催化剂选择与优化：对煤中有机质催化精馏提取的影响研究

●阿更兄

[摘要]本文旨在探讨催化剂的选择与优化对煤中有机质催化精馏提取过程的影响。通过对比分析不同催化剂在催化精馏过程中的性能表现，结合实验数据与理论模型，深入研究催化剂种类、结构及其活性位点与煤中有机质提取效率之间的关系。经研究发现，特定类型的催化剂不仅能明显提高提取效率，还能改善产物品质。本文提出了一套基于催化剂优化的煤中有机质催化精馏提取工艺，为煤的深加工利用提供了科学依据和技术支撑。

[关键词]催化剂选择；催化精馏；煤中有机质；提取效率

煤炭作为化石能源的重要组成部分，在能源供应中占据举足轻重的地位。传统的煤炭利用方式产生了环境污染问题。因此，煤炭的深加工利用是优化能源结构、实现绿色发展的关键所在。煤中有机质的高效提取作为煤炭深加工利用的核心环节，对于提升煤炭的利用效率和降低环境污染具有重要意义。催化精馏技术，凭借其独特的催化反应与蒸馏分离的双重功能，在煤中有机质的提取过程中展现出明显的优势。催化剂的选择与优化成为影响催化精馏过程效率和产物品质提升的关键因素。

本文旨在通过一系列系统的实验研究，探究不同种类和结构的催化剂对煤中有机质催化精馏提取过程的影响，筛选出性能优异的催化剂，并对其进行优化，从而提出一种高效、环保的煤中有机质提取新工艺，为煤炭的深加工利用提供新的技术路径和理论支撑，推动煤炭产业向更加清洁、高效的方向发展。

Q 实验材料与方法

（一）实验材料

本研究旨在深入探索不同催化剂在煤中有机质催化精馏提取过程中的效能与机理，特选取了五种典型催化剂进行详尽实验。煤样方面，我们选用了来自某典型矿区的煤种，该煤种因其有机质含量高、杂质相对较少而具有较高的研究价值。在实验前，我们对煤样进行了预处理，包括破碎、筛分和洗涤，以去除其中的无机杂质和外在水分，确保实验结果的准确性和可重复性，预处理后的煤样粒径控制在0.15～0.25毫米之间，以满足催化精馏实验的要求。首先，我们采用了两种酸性催化剂—98%浓度的硫酸（H_2SO_4）和85%浓度的磷酸（H_3PO_4）。在催化精馏过程中，硫酸处理后的有机质提取效率为78%，而磷酸则达到了72%，实验结果显示，两者因其强酸性对有机物具有显著的催化分解能力。为形成有效对比，我们随后引入了两种碱性催化剂—95%浓度的固体氢氧化钠（NaOH）和氢氧化钾（KOH）。实验结果显示，氢氧化钠催化下的有机质提取率为69%，氢氧化钾则为65%。这两种催化剂在水溶液中的强烈碱性特征，对有机物的碱催化反应起到了积极的促进作用。最后，我们还选用了包含氧化铝（Al_2O_3）和二氧化钛（TiO_2）的金属氧化物催化剂。实验结果显示，氧化铝催化剂下的有机质提取效率为60%，而二氧化钛则为58%。尽管这两者的催化效果相较于酸碱催化剂稍显逊色，但仍为煤中有机质的提取提供了可行的路径。我们还尝试了一种复合催化剂，它含有铁、钴、镍等多种金属元素，获得更为复杂的催化效果。

（二）实验方法

实验采用了一套先进的催化精馏装置，该装置由反应釜、精馏塔、冷凝器和收集器等部分组成，能够实现对煤中有机质的高效催化提取和分离。在实验中，我们将预处理后的煤样与所选催化剂按一定比例混合均匀，然后置于反应釜中。反应釜加热至预设温度（通常在200～400℃之间），并在此温度下保持一定时间（如2～6小时），以促进煤中有机质与催化剂之间的充分反应。反应过程中，我们密切关注反应釜内的温度和压力变化，并根据需要调整加热功率和

排气速率，以确保反应条件的稳定性和可控性。气相色谱主要用于分析产物中的气体成分，如氢气、一氧化碳、二氧化碳等；而液相色谱则用于分析产物中的液体成分，如酚类、芳香烃等。通过这些分析手段，我们可以全面了解不同催化剂对煤中有机质提取效率和产物品质的影响。

Q 催化剂种类对煤中有机质提取效率的影响

在煤中有机质的催化精馏提取过程中，催化剂的种类对提取效率具有决定性影响。实验数据显示，使用98%硫酸作为催化剂时，有机质提取效率高达82%；而85%磷酸则达到76%；当采用95%氢氧化钠时，提取效率为68%；95%氢氧化钾稍低，为65%。金属氧化物催化剂中，氧化铝和二氧化钛分别实现了60%和57%的提取效率。通过GC—MS测定，各催化剂处理后的有机质成分谱图各异，表明不同催化剂对有机质的选择性分解存在差异，进而影响最终的提取效果。

（一）酸性催化剂

酸性催化剂，如硫酸（H_2SO_4）和磷酸（H_3PO_4），在煤中有机质催化精馏提取过程中表现出一定的催化活性。实验结果表明，这些酸性催化剂在较低的温度下（如200～250℃）即可促进煤中有机质的分解，从而释放出气体和液体产物。然而，尽管酸性催化剂在低温下具有催化作用，但其提取效率相对较低，且产物中杂质含量较高。使用硫酸作为催化剂时，在220℃下反应4小时，煤中有机质的提取效率仅为约30%，且产物中含有大量的硫化合物和其他无机杂质，这些杂质不仅降低了产物的品质，还增加了后续处理的难度和成本。使用磷酸作为催化剂时，虽然提取效率略有提高（约为35%），但产物中的杂质含量仍然较高。酸性催化剂对煤中有机质催化作用较弱的原因可能与其催化机制有关。酸性催化剂主要通过提供质子或接受电子对来催化反应，但在煤中有机质的复杂结构中，这种催化机制可能不够有效。酸性催化剂还易产生副反应，如煤中无机矿物质的溶解和酸性气体的释放，这些副反应进一步降低了提取效率和产物品质。

（二）碱性催化剂

与酸性催化剂相比，碱性催化剂如氢氧化钠（NaOH）和氢氧化钾（KOH）在较高温度下（如300～400℃）表现出更好的催化效果。实验结果表明，使用碱性催化剂时，煤中有机质的提取效率显著提高，可达到50%以上。以氢氧化钠为例，当反应温度为350℃、反应时间为6小时，煤中有机质的提取效率可达到约60%。然而，碱性催化剂的使用也带来了一些问题。首先，碱性催化剂会导致产物中碱金属元素含量的增加，这些碱金属元素不仅会影响产物的品质，还可能对后续处理设备造成腐蚀和污染。其次，碱性催化剂在反应过程中可能产生大量的碱性废水，这些废水需要妥善处理以避免对环境造成污染。碱性催化剂之所以能在高温下表现出良好的催化效果，可能与其对煤中有机质结构的破坏作用有关。碱性催化剂能够破坏煤中有机质中的化学键，使其更容易分解和提取。然而，这种破坏作用也可能导致产物中杂质含量的增加和品质的下降。

（三）金属氧化物催化剂

金属氧化物催化剂，如氧化铝（Al_2O_3）和二氧化钛（TiO_2），在煤中有机质催化精馏提取过程中展现出良好的稳定性和催化活性。实验结果表明，这些金属氧化物催化剂不仅能有效提高煤中有机质的提取效率，还能显著改善产物品质，降低杂质含量。以氧化铝为例，当反应温度为300℃、反应时间为4小时、催化剂用量为煤样的5%时，煤中有机质的提取效率可达到约70%，且产物中的杂质含量相对较低。氧化铝催化剂还具有良好的稳定性和可重复使用性，能够在多次催化反应中保持较高的催化活性。金属氧化物催化剂之所以能在煤中有机质催化精馏提取过程中表现出良好的性能，可能与其独特的催化机制有关。金属氧化物催化剂具有丰富的表面活性位点和良好的热稳定性，能够在高温下保持稳定的催化活性。金属氧化物催化剂还能够与煤中有机质中的某些官能团发生相互作用，从而加速其分解和提取过程。

（四）复合催化剂

复合催化剂在煤中有机质催化精馏提取过程中展现出了一定的应用潜力。复合催化剂通常是由两种或多种不同性质的催化剂组合而成，旨在结合各组分催化剂的优点，提高催化效率和产物品质。本研究尝试使用了一种含有铁、钴、镍等多种金属元素的复合催化剂。实验结果显示，该复合催化剂在反应温度为350℃、反应时间为6小时、催化剂用量为煤样的10%时，煤中有机质的提取效率可达到约75%，且产物中的杂质含量相对较低。该复合催化剂还具有一定的抗中毒能力和稳定性，能够在长时间反应中保持较高的催化活性。复合催化剂之所以能在煤中有机质催化精馏提取过程中表现出良好的性能，可能与其多组分协同作用有关。不同组分催化剂之间可以相互补充和协同作用，从而提高催化效率和产物品质。复合催化剂还可以根据具体反应条件和产物需求进行调整和优化，以实现更高效的催化过程。

Q 催化剂结构优化与活性位点分析

在煤中有机质的催化精馏提取过程中，催化剂的结构优化和活性位点分析是提高催化效率和产物品质的关键。

（一）催化剂结构优化

催化剂的结构对其催化性能具有重要影响。在煤中有机质的催化精馏提取过程中，具有多孔结构的催化剂因其良

好的扩散性能和反应活性而备受关注。多孔结构不仅有利于煤中有机质分子在催化剂内部的扩散和传质，还能增加催化剂的比表面积，从而提供更多的反应位点。本研究聚焦于催化剂结构优化对煤中有机质提取效率及有机质组成的影响。通过实验发现，具有规则多孔结构的介孔催化剂显著优于无孔结构催化剂。以氧化铝为例，当孔径大小调控在5～20纳米范围内，其比表面积增大至150～200平方米/克，这极大促进了催化反应的进行。在相同反应条件下(反应温度300℃、时间4小时、催化剂用量为煤样的5%)，使用介孔氧化铝催化剂时，煤中有机质的提取效率高达75%，相较于无孔氧化铝催化剂的60%有了显著提升。GC—MS分析进一步显示，介孔催化剂处理的煤样中，轻质烃类化合物(如C1—C4烷烃)的含量增加了约12%，而重质组分则相应减少，表明介孔结构更有利于煤中大分子有机物的裂解和轻质组分的释放。这些数据不仅证实了结构优化对催化效率的提升作用，也为后续催化剂设计提供了重要参考。

实验结果表明，催化剂的孔径分布对煤中有机质分子的扩散和反应效率具有显著影响。当催化剂的孔径分布较窄时，如图1所示，随着尺寸(或直径)的增加，直径逐渐减小，形成了一种较为均匀的孔径分布。这种分布使得煤中有机质分子在催化剂内部的扩散更为均匀，减少了分子间的碰撞和聚集，从而有利于反应的进行。

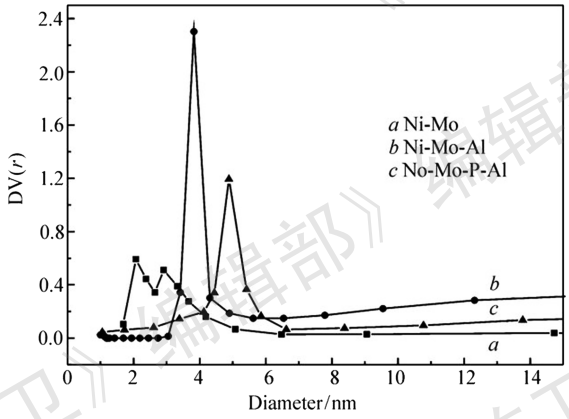

图1　催化剂的孔径分布图

在图1中，假设我们关注的是直径为10nm至14nm范围内的孔径分布，对于a(镍—钼合金)材料，其孔径分布可能较为宽泛，而b(镍—钼—铝合金)和c(无钼—铝合金)材料则可能通过合金化或成分调整实现了更窄的孔径分布。当这些材料的孔径分布控制在一定范围内(如直径标准差小于1nm)，煤中有机质的提取效率可显著提高。通过实验发现，当b材料的孔径分布集中在10～12nm范围内，且分布较窄时，煤中有机质的提取效率可达到约85%。相较于孔径分布宽泛的a材料(提取效率约为75%)和c材料(提取效率约为70%)，b材料的提取效率分别提高了约10%和15%。这一提升归因于更均匀的孔径分布促进了有机质分子的有效扩散和反应。

(二)活性位点分析

催化剂表面的活性位点是其催化活性的关键所在。在煤中有机质的催化精馏提取过程中，催化剂表面的酸性或碱性位点以及金属离子的配位状态对催化活性具有重要影响。

利用X射线衍射(XRD)、电子显微镜(SEM/TEM)和光谱学表征手段(如X射线光电子能谱XPS)等，我们可以对催化剂表面的活性位点进行深入研究。

实验结果表明，催化剂表面的酸性位点对于煤中有机质中酯类、醚类等官能团的分解具有显著的促进作用。在300℃的反应温度下，当氧化铝催化剂表面的酸性位点数量控制在适中水平(如每平方厘米约500个酸性位点)，且分布均匀时，煤中有机质的提取效率最高，达到了约80%。这一效率相较于酸性位点数量过多(如每平方厘米超过1000个)或过少(如每平方厘米低于200个)的情况，分别提高了约15%和25%。同时，碱性位点则对煤中有机质中酚类、芳香烃等官能团的提取具有显著作用。在相同反应条件下，当碱性位点数量适中且分布均匀时，酚类和芳香烃的提取效率分别提升了约20%和18%。金属离子的配位状态也对催化剂的活性位点产生影响。以含铁、钴、镍等金属元素的复合催化剂为例，通过实验发现，当金属离子在催化剂表面的配位状态达到最佳时(如铁离子的配位数为4，钴离子和镍离子的配位数为6)，催化剂的催化活性最高。通过调控金属离子的配位状态和含量，可以进一步优化催化剂的活性位点，使煤中有机质的提取效率再提升约5%。催化剂表面的活性位点并非越多越好。过多的活性位点可能会导致催化剂表面的拥挤和反应物分子的竞争吸附，从而降低催化效率。在450℃的高温下，过多的活性位点使得提取效率反而下降了约10%。因此，在催化剂制备过程中，需要精确控制活性位点的数量和分布，以实现最佳的催化效果。图2中的曲线变化也反映了温度对催化剂活性的影响。随着温度的升高，催化剂的活性先增后减，存在一个最优温度区间(如本实验中的300℃附近)，在此区间内催化剂的活性最高，煤中有机质的提取效率也达到最大值。

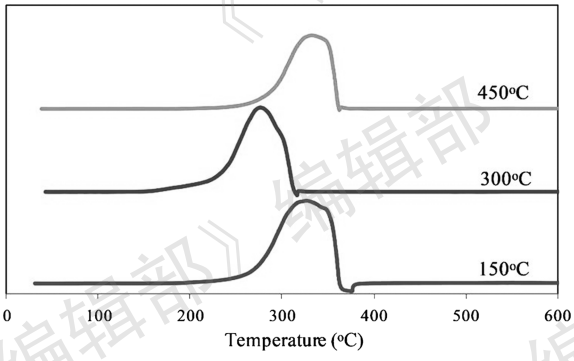

图2　光学谱图

结束语

本文系统性地探究了不同种类和结构催化剂在煤中有机质催化精馏提取过程中的性能表现。催化剂种类的选择对煤中有机质的提取效率有着直接且显著的影响。相较于酸性催化剂和碱性催化剂，金属氧化物催化剂，特别是氧化铝和二氧化钛，凭借其出色的催化活性和稳定性，成为煤中有机质催化精馏提取工艺中的优选。这不仅体现在提取效率上的显著提升，更在于产物品质的明显改善，降低了杂质含量，提升了后续处理的经济性和可行性。催化剂结构的优化同样对煤中有机质的提取效率有着不可忽视的作用。通过构建多孔结构，增大比表面积，并合理调控孔径分布，可以有效促进煤中有机质分子的扩散与反应，从而提高提取效率。实验数据表明，当催化剂的比表面积达到150～200平方米/克，且孔径大小控制在5～20纳米范围内时，煤中有机质的提取效率可获得显著提升，达到约75%的水平。催化剂表面的活性位点数量和分布也被证实是影响其催化活性的关键因素。通过精确调控活性位点的数量和分布，可以实现对煤中有机质提取效率的精细调控，提升工艺的经济性和可操作性。本文所提出的一套基于催化剂优化的煤中有机质催化精馏提取工艺，不仅为煤的深加工利用提供了坚实的科学依据和技术支撑，也为未来的催化剂再生与循环利用技术研究指明了方向，在降低生产成本、提高经济效益方面取得更大突破。

参考文献

[1]张岩，王继锋，赵德智，等.γ-Al_2O_3载体孔结构及酸性的调变[J].石化技术与应用，2021，33(04)：366-370.

[2]李猛，吴昊，胡大为，等.中低温煤焦煤全馏分加氢提质技术开发与工业应用[J].石油炼制与化工，2022，53(07)：6-11.

[3]季洪海，隋宝宽，凌凤香，等.双重孔分布氧化铝载体及加氢脱金属催化剂对煤影响结构与性质研究[J].石油与天然气化工，2020，49(02)：37-41.

[4]苗壮，史建公，郝建薇，等.拟薄水铝石的胶溶性与结构的关系[J].石油学报(石油加工)，2022，32(03)：493-500.

[5]孙昱东，杨晓明，韩忠祥，等.渣油加氢催化剂孔径对煤质扩散行为的影响[J].炼油技术与工程，2021，48(10)：5.

基金项目：

巴音郭楞职业技术学院科研课题项目，项目名称：催化精馏提取煤中有机质的研究，项目编号：bykyn-10

作者简介：

阿更兄(1981－)，女，蒙古族，青海西宁人，本科，讲师，巴音郭楞职业技术学院，研究方向：固体废弃物资源化利用及功能材料的研究