

油田管道结垢机理及防垢技术

朱明亮¹ 高清河² 吕宜铮² 王玉迪² 钱慧娟^{2*}

1. 东北石油大学化学化工学院 黑龙江大庆 163318

2. 大庆师范学院化学工程学院 黑龙江大庆 163712

摘要: 在油田生产中, 油田管道结垢主要是由无机盐如碳酸钙、硫酸钙和氢氧化镁的沉积而引起的。这些盐的溶解度随着温度的升高而降低, 发生沉积时会对油田生产造成极大的危害。本文介绍了油田管道结垢的危害及结垢机理。综述了化学防垢法、工艺防垢法、物理防垢法和涂层防垢技术的防垢原理、优缺点及存在问题。展望了涂层防垢技术面临的挑战及进一步需要研究的工作。

关键词: 防垢; 化学防垢; 物理防垢; 涂层

Scaling Mechanism and Anti-scaling Technology of Oil Field Pipeline

Zhu Mingliang¹, Ruan Ruixia¹, Gao Qinghe², Lv Yizheng², Wang Yudi², Qian Huijuan^{2*}

1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, 163318, Republic of China

2. College of Chemical Engineering, Daqing Normal University, Daqing 163712, Republic of China

Abstract: Pipeline scaling is very common in the petroleum industry. The formation of scale is due to the precipitation of inorganic salts such as calcium carbonate, calcium sulfate and magnesium hydroxide. The solubility of these salts decreases with the increase of temperature, which will do great harm to the production of oil field. In this paper, the harm and mechanism of scaling in oil field pipeline is reviewed. The principle, advantages, disadvantages and existing problems of chemical, physical, process and coating anti-scaling technology. The challenges and further research work in coating anti-scaling technology are also prospected.

Keywords: anti-scaling; chemical anti-scaling; physical anti-scaling; coating

前言:

复合驱油井结垢是一个普遍存在的世界级难题^[1]。

基金项目: 大庆师范学院科学研究基金资助(2021ZR02); 大庆市指导性科技计划项目(zd-2021-07); 大庆师范学院校级大学生创新创业训练计划项目(2020xj017)

作者简介: 朱明亮(1979-), 男(汉族), 黑龙江安达人, 在读博士研究生, 研究方向为功能涂层。E-mail: 83156211@qq.com

通讯作者简介: 钱慧娟(1981-), 女(汉族), 博士研究生, 副教授, 主要从事油田防垢和防腐方面研究。E-mail: qianhuijuan1981@163.com

尤其是在强碱三元复合驱中, 强碱(NaOH)与储层岩石和地层水之间可发生化学溶蚀、溶解及离子交换等一系列复杂的物理和化学反应^[2, 3], 从而导致油层黏土发生分散和迁移, 致使储层渗透率发生下降并出现垢质的沉积。结垢现象普遍存在于油田生产的各个环节。在油田注入系统中, NaOH与二氧化碳发生反应后生成的阴离子(CO₃²⁻)与体系的阳离子(Ca²⁺、Mg²⁺和Ba²⁺等)反应后会管壁、泵阀等位置沉积而成垢。在采出液的举升及集输中, 由于体系的温度和压力发生变化使得油-水-气三相平衡被破坏, 致使井筒、油管、套管、筛管和泵等发生结垢, 导致油井出现抽油杆断脱、杆滞后和卡泵等现象。严重时可使泵的运行时间由599天缩短至37天^[4], 这极大地影响了油田的正常生产^[5, 6]。因此, 防垢是非常

重要和必要的。

1 油田管道结垢机理

结垢机理的研究对结垢预测及后续防垢、除垢措施的选择都意义重大。油田管道结垢的类型以结晶垢为主,而结晶垢是由结晶和吸附共同作用的复杂现象。一般,结垢是通过本体结晶和表面结晶^[7]两种途径形成的。然而,受管道工艺条件的影响,管道结垢是这两种结晶机制共同作用的结果。目前,管道结垢机理主要有流体不配伍结垢理论、热力学条件变化结垢理论、结晶动力学理论和吸附结垢理论。

1.1 流体不配伍结垢

不配伍的地层水(含有 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 和 Ba^{2+} 等阳离子)和注入水(含有 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 和 SO_4^{2-} 等)混合后可引起结垢。在油田采出水回注过程中,当回注水的水质与地层的水质不相容时就会发生结垢。当两种或多种不配伍的水相互混合时,由于所含的离子成分不同,易结垢的阳离子和阴离子可以相互作用而结垢。例如,油田生产中含有 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的流体与含有 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 的流体混合后会生成 CaCO_3 和 MgCO_3 。另外,在油田生产中发现,有时将清水和采出水进行混注后结垢更加明显,这也是由于二者水质不配伍而引起的。

1.2 热力学条件变化结垢理论

最初地层流体中的各种离子是处于化学平衡状态中的,不会结垢。在油井生产中,由于压力和温度等环境因素发生变化,原有的相平衡状态被打破,某些盐类的溶解度降低就会产生结垢现象。温度对盐类的溶解度有较大的影响,尤其是对 CaCO_3 而言,随温度升高其溶解度降低,结垢程度增加。另外,压力对 CaCO_3 、 CaSO_4 和 BaSO_4 的结垢也有一定影响,压力降低可以促进结垢。在管道输送中,由于压力都是降低的,因此结垢呈上升趋势。

1.3 结晶动力学结垢理论

溶液的过饱和是结晶动力学的主要驱动力。结垢要经历成核、晶体生长和沉积等一系列过程。成核分为均相成核和非均相成核两种类型。均相成核则是自发进行的,是由分子碰撞所引起的^[8]。而管道结垢以非均相成核为主,主要是由流体中的砂粒、沉积物和管道的表面粗糙度所引起的。在实际结垢体系中,均相成核和非均相成核很难区分,有时二者同时发生。

1.4 吸附结垢理论

一般来说,管道内壁是凹凸不平且具有微观粗糙度的表面。而流体中的成垢离子易于吸附在管壁处,并

以粗糙表面为晶核进行成核生长。另外,某些悬浮粒子也成为晶核,使成垢粒子不断结晶长大,并吸附在管壁处结垢。根据吸附理论,管道表面垢的形成包括两个过程,即垢沉积过程(管壁粗糙表面的非均匀成核过程)和垢吸附/粘附过程(本体溶液中成核并粘附在管道表面上)^[9]。

2 油田常规防垢技术

油田常规防垢方法和技术主要包括化学防垢法、工艺防垢法和物理防垢法。在实际生产中,通常是联合应用几种防垢方法和技术,以达到最佳防垢效果。

2.1 化学防垢法

化学防垢法主要是通过加入化学防垢剂的方法阻止或减少无机盐垢在管道表面的结晶沉淀^[10, 11]。其作用机理^[12]主要为:增溶作用、分散作用、静电斥力作用、晶体畸变作用和去活化作用等。通过把少量的化学防垢剂加入到管道流体中,利用防垢剂分子与成垢阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Ba^{2+} 等)形成稳定的络合物,阻止成垢阳离子和阴离子之间的化学成垢反应,能起到延缓、减少或抑制结垢的作用。在垢形成初期,首先从流体中沉淀出细小的晶体;加入防垢剂后,防垢剂可吸附到这些细小晶体表面上,从而使它们仍保持细小的晶体,这抑制了它们的进一步增长,并增加了其溶解度。此外,某些防垢剂可使结垢晶体发生畸变,而变形的晶体不易相互粘附,也不易粘附在金属表面。目前,化学防垢剂在各油田使用普遍。然而,化学防垢法也有其局限性,如防垢效果受油田水质、化学防垢剂的使用浓度和温度等因素影响较大^[13]。此外,化学防垢剂必须连续地投加于管道流体中,这样才能有效地抑制垢的增长,但这增加了生产成本^[13]。再有,大多数防垢剂对金属设备会有腐蚀,对环境有一定的污染^[14]。

2.2 工艺防垢法

工艺防垢法是通过改变结垢物质形成的外部条件(流体的压力、温度和pH值等),使溶解盐的浓度保持在结垢阈值以下来实现防垢。可采取以下措施:①严控注入水的水质,保证其与地层水具有良好的配伍性。②控制流体流速,去报流体的流动状态为湍流,增大对垢的剥蚀和剪切作用,降低成垢速率。③改用防垢性能好的管道^[15],使垢质不易附着和粘附。④改善工艺生产条件,优化设计油田生产工艺,改进流体集输工艺,对配伍性差、易结垢的层系采用分层集输,降低结垢的可能性^[16]。然而,工艺防垢法的主要缺点是要对油田水处理的工艺或方法进行改进,成本较高。

2.3 物理防垢法

物理防垢法是通过某种作用阻碍无机盐沉积于管壁表面上,使无机盐以细小的结晶悬浮于流体中而不发生沉积并成垢^[17]。作用机理可归纳为振散作用、震壁作用、电解作用、辐射作用和磁场效应等^[18]。物理防垢法具有对环境无毒无污染和操作简便的优点。然而,物理防垢法的操作条件和参数设置要根据具体情况而定,并随时调整,且需对设备进行定期清洗,增加工人的劳动强度。虽然可在一定程度上缓解管道结垢,但物理防垢法还未取得突破性的进展^[19],使其在推广应用受到了限制。

3 涂层防垢技术

与常规化学防垢法、工艺防垢法和物理防垢法有所不同,利用表面涂层技术对金属基体进行防垢处理,受到了越来越多的国内外科研人员的关注^[20]。聚合物具有分子间内聚力低、成本低、可再生和易于加工等特点,是制备防垢涂层比较理想的材料。目前,研究比较广泛的聚合物基防垢涂层主要包括环氧树脂(EP)、全氟聚醚(PFPE)、聚四氟乙烯(PTFE)和聚苯硫醚(PPS)等涂层。

3.1 环氧树脂防垢涂层

环氧树脂具有优异的热稳定性、耐热性、力学性能和防腐耐磨性^[21, 22],在航空航天、汽车、防腐涂层、建筑等行业中实现了广泛的应用^[23, 24]。同时,研究人员也尝试将环氧涂层应用于防垢领域。姜春花等^[25]分析了无溶剂YH-16环氧涂层和帕罗特环氧涂层的防垢性能。结果表明,YH-16环氧涂层和帕罗特环氧涂层的结垢速率分别下降了71.1%和72.4%。Wang等^[26]于50℃的模拟地热水中研究了含Ni-Cu-Al合金粉末的环氧乙烷-环氧有机硅树脂复合涂层的防垢性能。结果发现,该涂层在防垢过程中会释放出Ni²⁺、Cu²⁺和Al³⁺离子,而这三种离子可有效抑制碳酸钙的成核与生长。王林和陈晔^[27]制备了纳米二氧化硅/环氧改性有机硅树脂涂层,并对其防污垢粘附能力进行了测试。然而,在高温、高压或者腐蚀环境等条件下,纯环氧涂层在长时间使用过程中存在质脆、韧性差等问题,导致涂层表面出现裂纹,甚至从金属表面脱落,这严重影响了其在工程中的应用。

与环氧涂层相比,含氟树脂由于分子链结构中存在较多的C-F键,且具有较高的化学键能,可大幅度地降低涂层的表面自由能;且氟原子的电子云对C-C键具有较强的屏蔽作用,使得含氟树脂具有优异的热稳定性、耐候性和耐久性,成为制备聚合物基防垢涂层的理想材料。

3.2 全氟聚醚防垢涂层

PFPE是一类分子中只含有C、F和O三种元素的全氟聚合物,广泛应用于航空航天、化工、机械、电子电器和核工业等。近年来,科研人员也尝试将PFPE用于制备防垢/防污涂层。Oldani等^[28]制备了 α, ω -功能化PFPE涂层并进行了防垢试验。实验表明, α, ω -功能化PFPE涂层的污垢热阻为0.0018 m²K/W,仅为无涂层表面污垢热阻的35%,有效抑制了污垢的形成。Oldani等^[29]还设计制备了ZrO₂/TiO₂-PFPE多级涂层,并进行了防CaSO₄垢实验。结果发现,与无涂层表面相比,ZrO₂/TiO₂-PFPE多级涂层具有更好的防垢效果,且CaSO₄颗粒在ZrO₂/TiO₂-PFPE涂层表面的附着力降低了70%-90%。此外,Oldani等^[30]采用溶胶-凝胶法制备了 α, ω -三乙氧基硅烷PFPE防垢涂层。与无涂层金属表面相比, α, ω -三乙氧基硅烷PFPE防垢涂层的结垢速率降低了近10倍。

虽然PFPE涂层的防垢性能较好,但是由于价格昂贵,限制了其在防垢领域的应用。

3.3 聚四氟乙烯防垢涂层

PTFE是表面自由能较低(18.6 mN/m),具有优良的不粘性和化学稳定性,是一种优良的防粘添加剂,在涂层防垢方面具有极大的应用潜力。张仲彬等^[31]研究了PTFE和聚全氟乙丙烯(FEP)涂层对碳酸钙的防垢效果。王兴海和刘天庆^[32]对化学镀Ni-P-PTFE涂层的防垢效果进行了研究,当涂层中PTFE的加入量分别为10%和35%时,Ni-P-PTFE涂层的防垢效果均较佳。何凯龙等^[33]制备了防垢性能优异的Ni-P-PTFE复合镀层(水接触角为123.4°,表面自由能为9.9 mN/m)。与基板T2相比,碳酸钙粒子在Ni-P-PTFE复合镀层表面的沉积能力变差,涂层表面CaCO₃晶体数量减少,且尺寸也明显变小。王永真等^[34]研究了PTFE的添加量对Ni-P-PTFE涂层性能的影响。结果表明,随着PTFE添加量的增加,Ni-P-PTFE涂层表面的结垢量明显降低。张帆等^[35]制备了金属-PTFE涂层(水接触角为132°,表面自由能为2.006 mN/m)。在80℃模拟地热水体系中,经480 h实验后,金属-PTFE涂层表面无明显的腐蚀痕迹,且涂层表面的垢质地松软,易于清除。

关于PTFE涂层防垢的相关研究,大多是在化学镀Ni-P或Ni-Cu-P合金中加入细小微粒来设计并制备疏水PTFE涂层。然而,这类化学镀涂层在长期使用中易导致涂层中镍离子的溶出^[36],对环境造成危害。

3.4 聚苯硫醚防垢涂层

PPS是一种分子中带有对亚苯基硫醚重复结构单元的热塑性树脂,具有优良的物理化学性能,包括优良的化学稳定性、耐辐射性、良好的热稳定性、耐磨性、阻燃性及与金属粘结力强等,在电子、石油化工、航空航天、纺织、海洋和汽车制造业等领域具有广泛应用。Sugama等^[37]研究了碳钢管表面涂PPS或PTFE掺杂PPS涂层的防垢性能。研究发现,涂层中掺杂的PTFE后起到了良好的防垢效果。Sugama和Gawlik^[38]研究了200℃硅酸盐卤水中疏水PPS/PTFE涂层的防垢性能。吴坤湖等^[39]对比分析了304不锈钢、环氧硅树脂、纯PPS涂层和PPS/PTFE涂层在模拟地热水中的防垢效果,PPS/PTFE涂层能有效抑制碳酸钙在涂层表面的成核与生长,其表面结垢量仅为304不锈钢表面的37.3%。Qian等^[40]设计制备了超疏水PPS/PTFE涂层并对防垢效果进行了研究。结果表明,经过360h的结垢后,超疏水PPS/PTFE涂层表面的结垢量仅为环氧涂层的38.6%,且垢的质地松散。

综上,前述大部分工作是围绕聚合物基疏水涂层开展的相关研究。与防垢的疏水涂层相比,对超疏水防垢涂层的研究较少,还鲜有报道。

3.5 其他防垢涂层

Li等^[41]通过电沉积和溶液浸渍法制备了超疏水CuO分级结构涂层,经氟化修饰后涂层的水接触角达到了157°。涂层结垢实验后,抛光后钢表面垢的晶型主要为方解石型碳酸钙,而超疏水CuO分级结构涂层表面则主要为文石型碳酸钙。与方解石相比,文石与涂层表之间的粘附力更低^[42]。因此,在低表面自由能和CuO分级结构的耦合协同作用下,超疏水CuO分级结构涂层展现出更佳的防垢性能。Jiang等^[43]利用1H, 1H, 2H, 2H-全氟癸基三乙氧基硅烷对CuO纳米线进行修饰后,获得了超疏水阳极氧化CuO纳米线表面(水接触角为154°,表面自由能为0.2 mN/m)。经过2h结垢后,其表面的CaCO₃结垢量仅为0.1607 mg/cm²,远远低于其他参比涂层。原因在于,超疏水阳极氧化CuO纳米线表面的微米-纳米结构可截留、圈存空气而形成空气膜,有效地阻止或延缓了垢质在表面的附着;CuO纳米线具有空间限制作用,使垢的附着强度明显降低。Boinovich等^[44]通过将激光化学改性与激光毛化技术相结合,制备了一系列超疏水涂层。长期实验结果表明,该超疏水涂层具有很好的防垢性能。Yin等^[45]利用溶剂热反应制备了超疏水一维纳米棒涂层。由于超疏水涂层表面的附着力低,附着的污染物很容易被水流带走,起到了良好的防垢效果。

王瑞英^[46]通过添加La₂O₃制备了Al₂O₃-TiO₂基涂层和Cr₃C₂-NiCr基涂层,并于68℃油田采出水体系中进行了静态结垢实验。结垢720h后,Al₂O₃-TiO₂基涂层和Cr₃C₂-NiCr基涂层表面的结垢量分别为0.5875g和0.2922g, Cr₃C₂-NiCr基涂层表面的结垢量为Al₂O₃-TiO₂基涂层49.7%,表现出较好的防垢效果。Zhu等^[47]设计制备了一种新型的二乙烯三胺五甲叉膦酸(DTPMPA)改性超疏水阳极氧化铝(DSAA)涂层,并将其用于碳酸钙的防垢研究。由于防垢剂DTPMPA分子可在溶液与DSAA涂层界面逐渐释放,与Ca²⁺形成了一个稳定的中间体DTPMPA:Ca²⁺,阻止了CaCO₃晶粒的进一步生长,并诱发了CaCO₃微晶的晶格畸变。此外,超疏水DSAA涂层的超疏水性有利于在溶液与涂层界面保留大量空气层,从而CaCO₃防止结垢。经过众多学者的不断努力和探索发现,对涂层制备方法进行改进或添加防垢剂分子均可有效提升涂层的防垢性能。

4 结语

除了高成本、高能耗和环境污染外,常规防垢方法大多还很难完全抑制结垢。而疏水/超疏水防垢涂层,由于具有较低的表面自由能和微米-纳米微观粗糙结构,在防垢方面具有广阔的发展前景。因此,对于油田管道系统来说,疏水/超疏水防垢涂层仍是重要的研究方向。同时,仍有许多挑战需要解决。疏水/超疏水防垢涂层面临的主要问题是涂层的防垢性能和耐久性。例如:(1)疏水/超疏水防垢涂层的微米-纳米粗糙结构易被机械磨损、苛刻条件和腐蚀物质所破坏,影响涂层的防垢性能和耐久性能。(2)用于高温体系时,水蒸气分子极易进入到疏水/超疏水防垢涂层的微米-纳米微观结构中,导致涂层的疏水性/超疏水性丧失和涂层防垢性能下降。因此,需要进一步提升疏水/超疏水防垢涂层的防垢性能、耐久性能和耐磨性能等,开发新的功能防垢涂层,加快实验室研究的防垢涂层投入到工业应用中。

参考文献:

- [1]赵海勇,刘曼,李诚,等.镇原油田结垢趋势预测及防垢技术[J].油田化学,2022,39(01):140-144.
- [2]Yanxia Z, Xiangguo L, Yunbao Z, et al. The Effect of Alkali on Reservoir Minerals and Deposition Characteristics[J]. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 2019, 55(4): 439-446.
- [3]Ghosh P, Sharma H, Mohanty K K. ASP flooding in tight carbonate rocks[J]. Fuel, 2019, 241: 653-668.
- [4]Li J, Li T, Yan J, et al. Silicon containing scale forming

characteristics and how scaling impacts sucker rod pump in ASP flooding[C]. Asia Pacific Oil and Gas Conference & Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2009.

[5]Kudaibergenov S, Shakhvorostov A, Gussenov I, et al. Application of novel hydrophobically modified polybetaines based on alkylaminocrotonates and methacrylic acid as pour point depressants and ASP flooding agent[J]. Polymer Bulletin, 2019, 76(10): 5129-5147.

[6]胡亚楠. 强碱三元复合驱储层结垢智能预测方法研究[D]. 东北石油大学, 2020: 2-5.

[7]Antony A, Low J H, Gray S, et al. Scale formation and control in high pressure membrane water treatment systems: A review[J]. Journal of Membrane Science, 2011, 383(1-2): 1-16.

[8]钱慧娟. 聚合物基功能涂层的制备及其防垢性能研究[D]. 东北石油大学, 2020: 2-8.

[9]Vazirian M M, Charpentier T V J, Mônica D O P, et al. Surface inorganic scale formation in oil and gas industry: As adhesion and deposition processes[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 137: 22-32.

[10]钱慧娟, 宋华, 朱明亮, 等. 聚合物基疏水/超疏水涂层防垢的研究进展[J]. 应用化工, 2020, 49 (03): 773-776.

[11]Branzoi F, Branzoi V, Licu C. Corrosion inhibition of carbon steel in cooling water systems by new organic polymers as green inhibitors[J]. Materials and Corrosion, 2014, 65(6): 637-647.

[12]柳鑫华, 张怀芳, 刘越, 等. 阻垢剂阻垢性能及阻垢机理的研究进展[J]. 材料保护, 2021, 54 (08): 150-157.

[13]任小波. 油井结垢原因及化学防垢剂的选择[J]. 化学工程与装备, 2021, (03): 53-54.

[14]李琼玮, 李慧, 刘爱华, 等. 国外油田化学防垢技术新进展[J]. 现代化工, 2018, 38 (08): 63-67.

[15]彭冲, 李亚洲, 欧阳诗昆, 等. 柔性陶瓷复合涂层在油田集输管线防垢中的应用研究[J]. 广东化工, 2020, 47 (15): 64-65+73.

[16]邹伟, 吴鹏, 张涛, 等. 地面集输系统结垢机理及清防垢技术研究[J]. 石油化工应用, 2021, 40 (02): 72-75+85.

[17]常辉, 郑锋, 徐卫峰, 等. 物理防垢技术在大牛地气田的应用[J]. 断块油气田, 2015, 22 (03): 405-408.

[18]王苗苗. JD油田注水井井筒结垢机理及防垢措施研究[D]. 西南石油大学, 2019: 18-20.

[19]孙延安. 三元复合驱采油螺杆泵螺杆抗结垢、抗磨损、抗静电复合涂层研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.

[20]钱慧娟, 朱明亮, 侯俞行, 等. PVDF/FEP/Al₂O₃/CNT防垢涂层制备及性能[J]. 塑料工业, 2021, 49 (12): 164-168+175.

[21]Fihri A, Abdullatif D, Mahfouz R, et al. Decorated fibrous silica epoxy coating exhibiting anti-corrosion properties[J]. Progress in Organic Coatings, 2019, 127: 110-116.

[22]Matsuda T, Kashi K B, Fushimi K, et al. Corrosion protection of epoxy coating with pH sensitive microcapsules encapsulating cerium nitrate[J]. Corrosion Science, 2019, 148: 188-197.

[23]Cha J, Kim J, Ryu S, et al. Comparison to mechanical properties of epoxy nanocomposites reinforced by functionalized carbon nanotubes and graphene nanoplatelets[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 162: 283-288.

[24]Capricho J C, Fox B, Hameed N. Multifunctionality in Epoxy Resins[J]. Polymer Reviews, 2020, 60(1): 1-41.

[25]姜春花, 金瑞萍, 蒋余巍, 等. 有机涂层在高温高压腐蚀环境下防结垢和防结蜡性能测试[J]. 腐蚀与防护, 2006, 27 (09): 460-462.

[26]Wang G G, Zhu L Q, Liu H C, et al. Galvanic corrosion of Ni-Cu-Al composite coating and its anti-fouling property for metal pipeline in simulated geothermal water[J]. Surface and Coating Technology, 2012, 206(18): 3728-3732.

[27]王林, 陈晔. 纳米复合双层防垢涂层的制备及其性能研究[J]. 轻工学报, 2016, 32 (1): 65-71.

[28]Oldani V, Bianchi C L, Biella S, et al. Perfluoropolyethers Coatings Design for Fouling Reduction on Heat Transfer Stainless-Steel Surface[J]. Heat Transfer Engineering, 2015, 37(2): 210-219.

[29]Oldani V, Negro R D, Bianchi C L, et al. Surface properties and anti-fouling assessment of coatings obtained from perfluoropolyethers and ceramic oxides nanopowders deposited on stainless steel[J]. Journal of Fluorine Chemistry, 2015, 180, 7-14.

[30]Oldani V, Sergi G, Pirola C, et al. Sol-gel hybrid coatings containing silica and a perfluoropolyether derivative

with high resistance and anti-fouling properties in liquid media[J]. Journal of Fluorine Chemistry, 2016, 188: 43-49.

[31]张仲彬, 徐志明, 张明玉, 等.PTFE、FEP涂层表面 CaCO_3 污垢特性的实验研究[J].工程热物理学报, 2009, 30 (08): 1405-1407.

[32]王兴海, 刘天庆. 碳酸钙在加热铜基表面结垢诱导期实验研究[J]. 化学工程, 2000, 28 (04): 31-33.

[33]何凯龙, 陈颖, 冯婧, 等.Ni-P-PTFE化学复合镀层的导热及阻垢性能研究[J].材料导报, 2013, 2 (02): 121-124.

[34]王永真, 陈颖, 何凯龙, 等.铜基Ni-P-PTFE化学复合镀层的阻垢和导热综合性能的研究[J].制冷学报, 2014, 35 (01): 20-24.

[35]张帆, 刘明言, Zhang Shuai, 等.不同涂层在地热水中的腐蚀与结垢[J].太阳能学报, 2015, 36 (02): 510-516.

[36]Zhang H, Li B, Sun D, et al. SiO_2 -PDMS-PVDF

hollow fiber membrane with high flux for vacuum membrane distillation[J]. Desalination, 2018, 429: 33-43.

[37]Sugama T, Webster R, Reams W, et al. High-performance polymer coatings for carbon steel heat exchanger tubes in geothermal environments[J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(9): 2145-2154.

[38]Sugama T, Gawlik K. Anti-silica fouling coatings in geothermal environments[J]. Materials Letters, 2002, 57(3): 666-673.

[39]吴坤湖, 李卫平, 刘慧丛, 等.地热水环境中PTFE/PPS复合涂层表面 CaCO_3 垢成核行为[J].北京科技大学学报, 2010, 32 (10): 1321-1326.

[40]Qian H J, Zhu Y J, Wang H Y, et al. Preparation and antiscaling performance of superhydrophobic poly (phenylene sulfide)/polytetrafluoroethylene composite coating[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2017, 56(44): 12663-12671.