中国科学: 物理学 力学 天文学 2017年 第47卷 第11期: 114608
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica physcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文 页岩油气高效开发专题

超临界CO_2直旋混合射流冲蚀岩石的损伤破坏机制

田守嶒*, 刘庆岭, 盛茂, 李根生, 王海柱

中国石油大学(北京), 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

*联系人, E-mail: tscsydx@163.com

收稿日期: 2016-12-22; 接受日期: 2017-04-10; 网络出版日期: 2017-09-05

国家自然基金重大计划项目(编号: 51490652)资助

摘要 超临界CO_2射流具有破岩门限压力低、效率高的特性. 直旋混合射流兼具直射流和旋转射流的破岩优势. 采用超临界CO_2流体调制形成直旋混合射流的方法, 有望大幅提高破岩效率. 为了揭示其独特的岩石损伤破坏机制, 分别选取页岩、白云岩与砂岩3种不同岩心, 开展超临界CO_2直旋混合射流冲蚀岩石实验, 并通过扫描电镜手段, 观测冲蚀孔的微观损伤形貌. 结果表明: 页岩冲蚀后几乎未发生宏观形变, 仅造成了表面微观损伤, 产生了微小裂隙; 白云岩及砂岩冲蚀后岩心表面产生了冲蚀孔, 矿物晶体自身及晶间发生断裂甚至破碎. 基于扫描电镜结果, 分析认为其岩石损伤机制可以分为两方面: 一方面, 直旋混合射流对岩石产生轴向冲击、径向拉伸与周向剪切的共同作用, 容易使岩石产生裂隙; 另一方面, 超临界CO_2具有低黏度、强扩散以及可压缩的性质, 可进入深层孔隙, 通过多种机制产生微裂隙并扩展已有裂缝, 最终造成岩石宏观破碎.

关键词 超临界CO_2, 直旋混合射流, 损伤机制, 扫描电镜

PACS: 91.60.Ed, 91.60.-x, 91.65.-n, 93.85.Fg

1 前言

随着油气勘探开发向深部地层发展, 深井和超深井数量不断增加[1]. 对于深井钻井, 其关键问题之一就是如何有效提高机械钻速, 从而降低钻井成本. 高压水射流技术作为一种提高机械钻速的方法, 目前已经广泛应用于钻井作业, 但其具有破岩门限压力高、破岩比能较大的局限[2–5]. 为了突破这一瓶颈, 国内外学者尝试通过提高射流压力形成超高压射流[6]、改变喷嘴结构[7,8]、引入新的流体介质[4]等方法, 发展了一系列新型射流技术, 取得了一定的提速效果.

直旋混合射流是通过喷嘴叶轮中心孔的直射流和叶轮加旋槽产生的旋转射流经混合段混合而成的一种新型射流[8]. 廖华林等人[5]、吴为等人[9]和罗宏斌等人[10]以水为流体介质研究了直旋混合射流的破岩规律与流场特性, 研究表明该射流综合了直射流破岩深度大与旋转射流破岩面积大的优势, 通过多种破坏方式对岩石进行冲蚀破碎, 降低破岩门限压力, 大幅提高射流的破岩效率. 超临界CO_2流体的密度接近于液体, 但具有接近于气体的低黏度和高扩散系数[4]. 近年来, 国内外学者提出了使用超临界CO_2作为钻井流体提高射流破岩能力的方法[4,11], 并通过理论分析、

引用格式: 田守嶒, 刘庆岭, 盛茂, 等. 超临界CO_2直旋混合射流冲蚀岩石的损伤破坏机制. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 114608
Tian S C, Liu Q L, Sheng M, et al. Mechanisms of rock breaking by swirling-round SC-CO_2 jet (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 114608, doi: 10.1360/SSPMA2016-00529

© 2017 《中国科学》杂志社

数值模拟、室内实验等手段开展了探索研究. 研究表明, 与水射流相比, 超临界CO_2射流破岩的门限压力较低, 破岩能力更强, 而且具有不污染储层的优势[4,12].

基于以上研究, 田守嶂等人[13,14]提出将超临界CO_2调制形成直旋混合射流, 并通过室内实验方法证明超临界CO_2直旋混合射流具有比超临界CO_2直射流以及直旋混合水射流更高的破岩效率. 如图1所示, 超临界CO_2直旋混合射流喷嘴主要由喷嘴本体和直旋叶轮组成, 其中喷嘴本体包含混合腔、收敛腔、扩散腔. 该喷嘴工作原理为: 超临界CO_2流体经过高压软管进入喷嘴后, 一部分通过叶轮中心孔形成直射流, 另一部分通过具有一定倾角的叶轮槽形成旋转射流, 两股射流在混合腔内混合, 经过收缩段, 最终由喷嘴出口喷出, 形成直旋混合射流.

扫描电镜具有放大倍数大、分辨率高、与原貌吻合度高等优点, 可真实反映试样原始表面微观形态, 是进行矿物鉴定、孔隙分布以及基质损伤分析等研究的重要手段[15–19], 近年来也被引入到水射流冲蚀损伤的研究中[20–22]. 本文借助扫描电镜手段, 对超临界CO_2直旋混合射流在页岩、白云岩、砂岩冲蚀表面进行直观观察, 分析和揭示了超临界CO_2直旋混合射流作用下多种岩石的损伤破坏形态与机制. 该研究结果有望加强和完善高压射流理论、为推动超临界CO_2直旋混合射流的工程应用提供可靠的理论基础及技术支撑.

2 射流冲蚀实验

2.1 实验装置

超临界CO_2直旋混合射流冲蚀实验是在中国石油大学(北京)高压水射流实验室的超临界CO_2射流综合实验系统上完成的. 如图2所示, 该实验系统是本文实验的载体, 主要包括冷箱、液态CO_2储罐、高压三柱塞泵、压力缓冲罐、热箱、围压釜体、两级除杂装置以及连接管线等设备. 射流喷嘴安装在压力缓冲罐下游、射流破岩釜体内部. 缓冲罐最高可为射流喷嘴提供80 MPa喷射压力, 围压釜最高模拟围压50 MPa, 模拟最高流体温度为100°C, 可模拟3000 m井深地层压力与温度环境.

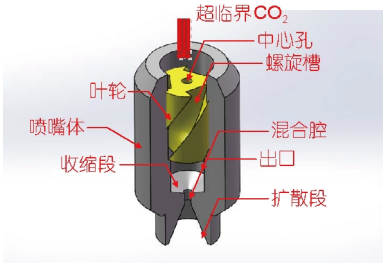


图 1 (网络版彩图)超临界CO_2直旋混合射流喷嘴示意图
Figure 1 (Color online) Structure of swirling-round SC-CO_2 jet nozzle.

图3所示为超临界CO_2射流冲蚀破岩实验流程图. 经过冷箱内的高压与低温水浴循环, 进入系统的CO_2流体变成液态, 并存储在液态CO_2储罐中, 便于柱塞泵的泵送; 液态CO_2柱塞泵泵送到压力缓冲罐中的盘管中, 压力不断上升, 并在高温水浴循环加热下转变为超临界态; 压力缓冲罐与高压软管、喷嘴连接, 超临界CO_2经过喷嘴, 在射流冲蚀破岩围压釜体内形成射流并冲蚀岩心靶件; 使用的CO_2变成气体经过回收管路、经过除杂装置重新进入冷箱, 再次冷却形成液态CO_2, 实现循环利用.

2.2 岩心试样

实验所用岩石样本均为野外采集, 分别为采自四川宜宾的页岩、北京房山的白云岩以及新疆准噶尔盆地的砂岩. 利用能谱分析方法, 对选用岩石样本的成分进行测定. 分析显示: 页岩为海相页岩, 含钙量较高, 矿物成分主要为方解石($CaCO_3$)、白云石($CaMg(CO_3)_2$)以及含钙、铁、钾、镁的硅酸盐矿物; 白云岩矿物成分主要为白云石($CaMg(CO_3)_2$), 同时含有一定量的硅酸盐基质; 砂岩矿物成分主要为由石英颗粒与方解石($CaCO_3$). 主要矿物成分测定表明: 选用的岩石样品符合页岩、砂岩及白云岩矿物组成, 能够反映这些岩性的性质. 同一类岩石在不同区域存在共性, 本文所观察到的实验现象及得到的破岩机制可为分析该类岩石提供参考. 如图4所示, 切割岩样制成直径为25 mm、长度为50–80 mm的柱状岩心, 岩石力学参数如表1所示. 对于页岩, 岩样取心均为垂直层理取心, 射流方向垂直于层理方向, 表1给出的数据为平行于射流方向测到的参数.

使用地质锤将标准岩心柱敲击分为两部分, 可以使岩心沿着岩石基质颗粒断面发生自然的晶体间断裂, 尽最大可能保证对比试验的岩心性质统一, 避免使用切割机对切割面造成的晶体断裂等外力伤害. 断



图 2 (网络版彩图)超临界CO_2射流破岩综合实验系统
Figure 2 (Color online) SC-CO_2 jet-eroding-rock experiment set-up.

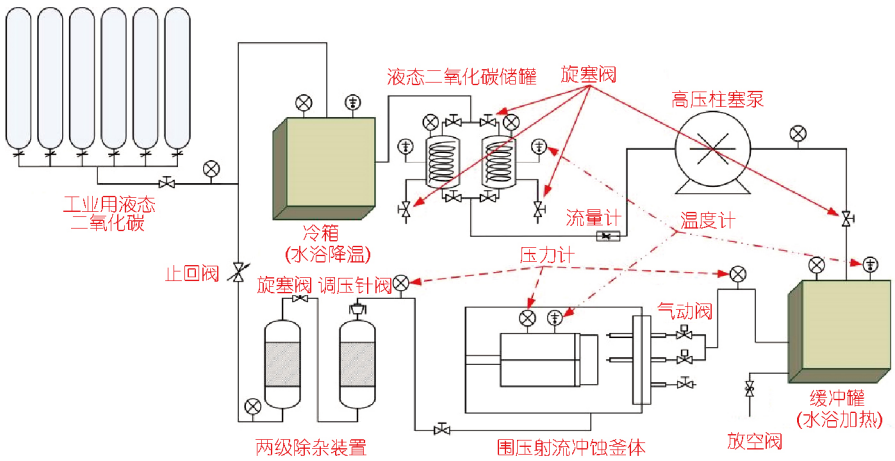


图 3 (网络版彩图)超临界CO_2循环实验系统示意图
Figure 3 (Color online) Flow diagram of the SC-CO_2 jet rock-erosion experiment.

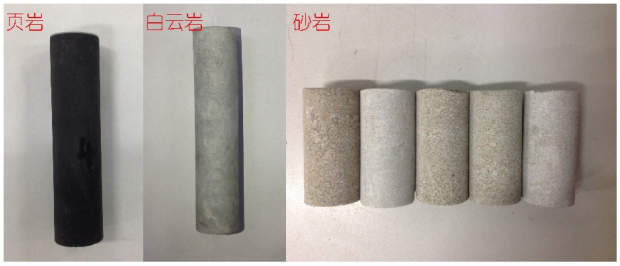


图 4 (网络版彩图)页岩、白云岩及砂岩岩心试样
Figure 4 (Color online) Core samples of shale, dolomite and sandstone.

开的岩心, 一半用于超临界CO_2射流冲蚀实验, 另一半则用作对比分析. 制备好的3种岩心试样均在相同条件下进行冲蚀实验, 根据高压水射流已有研究与现场应用, 设计了本研究实验方案, 如表2所示. 超临界CO_2循环过程中冷箱内温度不断升高, 缓冲罐内温度不断降低. 若实验时间过长则无法保证持形成持续的超临界CO_2射流, 因此本实验射流冲蚀时间设定为3 min. 冲蚀结束后, 砂岩和白云岩均形成了明显冲蚀孔, 表明超临界CO_2已经扩散进入岩石内部孔隙.

2.3 喷嘴

图5所示为室内实验所采用的直旋混合射流喷嘴, 各部分参数如图6和表3所示. 喷嘴由碳化钨材料制成, 可有效防止高速气蚀以及CO_2的化学反应侵蚀.

表 1 岩心岩石力学参数
Table 1 Rock mechanics parameters of the samples

编号	类型	密度 (g/cm^3)	杨氏模量 (GPa)	泊松比	抗压强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)
1	页岩	2.59	36.5	0.190	351.4	14.4
2	白云岩	2.92	50.4	0.266	216.1	9.3
3	砂岩	2.40	9.7	0.233	110.7	6.1

表 2 实验方案
Table 2 Experimental scheme

射流温度 (°C)	围压 (MPa)	射流压力 (MPa)	喷射距离 (mm)	喷射时间 (min)
55	10	40	3	3



图 5 (网络版彩图)超临界CO_2直旋混合射流喷嘴
Figure 5 (Color online) Swirling-round SC-CO_2 jet nozzle.

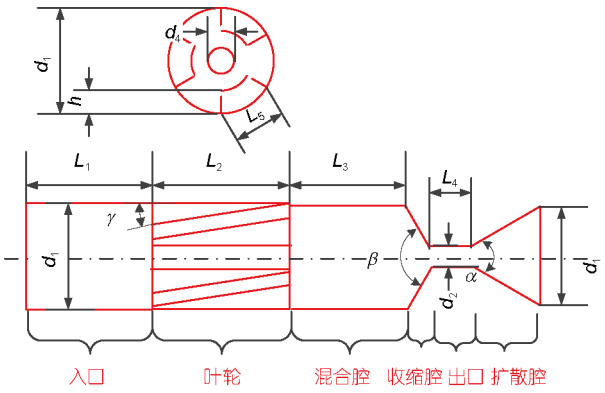


图 6 (网络版彩图)超临界CO_2直旋混合射流喷嘴平面示意图
Figure 6 (Color online) Plane sketch of swirling-round SC-CO_2 jet nozzle.

2.4 扫描电镜与测试方法

岩石孔隙特征的扫描电镜分析是在中国石油大学(北京)微结构能源材料实验室的Hitachi SU 8010型高分辨冷场发射扫描电子显微镜下完成的, 如图7所示. 该电镜设备具有超高分辨率、优秀的减速模式成像能力等特点, 获得二次电子图像可真实有效地反映岩心样品表面微观结构, 通过观察冲蚀孔或冲蚀面微观特征, 分析与揭示岩石基质损伤破坏形态与机制以及孔隙变化机制.

表 3 超临界CO_2直旋混合射流喷嘴结构参数
Table 3 Structural parameters of swirling-round SC-CO_2 jet nozzle.

参数	值	参数	值
d_1	6 mm	h	1.5 mm
L_1	6 mm	L_3	5 mm
d_4	1.5 mm	β	120°
γ	30°	d_2	1 mm
L_2	6 mm	L_4	2 mm
L_5	4 mm	α	60°



图 7 (网络版彩图)SU 8010型扫描电镜
Figure 7 (Color online) Photo of Hitachi SU 8010 ultra-high resolution scanning electron microscope.

因为岩心强度不同, 有的岩心表面可形成冲蚀孔眼, 有的则不能. 冲蚀实验完成后, 需要暂时将其放置于相同压力与温度条件下的围压釜中保存, 待进行扫描电镜实验时取出, 来保持冲蚀实验时原样. 进行扫描实验前, 需要按要求制备扫描试样. 将冲蚀的岩心

取出后, 需要观察的一面切下厚度约为4 mm的薄片, 形成孔眼的薄片还需要从中间过冲蚀孔切开, 以便观察岩心冲蚀孔断面. 制片的过程中不允许与水接触, 冲蚀面不应与液体及身体接触, 避免外部因素造成观察面的变化. 同时尽可能缓慢切割, 避免刀具剧烈震动产生较多微裂隙.

将切片在样品台水平放置并用导电胶固定, 再将样品台放入喷涂箱中进行抽真空与喷涂金膜的操作, 增加试样表面的导电性. 如图8所示, 达到所设定真空度与喷涂要求后取出样品台, 并在岩心上的待观察位置做标记, 然后将样品台放入扫描电镜观察舱室内. 一组岩心试样的整个准备过程需要约3–5 h.

3 实验结果

3.1 岩心冲蚀实验结果

每种岩性岩心分别进行3组射流冲蚀实验, 总共进行了9组, 获得18块冲蚀岩心. 页岩胶结致密, 抗拉/抗压强度较大, 渗透率极低, 射流冲蚀后仅留下冲蚀痕迹, 岩石未发生宏观形变(图9(a)). 白云岩抗拉/抗压强度低于页岩, 射流在白云岩表面产生了一定深度的冲蚀孔(图9(b)). 相对于页岩与白云岩, 砂岩胶结疏松, 强度最低, 射流冲蚀表面产生了深度较大的冲蚀孔(图9(c)).

3.2 损伤机制分析

将冲蚀后的岩心及对比岩心均进行切片, 进行扫描电镜观察. 冲蚀后岩心切片观察面反映岩石破坏微观形态, 使用对比岩心切片近似反映射流冲蚀前岩石表面微观形态. 参考典型岩石断裂图谱[23–26], 对扫描电镜图像进行分析.

3.2.1 页岩

图10所示为未经超临界CO_2直旋混合射流冲蚀的页岩表面SEM图像. 页岩表面致密, 沉积特征显著, 具有层理构造, 矿物晶体在基质内均匀散布, 很难观察到垂直于页岩层理方向的孔隙(图10(a)). 黏土矿物、有机质及碎屑等大小相近, 无显著分界. 进一步放大至2000倍, 发现未冲蚀区域矿物晶体断面的“毛刺”基本完好无损, 表明岩心敲断的方法没有对页岩表面造成机械损伤(图10(b)).

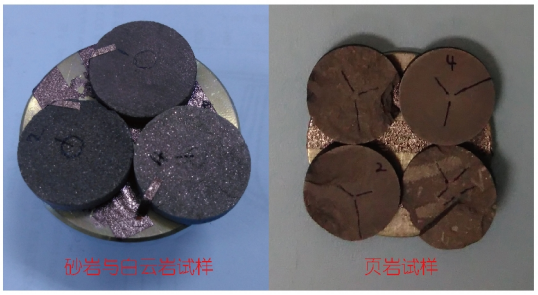


图 8 (网络版彩图)扫描电镜实验试样

Figure 8 (Color online) Core slices of for SEM observation.

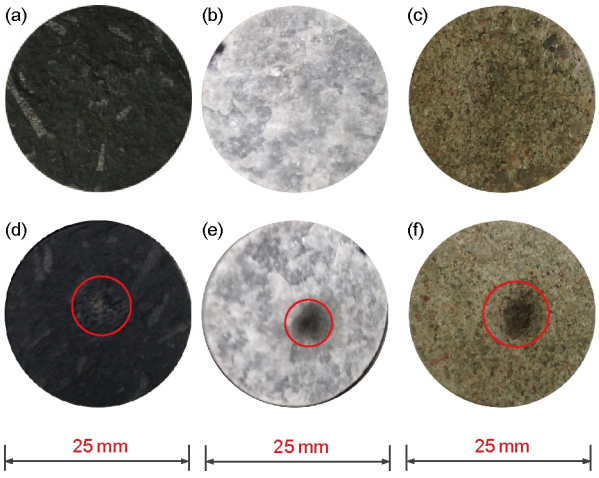


图 9 (网络版彩图)超临界CO_2直旋混合射流对不同岩心冲蚀效果. (a) 页岩-未冲蚀; (b) 白云岩-未冲蚀; (c) 砂岩-未冲蚀; (d) 页岩-冲蚀后; (e) 白云岩-冲蚀后; (f) 砂岩-冲蚀后

Figure 9 (Color online) Swirling-round SC-CO_2 jet erosion performance on different rocks. (a) Fresh shale core; (b) fresh dolomite core; (c) fresh sandstone core; (d) eroded shale core; (e) eroded dolomite core; (f) eroded sandstone core.

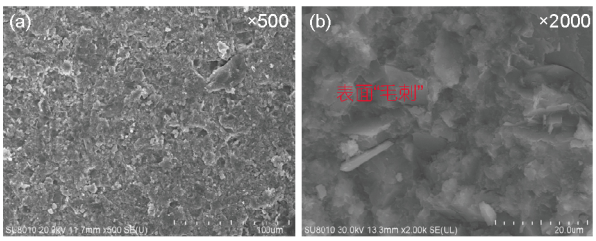


图 10 超临界CO_2直旋混合射流冲蚀前页岩表面微观形态. (a) 矿物晶体在基质内均匀散布; (b)矿物晶体断面“毛刺”完好无损

Figure 10 SEM images showing microstructure on shale before swirling-round SC-CO_2 jet erosion. (a) Mineral crystals are dispersed evenly in the matrix; (b) the mineral crystal cross section is intact.

图11所示为超临界CO_2直旋混合射流冲蚀后的页岩表面破坏的SEM图像. 页岩强度较大, 超临界CO_2直旋混合射流冲蚀后仅造成了表面的微观损伤, 形成了微小裂隙. 在冲蚀中心区域, 基质结构被破坏, 矿物晶体在射流冲击下发生断裂和破碎, 表面遍布颗粒碎屑(图11(a)). 基质表面裸露多条微小裂纹(图11(a)和(b)). 矿物颗粒被剥落, 形成微小孔眼及裂纹(图11(c)). 在冲蚀区域边缘, 表面呈现冲蚀痕迹(图11(d)). 观察结果表明, 超临界CO_2直旋混合射流破坏页岩方式为: 高速射流冲蚀, 破坏基质结构; 高速射流冲蚀, 造成矿物晶体断裂或剥落; 扩散进入基质, 产生微小裂隙并促进基质与颗粒胶结薄弱处发生破坏.

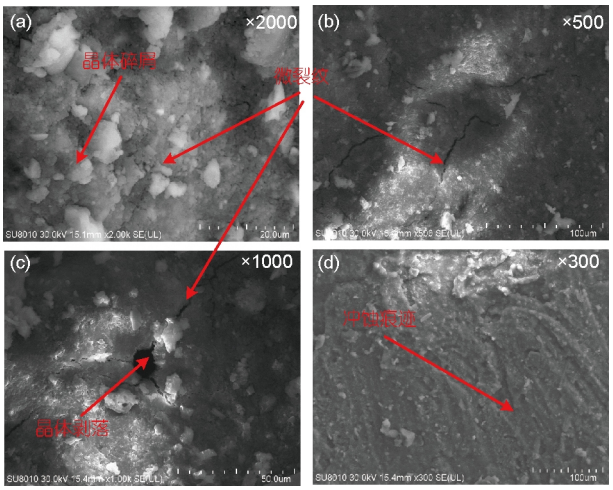


图 11 超临界CO_2直旋混合射流冲蚀后页岩破坏微观形态. (a) 表面遍布颗粒碎屑; (b) 基质表面裸露多条微小裂纹; (c) 矿物颗粒剥落后形成微小孔眼及裂纹; (d) 冲蚀区域边缘表面呈现冲蚀痕迹

Figure 10 SEM images showing microstructure on shale after swirling-round SC-CO_2 jet erosion. (a) Surface is covered with crystals debris; (b) there are several tiny cracks on the surface; (c) the mineral particles are peeled off, forming tiny holes and cracks; (d) erosion marks show on the edge of erosion zone.

3.2.2 白云岩

图12所示为未经超临界CO_2直旋混合射流冲蚀的白云岩表面的扫描电镜图像. 白云岩矿物颗粒排列紧密, 晶体断面完整, 棱角明显(图12(a)), 表明断面为晶体之间自然断裂, 未受到机械破坏. 放大至5000倍发现颗粒之间胶结紧密, 很难观察到孔隙.

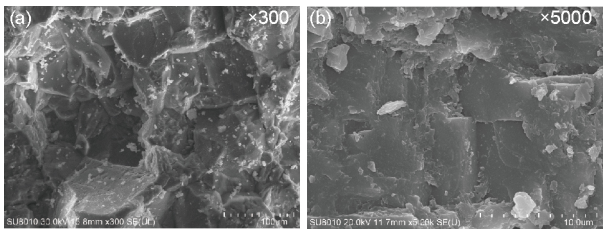


图 12 超临界CO_2直旋混合射流冲蚀前白云岩表面微观形态. (a) 颗粒排列紧密, 晶体断面完整; (b) 颗粒之间胶结紧密

Figure 12 SEM images showing microstructure on dolomite before swirling-round SC-CO_2 jet erosion. (a) The particles are arranged closely and the crystal section is intact; (b) cementation between particles is tight.

图13所示为超临界CO_2直旋混合射流冲蚀后的白云岩表面破坏SEM图像. 超临界CO_2直旋混合射流使白云岩表面产生了较为明显的冲蚀孔. 在冲蚀孔中心(图13(a))及侧面(图13(b)), 矿物晶体被射流冲碎, 表面遍布晶体碎屑. 此外, 晶体在射流的冲击下发生解理, 形成多个阶梯状的平行断裂面(图13(c)). 同时, 射流的冲刷作用下, 晶体之间的胶结物被剥离颗粒表面, 露出规模不同的晶间裂缝(图13(c)和(d)). 观察结果表明, 超临界CO_2直旋混合射流直旋混合射流破坏白云岩方式为: 高速射流冲蚀, 造成矿物晶体发生断裂与破碎; 射流冲蚀, 剥离晶体表面胶结物, 使颗粒间发生断裂; 扩散进入基质和微小缝隙, 进一步促进颗粒间薄弱点发生破坏.

3.2.3 砂岩

图14(a)和(b)所示为未受到射流冲蚀的砂岩原貌扫描电镜图像. 与页岩和白云岩相比, 砂岩胶结强度较低, 矿物颗粒排布疏松, 未冲蚀表面可见胶结物上分布有孔隙, 这有助于提高射流对胶结物的破坏效率.

图15所示为超临界CO_2直旋混合射流冲蚀后的砂岩表面破坏SEM图像. 超临界CO_2直旋混合射流使砂岩冲蚀表面产生了较深的冲蚀孔. 在冲蚀孔中心区域(图15(a)), 矿物晶体被射流冲碎, 表面遍布晶体碎屑. 晶体之间胶结结构在射流的冲击作用下发生破坏, 晶体颗粒被剥落, 产生规模不同的裂隙(图15(b)和(c)). 此外, 晶体在射流的冲击下发生解理, 形成多个平行断裂面(图15(c)). 同时, 射流的冲刷作用下, 晶体之间的胶结物被剥离颗粒表面, 露出规模不同的晶间裂缝(图15(c)和(d)). 观察结果表明, 超临界CO_2直旋混合射流对砂岩的损伤机制与白云岩类似, 区别在于砂岩胶结比白云岩疏松, 射流更易于破坏胶结结构, 产生裂隙, 剥落晶体颗粒.

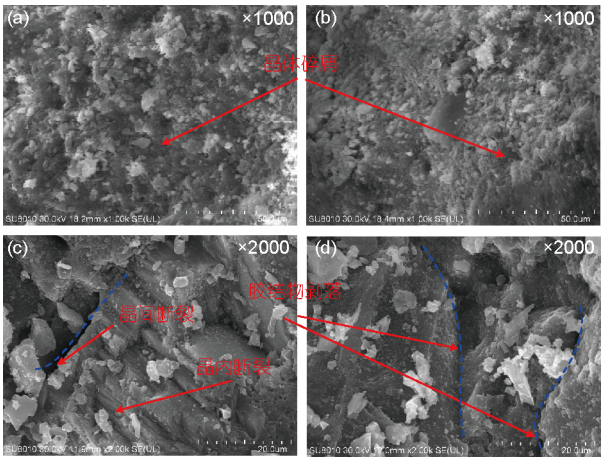


图 13　(网络版彩图)超临界CO_2直旋混合射流冲蚀前白云岩破坏微观形态. (a), (b) 表面遍布晶体碎屑; (c) 多个阶梯状的平行断裂面; (d) 胶结物剥离, 露出晶间裂缝

Figure 13　(Color online) SEM images showing microstructure on dolomite after swirling-round SC-CO_2 jet erosion. (a), (b) Surface is covered with crystals debris; (c) multiple ladder-like parallel fracture surfaces; (d) the cement is stripped off, and the intergranular fracture is revealed.

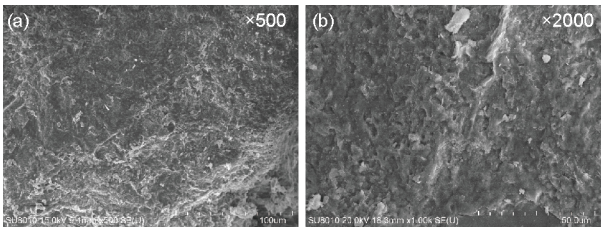


图 14　超临界CO_2直旋混合射流冲蚀前砂岩表面微观形态. (a) 矿物颗粒排布疏松; (b) 胶结物上分布有孔隙

Figure 14　SEM images showing microstructure on sandstone before swirling-round SC-CO_2 jet erosion. (a) Cementation between mineral crystals is loose; (b) there are pores on the cement.

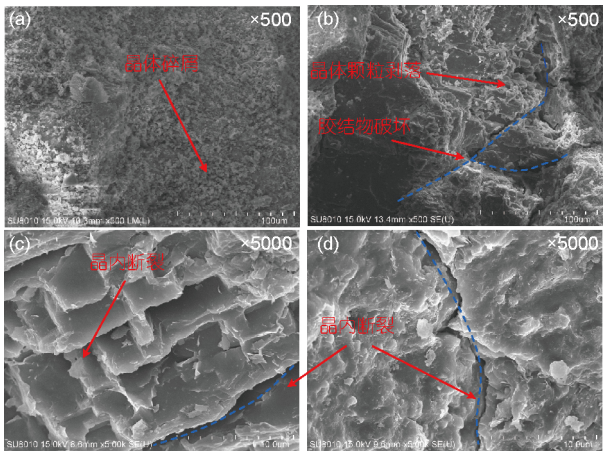


图 15　(网络版彩图)超临界CO_2直旋混合射流冲蚀后砂岩破坏微观形态. (a) 表面遍布晶体碎屑; (b) 胶结物破坏, 晶体颗粒被剥落; (c) 晶内断裂, 形成多个平行断裂面; (d) 晶间断裂, 产生晶间裂缝

Figure 15　(Color online) SEM images showing microstructure on sandstone after swirling-round SC-CO_2 jet erosion. (a) Surface is covered with crystals debris; (b) the cement breaks and the crystal particles are peeled off; (c) there are many parallel fracture planes in the crystalline fracture; (d) the intragranular fracture is revealed.

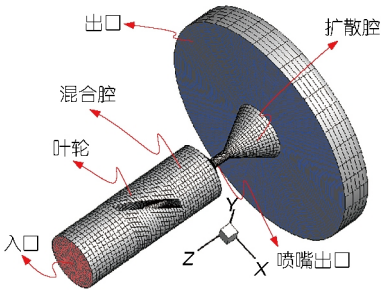


图 16　(网络版彩图)三维几何模型及网格划分

Figure 16　(Color online) The physical model and mesh generation.

3.3　岩石损伤破坏机制分析

基于以上3种岩石损伤现象, 从两个方面分析超临界CO_2直旋混合射流岩石损伤破坏机制.

(1) 直射流与旋转射流的双重冲击作用

直旋混合射流通过直射流与旋转射流共同作用岩石. 考虑到本实验条件下, 无法采用实验手段测试超临界CO_2直旋混合射流流场, 本文采用数值模拟手段分析射流速度分布特征. 几何模型与实验采用喷嘴一致(图6, 表3), 同时包括喷嘴外至岩样表面距离区域. 网格划分采用结构化网格(图16). 数值模型控制方程参见文献[27]. 模型入口与出口均采用压力边界, 与实验条件一致(表2), 其余壁面假设为无滑移绝热壁面条件. 模拟得到速度场剖面如图17所示, 射流进入分散腔后速度开始分散, 以超过100 m/s的速度冲击壁面. 在冲击壁面附近(距离0.5 mm), 射流各向速度(轴向、径向、切向)沿径向分布如图18所示. 根据三向速度相对大小, 射流沿径向可以分为三个区域: 直射流区域、旋转射流区域与外围区域. 直射流区域在喷嘴中心线附近, 轴向速度较大, 沿径向迅速衰减, 切向和径向速度相对较小; 旋转射流区域在距喷嘴轴线一定距离, 径向和切向速度逐步增大, 轴向速度进一步衰减;

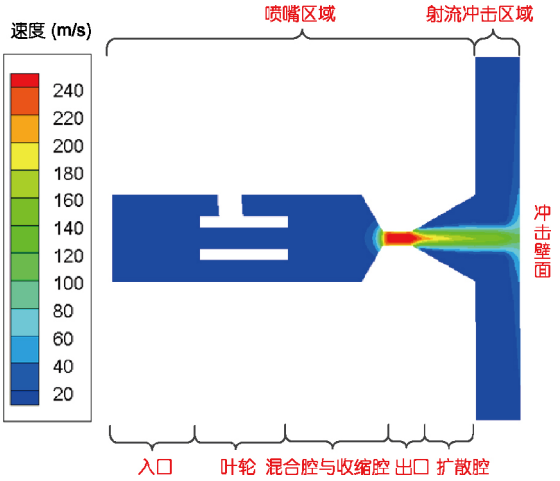


图 17 (网络版彩图)超临界CO_2直旋混合射流速度场剖面
Figure 17 (Color online) Velocity contours of swirling-round SC-CO_2 flow field profile.

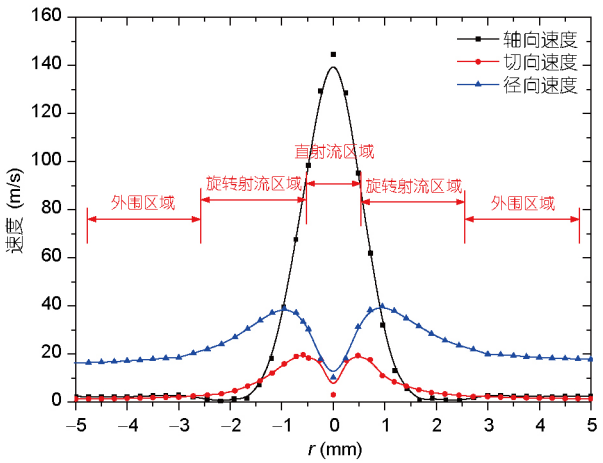


图 18 (网络版彩图)轴向、径向与切向速度径向分布(距冲击壁面0.5 mm)
Figure 18 (Color online) Axial, radial, and tangential velocity of SC-CO_2 versus distance from nozzle-axis when the distance to impinging wall is 0.5 mm.

外围区外围区域三向速度逐步衰减为零.

流场分析表明, 对于超临界CO_2直旋混合射流, 直射流能量集中在喷嘴中心线附近, 沿径向迅速衰减, 强旋射流作用在离喷嘴中心线径向一定距离. 直射流正向冲击破坏岩石基质结构, 使得晶体矿物颗粒发生断裂甚至破碎. 强旋射流作用在离喷嘴中心线径向一定距离, 射流质点具有三维速度, 即轴向速度、切向速度与径向速度. 强旋射流作用对岩石施加径向“张”力和周向“剪”力, 加上正向冲击产生的破碎力, 晶体颗粒胶结结构被破坏, 晶体自身发生断裂或剥落. 宏观尺度上, 岩体产生裂隙和裂纹, 扩展的微裂纹不断汇聚、连通, 逐步形成破碎坑.

(2) 超临界CO_2的强扩散作用

如表4所示[28], 超临界流体性质界于气态和液态之间, 处于较低的超临界压力与温度时, 其密度接近液体, 黏度和扩散系数接近于气体[29]. 此外, 超临界CO_2还具有可压缩性以及表面张力接近于零的性质. 因此, 超临界CO_2可以进入任何大于CO_2分子的深层孔隙与微裂隙中, 传递流体静压力, 通过相态变化机制对孔隙内壁持续产生波动压力, 使颗粒或者颗粒间胶结物在薄弱点发生拉伸破坏, 促使矿物颗粒发生剥落与断裂[30]. 在拉伸应力作用下, 大量微裂隙并扩展已有裂缝, 最终使岩石产生宏观破碎.

4 结论

页岩抗拉/抗压强度较大, 射流冲蚀后仅留下冲蚀痕迹, 岩石未发生宏观形变. 白云岩抗拉/抗压强度低于页岩, 射流在白云岩表面产生了一定深度的冲蚀孔. 相对于页岩与白云岩, 砂岩胶结疏松, 强度最低, 射流冲蚀表面产生了深度较大的冲蚀孔.

超临界CO_2直旋混合射流破坏页岩方式为: 高速射流冲蚀破坏基质结构; 射流冲蚀造成矿物晶体断裂或剥落; CO_2扩散进入基质, 产生微小裂隙并促进基质与颗粒胶结薄弱处发生破坏.

超临界CO_2直旋混合射流破坏白云岩与砂岩方式为: 高速射流冲蚀造成矿物晶体发生断裂与破碎; 射流冲蚀剥离晶体表面胶结物, 使颗粒间发生断裂; CO_2

表 4 不同相态物质的物理特性[28]
Table 4 Physical parameters of material in different phases [28]

物理特性	气体(常温常压)	超临界流体	液体(常温常压)
(1) 密度 (g/cm^3)	0.0006–0.002	0.2–0.9	0.6–1.6
(2) 黏度 (mPa s)	10^{-2}	0.03–0.1	0.2–3.0
(3) 扩散系数 (cm^2/s)	0.1–0.4	(2–7)×10^{-4}	(0.2–3)×10^{-5}

扩散进入基质和微小缝隙, 进一步促进颗粒间薄弱点发生破坏. 砂岩胶结比白云岩疏松, 射流更易于破坏胶结结构, 产生裂隙, 剥落晶体颗粒.

超临界CO_2直旋混合射流岩石损伤机制可以分为两个方面: 一方面为直射流与旋转射流双重冲击作用; 另一方面, 超临界CO_2具有低黏度、强扩散以及可压缩的性质, 可通过多种机制产生大量微裂隙并扩展已有裂缝, 最终使岩石产生宏观破碎.

参考文献

1 Yan H B, Li M P, Zhang C J, et al. Research and application of cement slurry for long cementing section in ultra-deep well in Sichuan (in Chinese). Drilling Fluid Compl Fluid, 2011, 28: 55–57 [严海兵, 李美平, 张成金, 等. 四川超深井长封固水泥浆性能研究与应用. 钻井液与完井液, 2011, 28: 55–57]

2 Butler T, Fontana P. A method for combined jet and mechanical drilling. In: Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans: Society of Petroleum Engineers, 1990

3 Kolle J, Otta R, Stang D. Laboratory and field testing of an ultra-high-pressure, jet-assisted drilling system. In: Proceedings of the SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam: Society of Petroleum Engineers, 1991

4 Koll J, Marvin M. Jet-Assisted Drilling With Super Critical Carbon Dioxide. Reprot, Tempress Technologies, Houston, 2000

5 Liao H L, Li G S, Li J B, et al. Flow field study on integrating straight and swirling jets for radial horizontal drilling (in Chinese). J China Coal Soc, 2012, 37: 1895–1900 [廖华林, 李根生, 李敬彬, 等. 径向水平钻孔直旋混合射流喷嘴流场特性分析. 煤炭学报, 2012, 37: 1895–1900]

6 Li G S, Shen Z H, Xu Y J, et al. Advances in basic study on ultra-high pressure water jet assisted drilling (in Chinese). Pet Drilling Tech, 2005, 33: 20–23 [李根生, 沈忠厚, 徐依吉, 等. 超高压射流辅助钻井技术研究进展. 石油钻探技术, 2005, 33: 20–23]

7 Li G S, Shi H Z, Shen Z H, et al. Mechanisms and tests for hydraulic pulsed cavitating jet assisted drilling (in Chinese). Pet Explor Dev, 2008, 35: 239–243 [李根生, 史怀忠, 沈忠厚, 等. 水力脉冲空化射流钻井机理与试验. 石油勘探与开发, 2008, 35: 239–243]

8 Buckman Sr W G, Dotson T L, Mcdaniels M D, et al. Nozzle for jet drilling and associated method. US Patent, 6668948, 2003-12-30

9 Wu W, Li G S, Niu J L, et al. Experimental study on rock breaking parameters of combined swirling and round jet (in Chinese). Fluid Machinery, 2009, 37: 1–6 [吴为, 李根生, 牛继磊, 等. 直旋混合射流破岩钻孔参数试验研究. 流体机械, 2009, 37: 1–6]

10 Luo H B, Li G S, Song J, et al. Experimental study on rock breaking mechanism of coaxial swirling dual-jet (in Chinese). Chin J Rock Mech Eng, 2008, 27: 2754–2759 [罗洪斌, 李根生, 宋剑, 等. 同轴旋转双射流冲蚀岩石机制与实验研究. 岩石力学与工程学报, 2008, 27: 2754–2759]

11 Shen Z H, Wang H Z, Li G S. Feasibility analysis of coiled tubing drilling with supercritical carbon dioxide (in Chinese). Pet Explor Dev, 2010, 37: 743–747 [沈忠厚, 王海柱, 李根生. 超临界CO_2连续油管钻井可行性分析. 石油勘探与开发, 2010, 37: 743–747]

12 Wang H, Li G, Shen Z, et al. Experiment on rock breaking with supercritical carbon dioxide jet. J Pet Sci Eng, 2015, 127: 305–310

13 Tian S C, Zhang Q L, Li G S, et al. Experimental study on rock-erosion features with combined swirling and round jet of supercritical carbon dioxide (in Chinese). Explosion Shock Waves, 2016, 36: 189–197 [田守嶒, 张启龙, 李根生, 等. 超临界CO_2直旋混合射流破岩特性的实验研究. 爆炸与冲击, 2016, 36: 189–197]

14 Tian S, Zhang Q, Li G, et al. Experiment on rock-erosion features with combined swirling and round jet of supercritical carbon dioxide under the ambient pressure condition. Atomization & Sprays, 2015, 26: 259–271

15 Sondergeld C H, Ambrose R J, Rai C S, et al. Micro-structural studies of gas shales. In: Proceedings of the SPE Unconventional Gas Conference. Pittsburgh: Society of Petroleum Engineers, 2010

16 Slatt R M, O'Brien N R. Pore types in the Barnett and Woodford gas shales: Contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks. Bulletin, 2011, 95: 2017–2030

17 Ji L, Zhang T, Milliken K L, et al. Experimental investigation of main controls to methane adsorption in clay-rich rocks. Appl Geochem, 2012, 27: 2533–2545

18 Curtis M E, Sondergeld C H, Ambrose R J, et al. Microstructural investigation of gas shales in two and three dimensions using nanometer-scale resolution imaging. Bulletin, 2012, 96: 665–677

19 Cai C, Li G, Huang Z, et al. Experimental study of the effect of liquid nitrogen cooling on rock pore structure. J Natural Gas Sci Eng, 2014, 21: 507–517

20 Zeng J, Kim T. Material removal of polycrystalline ceramics by a high pressure abrasive water jet—A SEM study. Int J Water Jet Technol, 1991, 1: 65–71

21 Li G S, Liao H L. Micro-failure mechanism analysis and test study for rock failure surface under water jet impact (in Chinese). Chin J High

Pressure Phys, 2005, 19: 337–342 [李根生, 廖华林. 超高压水射流冲蚀切割岩石断口微观断裂机理实验研究. 高压物理学报, 2005, 19: 337–342]
22 Sun Z, Kang X, Wang X. Experimental system of cavitation erosion with water-jet. Mater Design, 2005, 26: 59–63
23 Russo M. Analysis of Fractures Utilizing the SEM. Metallography in Failure Analysis. New York: Springer, 1978. 65–95
24 Nemati K M. Fracture analysis of concrete using scanning electron microscopy. Scanning, 1997, 19: 426–430
25 Li X W, Lan Y R, Zou J X. Rock fracture analysis (in Chinese). China Univ Mining Tech, 1983, 1: 18–24 [李先炜, 兰勇瑞, 邹俊兴. 岩石断口分析. 中国矿业大学学报, 1983, 1: 18–24]
26 Cui Y X, Wang C L. Metal Fracture Analysis (in Chinese). Harbin: Harbin Institute of Technology, 1998. 52–73 [崔约贤, 王长利. 金属断口分析. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998. 52–73]
27 Tian S, He Z, Li G, et al. Influences of ambient pressure and nozzle-to-target distance on SC-CO_2 jet impingement and perforation. J Nat Gas Sci Eng, 2016, 29: 232–242
28 Liao C H, Huang Z R. Supercritical CO_2 Fluid Extraction Technology (in Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 2005. 17–22 [廖传华, 黄振仁. 超临界CO_2流体萃取技术. 北京: 化学工业出版社, 2005. 17–22]
29 Han B X. Science and Technology of Supercritical Fluid (in Chinese). Beijing: China Petrochem Press, 2005. 2–5 [韩布兴. 超临界流体科学与技术. 北京: 中国石化出版社, 2005. 2–5]
30 He Z, Li G, Tian S, et al. SEM analysis on rock failure mechanism by supercritical CO_2 jet impingement. J Pet Sci Eng, 2016, 146: 111–120

Mechanisms of rock breaking by swirling-round SC-CO_2 jet

TIAN ShouCeng*, LIU QingLing, SHENG Mao, LI GenSheng & WANG HaiZhu

State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

Supercritical carbon dioxide (SC-CO_2) jet is characterized by low rock breaking threshold pressure and high rock breaking rate. Swirling-round jet, taking the advantages of both swirling and round jet, enjoys high rock breaking efficiency. By integrating swirling-round jet and SC-CO_2, it is prospective for swirling-round SC-CO_2 jet to improve rock erosion efficiency further. Rock damage mechanisms of swirling-round SC-CO_2 jet are investigated by means of rock-erosion experiments and scanning electron microscope (SEM) observation. The selected core samples include shale, dolomite as well as sandstone. For shale, no macro-deformation occurs and microscopic damage is discovered, forming tiny cracks. For dominate and sandstone, erosion holes form, and crystal particle cleavage as well as inter-particle rupture occur. According to the observation results, the rock damage mechanisms of swirling-round SC-CO_2 jet are divided into two aspects. On the one hand, swirling-round SC-CO_2 jet breaks rock by combining axial impinging, radical tension and circumferential shear. On the other hand, with characteristics of low viscosity, compressibility and strong diffusivity, numerous micro fractures are caused by SC-CO_2, and existing fractures are expanded, which led to fractures joining together and massive rocks split off.

supercritical carbon dioxide, swirling-round jet, rock damage mechanism, scanning electron microscope

PACS: 91.60.Ed, 91.60.-x, 91.65.-n, 93.85.Fg

doi: 10.1360/SSPMA2016-00529