文章编号：1000-5773(2005)04-0337-06

超高压水射流冲蚀切割岩石断口微观断裂机理实验研究*

李根生[1]，廖华林[2]

(1.中国石油大学(北京)石油天然气工程学院，北京 102249；
2.中国石油大学(华东)石油工程学院，山东东营 257061)

摘要：由于岩石破碎过程的复杂性，目前对水射流的破岩机理的认识仍然不十分清楚。先采用超高压万能水射流切割机冲蚀切割岩石，然后用扫描电镜对水射流切割岩石断口形貌进行观测，分析了岩石在超高压水射流作用下的破坏形式。观测分析表明，超高压射流切割岩石形成的切槽主要有长形规则和漏斗状两种形状。岩石在水射流作用下的破坏机制主要有拉伸破坏和剪切破坏两种，剥落岩块以穿晶断裂为主，其微观断裂机制是脆性拉伸破坏；切槽凹侧面主要是剪切错动，其微观破坏机制是剪脆性破坏。实验为水射流破岩机理分析提供了实测依据。

关键词：水射流；岩石切割；破坏机制；扫描电镜
中图分类号：TP69 **文献标识码**：A

1 引 言

尽管水射流破岩技术已广泛应用于矿山开采、石油钻探、巷道挖掘和岩石切割等有关工程领域[1]，但由于岩石破碎过程的复杂性，对水射流的破岩机理的认识仍然不十分清楚。造成这种局面的主要原因是水射流本身的复杂性，破岩过程短暂且变化多端，再加上岩石材料的透明性差，研究人员很观察和捕捉到水射流冲击岩石时岩石的内部应力应变及其它相关信号。至今，人们对水射流作用下岩石产生的破坏主要以哪种形式为主，是拉应力、剪应力、还是压应力引起的，以及岩石破碎发展过程仍存在广泛的争论[2]。水射流基本参数对破岩效果影响的实验，主要是宏观分析与观察，还难以建立宏观破岩效果与岩石微观断裂机理之间的联系。近年来，国内外学者逐渐重视岩石断口微观分析，将微观形貌破坏特征同岩石微观裂纹扩展到断裂破坏的力学机制联系起来，从微观方面研究岩石的破坏规律，为岩石损伤演化过程、细观力学研究提供实测依据，最终建立起岩石微观破坏机制和宏观断裂分析的桥梁，其理论意义和理论价值都是很深远的[3,4]。运用扫描电镜对水射流切割岩石断口形貌进行了观测实验研究，分析岩石在超高压水射流作用下的破坏形式，以期提高对水射流作用下岩石破岩机理的认识。

2 实验设备、材料和方法

2.1 实验设备

实验是在石油大学(华东)射流研究中心的超高压射流数控自动万能切割机(PWJ-B-2)上完成的，如图1所示，其最高压力可达300 MPa，主机额定功率22 kW，额定排量为2 L/min。喷嘴为进口红宝石喷嘴，直径为0.3 mm，最低移动速度为1.91 mm/s，其结构见图2 。由于超高压射流喷嘴材料的硬

* **收稿日期**：2004-10-19；**修回日期**：2005-01-17
基金项目：国家自然科学基金重点项目(50234030)；国家杰出青年科学基金(50125413)
作者简介：李根生(1961—)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事新型高压水射流技术方面研究. E-mail:ligs@bjpeu.edu.cn

度和耐磨性很高，而且喷嘴水眼尺寸很小，加工制作难度大，所以超高压射流喷嘴的设计一般比较简单，以保证流道的加工精度和光洁度。多数超高压射流喷嘴为直圆孔或带有一定的入口锥角。增压泵产生高压水输送给喷嘴，产生高速射流以冲击破碎岩石；控制系统用于控制喷嘴轨迹运动和调节泵压，从而使整个系统能协调完成各种预定工作。扫描电镜实验采用中国科学院科技仪器厂生产的 KYKY-2800 台式扫描电子显微镜。

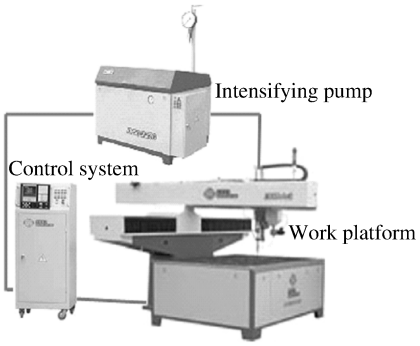


图 1 超高压射流切割机示意图

Fig. 1 The schematic view of jet cutting machine

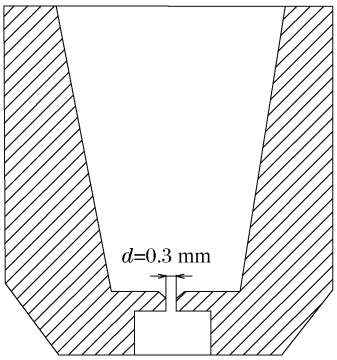


图 2 喷嘴结构示意图

Fig. 2 The geometry of nozzle

2.2 实验材料

选用了三种人造岩石，具有良好的各向同性和均质性。在伺服控制岩石力学三轴实验系统上，完成了岩石材料性能参数测试，实验岩样的性能指标如表 1 所示。

表 1 实验岩样的力学性能参数

Table 1 The mechanics properties of rock samples for the test

No.	Sample	Density /(g/cm^3)	Elastic modulus /(GPa)	Poisson's ratio	Cohesive /(MPa)	Friction angle /(°)	Tensile strength /(MPa)
1	White marble	2.84	36.96	0.13	25.19	42.95	1.05
2	Red granite	2.68	24.33	0.17	43.42	45.21	1.48
3	Black granite	3.11	43.75	0.14	58.08	42.23	2.51

2.3 实验方法

先用超高压射流数控自动万能切割机进行了淹没条件下水射流切割冲蚀岩石实验，然后通过扫描电镜进行岩石断口形貌观测实验研究，分析水射流作用下岩石微观破坏与断裂形式。射流驱动压力 150 MPa，按 Bernoulli 方程，对应的射流速度为 547.7 m/s，喷嘴横移速度 2.0 mm/s。断口观测面取三种岩石在射流冲击下岩石切槽侧面和剥落面。断口背面磨平，厚度 5～10 mm，将试样用导电胶粘于样品台上，置于真空喷涂仪中，喷涂金膜后上镜观测。

3 岩石断口微观断裂机理分析

岩石微观形貌分析是岩石微观结构研究的一部分，在一定程度上反映了水射流冲击岩石时岩石损伤演化过程的受力情况和结构破坏特征。参照典型岩石断口分析图谱来进行水射流冲击切割岩石断口断裂机理分析。

3.1 射流切割岩石断口外观形貌

纵观水射流切槽的外观形状，岩石上的切槽主要有两种形式，如图 3 所示。一种是较为规则的长形切槽，岩石破坏从切槽中心开始，较为规则的切槽集中在中心部位，岩石表面有少许剥落；另一种是中心有切槽同时还伴有较大岩块剥落，破坏也是从射流冲击中心部位开始，然后向两边发展，剥落岩块的深

度不超过切槽深度。由此推测,规则切槽中岩石的破坏形式与剥落岩块的破坏形式可能不同,剥落岩块破坏与岩石材料的力学性质有关,其破坏体积大小存在一定随机性,所以造成冲蚀体积随喷距变化无明显规律。



(a) Long regular slot　　(b) Funnel shape crater

图 3　超高压水射流作用下岩石切槽形状

Fig. 3　The rock shape of cutting slot by water jets impact

3.2　典型岩石断口分析

大量岩石断口微观形貌观察研究表明[3~6],岩石的断裂机理主要分为拉伸破坏和剪切破坏两大类。

(1) 拉伸破坏断口

拉伸破坏断口微观断裂方式主要是沿晶断裂和穿晶断裂以及他们相互耦合形式。沿晶断裂是岩石在张应力的作用下,如果结晶颗粒本身凝聚力大、晶间胶结物弱化或解理面脆化,则多沿体与弱化物质界面、解理面拉开,如图 4;穿晶断裂是当结晶颗粒强度小于胶结物时,颗粒本身常被拉断,断面不规整,如图 5。

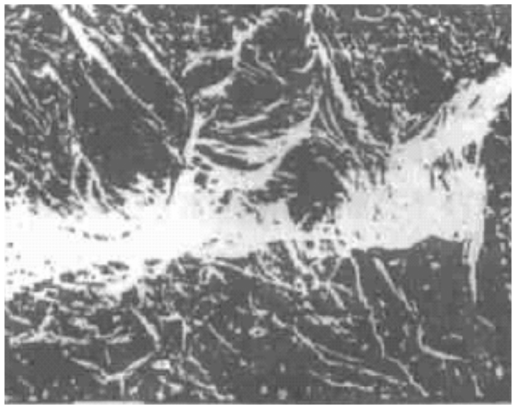


图 4　室内标准劈拉试验薄片

Fig. 4　The slice of the rock by tension test

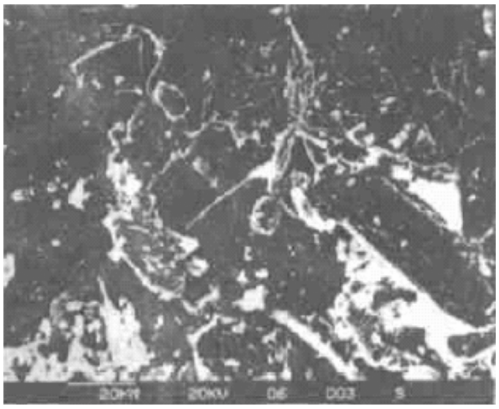


图 5　常规三轴卸载试验薄片

Fig. 5　The slice of the rock by tri-axial unloaded test

(2) 剪切破坏断口

此类断口由剪应力引起,由于相对剪切滑移,使晶面或解理面沿运动方向产生擦痕,或沿晶面有大体方向的错裂,如图 6、图 7 所示。

3.3　射流切割岩石断口对照分析

3.3.1　剥落岩块断口

在水射流切割岩石过程中,当射流产生的冲击应力超过岩石破坏强度且冲击接触时间超过一定数值时,易出现岩块从基体中剥落的现象,剥落的岩块多为片楔状,从切槽中心往外逐渐变薄,边缘一般为弧形。图 8(a)~图 8(c)为剥落岩块断口的形貌特征,三种岩石的断口面不规整,呈阶梯状。图 8(a)为

大理石,其组成晶体为条状,明显可以看到晶体本身被拉断的现象;图 8(b)、图 8(c)为花岗岩,晶体整体形态不明显,局部胶结物被拉断。如果表面剥落岩块为冲击造成的压缩应力波在自由表面反射成拉伸应力波所造成的,那么随着射流驱动压力的升高,冲击压力增大,反射流拉伸应力波的破坏作用将增加,剥落岩块的粒度也将增大。可是通过实验观测,随着压力的增加,在相同喷距下,切槽反而逐渐变得规则。如大理岩(白)在 200 MPa 的驱动压力射流冲击下,所试验最大 20 mm 不同喷距内,切槽基本上为规则长形切槽。由此判断,水射流破岩过程中剥落岩块主要是拉伸破坏。

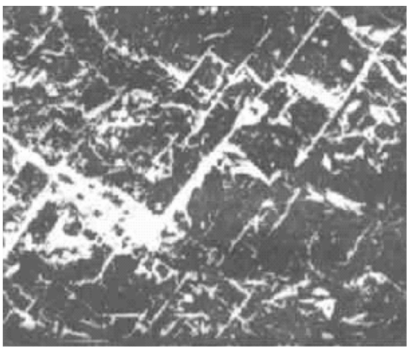


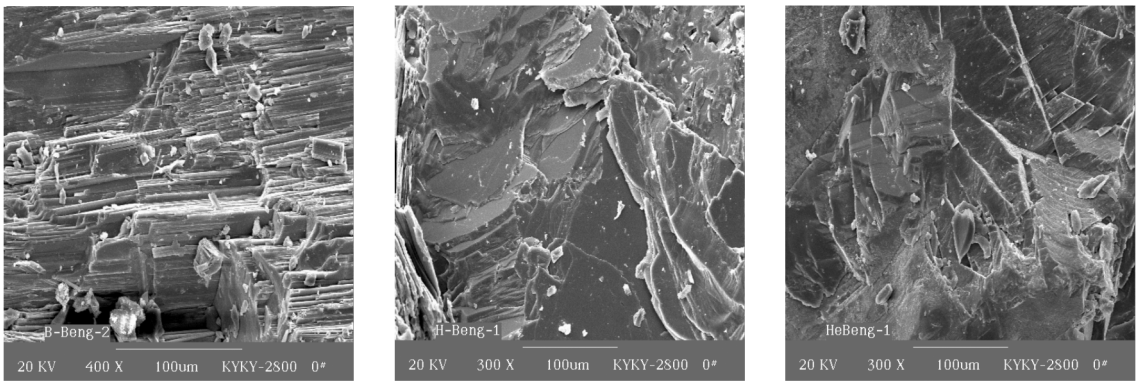
图 6 室内标准剪切试验薄片

Fig. 6 The slice of the rock by shear test



图 7 室内标准压缩试验薄片

Fig. 7 The slice of the rock by compression test



(a) White marble (b) Red granite (c) Black granite

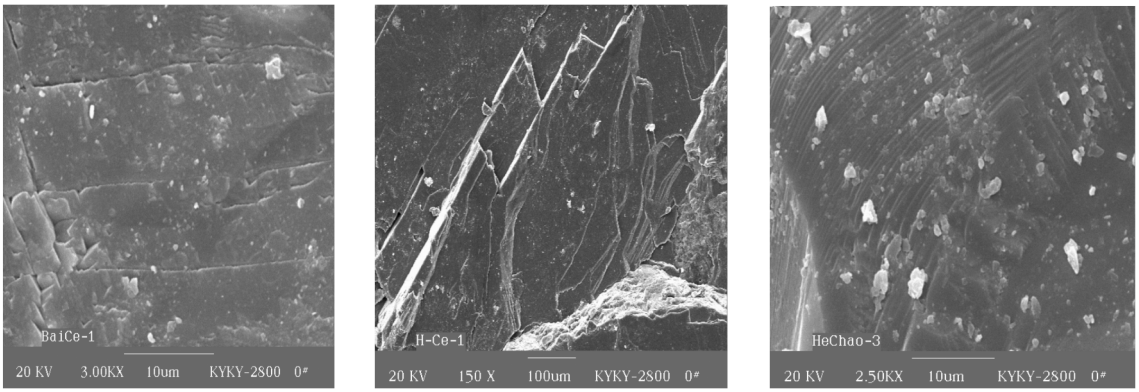
图 8 剥落岩块断口形貌特征

Fig. 8 The pattern of rock failure of dilapidated slice surface

3.3.2 切槽凹侧面断口

如果水射流产生冲击应力远高于岩石破坏强度,岩石表面岩块剥落现象并不明显,而是形成规则切槽,水射流切割过程中冲蚀出的岩石呈碎屑状。图 9(a)~图 9(c)为切槽侧面凹断口形貌特征。可以看出,岩石的断口面相对平整,其中图 9(a)、图 9(c)表面有明显平行擦痕,图 9(c)表面还有粉粒位于低洼处;图 9(b)沿晶面方向有大体方向相同的错裂。由此判断,水射流切割岩石过程中所形成的规则切槽侧面以剪切破坏为主。

水射流切槽断口扫描电镜分析表明,岩石在水射流作用下其破坏机制分为两大类,一类是拉伸破坏,另一类是剪切破坏。剥落岩块以穿晶断裂为主,其微观断裂机制是脆性拉伸破坏;切槽凹侧面主要是剪切错动,其微观破坏机制是剪脆性破坏。



(a) White marble　　(b) Red granite　　(c) Black granite

图 9　切槽凹侧面断口形貌特征

Fig. 9　The pattern of rock failure of slot concave and side surface

4　结　论

运用超高压射流数控自动万能切割机进行了淹没条件下水射流切割冲蚀岩石实验,对水射流切割岩石断口形貌进行了扫描电镜实验观测,分析了岩石的断裂形式。超高压射流切割岩石形成的切槽主要有长形规则和漏斗状两种形状。岩石在水射流作用下的破坏机制主要有拉伸破坏和剪切破坏两种,剥落岩块以穿晶断裂为主,其微观断裂机制是脆性拉伸破坏;切槽凹侧面主要是剪切错动,其微观破坏机制是剪脆性破坏。实验为水射流破岩机理分析提供了实测依据,有利于建立起岩石微观破坏机制和宏观断裂分析的桥梁,选择水射流作用下岩石破坏准则。

References:

[1] Shen Z H, Li G S, Wang R H. Application and Prospects of Water Jet Technology in Petroleum Engineering [J]. Journal of China Engineering Science, 2002, 4(12): 60－65. (in Chinese)
沈忠厚,李根生,王瑞和. 水射流技术在石油钻井中的应用前景 [J]. 中国工程科学,2002,4(12):60－65.

[2] Liao H L, Li G S, Xiong W. Development of Ultra-High Pressure Water Jet-Assisted Drilling Technology [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Suppl 2): 2583－2587. (in Chinese)
廖华林,李根生,熊　伟. 超高压射流辅助破岩钻孔研究进展 [J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(增 2):2583－2587.

[3] Xie H P, Chen Z D. Micro-Failure Mechanism Analysis for Rocks Failure Surface [J]. Journal of China Coal Society, 1989, 14(2): 57－66. (in Chinese)
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):57－66.

[4] Liu X M, Lee C F. Micro Failure Mechanism Analysis and Test Study for Rock Failure Surface [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(6): 509－513. (in Chinese)
刘小明,李焯芬. 岩石断口微观机理分析与实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报,1997,16(6):509－513

[5] Feng T, Xie X B, Pan C L, et al. Fracture Mechanism Analysis for Burst Rock with Electron Scanning Microscope [J]. Journal of Center South University of Technology, 1999, 30(2): 14－17. (in Chinese)
冯　涛,谢学斌,潘长良,等. 岩爆岩石断裂机理的电镜分析 [J]. 中南工业大学学报,1999,30(2):14－17.

[6] Tan Y A. Analysis of Fractured Face of Rock Burst with Scanning Electron Microscope and Its Progressive Failure Process [J]. Journal of Electron Microscope, 1989, 8(2): 41－47. (in Chinese)
谭以安. 岩爆岩石断口扫描电镜分析及岩爆渐进破坏过程 [J]. 电子显微学报,1989,8(2):41－47.

Micro-Failure Mechanism Analysis and Test Study for Rock Failure Surface under Water Jet Impact

LI Gen-Sheng[1], LIAO Hua-Lin[2]

(1. *Faculty of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing* 102249, *China*;
2. *College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Dongying* 257061, *China*)

Abstract: The rock breaking mechanism by water jets impact has not been clearly recognized as yet for complicated process of rock damage. The test of cutting rocks with submerged high-pressure water jets impact by a numerical controlling jet cutting machine are conducted. Then, the test for the pattern of failure surface of cutting slots and dilapidated slices are performed with scanning electron microscope (SEM) to study micro failure mechanism of rocks with water jets impinging. The result shows two types of rectangle shape and shallow funnel shape craters in the rock matrixes. The analysis shows that the micro-mechanism of rock failure due to water jets impingement is a brittle fracture in the condition of tensile and shearing stress.

Key words: water jets; rock cutting; breaking mechanism; SEM