

气孔对发气膨胀固井水泥石强度影响

柳华杰¹, 步玉环¹, 王雪英², 郭辛阳¹

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中石化中原油田供水管理处, 河南濮阳 457001)

摘要:发气膨胀剂产生的气孔具有补偿水泥石体积收缩及改善水泥石韧性的双重作用,对不同气孔体积比率的固井水泥石的抗压强度及水泥-套管界面胶结强度进行测试,并结合气孔结构显微观察对试验结果进行理论分析。结果表明:随着气孔体积比率增加,水泥石抗压强度及界面胶结强度先升高然后下降,进而又升高;气孔直径越均一,越利于提高水泥石强度;表面收缩压使半径不同的气孔内压力不同,小气孔内压力大于大气孔内压力;气孔间压力差增加了气孔边界骨架错位的可能性及小气孔沿着界面窜入大气孔内的趋势,从而降低水泥石的抗压强度和界面胶结强度;气孔通过影响水泥石的自应力、骨架应力和胶结面积,进而影响水泥石的抗压强度和界面胶结强度。

关键词:固井; 发气膨胀剂; 气孔; 抗压强度; 界面胶结强度

中图分类号:TE 256

文献标志码:A

Effects of gas pores on strength of oil well cement using gas swelling agents

LIU Hua-jie¹, BU Yu-huan¹, WANG Xue-ying², GUO Xin-yang¹

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Management Office of Water Supply, Zhongyuan Oilfield, SINOPEC, Puyang 457001, China)

Abstract: Gas pores can be generated during gas expansion when using gas swelling agent in the cementing process of an oil well, which can compensate for volume shrinkage and improve the ductility of the cement. The compressive strength of cement and the bonding strength between cement and casing were measured, and the gas pore structure was examined using a microscope. The influence of gas volume on the strength of the cement was investigated and analyzed. The experimental results show that, with the increase of the ratio of gas volume to the total volume of the cement matrix, its compressive strength and interfacial bonding strength increase first and then decrease. The strength of the cement can be increased when the pore sizes are uniformly distributed. The pressure in small pores is greater than that in large pores due to the effect of surface contract pressure. This pressure difference among different gas pores may cause collapses of pore boundaries that can make small pores merge with large ones, which can reduce the strength of the cement. The effects of gas pores on the strength of the cement can be attributed to the intrinsic stress, matrix stress and bonding area inside the cement body.

Key words: oil well cementing; gas swelling agent; gas pores; compressive strength; interfacial bonding strength

固井水泥石体积收缩及脆性破坏是导致层间封隔失效的两个主要原因^[1-5]。解决收缩的最有效方法是加入膨胀剂^[6-7]。发气膨胀剂能在水泥石中产生相互封闭的大量微小气孔^[8-9],使水泥石体积产生微膨胀,并且可以降低水泥石弹性模量^[10-13]。此外,气孔还具有补偿水泥浆“失重”的作用^[14]。目

前,已经开发出了不同类型的发气膨胀剂^[15-17],但较少关注气孔对水泥石强度性能的影响。笔者针对气孔对抗压强度及水泥-套管界面胶结强度的影响进行试验研究,并进行理论分析,为建立合理气孔结构提供依据。

收稿日期:2013-06-10

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2010EM003);中央高校基本科研业务费专项(14CX06024A);“海洋油气井钻完井理论与工程”创新团队(IRT1086);中国石油大学(华东)研究生创新基金项目(CX2013014)

作者简介:柳华杰(1986-),男,博士研究生,主要从事固完井研究。E-mail:liuhua jieupc@163.com。

1 试验

1.1 试验材料

固井现场常用的发气膨胀剂是铝粉,为了阻止在水泥浆泵注过程中发气,铝粉表面都经过钝化处理,而实验室操作不考虑泵注过程,因此采用纯铝粉(0.106~0.150 mm),为了进行系统研究,其具体加量分别为水泥质量的0.01%、0.02%、0.03%、0.035%、0.04%、0.045%、0.05%和0.06%。所用的试验配方为G级油井水泥+0.6%降失水剂+0.5%分散剂+2.0% CaCl_2 +(0.01%~0.06%)铝粉+消泡剂+水(水灰比0.44)。铝粉与水泥水化产生的氢氧化钙反应生成氢气,从而使水泥石膨胀。为了防止气孔在水泥浆中运移聚合,在水泥浆中加入 CaCl_2 ,加速水泥凝结与硬化。

1.2 试验方法

(1)抗压强度及界面胶结强度测试方法。按GB/T19139-2003标准配置水泥浆。将配置好的水泥浆倒入抗压强度模具(5 cm×5 cm×5 cm)及界面胶结强度仪(主要由钢套、釜盖、模拟套管等部分组成,模拟套管外径5 cm,钢套内径10 cm,钢套有效高度10 cm,钢套壁厚2 cm,釜盖厚度3 cm)中,该仪器工作原理如图1所示。

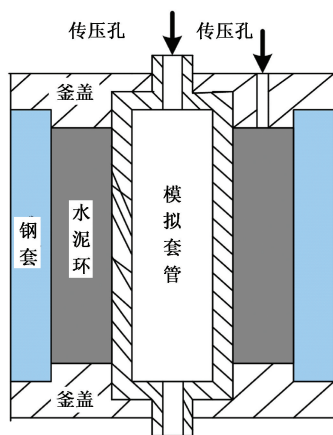


图1 界面胶结强度仪原理图

Fig.1 Schematic of interfacial bonding strength testing device

将装配好的抗压强度模具和界面胶结强度仪放入高温高压养护釜(压力为0~30 MPa;温度为室温~250℃;生产厂家为石油大学石仪公司)中进行养护。恒温养护条件为:养护温度75℃,养护压力10 MPa,养护时间72 h;变温养护条件为:先在75℃、10 MPa条件下养护48 h,然后变温到90℃水浴养护6 h,再变到20℃水浴养护6 h,然后再变到90℃

水浴养护6 h,而后变到75℃水浴养护6 h。养护结束后拆模,测定水泥石抗压强度和界面胶结强度。界面胶结强度测试方法:拆去釜盖后,将界面胶结强度仪垂直放置,在模拟套管端部垂直施加压力,记录模拟套管和水泥环发生相对滑移时的最大压力,然后除以模拟套管和水泥环的接触面积可得界面胶结强度。

(2)水泥石中气孔体积比率测试方法^[18]。假设气体密度为0,取单位体积发气水泥石块,膨胀前后质量恒定不变,由此得到:

$$\rho_1 = \rho_2(1 - \eta). \quad (1)$$

从而得到发气水泥石中气孔体积比率计算公式为

$$\eta = \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right). \quad (2)$$

式中, ρ_1 为发气水泥石密度, g/cm^3 ; ρ_2 为常规水泥石密度, g/cm^3 ; η 为气孔体积比率,%。

2 铝粉加量与气孔体积比率的关系

经测试可得铝粉加量与气孔所占体积比率间的关系,如图2所示。

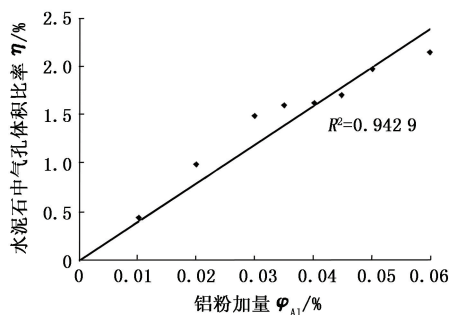


图2 铝粉加量与气孔体积比率的关系

Fig.2 Relationship between aluminum dosage and ratio of gas hole volume

从图2中可以看出,随着铝粉加量的增加,气孔体积比率呈线性递增。

3 气孔对水泥石力学性能的影响

不同气孔体积比率下水泥石的抗压强度及界面胶结强度测量结果如图3、4所示。

对比图3和图4可以看出,经过一周次温度变化后,水泥石的抗压强度及界面胶结强度都有一定程度的下降,说明水泥石受热应力后发生破坏;由图3(b)和图4(b)可以看出,变温养护后,具有适当气孔体积比率的水泥石仍具有较高的抗压强度和界面胶结强度,说明在水泥石中引入气孔可以提高水泥石抵抗应力应变的能力;恒温或变温养护条件下,随

着气孔体积比率增加,水泥石的抗压强度及界面胶结强度都出现先升高后下降然后又升高的变化规律,这与文献[18]中提出的“随着气孔体积比率增加,加气混凝土强度下降”的规律不一致。说明固井水泥石

的强度性能不仅受气孔体积比率的影响,而且还受到其他因素的影响。为了便于现场对发气膨胀剂的合理应用,还需要进行其他影响因素的考察。

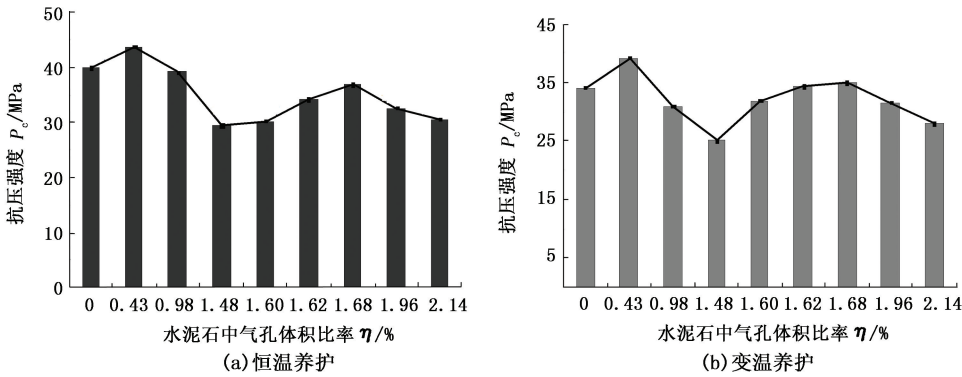


图 3 气孔对水泥石抗压强度影响

Fig.3 Effects of gas pores on compressive strength of cement

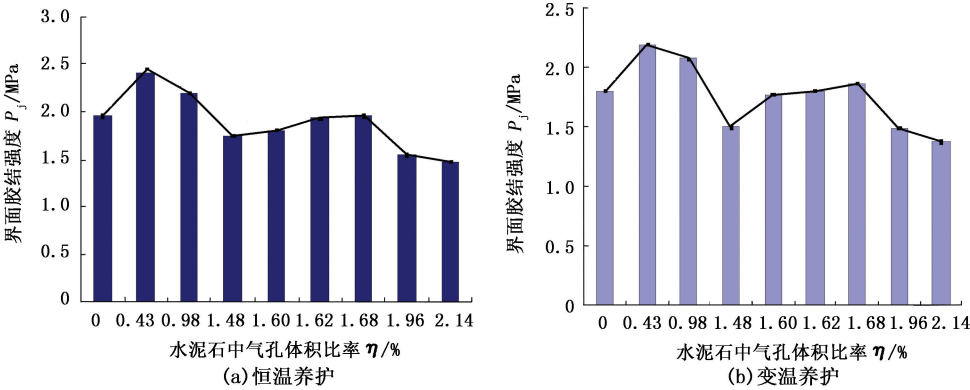


图 4 气孔对水泥-套管界面胶结强度影响

Fig.4 Effects of gas pores on cement-casing interfacial bonding strength

4 气孔结构显微分析

为进一步分析影响水泥石强度性能的因素,对应气孔体积比率对水泥石强度性能影响的试验结果,选择恒温养护条件下气孔体积比率为 0、0.43%、1.48%、1.68%、1.96% 的水泥石,进行气孔结构显微观察。选择水泥石的中间段位置,按照 SY/T 5913-2004 岩石制片方法,制成 0.03 mm 厚的水泥石薄片,然后在偏光显微镜(型号为 AXIOSKOP40APOL;生产厂家为德国 ZEISS 公司)下观察,水泥石薄片的透射自然光显微图片及相对应的正交偏光显微图片如图 5 所示。

图 5(a)为不加铝粉的水泥石显微结构图,孔隙在透射自然光时透明(显微图中为白色),在正交偏光时消光(显微图中发暗),可以看出,水泥石本身是个多孔结构,部分孔与裂缝连接。采用正交偏光对裂缝进行显微观察,如图 6 所示。从图 6 中可以

清晰看出裂缝中存在晶体干涉色,表明裂缝中有晶体生成,说明裂缝是原生裂缝。

图 5(b) ~ (e) 为具有一定气孔体积比率的水泥石显微结构。气孔在透射自然光显微图中为白色,与图 5(a) 相比可以发现,在正交偏光显微图片中,气孔中存在晶体干涉色,说明气孔中有晶体生成,从图 6 中可以看出,不加铝粉的水泥石孔壁上也有晶体生成,但很小,与气孔中的晶体相比,在体积上差别较大,据此可以区分水泥石中的原生孔和气孔。分析可知,铝粉和氢氧化钙反应产生氢气,同时生成的 AlO_2^- 和 Ca^{2+} 与水泥浆中的石膏遇水溶析产生的 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 为水化硫铝酸钙的生成提供物质条件^[19];铝粉周围的气孔为水化硫铝酸钙晶体生长提供空间;且从图 5(d) 的正交偏光显微图片中可以清晰地观察到长约 100 μm 的针柱状晶体,符合水化硫铝酸钙的晶形,因此可以判断气孔中的晶体为水化硫铝酸钙。

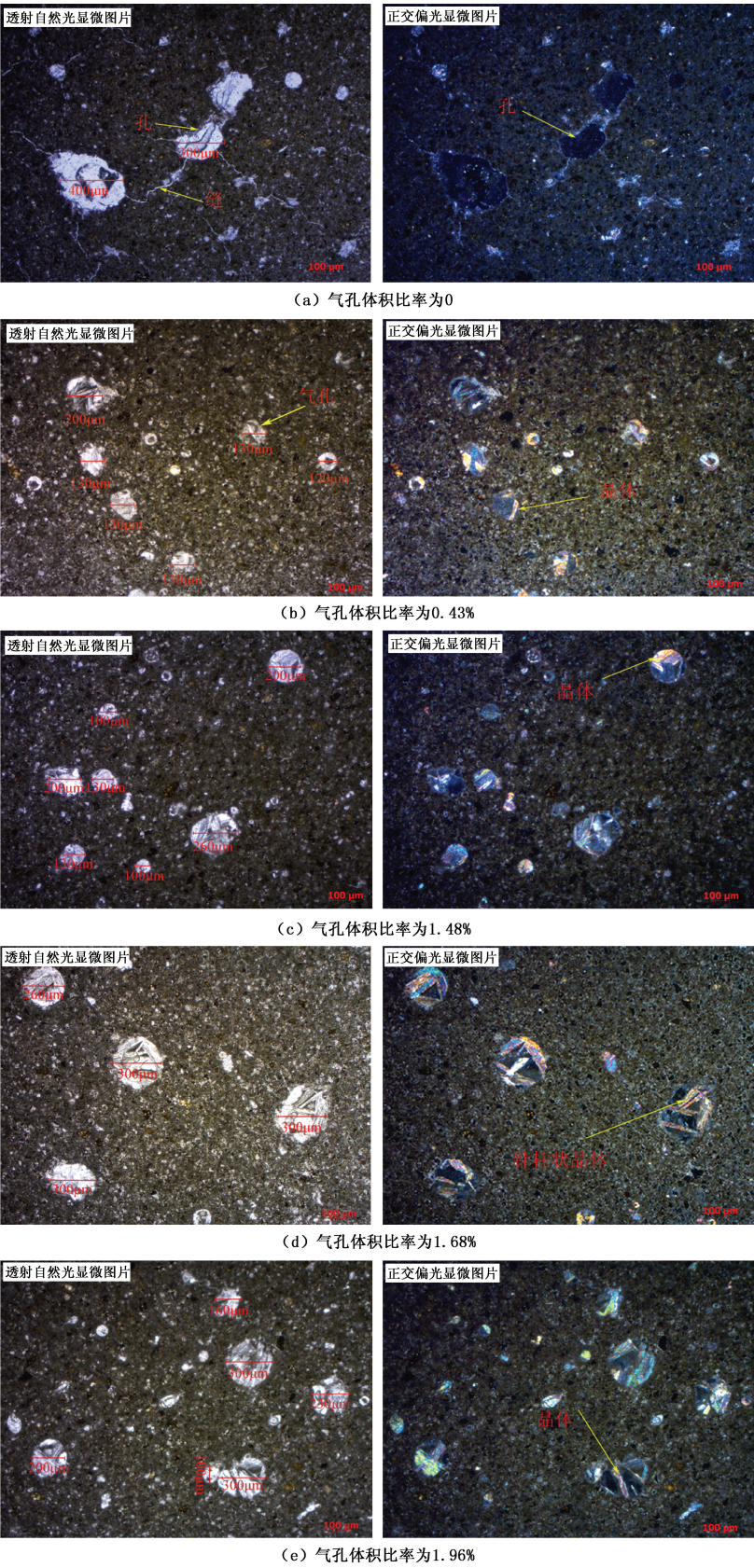


图 5 不同气孔体积比率下的水泥薄片显微结构

Fig.5 Microscopic structure of cement thin section with different gas volume

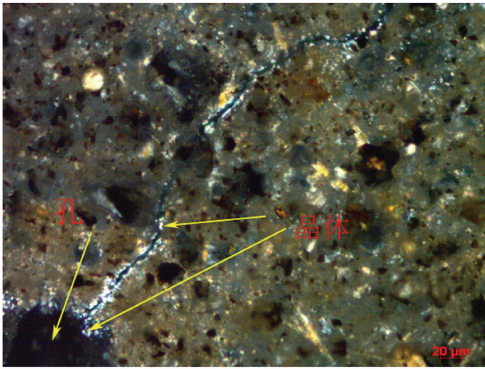


图 6 裂缝正交偏光显微结构

Fig. 6 Orthogonal polarization microscopic structure of fracture

对比图 5(a) 和(b) ~ (e) 可以看出,发气后水泥石中孔结构得到明显改善,原来存在的裂缝和不规则孔被封闭的气孔所替代。

图 5(b) 中大部分气孔直径约为 130 μm,图 5(c) 中气孔直径为 100 ~ 260 μm,图 5(d) 中气孔直径约为 300 μm,图 5(e) 中除了直径约为 300 μm 的大泡,又出现了部分小泡。与图 3、4 对应可知,气孔直径较均一的水泥石的强度处于顶点,气孔直径差别较大的水泥石强度下降。因此,水泥石的强度性能还与气孔直径分布相关。

5 气孔的静力学分析

在套管、地层、水泥浆的约束下形成的气孔必然存在内部压力。取垂深为 h 处的水泥环微元纵剖面,假设纵剖面内存在 2 个气孔,如图 7 所示。图 7 中, p_h 为水泥环微元承受的上部压力,Pa; r 和 R 为气孔半径,m; p_r 和 p_R 分别为对应气孔的内部压力,Pa。

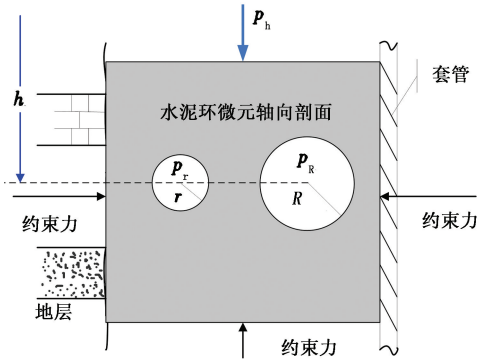


图 7 水泥环内部气孔结构示意图

Fig. 7 Schematic of gas pore structure in cement sheath

在等温条件下,由于表面收缩压的存在,使气孔曲界面两侧产生压力差,平衡时气孔内部压力总是

大于气孔外部压力^[20]。从图 7 中可以看出,气孔外部压力为 p_h (忽略大气压力),由气孔曲界面受力平衡可得

$$p_r - p_h = \frac{2\sigma}{r}, \tag{3}$$

$$p_R - p_h = \frac{2\sigma}{R}. \tag{4}$$

式中, σ 为水泥浆的表面张力, $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

将式(3)与式(4)相减,可得

$$p_r - p_R = \frac{2\sigma}{r} - \frac{2\sigma}{R}. \tag{5}$$

当 $r < R$ 时,由公式(5)可推得 $p_r - p_R > 0$,即 $p_r > p_R$ 。由此可以得:水泥石内部气孔半径不同时,气孔内压力不同,小气孔内压力大于大气孔内压力。当半径不同的两个气孔相邻时,气孔间的水泥骨架受到气孔间压力差引起的破坏应力作用。

6 气孔对抗压强度的影响

宏观条件下,由于气孔的内压及井壁、套管的约束,水泥石产生了膨胀预应力,称之为自应力。这种自应力能抵消部分压力,所以抗压强度取决于水泥石骨架应力和自应力,其关系式为

$$P_c = P_s + \Phi. \tag{6}$$

式中, P_c 为水泥石抗压强度,MPa; P_s 为水泥石自应力,MPa; Φ 为水泥石骨架应力,是指水泥颗粒水化胶结支撑的那部分压力,MPa。

自应力与水泥石的膨胀和受限程度有关。在一定受限条件下,在水泥石不发生膨胀破坏并且不挤毁套管和地层的前提下,水泥石中含有的气孔总体积越大,水泥石膨胀产生的自应力 P_s 越大。但是水泥石中气孔含量增加会减小水泥石截面承载面积,降低水泥石的骨架应力 Φ 。根据公式(6)可知,随着水泥石中含有的气孔总体积增加,当 P_s 的增加量大于 Φ 的减小量时,水泥石的抗压强度呈增加趋势,当 P_s 的增加量小于 Φ 的减小量时,水泥石的抗压强度呈下降趋势。

微观条件下,两个半径相差较大的气孔相邻,气孔间的压力差会对气孔间的水泥石骨架施加作用力,这个作用力相对水泥石承受的压力较小,但当水泥石受压时,气孔间的压力差产生的扰动增加了气孔边界骨架错位的可能性,降低水泥石的抗压强度。因此,在气孔的宏观和微观共同作用下,随着水泥石中气孔体积比率增加,水泥石的抗压强度出现先升高后下降然后又升高的变化规律。

7 气孔对界面胶结强度的影响

水泥与套管的界面胶结强度主要来自3方面:

①水泥环与套管表面的化学胶结力;②水泥环与套管接触面上的摩擦力;③水泥环与套管接触面上的机械咬合力^[21]。

由此得到界面胶结强度计算公式为

$$P_j = P_b + f + F. \quad (7)$$

式中, P_j 为界面胶结强度, MPa; P_b 为化学胶结力, MPa, 与水泥环和套管界面的胶着面积正相关; f 为摩擦力, MPa, 与水泥环和套管界面的接触应力正相关; F 为机械咬合力, MPa, 与水泥环和套管界面的接触应力正相关。

宏观条件下, 水泥石受限膨胀产生的自应力增加了与套管的接触应力, 从而增加了水泥环与套管界面上的摩擦力和机械咬合力。但是气孔也会挤占水泥环和套管的接触面积, 降低水泥环与套管界面的化学胶结力。因此, 根据公式(7)可知, 在保证水泥石稳定性的前提下, 随着水泥石中气孔总体积增加, 当 f 和 F 的增加量之和大于 P_b 的减小量时, 界面胶结强度呈增加趋势, 当 f 和 F 的增加量之和小于 P_b 的减小量时, 水泥石的界面胶结强度呈下降趋势。

微观条件下, 取微元水泥环界面处纵剖面, 假设界面处存在半径不同的2个气孔, 如图8所示。设

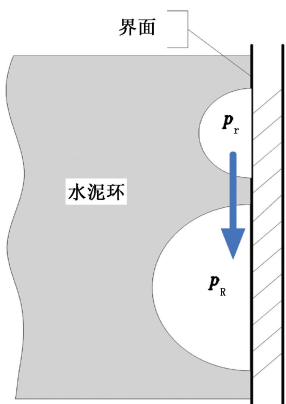


图8 水泥环界面处气孔结构示意图

Fig.8 Schematic of gas pore structure in interface

小气孔内压力为 p_r , 大气孔内压力为 p_R 。根据膨胀气孔静力学分析可知 $p_r > p_R$, 所以界面处的小气孔在内压力作用下有沿着界面窜入大气孔内的趋势, 从而给大、小气孔间的界面施加额外的破坏应力, 降低界面胶结强度。因此, 在气孔的宏观和微观的共同作用下, 随着水泥石中气孔体积比率增加, 界面胶结强度与水泥石抗压强度具有相同的变化规律。

8 结 论

(1) 恒温或变温养护条件下, 随着气孔体积比率增加, 水泥石的抗压强度及界面胶结强度都出现先升高后下降然后又升高的变化规律, 气孔可以改善水泥石中孔隙结构, 气孔直径越均一, 越利于改善水泥石强度。

(2) 表面收缩压使半径不同的气孔内压力不同, 小气孔内压力大于大气孔内压力; 宏观条件下, 气孔通过影响水泥石自应力、骨架应力和胶结面积, 进而影响水泥石的抗压强度和界面胶结强度; 微观条件下, 气孔间的压力差增加了气孔边界骨架错位的可能性及小气孔沿着界面窜入大气孔内的趋势, 从而降低水泥石的抗压强度和界面胶结强度。

(3) 在追求水泥石膨胀效果的同时, 采取特殊工艺或发气膨胀剂应用技术, 使气孔直径分布范围较集中, 对保证水泥石强度性能具有重要意义。

参考文献:

- [1] VIRGILIO C G, ROBERT L D. Real-time cement expansion/shrinkage testing under downhole conditions for enhanced annular isolation[R]. SPE/IADC 79911, 2003.
- [2] REDDY B R, XU Y, RAVI K. Cement shrinkage measurement in oilwell cementing—a comparative study of laboratory methods and procedures [R]. SPE 103610, 2007.
- [3] 步玉环, 王瑞和, 穆海朋, 等. 碳纤维改善水泥石韧性试验研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2005, 29(3): 53-60.
BU Yu-huan, WANG Rui-he, MU Hai-peng, et al. Experimental study on toughness improvement of cement rock by carbon fiber[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005, 29(3): 53-60.
- [4] 华苏东, 姚 晓. 固井水泥石脆性降低的途径及其作用机理[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(1): 108-113.
HUA Su-dong, YAO Xiao. Reduction in friability of well cement stone and its function mechanism[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007, 31(1): 108-113.
- [5] 李早元, 郭小阳, 罗发强, 等. 油井水泥环降脆增韧作用机理研究[J]. 石油学报, 2008, 29(3): 438-441.
LI Zao-yuan, GUO Xiao-yang, LUO Fa-qiang, et al. Research on mechanism of increasing flexibility and decreasing brittleness of cement sheath in oil well[J]. Acta Pe-

- trolei Sinica, 2008,29(3):438-441.
- [6] BAUMGARTE C, THIERCELIN M, KLAUS D. Case studies of expanding cement to prevent microannular formation[R]. SPE 56535,1999.
- [7] 冉千平,刘加平,缪昌文,等. 减缩抗裂型混凝土超塑化剂的性能及其作用机理[J]. 硅酸盐学报,2006,34(12):1537-1541.
- RAN Qian-ping, LIU Jia-ping, MIAO Chang-wen, et al. Performance of shrinkage-reducing and anti-cracking concert superplasticizer and its action mechanism[J]. J Chin Ceram Soc, 2006,34(12):1537-1541.
- [8] 姚晓. 油井水泥膨胀剂研究(Ⅱ)——膨胀机理及影响因素[J]. 钻井液与完井液,2004,21(5):43-48.
- YAO Xiao. Study on expandant for oil well cement(Ⅱ): expanding mechanism[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2004,21(5):43-48.
- [9] GOUAL M S, BALI A, BARQUIN F D, et al. Isothermal moisture properties of clayey cellular concretes elaborated from clayey waste, cement and aluminium powder[J]. Cement and Concrete Research, 2006,36:1768-1776.
- [10] NARAYANAN N, RAMAMURTHY K. Structure and properties of aerated concrete: a review[J]. Cement & Concrete Composites 2000,22:321-329.
- [11] TONY D H, JAY M F, SHAWN D R, et al. Foamed cement selection for horizontal liners proves effective for zonal isolation—case history[R]. SPE 71055, 2001.
- [12] MICHAEL P, JOHN M, JOHN A, et al. Selection of foamed cement for HPHT gas well proves effective for zonal isolation—case history[R]. SPE 79909, 2003.
- [13] JAMES E G, GUNNAR L, KRIS R, et al. Foam cement engineering and implementation for cement sheath integrity at high temperature and high pressure[R]. IADC/SPE 87194, 2004.
- [14] 丁士东,张卫东. 国内外防气窜固井技术[J]. 石油钻探技术,2002,30(5):35-38.
- DING Shi-dong, ZHANG Wei-dong. Domestic & over-sea cementing techniques of gas-channeling prevention[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2002,30(5):35-38.
- [15] 桑来玉,丁士东,赵艳,等. 油井水泥膨胀剂室内检测与评价[J]. 石油钻探技术,2000,28(3):24-26.
- SANG Lai-yu, DING Shi-dong, ZHAO Yan, et al. Experimental test and evaluation of cement swelling agents[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2000,28(3):24-26.
- [16] 王建东,屈建省,高永会. 国外深水固井水泥浆技术综述[J]. 钻井液与完井液,2005,22(6):54-60.
- WANG Jian-dong, QU Jian-sheng, GAO Yong-hui. The review of deep sea cementing slurry technology abroad[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2005,22(6):54-60.
- [17] 孙凌,吕容平,蔡涛,等. 氮气膨胀剂的研究与应用[J]. 钻井液与完井液,2006,23(2):33-36.
- SUN Ling, LÜ Rong-ping, CAI Tao, et al. Study and application of nitrogen-expanding agent for cement slurry[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2006,23(2):33-36.
- [18] CABRILLAC R, FIORIO B, BEAUCOUR A, et al. Experimental study of the mechanical anisotropy of aerated concretes and of the adjustment parameters of the introduced porosity[J]. Construction and Building Materials, 2006,20:286-295.
- [19] 陈胡星,叶青,沈锦林,等. 钙矾石的长期稳定性[J]. 材料科学与工程,2001,19(2):69-71.
- CHEN Hu-xing, YE Qing, SHEN Jin-lin, et al. Long term stability of ettringite in cement paste[J]. Materials Science & Engineering, 2001,19(2):69-71.
- [20] 赵福麟. 化学原理(Ⅱ)[M]. 东营:石油大学出版社,1997:75-83.
- [21] 步玉环,柳华杰,宋文宇. 晶格膨胀剂对水泥-套管界面胶结性能的影响试验[J]. 石油学报,2011,32(6):1067-1071.
- BU Yu-huan, LIU Hua-jie, SONG Wen-yu. Experimental study on effects of lattice expansive agent on cement-casing interfacial bonding quality[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011,32(6):1067-1071.

(编辑 李志芬)