流量为 50 L/min,最大压力为 100 MPa)和 JDW 300 型搅拌机(制浆量 300 L,制浆时间 1~2 min)、自动比例加砂装置、高速水砂混合磨料罐、高压水砂输送管路、喷头和切割试验操作台。

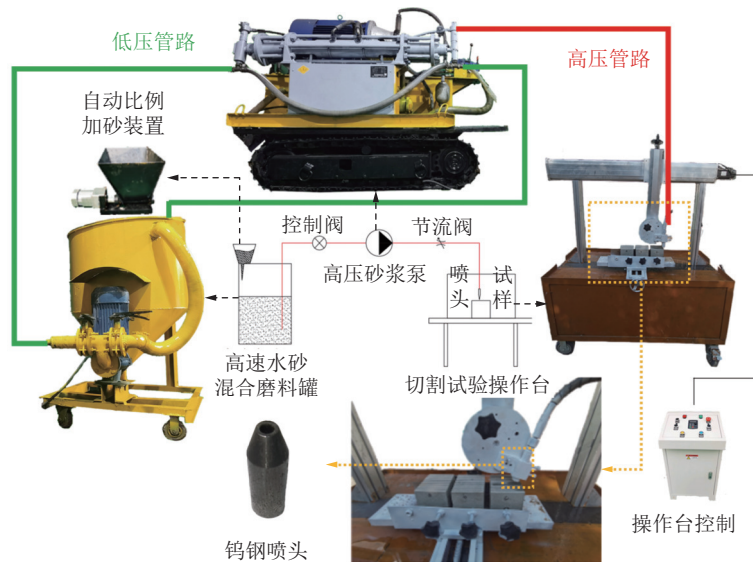


图 1 磨料水射流切割系统

Fig.1 AWJ cutting system

磨料水射流切割系统切割原理如下:自动比例加砂装置将水和磨料按比例加入高速水砂混合磨料罐,在高速水砂混合磨料罐内混合均匀的低压射流经高压砂浆泵加压形成高压射流,然后通过管路进入喷头转换为磨料射流动能,进而对切割试验操作台上固定的岩石试样进行切割。

切缝特征(如切缝深度及切缝内壁微观结构特征)是表征磨料水射流切割效果与机理的重要指标。为保证试验结果的准确度,采用数显游标卡尺和塞尺(测量精度为 0.01 mm)测量切割深度。测量方法为测量每条切缝的任意 5 个位置,舍去最大值和最小值后取平均值作为最终测量结果。由于材料损伤形貌和磨料运动特性息息相关,因此会导致射流在切割不同材料时的切割机理不同,本试验采用 VHX-2000 型数码显微镜对试样切割内壁微观结构特征进行观测以

研究磨料水射流的切割机理。同时为深入探究磨料水射流切割过程中射流的运动规律,采用 VIC-2D 高速摄像机对切割过程进行观测。为获得清晰的高速摄像观测结果,被切割靶件需要满足以下条件:①靶件需具有良好的透光性,确保可拍摄到高速磨料射流切割过程中的运动规律;②靶件需具有足够的强度及塑性,确保切割过程中靶件不发生断裂现象。因此,本试验选择 K9 水晶玻璃作为被切割材料。高速摄像机观测设备如图 2 所示。

1.2 试样制备与试验方案

切割试验选取较为均质砂岩靶件。根据岩石物理力学性质测定方法,对原状大块均质岩石进行钻心,经过切割、打磨等工序,加工为直径为 50 mm、高度为 100 mm 的标准圆柱试样及直径为 50 mm、厚度为 25 mm 的巴西圆盘劈裂试样(图 3(a)),砂岩试样的基



图 2 高速摄像机观测设备

Fig.2 High-speed camera observation equipment

本力学参数见表 1。另外,将砂岩加工为 100 mm × 100 mm × 100 mm 的正方体试样以进行磨料水射流切割试验 (图 3(b))。



(a) 力学参数测试试样



(b) AWJ切割试样

图 3 砂岩试样

Fig.3 Sandstone specimens

表 1 砂岩试样力学参数

Table 1 Sandstone mechanical parameters

密度/(kg · m ⁻³)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
2 406.16	47.93	1.95	11.73	0.41

研究表明,切割压力、靶距、速度、磨料类型及粒径、冲击角等因素对磨料水射流的切割性能具有重要影响,而本试验主要关注冲击角与切割压力之间的关系对切割性能的影响。表 2 为磨料水射流切割试验参数选取值;冲击角 δ 定义为射流方向与进给方向的夹角,如图 4 所示。本试验中磨料水射流均从右向左

推进切割砂岩试样;为减小试验误差,每组进行 3 次重复切割试验。

表 2 试验参数及取值范围

Table 2 Experimental parameters and value range

参数	取值
喷头直径/mm	1.2
进给速度/(mm · s ⁻¹)	15
磨料粒径/mesh	60
磨料质量分数/%	12.5
靶距/mm	15
切割压力/MPa	30、45、60
射流冲击角/(°)	65°、70°、75°、80°、85°、90°、95°、100°、105°、110°、115°

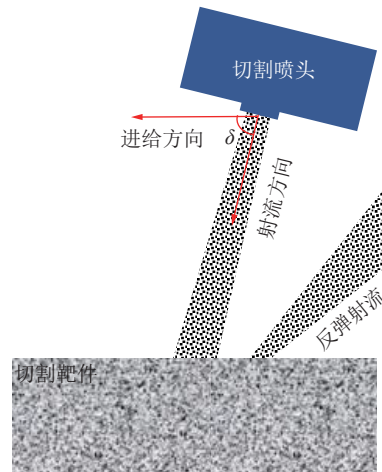


图 4 磨料水射流切割示意

Fig.4 AWJ cutting schematic

2 试验结果

2.1 砂岩试样切缝深度

图 5 为切割压力和冲击角对切缝深度的影响 (试样左视图)。通过图 5 可知,切割压力和冲击角对磨料水射流切缝 (深度及内壁形态) 具有显著影响。在切割过程的初始与结束阶段,磨料颗粒的运动轨迹不稳定,导致在入口与出口处的表观切缝深度并不能作为有效的切缝深度,因此,为确保准确测量切缝深度,分别从距磨料水射流入口和出口处 10 mm 开始 (剔除异常数据的影响),随机选取中间段的 5 个点进行测量,去除最大值和最小值后求取平均值作为最终的切缝深度,如图 5(d) 所示。通过图 5(d) 可知,对于同一冲击角,切缝深度随着切割压力的增加而增大,这是由于切割压力越大,磨料水射流携带的冲击能也越大,因此可以获得较大的冲蚀能力而形成较深的切缝。另外,在 3 种切割压力条件下,切缝深度随着冲击角

的增加均出现 2 个峰值点,对应的冲击角分别为 75° 和 100°。同时,以各切割压力条件下冲击角为 90°时的切缝深度为标准值,探究切割压力和冲击角对切缝深度提高率的影响,如图 5(e) 所示。通过对图 5(e) 的分析可知,切缝深度提高率随冲击角的变化趋势同样出现 2 个峰值点,即 75°和 100°处;当冲击角为 75°时,相对于 90°时切缝深度提高率分别为 21.66%、23.89%

和 26.84%;而当冲击角度为 100°时提高率分别为 10.14%、7.9% 和 10.28%;尽管在 75°和 100°时均可获得相对较好的切缝深度,但 75°时的提高率是 100°时的两倍,因此,在本文室内试验条件下 75°冲击角时可以获得最佳切割效果。另外,通过图 5(e) 可知,当冲击角大于 105°时,切缝深度提高率为负值,说明此时磨料水射流的切割效果较差。

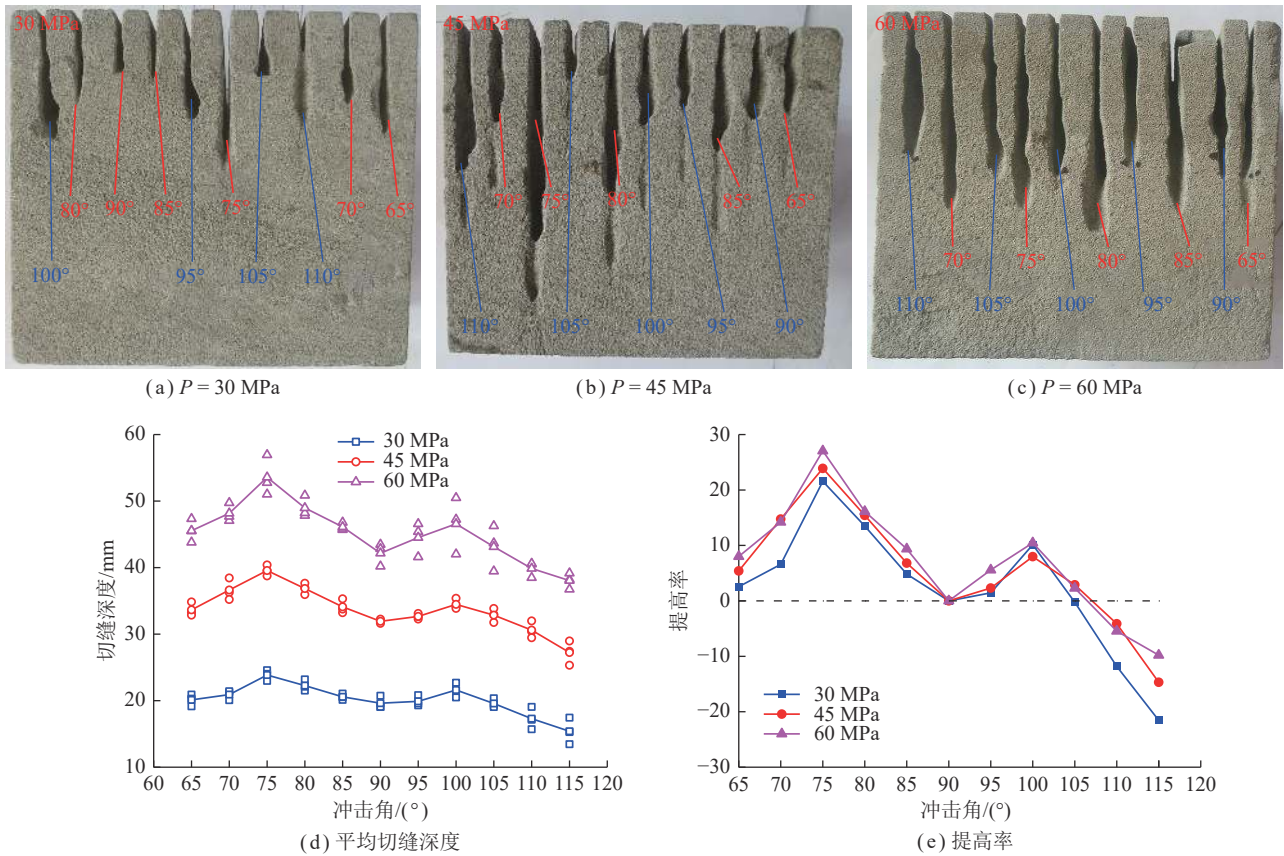


图 5 切割压力和冲击角对切缝深度的影响

Fig.5 Effect of cutting pressure and impact angle on the depth of cut

2.2 砂岩试样切缝内壁特征

2.2.1 切缝内壁宏观形态

通过外力将切割后的试样沿切缝劈开,并确保切缝内壁不受劈裂外力的影响。利用数码相机对切缝内壁拍照,通过对切缝内壁进行二值化处理以便更加清晰地观测其形貌特征。图 6 为 90°冲击角时的切缝内部形貌特征及磨料颗粒运动轨迹线(绿色虚线)。

从图 6 可以看出,在整个切缝范围内分为 3 个区域:区域 1 是由磨料水射流在第 1 阶段的微切削作用形成的,此时磨料颗粒的冲击角基本垂直于试样表面,由于其冲击速度最高,因此形成较为光滑平整的切缝内壁且仅有较浅射流轨迹纹理出现;随着冲蚀深度增加,在第 2 阶段磨料水射流发生偏转,此时磨料颗粒在运动过程中的水平速度分量逐渐增大而垂直速度分

量逐渐减小,因此,在该区域中形成较为明显的弯曲射

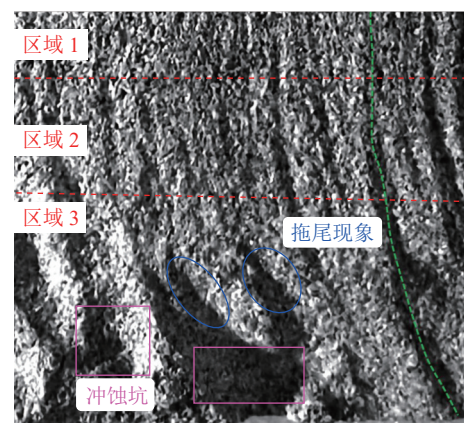


图 6 冲击角为 90°时切缝内壁特征

Fig.6 Characterization of the inner wall of the cut at an impact angle of 90°

流轨迹纹理, 并出现微小犁削坑, 主要由磨料颗粒的微切削和微犁削形成宏观破坏; 区域 3 是由磨料水射流在第 2 阶段发生较大偏转后切割形成的, 此时磨料颗粒的运动轨迹进一步发生偏转, 其水平速度分量进一步增大, 导致其冲蚀能力降低, 因此, 在该区域出现明显的冲蚀坑和拖尾现象。上述砂岩切割试验观测结果与 D. AROLA 等^[25]使用磨料水射流切割延性材料的结果相一致, 说明改变靶件材料类型并不会改变磨料水射流的基本切割机理。但由于不同靶件材料的物理力学性质不同, 其切割过程中磨料颗粒的运动轨迹不同, 因此将对切缝深度和内壁形态造成显著影响。

图 7 为不同冲击角条件下切缝内壁的形貌特征。通过与图 6 对比分析可知, 当磨料水射流与被切割材

料表面不垂直时, 磨料颗粒的运动轨迹近似为曲线, 因此, 切缝内壁中区域 1 并不显著, 而主要由区域 2 和区域 3 构成, 材料破坏主要由微切削和微犁削引起。同时结合图 5(d) 和图 6 可知, 当冲击角大于 90°时, 磨料颗粒的运动轨迹更加弯曲, 此时磨料颗粒速度的水平分量逐渐增加, 而垂直分量逐渐降低, 导致较多的磨料颗粒从被切割材料的表面滑过, 进而造成磨料颗粒的冲蚀能力降低幅度较大, 因此, 它引起的切缝深度较小; 当冲击角为 65°和 75°时, 尽管磨料颗粒的运动轨迹近似为曲线, 但相较于大冲击角, 磨料颗粒在垂直方向的速度损失较少, 其冲蚀能力降低也较小, 因此, 切缝深度相对较大; 同时, 不同冲击角条件下在区域 3 中均形成典型的冲蚀坑和拖尾现象。

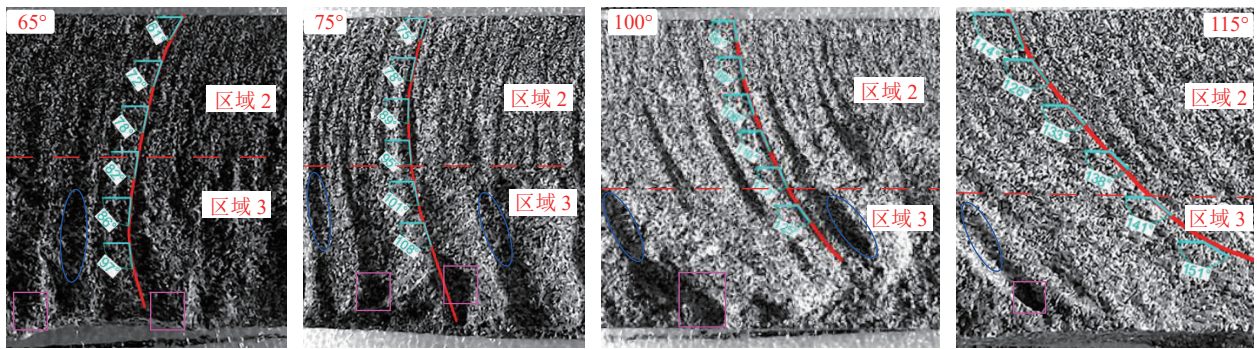


图 7 冲击角对切缝内壁形貌特征的影响

Fig.7 Effect of impact angle on the morphological characteristics of the inner wall of the cut

图 8 为磨料水射流结构示意图, 当磨料水射流以一定倾角与靶件表面接触时, 在接触点处发生分流现象, 此时可以将整个射流结构分为 3 个区域^[26-27]: 自由射流区 I, 在该区域中射流不受靶件的影响; 冲击区 II, 射流在该区域中的垂向速度逐渐减小, 水平速度逐渐增大, 且水平向速度在距滞止点 O 距离约 2d 处达

最大值 v_{m01} 和 v_{m02} ; 壁面射流区 III, 该区域中射流流体为沿程减速运动。

如图 9 所示, 在切割靶件过程中磨料水射流喷射到试样表面瞬间将产生折射和反弹现象形成二次射流效应, 因此, 切割效果主要受自由射流区 I 及左侧壁面射流区 III 处射流冲蚀力的影响。不同冲击角条件下, 在射流切割方向上磨料颗粒的冲击力不同, 从而形成不同的切缝深度。当冲击角为 90°时, 自由射流区 I 的磨料颗粒在接触靶件后将产生剧烈的垂直反弹^[28], 从而削弱自由射流区 I 磨料颗粒的冲蚀力; 由于大部分磨料颗粒产生垂直反射造成它在切割方向磨料颗粒的速度较小, 导致其整体冲蚀能力较低。

如图 9(a) 所示, 75°冲击角下的切缝主要由射流切缝方向速度为 v_{m1} 的磨料颗粒冲蚀形成, 而速度为 v_{m2} 的磨料颗粒沿着相反方向运动主要对已经形成的切缝起到抛光作用; 而如图 9(b) 所示, 100°冲击角下的切缝主要由射流切缝方向速度为 v_{m2} 的磨料颗粒冲蚀形成, 而速度为 v_{m1} 的磨料颗粒则主要对已形成的切缝起到抛光作用; 通过图 8 可知, 磨料颗粒的水平速度 v_{m1} 大于 v_{m2} , 75°冲击角下切割方向磨料颗粒的

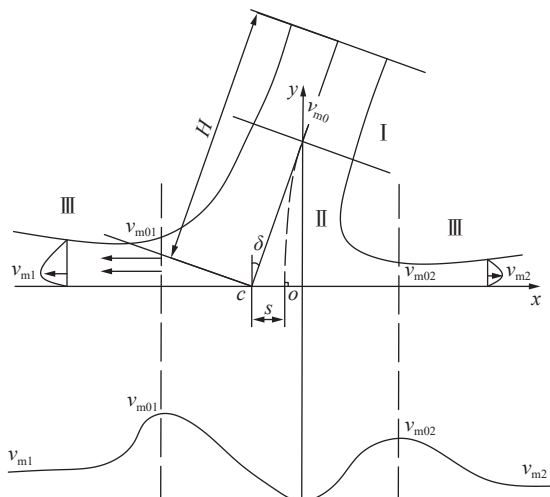
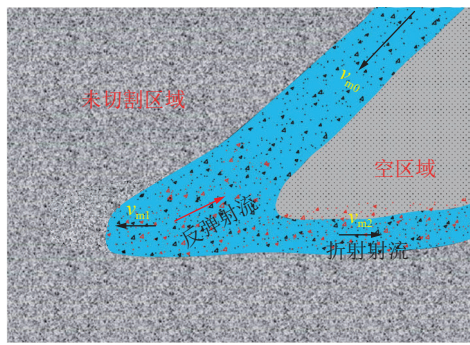
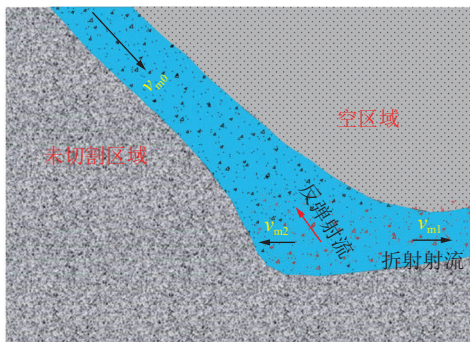


图 8 磨料水射流结构示意图

Fig.8 AWJ structure schematic



(a) 75°冲击角



(b) 100°冲击角

图9 磨料水射流切割示意

Fig.9 AWJ cutting schematic

冲蚀能力大于100°冲击角,75°冲击角的切缝深度高于100°冲击角。上述研究结果表明,选用适当的冲蚀角可以减轻磨料颗粒产生的垂直反射现象,同时也可以降低反击冲击波和膨胀波的影响,从而增大切割深度。

2.2.2 切缝内壁微观特征

除冲击角、切割压力等因素外,被切割材料自身

物理力学性质也会对切缝深度造成一定影响。岩石是一种典型的非均匀材料,内部细观结构特性(矿物组成、基质强度、晶界结合强度等)对其力学性质和破坏机理具有显著影响。通过对岩石断口的研究可深入探究岩石微结构构成和缺陷对断裂产生机理的影响。岩石材料的断口形貌具有典型的脆断特点^[29]。因此,利用VHX-2000型数码显微镜观测砂岩试样切缝内壁表面晶体断裂情况,以探究磨料水射流对砂岩的切割机理。如图6和图7所示,由于切缝内壁中3个区域并没有严格的分界线,因此在整个切缝深度选取3个区域进行观测,分别为20%切缝深度的上部区域、80%切缝深度的中部区域及存在冲蚀坑的下部区域。

图10为冲击角为90°时不同观测位置处切缝内壁表面特征,砂岩切缝内壁形貌特征主要可分为穿晶断裂、沿晶断裂、在晶体上产生切槽或凹坑、胶结物覆盖4类。通过图10(a)可知,切缝内壁的上部区域岩石晶体主要表现为穿晶断裂,同时该区域的切割微观形貌极不规则;另外,在晶体表面形成切槽且晶体间存在较大凹坑,切槽 Q_1 直径约为86.77 μm ,凹坑直径约为190 μm ,可以发现它远小于射流直径1.2 mm且略小于磨料直径250 μm (图10(a));在该切割深度下磨料颗粒具有较高的切割能量、材料去除及损坏潜力,并且完成切割后的部分反射磨料颗粒仍具有较大的冲击能力,因此,在该区域会存在由磨料颗粒直接冲击形成的切槽和由反弹磨料颗粒冲击形成的凹槽。

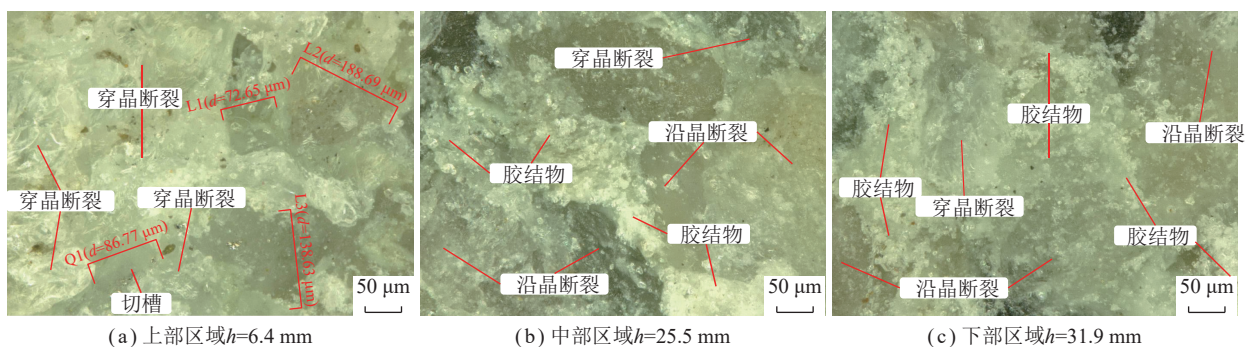


图10 90°冲击角条件下切缝内壁微观特征

Fig.10 Microscopic characteristics of the inner wall of the cut under 90° impact angle

结合图7可知,随着切缝深度的增加,磨料水射流速度水平分量逐渐增加而垂直分量逐渐降低,导致射流整体冲蚀能力降低,因此,在中部区域岩石晶体的微观形貌(图10(b))主要表现为沿晶断裂,同时存在少量穿晶断裂且首次发现晶体间胶结物的存在。而在下部区域,磨料水射流速度水平分量达到

最大值,此时磨料颗粒虽然对靶件有一定的冲蚀作用,但主要表现为对岩石进行抛光,因此,岩石晶体表现为沿晶断裂且晶体表面被大量胶结物覆盖;同时与上、中部区域对比发现下部区域切缝内壁更加光滑平整(图10(c))。上述结果表明,在磨料水射流切割过程中,切缝内壁表面晶体的破坏程度随着观测深度的增加

逐渐降低, 同时在内部细观结构特性影响下, 在切缝深度范围内表现出不同的晶体破坏类型。

根据图 5(d) 和图 8 可知, 虽然切缝深度在冲击角为 75° 和 100° 时均出现峰值, 但是磨料颗粒在上述冲击角下在试样内的运动轨迹具有显著差异, 导致不同的切缝表面宏观形貌特征, 因此, 对冲击角为 75° 和 100° 条件下的砂岩试样切缝内壁进行微观观测。图 11 为 75° 冲击角时切缝内壁微观特征。通过分析可知, 75° 冲击角条件下切缝内壁上部区域及中部区域微观

特征与冲击角度为 90° 时一致; 但在下部区域中主要表现为沿晶及穿晶断裂而未出现明显的胶结物, 说明此时磨料颗粒没有显著的抛光作用。图 12 为 100° 冲击角条件下切缝内壁微观特征。通过分析可知, 在上部和中部区域主要产生沿晶及穿晶断裂而未出现明显的切槽或凹坑; 下部区域的晶体破坏类型与冲击角为 90° 时相类似, 但晶体间存在的胶结物较少, 说明此时磨料颗粒具有抛光作用但其作用程度较 90° 冲击角时小。

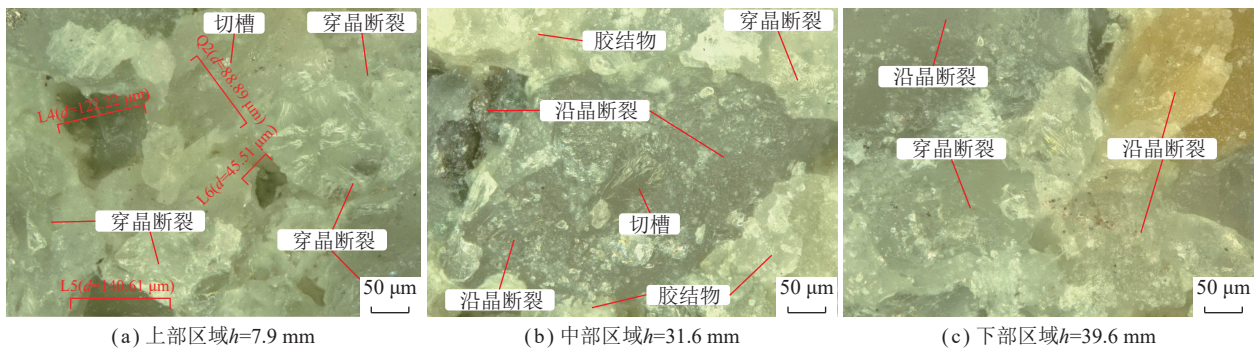


图 11 75° 冲击角条件下切缝内壁微观特征

Fig.11 Microscopic characteristics of the inner wall of the cut under 75° impact angle

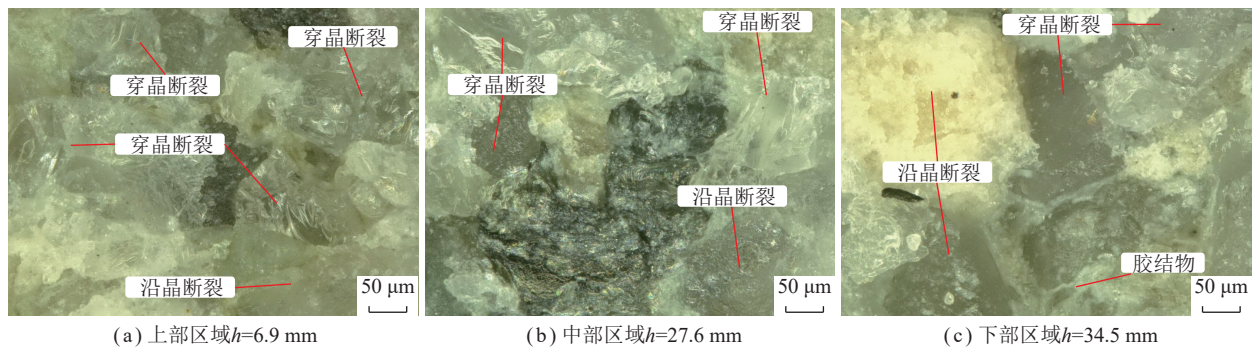


图 12 100° 冲击角条件下切缝内壁微观特征

Fig.12 Microscopic characteristics of the inner wall of the cut under 100° impact angle

2.3 水晶玻璃试样切割过程

在水晶玻璃试样切割试验中, 综合考虑切割和高速摄像机拍摄效果, 选取切割压力为 30 MPa, 靶距为 100 mm, 其余试验参数见表 2。图 13 为 90° 冲击角时高速摄像机记录的水晶玻璃切割过程, 选取 5 个不同时刻探究切割过程中射流的运动状态。

在第 1 时刻磨料射流垂直切入靶件 (图 13(a)), 在磨料颗粒冲蚀力作用下引起靶件产生宏观破坏; 随着喷头持续推进切割, 切缝深度增加且磨料射流出现明显反射现象 (第 2 时刻, 如图 13(b) 所示); 在第 3 时刻, 在垂直射流和反射流的共同作用下切缝深度继续增加; 上述 3 个时刻与 HASHISH 等^[10]的可视化试验结果相一致。在第 4 时刻, 磨料颗粒反射后尽管切割能

力降低, 但仍能够继续对切缝底部形成一定的冲蚀作用从而逐渐产生冲蚀坑 (图 13(d)); 随着喷头继续推进 (第五时刻), 在磨料射流切割稳定后, 前 4 个切割时刻重复出现直到完成切割工作。通过上述分析可以看出, 90° 冲击角时反射磨料射流与水平面的夹角较大, 因此, 它对已形成切缝的二次冲蚀和抛光能力较小, 同时也会极大地削弱垂直方向射流的切割能力, 从而导致达不到最佳切割效果; 另外, 在反射流的作用下切缝底部出现冲蚀坑。通过图 13 可知, 反射流主要出现在第二时刻并在后续持续发挥作用, 因此, 可以通过减缓磨料颗粒射流在第二时刻的偏转程度, 从而降低反射流的负面作用, 提高整体切割能力。

图 14 为 75° 冲击角时高速摄像机记录的水晶玻

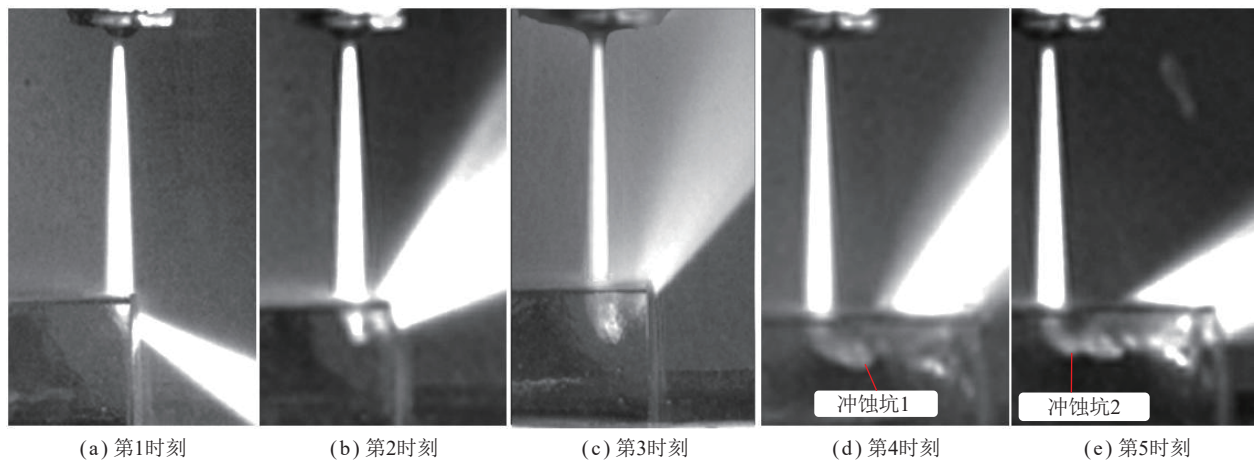


图 13 90°冲击角切割过程

Fig.13 90° impact angle cutting process

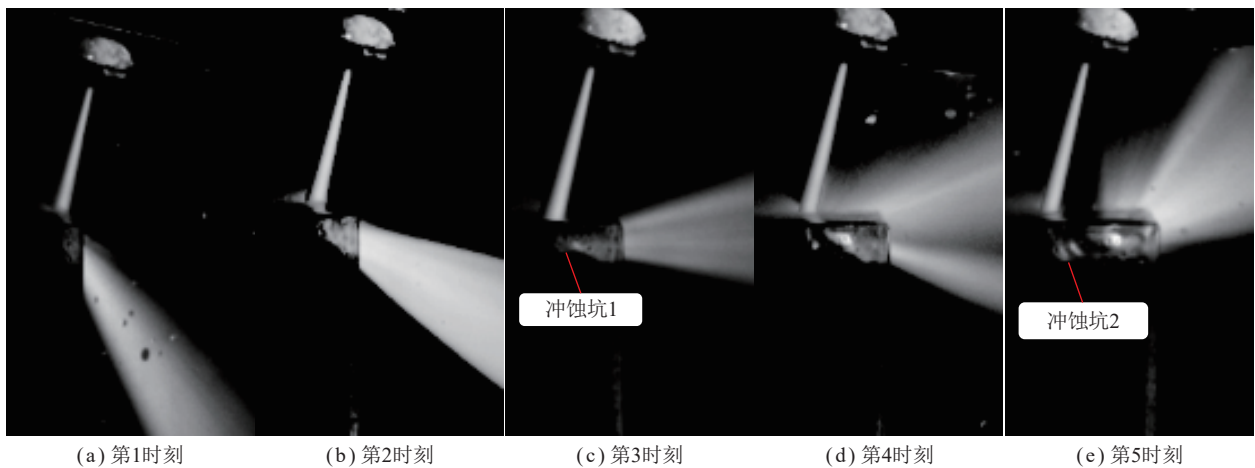


图 14 75°冲击角切割过程

Fig.14 75° impact angle cutting process

璃切割过程。通过对图 14 的分析可知,在第一时刻,靶件在磨料射流冲蚀力作用下产生宏观切缝;在后续时刻,随着喷头持续推进,形成向右下方的射流分量且该射流分量逐渐向水平方向偏转,此时垂直射流分量及与推进方向相同的水平射流分量对切缝的形成起主导作用,而与推进方向相反的水平射流分量则主要对已形成切缝起二次冲蚀及抛光作用,同时该作用比 90°冲击角时大,能够进一步增加切缝深度,上述过程持续进行完成切缝作业。另外,在切缝底部同样存在由水平射流分量引起的冲蚀坑。

如图 15 为 100°冲击角时高速摄像机记录的水晶玻璃切割过程。

通过结合图 13 和图 14 磨料喷射与反射路径可知,两者切割过程中磨料射流的变化情况类似,但对靶件破坏起主导作用的垂直射流分量及与推进方向相同的水平射流分量冲蚀能力不同。75°冲击角时,磨料喷射方向与推进方向的夹角为锐角,大部分磨料颗

粒可以有效地作用在切缝前端,小部分磨料颗粒沿着与推进方向相反的路径喷射,因此,与推进方向相同的水平射流分量对靶件的冲蚀力较大;而 100°冲击角时,由于磨料喷射方向与推进方向的夹角为钝角,造成磨料颗粒在水平方向的分配情况正好相反,而与推进方向相反的水平射流仅有较小的二次冲蚀力,因此切缝深度在冲蚀角超过 100°后表现出持续下降的趋势,如图 5(d) 所示。另外,如图 15(c)、(d) 所示,在切缝底部同样形成较多的冲蚀坑。

2.4 磨料水射流切割宏观模型

根据磨料水射流切割砂岩试样切缝内壁形貌特征及水晶玻璃试样高速摄像机观测结果的综合分析,建立磨料水射流在不同冲击角条件下切割过程的宏观模型,如图 16 所示。通过分析可知,冲击角不同造成磨料颗粒的运动轨迹各不相同,从而形成不同的切缝特征,但总体上看磨料水射流整个切割过程可分为 4 个阶段。以 90°冲击角为例进行说明:第 1 阶段为切

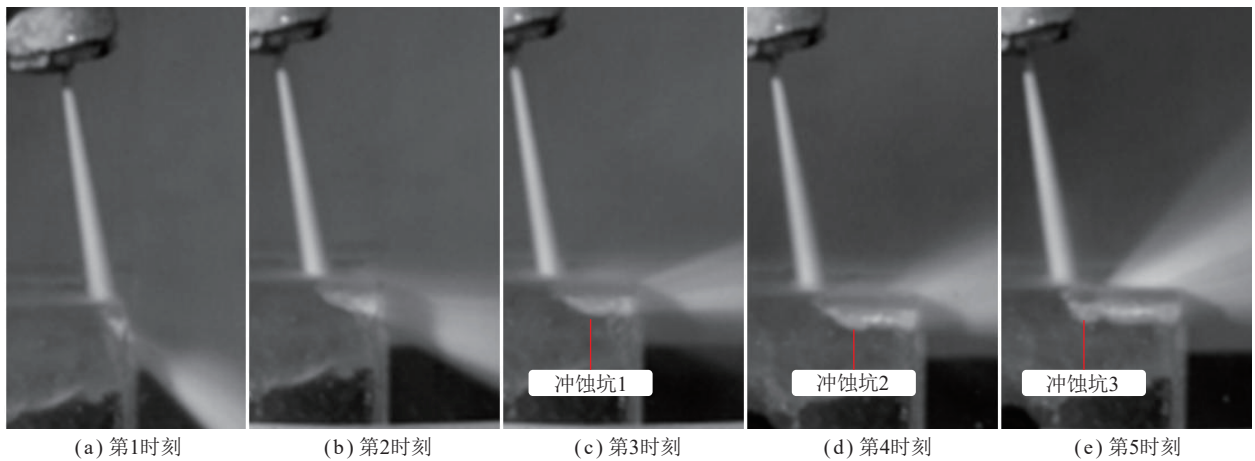


图 15 100°冲击角切割过程

Fig.15 100° impact angle cutting process

割的初始阶段,当切割喷头移动距离为 x_1 时,切缝深度为 h_1 ,当继续向前推进 x_2 时,切缝深度增加至 h_2 ,在上述切割过程中磨料水射流基本垂直射向靶件,完成冲蚀切割;随着切割喷头继续前移 (x_3),切缝深度增加至 h_3 ,由于切缝深度持续增加而切割靶距保持不变,因此磨料水射流将出现偏转和分离现象,导致磨料水

射流的切割能力逐渐减弱,在射流分量的综合作用下形成与切割推进方向相反的弯曲切缝形态,且其弯曲程度随切割喷头推进距离增加而逐渐增大(第2阶段);当切割喷头继续推进 x_4 时为第3阶段,基本达到稳定的最大切缝深度 h_4 ;第4阶段为稳定切割阶段,前3个阶段循环进行,直到完成整个磨料水射流切割作业。

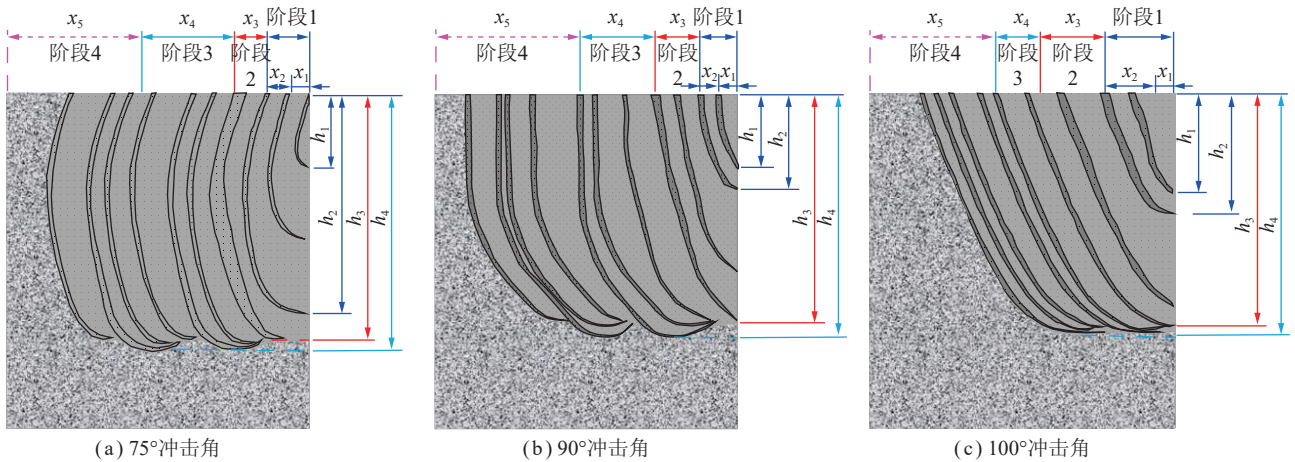


图 16 磨料水射流切割过程宏观模型

Fig.16 Macroscopic model of abrasive water jet cutting process

3 结 论

(1) 切缝深度随切割压力的增加逐渐增大,随着冲击角的变化将出现 2 个峰值点 (75°和 100°) 且 75°冲击角时切割效果最佳;当冲击角大于 100°时,磨料水射流的切割效果随冲击角的增加逐渐变差。

(2) 90°冲击角时,在切割初始阶段切缝内壁较光滑且仅有较浅射流轨迹纹理(区域 1),随着冲蚀深度增加,切缝内壁出现明显的弯曲射流轨迹纹理(区域 2);当磨料射流与靶件表面不垂直时,在切割初始阶段切缝内壁就形成明显的弯曲射流轨迹纹理(区域 2);

不同冲击角条件下在切缝底部均出现典型的冲蚀坑及拖尾现象(区域 3)。

(3) 90°冲击角时切缝上部主要为穿晶断裂并伴随出现切槽,中部及下部主要为沿晶断裂且胶结物覆盖随切割深度的增加而逐渐显著;75°冲击角时切缝上部及中部晶体破坏特征与 90°冲击角时一致,但下部主要为沿晶及穿晶断裂而未出现胶结物覆盖;100°冲击角时上部及中部主要为沿晶及穿晶断裂而未出现切槽,其下部晶体破坏与 90°冲击角时相类似且仅出现少量胶结物覆盖。

(4) 90°冲击角磨料反射流会严重削弱其切割能力;

磨料喷射与推进方向的夹角不同造成对靶件破坏起主导作用的垂直射流及水平射流分量(与推进方向同向)的冲蚀能力不同,进而导致75°冲击角的切割深度大于100°冲击角;而与推进方向反向的水平射流分量则对已形成切缝具有二次冲蚀及抛光作用,但不同冲击角下的作用程度不同;同时结合切缝表面观测和射流切割过程观察结果,建立不同冲击角下切割过程宏观模型,并将其划分为4个阶段。

参考文献(References):

- [1] 张建国, 兰天伟, 王满, 等. 平顶山矿区深部矿井动力灾害预测方法与应用[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1698-1706.
ZHANG Jianguo, LAN Tianwei, WANG Man, et al. Prediction method of deep mining dynamic disasters and its application in Pingdingshan mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1698-1706.
- [2] 齐庆新, 潘一山, 李海涛, 等. 煤矿深部开采煤岩动力灾害防控理论基础与关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1567-1584.
QI Qingxin, PAN Yishan, LI Haitao, et al. Theoretical basis and key technology of prevention and control of coal-rock dynamic disasters in deep coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1567-1584.
- [3] 王恩元, 张国锐, 张超林, 等. 我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 297-322.
WANG Enyuan, ZHANG Guorui, ZHANG Chaolin, et al. Research progress and prospect on theory and technology for coal and gas outburst control and protection in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 297-322.
- [4] 刘送永, 李洪盛, 江红祥, 等. 矿山煤岩破碎方法研究进展及展望[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 1047-1069.
LIU Songyong, LI Hongsheng, JIANG Hongxiang, et al. Research progress and prospect of coal-rock breaking methods in mines[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 1047-1069.
- [5] 卢义玉, 黄杉, 葛兆龙, 等. 我国煤矿水射流卸压增透技术进展与战略思考[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3189-3211.
LU Yiyu, HUANG Shan, GE Zhaolong, et al. Research progress and strategic thinking of coal mine water jet technology to enhance coal permeability in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3189-3211.
- [6] 胡阳. 深部冲击地压煤层高压水射流割缝卸压参数优化研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023: 52-96.
HU Yang. Research on optimization of pressure relief parameters of high pressure water jet in deep rock burst coal seam[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023: 52-96.
- [7] 潘俊锋, 马文涛, 刘少虹, 等. 坚硬顶板水射流预制缝槽定向预裂防冲技术试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(8): 1591-1602.
PAN Junfeng, MA Wentao, LIU Shaohong, et al. A prevention technology of rock burst based on directional presplitting of water jet prefabricated slot in hard roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(8): 1591-1602.
- [8] 刘勇, 陈长江, 魏建平, 等. 磨料水射流与磨料气体射流破岩压力对比分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(9): 2510-2517.
LIU Yong, CHEN Changjiang, WEI Jianping, et al. Comparison analysis on the rock breakage pressure induced by abrasive water jets and abrasive gas jets[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2510-2517.
- [9] PEREC A. Abrasive suspension water jet cutting optimization using orthogonal array design[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 149: 366-373.
- [10] HASHISH M. Visualization of the abrasive-waterjet cutting process[J]. *Experimental Mechanics*, 1988, 28(2): 159-169.
- [11] 陈晓晨, 邓松圣, 管金发, 等. 磨料水射流冲蚀金属损伤形貌特征及机理研究[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(1): 8-16.
CHEN Xiaochen, DENG Songsheng, GUAN Jinfa, et al. Characteristics and generation mechanism of metal damage morphology by abrasive water jet erosion[J]. *Tribology*, 2018, 38(1): 8-16.
- [12] BALLOUT Y, MATHIS J A, TALIA J E. Solid particle erosion mechanism in glass[J]. *Wear*, 1996, 196(1/2): 263-269.
- [13] 叶启立, 王成勇, 赖子健, 等. 锆基非晶合金离散磨粒冲蚀机理研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(15): 92-104.
YE Qili, WANG Chengyong, LAI Zijian, et al. An investigation into the erosion mechanisms of Zr-based bulk metallic glasses by loose abrasives[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(15): 92-104.
- [14] YUAN Y M, CHEN J F, GAO H. Surface profile evolution model for titanium alloy machined using abrasive waterjet[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 240: 107911.
- [15] WANG F C, LI L C, ZHOU X, et al. New application of abrasive slurry jet in coal rocks breaking and prediction model of its rock breaking ability[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, 46(8): 7227-7237.
- [16] SIORES E, WONG W C K, CHEN L, et al. Enhancing abrasive waterjet cutting of ceramics by head oscillation techniques[J]. *CIRP Annals*, 1996, 45(1): 327-330.
- [17] HASHISH M. The effect of beam angle in abrasive-waterjet machining[J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1993, 115(1): 51-56.
- [18] YUVARAJ N, PRADEEP KUMAR M. Study and evaluation of abrasive water jet cutting performance on AA5083-H32 aluminum alloy by varying the jet impingement angles with different abrasive mesh sizes[J]. *Machining Science and Technology*, 2017, 21(3): 385-415.
- [19] 黄璐云, 陈正寿, 倪路新, 等. 靶距与冲击角对超高压水射流喷嘴水动力学性能影响的研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(15): 169-178, 223.
HUANG Luyun, CHEN Zhengshou, NI Luxin, et al. Effects of target distance and impact angle on hydrodynamic performance of ultra-high pressure water jet nozzle[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(15): 169-178, 223.
- [20] 聂百胜, 宫伟力, 兰日昌, 等. 前混合磨料水射流切割岩石的实验

- 及机理研究[C]//隧道、地下工程及岩石破碎学术研讨会论文集. 大连, 2007: 356–361.
- [21] WANG F C, ZHOU D P, XU Q W, et al. Mathematical model of rock stress under abrasive slurry jet impact based on contact mechanics[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 107: 1–8.
- [22] HUANG F, ZHAO Z Q, LI D, et al. Investigation of the breaking manifestations of bedded shale impacted by a high-pressure abrasive water jet[J]. *Powder Technology*, 2022, 397: 117021.
- [23] MIRANDA R M, QUINTINO L. Microstructural study of material removal mechanisms observed in abrasive waterjet cutting of calcareous stones[J]. *Materials Characterization*, 2005, 54(4/5): 370–377.
- [24] QU H, TANG S M, SHENG M, et al. Experimental investigation of the damage characteristics and breaking process of shale by abrasive waterjet impact[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 211: 110165.
- [25] AROLA D, RAMULU M. A study of kerf characteristics in abrasive waterjet machining of graphite/epoxy composite[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1996, 118(2): 256–265.
- [26] 牟绍桂, 罗银川, 李风雨, 等. 射流速度和冲击角度对材料去除特性的分析[J]. *光学技术*, 2016, 42(2): 161–165.
- MI Shaogui, LUO Yinchuan, LI Fengyu, et al. Analysis of jet velocity and impinging angle on material removal characteristic in fluid jet polishing[J]. *Optical Technique*, 2016, 42(2): 161–165.
- [27] 余常昭. 紊动射流[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993: 157–161.
- [28] 廉晓庆, 冯秀梅, 蒋明学, 等. 不同冲蚀角下非均质脆性材料的残余应力和冲蚀机制[J]. *硅酸盐学报*, 2011, 39(11): 1740–1746.
- LIAN Xiaoqing, FENG Xiumei, JIANG Mingxue, et al. Residual stresses and erosion mechanisms of inhomogeneous brittle material at different impact angles[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2011, 39(11): 1740–1746.
- [29] 谢和平, 陈至达. 岩石断裂的微观机理分析[J]. *煤炭学报*, 1989, 14(2): 57–67.
- XIE Heping, CHEN Zhida. Analysis of rock fracture micro-mechanism[J]. *Journl of China Coal Society*, 1989, 14(2): 57–67.