

碳酸盐岩储层酸处理降低破裂压力研究综述

刘林森¹ 陈红军¹ 刘超¹ 付珍² 李进³

(1. 西南石油大学国家重点实验室压裂酸化实验室 2. 西南石油大学建筑工程学院)

(3. 中国石油西南油气田公司输气管理处)

摘要 我国具有丰富的低渗透油气资源,压裂酸化改造是提高低渗透油气藏开采效果的重要手段,而地层破裂是储层压裂酸化改造成功的关键。在低渗透储层的改造过程中,由于储层埋藏深、构造应力异常、泥质含量高等原因,某些井地层破裂压力异常高,导致了施工失败。本文以碳酸盐岩储层为研究对象,通过对碳酸盐岩岩石力学强度的本质分析,综述了岩石的矿物组成、结构特征、构造、水或者化学溶液作用以及缺陷对碳酸盐岩岩石力学性质的影响。为酸处理降低岩石力学强度,从而降低地层破裂压力提供了重要理论依据。

关键词 酸化 综述 低渗透 压裂酸化 异常高破裂压力

DOI: 10.3969/j.issn.1007-3426.2010.03.020

截至2004年^[1],我国探明的低渗透油藏原油储量 53.2×10^8 t,发现的低渗透气藏储量 $(1.2 \sim 1.5) \times 10^{12}$ m³,压裂、酸化是这类储层投产的重要手段。在这类储层的改造过程中,某些井层由于破裂压力异常高,导致了施工失败。塔里木油田^[2~3]、澳大利亚^[4]、美国^[5]等均有这种情况。异常高破裂压力出现的原因主要有:随着最小水平主应力的增加,地层破裂压力显著增加^[6];Shao^[7]数值模拟表明软地层的破裂压力高于刚性大的地层破裂压力,随着储层的泥质含量的增强,也会显著增加破裂压力;此外,在某些高压、低渗透、微裂缝发育的储层中,钻完井时使用的加重钻井液,会在井壁附近形成一个超压致密带,这也直接导致异常高破裂压力的形成。这类储层在改造时地层压不开、液体注不进、施工压力高,使得后续增产工作无法进一步开展。目前现场应用的降低施工压力的措施主要有喷砂射孔^[8]、高能气体压裂^[9]、优化射孔^[10]、加重压裂液^[11]、酸化预处理技术。酸化预处理降低破裂压力由于现场操作方便,不需要增加额外的施工设备,该技术在现场得到了广泛的应用^[12]。

酸处理降低破裂压力的原理是从本质上弱化岩石强度,酸对岩石强度的影响,目前已经有许多作者

进行了比较详细的研究。Dunning J D^[13]认为,酸岩化学作用通过改变岩土成分、结构,必然改变岩土的力学性质。Newman G U^[14]研究了化学反应对碳酸盐岩力学参数的影响:化学反应往往发生在钙质颗粒之间,且使钙质颗粒之间胶接物发生溶解,在应力作用下,可以引起钙质颗粒间应力集中。程昌炳^[15]通过酸对土体的侵蚀实验表明,土体中的胶结物被酸溶解后引起了岩土力学性能的改变。陈四利^[16]的研究表明:矿岩与溶浸液发生了溶解作用、水解作用和酸化作用等化学作用后,其中易溶矿物随水流失,而难溶矿物则残留原地;同时矿岩中孔隙增加,使矿岩变得松散脆弱,强度降低。

1 碳酸盐岩岩石力学强度的本质

碳酸盐岩主要由方解石和白云石两种矿物组成,以方解石为主的碳酸盐岩称为石灰岩,以白云石为主的碳酸盐岩称为白云岩。纯石灰岩(纯方解石)的理论化学成分为CaO(56%)和CO₂(44%);纯白云岩(白云石)的理论化学成分为CaO(30.4%)、MgO(21.7%)、CO₂(47.9%)。但是,实际上自然界的碳酸盐岩总是或多或少地含有其他的化学成分。

碳酸盐岩基本结构组分主要由颗粒、泥、胶结物、晶粒、生物格架等五类结构类型组成^[17]。通过对碳酸盐岩结构的分析,碳酸盐岩的主要结构有两种:一种是由颗粒(晶粒、生物格架)和胶结物(胶结物和泥同时存在)组成;另一种是颗粒(晶粒、生物格架)和泥组成。胶结物是颗粒沉积以后,粒间水的化学沉淀产物,它存在的前提是必须有粒间孔隙。如果在沉积过程中,水动力条件较强,泥被冲洗走,沉积颗粒之间的孔隙基本上空着,胶结物才有可能生成,否则,粒间空隙基本上为泥所充填。

对于有胶结物的碳酸盐岩,其岩石力学强度主要取决于颗粒强度和胶结强度;对于没有胶结物的碳酸盐岩,其岩石力学强度主要取决于颗粒强度。

2 碳酸盐岩岩石力学性质影响因素分析

2.1 矿物组成对岩石力学性质的影响

岩石是由矿物组成的,岩石的矿物成分对岩石的物理力学性质产生直接的影响。一般岩块中含硬度大的粒柱状矿物(如石英、长石、角闪石等)越多,岩块强度越高;岩块含硬度小的片状矿物(如云母、绿泥石、高岭石等)越多时,岩块强度就越低^[18]; Monjois^[19]研究了硅质含量对大孔隙率砂岩强度的影响,随着硅质含量增加,砂岩强度增加。

岩石类型对岩石强度的影响表现为随着碎屑颗粒粒度由粗到细,即由砂岩到泥岩变化,岩石的强度随之减弱^[20]。

2.2 岩石的结构特征对岩石力学性质的影响

根据岩石的结构特征,可以将岩石分为两类:结晶岩类,如大部分的岩浆岩、变质岩和沉积岩,如没有胶结物的碳酸盐岩就属于这一类;另一类为胶结物联结的岩石,如胶结物结构的碳酸盐岩。

结晶岩类靠直接接触产生的力牢固联结在一起,结合力强,比胶结联结的岩石具有更高的强度和稳定性。对于结晶联结,结晶晶粒的大小对岩石的强度有明显的影 响,如粗粒花岗岩的抗压强度一般在 118 MPa~137 MPa,而细粒花岗岩有的则可达 196 MPa~245 MPa;又如石灰岩随着颗粒大小由粗到细,其岩石强度逐渐提高,最高可达 255 MPa^[21]。

胶结联结的矿物其强度和稳定性主要取决于胶结物的成分和胶结形式,同时受碎屑成分的影响,变化很大。就胶结物成分而言,硅质胶结物的强度和稳定性最高,其次是钙质和铁质胶结物,最低的是泥质胶结物,含胶结物的碳酸盐岩的胶结物是泥质和钙质;胶结联结的形式有基底胶结、孔隙胶结和接触胶结。碳酸盐岩属于孔隙胶结,胶结物充填于颗粒间的孔隙中,其强度与颗粒和胶结物的成分有关,如果胶结物为泥质,与水作用容易软化而降低岩石的强度和稳定性^[22]。

2.3 岩石构造对岩石力学性质的影响

岩石的构造对其物理力学性质的影响,主要是由岩石各组成部分的空间分布及其相互间的排列关系所决定。如当岩石具有片状构造、板状构造、片麻构造以及流纹构造时,其矿物成分在岩石中分布不均匀。一些强度低、易风化的矿物,多沿一定方向富集成条带状分布,或者称为局部的聚集体,而使岩石的物理力学性质沿一定方向或局部发生很大变化。岩石受力破坏和岩石受到风化,首先都是从岩石的这些缺陷开始发生的。另一种强矿石,不同的矿物成分虽然在岩石中的分布是均匀的,但由于存在着层理、裂隙和各种成因的孔隙,而使岩石的强度和透水性在不同的方向上呈现明显的差异。一般来说,垂直层面的抗压强度大于平行层面的抗压强度,平行层面的透水性大于垂直层面的透水性。加入上述两种情况同时存在,则岩石的强度和稳定性会明显降低^[23]。

2.4 水或者化学溶液对岩石力学性质的影响

岩石被水饱和和后会 使岩石的强度降低,已为大量实验资料证实。当岩石与水接触时,水沿着岩石中的孔隙、裂隙浸人,浸湿岩石全部自由表面上的矿物颗粒,并继续沿着矿物颗粒间的接触面向深部浸人,削弱矿物颗粒间的联结,使岩石的强度受到影响。岩石中的水通常以两种方式赋存,一种称之为结合水或称束缚水,一种为重力水或称为自由水。它们对岩石力学性质的影响,主要体现在以下 5 个方面,即连接作用、润滑作用、水楔作用、孔隙压力作用、溶蚀及潜蚀作用^[24~25]。以上 5 种作用都与岩石中结合水有关,而岩石中结合水的多少主要和矿物

的亲水性有关。岩石中亲水性最大的是粘土矿物,含粘土矿物多的岩石受水的影响最大。如粘土岩在浸湿后其强度可降低90%,含亲水矿物少(或者不含)的岩石如花岗岩、石英岩等,浸水后强度变化则小很多^[26]。Schroeder^[27]等人从实验角度出发证实了水介质的存在显著降低了岩石的强度。

冯夏庭、丁梧秀^[28]在岩石工程安全性的诸多影响因素中认为,水是最活跃的一个因素。岩土体受化学溶液侵蚀作用后,由于水-岩作用削弱了矿物颗粒间联结或软化矿物颗粒晶格,而使岩土体物理力学性质变异,同时水溶液通过溶蚀岩土体而将溶蚀物质带走,使岩土体性状变差,甚至出现工程事故,对岩土工程的长期稳定性产生威胁。

Lajtai E Z 等人认为^[29]在湿润条件下的破坏韧性值比干燥条件下的要低,裂纹扩展速度加快 ξ 电位与裂纹增长、钻进效率有一定的关系。 ξ 电位等于0时,岩石材料脆性增强,对环境的影响更加敏感,抗压强度最低,亚临界裂纹扩展速度将提高1个数量级以上。因此,如果将一些 ξ 电位等于0的化学溶液加入到钻井液与破裂液中,就可以提高岩石的可钻性和可破裂性。

由于碳酸盐分布的广泛性,碳酸盐矿物和岩石的溶蚀、沉淀反应是自然界最基本的作用之一,其溶蚀动力学过程是喀斯特研究者最为关注的焦点。碳酸盐溶蚀涉及气、液、固三相的复杂体系,其化学反应受pH、 P_{CO_2} 、 T 、 HCO_3^- 、水动力条件、矿物比表面积、矿物成因和结构、外来离子等因素的控制和影响。Burge等^[30]认为:灰岩的溶蚀速度主要是由岩石-水界面上反应速度所控制;在岩石-水界面上存在着两个过程即扩散传输和表面反应,在静水条件下,机械涡流扩散促使其运动,后者比前者快100倍。李先炜^[31]认为,岩石饱水后,水就顺着裂隙、孔隙进入岩石内部并润湿自由面上的每个矿物颗粒,从而削弱颗粒间的连接,降低岩石的强度。何宇彬^[32]对各类碳酸盐岩进行了实验研究,探讨了其矿物成分与比溶蚀度(K_v)的关系,指出具有泥晶结构及粒屑泥晶结构的碳酸盐岩的 K_v 值大于1.0,而具有晶粒结构的 K_v 值小于1.0,具有晶粒结构的碳酸盐岩的 K_v 值随晶粒的增大而降低。灰岩类岩石主

要沿裂隙溶蚀扩大,称为分异作用;白云岩类岩石主要沿分散孤立的晶间空隙溶蚀。

汤连生等^[33]通过不同应力状态下的试验,对岩石破坏特性的化学环境的影响进行了研究。与空气浸蚀条件相比,裂纹尖端的水或化学溶液使岩石的破裂韧度明显降低;应力腐蚀破裂也明显地受到化学环境的影响。研究认为,水-岩化学作用不仅导致化学元素在岩石与水之间重新分配,而且导致岩石微观结构的改变,这两者的变化都将导致岩石力学性质的改变。

冯夏庭等^[34,35]开展了不同应力状态(双抗扭、破坏韧性)化学环境的变化对岩石的物理力学性质、裂纹扩展的影响实验,对不同的岩石和化学溶液组合进行 ζ 电位测试。研究表明,裂纹尖端的水或化学溶液使岩石的破裂韧度明显地比空气浸蚀条件下的低,应力腐蚀破裂也明显地受到化学环境的影响,而三轴强度不会因化学集结物的变化而发生明显的变化。

2.5 岩石的缺陷如裂缝、孔洞以及溶洞对岩石力学性质的影响

丁梧秀、冯夏庭^[36]研究了岩石微观结构的化学损伤,主要表现为岩石结构微孔洞或微孔隙的增加。因此,以裂隙率的变化为基础而建立的损伤变量,可定量反映出岩石的微观化学损伤程度。REYES^[37]指出工程岩体中赋存有大量的原生裂隙和一些断层。在压缩应力作用下,这些原生缺陷的扩展和相互作用将极大地改变岩体内部的应力重分布,并引起局部应力集中现象。当局部的应力集中强度达到岩石破坏强度时,裂隙面将发生滑动,引起裂纹的起裂与扩展,从而影响裂隙岩体的变形及强度特性。

陈四利、冯夏庭^[38]指出岩石破裂的实质是岩石在受力过程中微裂纹的萌生、扩展直至裂纹连通的结构,是岩石微观结构变形破坏积累的宏观反映。岩石在单轴压缩条件下,其各种环境下的破坏特征与方式基本是相同的,破裂均呈现出从试件最薄弱的地方开始,而且裂纹起裂及扩展方向与荷载方向平行或成很小的夹角。

黄明利^[39]指出岩石的破坏失稳过程本质上是其在受力过程中微裂纹萌生、扩展和贯通的结果,是

岩石微结构累积变形破坏的宏观反映。岩石内初始微缺陷(孔洞、微裂隙和颗粒边界等)的随机分布导致其受载时新生裂纹的随机分布,初始微缺陷的尺寸在某种程度上对岩石的裂纹扩展和宏观破坏失稳起到决定作用。该文应用扫描电镜,通过对不同种类的岩石和含有预结构的岩石试样在单轴载荷作用下的破坏特征进行观测,并对得到的不同载荷下的裂纹扩展特征照片进行了分析,着重阐明微缺陷对岩石破坏失稳的控制作用。实验结果表明,岩石试件的变形与破坏过程可以分为裂纹压密、微裂纹萌生和扩展以及断裂破坏 3 个阶段;微裂缝首先在预裂缝周围的拉应力集中区产生,随着外载荷的增加不断扩展,最后形成与最大主应力方向平行的宏观断裂带。

冯增朝、赵阳升^[40]把岩石中的断层、裂缝和裂隙称为高层次缺陷,微裂隙、孔隙等称为低层次缺陷。并按照裂隙尺度进行分级,研究岩体裂隙尺度对其变形与破坏的控制作用。当裂缝、裂隙、微裂隙、孔隙等不同尺度、不同层次缺陷并存时,高层次缺陷对岩体的变形、稳定、破坏起着主导控制作用。尽管低层次的岩石缺陷对岩石强度的控制作用极其微弱,但它影响高层次岩石缺陷对岩体强度的控制作用。高均质度岩石内的裂隙对岩体强度的控制作用远远大于低均质度岩石内的裂隙。

综上所述,碳酸盐岩的破裂首先从岩石薄弱处开始,而岩石的裂纹、孔洞及溶洞等缺陷正是其薄弱处,酸也首先在这些地方起作用。

3 对酸处理降低碳酸盐岩地层破裂压力的两点认识

(1) 酸化预处理降低地层破裂压力是通过降低岩石力学强度来实现的,岩石本身力学性质的弱化是地层破裂压力降低的根本原因。

(2) 碳酸盐岩的结构有两种类型,一种是结晶联结,其岩石强度取决于颗粒强度,酸液首先在岩石的缺陷处如裂缝开始反应,降低岩石有效承载面积即损伤,表现为微裂缝、微孔洞的形成、扩展、贯通,从而降低岩石的力学强度。另一种是胶结物联结,碳酸盐岩的胶结物一般为钙质和泥质胶结物,泥质胶结物容易与水作用使岩石软化从而降低岩石的强

度和稳定性;而钙质胶结物容易与酸发生反应,降低岩石的胶结能力,使岩石的孔隙增大,从而降低岩石的强度和稳定性。

参考文献

- 1 丁云宏 主编. 难动用储量开发压裂酸化技术[M]. 北京:石油工业出版社,2005,1-5
- 2 彭建新,张福祥,王永辉,等. 异常高压超深井压裂工艺技术研究[J]. 2005 国际油气藏增产改造学术研讨会会议论文集[C],中国安徽
- 3 陈波. 塔河碳酸盐岩储层大型酸化压裂技术介绍[J]. 石油与天然气化工,2005,34(3):210-212
- 4 I yang. D G Grosby et al: Investigation of the factors influencing hydraulic fracture initiation in highly stressed formation, SPE 38043,1997
- 5 GRI: Staged Field Experiment No. 4 application of advanced technologies in tight gas sandstone - frontier Formation, chimney Butte field, Sublette county, Wyoming. Report No. GRI - 92/0394
- 6 万仁溥. 采油技术手册(九)[M],北京:石油工业出版社,1998
- 7 王鸿勋. 水力压裂原理[M]. 北京:石油工业出版社,1987
- 8 李根生,牛继磊. 水力喷射射孔机理及实验[J]. 石油大学学报,2002,26(2):31-34
- 9 石崇兵,李传乐. 高能气体压裂技术的发展趋势[J]. 西安石油学院学报(自然科学版),2000,15(5):17-20
- 10 MORALES R H, BRADY B H. Three - dimensional analysis and visualtion of the wellbore and the fracturing process in inclined wells[R]. SPE 25889,199311 专利:中国石油天然气股份有限公司一种加重压裂液配方. 中国:2005101058138 2005. 9. 29
- 12 曾庆坤. 宝浪油田异常破裂压力预测及降低破裂压力技术研究. 西南石油学院[D],2004. 4
- 13 Dunning J D, Miller M E. Effect of pore fluid chemistry on stable sliding of Berea sandstone [J]. Pageaph. 1984/1985. 122: 447 ~ 462
- 14 Newman G U. The continuous damage theory of brittle materials [J] J. of Applied Mech. ,1998,48:809~815
- 15 程昌炳,徐昌伟. 花岗岩残积土的胶结特性及其对力学性能的影响[J]. 岩土力学,1986,7(2):60-66
- 16 陈四利. 化学腐蚀下岩石细观损伤破裂机理及其本构模型[D]. 沈阳:博士学位论文,东北大学,2003:84-85
- 17 朱筱敏. 沉积岩石学. 北京:石油工业出版社. 2008,9:163-177
- 18 谢和平,陈忠辉. 岩石力学[M]. 北京:科学出版社,2004:12-13
- 19 Monjois J P. Response of a microrack constitutive model for brittle rock [A]. In: Aubertin ed. Proceedings of the NARM6 on Rock Mechanics[C]. 1985:1707-1714

- 20 彭苏萍,孟召平. 矿井工程地质理论与实践[M]. 北京:地质出版社,2002
- 21 蔡美峰,何满朝,刘东燕. 岩石的力学性质[M]. 北京:科学出版社,68-72
- 22 楼一珊,等. 岩石力学与石油工程[M]. 工业出版社,2006,3(1):48-49
- 23 刘向君,罗平亚. 岩石力学与石油工程. 北京:石油工业出版社. 2004,10:42-45
- 24 孙广忠. 岩体力学基础[M]. 北京:科学出版社,1979
- 25 郑永学. 矿山岩体力学[M]. 北京:冶金工业出版社,1988
- 26 华东水利学院、成都科技大学 合编. 岩石力学[M]. 北京:水利水电出版社,1986
- 27 Schroeder B A. FE in environmental engineering;coupled thermo-hydro-mechanical process in porous media including pollutant transport [J]. Archives of Computational Methods in Engineering,1999,(2):1~54
- 28 冯夏庭,丁梧秀. 应力-水流-化学耦合下石破裂全过程的细观力学试验[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(9):1465-1470
- 29 Lajtai E Z,Schmidtke R H,Bielus L P. The effect of water on the time-dependent deformation and fracture of granite [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.,1987,24(4):247-255
- 30 Burge A. 何宇彬 译. 喀斯特化和水的化学. 国外地质[J]. 1981,(4):23-27
- 31 李先炜. 岩块力学性质[M]. 北京:煤炭工业出版社,1983
- 32 何宇彬,金玉璋,李 康. 碳酸盐岩溶蚀机理研究[J]. 中国岩溶,1984,5(2):12-16
- 33 汤连生,王思敬. 水-岩化学作用对岩体变形破坏力学效应研究进展[J]. 地球研究进展,1999,14(5):433-439
- 34 冯夏庭,赖户政宏. 化学环境侵蚀下的岩石破裂特性——第一部分:试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(4):403-407
- 35 丁梧秀,冯夏庭. 化学腐蚀下灰岩力学效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(21):3571-3576
- 36 丁梧秀,冯夏庭. 灰岩细观结构的化学损伤效应及化学损伤量化研究方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(8):1283-1288
- 37 REYES O,EINSTEIN H. Failure mechanics of fractured rock—a fracture coalescence model[C]// Proceedings of the 7th International Congress on Rock Mechanics. Rotterdam:A. A. Balkema,1991:333-340
- 38 陈四利,冯夏庭. 岩石单轴抗压强度与破裂特征的化学腐蚀效应. 岩石力学与工程学报,2003,22(4):547-551
- 39 黄明利. 岩石单轴压缩下破坏失稳过程 SEM 即时研究. 东北大学学报,1999,20(4):426-429
- 40 冯增朝,赵阳升. 岩体裂隙尺度对其变形与破坏的控制作用. 岩石力学与工程学报,2008,27(1):78-83

作者简介

刘林森:男,1985年生,现为西南石油大学在读硕士研究生,现从事压裂酸化改造理论及技术方面的研究工作。地址:(610500)四川省成都市新都区西南石油大学研究生部07级9班。

收稿日期:2009-12-03

编辑:冯学军

(上接第322页)

来说,影响原油乳状液稳定性的根本因素是注聚用聚合物在地层中自身粘度的变化。粘度较高的聚合物容易导致原油乳状液的稳定性增强。

参考文献

- 1 冈秦麟. 论我国的三次采油技术[J]. 油气采收率技术,1998,5(4):1-7
- 2 张 健,韩 明,向问陶,等. 海上稠油油田聚合物驱原油破乳研究:II 破乳剂辅助剂研制[J]. 石油与天然气化工,2006,35(2):134-136
- 3 吴 晶,曾红霞,李之平,等. 聚丙烯酰胺对克拉玛依复合驱采出液破乳过程的影响[J]. 油田化学,2000,17(3):272-275
- 4 张 健,韩 明,向问陶,等. 海上稠油油田聚合物驱原油破乳研究 I 破乳剂研制[J]. 石油与天然气化工,2006,35(2):130-133
- 5 薛龙英,吕志凤,何 芳,等. 污水中聚丙烯酰胺的水解度、摩尔质量及含量的测定[J]. 石油与天然气化工,2007,36(2):169-172

- 6 王启民. 聚合物驱油技术的实践与认识[J]. 大庆石油地质与开发,1999,18(4):1-5
- 7 Taylor K C, Burke R A, Nasr-EI-Din H A, Schramm L L. Development of a flow injection analysis method for the determination of acrylamide copolymer in brines[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1998,21(2):129-139
- 8 李明远,甄 鹏. 原油乳状液稳定性研究:IV 界面膜特性与原油乳状液稳定性[J]. 石油学报:石油加工,1998,14(3):1-5
- 9 李学文,康万利. 原油乳状液的稳定性与界面膜研究进展[J]. 油气田地面工程,2003,22(10):7-8

收稿日期:2009-12-22

收修改稿:2010-01-08

编辑:冯学军