

油气井酸化缓蚀剂研究进展

张娟涛^{1,2}, 李谦定¹, 赵俊³

(1. 西安石油大学 化学化工学院, 西安 710065; 2. 中国石油集团 石油管工程技术研究院, 西安 710065;
3. 国家石油天然气管材工程技术研究中心, 宝鸡 721008)

摘要: 介绍了油气井新型酸化技术对缓蚀剂的要求, 综述了酸化缓蚀剂国内外研究的现状, 并分析了油气井酸化缓蚀剂研究的发展方向。

关键词: 酸化缓蚀剂; 油气井; 研究进展

中图分类号: TG174.42 文献标志码: A 文章编号: 1005-748X(2014)06-0593-05

Research Progress of Acidizing Corrosion Inhibitors in Oil/Gas Well

ZHANG Juan-tao^{1,2}, LI Qian-ding¹, ZHAO Jun³

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710065, China;

3. National Petroleum and Gas Tubular Goods Engineering Technology Research Center, Baoji 721008, China)

Abstract: The requirements of new acidizing technology for corrosion inhibitors used in oil/gas well are introduced, the current research status of acidizing corrosion inhibitors at home and abroad is summarized, and the research development directions of acidizing corrosion inhibitors are analyzed in this review.

Key words: acidizing corrosion inhibitor; oil/gas well; research progress

腐蚀问题广泛发生在油气井酸化过程中^[1]。酸化是用酸或潜在酸溶解储层空隙和裂缝中的堵塞物质或扩大沟通油气层原有的空隙和裂缝, 以恢复或增加油气层的渗透率, 从而提高油气井的产量。实现油气井增产和注水井增注, 是目前国内外最常用的增产、增注措施^[2]。但在酸化处理时, 所使用的酸液(主要为盐酸)会直接与储罐、压裂设备、井下油管、套管接触, 给这些设备带来严重的腐蚀。在升级材料、阴极保护、涂镀层和添加缓蚀剂四种主要的减轻腐蚀的方法中, 添加缓蚀剂是最方便最有效的方法, 其余三种都有一定的不足^[3]。

虽然升级材料引入抗酸腐蚀合金元素(例如镍、钛)可以解决腐蚀方面的很多问题, 但高额的成本使材料本身难以推广应用。阴极保护分为牺牲阳极法和外加电流法两种, 牺牲阳极法需要定期更换阳极, 外加电流需要不断供电, 这两种方法的运行成本都较高, 且在油气井酸化介质中, 阳极消耗更快, 外加

电流还会对井下设备产生干扰。管材表面进行涂镀层处理可以起到一定的防腐蚀作用, 但一旦涂镀层有起泡、针孔等缺陷就会形成局部腐蚀从而加速金属的溶解穿孔, 同时也会导致涂镀层剥落堵井。而在油气井酸化过程中添加缓蚀剂具有性能稳定、操作简单、用量小、保护效率高、费用低等优点。本文主要介绍油气井新型酸化技术对缓蚀剂的要求, 综述酸化缓蚀剂国内外研究的现状, 并对该领域的研究发展方向进行展望。

1 油气井新型酸化技术对缓蚀剂的要求

随着石油工业的发展及油田开发规模的不断扩大, 酸化技术越来越先进:一是酸液体系的更新, 除了普通的盐酸和土酸酸化液体系外, 出现了泡沫酸、胶束酸、乳化酸等缓速酸液体系^[4-9];二是新型酸化工艺的发展, 随着油田开发的不断深入, 地层压力下降含水量上升以及深井、超深井的出现, 使得分层酸化逐渐推广应用。此外, 随着低渗透薄储层、稠油油气藏及页岩气等非常规能源的开发, 水平井酸化已成为油气井酸化的重要内容, 包括机械转向技术、化学微粒暂堵剂分流酸化技术、水力喷射酸化技术,

收稿日期: 2013-08-14

通信作者: 张娟涛(1979—), 工程师, 硕士, 从事油田腐蚀与防护研究工作, 029-81887897, zhangjuantao@cnpc.com.cn

等^[10-14]。这些新的酸化技术也给酸化缓蚀剂带来了新的要求:①具有较强的缓蚀性能,吸附能力强,不受发泡、流体流动等因素的影响;②与酸液体系及地层流体的配伍性好,易在酸液体系中溶解分散,不产生沉淀;③能耐高温高压,在深井、超深井中的高温高压条件下也具有较强的缓蚀效果;④适用条件宽泛,可以满足多层及分段酸化技术需求;⑤易降解,无毒环保,对地层伤害较小。

2 油气井酸化缓蚀剂国内外研究现状

杂环化合物具有很好的防腐蚀效果^[15-19]。一些新型的杂环化合物近年来日益广泛地被用于酸液的缓蚀剂,如唑类、噻重氮类、吲哚等化合物及其衍生物等。此外,食用药品和表面活性剂作酸化缓蚀剂的研究开发也逐渐热了起来,也取得了一定的成绩;同时,植物提取液作“绿色”酸化缓蚀剂得到不断推广,成为人们朝着廉价、有效、“零”污染方面研究的一个新目标;一些难以降解的、会对环境造成伤害的污染物,通过研究加以利用作酸化缓蚀剂,也是新的研究方向。

2.1 杂环化合物(唑类、吲哚、噻重氮等)作酸化缓蚀剂

杂环化合物是分子中含有杂环结构的有机化合物,由碳原子和至少一个其他原子如氧、硫、氮等组成,碳以外的原子称为杂原子^[15]。杂环化合物中,最小的杂环为三元环,最常见的是五、六元环。五元杂环化合物有呋喃、噻吩、吡咯、噻唑、咪唑、唑等;六元杂环化合物有吡啶、吡嗪、嘧啶等。杂环化合物可以与苯环并联成稠环杂环化合物,稠环杂环化合物有吲哚、喹啉、蝶啶、吖啶等。

B. Mernari 等^[16]指出,3,5 双(N-吡啶)-4-氨基-1,2,4-三唑在 1 mol/L HCl 溶液中是一种阳极型缓蚀剂。K. Tebbji 等^[17]研究了联吡唑化合物乙基-5,5'-二甲基-1'H-1,3'-联吡唑-3 羧酸盐(P1)和 3,5,5'-三甲基色氨酸-1'-1,3'-联吡唑(P2)的缓蚀效果,P2 在 1 mol/L HCl 溶液中的缓蚀效果要比 P1 好,当其添加量为 10⁻³ mol/L 时其缓蚀率能达到 84%。L. Larabi 等^[18]发现 2-巯基-1-甲基咪唑在盐酸溶液中是一种铜的混合型缓蚀剂,但其阳极反应的抑制效果更为显著。M. Elayyachy 等^[19]研究了两种联吡唑衍生物在 1 mol/L HCl 中对碳钢的缓蚀效果。X. H. Li 等^[20]指出蓝四氮唑在 1 mol/L HCl 是良好的冷轧钢缓蚀剂。O. Krim 等^[21]研究

指出甲基吡咯是一种阴极型缓蚀剂,缓蚀率随着缓蚀剂的浓度增加而增大。A. Chetouani 等^[22]分析了两种哒嗪衍生物对碳钢在 1 mol/L HCl 溶液中的缓蚀效果,指出这两种物质都具有良好的防腐蚀效果,且均为阴极型缓蚀剂,物质中硫原子的增加增强了缓蚀剂分子在金属表面的吸附。

2.2 药品作酸化缓蚀剂

安替比林具有解热镇痛的作用,Abd El Rehim SS 等^[23]研究了 4-(2'-氨基-5'-甲苯偶氮)安替比林(AMPA)在 2 mol/L HCl 溶液中对低碳钢的缓蚀效果作用,指出当其添加量为 0.01 mol/L 时,在 20 °C 时的缓蚀率能达到 95%,在 60 °C 时的缓蚀率只有 70%。巴比妥酸盐是安眠药物,M. Özcan 等^[24]研究指出巴比妥酸盐(BA)、二乙基巴比妥酸盐(DEBA)、硫代巴比妥酸(TBA)作为绿色缓蚀剂对低碳钢在磷酸溶液中具有一定的缓蚀作用,其中 TBA 效果最好,而 BA 效果最差。链霉素是一种氨基葡萄糖型抗生素,S. K. Shukla 等^[25]指出链霉素在 1 mol/L HCl 溶液中,当添加量为 500 mg/L 时对低碳钢的缓蚀率可达到 88.5%。

2.3 植物提取液作酸化缓蚀剂

植物提取液是以植物为原料,经过物理或化学提取分离过程,获取植物中的某一种或多种有效化学成分,而不改变其有效成分结构的溶液。根据提取植物的成分不同,分为甙、酸、多酚、多糖、萜类、黄酮、生物碱等许多种类。对植物提取液做缓蚀剂的研究起步较早,但一直没有得到实际应用。当前,随着“绿色”酸化缓蚀剂的发展和人们对环境的日益重视,植物提取液又开始了新一轮的研究热潮。

芦荟提取液在 2 mol/L HCl 溶液中缓蚀率可达到 67%^[26],而椰子水对铝的缓蚀率可达到 93%^[27]。A. Ostovari^[28]研究了指甲花提取液及其主要成分指甲花醌、五倍子酸、单宁酸在 1 mol/L HCl 溶液中的缓蚀效果大小依次为:指甲花醌 > 指甲花提取液 > 五倍子酸 > 单宁酸;当指甲花提取液加量为 1.2 g/L 时缓蚀率最高可达到 92.6%。P. Kalaiselvi 等^[29]报道了艾草的甲醇提取液在 4 mol/L HCl 溶液中是良好的碳钢缓蚀剂,在加量分别为 1.5 g/L 和 40 g/L 时,缓蚀率可达到 93% 和 96.5%。付惠和李向红等^[30-31]提取了核桃叶、元宝枫叶等作酸液缓蚀剂,对钢有良好的缓蚀效果。

2.4 表面活性剂作酸化缓蚀剂

表面活性剂指具有亲水亲油基团、在溶液的表

面能定向排列、并在较低浓度时能显著降低表面张力的物质。其分子结构具有两亲性:一端为亲水基团,另一端为憎水基团。按亲水基团是否电离可分为离子型表面活性剂和非离子型表面活性剂。许多表面活性剂因为具有氮、氧、硫等原子和长的烃链,而被研究者关注起来,逐渐用作酸化缓蚀剂。

M. Achouri 等^[32]报道了阳离子表面活性剂双二甲基烷基溴化铵在 1 mol/L HCl 溶液中是一种良好的阴极型缓蚀剂,该表面活性剂的缓蚀率随着缓蚀剂浓度的增加而增大。双二甲基烷基溴化铵系列表面活性剂在盐酸溶液中的防护作用也受到了研究者的关注,研究结果表明该系列表面活性剂在 1 mol/L HCl 溶液中是良好的阴极型缓蚀剂^[33]。M. A. Migahed^[34]通过电化学手段研究了阳离子表面活性剂 1-十二烷基-4-甲氧基吡啶溴化物对碳钢在 2 mol/L HCl 溶液中的缓蚀性能,指出在达到其临界胶团浓度时缓蚀率达到最大值。

2.5 废物回收利用作酸化缓蚀剂

废物回收利用作酸用缓蚀剂的报道相对较少,M. A. Migahed 等^[35]研究了回收聚乙烯形成硫醇衍生物作水溶性缓蚀剂,试验证明该物质在 2 mol/L HCl 溶液中具有很好的防腐蚀效果,是一种混合型缓蚀剂。

郑家燊^[36]研究了以煤焦油吡啶釜残渣为主要原料合成的酸化缓蚀剂,可用于 70~180 °C、15%~28% HCl 溶液中。如四川天然气研究所开发的“7251”、“7623”,华中理工大学和江汉油田开发的“7461”,都是以此为原料合成的。陈兆喜等^[37]用农药合成废弃物-4-甲基吡啶、3,4-二甲基吡啶、2,5-二甲基吡啶、2,3,5-三甲基吡啶为原料制备复合吡啶盐作酸化缓蚀剂,在解决了油气井中油管腐蚀问题的同时,也实现了其重新利用的价值,一举两得。

2.6 其他有机化合物作酸化缓蚀剂

除了杂环化合物外,还有许多有机化合物作酸化缓蚀剂。此类有机物未形成杂环但大多数也含有氮、硫、氧、磷等杂原子或烯、炔 π 键,因其能在金属表面形成稳定牢固的吸附膜,而广泛被用作盐酸酸化缓蚀剂。

B. I. Ita 等^[38]研究了 4-苯基氨基脲和氨基脲对碳钢在盐酸溶液中的缓蚀作用,结果表明,4-苯基氨基脲的最高缓蚀率为 82%,而氨基脲只有 66%。Y. W. Ren^[39]等研究了木质素三元共聚物在 10% HCl 溶液中对碳钢的缓蚀作用,指出该物质在

25 °C 和 80 °C 时的最高缓蚀率均超过 95%,且缓蚀率随缓蚀剂加量的增加而增大。D. Jayaperumal^[40]研究了辛醇和炔丙醇在盐酸溶液中的缓蚀行为,结果表明辛醇和炔丙醇在添加量为 1%,盐酸质量浓度为 15%,温度 30 °C 时的缓蚀率分别为 87% 和 100%;在 105 °C 时的缓蚀率分别为 82% 和 99%。

3 油气井酸化缓蚀剂的展望

开发环境友好型酸化缓蚀剂成为研究的新的目标;而且,石油开采中酸化施工工艺也在不断改进和完善,酸化缓蚀剂对油气井酸化作业的适用性和针对特殊材料的腐蚀控制也成为一个焦点;此外,酸化缓蚀剂复配技术、缓蚀机理研究、结构分析手段的日益完善,也为酸化缓蚀剂的开发和研究提供了新的方向。

3.1 有机酸类多功能型酸化缓蚀剂的开发

有机酸类是分子结构中含有羧基(—COOH)的化合物,包括羧酸、羟基酸、酮酸等。在中草药的叶、根、特别是果实中广泛分布。常见的植物中的有机酸有脂肪族的一元、二元、多元羧酸如酒石酸、草酸、苹果酸等,亦有芳香族有机酸如苯甲酸、水杨酸等。这些物质一方面可直接作酸化缓蚀剂,另一方面又能和主体酸协同作用于油气井的酸化解堵。

3.2 酸化缓蚀剂在酸化过程中的适用性研究

(1) 酸化缓蚀剂与其他添加剂的协同作用 在酸化处理时除了添加酸化缓蚀剂外,还要加入一些其他添加剂,如粘土稳定剂、铁离子稳定剂、表面活性剂、稠化剂等,以改善酸液的性能和防止酸液在油气层中产生有害影响,加强酸化缓蚀剂与这些添加剂的协同作用研究有助于酸化施工的稳定性。

(2) 模拟油气井酸化返排过程中的工况环境,研究材料的腐蚀和酸化缓蚀剂的防护效果 在酸化作业后,残酸需要返排,存在于工况环境中的物质除了各种添加剂之外,还有酸液和岩层反应生成的二氧化碳等,研究工况条件下酸化缓蚀剂的防腐蚀作用,具有重要的现实意义。

3.3 特殊材料腐蚀机理的研究

目前油气井开采中对油管材料的要求也逐渐苛刻。如塔里木已采用超级 13Cr 油管,这种不锈钢油管针对 CO₂ 腐蚀的防护效果非常优秀;但是在酸化作业实现油气井增产时,却发生了比普通碳钢更为严重的腐蚀。究其原因和探讨机理发现,超级 13Cr 材质中 Cr³⁺ 对酸液具有很强的敏感性,极易和 H⁺

置换,从而加剧了腐蚀。这对酸化过程中的酸化缓蚀剂筛选有很好的指导作用,在防止 Cl^- 腐蚀的同时,更要注重 H^+ 对 Cr^{3+} 的置换,通常这样的酸化缓蚀剂必须是混合型的,能够同时保护阴极和阳极。因此,这类特殊材料的腐蚀机理研究,可为选择酸化缓蚀剂类型提供理论和技术支持。

3.4 “绿色”酸化缓蚀剂的持续发展

“绿色”酸化缓蚀剂原料的一个主要来源就是植物提取液。许多植物例如桐油、肉桂和松树的提取液具有防腐蚀效果归咎于这些植物提取液中的化学物质含有氮、硫、氧等原子,能在金属表面形成保护膜,达到缓蚀的目的。然而在此植物化学防腐蚀领域中存在着众多因素,要素之间协同作用的研究很少。天然酸化缓蚀剂能够被应用的主要原因为可降解性、容易利用和无毒性^[4]。故“绿色”酸化缓蚀剂仍是未来研究的热点。

3.5 废物回收利用作缓蚀剂

环境污染已经使我们无法逃避的一个事实,对废弃物(垃圾)的回收利用一方面可以减少废弃物污染,保护环境,另一方面也可以实现其再利用价值,节约资源。如塑料垃圾、工业生产吡啶废液残渣等可再加工作酸化缓蚀剂。

3.6 无机盐的增效作用的研究

无机酸化缓蚀剂具有成膜快、成膜较致密、耐高温等特点,早已应用于酸化缓蚀剂的复配当中。M. A. Migahed 等^[35]很早就将锑盐复配到有机化合物中作为高温酸化缓蚀剂,并取得了良好的防腐蚀效果。因此,加强无机盐和有机缓蚀剂的复配研究,是实现高温(超高温)酸化防腐蚀的一个途径。

3.7 开发先进的分析仪器和计算机技术

不断开发现代先进的分析仪器和计算机技术,从微观结构更好地研究酸化缓蚀剂的合成和防腐蚀效果,为酸化缓蚀剂的研究提供理论基础。梅特勒-托利多公司开发的量热仪及在先红外检测系统对于酸化缓蚀剂合成方面,具有指导作用^[41]。该设备由计算机编程操作,在合成缓蚀剂中可以检测化学合成过程的吸热和放热、有机物官能团的变化等,同时保证了实验的精确性,有力地有助于酸化缓蚀剂合成条件的摸索。开发类似设备,对于酸化缓蚀剂的开发会具有很大的推进作用。

4 结束语

酸化缓蚀剂无论是在研制、影响因素、缓蚀机理还是研究方法等方面都取得了很大的进步,但是随

着油气井开采深度的不断加深,酸化的工况条件也越来越复杂,对酸化缓蚀剂的要求也越来越苛刻。因此开发高温、高效、多功能环境友好的酸化缓蚀剂将成为油气田工业设备防腐蚀研究的热点。

参考文献:

- [1] MIGAHED M A, NASSAR I F. Corrosion inhibition of tubing steel during acidization of oil and gas wells [J]. *Electrochim Acta*, 2008, 53(6): 2877-2882.
- [2] 马宝岐, 吴安明. 油田化学原理与技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- [3] 郭晓南, 陆原, 张勇, 等. 油田高温酸化缓蚀剂的合成及缓蚀性能[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(11): 981-983.
- [4] 单士同. 新型高效缓蚀剂在油田水平井酸化工艺的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 32(2): 14-17.
- [5] 李峰. 常规试油中压裂酸化技术的应用分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 32(11): 102-103.
- [6] 吴文瑞, 李怀杰, 孙支林, 等. 泡沫酸酸化工艺技术研究与应用[J]. 石油化工应用, 2011, 30(10): 24-26.
- [7] 赵福麟. 缓速酸[J]. 油田化学, 1986, 3(3): 179-190.
- [8] 周迎新. 缓速酸化技术的实验与应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 32(15): 275.
- [9] 李楷, 蒋文学, 王忍峰. 新型酸化液体系在复杂水井中的研究与应用[J]. 油田化学, 2011, 28(3): 305-308.
- [10] 许国文. 气藏水平井分段酸化完井一体化工艺管柱[J]. 石油矿场机械, 2012, 41(4): 89-92.
- [11] 沈云波, 何柳, 沈莉波. 水平井分段压裂酸化工业技术现状及研究进展[J]. 西部探矿工程, 2012(10): 48-50.
- [12] 董贤勇, 李兆敏, 李松岩, 等. 水平井酸化液分布规律研究[J]. 钻井液与完井液, 2011, 28(2): 66-69.
- [13] 聂斌, 周平, 赵文, 等. 水平井酸相态转换酸分段酸化技术研究与应用[J]. 化学工程与装备, 2012(5): 72-74.
- [14] 苏勇, 南美刚, 贺荣廷, 等. 高温、高压分层酸化管柱的研究及应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 32(2): 107-109.
- [15] 高鸿宾. 有机化学(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [16] MERNARI B, ATTARI HEL, TRAISNEL M, et al. Inhibiting effects of 3,5-bis(N-pyridyl)-4-amino-1,2,4-triazoles on the corrosion for mild steel in 1 M HCl medium[J]. *Corros Sci*, 1998, 40(2/3): 391-399.
- [17] TEBBJI K, HAMMOUTI B, OUDDA H. The inhibitive effect of bipyrazolic derivatives on the corrosion of steel in hydrochloric acid solution[J]. *Appl Surf*

- Sci, 2005, 252(5):1378-1385.
- [18] LARABI L, BENALI O, MEKELLECHE S M. 2-Mercapto-1-methylimidazole as corrosion inhibitor for copper in hydrochloric acid[J]. Appl Surf Sci, 2006, 253(3):1371-1378.
- [19] ELAYYACHY M, ELKODADI M, AOUNITI A. New bipyrazole derivatives as corrosion inhibitors for steel in hydrochloric acid solutions[J]. Mater Chem Phys, 2005, 93(2/3):281-285.
- [20] LI X H, DENG S D, FU H. Blue tetrazolium as a novel corrosion inhibitor for cold rolled steel in hydrochloric acid solution[J]. Corros Sci, 2010, 52(9): 2786-2792.
- [21] KRIM O, BOUACHRINE M, HAMMOUTI B, et al. 2,5-difuryl-N-methylpyrrole as corrosion inhibitor for steel in 1 M HCl[J]. Portugalae Electrochim Acta, 2008, 26(3):283-289.
- [22] CHETOUANI A, AOUNITI A, HAMMOUTI B. Corrosion inhibitors for iron in hydrochloride acid solution by newly synthesised pyridazine derivatives[J]. Corros Sci, 2003, 45(8):1675-1684.
- [23] ABD E R SS, IBRAHIM M A M, KHALID K F. The inhibition of 4-(2'-amino-5'-methylphenylazo) antipyrine on corrosion of mild steel in HCl solution[J]. Mater Chem Phys, 2001, 70(3):268-273.
- [24] ÖZCAN M, SOLMAZB R, KARDAS G. Adsorption properties of barbiturates as green corrosion inhibitors on mild steel in phosphoric acid[J]. Colloid Surface A-Physicochem Eng Aspects, 2008, 325 (1/2): 57-63.
- [25] SHUKLA S K, SINGH A K, AHAMAD I, et al. Streptomycin: A commercially available drug as corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid solution[J]. Mater Lett, 2009, 63(9/10):819-822.
- [26] ABIOIA O K, JAMES A O. The effects of Aloe vera extract on corrosion and kinetics of corrosion process of zinc in HCl solution[J]. Corros Sci, 2010, 52(2): 661-664.
- [27] ABIOLA O K, TOBUN Y C N L. Water as green corrosion inhibitor for acid corrosion of aluminium in HCl solution[J]. Chinese Chem Lett, 2010, 21(12): 1449-1452.
- [28] OSTOARI A A, HOSEINIEH S M, PEIKARI M. Corrosion inhibition of mild steel in 1 M HCl solution by henna extract: A comparative study of the inhibition by henna and its constituents (Lawsone, Gallic acid, α-D-Glucose and Tannic acid)[J]. Corros Sci, 2009, 51(9):1935-1949.
- [29] KALAISEVI P, CHELLAMMAL S, PALANICHAMY S, et al. Artemisia pallens as corrosion inhibitor for mild steel in HCl medium[J]. Mater Chem Phys, 2010, 120(2/3):643-648.
- [30] 付惠, 李向红, 邓书端, 等. 核桃提取物在盐酸介质中对钢的缓蚀性能[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(1): 20-22.
- [31] 李向红, 付惠, 张俊, 等. 元宝枫叶提取物在硫酸中对钢的缓蚀作用[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2011, 23(1):61-64.
- [32] ACHOURI M E I, INFANTE M R, IZQUIERDO F, et al. Synthesis of some cationic gemini surfactants and their inhibitive effect on iron corrosion in hydrochloric acid medium[J]. Corros Sci, 2001, 43(1): 19-35.
- [33] ACHOURI M E I, HAJJI M S, KERTIT S, et al. Some surfactants in the series of 2-(alkyldimethylammonio) alkanol bromides as inhibitors of the corrosion of iron in acid chloride solution[J]. Corros Sci, 1995, 37(3):381-389.
- [34] MIGAHED M A. Electrochemical investigation of the corrosion behaviour of mild steel in 2 M HCl solution in presence of 1-dodecyl-4-methoxy pyridinium bromide[J]. Mater Chem Phys, 2005, 93(1):48-53.
- [35] MIGAHED M A, ABDUL-RAHEIM A M, ATTA A M, et al. Synthesis and evaluation of a new water soluble corrosion inhibitor from recycled poly(ethylene terphthalate)[J]. Mater Chem Phys, 2010, 121 (1/2):208-214.
- [36] 郑家燊. 缓蚀剂的研究现状及其应用[J]. 腐蚀与防护, 1997, 18(3):36-40.
- [37] 陈兆喜, 朱爱根, 陶远贤, 等. 复合吡啶季铵盐缓蚀剂的应用[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(1):233-235.
- [38] ITA B I, OFFIONG O E. Corrosion inhibitory properties of 4-phenylsemicarbazide and semicarbazide on mild steel in hydrochloric acid[J]. Mater Chem Phys, 1999, 59(2):179-184.
- [39] REN Y W, LUO Y, ZHANG K S. Lignin terpolymer for corrosion inhibition of mild steel in 10% hydrochloric acid medium[J]. Corros Sci, 2008, 50 (11): 3147-3153.
- [40] JAYAPERUMAL D. Effects of alcohol-based inhibitors on corrosion of mild steel in hydrochloric acid [J]. Mater Chem Phys, 2010, 119(3):478-484.
- [41] ZHAO J, ZHANG N S, QU C T, et al. Cigarette butts and their application in corrosion inhibition for N80 steel at 90 °C in a hydrochloric acid solution[J]. Ind Eng Chem Res, 2010, 49(8):3986-3991.