

煤矿井下瓦斯浓度异常波动的成因分析与预警方法研究

肖宇

天地（常州）自动化股份有限公司 江苏 常州 213138

【摘要】：煤矿井下瓦斯浓度的异常波动直接关系到矿工生命安全与矿井的安全生产。研究分析了瓦斯浓度异常波动的主要成因，重点探讨了井下瓦斯的产生、积聚及其波动规律。通过数据监测与模型预测，识别出影响瓦斯浓度波动的关键因素。结合机器学习算法及环境监测技术，提出了一种基于实时数据分析的预警方法，能够提前识别潜在风险并提供警示，为矿井安全管理提供技术支持，减少瓦斯爆炸等事故的发生。

【关键词】：瓦斯浓度；异常波动；成因分析；预警方法；煤矿安全

DOI:10.12417/2705-0998.26.05.066

引言

煤矿井下瓦斯浓度波动异常常常是导致矿井事故的重要原因之一。由于煤矿井下环境复杂，瓦斯的积聚和释放受到多种因素的影响，瓦斯浓度异常波动往往难以预测，给矿井安全带来巨大隐患。如何有效识别这些波动的成因，并通过科学的手段进行预警，成为煤矿安全管理中的一个重要课题。随着监测技术的进步，结合数据分析与智能算法，已成为提升瓦斯监测精度和预警能力的重要途径。通过对瓦斯浓度波动的深入研究，可以为煤矿安全管理提供有效的技术支持，并减少相关事故的发生。

1 瓦斯浓度波动异常的成因分析

1.1 瓦斯产生与积聚规律

煤矿井下瓦斯的产生主要源于煤层中的有机物质在地质作用下分解，生成甲烷等气体。瓦斯的积聚过程涉及煤层的气孔、裂隙以及岩石的孔隙度等因素。煤层中的有机物质在压力和温度的作用下不断释放瓦斯，尤其是在开采过程中，煤层破裂和暴露会导致大量瓦斯释放。瓦斯的积聚与矿井的通风状况密切相关，若通风不畅，瓦斯将长期滞留在井下，形成高浓度区，进而导致异常波动的发生。瓦斯浓度的变化不仅与煤层的气体释放能力有关，还与矿井开采深度、采掘速度等因素紧密相连。

1.2 井下环境因素对瓦斯浓度的影响

井下温度和湿度是影响瓦斯生成和扩散的重要因素。温度升高时，瓦斯的释放速度加快，湿度过高则可能影响瓦斯的逸散性，导致瓦斯浓度的波动。矿井的通风系统同样在控制瓦斯浓度方面起着至关重要的作用，若通风系统设计不当或设备故障，可能导致瓦斯气体的积聚和浓度的波动^[1]。矿井的开采方法也会对瓦斯浓度的变化产生影响，特别是在采煤过程中，煤层的破碎和裂隙的增加会导致瓦斯的快速释放，从而使得瓦斯浓度出现剧烈波动。矿井内的地质条件，如岩层的渗透性及煤层的结构，也决定了瓦斯在地下的扩散路径和积聚区域，这些因素共同作用，导致了瓦斯浓度的不稳定性。

1.3 影响瓦斯波动的的外部因素

矿井外部因素同样对井下瓦斯浓度的波动起着不可忽视的作用。地震、气候变化等自然因素可以直接影响地下气体的释放与积聚。地震可能导致矿井内部裂隙的扩展，进而影响瓦斯的逸散和积聚过程。而气候变化，尤其是气温的急剧波动，可能影响瓦斯的溶解度与逸散性，导致井下瓦斯浓度的异常波动。人为因素也不可忽视，尤其是在矿井外部建设或其他矿区的开采活动中，周边环境的变化可能通过地下水流动或空气流动，间接影响瓦斯浓度。矿井内外的温差变化，也可能引起矿井内空气的流动变化，从而加剧瓦斯浓度的波动。外部因素的复杂性进一步增加了瓦斯浓度监测与预警的难度。

2 瓦斯浓度波动监测与数据分析方法

2.1 井下瓦斯浓度实时监测技术

瓦斯浓度传感器主要依赖红外、催化燃烧、电化学等原理，进行气体检测。红外技术通过检测气体的特定吸收波长，精确测量瓦斯浓度；催化燃烧传感器则通过气体燃烧产生的热量变化，间接反映瓦斯浓度。电化学传感器能够通过化学反应释放的电流变化来测定瓦斯浓度。这些监测设备被广泛安装在矿井各个关键位置，实时采集数据并传输至矿井监控中心，以便及时评估井下瓦斯的浓度变化情况。实时监测系统还可与矿井通风系统、自动化设备相联动，当瓦斯浓度达到设定的预警值时，系统将自动启动通风或报警，最大限度地减少瓦斯爆炸等安全事故的发生。传感器的安装位置、传输网络的稳定性及数据采集频率直接影响实时监测的效果，完善的监测设备和系统集成能力是确保安全的关键。

2.2 数据采集与处理方法

瓦斯浓度的采集和处理涉及到大量实时数据的获取、存储和分析。数据采集主要通过安装在矿井内的传感器进行，传感器根据预设的采样频率获取瓦斯浓度数据，通常采样周期在几秒至几分钟之间。采集的数据需通过数据采集系统进行初步处理，滤除噪音和异常值，确保数据的准确性和稳定性。数据处理过程中，常采用滤波、平滑和插值等技术，确保数据的完整

性和精度^[2]。由于矿井环境复杂，数据质量受多个因素影响，因此数据的清洗和预处理尤为重要。数据存储与管理也是不可忽视的一环，传统的集中式存储方法已难以应对大数据量的实时处理需求，分布式数据库和云计算平台的应用开始广泛推广。数据处理的核心目标是后续分析提供高质量的输入，同时减少因传感器故障或数据波动引起的误判。

2.3 波动异常模式识别

传统的异常检测方法通常依赖设定阈值进行判断，若瓦斯浓度超过设定值即认为发生了异常。矿井环境的复杂性和瓦斯浓度的波动特性使得这种简单的阈值检测方法难以应对多变的情况。基于此，越来越多的研究引入了数据驱动的模式识别方法，利用历史数据进行建模，结合机器学习算法识别瓦斯浓度的波动模式。支持向量机（SVM）、神经网络和决策树等算法在异常波动的检测中得到了应用。通过这些方法，可以从海量数据中挖掘出与正常波动不同的异常模式。通过对比历史数据，机器学习算法能够识别出潜在的安全隐患和异常波动，提前发出预警信号。

3 预警系统设计与实践

3.1 基于数据模型的预警算法

基于数据模型的预警算法旨在通过分析瓦斯浓度的历史数据和实时监测数据，预测潜在的风险并及时发出预警信号。常见的预警算法包括回归分析、时间序列分析及动态系统建模。回归分析方法通过建立瓦斯浓度与相关因素之间的数学关系模型，评估瓦斯浓度的变化趋势，并根据历史数据预测未来浓度波动。时间序列分析则通过分析过去的模式，发现潜在的波动趋势，以预测未来瓦斯浓度的变化。动态系统模型通过对矿井环境的实时监控数据建模，结合物理和化学过程，形成闭环系统，实时调整预警阈值和反应机制。这些模型不仅能帮助识别潜在的风险，还能为预警系统提供数据支持，使其能够在异常波动发生前及时发出警告。

3.2 机器学习在预警中的应用

机器学习技术在瓦斯浓度预警系统中的应用日益广泛，特别是在处理非线性和复杂的矿井环境数据时，机器学习能够显著提高预警系统的准确性和鲁棒性。通过使用监督学习和无监督学习算法，系统能够根据历史数据进行模式识别，及时发现瓦斯浓度的异常波动^[3]。常见的机器学习算法包括决策树、随机森林、支持向量机（SVM）和深度神经网络（DNN）。决策树和随机森林通过构建树状结构，从多个因素中提取特征，判断瓦斯浓度是否超出安全范围；SVM 则通过寻找最佳分割面来区分正常波动和异常波动；深度神经网络则通过多层次非线性模型，提高系统的预测能力，尤其在处理复杂、冗余数据时具有明显优势。机器学习模型还能够进行在线学习，随着新的数据不断输入，系统会不断优化自身的预测能力，提高对突发

异常波动的识别和反应速度。

3.3 预警系统的优化与调整

矿井监测数据的逐渐积累，预警系统需要不断更新和完善，以适应新的安全需求和技术变化。系统的优化首先体现在数据处理和模型更新上，针对新产生的数据，及时对算法模型进行再训练和调优，以提高对异常波动的敏感度和准确性。系统的参数调整也是优化过程中的重要部分。预警阈值的设定需要根据不同环境条件进行灵活调整，例如在高温、高湿等特殊环境下，瓦斯浓度波动的特性可能与常规条件下有所不同，因此需要动态调整预警参数，以避免误报或漏报。预警系统还需与矿井的其他安全系统（如通风系统、气体监测系统）进行联动，形成闭环控制机制。通过系统间的信息共享和协同工作，能够进一步提升安全管理的智能化水平。

4 预警方法的验证与实验分析

4.1 实验设计与数据采集

为了验证预警方法的有效性，实验设计需基于煤矿井下的实际工作环境，模拟多种可能的瓦斯浓度波动情形。实验中，数据采集设备将布置在矿井的多个关键区域，确保监测覆盖瓦斯浓度变化的全方位。数据采集不仅包括瓦斯浓度的实时监测，还需获取温度、湿度、风速等相关环境变量，这些因素对瓦斯的扩散和积聚具有显著影响。为确保数据的代表性和可靠性，采集的时间应具有一定的连续性，捕捉不同条件下瓦斯浓度的变化趋势。实验期间，将设计不同的异常波动场景，例如高浓度瓦斯释放、局部通风系统失效等，模拟实际矿井中的突发事件，以评估预警系统在复杂条件下的响应能力。实验数据还需要进行多轮次的采集与分析，确保在各种环境和操作条件下，预警方法的普适性和有效性。

4.2 预警系统的验证与测试

在实验设计完成后，预警系统的验证与测试至关重要。通过与传统的预警方法对比，能够明确新方法在预测瓦斯浓度异常波动方面的优势。验证过程中，系统会根据实时采集的监测数据进行实时分析，自动生成预警信息。每当瓦斯浓度超出设定的阈值时，系统将触发警报，并记录异常波动的详细信息。通过反复测试，不仅评估系统在正常情况下的表现，也要对系统在异常波动、设备故障或数据丢失等情况下的应对能力进行全面验证^[4]。测试数据应涵盖不同的矿井环境及不同的工作状态，以确保系统能够应对矿井环境的多样性和复杂性。测试结果将通过多维度的对比分析，检验预警方法在准确性、响应速度和稳定性方面的表现，确保其能够为煤矿安全提供可靠的技术支持。

4.3 系统性能评估与优化

预警系统的性能评估主要通过精度、响应时间和稳定性三个维度进行分析。精度评估侧重于系统在检测瓦斯浓度异常波

动时的准确性，具体通过对比真实瓦斯浓度的变化和预警系统输出的警报结果来衡量。响应时间是评估系统在监测到浓度变化后，发出警报所需的时间，要求在极短的时间内作出反应，特别是在突发事件中。稳定性评估则考察系统在长时间运行和高负荷条件下，是否能持续提供准确、实时的预警信息。通过实验数据的反馈，系统会不断优化其算法和参数设置，提升整体性能。优化过程中，可能涉及到改进算法的处理效率、提高数据处理的准确性，或者增强系统的硬件设备，以确保在实际环境下的稳定性和可靠性。性能优化还要关注系统的可扩展性，确保在矿井规模扩大或条件变化时，系统仍能有效运行。

5 瓦斯浓度波动异常的防控策略

5.1 预警系统的实际应用前景

煤矿安全管理要求的提高，瓦斯浓度波动的预警系统在矿井中的应用前景逐渐广阔。系统通过实时监测与数据分析，能够提前识别出异常波动趋势，为矿井安全提供及时预警，减少突发性事故的发生。尤其在复杂的井下环境中，预警系统不仅能提高瓦斯浓度异常的检测灵敏度，还能与矿井的其他安全系统（如通风、消防等）联动，形成自动化的应急响应机制。随着智能化技术的发展，未来预警系统将更加精准、实时，具备更强的适应性，能够在不同的矿井条件下灵活应用。这将极大提高矿井作业的安全性，降低事故风险，促进矿山企业在安全领域的技术进步与管理优化。

5.2 加强井下安全管理与监控

加强井下安全管理和监控是有效防控瓦斯浓度波动异常的重要措施。矿井管理部门需要加强对瓦斯浓度的日常监测，

并结合实际操作，制定科学合理的安全管理规程。通过建立完善的监控系统和操作规程，能够在矿井生产过程中实时捕捉瓦斯浓度变化，并对潜在的风险点进行早期识别^[1]。对井下作业人员的培训也是管理中的关键部分，应定期进行瓦斯浓度异常情况的应急演练，确保员工能够在突发事件中迅速、有效地采取应对措施。结合大数据分析技术，井下安全管理的智能化程度将不断提高，实现自动化监控与人工干预的有效结合，从而增强整体防控能力。

5.3 未来预警技术的提升方向

未来的瓦斯浓度预警技术将朝着更加智能化、精准化和自主化的方向发展。通过深度学习、物联网（IoT）等先进技术的结合，预警系统将能够处理更多复杂的环境数据，优化风险预测模型，进一步提升异常波动的预警准确性和响应速度。新型传感器的研发也将使得瓦斯浓度的检测更加高效，能够在更恶劣的环境中长期稳定工作。基于云计算和大数据分析，预警系统的跨区域联动和信息共享能力将得到大幅提升，实现多个矿井、不同区域之间的数据融合与风险监测。随着技术的不断突破，预警系统将不仅限于传统的瓦斯浓度监测，还能引入更多维度的安全数据，全面提升煤矿的智能安全管理水平。

6 结语

瓦斯浓度的异常波动对煤矿安全构成严重威胁，实施精准的监测和预警系统是保障矿井安全的重要手段。未来，随着技术的不断发展，预警系统将更加智能化、精准化。通过实时数据监测与智能分析，能够有效提升煤矿安全管理水平，预防瓦斯爆炸等事故的发生。持续优化和创新预警技术，将为煤矿行业的安全生产提供更加可靠的保障。

参考文献：

- [1] 赖文哲,范敏楠,邵良杉.基于ICOA-LSSVM混合机器学习模型的煤矿井下瓦斯浓度预测研究[J/OL].中国矿业,1-11[2026-04-08].
- [2] 邹德龙.无线传感器网络在煤矿瓦斯监测与预警系统中的应用[J].煤矿机械,2026,47(01):226-230.
- [3] 王振宇.煤矿瓦斯煤尘爆炸特性分析[J].煤,2025,34(12):23-26.
- [4] 吴浩.基于多传感物联网的煤矿井下瓦斯浓度自动在线监测[J].自动化应用,2025,66(22):195-197.
- [5] 杨娟,郝晴,戴俊,等.镍负载缺陷型氧化钛光催化转化低浓度瓦斯制甲醛及性能增强机理[J/OL].煤炭学报,1-16[2026-04-08].