综述与专论

DOI：10.11949/0438-1157.

地热系统化学除垢技术研究进展与发展趋势

李娜[1]，刘保磊[1,2,3,4]，马鹏鹏[5,6,7]，高英格[1]

（[1]长江大学石油工程学院，湖北 武汉 430100；[2]低碳催化与二氧化碳利用全国重点实验室（长江大学），湖北 武汉 430100；[3]油气资源与勘探技术教育部重点实验室（长江大学），湖北 武汉 430100；[4]油气钻采工程湖北省重点实验室（长江大学），湖北 武汉 430100；[5]中国石化集团新星石油有限责任公司，北京 100083；[6]中石化（北京）新能源技术研究院有限公司，北京 100083；[7]深层地热富集机理与高效开发全国重点实验室，北京 100083）

摘要： 地热系统结垢问题严重影响运行效率与经济性。化学除垢虽能彻底除垢，但面临腐蚀、二次沉淀及复合垢处理难等挑战。系统梳理了地热系统主要垢型（碳酸盐、硫酸盐、硅酸盐、硫化物及铁垢）的形成机制与分布特征，阐述了酸化溶解、碱性溶解及螯合溶解三类化学除垢原理，并总结了各类垢型的化学除垢技术进展：除碳酸盐垢以盐酸为主、有机酸与螯合剂为补充；硫酸盐垢以螯合溶解为核心，碱性溶解（转化协同）可提升除垢效率；硅酸盐垢的碱性-螯合溶解正逐步替代含氟酸溶解；复合垢通过酸基复配、碱性螯合体系及弱碱性多功能协同等多组分配方实现高效除垢。未来技术将向绿色环保型除垢剂、精准化复合垢配方设计及除垢-防垢一体化方向发展。

关键词： 结垢；二氧化硅；溶解；化学除垢；地热系统

中图分类号： P 314；TK 268.+2　　**文献标志码：** A

文章编号： 0438-1157（XXXX）XX-0001-16

Advances and trends in chemical descaling technology for geothermal systems

LI Na[1], LIU Baolei[1,2,3,4], MA Pengpeng[5,6,7], GAO Yingge[1]

([1]*School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan* 430100, *Hubei, China*; [2]*State Key Laboratory of Low Carbon Catalysis and Carbon Dioxide Utilization* (*Yangtze University*), *Wuhan* 430100, *Hubei, China*; [3]*Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education* (*Yangtze University*), *Wuhan* 430100, *Hubei, China*; [4]*Hubei Key Laboratory of Drilling and Production Engineering for Oil and Gas* (*Yangtze University*), *Wuhan* 430100, *Hubei, China*; [5]*Sinopec Group Xinxing Petroleum Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*; [6]*Sinopec* (*Beijing*) *New Energy Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*; [7]*State Key Laboratory of Mechanisms of Deep Geothermal Accumulation and Efficient Development, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Scaling in geothermal systems severely compromises operational efficiency and economic viability. Although chemical descaling offers complete removal, it still faces challenges such as corrosion, secondary precipitation, and difficulties in treating complex composite scales. This review systematically outlines the formation mechanisms and distribution characteristics of major scale types in geothermal systems, including carbonates, sulfates, silicates, sulfides, and iron-based scales. Three fundamental chemical descaling principles—acid

收稿日期： 2026-05-06　　**修回日期：** 2026-07-10

通信作者： 刘保磊(1982—)，男，博士，教授，baoleiliu@yangtzeu.edu.cn

第一作者： 李娜(2003—)，女，硕士研究生，2752398258@qq.com

基金项目： 国家自然科学基金面上项目(52174019)；国家科技重大专项(2025ZD1405902)；国家科技重大专项(2025ZD1406407)；国家科技重大专项(2025ZD1407501)

引用本文： 李娜, 刘保磊, 马鹏鹏, 高英格. 地热系统化学除垢技术研究进展与发展趋势[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1-16

Citation: LI Na, LIU Baolei, MA Pengpeng, GAO Yingge. Advances and trends in chemical descaling technology for geothermal systems[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1-16

dissolution, alkaline dissolution, and chelation dissolution—are elaborated, and the technical progress for each scale type is summarized. Specifically, hydrochloric acid remains the primary agent for carbonate scale removal, supplemented by organic acids and chelating agents. For sulfate scales, chelation dissolution is the core technology, and alkaline dissolution (via conversion synergy) can further enhance removal efficiency. For silicate scales, alkaline-chelation dissolution is gradually replacing traditional fluoride-based acid methods. Composite scales are effectively removed through multi-component formulations such as acid-based blends, alkaline chelation systems, and weakly alkaline multifunctional synergistic systems. Future technologies are expected to evolve toward environmentally friendly descaling agents, precise formulation design for composite scales, and integrated descaling-anti-scaling strategies.

Keywords: fouling; silica; dissolution; chemical descaling; geothermal systems

引 言

地热能作为一种稳定、可靠、可再生的清洁能源，因其不受天气等自然条件的影响、平均能源利用率高于太阳能和风能，可用于供暖、发电、农业烘干、融雪、温泉等多个领域[1]，展现出巨大潜力。与其它常规能源相比较，地热能具有绿色低碳、能源利用系数高、稳定性高、廉价、分布广、易于开采且可直接利用等优点[2-3]。其规模化开发利用对于保障国家能源安全、减少温室气体排放、实现可持续发展具有重要意义[4]。

然而广泛的研究与实践表明，地热流体在开发利用过程中往往会出现结垢问题，在热储、井筒、地面设备、管道及换热器等关键部位形成的垢层[5]，会降低热交换效率，导致过滤器和井管堵塞，减少进水量，加速金属井管腐蚀甚至破裂，增加系统运行阻力，严重制约了地热能的高效、经济与长期稳定利用[6]。针对这一情况，需要花费大量的人力、物力和财力对地热系统进行定期除垢维护。现有的除垢方法主要分为物理法和化学法两大类[7]。物理法除垢虽然具有环保、操作相对简单等优点，但普遍存在除垢效率偏低、设备投资成本高、对致密硬垢清除能力有限等不足[4, 7-8]。相比之下，化学法除垢具有除垢效率高、适用范围广等优势[8]，是当前地热领域应用最为广泛的除垢手段。

尽管化学除垢技术在地热领域发挥着不可替代的作用，但其仍面临除垢剂腐蚀性强、二次沉淀风险高、环保法规限制趋严以及复合垢处理难度大等严峻挑战。在此背景下，系统梳理了地热系统碳酸盐、硫酸盐、硅酸盐、硫化物及铁垢五种主要垢型的类型与成因，将化学除垢技术归纳为酸化溶解、碱性溶解、螯合溶解三大原理并对比其环境依赖性，重点聚焦国内外复合垢协同除垢配方的最新进展，同时总结各类除垢剂的适用范围与局限性，展望未来发展趋势。不同除垢剂的经济性受垢型组成、施工条件及区域成本等因素影响显著，本文侧重技术原理与效果评估，未对不同除垢剂进行统一的成本量化比较，具体经济性需结合工况确定。讨论范围限于化学除垢技术，不涉及物理除垢及防垢技术，为地热资源的高效开发与可持续利用提供理论依据与实践指导。

1 地热流体的物化特征及结垢与腐蚀

地热流体普遍具有高盐度、高氯离子浓度、高导电性以及复杂的化学组成。主要阳离子为Na^+和Ca^{2+}，阴离子以Cl^-和SO_4^{2-}为主，常伴生高浓度CO_2、H_2S、CH_4等气体，pH多呈中性至弱碱性，氧化还原环境为还原态[9-14]。这些物化特征决定了地热流体不仅易结垢，且具有强腐蚀性[11, 15]。以德国Groß Schönebeck地热流体为例，其总溶解固体(TDS)高达193~269 g/L，Cl^-浓度达99~167 g/L，气体中N_2占80%vol、CH_4占15%vol，pH为5.5 - 6.4[9]。

1.1 地热流体结垢的形成

地热流体中高浓度的Ca^{2+}、Ba^{2+}、Sr^{2+}与HCO_3^-、SO_4^{2-}反应易形成碳酸盐垢和硫酸盐垢；SiO_2过饱和则沉积无定形硅垢，极难清除；Fe、Pb、Zn等金属因氧化还原或pH变化可生成金属氧化物或硫化物垢；硫酸盐还原菌等微生物活动还可诱发微生物腐蚀并生成FeS垢[9-10, 15]。Salton Sea地热流体因极高盐度和金属离子浓度，在井口和管道中大量沉淀出Fe_3O_4、PbS、ZnS等复杂垢层[10]。

1.2 地热流体腐蚀机制与影响因素

地热流体中高浓度的Cl^-、H_2S、CO_2以及高温环境是造成设备腐蚀的主要因素。在腐蚀方面，高浓度Cl^-会穿透金属钝化膜，引发点蚀、缝隙腐蚀和应力腐蚀开裂；H_2S促进硫化物应力开裂和氢脆；CO_2溶于水形成碳酸，加速均匀腐蚀；高温环境显著提高腐蚀速率，溶解氧混入会进一步恶化腐蚀[9-11, 15]。现场监测表明，日本Onikobe地热流体中，J55和N80套管的腐蚀速率分别高达226 mm/a和192 mm/a[11]。地热系统的腐蚀问题与结垢问题同样严峻，二者常相互伴生：垢层的不均匀沉积会加剧局部腐蚀，而腐蚀产物又可参与新的成垢反应，形成腐蚀-结垢耦合循环。

1.3 化学除垢过程中的电化学腐蚀风险

化学除垢剂多为强电解质，在除垢作业中会引入额外的电化学腐蚀风险。高电导率加速阳极溶解。H^+参与阴极析氢反应，增加氢脆风险。高浓度Cl^-可破坏金属表面钝化膜，诱发点蚀和缝隙腐蚀[15]。垢层剥离后裸露金属与残余垢层形成电偶腐蚀，加剧局部点蚀。因此，化学除垢剂中必须配伍高效缓蚀剂，以同时抑制阴、阳极反应。

2 地热系统结垢类型与成因

2.1 碳酸盐垢

碳酸盐垢是地热系统中最为常见的垢型之一，以方解石为主[16-18]。自然界中，碳酸钙($CaCO_3$)矿物有方解石、文石和球霰石3种形态，其中方解石最为稳定，也是地热系统中最常见的次生矿物[19-21]。对于中性至偏碱性地热流体，方解石通常处于饱和状态，尤其在中低温地热系统中更易析出[22]。除钙垢外，因流体组分差异，局部条件下也会形成菱铁矿($FeCO_3$)、菱锰矿($MnCO_3$)和毒重石($BaCO_3$)等其他碳酸盐垢[23]。碳酸盐垢广泛分布于地热系统的生产井筒、输送管道、阀门、闪蒸罐入口、节流阀处以及涡轮机叶片等表面设备上[24]，尤其集中出现于地热流体发生闪蒸沸腾或流速突变的井段及设备处(图1、2)。

碳酸盐垢的形成是热力学、动力学与流体力学综合作用的结果，具体表现为以下三个关键环节：(1)CO_2逸出与pH升高：当地热流体沿井筒上升时，压力逐渐降低，导致其中溶解的CO_2气体大量逸出(脱气过程)[25, 27-29]，CO_2作为酸性气体，其逸出使流体pH值显著升高[30]。(2)化学反应与沉淀：随着pH值升高，流体中的Ca^{2+}与HCO_3^-发生反应，生成$CaCO_3$沉淀；(3)温度与压力的影响：$CaCO_3$具有逆溶解度特性，即在压力一定时，其溶解度随温度升高而降低[31]，这一性质进一步加剧了井筒高温区段中沉淀的生成[32]。同时，压力下降本身既是CO_2逸出的驱动力，也直接降低了$CaCO_3$的溶解度[4]。

图1 运输管道中的$CaCO_3$[25]

Fig.1 $CaCO_3$ in a transportation pipeline[25]

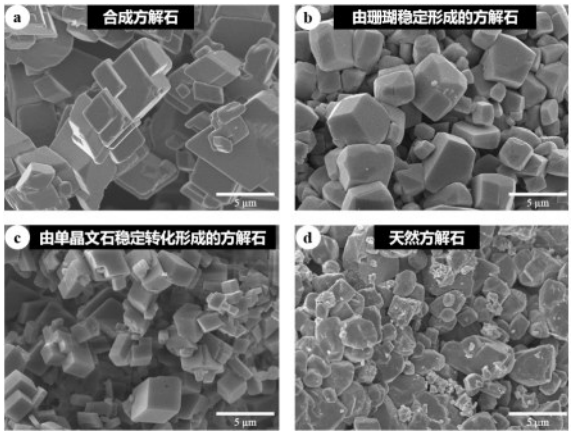

图2 典型方解石垢的扫描电镜图像[26]：(a)合成方解石(菱面体晶体)；(b)珊瑚稳定形成的方解石(多面体晶体)；(c)由单晶文石稳定转化形成的方解石(自形菱面体晶体)；(d)天然方解石(多面体晶体)

Fig.2 SEM images of typical calcite scale[26]: (a) synthetic calcite (rhombic crystals); (b) calcite stabilized from coral (polyhedral crystals); (c) calcite stabilized from single-crystal aragonite (euhedral rhombic crystals); (d) natural calcite (polyhedral crystals)

2.2 硫酸盐垢

硫酸盐垢是地热系统中在特定条件下形成的重要垢型，主要包括硫酸钙($CaSO_4$)和硫酸钡/锶($BaSO_4/SrSO_4$)两类[9, 33]。不同垢型在空间分布上表

现出明显的高温区与低温区差异：$CaSO_4$垢通常以硬石膏形态在系统内高温区域（如生产集输系统、高压分离器等）形成；而$BaSO_4$（重晶石）和$SrSO_4$（天青石）垢则常见于电站冷端等温度降低的区域（如热交换器、管道），二者常以固溶体形式共同析出[33, 34]（图3）。

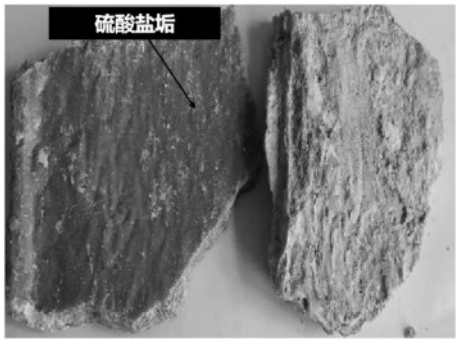

图3　复杂硫酸盐垢[35]

Fig.3　Complex sulfate scale[35]

硫酸盐垢的析出受流体化学环境变化与热力学条件改变的双重影响，其成因概括为以下两点：（1）温压下降导致溶解度降低：当地热流体从地下高温高压环境上升至地表或流经设备时，温度压力降低导致硫酸盐溶解度下降，从而过饱和析出[36-38]。（2）不同来源流体混合：当深部富含Ca^{2+}、Ba^{2+}、Sr^{2+}的流体与浅部富含SO_4^{2-}的流体相遇混合时，不配伍液体中的成垢阴阳离子进入同一体系，溶液迅速达到过饱和状态，导致硫酸盐晶体急剧析出[39]。

2.3　硅酸盐垢

硅酸盐垢是地热系统中最为常见和复杂的垢型之一，通常产生于高温地热系统（一般高于180℃，如冰岛、菲律宾、印尼、新西兰等）[16, 21]。硅酸盐垢主要可分为两大类：其一是以无定形二氧化硅为主体的纯二氧化硅垢[3, 40-41]；其二是因地热流体中金属阳离子组分不同，与硅酸根结合形成的金属硅酸盐垢，如镁硅酸盐、铝硅酸盐、铁硅酸盐等[24, 42]。这些金属硅酸盐垢多为无定形或弱结晶态，通常比纯二氧化硅垢更坚硬、更难溶解和处理[24]。从分布特征来看，两类硅酸盐垢存在明显差异。纯二氧化硅垢主要沉积于温度下降显著的区段，如分离器、卤水管道、溢流箱、回注管线、回注泵及回注井[24, 43]。金属硅酸盐垢容易出现在井口及分离器入口等因CO_2脱气导致pH快速上升且流体化学条件剧烈变化的部位（图4）。

硅酸盐垢的形成是温度、pH值、离子组成及流体动力学等多因素协同作用的结果，具体体现在以下四个方面：（1）温度下降与CO_2脱气：二氧化硅具有正溶解度特性，即其溶解度随温度升高而增加[44]。当地热流体从高温储层上升至地表或经冷却时，温度降低导致二氧化硅过饱和，引发自发聚合与沉淀[45]。与此同时，压力降低使溶解的CO_2大量逸出，流体pH从弱酸性升至碱性[46]。这进一步促进了硅的聚合及金属硅酸盐的沉淀[42]。（2）pH值的调控作用：pH值通过改变硅与金属离子的化学形态，从根本上决定了硅酸盐垢的沉积路径与类型。对于纯二氧化硅垢，中性至弱碱性环境最利于硅酸聚合形成胶体沉淀，而高pH区虽溶解度更高，但沉淀动力学极快，反而导致剧烈结垢[42, 47]。对于金属硅酸盐，镁硅酸盐在高碱性条件下因静电作用而大量生成[48]；铝硅酸盐则在近中性环境最为显著[49]。值得注意的是，当地热流体因CO_2逸出导致pH升至8~10的碱性范围时，纯二氧化硅快速沉淀与多种金属硅酸盐形成的条件同时得到满足，因此这一区间成为结垢发生的关键区间[42]。（3）流体化学组成的影响：高浓度的溶解硅和多种金属阳离子是成垢的物质基础[50]。这些阳离子不仅能与硅酸根直接反应生成沉淀，还能通过中和硅胶体表面的负电荷，破坏胶体稳定性，促进其聚沉。此外，Na^+、K^+等一价离子虽不直接参与沉淀，但会通过改变体系离子强度影响胶体稳定性，进而调控结垢行为[45]。（4）流速与质量流量：质量流量越大，单位时间内流经设备并达到过饱和的成垢物质总量也越大，从而导致更严重的结垢[43]。

图4　管道中的硅垢[24]

Fig.4　Silica scale in a pipeline[24]

2.4　其他次要垢型

除上述主要垢型外，以硫化物和铁氧化物为主

的次要垢型也在地热系统中广泛分布。硫化物垢主要类型包括铁、锌、铅、铜等金属硫化物，其中以黄铁矿(FeS_2)最为常见，此外还有闪锌矿(ZnS)、方铅矿(PbS)、黄铜矿($CuFeS_2$)等[51-52]。铁垢则以铁的氧化物/氢氧化物为主，如赤铁矿(Fe_2O_3)、针铁矿(FeOOH)等，多在地热流体与空气接触或氧化还原条件改变时析出[23, 53-54]。从沉积部位看，硫化物垢常见于生产井筒及阀门、节流阀等流速突变处(图5)；铁氧化物垢常见于闪蒸罐及井口至分离器管段等与空气接触的部位。

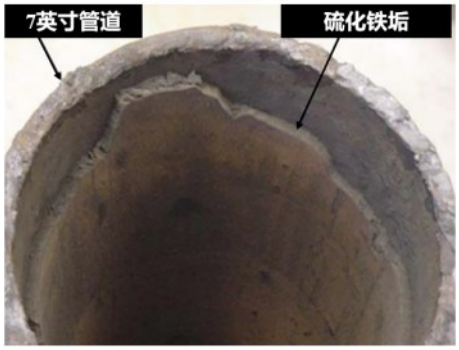

图5 管道中典型的硫化铁垢[55]

Fig.5 Typical iron sulfide scale in a pipeline[55]

硫化物垢的沉淀过程主要受以下两个因素的共同控制：(1)物质来源：流体中充足的H_2S与金属离子发生反应。金属离子既可源自深部储层流体，也可来自生产管道腐蚀的产物[51]。(2)环境条件：还原性、近中性的化学环境是促成反应沉淀的关键。H_2S浓度、适宜的pH与低氧化还原电位的特定组合控制着沉淀过程。一旦环境酸化或流体被氧化，硫化物沉淀便会受到强烈抑制，沉积物类型可能转变为氧化物或二氧化硅[56]。

铁垢的形成与注入水水质、地层水成分及管道腐蚀状况密切相关[53]。当地热流体从地下还原环境上升至地表或与含氧流体混合时，溶解的Fe^{2+}被氧化为Fe^{3+}，进而形成难溶的氧化物或氢氧化物沉淀。

综上所述，地热系统结垢类型多样，碳酸盐垢、硫酸盐垢、硅酸盐垢、硫化物垢及铁垢在形成机制、分布位置与除垢难度上各具特征。碳酸盐垢以CO_2脱气为核心机制，广泛分布于井筒及地面设备的高温、降压区段；硫酸盐垢受温压下降与不同来源流体混合控制，在高温区与低温区表现出明显的垢型分异；硅酸盐垢的形成受温度、pH与离子组成协同影响，是高温地热系统中处理难度最大的垢型之一；硫化物垢与铁垢则主要受流体氧化还原环境变化控制，常与其他垢型伴生(图6)。

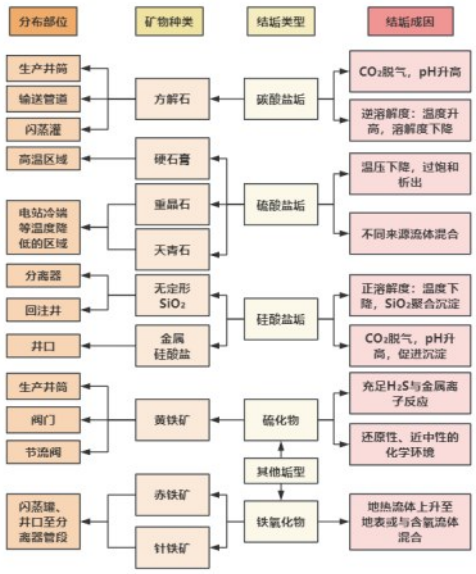

图6 地热系统主要垢型形成机制与分布特征示意图

Fig.6 Schematic diagram of the formation mechanisms and distribution characteristics of major scale types in geothermal systems

3 化学除垢技术基本原理

地热系统中的垢型常相互伴生形成复合垢，显著增加了除垢难度。因此，在明确各类垢型形成机制的基础上，理清化学除垢的作用原理，是科学选配除垢剂、优化工艺参数的理论前提。

3.1 酸化溶解

酸化溶解主要应用于以$CaCO_3$为主的碳酸盐垢。其原理是利用酸液提供的H^+与垢层发生中和反应，生成可溶性金属盐、H_2O和CO_2，从而实现垢层的直接溶解与移除[57]，除垢产物以Ca^{2+}等可溶性离子形式进入溶液，CO_2部分逸出或溶于水，暂时转移至液相；后续经地面处理(中和、沉淀、过滤)实现固液分离，垢最终被彻底去除。

尽管强酸与弱酸在酸化溶解中的基本化学原理相同，均为H^+与CO_3^{2-}的中和反应，但二者在反应动力学、传质过程及对垢层微观结构的影响上存在显著差异。

(1) 强酸：表面快速消耗型 强酸如盐酸(HCl)在水中完全解离，H^+活度高，反应速率极快。当HCl溶液接触$CaCO_3$垢层表面时，H^+迅速与表层$CaCO_3$反应，形成集中于垢液界面的反应界面。由于H^+的消耗速率远大于其在垢层内部的扩散速率，溶解反应

被限制在垢层浅表区域，垢层以逐层减薄的方式被移除，表面常出现不均匀的溶蚀凹坑。局部Ca^{2+}浓度快速升高，在高矿化度或高温条件下，易引发二次沉淀（图7）。该反应近乎不可逆，在常规条件下转化率接近100%，整体反应速率受传质（扩散）控制[58-59]。

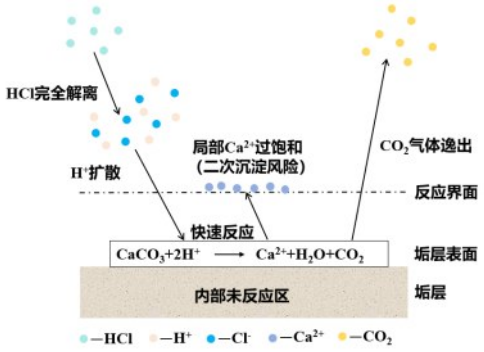

图7　强酸（HCl）表面酸化溶解$CaCO_3$垢层示意图

Fig.7　Schematic diagram of surface acid dissolution of $CaCO_3$ scale layer by strong acid (HCl)

（2）*弱酸：近表面弥散释放型*　弱酸如乙酸（HAc）在水中仅部分解离，存在大量未解离的中性分子。这些中性分子可扩散进入垢层近表面的微孔隙与晶粒边界区域，在孔隙中原位解离释放H^+，同时酸根阴离子Ac^-与Ca^{2+}形成可溶性钙盐，使溶解反应弥散分布于整个垢层厚度之内，无集中的反应界面。由于H^+释放缓和，局部pH变化平缓，Ca^{2+}浓度梯度小，且CO_2生成速率低，二次沉淀风险显著降低，垢层整体均匀减薄，对金属基体的腐蚀性远低于强酸（图8）。需注意，弱酸反应受热力学平衡控制，转化率远低于100%，且随温度升高而下降[58-60]。

3.2　碱性溶解

碱性溶解主要应用于以硫酸盐垢和硅酸盐垢为主的酸难溶垢。其原理是利用碱性溶液（OH^-或CO_3^{2-}等碱性离子）与垢层发生反应，将难溶组分转化为可去除形态[61-62]，除垢产物以SiO_3^{2-}等可溶性硅酸盐形式进入溶液，暂时转移至液相；后续经地面处理实现固液分离，垢最终被彻底去除。

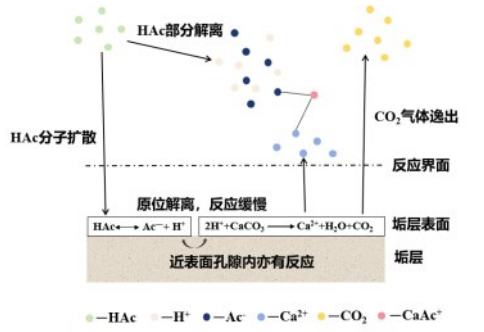

图8　弱酸（HAc）近表面酸化溶解$CaCO_3$垢层示意图

Fig.8　Schematic diagram of near-surface acid dissolution of $CaCO_3$ scale layer by weak acid (HAc)

尽管碱性溶解对硫酸盐垢和硅酸盐垢均有效，但二者的反应路径、产物及控制因素存在本质差异。

（1）*硫酸盐垢：两步转化-溶解机制*　针对难溶硫酸盐垢，采用氢氧化钠（NaOH）或碳酸钾（K_2CO_3）等转化剂在高温高pH条件下，先将硫酸盐转化为易处理的中间体，再通过酸化或螯合溶解实现彻底去除。其中，$CaSO_4$转化较完全，后续酸化即可；$BaSO_4$溶度积极低，需高浓度转化剂、高温、长时间浸泡，并依赖螯合剂乙二胺四乙酸（EDTA）协同去除[61-64]。其反应公式式（1）-式（4）分别如下：

$$CaSO_4(s)+2NaOH\rightarrow Ca(OH)_2\downarrow+Na_2SO_4 \quad (1)$$

$$Ca(OH)_2+2H^+\rightarrow H_2O+Ca^{2+} \quad (2)$$

$$BaSO_4(s)+K_2CO_3\rightarrow BaCO_3\downarrow+K_2SO_4 \quad (3)$$

$$BaCO_3(s)+K_4\text{-}EDTA\rightarrow[Ba(EDTA)]^{2-}+K_2CO_3+2K^+ \quad (4)$$

（2）*硅酸盐垢：直接溶蚀机制*　针对无定形SiO_2等硅垢，OH^-直接攻击硅氧骨架中的Si-O-Si键，使其断裂生成可溶性硅酸盐，无需后续酸化或螯合。该反应对无定形SiO_2效果显著，但对已老化结晶的石英相硅垢溶蚀速率极慢[61-62]。其反应公式式（5）如下：

$$SiO_2+2NaOH\rightarrow Na_2SiO_3+H_2O \quad (5)$$

3.3　螯合溶解

螯合溶解主要用于处理硫酸盐、硅酸盐等酸不溶或难溶垢。其原理是借助螯合剂分子中多个配位原子，与Ca^{2+}、Ba^{2+}、Fe^{3+}等金属离子形成稳定且水溶性的环状螯合物。以二乙烯三胺五乙酸（DTPA）为例，其分子中多个配位原子可与金属离子形成稳定的五元环或六元环结构（图9），使其螯合物比一般配合物更加稳定[65]。该过程能将金属离子从坚固的矿物晶格中分离出来，使整体垢层瓦解溶解[66-68]，除垢产物以可溶性螯合物形式进入溶液，暂时转移至液相；后续经地面处理实现固液分离，垢最终被彻底去除。

螯合剂在酸性和碱性环境中的反应路径存在本质差异，源于其质子化状态随酸碱度的变化。

（1）*酸性环境：酸溶为主、螯合为辅的协同机制*　酸性条件下，螯合剂分子中的羧基和氨基被大量质子化，配位原子被H^+占据，直接螯合能力显著降低，

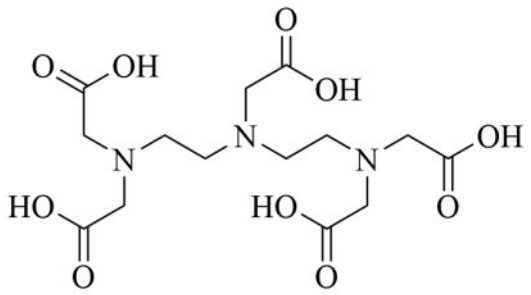

图9 DTPA分子结构式[65]

Fig.9 Molecular structural formula of DTPA[65]

但仍保留一定配位能力。除垢主要依赖H^+的酸化溶解，螯合剂作为辅助角色，一方面与溶液中已溶出的金属离子结合防止二次沉淀，另一方面也直接螯合少量金属离子。该机制适用于碳酸盐等可酸溶垢型[68-69]。

(2) *碱性环境：螯合剂直接配位溶解机制* 碱性条件下，螯合剂充分去质子化，达到完全电离形态，配位位点完全暴露，恢复强配位能力。酸化溶解无法进行，螯合剂通过配位作用直接与垢层表面的金属离子结合，将其从晶格中抽离形成可溶性螯合物。该机制适用于硫酸盐垢及部分碳酸盐垢，但反应速率较慢，且对溶液中已有的金属离子高度敏感[68-69]。

以环保型螯合剂谷氨酸二乙酸(GLDA)为例(表1)：酸性条件下，螯合钙仅占总溶出钙的17%，溶解以酸溶为主；碱性条件下，所有溶出钙均被螯合，螯合作用成为主导[69]。

表1 GLDA在酸性与碱性环境下对碳酸钙的溶解及螯合能力对比[69]

Table 1 Comparison of the dissolution and chelation capabilities of GLDA for calcium carbonate under acidic and alkaline environments[69]

环境	主导机制	总钙浓度/(g/L)	螯合钙浓度/(g/L)	螯合钙占比/%	自由Ca^{2+}
酸性（pH=1.7）	酸溶解为主	23.6	4	17	大量存在
碱性（pH=13）	纯螯合	11.2	11.2	100	无

4 主要垢型的化学除垢技术

4.1 国内外研究现状概述

我国中高温地热流体常用于发电，但结垢问题十分突出，如羊八井地热电站井孔1~2天即需除垢，严重时数日即可堵塞井管[70]；那曲、当雄等地热项目也因结垢严重而被迫关停或无法正常使用。面对严峻挑战，我国形成了以工程实践为驱动的化学除垢技术体系。1988和1991年，羊八井地热电厂对18口严重结垢的生产井进行化学除垢，恢复供汽并重新并入热网，效益显著[71]。2015年甘孜康定某地热井再次通过化学洗井成功除垢[27]。2025年朱保磊对川西康定DZK02地热井的碳酸钙垢进行数值模拟，提出在闪蒸点注入3%HCl可实现不关井实时防垢[72]。近年来，复合垢协同配方及绿色螯合剂研究逐步开展。国外如美国、冰岛等国虽已形成相对成熟的防垢技术[73, 74]，但多聚焦于结垢预测与预防，对酸洗除垢的现场报道较少。例如，1980年Deutscher等对美国Salton Sea地热田垢样进行了系统的化学溶解实验，发现热NaOH+EDTA对富硅垢有效、HNO_3+HAc对富PbS垢有效，但现场试验受限于温度保持和药剂接触效率，效果有限[75]。2024年Suzuki-Muresan等对法国Soultz-sous-Forêts地热换热器管垢进行化学清洗，发现多循环王水处理去除率达89%，DTPA也有较好效果[36]。总体而言，我国在碳酸盐垢化学清除领域具有明显的工程实践优势，而硫酸盐垢与硅酸盐垢的除垢技术研究相对滞后，与国外存在差距，是未来需要重点加强的方向。

4.2 碳酸盐垢的化学除垢技术

碳酸盐垢是地热系统中最为常见的垢型之一，其化学除垢技术研究最为成熟，主要策略可归纳为无机酸溶解、有机酸溶解和螯合溶解三类。

4.2.1 *无机酸溶解* 盐酸是无机酸溶解中最具代表性的碳酸盐垢除垢剂[76]，具有溶垢速率快、成本低廉的显著优势，尤其适用于常规井况的基质酸化。以西藏羊八井地热田为例，采用盐酸清洗成功恢复了18口严重结垢生产井的出力，节约钻井费用约270万元，经济效益显著[71]。但盐酸存在强腐蚀性，需配伍高效缓蚀剂[77]。在含硫环境中易产生有毒H_2S气体；高矿化度或高温条件下可能因$CaCl_2$过饱

和引发二次沉淀[78]。因此，其应用在环保要求高或含硫、高温、高矿化度等复杂工况中受到限制。

4.2.2　有机酸溶解　有机酸（如甲酸、乙酸、柠檬酸）是盐酸的重要替代方案[79]，具有腐蚀性低、反应温和的特点，适用于高温高压及腐蚀敏感环境[78]。甲酸高温稳定性好、溶解能力相对较强，是高温深井（>120°C）除碳酸盐垢的优先选择；乙酸作用更温和，适用于敏感地层或设备；柠檬酸兼具螯合铁离子的能力，常与氢氟酸（HF）复配用于砂岩酸化[68, 80]。针对$CaCO_3$的有机酸去除，开发了一种由乙酸、柠檬酸、磷酸和乙二胺四乙酸（EDTA）组成的环保型有机酸混合溶液。结果表明，该溶液在1.0 mol/L浓度下对管道内壁$CaCO_3$具有显著溶解效果，且其腐蚀速率比0.1 mol/L盐酸低约39%，展现出有机酸在除垢作业中低腐蚀、环境友好的优势[81]。然而，有机酸普遍存在单位质量溶垢能力较弱、成本较高、对硫酸盐等非碳酸盐垢无效等缺点，整体除垢效率低于盐酸[78]。

4.2.3　螯合溶解　螯合剂（如EDTA、GLDA、羟乙基乙二胺三乙酸(HEDTA)、次氮基三乙酸(NTA)）代表了环境友好型除垢策略。其通过螯合Ca^{2+}、Mg^{2+}等金属离子溶解垢体，并能有效抑制二次沉淀，对混合垢层适应性强且腐蚀性极低。EDTA在宽pH（4~13）范围有效，但生物降解性差[82-84]；GLDA作为新型环保螯合剂，在低pH（1.7~3）下溶解速率快、热稳定性好，是环保敏感条件下的首选[68-69, 85]；HEDTA则在高温（>150°C）且pH≈4时综合性能最佳[86]；NTA在高pH（>11）及高温条件下表现优异，适用于碱性化学刺激场景。美国Desert Peak增强型地热系统的数值模拟表明，高pH（11.5）的NTA螯合溶液能有效溶解近井区域的方解石与斜长石，使孔隙度从50%提升至约60%，渗透性增强范围达5米左右[87]。螯合剂的主要局限在于成本高昂、反应速度通常较慢，多用于设备高度敏感、环保要求严苛或需严防二次沉淀的特定井况（图10）。

4.3　硫酸盐垢的化学除垢技术

硫酸盐垢是地热系统中最难处理的垢型之一，几乎不溶于常规无机酸。其化学除垢以螯合溶解为核心、碱性溶解（转化协同）为辅助。

4.3.1　螯合溶解　螯合剂是除硫酸盐垢的技术核心，应用最广泛的是EDTA和DTPA。两者均需在高pH（pH>11，最佳12~13）条件下使用，以确保充分去质子化、增强螯合能力[88]。温度影响因试剂而异：

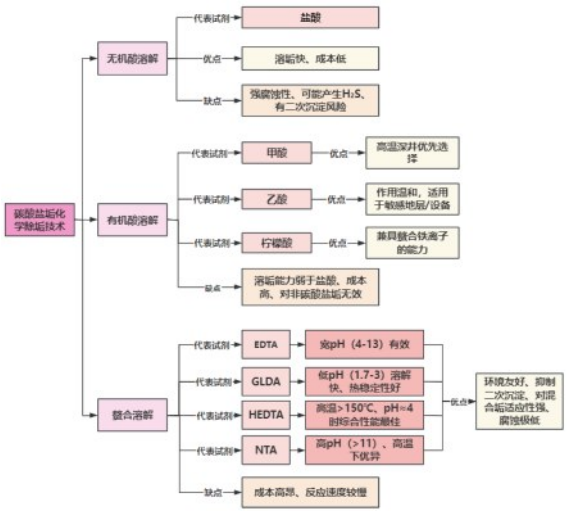

图10　碳酸盐垢化学除垢技术分类与对比流程图

Fig.10　Flowchart of classification and comparison of chemical descaling technologies for carbonate scales

EDTA在高温下对$CaSO_4$、$BaSO_4$及$SrSO_4$均有良好溶解效果，而DTPA在中低温条件下反应速率更快，但过高温度下性能可能下降[89]。绿色螯合剂方面，甲基甘氨酸二乙酸（MGDA）在高温下对$CaSO_4$垢的除垢效果优异：100℃时8%浓度的24 h去除率可达93%，明显优于GLDA和DTPA，但低温下效率显著下降[90]。为提升传统螯合剂性能，发展了活化剂复配策略：如DTPA与草酸、单宁酸、非离子表面活性剂复配体系，在35℃低温下对$BaSO_4$溶解率达76.9%，90℃下达71.2%，溶解效率为EDTA的3.2倍、DTPA的5倍，且腐蚀速率极低[91]。

4.3.2　碱性溶解（转化协同）　转化剂一般需与螯合剂复配使用，是碱性溶解路径中提升螯合剂性能的关键协同组分。以碳酸钾（K_2CO_3）为代表的转化剂可将极难溶的硫酸盐转化为更易与螯合剂反应的碳酸盐中间体，实现一步法高效溶解。研究表明，15wt%K_4-EDTA与10wt%K_2CO_3的复配体系在高pH、高温条件下，可在数小时内实现$BaSO_4$垢的完全溶解，且腐蚀性低、无有毒副产物[64]。但转化剂的作用具有试剂特异性：对于葡萄糖酸，K_2CO_3可使其对$CaSO_4$的溶解能力提升38.5%；而对于乳酸，加入K_2CO_3后其溶解能力反而下降76.5%[92]，表明配方设计需针对具体试剂进行优化（图11）。

4.4　硅酸盐垢的化学除垢技术

硅酸盐垢结构致密、成分复杂，是目前地热系统化学除垢中的难点，与碳酸盐垢和硫酸盐垢相比，其化学除垢方法相对有限。现有除垢技术主要分为传统含氟酸溶解和碱性-螯合溶解两类。

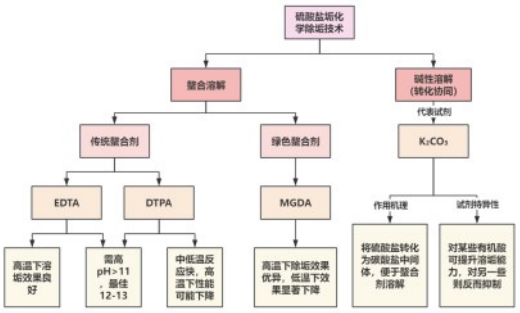

图11 硫酸盐垢化学除垢技术分类与对比流程图

Fig.11 Flowchart of classification and comparison of chemical descaling technologies for sulfate scales

4.4.1 *传统含氟酸溶解* 传统方法以氢氟酸（HF）为核心试剂，常通过HCl与氟化氢铵（$NH_4 \cdot HF_2$）复配原位生成HF，利用F^-与硅反应生成可溶性氟硅酸盐。该方法对硅酸盐垢有一定效果，但HF剧毒、强腐蚀，操作风险与环保压力极大；且F^-易与Ca^{2+}、Mg^{2+}生成CaF_2等二次沉淀，造成新的堵塞，应用受限，正逐步被更环保的技术替代[93-94]。

4.4.2 *碱性-螯合溶解* 碱性-螯合溶解是环境友好型的硅垢去除技术。单纯碱液对硅酸盐垢溶解率仅约40%，需复配螯合剂来螯合Ca^{2+}、Mg^{2+}，防止氢氧化物沉淀。针对含铁氧化物的复杂垢，还需添加聚羧酸盐分散剂和表面活性剂以突破杂质屏障[94]。研究表明，采用7%螯合剂混合物与15%NaOH组成的碱性螯合体系，在70℃下浸泡24~48 h，对工业硅酸盐垢溶解率可达95%~100%，对无定形垢可达80%[94]。与传统方法相比，碱性螯合体系完全不含氟，具有无毒、可生物降解的显著优势，但需维持中温条件和较长反应时间，对极端致密垢的去除效果仍有提升空间（图12）。

目前归纳了碳酸盐垢、硫酸盐垢及硅酸盐垢的化学除垢技术对比（表2）。这些技术策略所涉及的除垢剂类型与适用条件具有重要参考价值，目前已形成针对不同垢型的除垢体系，兼具高效性与针对性。随着地热开发工况的日趋复杂，合理选用与复配除垢技术正成为保障系统稳定运行的关键。

综上所述，碳酸盐垢、硫酸盐垢与硅酸盐垢在化学除垢策略上存在显著差异。碳酸盐垢技术最为成熟，以盐酸为代表的无机酸溶解仍为首选，有机酸与螯合剂在复杂工况下作为重要补充；硫酸盐垢因难溶于常规酸，除垢以螯合溶解为核心，转化剂协同可大幅提升效率；硅酸盐垢是当前除垢难点，传统含氟酸溶解因安全环保风险正被碱性-螯

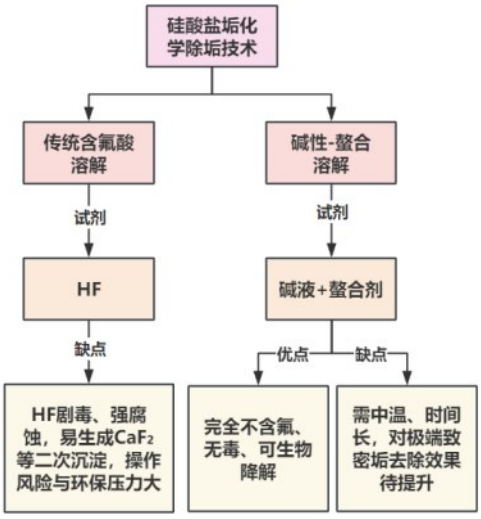

图12 硅酸盐垢的化学除垢技术分类与对比流程图

Fig.12 Flowchart of classification and comparison of chemical descaling technologies for silicate scales

合溶解逐步替代。三类垢型的除垢技术各具特点，实际应用中需根据垢型组成、工况条件、环保要求及经济成本综合选择。

4.5 复合垢的化学除垢与配方技术

随着地热系统开发深度与开采时间的增加，单一垢型往往共存于同一系统，甚至在同一垢层中交替分布，形成成分复杂的混合垢。复合垢常表现为多层结构或混合晶相，不同垢型之间存在协同沉积效应，显著增加了单一除垢剂的选择性溶解难度。针对这类复合垢，多组分协同的复合型除垢剂及配方技术成为当前化学除垢领域的重要发展方向。

地热系统中复合垢按其成因与主控矿物可大致分为：硫酸盐-碳酸盐复合垢、硅酸盐-碳酸盐复合垢、含铁硫化物复合垢、硫酸钡-硫酸锶复合垢以及成分复杂的多元复合垢。针对这些类型，已发展出多种复合除垢剂体系，其设计思路可归纳为以下三类典型模式。

（1） *酸基复配体系* 主要针对可被酸溶解的复合垢类型，包括硫酸盐-碳酸盐垢、硅酸盐-碳酸盐垢和含铁硫化物复合垢。其核心原理是利用无机酸或有机酸提供的H^+溶解垢层中的可酸溶组分，从而破坏复合垢的整体结构，同时复配螯合剂以螯合溶出的金属离子、防止二次沉淀，可辅以表面活性剂增强渗透与垢层剥离能力[95]。对于含硅质的复合垢，可进一步加入HF将硅质转化为可溶性氟硅酸盐[96]。该体系反应迅速，适用于中低温工况，但对设备腐蚀风险较高，需严格控制酸液浓度并配伍高效

表2 碳酸盐垢、硫酸盐垢、硅酸盐垢化学除垢技术对比

Table 2 Comparison of chemical descaling technologies for carbonate, sulfate, and silicate scales

垢型	除垢剂类型	代表试剂	优势	局限性	适用场景	参考文献
碳酸盐垢	无机酸溶解	盐酸	溶垢快、成本低、技术成熟	腐蚀性强、含硫时产生H_2S、高温高盐下易二次沉淀	常规碳酸盐垢	[71, 76–78]
	有机酸溶解	甲酸、乙酸、柠檬酸	腐蚀性低、反应温和	溶垢能力弱于盐酸、成本较高、对非碳酸盐垢无效	高温高压及腐蚀敏感环境	[78–79, 81]
	螯合溶解	EDTA、GLDA、HEDTA、NTA	腐蚀极低、宽pH有效、可防二次沉淀	成本高、反应慢	设备高度敏感、环保要求严苛或需严防二次沉淀的特定井况	[68, 82, 86–87]
硫酸盐垢	螯合溶解	EDTA、DTPA	腐蚀性低	需高pH(>11)、温度影响因试剂而异	各类硫酸盐垢	[88–91]
	碱性溶解(转化协同)	EDTA+K_2CO_3	显著提升溶解效率、腐蚀性低、无有毒副产物	转化剂作用具有试剂特异性	转化剂一般需与螯合剂复配使用、高温深井、极难溶硫酸盐垢	[64, 92]
硅酸盐垢	含氟酸溶解	HF、$NH_4 \cdot HF_2$	对硅酸盐有溶解能力	剧毒、强腐蚀、易产生CaF_2二次沉淀	已逐渐被淘汰	[93–94]
	碱性–螯合溶解	NaOH+螯合剂	无毒、可生物降解、溶解率高	需中温条件、反应时间长、对极端致密垢效果待提升	环保要求高	[93–94]

缓蚀剂,在含硫或高温环境下应用受限。需注意的是,针对含铁硫化物与碳酸盐的复合垢,新型环保酸体系(NEFAS)在高温下表现出良好的溶解性能与低腐蚀性,为酸基复配体系提供了更环保的选择[55]。

(2) *碱性螯合体系* 主要针对硫酸钡–硫酸锶垢等极难溶垢。以EDTA或DTPA为螯合主剂,在高pH条件下充分去质子化以增强螯合能力。进一步引入K_2CO_3等转化剂,可将难溶硫酸盐转化为碳酸盐中间体,显著提升溶解效率[97]。对于不含转化剂的碱性螯合体系[98–99],虽添加了表面活性剂或分散剂以改善传质,但主导机理仍为强螯合作用。该类体系适用于高温深井,腐蚀性低,但对低温工况反应动力学受限,且含转化剂的配方成本较高。

(3) *弱碱性多功能协同体系* 主要针对成分复杂的多元复合垢。以丙烯酸、乳酸等有机酸/聚合物为主剂,复配非离子表面活性剂等助剂,除垢效果主要依赖于多重机制的协同作用,通常在弱碱性至中性条件下实现多种垢型的同步除垢[100]。例如,有机酸可在垢层微界面产生局部酸化以溶解碳酸盐,聚合物通过静电排斥分散已脱落颗粒,羧基的弱络合作用抑制Ca^{2+}、Fe^{2+}的二次沉淀,而非离子表面活性剂则降低界面附着力促进垢层整片剥离。该类体系腐蚀性低,部分配方可实现无需关井、无需返排的简化作业流程。

目前列举了典型复合垢的化学除垢配方与效果(表3)。这些配方所涉及的除垢剂类型与适用条件具有重要参考价值,目前已形成针对不同复合垢类型的多组分协同技术体系,兼具高效除垢与低腐蚀特性。随着地热开发规模的扩大和复合垢问题的日益突出,该类技术正得到日益广泛的应用。

综上所述,针对地热系统中日益普遍的复合垢问题,复合型除垢剂与配方技术已形成三类典型设计思路:一是酸基复配体系,主要针对可被酸溶解的复合垢(如硫酸盐–碳酸盐垢、硅酸盐–碳酸盐垢和含铁硫化物复合垢),通过无机酸/有机酸与螯合剂协同溶解;二是碱性螯合体系,主要针对硫酸钡–硫酸锶等极难溶垢,以螯合剂为主剂,其中引入转化剂可显著提升溶解效率,而不含转化剂的体系则依靠强螯合作用直接溶解垢层,两者可根据工况条件灵活选用;三是弱碱性多功能协同体系,主要针对成分复杂的多元复合垢,以有机酸/聚合物为主剂,依赖于多重机制的协同作用。这些技术路径为地热复合垢的高效除垢提供了有效解决方案。

5 发展趋势

尽管现有化学除垢技术在单一垢型处理方面

表3 典型复合垢化学除垢配方与效果

Table 3 Typical composite scale chemical descaling formulations and effects

复合垢类型	主要成分	详细配方	关键条件	测试条件	除垢率/%	技术类型	文献
硫酸盐-碳酸盐复合垢	$CaSO_4$+$CaCO_3$	氨基磺酸:HCl:EDTA=4:1:1	温度:60℃,酸性环境,反应时间:24 h	静态浸泡	≥90		[95]
硅酸盐-碳酸盐复合垢	SiO_2+CaO	4 mLHCl+40 mLH_2O+4 mLHF+0.4 g柠檬酸+0.1 g苯磺酸钠	温度:40℃,酸性环境,反应时间:2 h	静态浸泡	≥98	酸基复配	[96]
含铁硫化物复合垢	Fe_7S_8+FeS_2+$CaCO_3$等	75 wt%NEFAS(新环保酸系统,配方未公开)	温度:125℃,酸性环境,反应时间:6 h	静态浸泡	初始垢量未提供,无法计算		[55]
硫酸钡-硫酸锶复合垢	$BaSO_4$+$SrSO_4$	20%DTPA+4%KCl+1%Tween60+10%K_2CO_3	温度:25℃,pH:12,反应时间:24 h	静态浸泡	81.41		[97]
	$BaSO_4$+$SrSO_4$	25%EDTA+21%KOH+1%PTMAS+余量H_2O	温度:80℃,pH:10~14,反应时间:36 h	静态浸泡	≥80	碱性螯合	[98]
	$BaSO_4$+$SrSO_4$	10%DTPA+6%水杨酸+0.03%聚丙烯酸钾+0.2%吐温-80	温度:80℃,pH:12,反应时间:8 h	静态浸泡	59.7		[99]
多元复合垢	碳酸盐+硫酸盐+氧化物+硅酸盐等	丙烯酸(15~30 wt%)+乳酸(5~15 wt%)+非离子表面活性剂(1~3 wt%)+环氧乙烷(<1 wt%)+水(70 wt%)	温度:70-100℃,pH:9,反应时间:5~6 h	静态浸泡	≥74.6	弱碱性多功能	[100]

已较为成熟,复合垢的协同除垢配方也取得了进展,但在实际应用中仍面临诸多挑战,包括传统除垢剂的环境友好性不足、复合垢的高效、选择性除垢机理尚不清晰、以及除垢作业后的快速再结垢问题依然突出。因此,面向未来,地热系统化学除垢技术需在以下方向持续突破:

(1)绿色环保型除垢剂的深入研发。随着环保法规日益严格,可生物降解、低毒、低腐蚀的绿色除垢剂成为重要发展方向。当前主流的化学除垢剂仍以合成螯合剂和无机酸为主,其在环境中的持久残留和生态毒性问题日益受到关注。新型绿色螯合剂(如GLDA、MGDA等)因其优异的生物降解性和热稳定性,正逐步替代传统药剂应用于各类垢型的除垢。天然有机酸复配体系在除碳酸盐垢中展现出替代强酸的潜力,且对金属设备腐蚀性显著降低。此外,无氟、无磷、低氮的环保型配方设计理念

正成为研发主流。未来研究的重点在于优化绿色药剂的分子结构以提升其螯合能力与热稳定性，降低生产成本以增强市场竞争力，以及开发无氟、无强碱的硅酸盐垢绿色除垢技术。

（2）复合垢协同除垢机理与精准化配方设计。针对地热系统中日益普遍的复合垢问题，需加强多组分协同作用机制的基础研究。复合垢通常具有多层结构或多晶相共存的特征，不同垢层之间可能存在物理包裹或化学键合，导致单一组分除垢剂难以同时作用于所有成分。多组分协同体系的设计思路已得到广泛认可，其核心在于利用不同功能组分之间的互补与增效作用，实现对复合垢的分层溶解或同步瓦解。未来应深入探究不同除垢剂组分在垢层界面上的竞争、协同与转化行为，建立基于垢型矿物组成与流体化学特征的定制化配方开发流程，实现从依赖经验试错向机理驱动的理性设计模式转变，从而提升复合垢的高效、选择性除垢能力。

（3）除垢-防垢一体化技术。在实现精准除垢的基础上，如何防止垢层再次快速沉积成为提升系统长期经济性的关键。为减少重复作业频次、延长设备运行周期，同步实现除垢与预防再结垢的一体化技术正受到越来越多的关注。传统除垢作业往往侧重于垢层的即时去除，但去除后金属表面处于活化状态，反而可能加速后续垢物的再沉积。一体化技术的核心在于开发兼具除垢与阻垢双重功能的复合体系，在去除现有垢层的同时，通过阻垢剂分子在金属表面的吸附或在垢层生长位点的锚定，形成长效防护屏障。这要求除垢组分与阻垢组分在化学上兼容、在功能上协同，避免相互干扰。优化注入与分段关井反应工艺，可提高药液与垢层的接触效率，实现井筒关键部位的定点处理，从而在除垢垢层的同时构建长效防垢能力，显著降低全生命周期运维成本。

6 结 论

地热系统在开发利用过程中普遍存在结垢问题，严重影响运行效率与经济性。化学除垢虽因成本低、除垢彻底而成为主流技术，但仍面临腐蚀、二次沉淀及复合垢处理难等挑战。解决结垢问题对于提高系统效率、延长设备寿命、提升资源利用价值具有重要意义，有必要进一步深入开展相关研究。

地热系统主要垢型包括碳酸盐垢、硫酸盐垢、硅酸盐垢、硫化物垢及铁垢，其形成受温度、压力、pH与流体化学协同控制。碳酸盐垢的除垢以盐酸为主、有机酸与螯合剂为辅；硫酸盐垢以螯合溶解为核心，碱性溶解（转化协同）可显著提升效率；硅酸盐垢的碱性-螯合溶解正逐步替代传统含氟酸溶解。这些垢型在实际地热系统中往往共存并相互伴生，形成成分复杂的复合垢；复合垢则通过酸基复配、碱性螯合体系、弱碱性多功能协同等多组分配方实现高效除垢。

未来化学除垢技术将向绿色环保型除垢剂、复合垢精准化配方设计及除垢-防垢一体化方向发展。具体而言，可生物降解螯合剂与天然有机酸将逐步替代传统强酸强碱；基于垢型组成与流体化学特征的定制化配方将成为研发重点；兼具除垢与预防功能的复合体系有望显著降低全生命周期运维成本，推动地热资源可持续利用。

参考文献

[1] 刘成林, 王馨佩, 车长波, 等. 中国非常规油气与可再生能源发展前景[J]. 世界石油工业, 2025, **32**(3): 12-21.
Liu C L, Wang X P, Che C B, et al. Development prospects of unconventional oil and gas and renewable energy in China[J]. World Petroleum Industry, 2025, **32**(3): 12-21.

[2] 吴微, 赵荣钦, 刘文锴, 等. "双碳"目标下城市地热能开发利用研究现状与展望[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, **57**(4): 108-118.
Wu W, Zhao R Q, Liu W K, et al. Research status and prospects of urban geothermal energy development and utilization under dual-carbon goals[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, **57**(4): 108-118.

[3] 韦梅华. 四川省康定县地下热水结垢机理及趋势分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
Wei M H. Analysis of the scaling mechanism and trend of thermal groundwater in Kangding County of Sichuan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.

[4] 林红波. 高温地热井筒结垢机理与防除垢研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2022.
Lin H B. Study on scaling mechanism and anti-scaling of high temperature geothermal wellbore[D]. Xi′an: Xi′an Shiyou University, 2022.

[5] 王宏伟, 李亚峰, 林豹, 等. 地热供热系统的结垢问题初探[J]. 辽宁化工, 2002, **31**(10): 419-420, 434.
Wang H W, Li Y F, Lin B, et al. Discussion on the problems about encrustment in geothermal heating system[J]. Liaoning Chemical Industry, 2002, **31**(10): 419-420, 434.

[6] 卢予北. 地热井常见主要问题分析与研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2004, **31**(2): 43-47.
Lu Y B. Analyses and research on frequently occurred problems

in geothermal well[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2004, **31**(2): 43–47.

[7] 郑尚基. 地热水阻垢实验研究及机理分析[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2018.
Zheng S J. Experimental study and mechanism analysis of geothermal water scaling inhibition[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2018.

[8] 朱新建, 胡远远, 张波, 等. 油田采出水除垢技术研究进展[J/OL]. 华南理工大学学报(自然科学版), 1–14.
Zhu X J, Hu Y Y, Zhang B, et al. Research progress in scale removal technology for oilfield produced water[J/OL]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 1–14.

[9] Regenspurg S, Wiersberg T, Brandt W, et al. Geochemical properties of saline geothermal fluids from the in-situ geothermal laboratory Groß Schönebeck (Germany)[J]. Geochemistry, 2010, **70**: 3–12.

[10] Gallup D L. Geochemistry of geothermal fluids and well scales, and potential for mineral recovery[J]. Ore Geology Reviews, 1998, **12**(4): 225–236.

[11] Nogara J, Zarrouk S J. Corrosion in geothermal environment: Part 1: Fluids and their impact[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, **82**: 1333–1346.

[12] Arnórsson S, Stefánsson A, Bjarnason J O. Fluid-fluid interactions in geothermal systems[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2007, **65**(1): 259–312.

[13] 赵佳怡, 张薇, 马峰, 等. 雄安新区容城地热田地热流体化学特征[J]. 地质学报, 2020, **94**(7): 1991–2001.
Zhao J Y, Zhang W, Ma F, et al. Geochemical characteristics of the geothermal fluid in the Rongcheng geothermal field, Xiong′an New Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, **94**(7): 1991–2001.

[14] Klapper H S, Bartetzko A, Lehr J. Hydrogeochemical modelling to monitor scaling and corrosion during geothermal energy production in the north German Basin[C]//CORROSION 2017. New Orleans: NACE International, 2017: 1–8.

[15] 白海涛, 高俊哲, 孙玉倩, 等. 地热水腐蚀与结垢研究现状与展望[J]. 科学技术与工程, 2024, **24**(25): 10577–10587.
Bai H T, Gao J Z, Sun Y Q, et al. Review of geothermal water corrosion and scaling[J]. Science Technology and Engineering, 2024, **24**(25): 10577–10587.

[16] 刘明言. 地热流体的腐蚀与结垢控制现状[J]. 新能源进展, 2015, **3**(1): 38–46.
Liu M Y. A review on controls of corrosion and scaling in geothermal fluids[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2015, **3**(1): 38–46.

[17] 叶西安, 刘生旭, 安俊蒲, 等. 地热井结垢厚度预测软件的构建与分析[J]. 当代化工研究, 2025, 2025(2): 130–132.
Ye X A, Liu S X, An J P, et al. Construction and analysis of scaling thickness prediction software for geothermal wells[J]. Modern Chemical Research, 2025, 2025(2): 130–132.

[18] 孙本达, 袁义方. 防止地热流体结垢和除垢的研究[J]. 热力发电, 1987, (4): 15–19, 14.
Sun B D, Yuan Y F. Study on preventing geothermal fluid from scaling and descaling[J]. Thermal Power Generation, 1987, (4): 15–19, 14.

[19] Jarrahian K, Mackay E, Singleton M, et al. Scale control in geothermal wells—what are the options for effective and economic scale management?[J]. SPE Journal, 2025, **30**(4): 2171–2189.

[20] Pátzay G, Kármán F H, Póta G. Preliminary investigations of scaling and corrosion in high enthalpy geothermal wells in Hungary[J]. Geothermics, 2003, **32**(4–6): 627–638.

[21] 谢迎春, 李义曼, 王宗满, 等. 地热流体开发利用中防垢除垢技术研究进展[J]. 新能源进展, 2023, **11**(1): 21–28.
Xie Y C, Li Y M, Wang Z M, et al. Status of scale prevention and removal technologies in utilization of geothermal fluid[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2023, **11**(1): 21–28.

[22] Bénézeth P, Stefánsson A, Gautier Q, et al. Mineral solubility and aqueous speciation under hydrothermal conditions to 300 ℃ – the carbonate system as an example[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2013, **76**(1): 81–133.

[23] Pauwels J, Salah S, Vasile M, et al. Characterization of scaling material obtained from the geothermal power plant of the Balmatt site, Mol[J]. Geothermics, 2021, **94**: 102090.

[24] Haklidir F T, Haklidir M. Fuzzy control of calcium carbonate and silica scales in geothermal systems[J]. Geothermics, 2017, **70**: 230–238.

[25] Bu X B, Jiang K Q, Wang X L, et al. Analysis of calcium carbonate scaling and antiscaling field experiment[J]. Geothermics, 2022, **104**: 102433.

[26] Hashim M S, Kaczmarek S E. Evolution of calcite microcrystal morphology during experimental dissolution[J]. Journal of Sedimentary Research, 2021, **91**(3): 229–242.

[27] Kaypakoğlu B, Sisman M, Aksoy N. Preventive methods for scaling and corrosion in geothermal fields[C]//New Zealand Geothermal Workshop 2012 Proceedings. Auckland, New Zealand: New Zealand Geothermal Association, 2012.

[28] 王延欣, 刘世良, 边庆玉, 等. 甘孜地热井结垢分析及防垢对策[J]. 新能源进展, 2015, **3**(3): 202–206.
Wang Y X, Liu S L, Bian Q Y, et al. Scaling analysis of geothermal well from Ganzi and countermeasures for anti-scale[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2015, **3**(3): 202–206.

[29] 郭雪梅, 李彬. 关于药剂软化法对HRI地热井阻垢的可行性探讨[J]. 山东工业技术, 2015, (6): 215.
Guo X M, Li B. Discussion on the feasibility of scale inhibition of HRI geothermal well by chemical softening method[J]. Shandong Industrial Technology, 2015, (6): 215.

[30] Eseosa A, Atubokiki A J. Prediction and monitoring of oilfield carbonate scales using scale check©[C]//Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Abuja: Society of Petroleum Engineers, 2011: SPE 150797-MS.

[31] Weyl P K. The change in solubility of calcium carbonate with temperature and carbon dioxide content[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1959, **17**(3–4): 214–225.

[32] Uwakwe O C, Riechelmann S, Reinsch T, et al. Review of carbonate rock experiments at different pressure and temperature conditions in the context of geothermal energy exploitation[J]. Geosciences, 2025, **15**(2): 61.

[33] Gill J S, Jacobs G T, Butler S. Mitigation of calcium sulfate scaling in geothermal production wells[J]. Transactions-Geothermal Resources Council, 2016, **40**: 465–468.

[34] Scheiber J, Nitschke F, Seibt A, et al. Geochemical and mineralogical monitoring of the geothermal power plant in Soultz-sous-Forêts (France)[C]//Proceedings of the 37th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University,

2012: 1033−1042.

[35] 单素灵, 何政伟, 刘立军, 等. 两种硫酸盐清洗剂的研制[J]. 清洗世界, 2017, **33**(6): 27−29, 48.
Shan S L, He Z W, Liu L J, et al. Development of two kinds of sulphate detergent[J]. Cleaning World, 2017, **33**(6): 27−29, 48.

[36] Suzuki−Muresan T, Rivonkar A, Bossé V, et al. Chemical and mechanical decontamination of scales from geothermal shell and tube heat exchangers in operation before anti−scaling treatment [J]. Geothermics, 2024, **120**: 102960.

[37] Penot C, Martelo D, Paul S. Corrosion and scaling in geothermal heat exchangers[J]. Applied Sciences, 2023, **13**(20): 11549.

[38] Kharaka Y, Lico M S, Carothers W W. Predicted corrosion and scale−formation properties of geopressured geothermal waters from the northern gulf of Mexico Basin[J]. Journal of Petroleum Technology, 1980, **32**(2): 319−324.

[39] 徐波. 硫酸钡锶垢化学清垢研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2014.
Xu B. Study on chemical cleaning of barium strontium sulfate scale[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.

[40] Sigfusson B, Gunnarsson I, Energy R. Scaling prevention experiments in the hellisheiði power plant, Iceland[C]// Proceedings, thirty−sixth workshop on geothermal reservoir engineering. Stanford: Stanford University, 2011: SGP−TR−191.

[41] 余琴. 重庆碳酸盐岩钻井地热水热储温度与结垢研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
Yu Q. Study on the reservoir temperature and scaling of borehole geothermal water of carbonate rocks in Chongqing[D]. Chongqing: Southwest University, 2017.

[42] Paudyal S, Fan C F, Adams L, et al. Silica and silicate scales formation in geothermal condition and their control[C]//ADIPEC. Abu Dhabi: Society of Petroleum Engineers, 2025: SPE 229152−MS.

[43] Utami W S, Herdianita N R, Atmaja R W. The effect of temperature and pH on the formation of silica scaling of dieng geothermal field, Central Java, Indonesia[C]//Proceedings, Thirty−Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University, 2014.

[44] von Hirtz P. Silica scale control in geothermal plants—Historical perspective and current technology[M]//Geothermal Power Generation. Amsterdam: Elsevier, 2016: 443−476.

[45] Ngothai Y, Lane D, Kuncoro G, et al. Effect of geothermal brine properties on silica scaling in enhanced geothermal systems[C]// Geothermal Resources Council. Geothermal Resources Council Annual Meeting 2012 − Geothermal: Reliable, Renewable, Global. Reno: Geothermal Resources Council, 2012: 871−880.

[46] Demir M M, Baba A, Atilla V, et al. Types of the scaling in hyper saline geothermal system in northwest Turkey[J]. Geothermics, 2014, **50**: 1−9.

[47] Longval R, Meirbekova R, Fisher J, et al. An overview of silica scaling reduction technologies in the geothermal market[J]. Energies, 2024, **17**(19): 4825.

[48] Demadis K D, Spinthaki A, Kamaratou M, et al. Control of metal silicate scaling by chemical additives[C]//CORROSION 2019. Nashville: NACE International, 2019: 1−15.

[49] Gallup D L. Aluminum silicate scale formation and inhibition: Scale characterization and laboratory experiments[J]. Geothermics, 1997, **26**(4): 483−499.

[50] Demadis K. Recent developments in controlling silica and magnesium silicate foulants in industrial water systems[M]//The Science and Technology of Industrial Water Treatment. Boca Raton: CRC Press, 2010: 179−203.

[51] Chen T, Chang F, Wang Q W, et al. Non−acidic iron sulfide scale dissolver: from lab development to field application[C]// CORROSION 2021. NACE International, 2021: 1−13.

[52] Gunnlaugsson E, Ármannsson H, Thorhallsson S, et al. Problems in geothermal operation − scaling and corrosion[J]. Geothermal Training Program, United Nations University, 2014: 1−18.

[53] 魏高峰, 李仲铭, 屈策计. 延长油田注水井的新型防垢剂制备及性能评价[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, **44**(24): 119−121.
Wei G F, Li Z M, Qu C J. Preparation and performance evaluation of a new scale inhibitor for water injection wells in Yanchang Oilfield[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2024, **44**(24): 119−121.

[54] Juhri S, Yonezu K, Inoue H, et al. Precipitation behavior of iron and silicic acid when mixing acidic and weakly alkaline geothermal waters at the Hatchobaru geothermal power plant, Oita, Japan[J]. Geothermics, 2022, **104**: 102470.

[55] Gamal H, Abdelgawad K, Elkatatny S. New environmentally friendly acid system for iron sulfide scale removal[J]. Sustainability, 2019, **11**(23): 6727.

[56] Juhri S, Yonezu K, Harijoko A, et al. Diverse scale deposition in response to the change in chemical properties of geothermal water at the Dieng geothermal power plant, Indonesia[J]. Geothermics, 2023, **111**: 102717.

[57] Tahir M S, Saleem M. Experimental study of chemical de−scaling−I: Effect of acid concentration[J]. Journal of Faculty of Engineering & Technology, 2008, **2007**: 1−9.

[58] Buijse M, de Boer P, Breukel B, et al. Organic acids in carbonate acidizing[J]. SPE Production & Facilities, 2004, **19**(3): 128−134.

[59] Chatelain J C, Silberberg I H, Schechter R S. Thermodynamic limitations in organic−acid/carbonate systems[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1976, **16**(4): 189−195.

[60] Alkhaldi M H H, Nasr−El−Din H A A, Sarma H. Kinetics of the reaction of citric acid with calcite[J]. SPE Journal, 2010, **15**(3): 704−713.

[61] Wu Z G, Yan Z H, Zhang Q H, et al. Review on descaling and anti−scaling technology of heat exchanger in high−salt wastewater thermal desalination[J]. Water Science & Technology, 2023, **88**(8): 2081−2107.

[62] 张静, 赵大洲. 油气田硫酸盐垢的形成机理及除垢技术研究进展[J]. 煤化工, 2025, **53**(4): 142−146.
Zhang J, Zhao D Z. Research progress on formation mechanism and descaling technology of sulfate scale in oil and gas field[J]. Coal Chemical Industry, 2025, **53**(4): 142−146.

[63] Murtaza M, Alarifi S A, Rasm M Y, et al. Single step calcium sulfate scale removal at high temperature using tetrapotassium ethylenediaminetetraacetate with potassium carbonate[J]. Scientific Reports, 2022, **12**: 10085.

[64] Murtaza M, Rasm M Y, Alarifi S A, et al. An efficient single step approach for barium sulfate ($BaSO_4$) scale removal at high temperature[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2023, **48**(12): 16879−16888.

[65] 赵立强, 王春雷, 袁学芳, 等. 耐高温硫酸钡解堵剂研制及性能

评价[J]. 油气藏评价与开发, 2016, **6**(6): 55-60, 74.
Zhao L Q, Wang C L, Yuan X F, et al. Barium sulphate blockage development of high temperature resistant and its performance evaluation[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2016, **6**(6): 55-60, 74.

[66] Li Q, Fan Z Z, Liu Q W, et al, et al. Optimization and field test of a chelating acid system for scaled gas wells in the Hechuan gas field[J]. Energies, 2021, **14**(23): 7959.

[67] Almubarak T, Ng J H, Nasr-El-Din H. Chelating agents in productivity enhancement: a review[C]//SPE Oklahoma City Oil and Gas Symposium. Oklahoma City: Society of Petroleum Engineers, 2017: SPE 185097-MS.

[68] Hassan A, Mahmoud M, Bageri B S, et al. Applications of chelating agents in the upstream oil and gas industry: a review[J]. Energy & Fuels, 2020, **34**(12): 15593-15613.

[69] Mahmoud M A A, Nasr-El-Din H A A, De Wolf C A A, et al. Evaluation of a new environmentally friendly chelating agent for high-temperature applications[J]. SPE Journal, 2011, **16**(3): 559-574.

[70] 周大吉. 西藏羊八井地热发电站的运行、问题及对策[J]. 电力建设, 2003, **24**(10): 1-3, 9.
Zhou D J. Operation, problems and countermeasures of yangbajing geothermal power station in Tibet[J]. Electric Power Construction, 2003, **24**(10): 1-3, 9.

[71] 杨东方, 唐令龙. 西藏地热井除垢[J]. 四川电力技术, 1995, (4): 8-10, 51.
Yang D F, Tang L L. Scales removal of geothermal well in Xizang [J]. Sichuan Electric Power Technology, 1995, (4): 8-10, 51.

[72] 朱保磊. 川西康定DZK02地热井结垢与堵塞过程数值模拟研究[D]. 长春: 吉林大学, 2025.
Zhu B L. Numerical simulation study on scaling and blockage processes in the DZK02 geothermal well in Kangding, western Sichuan[D]. Changchun: Jilin University, 2025.

[73] 李义曼, 庞忠和. 地热系统碳酸钙垢形成原因及定量化评价[J]. 新能源进展, 2018, **6**(4): 274-281.
Li Y M, Pang Z H. Carbonate calcium scale formation and quantitative assessment in geothermal system[J]. Advances in New and Renewable Enengy, 2018, **6**(4): 274-281.

[74] Li Y M, Pang Z H, Galeczka I M. Quantitative assessment of calcite scaling of a high temperature geothermal well in the Kangding geothermal field of Eastern Himalayan Syntax[J]. Geothermics, 2020, **87**: 101844.

[75] Deutscher S B, Ross D M, Quong R, et al. Studies of the dissolution of geothermal scale[R]. Livermore: Lawrence Livermore Laboratory, 1980.

[76] Li L, Nasr-El-Din H A, Chang F F, et al. Reaction of simple organic acids and chelating agents with calcite[C]//IPTC 2008: International Petroleum Technology Conference. European Association of Geoscientists & Engineers, 2008.

[77] Man M S, Aziz H A, Abdullah S B. Application of ILs as carbonate scales dissolver[J]. Current Research in Green and Sustainable Chemistry, 2022, **5**: 100277.

[78] Kamal M S, Hussein I, Mahmoud M, et al. Oilfield scale formation and chemical removal: a review[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, **171**: 127-139.

[79] Harris F N. Applications of acetic acid to well completion, stimulation and reconditioning[J]. Journal of Petroleum Technology, 1961, **13**(7): 637-639.

[80] Alhamad L, Alrashed A, Al Munif E, et al. Organic acids for stimulation purposes: a review[J]. SPE Production & Operations, 2020, **35**(4): 952-978.

[81] Malik A, González-Gutiérrez A G, Calderón-Anaya I L, et al. Evaluation of an organic acid descaling solution for removal calcareous scales on pipelines[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2023, **27**(11): 3119-3128.

[82] Tyler T N, Metzger R R, Twyford L R. Analysis and treatment of formation damage at Prudhoe Bay, Alaska[J]. Journal of Petroleum Technology, 1985, **37**(6): 1010-1018.

[83] Fredd C N, Fogler H S. Alternative stimulation fluids and their impact on carbonate acidizing[J]. SPE Journal, 1998, **3**(1): 34-41.

[84] Fredd C N, Fogler H S. Influence of transport and reaction on wormhole formation in porous media[J]. AIChE Journal, 1998, **44**(9): 1933-1949.

[85] LePage J N N, De Wolf C A A, Bemelaar J H H, et al. An environmentally friendly stimulation fluid for high-temperature applications[J]. SPE Journal, 2011, **16**(1): 104-110.

[86] Frenier W W, Fredd C N, Chang F. Hydroxyaminocarboxylic acids produce superior formulations for matrix stimulation of carbonates at high temperatures[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans: Society of Petroleum Engineers, 2001: SPE 71696-MS.

[87] Xu T F, Rose P, Fayer S, et al. Numerical simulation study of silica and calcite dissolution around a geothermal well by injecting high pH solutions with chelating agent[R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009.

[88] Bageri B S, Mahmoud M A, Shawabkeh R A, et al. Toward a complete removal of barite (barium sulfate $BaSO_4$) scale using chelating agents and catalysts[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2017, **42**(4): 1667-1674.

[89] de Pasquali D C, Horai E, Real M I, et al. Chemical dissolution of oilfield strontium sulfate ($SrSO_4$) scale by chelating agents[J]. Applied Geochemistry, 2019, **106**: 134-141.

[90] Hou J, Huang T, Chen T, et al. An efficient chelator-MGDA to remove calcium sulfate scales in oil production systems[C]//Middle East Oil, Gas and Geosciences Show (MEOS GEO). Manama: Society of Petroleum Engineers, 2025: SPE 227843-MS.

[91] Gamal H, Al-Afnan S, Elkatatny S, et al. Barium sulfate scale removal at low-temperature[J]. Geofluids, 2021, **2021**: 5527818.

[92] Alissa F M, Aljuryyed N W, Balharth S A, et al. Calcium sulfate scale dissolution efficiency by various chemicals additives[C]//SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control. Lafayette: Society of Petroleum Engineers, 2022: SPE 208819-MS.

[93] McCartney T R, Gharaibeh S, Shank R. Improved methods for removal of silicate deposits[C]//Heat Exchanger Fouling and Cleaning – 2017. 2017.

[94] Gharaibeh S A, McCartney T R, Shank R A. A novel non-toxic method for the decontamination of silicate scales-a case study[C]//CORROSION 2017. New Orleans: NACE International, 2017: NACE-2017-9087.

[95] 王继刚, 刘浪, 谢成靓, 等. 注水井固体溶垢剂的研究及应用[J]. 化学工程师, 2018, **32**(5): 55-57.
Wang J G, Liu L, Xie C L, et al. Study and application of solid dissolving agent in water injection well[J]. Chemical Engineer,

2018, **32**(5): 55−57.

[96] 洪广福, 闫江涛, 陈铁, 等. 油田结垢和化学除垢剂的应用[J]. 当代化工, 2021, **50**(10): 2501−2504.
Hong G F, Yan J T, Chen T, et al. Application of scale formation and Chemical scale remover in Oil Field[J]. Contemporary Chemical Industry, 2021, **50**(10): 2501−2504.

[97] 李亚鹏. 高效油气田无机堵塞物溶垢剂的研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2024.
Li Y P. Research on high efficiency oil and gas field inorganic clogging material scale dissolver[D]. Xi′an: Xi′an Shiyou University, 2024.

[98] 王建峰, 路以文, 邢钰, 等. 塔河油田成垢机理分析及复合除垢剂研究[J]. 断块油气田, 2018, **25**(1): 102−106.
Wang J F, Lu Y W, Xing Y, et al. Mechanism analysis of scale formation and study on compound descaling agent for Tarim River Oilfield[J]. Fault−Block Oil & Gas Field, 2018, **25**(1): 102−106.

[99] 袁秀妮, 徐自强, 赵敏, 等. 硫酸钡/锶垢除垢剂配方优化及性能评价[J]. 油田化学, 2023, **40**(4): 704−708, 715.
Yuan X N, Xu Z Q, Zhao M, et al. Formulation optimization and performance evaluation of barium sulfate/strontium scale remover [J]. Oilfield Chemistry, 2023, **40**(4): 704−708, 715.

[100] Gamal H, Elkatatny S, Al−Afnan S, et al. Development of a unique organic acid solution for removing composite field scales [J]. ACS Omega, 2021, **6**(2): 1205−1215.