

文章编号:1673-5005(2007)01-0108-06

油井水泥石脆性降低的途径及其作用机理

华苏东, 姚 晓

(南京工业大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210009)

摘要:针对国内油田薄油层井、小间隙井和侧钻井固井后射孔及后续增产措施造成的水泥环脆裂(即二次窜流)问题,为了降低水泥石的脆性,正确评价不同材料对水泥石韧性或弹性的影响,对掺有胶乳、橡胶粉和 PVA 纤维水泥石的抗折强度、抗压强度、抗冲击功和弹性模量等力学性能进行了研究,并对 3 种材料的作用机理进行了剖析。研究表明,与净浆水泥石相比,掺有胶乳和橡胶粉水泥石的弹性模量分别降低了 69%~76% 和 49%~60%,掺有 PVA 纤维水泥石的抗冲击功和抗折强度分别提高了 9%~89% 和 16%~37%。胶乳、橡胶粉与水泥水化产物的有效铰接和桥联作用显著提高了水泥石的弹性,PVA 纤维的有效阻裂作用显著提高了水泥石的韧性。

关键词:固井;水泥环;油井水泥;韧性;胶乳;纤维;橡胶粉;弹性模量

中图分类号:TE 256.6

文献标识码:A

Reduction in friability of well cement stone and its function mechanism

HUA Su-dong, YAO Xiao

(College of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: Aiming to the problem of the brittle fracture of cement sheath caused by perforation and other production enhancing measures after well cementing of thin oil reservoir wells, latex, rubber powders and PVA fibers were studied to reduce cement stone friability and distinguish the toughness and elasticity of cement stone accurately. The mechanical properties of well cement stone mixed latex, rubber powders and PVA fibers were measured, and the function mechanism of above mentioned materials was analyzed. The results show that compared with net cement stone, the elastic modules of well cement stone with latex and rubber powders are decreased by 69%~76% and 49%~60% respectively. The flexural strength, the impact work of cement stone with PVA fibers are increased by 9%~89% and 16%~37% respectively. Articulation and bridging of latex and rubber powders can improve the elasticity of well cement stone remarkably. Crack resistance behavior of PVA fibers can improve the toughness of cement stone markedly.

Key words: cementing; cement sheath; well cement; toughness; latex; fiber; rubber powder; elastic module

固井就是将水泥浆注入环空(井壁与套管之间)的过程,目的是为了层间分隔、支撑和保护套管^[1]。固井质量直接关系到油气井寿命的延长、采收率的提高和油气资源的保护。影响固井质量的因素主要有施工工艺、井下地质条件和固井材料,其中固井材料是固井设计的重要环节。油井水泥是固井材料的主要组成部分。井下水泥环的破坏必然减弱或失去封隔地下油、气、水层的作用,造成层间窜流并腐蚀套管,严重时会使油气井报废。大庆油田在射孔前后进行的声幅测井(CBL)结果证实,射孔前

声幅质量为优秀,而射孔后声幅质量不合格,并发现在 722 口套损井的 990 个套损点中,射孔井段附近的套损占 56.0%^[2]。通过降低水泥石的脆性来保证固井质量,延长油气井寿命,是国内外固井工程技术人员所关心的重要课题。降低水泥石脆性的方法在国内外文献中已有报道^[3-5],但在评价不同材料对水泥石韧性或弹性的影响方面仍存在分歧,有碍于相关材料的研发和应用。为了解决固井后射孔和后续增产措施造成的水泥环脆裂(即二次窜流)问题,正确评价不同材料对水泥石韧性或者弹性的影响,

收稿日期:2006-06-05

基金项目:国家高新技术“863”计划项目(2003AA327120);南京工业大学博士创新基金资助项目(BSCX200503)

作者简介:华苏东(1981-),男(汉族),江苏淮安人,博士研究生,研究方向为油井水泥固井外加剂。

笔者对掺有胶乳、橡胶粉、纤维等3种材料的水泥石力学性能进行研究,并对其作用机理进行分析,以期对新型固井材料的选择和设计提供一定的理论支持。

1 普通水泥石固井材料

1.1 油井水泥石的性能

水泥石是属于有先天微观缺陷的脆性材料,并存在抗拉强度低(为抗压强度的1/7~1/12)、抗破裂性能差(极限延伸率为0.02%~0.06%)和抗冲击强度低(断裂功为20~80 J/m²)^[2]等固有缺陷。

1.2 井下水泥环的损伤

在油气井开发过程中,由于油井水泥石固有的脆性,井下水泥环受射孔弹高能聚流的作用,在瞬间承受3~4 GPa的冲击压力^[6],其应力波在水泥环局部形成拉伸的高应力区,当水泥环的径向拉应力超过其极限时,水泥环会破裂形成宏观裂纹。油气井开发过程中的后续增产措施使这些裂纹进一步扩大,甚至使水泥环的封隔作用彻底失效,造成地下流体(油、气、水)层间窜流。如果在生产井中出现这种情况,油气资源就会因层间窜流而流失或使其他地层的流体进入产层;如果在注水井中出现这种情况,注入的流体可能通过水泥环进入非目的层,从而影响油气采收率的提高。

随着小眼井、分支井、侧钻井和薄油层井、热采井数量的增多,对固井质量的要求也越来越高。对于小间隙环空和薄油层固井,因水泥环很薄,水泥石的完整性必须得到保证,否则油井寿命将受到严重影响;开窗侧钻井、大斜度井、大位移井和分支井中造斜段的水泥环经常遭受继续钻进时钻头、钻杆的

撞击和震动,以及热采井中热冲击应力对水泥环产生的破坏,都要求降低水泥环的脆性。

在油气井长期生产过程中,当受到高温高压作用时(如酸化、压裂以及注蒸汽等)套管将沿径向和轴向膨胀,轴向力将在水泥环和套管的胶结面上产生剪切应力,引起胶结面破坏或使水泥环产生径向破裂。水泥环的破裂又将大幅度降低油气井产量,加剧地下流体对套管和水泥环的腐蚀,使套损率上升。

2 胶乳材料

胶乳是一种乳液聚合物,悬浮颗粒的直径一般为0.05~0.5 μm,大多数胶乳悬浮液含有约50%的固相^[7]。一般非离子型或离子型的胶乳作为油井水泥外加剂,主要有聚醋酸乙烯脂、聚苯乙烯、氯乙烯共聚物、氯苯乙烯、氯丁二烯/苯乙烯共聚物、苯乙烯/丁二烯共聚物及树脂胶乳等。

2.1 性能试验

胶乳材料具有以下优点^[8]:降低水泥石的弹性模量,提高水泥石的弹性;降低油井水泥浆的滤失量;提高水泥环的粘结性能。缺点是掺量大(一般占水泥干灰量的10%~20%)、价格昂贵、污染环境、抗压强度损失过大、不能改善抗冲击性能(见表1, w_{w-c} 表示水与干水泥的质量分数之比)等。

由表1可知,与净浆相比,掺有胶乳的水泥石,抗冲击功降低17%~25%,抗折强度增长-29%~2%,抗压强度增长-32%~5%,弹性模量降低69%~76%,故掺有胶乳的水泥石,其弹性显著改善,抗冲击功明显降低。

表1 掺有胶乳水泥石的力学性能(48 h, $w_{w-c}=0.44$)

质量分数 $w/\%$		抗冲击功 W/J		抗折强度 p_1/MPa		抗压强度 p_2/MPa		弹性模量 G/MPa	
胶乳	USZ	50 ℃	80 ℃	50 ℃	80 ℃	50 ℃	80 ℃	50 ℃	80 ℃
0	0	0.047	0.048	7.91	8.33	23.1	28.3	26.2	30.5
5	0.1	0.035	0.034	7.35	7.45	24.3	19.2	8.01	8.61
10	0.2	0.037	0.036	8.02	8.23	18.6	21.6	7.93	7.93
15	0.3	0.038	0.035	8.04	7.35	24.1	24.1	6.94	7.65
20	0.4	0.039	0.037	6.47	5.88	20.6	23.1	6.51	7.21

注:USZ为减阻剂(河南卫辉);所用水泥为G级油井水泥(江苏江南);所用胶乳为市售。

2.2 作用机理

胶乳水泥体系是有机高分子聚合物分散体系,其作用机理复杂,可用互穿聚合物网络解释其作用机理。互穿聚合物网络是指两种或两种以上交联聚合物互相贯穿而形成的交织在一起的聚合物网络,可以视为用化学方法实现的机械共混物^[9]。

当聚合物胶乳与水泥混合形成水泥浆时,聚合物胶乳颗粒均匀地分散于水泥浆中。水泥凝胶体单

元结构与聚合物胶乳颗粒间的自由水通常被限制在毛细管孔隙中,但是只要水泥水化继续进行,毛细管孔隙中的水将不断减少,使得聚合物胶乳颗粒从水中分离出来,在水泥水化物表面形成一层连续薄膜。这层薄膜将水泥水化物的单元网络结构相互“铰”结,牢固地粘结成为一个整体。这些聚合物丝状膜层横跨于水泥浆硬化体的缺陷和微裂缝间,穿梭连接,既分散了水泥石的应力集中,又增加了变形性,

从而提高了水泥石的弹性(见图 1 和图 2)。

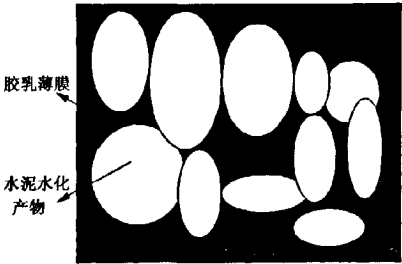


图 1 胶乳材料作用机理示意图

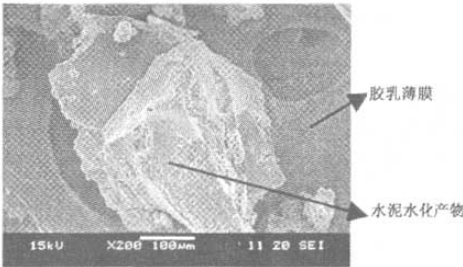


图 2 胶乳膜与水泥水化产物相互粘结

表 2 掺有橡胶粉水泥石的力学性能(48 h, $w_{w,c}=0.44$)

质量分数 $w/\%$		抗冲击功 W/J		抗折强度 p_1/MPa		抗压强度 p_2/MPa		弹性模量 G/MPa	
橡胶粉	USZ	50 ℃	80 ℃	50 ℃	80 ℃	50 ℃	80 ℃	50 ℃	80 ℃
0	0	0.047	0.048	7.91	8.33	23.1	28.3	26.2	30.5
5	0.1	0.051	0.051	6.39	6.61	18.1	18.4	12.8	15.5
10	0.2	0.054	0.057	6.02	6.54	17.6	17.8	12.4	14.7
15	0.3	0.058	0.052	5.80	6.39	16.1	15.8	11.8	13.5
20	0.4	0.053	0.053	6.39	6.83	13.6	14.1	10.4	12.8

注:所用橡胶粉为市售。

3.2 作用机理

颗粒材料的作用机理可用夹杂第二相桥联原理进行解释,该原理主要围绕能量消耗的作用展开,比较成熟的理论有 Bucknall^[10-12]的多重银纹理论和 Newman 的剪切-屈服理论。

在水泥基体中引入适宜的粒子后,分散相粒子可以起到应力集中点的作用,在受到冲击载荷作用时,引发粒子周围的基体产生大量银纹,使大量能量得以充分耗散,从而降低了水泥石的脆性(如图 3 和图 4)。

用 ΔJ_{IB} 表示颗粒材料的增韧效果, ΔJ_{IB} 的值越大,材料的增韧效果越好^[13]。其计算公式如下:

$$\Delta J_{IB} = f \int_0^l \sigma_1(x) d\delta(x). \tag{1}$$

式中, ΔJ_{IB} 为韧性增值, N/m ; f 为夹杂相在裂纹面上的面积分数(相当于其体积分); l 为夹杂相桥联长度, m ; σ_1 为夹杂相桥联应力, MPa ; δ 为裂纹张开

3 颗粒材料

颗粒材料主要包括无机颗粒和有机颗粒,粒径一般为 75 ~ 230 μm 。无机颗粒主要包括膨润土、硅灰、微珠、活性矿渣和云母粉等;有机颗粒主要包括天然橡胶粉、工业合成橡胶粉、有机玻璃珠等。

3.1 性能试验

颗粒材料具有价格低廉、原料易得、改善水泥石的弹性、延缓水泥石裂纹扩展等优点。缺点是掺量大(一般占水泥干灰量的 10% ~ 20%)、不具备胶结能力、不易搅拌均匀、抗压强度损失过大、抗冲击性能改善不明显(见表 2)。

从表 2 可知,与净浆相比,掺有橡胶粉的水泥石,抗冲击功增加 8% ~ 23%,抗折强度降低 19% ~ 27%,抗压强度降低 22% ~ 50%,弹性模量降低 49% ~ 60%。因此,掺有橡胶粉的水泥石,其弹性改善明显,抗冲击功提高不显著,抗折强度、抗压强度损失过大。

距离, m 。

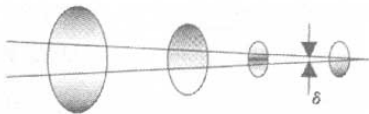


图 3 颗粒桥联作用示意图

假定夹杂相桥联应力 σ_1 仅与裂纹张开位移 δ 有关,即 $\sigma_1(x) = \sigma_1(\delta(x))$,则式(1)可简化为

$$\Delta J_{IB} = f \int_0^l \sigma_1(\delta) d\delta. \tag{2}$$

其中弹性桥联

$$\sigma_1 = k\delta. \tag{3}$$

故式(2)可简化为

$$\Delta J_{IB} = kf(\delta(l))^2/2.$$

式中, k 为桥联相弹性系数, N/m^3 ; $\delta(l)$ 为桥联相所能承受的最大伸长, m ; k , f 和 $\delta(l)$ 均正比于 ΔJ_{IB} ,故提高桥联相弹性系数、桥联相在裂纹面上的面积分数和

桥联相所能承受的最大伸长可降低材料的脆性。

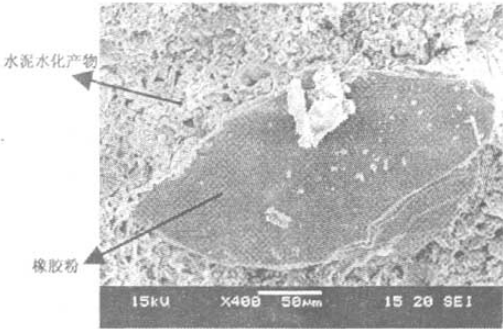


图 4 橡胶粉与水泥水化产物互嵌

4 纤维材料

纤维增韧材料可分为刚性纤维和非刚性纤维，

非刚性纤维又可分为高弹模纤维和低弹模纤维^[14]。在纤维增韧油井水泥研究中,不但要提高水泥石的韧性,纤维水泥浆也要有适当的可泵性^[15],故一般采用非刚性纤维作为油井水泥增韧材料。高弹模纤维主要有石棉纤维、玻璃纤维和碳纤维^[16]等;低弹模纤维主要有维纶纤维、尼龙纤维、聚丙烯纤维、聚乙烯醇纤维和涤纶纤维等。

4.1 性能试验

纤维增韧材料具有掺量小(一般占水泥干灰量的 0.5%~2.0%)、可增加油井水泥石的抗折强度、抗冲击性能和抗压强度、改善水泥环与地层的胶结、抑制水泥石的收缩等优点。缺点是价格昂贵、混拌要求高、施工设备要求高、不易分散、与水泥基体的粘结性能不好。

表 3 掺有 PVA 纤维水泥石的力学性能(48 h, w_{w-c} = 0.44)

质量分数 w/%		抗冲击功 W/J		抗折强度 p ₁ /MPa		抗压强度 p ₂ /MPa		弹性模量 G/MPa	
PVA 纤维	USZ	50 ℃	80 ℃	50 ℃	80 ℃	50 ℃	80 ℃	50 ℃	80 ℃
0	0	0.047	0.048	7.91	8.33	23.1	28.3	26.2	30.5
0.15	0.1	0.051	0.053	9.31	9.81	19.2	23.4	20.8	28.2
0.30	0.1	0.059	0.056	9.52	10.3	23.0	29.7	25.4	26.5
0.50	0.2	0.080	0.061	9.15	9.91	21.9	25.1	24.8	25.5
0.70	0.2	0.089	0.085	10.8	10.3	24.2	30.5	23.4	23.8

注:PVA 纤维为市售。

从表 3 可知,与净浆水泥石相比,掺有 PVA 纤维的水泥石,抗冲击功增加 9%~89%,抗折强度增加 16%~37%,抗压强度增加 17%~8%,弹性模量降低 3%~21%,故掺有 PVA 纤维的水泥石的抗冲击功和抗折强度显著提高,而抗压强度和弹性模量改善不明显。

4.2 作用机理

表述纤维材料增韧机理的方法较多,如桥接理论、纤维间距理论、多缝开裂理论、混合法则以及裂尖应力强度因子计算法等,其中裂尖应力强度因子计算法更能直观反映纤维材料的增韧机理。

当裂纹出现后,如果裂纹位于纤维之间而不跨越纤维,纤维的铆固作用将阻止裂纹的扩展。如果裂尖运动无限接近于纤维时,裂尖周围的高应力集中将使裂尖邻域内的纤维与水泥沿接触面部分脱离,从而裂纹越过纤维。显而易见,在纤维未被拔断或拔出之前这种脱离面范围不大;在裂纹刚好穿过(或绕过)纤维的瞬间,水泥基体的突然断开必然导致纤维在与水泥基体界面分离部分应变的突变,从而使这部分纤维承受很大的拉应力。根据 Saint-Venant 原理,并且假定水泥基体处于平面应力的状

态^[17],由于纤维与水泥的分离界面很小,可认为集中力 P 正好作用在裂纹面上(如图 5),纤维的作用可以用一对单位厚度上的集中力 P 表示。对于受单向拉伸的无限大裂纹板,裂尖的应力强度系数(K)为

$$K = K^c - K^f. \tag{4}$$

式中, K^c 为无纤维时裂尖的应力强度系数, $N/m^{3/2}$; K^f 为由纤维等效的集中力 P 产生裂尖的应力强度系数, $N/m^{3/2}$ 。

在式(4)中,无纤维时由远场均匀拉力 σ 产生的裂尖应力强度系数(K^c)为

$$K^c = \sigma \sqrt{\pi a}. \tag{5}$$

式中, σ 为远场均匀拉力,MPa; a 为裂纹的半长度, m。

单根纤维等效集中力 P 产生的裂纹近端应力强度系数(K^f)为

$$K^f = (P/\sqrt{\pi a}) \sqrt{(2a-b)/b}. \tag{6}$$

式中, P 为纤维等效的集中力,MPa; b 为纤维至裂尖的距离(在裂纹刚好穿过纤维的瞬间, b 是一个微小的量),m。

由式(6)可知,当 b 趋于零时, K^f 趋于 ∞ 。可

见,在裂纹尖端穿过纤维的瞬间,由纤维等效的集中力 P 产生的反向应力强度因子是巨大的,它极大地减小了裂纹总的应力强度系数(K),从而阻止裂纹继续扩展。要使裂纹穿过纤维后继续扩展,必须增加远场载荷,但裂纹扩展并遇到另一纤维,纤维的作用又将极大地阻止裂纹扩展(如图6)。

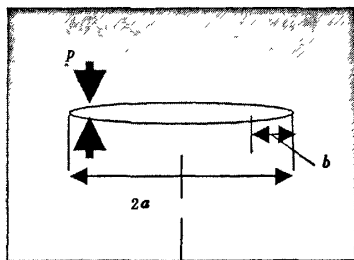


图5 纤维的作用示意图

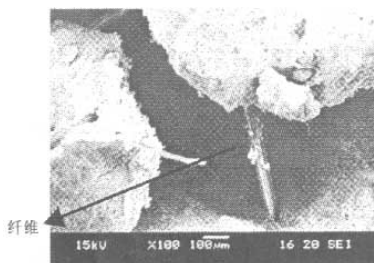


图6 纤维阻裂作用的SEM图

5 结论

(1) 胶乳和橡胶粉可以显著降低油井水泥石的弹性模量,纤维材料可以显著提高水泥石的抗冲击功和抗折强度。

(2) 互穿聚合物网络理论、第二相桥联原理以及裂尖应力强度因子计算法全面、直观地解释了胶乳、橡胶粉、纤维材料降低油井水泥石脆性的作用机制。

(3) 正确评价了不同材料对水泥石的韧性或弹性的影响,为新型固井材料的选择和设计提供了一定的理论支持。

参考文献:

- [1] GOODWIN K J. Oilwell/gaswell cement-sheath evaluation[R]. SPE 39290, 1997.
- [2] 姚晓,樊松林,吴叶成,等. 油井水泥纤维增韧材料的研究[J]. 西安石油大学学报:自然科学版, 2005, 20(2):39-42.
YAO Xiao, FAN Song-lin, WU Ye-cheng, et al. Study and application of toughness-enhancing fiber material for the cement used for well-cementing[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2005, 20(2):39-42.
- [3] DAVID J Mack, ROBERT L Dillenbeck. Cement: How tough is tough enough? a laboratory and field study[R]. SPE 78712, 2002.
- [4] WALTER Morris, MARCELO A Criado, JORGE Robles. Design of high toughness cement for effective long lasting well isolations[R]. SPE 81001, 2003.
- [5] 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.
- [6] 励争,苏先基. 水泥石动态断裂韧性的实验研究[J]. 力学与实践, 1999, 21(1): 41-44.
LI Zheng, SU Xian-ji. Determination of dynamic fracture toughness for cement block [J]. Mechanics and Practice, 1999, 21(1): 41-44.
- [7] 孙富全,靳建洲. 胶乳水泥浆体系[C]//2004年固井技术研讨会论文集编委会. 2004年固井技术研讨会论文集. 北京:石油工业出版社,2004:90-94.
- [8] 姚晓,吴叶成,黎学年. 国内外固井技术难点及新型水泥外加剂特性评析[J]. 钻井液与完井液, 2005, 22(2):11-16.
YAO Xiao, WU Ye-cheng, LI Xue-nian. Evaluation of the key cementing technology and the properties of novel cement additives [J]. Drilling fluid & completion fluid, 2005, 22(2):11-16.
- [9] 阎利. 有机玻璃增韧改性研究[D]. 重庆:重庆大学材料科学与工程学院, 2001.
- [10] BUCKNALL C B, KARPODINIS A, ZHANG X C. A model for particle cavitation in rubber-toughened plastics [J]. Journal of Materials Science, 1994, 29(13): 3377-3383.
- [11] LAZZER A, BUCKNALL C B. Application of a dilatational yielding model to rubber-toughened polymers[J]. Polymer, 1995, 36(15):2895-2902.
- [12] LAZZER A, BUCKNALL C B. Dilatational bands in rubber-toughened polymers[J]. Journal of Materials Science, 1993, 28(24):6799-6808.
- [13] 杨卫. 宏观断裂力学[M]. 北京:国防工业出版社, 1995:42-49.
- [14] 董建伟,王广宇,裴宇波. 改性聚丙烯纤维混凝土及其应用[J]. 吉林水利, 2000, 9: 7-10.
DONG Jian-wei, WANG Guang-yu, PEI Yu-bo. Quality

- ty-improving polypropylene fiber concrete and its application [J]. Jilin Water Conservancy, 2000, 9:7-10.
- [15] WANG Yan-hui. Flow of fiber-reinforced cement slurries at elevated temperatures[D]. Columbia: Columbia University, 2001.
- [16] 步玉环,李玉海,王瑞和. 碳纤维水泥配伍性试验研究[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2004, 28(6): 41-48.
- BU Yu-huan, LI Yu-hai, WANG Rui-he. Experimental study of compatibility between carbon fiber and cement [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28(6): 41-48.
- [17] 易志坚,杨庆国,李祖伟,等. 基于断裂力学原理的纤维砼阻裂机理分析[J]. 重庆交通学院学报, 2004, 23(6): 43-45.
- YI Zhi-jian, YANG Qing-guo, LI Zu-wei, et al. Use of fracture mechanics concept to interpret crack resistance behavior of fiber reinforced concrete [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2004, 23(6): 43-45.

(编辑 修荣荣)

(上接第94页)

- [2] 陈浩,刘承杰,刘清友,等. 套管柱与钻柱间侧向力的分析[J]. 天然气工业, 2001, 21(4): 63-65.
- CHEN Hao, LIU Cheng-jie, LIU Qing-you, et al. An analysis of the lateral force between casing string and drill stem[J]. Nature Gas Industry, 2001, 21(4): 63-65.
- [3] 赵国珍,龚伟安. 钻柱力学基础[M]. 北京:石油工业出版社, 1998.
- [4] ROBERT F, MITCHELL, LANDMARK. A buckling criterion for constant-curvature wellbores[R]. SPE 57896, 1999.
- [5] WEI Yong-qiu. Effect of drill pipe/coiled tubing initial configuration on contact force[R]. SPE 52189, 1999.
- [6] 陈浩,刘承杰. 大位移井套管柱磨损的探讨[J]. 石油矿场机械, 2002, 31(1): 7-9.
- CHEN Hao, LIU Cheng-jie. A discussion on the casing wear in extended reach well [J]. Oil Field Equipment, 2002, 31(1): 7-9.
- [7] 苏义脑. 水平井眼轨道控制[M]. 北京:石油工业出版社, 2000.
- [8] 凌道盛,徐兴. 非线性有限元及程序[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2000.

(编辑 沈玉英)

中国石油大学(华东)石油工程学院 19 项科研成果通过鉴定

山东省科技厅分别组织油气田开发学科和油气井工程学科鉴定委员会对中国石油大学(华东)石油工程学院科研项目进行鉴定。其中,油气田开发学科鉴定委员会以中国科学院院士郭尚平为主任委员,油气井工程学科鉴定委员会以中国工程院院士苏义脑为主任委员。在通过鉴定的 19 项科研项目当中,有 3 项达到国际领先水平,13 项达到国际先进水平,3 项达到国内领先水平。

在通过鉴定的 19 项科研成果中,姚军主持完成的“碳酸盐岩缝洞型介质流动机理研究及其应用”等 3 项科研成果达到国际领先水平;徐依吉主持完成的“胶乳防气窜水泥浆体系的研究”等 13 项科研成果达到国际先进水平;步玉环主持完成的“提高易渗漏小间隙井固井质量技术”等 3 项科研成果达到国内领先水平。以上科技成果标志着中国石油大学(华东)石油工程学院的科研水平又迈上了一个新台阶,部分领域已处于国际前沿水平。

(摘自中国石油大学(华东)校园网)