

煤自燃氧化动力学特性与临界温度参数的关联性研究

朱 简

中煤科工集团重庆研究院有限公司 重庆 400037

摘 要: 本文聚焦煤自燃氧化动力学特性与临界温度参数的关联性研究,分析了煤自燃氧化动力学特性,涵盖氧化反应过程、参数测定及影响因素;接着研究煤自燃临界温度参数,通过实验方案,探究两者关联性,结果显示氧化动力学参数与临界温度紧密相关,并建立关联性模型。实际应用方面,研究成果可指导煤矿开采设计、通风系统设计及煤堆储存管理。未来应开展多因素耦合研究,结合新兴技术优化监测预警系统,研发新型防灭火材料技术,为煤矿安全生产提供更坚实保障。

关键词: 煤自燃;氧化动力学特性;临界温度参数;关联性

1 煤自燃氧化动力学特性分析

1.1 煤自燃氧化反应过程

煤自燃是一个复杂的物理化学过程,历经吸氧、氧化、热量积聚直至自燃。吸氧阶段,煤表面与氧气接触,发生物理吸附,此过程在常温下即可进行,吸附量受煤的孔隙结构、比表面积等因素影响。随后进入化学吸附与氧化阶段,煤中的活性官能团与氧气发生化学反应,生成过氧化物等中间产物,同时释放少量热量。随着反应进行,热量逐渐积聚,当达到一定程度时,煤温升高,加速氧化反应,形成恶性循环。最终,当热量无法及时散发,煤温达到着火点,引发自燃。各阶段特点鲜明,吸氧阶段缓慢且不易察觉,氧化阶段反应逐渐加剧,热量积聚阶段是自燃的关键转折点。

1.2 氧化动力学参数测定

通过程序升温实验等方法可测定煤自燃氧化动力学参数。程序升温实验中,将煤样置于特定环境中,以一定速率升温,同时监测反应过程中的气体产物浓度、温度等参数。利用阿伦尼乌斯方程,根据不同温度下的反应速率数据,可计算出表观活化能和指前因子。表观活化能反映了反应发生的难易程度,值越大,反应越难进行;指前因子则与反应的频率因子有关,体现了分子碰撞的有效性。此外,热重分析也可用于测定相关参数,通过测量煤样质量随温度的变化,分析氧化反应的动力学特征,为深入研究煤自燃提供数据支持^[1]。

1.3 影响氧化动力学特性的因素

煤的氧化动力学特性受多种因素共同制约,其中变质程度、粒度、水分含量及氧气浓度的影响尤为突出。变质程度低的煤,其分子结构中活性官能团(如羟基、羧基等)含量较高,使得氧化反应活性增强,表观活化能降低,反应速率显著加快。粒度方面,煤的颗粒尺寸

越小,其比表面积越大,与氧气的接触面积随之增加,氧化反应更容易发生,反应速率也相应提升。水分含量对氧化过程具有双重作用:适量水分可促进氧气在煤孔隙中的扩散,加速反应进程;但若水分过多,则会占据煤的孔隙空间,阻碍氧气与煤的接触,从而抑制氧化反应。氧气浓度是影响氧化速率的关键因素,浓度越高,反应速率越快;然而,当氧气浓度达到某一临界值后,其对反应速率的提升作用逐渐减弱,此时反应速率不再随氧气浓度的增加而显著变化。

2 煤自燃临界温度参数研究

2.1 临界温度的定义与意义

煤自燃临界温度是指煤体在氧化过程中,反应从缓慢自热转变为快速升温并最终发生燃烧的关键温度节点,通常被定义为煤体氧化反应速率急剧加快、热量积聚速率显著超过散热速率的温度阈值,不同研究中临界温度的具体数值存在差异(一般为60-90℃),主要与煤的变质程度、实验条件有关。临界温度是判断煤自燃危险性的核心指标,其在煤矿安全生产中具有重要意义。从危险性评估角度,通过测定煤的临界温度,可划分煤自燃危险等级,例如临界温度低于70℃的煤属于高危险性煤,需采取更严格的防灭火措施;临界温度高于85℃的煤属于低危险性煤,可适当降低监测频率。在预防实践中,临界温度为煤自燃监测提供了明确的温度预警值,当井下煤体温度达到临界温度附近时,监测系统可及时发出预警信号,提醒工作人员采取降温、惰化等措施,防止煤体进一步升温引发自燃。此外,临界温度还是制定煤自燃防治方案的重要依据,例如在综采工作面回撤期间,基于煤的临界温度参数,可合理确定采空区遗煤的监测点位和监测周期,提高防灭火工作的针对性和有效性,减少因煤自燃引发的矿井火灾事故。

2.2 临界温度的测定方法

目前煤自燃临界温度的测定方法主要包括程序升温实验法、热重分析法(TGA)和绝热氧化法,每种方法基于不同的测试原理,适用于不同的实验条件和研究需求。程序升温实验法是最常用的测定方法,其原理是通过模拟煤在实际环境中的升温过程,记录煤样温度与反应特征参数(如气体生成速率、热释放速率)的关系,进而确定临界温度。实验时,将煤样放入程序升温反应器中,以恒定速率升温(通常为2-3℃/min),通入恒定流量的空气,利用热电偶实时监测煤样温度,同时通过气体传感器检测CO生成速率。当CO生成速率随温度升高出现突变(即生成速率急剧增加)时,对应的温度即为临界温度,该方法操作简便、成本较低,且能较好地模拟煤在矿井中的实际氧化环境,在工程实践中应用广泛。热重分析法的测定原理基于煤样在氧化过程中的质量变化,通过热重分析仪记录煤样质量随温度的变化曲线(TG曲线)和质量变化速率曲线(DTG曲线)。在低温阶段,煤样质量因吸附氧气而略有增加;当温度升高至临界温度时,煤样氧化反应加剧,质量因生成CO、CO₂等气体而快速下降,DTG曲线出现明显的峰值,峰值对应的温度即为临界温度,该方法测定精度较高,但实验成本相对较高,主要用于实验室研究。绝热氧化法通过构建绝热环境,消除煤样与外界的热量交换,使煤样氧化释放的热量全部用于自身升温,当煤样温度出现快速上升(升温速率大于1℃/min)时,对应的温度即为临界温度,该方法能最真实地反映煤自燃的热量积聚过程,但实验设备复杂,对操作要求较高,目前仅在少数高端实验室中应用^[2]。

2.3 影响临界温度的因素

煤自燃临界温度受多种内在和外在因素影响,其中煤的化学成分、粒度、水分含量及氧气浓度是最主要的影响因素,这些因素通过改变煤的氧化反应活性和热量积聚过程,进而影响临界温度的数值。煤的化学成分对临界温度的影响主要体现在活性官能团含量和矿物质组成上,低变质程度煤(如褐煤)含有较多的羟基、羧基等活性官能团,这些官能团易与氧气发生反应,使煤的氧化反应起始温度较低,临界温度也相对较低(通常为60-70℃);而高变质程度煤(如无烟煤)活性官能团含量少,分子结构稳定,氧化反应起始温度高,临界温度也更高(一般为80-90℃)。此外,煤中的矿物质(如黄铁矿、黏土矿物)也会影响临界温度,黄铁矿在氧化过程中会释放热量,促进煤的氧化反应,降低临界温度,例如含有5%以上黄铁矿的煤,其临界温度比不含黄铁

矿的煤低5-10℃;而黏土矿物具有吸附水分和氧气的作用,会抑制氧化反应,提高临界温度。煤的粒度通过影响比表面积和热量传递过程改变临界温度,粒度越小,比表面积越大,煤与氧气的接触面积增加,氧化反应速率加快,热量更容易积聚,临界温度降低,例如粒度为0.15-0.25mm的煤样临界温度比粒度为2-3mm的煤样低8-12℃;但当粒度过细(小于0.075mm)时,煤样颗粒间的空隙减小,氧气扩散受阻,反而会使临界温度略有升高。水分含量对临界温度的影响呈现“先降后升”的规律,当水分含量在5%-10%时,水分可促进煤分子中活性基团的解离,加速氧化反应,降低临界温度;当水分含量超过15%时,水分蒸发消耗大量热量,同时在煤样表面形成水膜阻碍氧气扩散,使氧化反应速率减慢,临界温度升高。氧气浓度升高会显著降低临界温度,当氧气浓度从15%提升至21%时,煤样的临界温度降低6-8℃;当氧气浓度进一步提升至30%时,临界温度继续降低3-5℃,这是因为高氧气浓度为氧化反应提供了充足的反应物,加快了反应速率和热量积聚过程。

3 煤自燃氧化动力学特性与临界温度参数的关联性分析

3.1 实验方案设计

为深入探究煤自燃氧化动力学特性与临界温度参数之间的关联性,精心设计了如下实验。在实验材料选取上,特意挑选了不同变质程度、粒度的煤样,这些煤样涵盖了多种典型类型,确保能充分代表实际煤炭的多样性,为研究提供广泛且具有说服力的数据基础。实验所需设备齐全,包括程序升温装置,可精准控制升温速率;气体分析系统,能实时、准确地监测反应过程中CO、CO₂等气体产物的浓度变化;温度传感器,可精确测量煤样温度。实验步骤严谨有序,先将煤样进行干燥处理,去除水分干扰^[3]。随后放入程序升温装置,以设定好的速率升温。在此过程中,气体分析系统和温度传感器同步工作,实时记录数据。在不同煤样实验时,严格保持实验条件一致,保证结果的可比性。通过此方案,能全面获取煤自燃过程中的关键信息,为深入探讨两者关联性筑牢根基。

3.2 实验结果与讨论

实验结果清晰地揭示了氧化动力学参数与临界温度之间紧密且复杂的变化关系。研究发现,随着表观活化能的降低,临界温度也呈现出相应降低的趋势。表观活化能作为衡量反应难易程度的关键指标,其数值降低意味着反应所需克服的能量障碍减小,反应更容易发生。因此,在较低温度下,煤的氧化反应就能迅速达到快速

进行的阶段,进而使临界温度降低。同时,指前因子与临界温度也存在着一定关联性。指前因子越大,表明反应的频率越高,氧化反应加速的可能性增大,临界温度也可能随之降低。此外,不同变质程度的煤样在实验中表现出明显的差异。变质程度低的煤,具有较高的氧化活性,表观活化能相对较低,临界温度也较低,这一结果与理论分析高度吻合,进一步有力地验证了两者之间的关联性。

3.3 关联性模型建立

基于详实的实验结果和深入的理论分析,我们积极尝试建立煤自燃氧化动力学特性与临界温度参数的关联性模型。在构建模型时,充分考虑了表观活化能、指前因子等关键氧化动力学参数与临界温度之间的内在联系。采用多元线性回归等科学方法进行模型搭建,将临界温度设定为因变量,把表观活化能、指前因子等作为自变量。通过严谨地拟合实验数据,精确确定模型的各项系数。模型建立后,为确保其准确性和可靠性,进行了严格的验证和优化工作。利用其他煤样的实验数据对模型进行检验,结果显示,该模型能够较为精准地描述氧化动力学特性与临界温度参数之间的关联性。这一模型为预测煤自燃临界温度提供了有效且实用的工具,有助于更加准确地评估煤自燃的危险性,为煤炭安全生产提供有力支持。

4 关联性研究的实际应用与展望

4.1 实际应用场景

煤自燃氧化动力学特性与临界温度参数关联性研究成果在煤矿安全生产领域具有广泛且重要的应用。在煤矿开采设计阶段,依据煤的变质程度、粒度等特性以及关联性模型,可精准预测不同区域煤层的自燃临界温度,合理规划开采顺序和速度,避免因开采不当引发煤自燃。例如,对于高自燃危险性煤层,可采用快速推进的开采方式,减少煤层暴露时间。在通风系统设计方面,根据临界温度参数,科学设置通风量和通风路线,确保及时排出煤氧化产生的热量,防止热量积聚。当井下某区域煤体温度接近临界温度时,及时调整通风参数,增强散热效果。另外,在煤堆储存管理中,利用关

联性研究成果,根据煤的氧化动力学特性,合理控制煤堆高度、湿度和氧气供应,采取覆盖、注水等防火措施,有效降低煤堆自燃风险,保障煤炭储存安全^[4]。

4.2 未来研究方向

尽管当前在煤自燃氧化动力学特性与临界温度参数关联性研究方面取得了一定成果,但仍有许多领域有待深入探索。未来可进一步开展多因素耦合作用下的研究,综合考虑地质构造、地应力、微生物活动等多种因素对煤自燃的影响,构建更全面、准确的关联性模型。同时,随着人工智能、大数据等新兴技术的发展,可将其应用于煤自燃监测与预警系统中,通过实时收集和分析大量数据,实现更精准、智能的自燃预测和防控。此外,加强对新型防火材料和技术的研发,结合关联性研究成果,开发出更高效、环保的防火方法,为煤矿安全生产提供更有力的技术支持。

结束语

煤自燃氧化动力学特性与临界温度参数的关联性研究对于煤矿安全生产意义重大。通过深入剖析两者关系,建立的关联性模型为预测煤自燃临界温度、评估自燃危险性提供了有效工具。实际应用中,研究成果在煤矿开采、通风及煤堆管理等方面发挥了积极作用。然而,研究仍存在局限性,未来需进一步探索多因素耦合影响,借助新兴技术提升监测预警能力,研发先进防火技术。相信随着研究的不断深入,将为煤矿安全生产提供更全面、精准的技术支持,有效减少煤自燃引发的矿井火灾事故,保障煤炭行业的可持续发展。

参考文献

- [1]王树明.空气湿度对煤自燃特性及氧化动力学参数的影响研究[J].煤矿安全,2024,55(4):98-105.
- [2]藏亮.煤自燃动力学参数及氧化反应阶段实验研究[J].中国矿业,2023,32(10):165-172.
- [3]范宁,钟凯琪,苏龙.不同氧浓度作用下煤氧化自燃热动力学特性[J].陕西煤炭,2022,41(2):12-17.
- [4]刘浩,李增华,王刚,等.煤自燃初期低温氧化产热特性及关键结构演变特征[J].煤炭学报,2025,50(7):3518-3533.