

采油用高温缓蚀阻垢剂的研究及应用

杜清珍¹, 谢刚¹, 姜伟祺¹, 闫暄崎¹, 朱克华², 魏爱军¹

(1. 华北油田公司采油工程研究院, 河北 任丘 062552;
2. 华北油田公司第二采油厂, 河北 霸州 065700)

摘要: 目的 通过化学防腐技术, 解决油田生产中高温油井腐蚀结垢影响油田正常生产的难题。方法 进行挂片失重实验和容量分析实验, 开展现场水质分析和垢样分析, 通过正交实验研究不同种类缓蚀阻垢剂在不同添加量、不同温度下对缓蚀效率、阻垢效率的影响。结果 在明确油井腐蚀结垢原因的基础上, 有针对性地研制出了以咪唑啉衍生物和有机膦酸盐等为主, 以耐高温的氟碳咪唑啉为辅的 HZG 系列缓蚀阻垢剂。其缓蚀阻垢效果较好, 缓蚀率达 90% 以上, 阻垢率达 95% 以上, 有效缓解了高温油藏(大于 100 ℃)油井筒腐蚀、结垢的问题。经 10 口井现场应用, 铁离子下降率平均达到 82%, 钙离子浓度明显上升, 平均检泵周期延长了 2.2 倍。结论 氟碳咪唑啉的加入有效提高了缓蚀阻垢剂的耐温性。HZG 系列缓蚀阻垢剂用于现场的缓蚀阻垢效果较好, 解决了高温油井腐蚀结垢的难题。

关键词: 采油井; 腐蚀; 结垢; 缓蚀; 阻垢; 检泵周期

中图分类号: TG174.42; TE983 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)12-0056-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.12.009

Research and Application of High-temperature Corrosion and Scale Inhibitors for Oil Recovery

DU Qing-zhen¹, XIE Gang¹, JIANG Wei-qi¹, YAN Xuan-qi¹, ZHU Ke-hua², WEI Ai-jun¹

(1. Production Engineering Research Institute of Huabei Oilfield Company, Renqiu 062552, China;
2. The Second Oil Production Facility of Huabei Oilfield Company, Bazhou 065700, China)

ABSTRACT: Objective To solve the problem of corrosion and scaling affecting the normal production in the high temperature oil well during the oilfield production by chemical corrosion technology. **Methods** The weight loss test and the capacity analysis experiment were carried out and the on-site analyses of water quality and scale samples were performed. The effects of different kinds of corrosion and scale inhibitors on the corrosion efficiency and scale efficiency were studied by orthogonal test at different additive amounts and different temperatures. **Results** Based on clarifying the causes of the corrosion and scaling of oil well, the HZG series of corrosion and scale inhibitors were developed composed of imidazoline derivatives and organic phosphonic acid salt with supplement of high temperature-resistant fluorocarbon imidazoline. The inhibition effect on scale and corrosion was great, the corrosion inhibition rate was above 90% and the scaling inhibition rate was above 95%, effectively alleviating the corrosion and scaling problem of well bore under the high temperature oil reservoir (greater than 100 ℃), and the on-site applications achieved good effects in the testing of 10 wells, the average decreased rate of calcium ions reached 82%, the calcium ion concentration was also in-

收稿日期: 2015-10-28; 修訂日期: 2015-11-05

Received : 2015-10-28; Revised: 2015-11-05

作者简介: 杜清珍(1967—), 女, 河北人, 高级工程师, 主要从事油田化学方面的研究。

Biography: DU Qing-zhen (1967—), Female, from Hebei, Senior engineer, Research focus: the research and technical service of oilfield chemistry.

creased significantly, the average pump detection period extended 2.2 times. **Conclusion** Addition of components of fluorocarbon Imidazoline could effectively improve the heat resistance of corrosion and scale inhibitors. On-site usage of HZG series of corrosion and scale inhibitors obtained great inhibition effect on corrosion and scale, and solved the corrosion and scale problems of the high temperature oil well.

KEY WORDS: oil well; corrosion; scaling; corrosion inhibition; scale inhibition; pump detection period

在我国,腐蚀造成的损失占国民经济的3%左右,石油石化行业的这一数据约为6%^[1-3]。全球直接腐蚀成本占全球GDP的比例估计也在同样水平,达到1.8万亿美元。如果防腐蚀技术能够得到充分应用,腐蚀损失的30%~40%是可以挽回的。华北南部油田井深3000 m左右,油层温度约为120 ℃,随着油田开发的深入,综合含水量平均为86.5% (文中表示含量的分数均为质量分数),油井腐蚀呈现逐年增多的趋势。根据现场调研分析,该断块油井采出水矿化度相差较大,在12 000~35 000 mg/L之间,水型以氯化钙型为主,腐蚀主要集中在700~2000 m之间,表现为点蚀、坑蚀严重,由此造成油井检泵作业频繁,影响油田正常生产。为解决生产实际问题,在技术调研及查阅文献的基础上^[4-11],采取了经济适用的化学防腐阻垢技术。

目前,采油用缓蚀阻垢剂耐温性不足100 ℃^[12],无法满足油田高温油井的防腐阻垢需要。笔者项目组在分析腐蚀原因的基础上,研制出了HZG系列采油用高温缓蚀阻垢剂,其耐温性达130 ℃,有效缓解了高温油井井筒的腐蚀结垢,经现场应用,取得了较好的效果,实施井平均检泵周期延长2.2倍。

1 实验

1.1 水质及垢样分析

依据SY/T 5523—2000《油气田水分析方法》、SY/T 5329—94《碎屑岩油藏注水水质推荐指标及分析方法》和SY/T 0600—1997《油田水结垢趋势预测方法》对现场水样和垢样进行详细分析。

1.2 动、静态挂片实验

试片为25 mm×12 mm×2 mm的N80碳钢片,成分为:C 0.24%, Si 0.22%, Mn 1.19%, S 0.004%, P 0.0132%, Cr 0.036%, Ni 0.028%, Mo 0.021%, Cu 0.019%, Fe余量。试片依次经400~800目金相砂纸打磨抛光,再经无水乙醇及石油醚擦洗后,放入干燥器中备用。实验介质为现场油井产出水。

动态挂片实验在CLFS-II高温高压动态腐蚀速率仪中进行。实验前,测量试片尺寸并称量。实验介质均为1 L,同时挂入3个平行样,仪器转速设定为65 r/min,实验周期为72 h。静态腐蚀实验在101A-1型恒温干燥箱中进行,实验介质均为0.5 L,实验周期为120 h。

实验结束后,按照SY/T 0026—1999《水腐蚀性测试方法》中的5.5小节对腐蚀产物进行清除,并干燥及称取质量。以实验前后试片的质量损失计算腐蚀速率 v (mm/a):

$$v = 8.76 \times 10^4 \times (m_0 - m_1) / (\rho St) \quad (1)$$

式中: m_0 为试片初始质量,g; m_1 为试片实验后的质量,g; ρ 为金属密度,一般取7.85 g/cm³; S 为试片表面积,cm²; t 为腐蚀时间,h。

缓蚀效果评价依据SY/T 5273—2000《油田采出水用缓蚀剂性能评价方法》中的常压静态腐蚀速率及缓蚀率测定方法进行,实验介质为现场采出水,缓蚀率 η 按下式计算:

$$\eta = (v_0 - v_1) / v_1 \times 100\% \quad (2)$$

式中: v_0 为空白实验试片的腐蚀速率,mm/a; v_1 为加药后试片的腐蚀速率,mm/a。

1.3 阻垢实验

阻垢实验依据SY/T 5673—93《油田用防垢剂性能评价方法》进行,介质直接取现场油井产出水,温度为现场实际温度。在101A-1型恒温干燥箱中恒温放置24 h,滴定加热前后介质中的钙离子浓度,按(3)式计算阻垢率 E :

$$E = \frac{\rho_i - \rho_0}{\rho - \rho_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: ρ_i 为加热加药后的Ca²⁺质量浓度,mg/L; ρ_0 为空白水样加热后的Ca²⁺质量浓度,mg/L; ρ 为室温下空白水样的Ca²⁺质量浓度,mg/L。

2 结果与讨论

2.1 水质分析结果

由表1可知,该断块油井矿化度在5800~15 400

表1 某断块部分油井采出水分析结果

Tab. 1 Analysis results of the water production from the oil wells of a fault block

取样地点	矿化度	含量/(mg · L ⁻¹)								水型	含量/(mg · L ⁻¹)			pH(试纸)
		Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	CO ₂		总铁	亚铁	硫	
Y9-24X	15377.31	8329.95	1078.41	0.00	15.19	445.89	162.10	5345.76	120.23	氯化钙	17.30	16.10	0.00	6.0
Y60-81X	15341.59	8675.24	827.61	0.00	18.54	561.12	0.00	5259.09	18.22	氯化钙	6.08	3.90	0.05	6.5
Y63-69X	8445.76	3841.27	1429.52	0.00	15.19	55.11	112.87	2991.79	29.15	重碳酸钠	3.90	3.25	0.00	6.0
Y60-41X	15612.97	8761.56	940.47	0.00	31.91	658.82	0.00	5220.22	61.93	氯化钙	21.60	17.70	0.00	6.0
Y60-8X	5895.98	2287.50	1429.52	86.32	12.16	50.10	60.04	1970.35	0.00	重碳酸钠	1.38	0.30	1.80	7.0
Y63-84X	7510.14	3409.67	1316.66	61.66	22.79	62.63	30.02	2606.72	0.00	重碳酸钠	0.45	0.10	0.00	6.0

mg/L之间,部分井含有游离CO₂和S²⁻,pH值较低,在6.0~7.0之间,说明存在由游离CO₂,S²⁻及阴阳离子引起的电化学腐蚀。部分油井存在CO₃²⁻,说明井筒中有碳酸盐结垢。

2.2 垢样分析结果

取某断块油井井筒垢样进行分析,其外观呈黑色,质较硬。加入盐酸后全部溶解,并且反应剧烈,有大量气泡产生,有臭味,说明生成了碳酸盐和硫化物。定量分析显示,该垢样含Ca²⁺3.3%,Fe³⁺23.9%,Fe²⁺14.3%,灼烧减量为25.8%,酸不溶物为0.28%。含铁离子38.2%,钙离子较少,说明该井垢物以腐蚀产物为主,辅以少量碳酸盐结垢。垢样溶解时有硫化氢气味,说明存在S²⁻腐蚀。

根据以上分析判断,该断块主要是由低pH值、高矿化度及游离CO₂和S²⁻等引起的电化学腐蚀^[13]。由于各油井产出液的矿化度、游离CO₂及S²⁻等含量不同,导致各井腐蚀、结垢程度也不同。

2.3 配方优化

针对现场油井的腐蚀、结垢特点,以高效、环保、低成本为原则,在现场条件下对收集到的7种不同缓蚀阻垢剂进行初选,并依据协同效应理论进行复配优化。在此基础上进一步开展浓度、温度、配伍性等实验研究,获得高效、绿色的HZG缓蚀阻垢剂配方。7种缓蚀阻垢剂包括:聚天冬氨酸类为主的1#、咪唑啉类衍生物为主的2#、磺酸盐共聚物为主的3#、有机膦酸盐类为主的4#、四元无磷共聚物类为主的5#、Gemini季铵盐类为主的6#和聚环氧琥珀酸类为主的7#。

2.3.1 缓蚀阻垢剂初选

利用现场水,分别采用静态挂片法和容量法(80℃,80 mg/L)对7种缓蚀阻垢剂进行了缓蚀、阻垢效

果优选,缓蚀效果考察时间为120 h,阻垢效果考察时间为24 h,结果见表2。

表2 不同缓蚀阻垢剂的优选结果

Tab. 2 Optimization results of different corrosion and scale inhibitors

药剂	腐蚀速率/(mm·a ⁻¹)	缓蚀率/%	钙离子含量/(mg·L ⁻¹)		阻垢率/%
			常温	80 ℃	
空白	0.0432		115.6	95.8	
1#	0.0113	73.8	—	108.7	25.2
2#	0.0072	83.3	—	113.4	88.7
3#	0.0088	79.6	—	110.8	55.6
4#	0.0044	89.8	—	114.1	92.6
5#	0.0135	68.8	—	113.9	61.5
6#	0.0081	81.3	—	114.8	95.8
7#	0.0068	84.3	—	115.3	98.3

由表2可知,2#,4#,6#和7#缓蚀阻垢剂具有较好的缓蚀、阻垢效果,缓蚀率在80%以上,阻垢率在88%以上;其余3种的缓蚀、阻垢效果相对较差,缓蚀率不足80%,阻垢率不足65%。为进一步提高药剂的性价比,考察各药剂间是否存在协同效应,针对效果较好的4种缓蚀阻垢剂,采用L₈(2⁴)的4因素2水平正交实验进行复配优化。因素及水平见表3,正交试验设计及结果见表4。

根据表4可知,实验1,4,6,7号的配方具有较好

表3 因素-水平

Tab. 3 Factor-level

水平	因素				mg/L
	2#	4#	6#	7#	
1	30	30	30	30	
2	50	50	50	50	

表4 正交实验及结果
Tab. 4 Orthogonal test table

实验号	水平				腐蚀速率 / (mm·a ⁻¹)	缓蚀率 / %	阻垢率 / %
	2#	4#	6#	7#			
1	1	1	1	1	0.0028	91.3	96.7
2	1	1	2	2	0.0103	67.9	93.5
3	1	2	1	1	0.0065	79.8	94.6
4	1	2	2	2	0.0037	88.5	98.5
5	2	1	1	2	0.0098	69.5	92.4
6	2	1	2	1	0.0036	88.8	96.5
7	2	2	1	2	0.0041	87.2	98.5
8	2	2	2	1	0.0115	64.2	96.8

的缓蚀、阻垢效果,缓蚀率达 87% 以上,阻垢率达 94% 以上,而其他几组配方的缓蚀效果相对较差,缓蚀率在 80% 以下。这说明相同组分在不同配比下具有不同的缓蚀、阻垢效果,当各组分配比适合时,可以充分发挥其协同效应,提高各单剂的性价比。

2.3.2 温度的影响

根据实际测量,油井井底温度在 90~130 ℃,腐蚀严重的井筒温度为 70~100 ℃。因此实验中选择温度为 70~120 ℃,在加药质量浓度为 80 mg/L 的条件下,利用现场水考察上述效果最好的 4 号实验中复合配方的耐温性,结果见图 1。图 1 表明,随着温度升高,缓蚀率下降,100 ℃以下的缓蚀率大部分在 90% 以上,但温度达到 120 ℃时,缓蚀率下降到 62.9%。这说明常规缓蚀阻垢剂在 100 ℃以上的耐温效果较差。

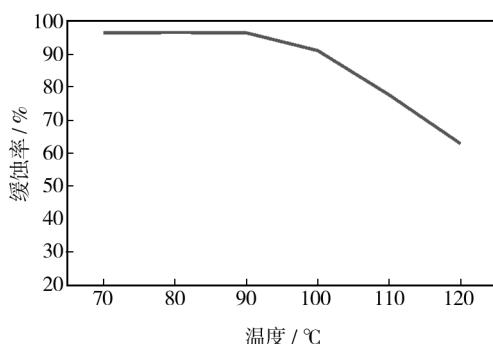


图 1 缓蚀率随温度的变化

Fig. 1 Changes in inhibition rate with temperature

通过查阅文献^[14~15],选择耐温性较好的缓蚀剂氟碳咪唑啉衍生物(FC)与初步优选效果较好的 4 组配方进行配伍性考察实验,条件如下:温度 120 ℃,加药质量浓度 80 mg/L,以现场水为介质,初步配方与 FC 质量比分别为 10:1,9:1,8:1。少量 FC 的加入

可以起到较好的缓蚀效果,但如果 FC 含量过高,不仅会降低产率,而且会增加成本。为了便于区别,将正交实验中 1 号的初步配方与 FC 组合记为 HZG-1,4 号的初步配方与 FC 组合记为 HZG-2,6 号的初步配方与 FC 组合记为 HZG-3,7 号的初步配方与 FC 组合记为 HZG-4。实验结果见图 2。

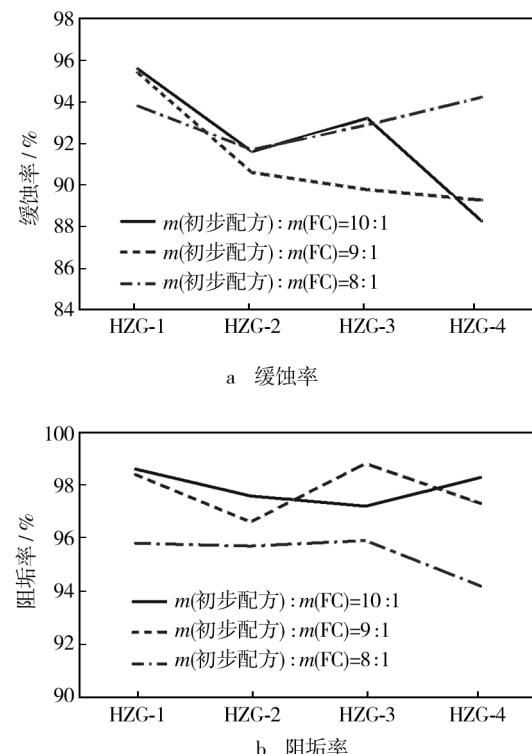


图 2 不同初步配方在 120 ℃下与 FC 的配伍性考察结果

Fig. 2 Study on compatibility of FC with different primary formulations at 120 ℃

图 2 表明,添加 FC 不仅可以提高缓蚀阻垢剂的耐高温缓蚀效果,使缓蚀率达到 90% 以上,而且对原配方的阻垢效果基本没有影响,阻垢率达 95% 以上。究其原理,FC 中的 F 电负性极强,可与 Fe 的空 d 轨道结合,并可与其他组分(如咪唑啉衍生物和有机磷酸盐的 p 键)吸附,在这些共同作用下,产生多点钉扎效应,提高了缓蚀阻垢剂的吸附能力;同时 F 原子之间的排斥力大,使钉扎的含 F 支链能够铺展开,加上烷基上未参与吸附键的 F 原子之间相互排斥,使伸向溶液中的 F 呈螺旋状排列,保护了内部各种化学键不受破坏,提高了原配方的耐温性,又使各组分间产生协同效应。

2.3.3 浓度的影响

为提高现场效费比,利用高温油井 Y60-81X 和 Y63-69X 的采出水对四组配方在不同浓度下的使用

效果进行了考察,结果见表5。由表5可知,在加药质量浓度为90 mg/L的条件下,HZG-1配方对Y60-81X井的缓蚀阻垢效果较好,缓蚀率达到92%,阻垢率达96.8%,而对Y63-69X井的缓蚀率仅为76%,阻垢率达95.7%;HZG-3对Y60-81X和Y63-69X井的缓蚀、阻垢效果均较好,对Y60-81X井缓蚀率达到95%,阻垢率达95.8%,对Y63-69X井缓蚀率为85%,阻垢率达95.6%。

由此可见,不同配方对不同高温油井的缓蚀阻垢效果都存在一个浓度极限值,当达到这一值后,缓蚀阻垢效果较好并趋于稳定,这一值被推荐为现场实际

使用浓度。

3 现场应用

在室内实验的基础上,2014年10月采用HZG系列缓蚀阻垢剂,通过间歇注入方式现场实施10口井(效果见表6),均取得了较好的缓蚀阻垢效果,铁离子浓度下降率平均达82%,钙离子浓度明显提升。截止2015年9月底,10口井均未因腐蚀、结垢出现检泵作业,平均检泵周期由实施前的140天延长到443天,延长了2.2倍,目前继续有效,缓蚀阻垢效果显著。

表5 浓度对缓蚀阻垢剂使用效果的影响

Tab.5 Influence of concentration on the effect of corrosion and scale inhibitors

药剂	质量浓度 /(mg·L ⁻¹)	Y60-81X			Y63-69X		
		腐蚀速率/(mm·a ⁻¹)	缓蚀率/%	阻垢率/%	腐蚀速率/(mm·a ⁻¹)	缓蚀率/%	阻垢率/%
空白		0.0495			0.0305		
HZG-1	40	0.0152	69.3	85.6	0.0096	68.5	82.9
	60	0.0116	76.6	89.5	0.0085	72.1	88.6
	80	0.0087	86.3	95.7	0.0075	75.4	92.6
	90	0.0079	92.6	96.8	0.0073	76.1	95.7
	100	0.0086	91.9	98.5	0.0079	74.1	98.5
HZG-2	40	0.0192	61.2	86.9	0.0093	69.5	88.3
	60	0.0155	68.7	90.6	0.0088	71.1	92.1
	80	0.0113	77.2	96.2	0.0050	83.6	96.2
	90	0.0112	77.4	97.5	0.0061	82.0	97.5
	100	0.0101	79.6	98.2	0.0058	84.0	98.6
HZG-3	40	0.0180	63.6	84.5	0.0100	67.1	78.9
	60	0.0135	72.7	88.9	0.0075	75.3	88.2
	80	0.0069	86.0	94.8	0.0058	81.1	92.8
	90	0.0024	95.1	95.8	0.0044	85.6	95.6
	100	0.0043	91.4	96.2	0.0055	82.1	96.0
HZG-4	40	0.0162	67.2	88.6	0.0095	68.8	85.4
	60	0.0101	79.6	92.4	0.0063	79.4	88.6
	80	0.0062	87.4	96.8	0.0037	87.9	93.4
	90	0.0093	81.3	97.6	0.0023	92.6	95.8
	100	0.0086	82.6	98.5	0.0020	93.5	96.0

表6 现场实施效果

Tab.6 On-site implementation effect

序号	井号	推荐配方	总铁含量/(mg·L ⁻¹)		缓蚀率 /%	钙离子含量/(mg·L ⁻¹)		实施前检泵 周期/d	实施后长寿 时间/d
			加药前	加药后		加药前	加药后		
1	Y63-38	HZG-1	17.30	2.41	86.1	58.8	65.8	201	440
2	Y63-43	HZG-2	6.08	1.12	81.6	45.1	55.6	118	360
3	Y63-69X	HZG-2	3.90	0.30	92.3	55.1	60.3	102	550
4	Y63-84X	HZG-3	21.60	3.54	83.6	60.5	66.8	146	556
5	Y63-100	HZG-4	3.14	0.97	69.1	62.5	70.4	136	360
6	Y60-41X	HZG-1	0.96	0.22	77.1	650.2	662.1	91	360
7	Y60-8X	HZG-1	0.25	0.00	100.0	50.2	62.4	81	366
8	Y60-81X	HZG-4	1.38	0.48	65.2	550.6	555.3	223	437
9	G59-13	HZG-3	0.45	0.12	73.3	46.2	52.8	194	605
10	Y9-24X	HZG-1	17.0	1.20	92.9	118.6	124.3	110	395

4 结论

- 1) 氟碳咪唑啉组分的加入有效提高了缓蚀阻垢剂的耐温性,使其耐温性高达130℃。
- 2) 所研制的耐高温HZG系列缓蚀阻垢剂解决了高温油井(大于100℃)井筒腐蚀、结垢的难题。
- 3) 现场应用效果证明,科学的投药量及精细的现场管理可以确保取得较好的实施效果。

参考文献

- [1] 《油气田腐蚀与防护技术手册》编委会. 油气田腐蚀与防护技术手册[M]. 北京:石油工业出版社,1999.
The Editorial Board of "Manual for Corrosion and Protection of Oil and Gas Fields". Manual for Corrosion and Protection of Oil and Gas Fields [M]. Beijing: Petroleum Industry Press,1999.
- [2] 刘道新. 材料的腐蚀与防护[M]. 西安:西北工业大学出版社,2005.
LIU Dao-xin. Corrosion and Protection of Materials [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University Press, 2005.
- [3] R·温斯顿·里维. 尤利格腐蚀手册[M]. 杨武,译. 北京:化学工业出版社,2005.
R Winston Revie. Uhlig's Corrosion Handbook [M]. Translate by YANG Wu. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [4] 赵景茂,陈国浩. 咪唑啉与硫脲在CO₂腐蚀体系中的缓蚀协同作用机理[J]. 中国腐蚀与防护学报,2013,33(3):226—230.
ZHAO Jing-mao, CHEN Guo-hao. Synergistic Inhibition Mechanism of Imidazoline and Thiourea in CO₂ Corrosive System [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2013, 33(3): 226—230.
- [5] 李俊,赵景茂. Gemini表面活性剂作为金属缓蚀剂的研究进展[J]. 腐蚀与防护,2011,32(7):543—547.
LI Jun, ZHAO Jing-mao. Progress in Research of Gemini Surfactants as Corrosion Inhibitors for Metals [J]. Corrosion & Protection, 2011, 32(7): 543—547.
- [6] 张欢,余静,徐燕飞,等.4种环境友好型缓蚀剂对304不锈钢在氯化钠介质中点蚀的抑制作用[J]. 材料保护,2007,40(4):72—74.
ZHANG Huan, YU Jing, XU Yan-fei, et al. Inhibition of Pitting Corrosion of 304 Stainless Steel in Sodium Chloride Medium by 4 Kinds of Environmentally Friendly Corrosion Inhibitors [J]. Material Protection, 2007, 40(4): 72—74.
- [7] 宋莎莎. 咪唑啉季铵盐缓蚀剂的制备及其性能研究[J]. 江苏化工,2008,36(6):15—17.
SONG Sha-sha. Research of Synthetics and Inhibitory Performance of Imidazoline Quaternary-ammonium-salt Corrosion Inhibitor [J]. Jiangsu Chemical Industry, 2008, 36(6): 15—17.
- [8] 徐孝轩. 一种新型的“绿色”缓蚀剂:开发与应用[J]. 国外油田工程,2007,23(4):29—36.
XU Xiao-xuan. A New Type of "Green" Corrosion Inhibitor: Development and Application [J]. Foreign Oilfield Project, 2007, 23(4): 29—36.
- [9] 张晨,赵景茂. CO₂体系中咪唑啉季铵盐与十二烷基磺酸钠之间的缓蚀协同效应[J]. 物理化学学报,2014,30(4):677—685.
ZHANG Chen, ZHAO Jing-mao. Synergistic Inhibition Effect of Imidazoline Ammonium Salt and Sodium Dodecyl Sulfate in CO₂ System [J]. Journal of Physical Chemistry, 2014, 30(4): 677—685.
- [10] 黄琳,徐想娥,汪万强. 钨酸钠及其复配缓蚀剂在模拟海水中对碳钢的缓蚀性能[J]. 表面技术,2014,43(1):25—29.
HUANG Lin, XU Xiang-e, WANG Wan-qiang. Corrosion Inhibition Performances of Sodium Tungstate and Its Composite for Carbon Steel in Simulated Seawater [J]. Surface Technology, 2014, 43(1): 25—29.
- [11] 谢建丽,金凯峰,蒋晓斌,等. 带锈碳钢在稀NaCl溶液中的腐蚀行为[J]. 表面技术,2014,43(2):55—59.
XIE Jian-li, JIN Kai-feng, JIANG Xiao-bin, et al. Corrosion Behavior of Rusted Carbon Steel in Diluted NaCl Solution [J]. Surface Technology, 2014, 43(2): 55—59.
- [12] 杜清珍,王胜利,张伟,等. HZ油井缓蚀阻垢剂在华北油田的应用[J]. 石油钻采工艺,2006,28(增刊):39—41.
DU Qing-zhen, WANG Sheng-li, ZHANG Wei, et al. Application of HZ Scale and Corrosion Inhibitor in Huabei Oilfield [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2006, 28 (Suppl): 39—41.
- [13] 杜清珍,谢刚,杨梅红,等. 华北油田油井腐蚀原因分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2013,35(3):142—148.
DU Qing-zhen, XIE Gang, YANG Mei-hong, et al. The Technology Research About Reason and Mechanism of Corrosion in Huabei Oilfield [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2013, 35(3): 142—148.
- [14] 陈晓东,杨锐,焦伟杰,等. 新型氟碳油井缓蚀剂在高含水油田应用研究[J]. 应用化工,2010,39(8):1159—1166.

(下转第74页)

- ment in Research and Application of Electro-spark Deposition Technology [J]. Hot Working Technology , 2013 , 42 (24): 32—36.
- [2] 田亮, 刘振英, 罗宇, 等. 面向再制造的硬面堆焊技术研究现状和展望 [J]. 电焊机 , 2015 , 45 (2): 11—18 .
TIAN Liang, LIU Zhen-ying, LUO Yu, et al. Status and Development Prospects of Hardfacing Technology for Remanufacturing [J]. Electric Welding Machine , 2015 , 45 (2): 11—18 .
- [3] 董晨竹, 邢斌赛, 郝杰, 等. 电火花沉积 Fe 基涂层的组织及耐磨性能 [J]. 表面技术 , 2013 , 42 (2): 37—39 .
DONG Chen-zhu, XING Bin-sai, HAO Jie, et al. Microstructure and Wear Properties of Fe-based Coating Prepared by Electrospark Deposition [J]. Surface Technology , 2013 , 42 (2): 37—39 .
- [4] 孙凯伟, 于华, 吴公一, 等. TA2 表面电火花沉积 NiCr 涂层的界面行为 [J]. 焊接技术 , 2015 , 44 (4): 10—12 .
SUN Kai-wei, YU Hua, WU Gong-yi, et al. Interface Behavior of NiCr Coating on TA2 Produced by Electrospark Deposition [J]. Welding Technology , 2015 , 44 (4): 10—12 .
- [5] ZHAO Yan-ping, GONG Jian-ming, WANG Yan-fei, et al. Effect of Start/Stop Position Distribution on Residual Stresses in Multi-pass Welded 12Cr1MoV/P91 Dissimilar Pipe [J]. International Journal of Steel Structures , 2014 , 14 (3): 539—546 .
- [6] 王建升, 王华昆, 钟毅, 等. H13 钢电火花沉积层组织结构的研究 [J]. 中国表面工程 , 2003 , 16 (6): 27—30 .
WANG Jian-sheng, WANG Hua-kun, ZHONG Yi, et al. Microstructure of Electron-spark Deposited Coating on H13 Steel [J]. China Surface Engineering , 2003 , 16 (6): 27—30 .
- [7] GAO Yu-xin, ZHAO Cheng. Microstructure and Properties of Electrospark Deposition Coating on Die Steel [J]. Advanced Materials Research , 2011 , 294: 188—191 .
- [8] 郝越峰, 曹明让, 曹一龙. 一种 45 钢表面电火花沉积 WC 层的新方法 [J]. 表面技术 , 2014 , 43 (4): 97—100 .
HAO Yue-feng, CAO Ming-rang, CAO Yi-long. A New Method of Depositing WC Alloying by EDM Technology on the Surface of 45 Steel [J]. Surface Technology , 2014 , 43 (4): 97—100 .
- [9] YU Hua, SHI Hong-xin, WANG Yao-li, et al. NiCr Alloy Coating Deposited on the Surface of 35CrMo Steel by the Electrospark Process [J]. Materials Science Forum , 2008 , 575/578: 827—832 .
- [10] EBRAHIMNIA M, MALEK GHAINI F, XIE Y J, et al. Microstructural Characteristics of the Built up Layer of a Precipitation Hardened Nickel Based Superalloy by Electro-spark Deposition [J]. Surface and Coatings Technology , 2014 , 258: 515—523 .
- [11] 王燕, 张富巨. Q235 钢电火花堆焊接头行为研究 [J]. 电焊机 , 2014 , 44 (3): 122—125 .
WANG Yan, ZHANG Fu-ju. Research on the Joint Behavior of Electro-spark Deposition on Q235 Steel [J]. Electric Welding Machine , 2014 , 44 (3): 122—125 .
- [12] 斯重遥. 焊接手册 [M]. 北京: 机械工业出版社 , 1992 .
SI Zhong-yao. Welding Handbook [M]. Beijing: China Machine Press , 1992 .
- [13] 王召煜, 李国禄, 王海斗, 等. 超音速等离子喷涂 FeCrBSi 涂层组织和残余应力分析 [J]. 材料热处理学报 , 2012 , 33 (1): 146—149 .
WANG Zhao-yu, LI Guo-lu, WANG Hai-dou, et al. Analysis of Microstructure and Residual Stresses in Supersonic Plasma Sprayed FeCrBSi Coatings [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment , 2012 , 33 (1): 146—149 .
- [14] 徐滨士, 朱绍华. 表面工程的理论与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社 , 2010 .
XU Bin-shi, ZHU Shao-hua. The Theory of Surface Engineering and Technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press , 2010 .
- [15] 荆磊, 周国栋, 姜春竹, 等. 镁合金防腐涂层微观形貌及残余应力研究 [J]. 材料热处理学报 , 2015 , 7 (1): 50—55 .
JIN Lei, ZHOU Guo-dong, JIANG Chun-zhu, et al. Research on the Morphology and Residual Stress of Magnesium Alloy Anti-corrosion Coatings [J]. Thermal Spray Technology , 2015 , 7 (1): 50—55 .

(上接第 61 页)

- CHEN Xiao-dong, YANG Rui, JIAO Wei-jie, et al. Applied Research of Fluorocarbon Corrosion Inhibitor in High Water Oilfield [J]. Applied Chemical Industry , 2010 , 39 (8): 1159—1166 .
- [15] 席先锋, 朱洁玉, 顾永红, 等. 4 种新型氟碳表面活性剂

- [J]. 精细化工 , 2005 , 22 (增刊): 67—69 .
XI Xian-feng, ZHU Jie-yu, GU Yong-hong, et al. Four New Type of Fluorocarbon Surfactant [J]. Fine Chemicals , 2005 , 22 (Suppl): 67—69 .