

油气钻井堵漏材料研究现状

邢博冉 阮佳慧 唐 剑 徐梓翔 胡俊杰
姚 杨 卢 明 王 婷 刘鑫易 王永伦

重庆科技大学, 重庆

摘要 | 随着油气勘探开发向深部地层和复杂地质区域不断推进, 钻井过程中的井漏问题愈发突出。井漏不仅导致钻井成本增加、钻井周期延长, 还可能引发一系列安全隐患和环境问题。堵漏材料作为解决井漏问题的关键要素, 其性能和适用性直接影响着堵漏效果和钻井作业的顺利进行。本文全面且深入地综述了油气钻井堵漏材料的研究现状, 系统分析了各类堵漏材料的特性、堵漏机理、应用场景以及研究进展, 旨在为堵漏材料的进一步研发和优化提供理论参考, 推动油气钻井堵漏技术的发展。

关键词 | 油气钻井; 堵漏材料; 研究现状; 堵漏机理

Copyright © 2025 by author (s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



在油气钻井作业中, 井漏是极为常见且棘手的复杂问题之一。当钻井液的液柱压力大于地层的承压能力时, 钻井液就会流入地层孔隙、裂缝或溶洞中, 从而引发井漏。井漏问题会导致钻井液大量损耗, 增加钻井成本; 可能引起井壁失稳, 诱发卡钻等事故; 还可能对地层造成污染, 破坏油气储层。随着油气

通讯作者: 邢博冉, 重庆科技大学, 研究方向: 油气田方向。

文章引用: 邢博冉, 阮佳慧, 唐剑, 等. 油气钻井堵漏材料研究现状 [J]. 环境与资源, 2025, 7 (1): 57-68.

<https://doi.org/10.35534/er.0701005>

勘探开发逐渐向深层、超深层以及海上等复杂区域拓展，地层条件愈发复杂，井漏问题的发生频率和严重程度也在不断增加。因此，研发高效、可靠的堵漏材料，提高井漏防治能力，对于保障油气钻井作业的安全、高效进行具有至关重要的意义。

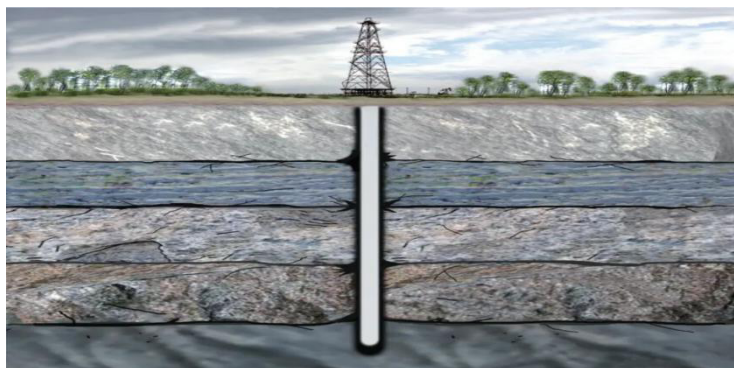


图1 钻井液流入地层

Figure 1 Drilling fluid flows into the formation

1 堵漏材料分类及特点

1.1 可固化堵漏材料

(1) 水泥堵漏材料

水泥堵漏材料是一种应用广泛的固化堵漏材料，其主要成分包括硅酸盐水泥、铝酸盐水泥等。水泥堵漏的原理是通过水泥浆在漏失通道内的扩散、填充和凝固，形成一个坚固的封堵体，从而阻止钻井液的进一步漏失。水泥堵漏材料具有抗压强度高、耐高温、耐久性好等优点，能够有效应对高渗透性砂岩地层和溶洞型储层的严重漏失问题。例如，在处理高渗透性砂岩地层漏失时，水泥浆能够在压差作用下迅速进入地层孔隙，凝固后形成高强度的封堵层，提高地层的承压能力。为了改善水泥堵漏材料的性能，常添加一些外加剂，如膨润土、颗粒堵漏材料（碳酸钙）、纤维类堵漏材料等。膨润土可以增加水泥浆的黏度和悬浮性，防止水泥颗粒沉淀；碳酸钙能够调节水泥浆的凝结时间和强度；纤维类堵漏材料则可以增强封堵体的韧性，防止裂缝再次张开。近年来，

研究人员还开发出了一些新型水泥堵漏材料，如水性环氧树脂与超细普通硅酸盐水泥—硫酸铝酸盐水泥共混的复合材料，该材料具有快速填充、低渗透封堵的特点，适用于固体漏失和泥层裂缝漏失等情况。

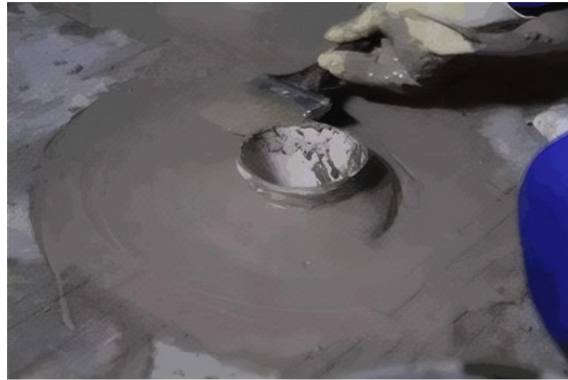


图2 水泥堵漏材料

Figure 2 Cement plugging materials

(2) 交联体系堵漏材料

交联体系堵漏材料主要是通过聚合物分子之间的交联反应形成三维网络结构，从而实现对漏失通道的封堵。常见的交联体系堵漏材料有聚丙烯酰胺凝胶、聚乙烯醇凝胶等。这类堵漏材料具有以下特点：一是形状可控，能够根据漏失通道的形状和大小进行自适应填充；二是成胶时间可调，可以根据实际需求，通过调整交联剂的种类和用量来控制成胶时间，确保堵漏材料在到达漏失位置后才发生交联固化；三是裂缝中滞留时间长，由于其形成的三维网络结构具有较强的吸附性和稳定性，能够在裂缝中长时间停留，有效防止二次漏失。交联体系堵漏材料适用于封堵细微孔缝漏失，在低渗透地层和裂缝性地层中具有较好的应用效果。然而，其也存在一些不足之处，如抗温抗盐性能有限，在高温、高盐地层中，交联体系可能会发生降解或破坏，导致堵漏效果下降。

1.2 常规化堵漏材料 (LCMs)

(1) 颗粒LCMs堵漏材料

颗粒LCMs堵漏材料是由各种不同形状和尺寸的颗粒组成，常见的有碳酸

钙、核桃壳、云母片、橡胶颗粒等。其堵漏机理是基于架桥和填充作用，当堵漏材料随钻井液进入漏失通道时，较大颗粒首先在漏失通道入口处发生架桥，形成初步的阻挡层，随后较小颗粒在压差作用下填充到架桥颗粒之间的空隙中，逐渐形成密实的封堵层，从而阻止钻井液的漏失。颗粒LCMs堵漏材料具有来源广泛、成本较低、使用方便等优点，在钻井堵漏中应用较为普遍。不同形状和尺寸的颗粒适用于不同类型的漏失通道，例如，片状的云母片适用于封堵宽度较大的裂缝；球形的碳酸钙颗粒则在填充孔隙型漏失通道时效果较好。但该类材料也存在一些问题，如颗粒与漏失通道尺寸的匹配性要求较高，如果颗粒尺寸选择不当，可能导致封堵效果不佳；此外，在裂缝宽度较大或流速较高的情况下，颗粒容易被冲走，造成二次漏失。

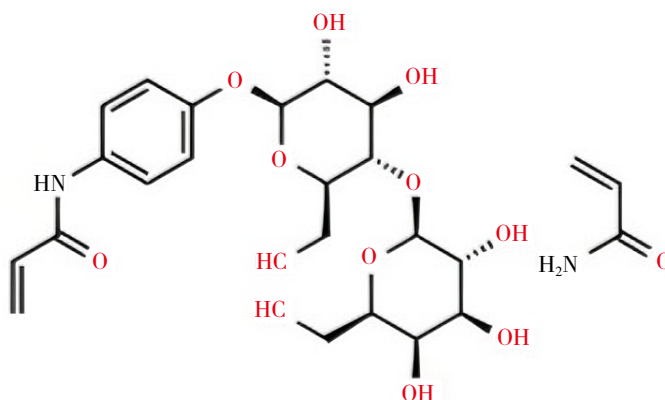


图 3 聚丙烯酰胺分子式

Figure 3 Molecular formula of polyacrylamide

(2) 纤维类堵漏材料

纤维类堵漏材料主要包括植物纤维（如棉籽壳、锯末等）、矿物纤维（如石棉、玻璃纤维等）和合成纤维（如聚丙烯纤维、芳纶纤维等）。纤维类堵漏材料的堵漏原理是利用纤维的柔韧性和相互交织的特性，在漏失通道内形成三维网状结构，从而阻止钻井液的漏失。纤维类堵漏材料具有以下优点：一是能够有效增加封堵层的强度和韧性，防止封堵层在压力作用下破裂；二是对不规则形状和大小的漏失通道具有较好的适应性，能够在复杂的漏失环境中发挥作

用；三是可以与颗粒类堵漏材料配合使用，形成协同堵漏效应，提高堵漏效果。在处理天然裂缝型地层漏失时，纤维类堵漏材料能够深入裂缝内部，与裂缝壁面紧密结合，形成稳定的封堵结构。然而，部分纤维类堵漏材料存在一些局限性，如石棉纤维对人体健康有害，使用时需要采取严格的防护措施；植物纤维在高温、高湿环境下容易发生分解，影响堵漏效果。

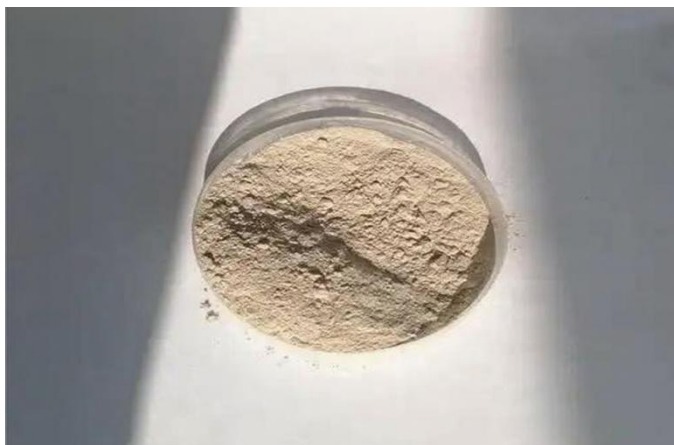


图 4 纤维类材料堵漏剂

Figure 4 Fiber material plugging agent

1.3 可固化和 LCMs 混合体堵漏材料

可固化和 LCMs 混合体堵漏材料是将可固化堵漏材料和常规化堵漏材料（LCMs）按照一定比例混合而成的一种新型堵漏材料。这种混合体堵漏材料综合了两者的优点，既具有可固化堵漏材料的高强度和耐久性，又具有 LCMs 的快速封堵和适应性强的特点。例如，将水泥与颗粒 LCMs 混合，可以在保证封堵强度的同时，利用颗粒的架桥作用快速形成初步封堵，提高堵漏效率；将交联体系堵漏材料与纤维类堵漏材料混合，则可以增强封堵层的柔韧性和稳定性，防止裂缝再次张开。可固化和 LCMs 混合体堵漏材料适用于处理各种复杂的漏失情况，特别是在溶洞型地层和大裂缝地层漏失中，具有较高的堵漏成功率。其性能受到混合比例、材料粒径分布、固化条件等多种因素的影响，需要根据具体的漏失情况进行优化设计。

2 堵漏材料的堵漏机理

(1) 物理封堵机理

物理封堵是堵漏材料最常见的堵漏方式之一，主要通过填充、架桥、吸附等物理作用来实现对漏失通道的封堵。对于颗粒LCMs堵漏材料，当颗粒随钻井液进入漏失通道时，首先较大粒径的颗粒会在漏失通道的狭窄部位或入口处发生架桥，形成初始的阻挡结构。随着更多颗粒的堆积，架桥结构逐渐稳定，并在压差作用下，较小粒径的颗粒不断填充到架桥颗粒之间的空隙中，使封堵层逐渐密实，最终阻止钻井液的通过。纤维类堵漏材料则是利用纤维的长径比大、柔韧性好的特点，在漏失通道内相互交织、缠绕，形成三维网状结构，从而增加流体流动的阻力，实现堵漏。此外，一些具有较大比表面积的堵漏材料，如纳米材料、膨润土等，还可以通过吸附作用附着在漏失通道壁面上，进一步增强封堵效果。



图5 钻井示意图

Figure 5 Drilling schematic diagram

(2) 化学固化机理

化学固化机理主要适用于可固化堵漏材料，如水泥、交联体系堵漏材料等。以水泥为例，水泥中的主要成分（如硅酸三钙、硅酸二钙等）与水发生水化反应，生成一系列水化产物，如氢氧化钙、水化硅酸钙等。这些水化产物逐

渐结晶、硬化，形成具有一定强度的固体结构，从而实现了对漏失通道的封堵。交联体系堵漏材料则是通过聚合物分子之间的交联反应，形成三维网络结构。在交联过程中，交联剂与聚合物分子链上的活性基团发生化学反应，将分子链连接在一起，使聚合物从线性结构转变为体型结构，从而固化成型，封堵漏失通道。化学固化过程通常受到温度、压力、固化剂浓度等因素的影响，合理控制这些因素可以确保堵漏材料在合适的时间和位置固化，达到最佳的堵漏效果。

（3）膨胀封堵机理

膨胀封堵机理是指堵漏材料在进入漏失通道后，能够吸收周围介质中的水分或与其他物质发生反应，从而发生体积膨胀，填充漏失通道并产生较大的挤压力，实现对漏失通道的有效封堵。一些膨胀类堵漏材料，如橡胶颗粒、吸水树脂等，具有特殊的分子结构，在接触到钻井液或地层水后，分子链会发生伸展，导致材料体积膨胀。膨胀后的堵漏材料能够紧密贴合漏失通道壁面，形成密封良好的封堵层，有效阻止钻井液的漏失。膨胀封堵机理适用于处理裂缝宽度变化较大或存在不规则孔隙的漏失地层，能够适应不同的漏失情况，提高堵漏的可靠性。

3 堵漏材料的应用现状

3.1 不同地层漏失的堵漏材料选择

在油气钻井过程中，不同类型的地层漏失需要选择合适的堵漏材料来进行处理。对于高渗透孔隙型地层漏失，由于漏失通道主要为孔隙，孔隙尺寸相对较小且分布较为均匀，水泥堵漏材料因其能够形成高强度的封堵体，填充孔隙并提高地层承压能力，成为常用的选择，堵漏成功率较高，可达90%以上。在处理溶洞型地层漏失时，由于溶洞空间较大，常规的堵漏材料难以形成有效的封堵，可固化和LCMs混合堵漏材料则显示出优势。通过将可固化材料（如水泥）与颗粒、纤维等LCMs材料混合使用，利用可固化材料的固化特性和LCMs材料的填充、架桥作用，可以对溶洞进行有效封堵，堵漏成功率可达85%左右。

天然裂缝型地层漏失的裂缝宽度和长度不一，纤维类堵漏材料能够深入裂缝内部，与裂缝壁面紧密结合，形成稳定的封堵结构，适用于此类漏失情况，堵漏成功率一般在70%~80%之间。诱导裂缝型漏失是由于井底压力超过地层破裂压力而产生的裂缝漏失，颗粒LCMs堵漏材料可以在裂缝中快速架桥和填充，阻止钻井液的进一步漏失，具有较好的应用效果，堵漏成功率约为75%。

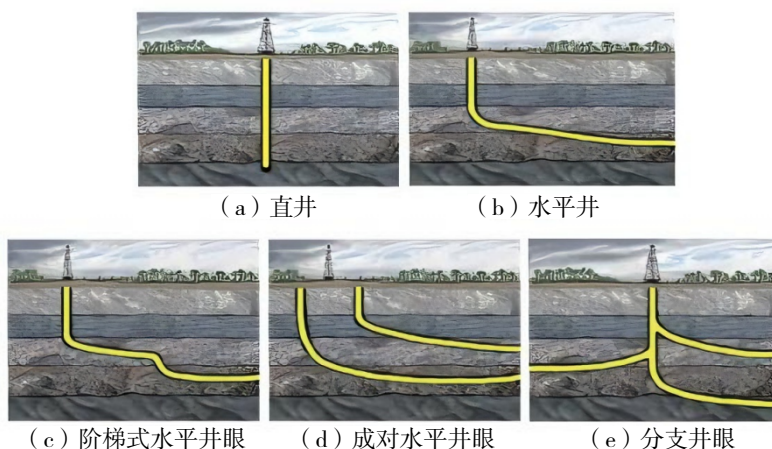


图6 常见井型

Figure 6 Common well types

3.2 国内外堵漏材料的应用案例

在国外，许多石油公司在复杂地层的钻井作业中应用了各种新型堵漏材料，并取得了良好的效果。例如，贝克休斯公司研发的氧化镁基触变性无机凝胶堵漏材料MAX-LOCK，在中东碳酸盐岩恶性漏失井的堵漏作业中，通过优化凝胶的凝结时间，使其能够适应不同的地层条件，成功解决了该地区的井漏难题，提高了钻井作业的效率 and 安全性。在国内，各大油田也在不断探索和应用新型堵漏材料。南海西部莺歌海盆地X构造地层温度高、压力系数大、承压能力低，钻井过程中极易发生恶性井漏。采用“试挤清洗液+注挤水泥浆”间歇式挤水泥工艺，利用水泥堵漏材料的高强度和耐久性，进行高承压堵漏10余井次，堵漏成功率达到100%，保障了该地区超高温、高压井段地层的安全顺利钻进。此外，涪陵地区页岩气井在钻井过程中遇到了裂缝性漏失问题，通过应用

与油气钻井液具有较好匹配性的复合堵漏材料（微纳米尺度可变形球形凝胶与云母片、纤维等材料复合），成功解决了井漏问题，取得了较好的堵漏效果，提高了页岩气的开采效率。

4 研究进展与发展趋势

（1）新型堵漏材料的研发

随着油气勘探开发的不断深入，对堵漏材料的性能要求也越来越高。近年来，研究人员致力于开发新型堵漏材料，以满足复杂地层钻井的需求。例如，纳米材料因其独特的物理化学性质，如高比表面积、小尺寸效应等，在堵漏材料领域展现出了巨大的应用潜力。将纳米粒子（如纳米二氧化硅、纳米碳酸钙等）添加到传统堵漏材料中，可以改善材料的性能，如提高封堵强度、增强抗温抗盐性能等。一些智能型堵漏材料也逐渐成为研究热点，这类材料能够根据地层环境的变化（如温度、压力、pH值等）自动调节自身性能，实现更加精准和高效的堵漏。形状记忆材料在受到外界刺激（如温度、磁场等）时能够恢复到预先设定的形状，利用这一特性开发的形状记忆堵漏材料，可以在特定条件下变形并填充漏失通道，提高堵漏效果。

（2）堵漏材料性能优化

为了提高堵漏材料的性能，研究人员从多个方面进行了优化。在材料配方优化方面，通过调整不同成分的比例和种类，改善堵漏材料的综合性能。例如，在水泥堵漏材料中，合理调整水泥、外加剂和掺合料的比例，可以提高水泥浆的流动性、凝结时间和抗压强度。在制备工艺改进方面，采用先进的制备技术，如纳米技术、微胶囊技术等，提高堵漏材料的质量和性能。纳米技术可以制备出粒径均匀、性能稳定的纳米堵漏材料；微胶囊技术则可以将活性成分包裹在微胶囊中，实现对堵漏材料性能的精准控制，如控制固化时间、释放活性物质等。此外，表面改性技术也被广泛应用于堵漏材料的性能优化，通过对堵漏材料表面进行改性，提高其与钻井液和地层的相容性，增强封堵效果。

（3）发展趋势

未来，油气钻井堵漏材料的发展趋势主要体现在以下几个方面。一是向高

性能、多功能方向发展，研发具有更高抗压强度、抗温抗盐性能、良好柔韧性和自修复能力的堵漏材料，以适应复杂多变的地层条件。二是注重环保和可持续性，开发环境友好型堵漏材料，减少对地层和环境的污染，同时降低材料成本，提高资源利用率。三是加强堵漏材料与堵漏工艺的协同研究，根据不同的漏失情况，优化堵漏材料的选择和使用方法，结合先进的堵漏工艺，提高堵漏成功率和效率。四是借助先进的测试技术和模拟软件，深入研究堵漏材料的堵漏机理和性能影响因素，为堵漏材料的研发和应用提供更加科学的理论依据。

	单位	石油储量	石油产量	石油销量	单位	石油销售收入	单位	石油实现价格	石油成本	生产操作成本	折旧费
中国海油	百万桶	4, 842	519	515	人民币百万元	282, 377	美元/桶	78	29	8	14
中国石油	百万桶	6, 219	937	1, 099	人民币百万元	592, 668	美元/桶	77	41	12	
中国石化	百万桶	2, 003	281	248	人民币百万元	131, 740	美元/桶	76	53	15	
沙特阿美	百万桶	191, 349			人民币百万元		美元/桶	84	20	3	6
西方石油	百万桶	1, 940		213	人民币百万元	115, 238	美元/桶	77	34	13	14
美国石油	百万桶	3, 321	366	366	人民币百万元	186, 781	美元/桶	73	25	6	
埃克森美孚	百万桶	6, 847	594	594	人民币百万元	325, 963	美元/桶	78	31	12	
戴文能源	百万桶	786	117	117	人民币百万元	62, 476	美元/桶	76	24	6	10
康菲石油	百万桶	3, 121	342	349	人民币百万元	189, 707	美元/桶	77	29	12	14
雪佛龙	百万桶	4, 179	546		人民币百万元		美元/桶				10
西诺沃斯	百万桶		222		人民币百万元		美元/桶				
中曼石油	百万桶	865	5	4	人民币百万元	2, 069	美元/桶	67	18	12	6

图 7 未来堵漏材料发展趋势

Figure 7 Future development trend of plugging materials

5 结论

油气钻井堵漏材料在解决井漏问题、保障钻井作业顺利进行方面发挥着关键作用。目前，已开发出多种类型的堵漏材料，包括可固化堵漏材料、常规化堵漏材料和可固化和LCMs混合体堵漏材料等，它们各自具有独特的特性、堵漏机理和应用场景。在实际应用中，需要根据不同的地层漏失情况，合理选择堵漏材料，并结合先进的堵漏工艺，以提高堵漏效果。随着油气勘探开发的不断发展，对堵漏材料的性能要求也越来越高。未来，堵漏材料的研究将朝着新型材料研发、性能优化、环保可持续，以及与堵漏工艺协同发展的方向前进。通过不断的技术创新和研究突破，有望开发出更加高效、可靠、环保的堵漏材料，为油气钻井行业的发展提供强有力的支持。然而，目前堵漏材料的研究仍存在一些不足之处，如部分材料在极端环境下的性能稳定性有待提高、堵漏材

料的评价方法和标准不够统一等，这些问题需要在的研究中进一步深入探讨今后和解决。

参考文献

- [1] WHITE S R, SOTTOS N R, GEUBELLE P H, et al. Autonomic healing of polymer composites [J]. *Nature*, 2001, 409 (6822): 794–797.
- [2] BLASSIZIK B J, KRAMER S L B, OLUGEBEFOLA S C, et al. Self-healing polymers and composites [J]. *Annual Review of Materials Research*, 2010 (40): 179–211.
- [3] 李全, 张伟, 王磊, 等. 动态共价键自修复材料的研究进展 [J]. *高分子学报*, 2023, 54 (6): 721–733.
- [4] JONKERS H M, SCHLANGEN E. Development of bacteria-based self-healing concrete [J]. *Ecological Engineering*, 2019 (129): 1–7.
- [5] CHEN X, DAM M A, ONO K, et al. A thermally re-mendable cross-linked polymeric material [J]. *Science*, 2002, 295 (5560): 1698–1702.
- [6] 邢博冉, 唐剑, 阮佳慧, 等. 微纳米容器型自修复防腐涂层研究进展 [J]. *材料工程*, 2024, 52 (3): 15–26.

Research Status of Plugging Materials for Oil and Gas Drilling

Xing Boran Ruan Jiahui Tang Jian Xu Zixiang Hu Junjie
Yao Yang Lu Ming Wang Ting Liu Xinyi Wang Yonglun

Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Abstract: As oil and gas exploration and development continue to advance into deep formations and complex geological areas, the problem of lost circulation during drilling has become increasingly prominent. Lost circulation not only increases drilling costs and extends drilling cycles, but may also cause a series of safety hazards and environmental problems. As a key factor in solving lost circulation problems, lost circulation materials have a direct impact on the lost circulation effect and the smooth progress of drilling operations. This paper comprehensively and in-depth reviews the research status of lost circulation materials for oil and gas drilling, and systematically analyzes the characteristics, lost circulation mechanisms, application scenarios and research progress of various lost circulation materials, aiming to provide theoretical reference for further development and optimization of lost circulation materials. Promote the development of lost circulation technology for oil and gas drilling.

Key words: Oil and gas drilling; Plugging materials; Research status; Plugging mechanism