

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.02.023

基于知识图谱的露天矿爆破安全管理问答系统*

孙嘉怡¹,李萍丰^{2,3},管伟明¹,谭洁¹,赵明生^{2,3},余红兵^{2,3},温颖远¹,唐洪佩^{2,3}

(1. 新疆大学,乌鲁木齐 830017;2. 新疆宏大爆破工程有限公司,昌吉 831399;

3. 宏大爆破工程集团有限责任公司,长沙 410011)

摘要: 在爆破作业中,安全管理发挥着至关重要的作用,爆破安全与“钻孔、爆破、采装、运输、排土”等工艺流程密切相关,工序之间相互作用显著。然而,由于现有爆破安全数据来源多样、结构复杂,缺乏系统化集成,导致现场作业人员在面对复杂工况时难以准确获取关键安全知识,给安全管理带来了挑战。因此将基于BERT-BiLSTM-CRF的命名实体识别方法应用于爆破安全管理领域。首先采用BERT预训练模型获取动态词向量,其次采用BiLSTM-CRF进行实体最佳标签序列标注,构建了涵盖7类实体和9类关系的知识图谱,并利用开源图数据库系统Neo4j存储知识图谱数据。结果表明:模型所有实体类型的 F_1 值均在60%以上,证明该模型较传统模型实体识别提取精度显著提高。并基于知识图谱模型开发了露天煤矿爆破工艺安全管理知识问答系统,完成领域知识查询及各类爆破工艺与安全标准的迅速匹配。通过问答系统的支持,现场工程师能够在复杂的爆破安全管理中迅速做出科学决策。

关键词: 知识图谱;问答系统;爆破安全;工艺流程;预训练语言模型

中图分类号: TD824; TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2025)02-0188-14

Knowledge Graph-based Q&A System for Blasting Safety Management in Open-pit Mines

SUN Jia-yi¹, LI Ping-feng^{2,3}, GUAN Wei-ming¹, TAN Jie¹, ZHAO Ming-sheng^{2,3},
YU Hong-bing^{2,3}, WEN Ying-yuan¹, TANG Hong-pei^{2,3}

(1. Xinjiang University, Xinjiang 830017, China; 2. Xinjiang Hongda Blasting Engineering Co., Ltd., Xinjiang 831399, China; 3. Hongda Blasting Engineering Group Co., Ltd., Hunan 410011, China)

Abstract: Safety management plays a vital role in blasting operations, and blasting safety is closely related to the processes of drilling, blasting, loading, transportation, and dumping, with significant interactions among these procedures. However, due to the diverse sources and complex structure of current blasting safety data, the lack of systematic integration poses challenges for on-site personnel to accurately acquire critical safety knowledge under complex working conditions. To address this issue, this study applies a BERT-BiLSTM-CRF-based method for entity recognition in the field of blasting safety management. The BERT pre-trained model is first used to obtain dynamic word embeddings, fol-

收稿日期(Date of reception): 2025-04-26

网络首发日期(Published online): 2025-05-14

作者简介: 孙嘉怡(2000-),女,硕士研究生,从事露天矿爆破相关研究工作,(E-mail) sunjiayi0711@163.com.

通讯作者: 管伟明(1981-),男,教授、博士生导师,主要从事智能矿山、矿区生态修复、露天矿爆破等方向的教学与研究工作,(E-mail) gwmxju@xju.edu.cn.

基金项目: 新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目(XJ2025G100); 新疆维吾尔自治区科技攻关计划(2024A03001-2)

About the author: SUN Jia-yi(2000-), female, master's degree candidate, engaged in research on open-pit mine blasting, (E-mail) sunjiayi0711@163.com.

Corresponding author: GUAN Wei-ming(1981-), male, professor, doctoral supervisor, His research focuses on intelligent mining, mine ecological restoration, and open-pit blasting, (E-mail) gwmxju@xju.edu.cn.

Fund Programs: Graduate Student Innovation Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region(XJ2025G100), Science and Technology Major Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region(2024A03001-2)

lowed by optimal label sequence tagging using the BiLSTM-CRF model. A knowledge graph covering seven entity types and nine relationship types is constructed and stored using the open-source Neo4j graph database system. Experimental results show that the F_1 -score for all entity types exceeds 60%, demonstrating that the proposed model significantly improves entity recognition accuracy compared to traditional models. Based on this, a knowledge graph-based Q&A system for blasting process safety management in open-pit coal mines is developed, enabling rapid querying of domain knowledge and efficient matching of various blasting processes with safety standards. With the support of this Q&A system, on-site engineers can make timely and informed decisions in complex blasting safety management scenarios.

Key words: knowledge graph; Q&A System; blasting safety; process flow; pre-trained language model

近年来,随着露天煤矿智能化转型爆破工艺也在持续更新,爆破安全事故虽有所下降,但存在工艺施工不规范而带来的影响^[1]。据统计,约 68% 的爆破事故因违反作业程序及设备操作不当而引发^[2]。在 2015—2019 年间造成 224 ~ 300 人的年死亡人数^[3],可以看出工艺标准化缺失仍是制约安全水平提升的关键瓶颈,因此规范工艺流程的爆破安全管理尤为关键^[4,5]。

地方和中央政府发布了关于爆破安全管理和工艺规范的标准及法规,且研究者们通过与爆破工艺效果相关联的评价参数在爆破飞石距离^[6]、爆破振动^[7]、坡面稳定性等方面进行了细化研究^[8],但其中的研究成果难以相互联系并应用于爆破安全管理的决策过程中。为将知识成果应用于安全管理中,柯丽华等用社会网络分析法建立了风险评价模型^[9];岳中文等建立了基于粒子群算法优化最小二乘支持向量机的露天矿爆破振动效应预测模型^[10];李爱陈等提出用改进层次分析法分析露天矿爆破效果影响因素^[11];张华提出模糊综合-集值统计法的露天煤矿爆破安全风险评价模型^[12]。可以看出,爆破安全评价多集中于对于爆破效果的各类模型研究,角度较为局限,无法考虑更多安全影响因素。

知识图谱是组织和管理海量知识的有效工具^[13],为储存和表达领域知识提供了新的方法^[14]。爆破工艺安全图谱可用于知识获取、安全管理关联路径和统计分析,还可用于发现危险源和检索事故处理方法。命名实体识别(NER)是构建图谱中的重要任务,工艺安全管理实体识别是爆破安全管理模型处理和应用的核心^[15]。Shah 等人提出预训练语言模型^[16],通过 BERT 掩码语言建模(MLM)与双向注意力机制(Transformer)实现动态语义编码,使得实体识别精度显著提升; Bert-BiLSTM-CRF 是预训练语言模型的代表,包括特征选择、序列标记等^[17]。首先使用大规模标记语料库训练模型,进而对测试语料库的序列进行解码,完成 NER 任务。张念采用 BERT-BiLSTM-CRF 构建隧道施工安全领域知识图谱^[18],验证了模型在安全管理领域的适

应性。

PTM 的“预训练 + 微调”模式在煤矿领域的设备维护及灾害防治展现出多场景适应性, Jin J 结合 CNN-LSTM 模型对采煤机、液压支架等设备的传感器数据进行故障模式推理^[19];潘理虎构建本体驱动知识图谱支持设备-人员关系查询^[20];刘永立等人融合知识图谱与 DQN 算法^[21],动态生成针对井工矿中塌方、火灾等事故的救援路径和资源调度方案;通过的预训练方法可以整合分散经验,提升风险预防智能化水平。然而,但是现有研究多局限于一般煤矿设备管理和灾害救援,露天矿爆破工艺涉及特定的爆破参数、填塞技术等专业知识,现有知识图谱尚未有效涵盖这些细分领域,缺乏针对露天矿爆破工艺的专属知识体系。

综上所述,现有研究验证了知识图谱在矿山各类管理识别中的有效性,但是爆破领域具有显著的领域专属性,难以识别爆破工艺流程之间的关联关系与风险传播路径,实体和关系抽取精准度不足,未能达到安全管理实际应用需求。因此提出了一种基于 BERT-BiLSTM-CRF 命名实体识别模型针对露天矿爆破安全工艺管理领域知识实现高精度实体识别;将地质条件、施工工艺及设计参数等实体关系建模与具体的设计数值、标准安全范围等量化属性融合,形成可拓展的爆破安全管理问答系统,动态适应矿山生产环境和条件的变化。

1 爆破安全管理领域知识图谱构建流程

1.1 构建流程

以爆破安全管理领域的标准规范文件为知识提取的数据源,依托生产工艺流程中各作业环节的特征,针对不同类型的数据开展实体识别。对于爆破设计等结构化与半结构化数据,采用规则方法与传统机器学习方法进行处理;而对于工艺规范中的非结构化文本,则引入基于 BERT 模型的预训练语言模型开展深度学习训练,以实现语料中的实体抽取。最终,通过构建问答系统,以知识问答和知识检索的形式实现知识的高效呈现。研究路线如图 1 所示。

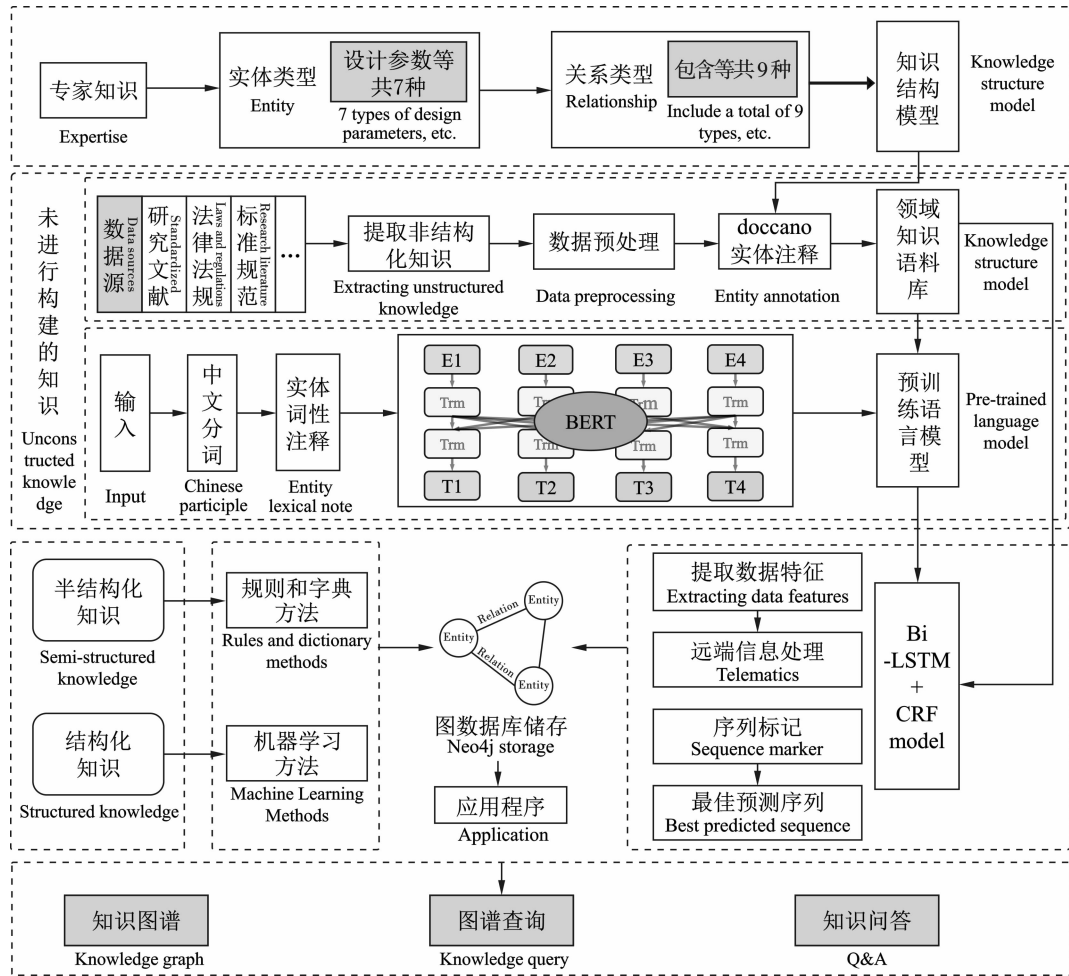


图 1 研究路线图

Fig. 1 Research roadmap

1.2 数据集来源及预处理

以露天煤矿相关的国家标准、行业标准、企业爆破管理文件以及 CNKI 库中的爆破相关研究文献为数据来源,构建原始语料库。首先,从中国标准服务网、煤炭行业标准网站中检索与露天煤矿爆破及安全管理相关的标准和规范文件共 15 篇,在 CNKI 库中以“露天矿”和“爆破工艺”为关键词检索出 53 篇,并收集各类企业爆破设计方案及安全应急预案共 20 篇。剔除无法转换为文本格式的文件,最终选出包括 PDF 和文本格式的 88 篇文本文献作为原始数据。国家及地方发布的安全技术标准体系主要针对露天矿的各项安全生产标准,包括中国国家标准(GB)、煤炭行业标准(MT)和煤矿安全标准(AQ)。其中,露天矿的爆破安全管理标准、生产流程标准及作业行为标准等是主要内容,部分规标准文件如表 1 所示。

1.3 爆破实体及关系分层构建

为使实体类型概念划分合理,基于安全管理和工艺流程结构双维度构建实体类型。管理对象往往

为人员、材料、机械及环境,因此设计组织人员、机具设备及地质环境三类实体。此外,实体划分还以典型的生产工艺流程为主线,由于施工过程环境复杂,不同施工场所需采用不同的施工工艺,因此基于“钻孔—爆破—采装—运输—排土”五个作业环节,划分出工艺方法、设计参数、材料消耗、施工效果四类实体类型。同时,依据规范标准将每一环节包含的具体工艺细分为设备选型、孔网参数、深孔爆破、间断工艺等工艺要素,再将工艺要素细化至孔深、孔距、炸药单耗、飞石距离、块度、运输距离和满斗率等具体参数因素,形成结构化的工艺知识分解体系,具体实体类型如图 2 所示。

综上所述,将实体类型划分为:组织人员、工艺方法、机具设备、地质环境、设计参数、材料消耗及施工效果共 7 类实体类型。对于新增的实体类型材料消耗、施工效果,由于尚未形成规范的分类体系因此采取自底向上的构建方式,这些实体类型 9 种实体关系联系起来;生产、编制、装配、使用、勘测、包含、影响、取值、执行,实体关系概念如表 2 所示。

表 1 露天煤矿爆破规范体系示例
Table 1 Example of a blasting code system for surface coal mines

序号 No.	标准规范示例 Example of standard specification	依据发布机构和作用范围划分 By issuing organization and scope of action	依据其内容不同划分 Divided according to their content
1	中华人民共和国煤炭法 Coal law of the People's Republic of China	法律 Law	安全行为标准 Safety behavior standards
2	中华人民共和国矿山安全法 Mine safety law of the People's Republic of China	法律 Law	安全管理标准 Safety management standards
3	煤矿安全检查条例 Coal mine safety Inspection Regulations	行政法规 Administrative legislation	安全行为标准 Safety behavior standards
4	煤矿建设安全规程 Coal mine construction safety regulations	行政法规 Administrative legislation	安全行为标准 Safety behavior standards
5	爆破安全规程 (GB6722—2014) Blasting safety regulations	国家标准 (GB) National standard	安全行为标准 Safety behavior standards
6	煤炭工业露天煤矿设计规范 (GB50197—2015) Design code for surface coal mines in the coal industry	国家标准 (GB) National standard	生产技术规范标准 Technical specifications and standards for production
7	煤炭工业露天煤矿边坡工程设计标准 (GB51289—2018) Coal industry surface coal mine slope engineering design standards	国家标准 (GB) National standard	生产技术规范标准 Technical specifications and standards for production
8	民用爆破器材工程设计安全规范 (GB50089—2007) Safety code for civil explosives engineering design	国家标准 (GB) National standard	生产技术规范标准 Technical specifications and standards for production
9	爆破作业项目管理要求 (GA991—2012) Project management requirements for blasting operations	行业标准 (GA) Industry standard	安全行为标准 Safety behavior standards
10	煤矿生产技术规范标准 (AQ1055—2018) Coal mine production technical code standards	煤矿安全标准 (AQ) Coal mine safety standard	安全管理标准 Safety management standards

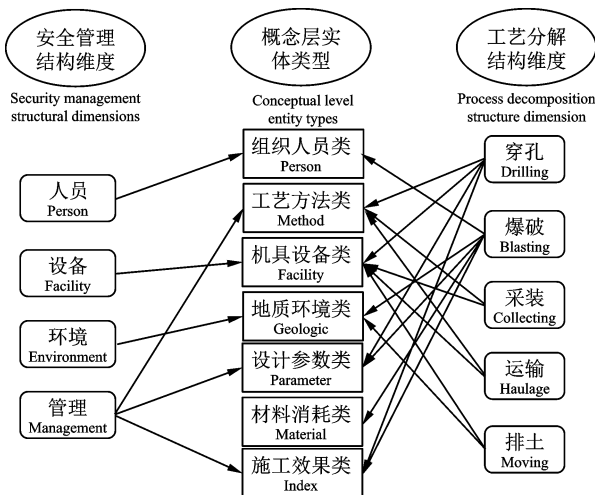


图 2 露天煤矿爆破工艺安全管理领域实体类型
Fig. 2 Entity types in the field of safety management of
blasting processes in surface coal mines

考虑到露天煤矿生产过程中的复杂性,结合了露天煤矿爆破工艺与安全知识体系自上而下的分解方法,选用了斯坦福大学开发的成熟本体构建模型——七步法。这一方法不仅提高了实体类型在概

念层面划分的合理性,也确保了标准规范数据的准确性和全面性。基于上述的语料库文本分析,可以得到露天煤矿爆破工艺管理知识标准规范之间的知识结构模式如图 3 所示,圆圈为实体类型,文字箭头表示关系类型,两实体间的箭头表示关系方向,由此构成了露天煤矿爆破工艺安全管理知识结构。

2 爆破安全知识实体识别模型

2.1 BERT-BiLSTM-CRF 模型

所构建的 BERT-BiLSTM-CRF 模型结构如图 4 所示,该模型主要由 3 部分组成:BERT 层、BiLSTM、CRF 解码层。BERT 层用于对句子中的字符进行向量化表示,BiLSTM 层用于获取向量的上下文语义特征,CRF 解码层用于输出全局最优标签序列。

①BERT 模型

BERT 模型作为基于 Transformer 的无监督预训练语言模型,其核心在于通过自注意力机制 (Self-Attention) 实现上下文感知的语义表征。模型输入由标记嵌入 (字符语义)、位置嵌入 (序列顺序) 和片段嵌入 (句子边界) 三部分构成,通过式 (1) 的自注

注意力计算动态捕获词间关联

$$Attention(Q, K, V) = softmax\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V \quad (1)$$

式中： Q, K, V 是字向量矩阵； d_k 是 Embedding 维度； $\sqrt{d_k}$ 的缩放系数避免高维空间点积值过大导致梯度消失； $Softmax$ 函数归一化权重系数矩阵以凸显关键特征。

在露天煤矿爆破安全管理识别场景中，由于知

识类型众多因此实体集中现象较为普遍，需通过动态语义建模解决一词多义问题。例如在下面的句子中：“爆破效果中爆破振动需控制在 5 cm/s 以下”，共有 20 个字符包含 2 个实体。首先，输入序列 $E_{10} \{E_1, E_2, \dots, E_n\}, E_i(i \in n)$ 经 BERT 编码后，每个单个字中 E_i 向量会融合其上下文特征，并通过 [SEP] 标记分割多句子输入，[CLS] 标记聚合全局特征用于下游任务微调。

表 2 实体关系概念表

Table 2 Conceptualization of entity relationships

序号 No.	关系名称 Relationship name	关系概念 Relationship concepts
1	生产 Establish	因素 A 通过特定流程或条件促成因素 B 的存在或形成 A contributes to the existence or formation of B through specific processes
2	编制 Design	因素 A 通过系统性规划或设计生成因素 B 的逻辑关系 A generates the logic of B through systematic planning or design
3	装配 Equip	因素 A 通过组合或集成形成更复杂的因素 B 的构成关系 A forms a more complex compositional relationship of B through integration
4	使用 Use	因素 A 在实现目标过程中对因素 B 的调用或消耗 The invocation or consumption of B by A in the achievement of its objectives
5	勘测 Survey	因素 A 通过技术或方法获取因素 B 的量化信息 A obtains quantitative information on B through technology or methodology
6	包含 Include	因素 B 是因素 A 的组成部分或属性子集的层级关系 Hierarchical relationships in which B is a component or subset of attributes of A
7	影响 Affect	因素 A 对因素 B 产生直接或间接的因果作用 A has a direct or indirect causal effect on B
8	取值 Value	因素 A 为因素 B 赋予具体数值或属性的量化定义关系 Quantitatively defined relationship in which A assigns a specific value to B
9	执行 Execute	因素 A 通过行动或操作实现因素 B 的目标或结果 A achieves the goal or result of B through an action or operation

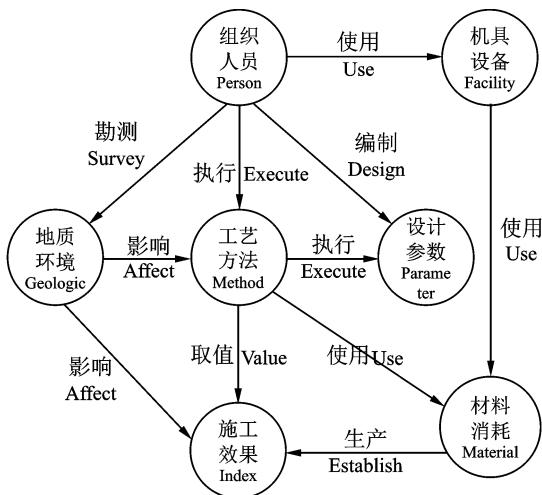


图 3 露天煤矿爆破工艺安全管理知识领域知识结构模式

Fig. 3 Knowledge structure model of the knowledge domain for safety management of blasting processes in open-pit coal mines

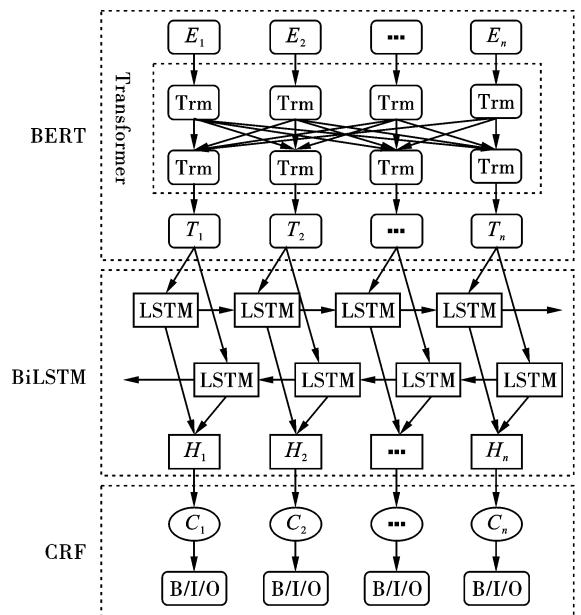


图 4 BERT-BiLSTM-CRF 模型原理

Fig. 4 Principle of BERT-BiLSTM-CRF model

同时中文分词中易出现复合实体的分词歧义问题,BERT 可通过自注意力机制的逐字符编码方法动态捕捉上下文语义关系,避免了传统分词工具对复合术语的切割错误。例如,将实体“爆破振动”作为输入序列通过字符级嵌入分别编码“爆”“破”“振”“动”,避免预分词导致的语义割裂;之后通过自注意力权重矩阵计算“振”“动”与“爆”“破”的注意力得分,相邻字符得分显著高于其他无关字符,表明模型捕捉到“爆破振动”作为整体概念的语义边界,有效规避复合实体被错误分词的问题。

②BiLSTM 模型

LSTM(Long-Short Term Memory)作为循环神经网络(RNN)的改进架构,通过门控机制解决梯度问题。其核心包含三类门函数:遗忘门、输入门、输出门。输入门与遗忘门的结合可以实现多余信息的过滤删除,将有用的信息传递给下一时刻。对整个系统的输出结果来说,主要是记忆 Cell 的输出结果与和输出门的输出结果相乘。计算公式为式(2)~(7)。

$$f_i = \sigma(W_f[h_{i-1}, x_i] + b_f) \quad (2)$$

$$i_i = \sigma(W_i[h_{i-1}, x_i] + b_i) \quad (3)$$

$$\tilde{C}_i = \tanh(W_c[h_{i-1}, x_i] + b_c) \quad (4)$$

$$c_i = f_i * c_{i-1} + i_i * \tilde{C}_i \quad (5)$$

$$o_i = \sigma(W_o[h_{i-1}, x_i] + b_o) \quad (6)$$

$$h_i = o_i * \tanh(c_i) \quad (7)$$

BiLSTM 在 LSTM 基础上引入双向时序处理:使模型能同步解析上下文语义,显著提升了实体边界识别精度。

③CRF 模型

在 NER 任务中,CRF 通过建模标签间转移约束优化序列标注结果^[22],其核心在于利用 A-标签转移矩阵与 BiLSTM 输出 P-概率矩阵联合求解最优标签序列。具体实现分为三阶段:

首先进行特征建模,BiLSTM 输出每个字符的标签发射概率 $P_{x_{y_i}}$,CRF 层通过转移矩阵 $A_{y_{y_i+1}}$ 定义标签转移规则。其次在模型训练时,对于每个序列 Y 优化对数损失函数,调整矩阵 A 的值,利用 Softmax 函数定义转移概率值为式(8)。

$$p(X|Y) = \frac{e^s(X,Y)}{\sum_{\tilde{Y} \in Y_X} s(X,\tilde{Y})} \quad (8)$$

式中: Y_X 为所有的标签序列; \tilde{Y} 为真实标注序列。因此,只需要最大化似然概率 $p(X|Y)$ 即可,利用对数似然函数式(9)。

$$\ln[p(X|Y)] = \ln \left[\frac{e^{s(X,Y)}}{\sum_{\tilde{Y} \in Y_X} s(X,\tilde{Y})} \right] - s(X|Y) \quad (9)$$

当模型进行预测时按式(10)所示策略寻找最优路径。

$$y^* = \arg \max_{\tilde{Y} \in Y_X} s(X,\tilde{Y}) \quad (10)$$

式中, y^* 表示集合中使得 $s(X,\tilde{Y})$ 函数最大的序列。

在处理命名实体识别问题的过程中,多采用将神经网络模型与传统的统计学数学模型相结合的使用方法,BiLSTM-CRF 是最具代表性的模型结构。

④评价指标

命名实体识别(NER)评价指标的定义和公式如下:Precision 为精确度,Recall 为召回率, F_1 分数为综合评价指标。TP 为正确识别的实体数量,FP 为错误识别的实体的数量,错误识别的主体的数量标记为 FN(文献)。

精度是指正确识别的实体数量与正确识别实体总数之间的比率。P 计算公式如式(11)所示。

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \times 100\% \quad (11)$$

召回率是正确识别的实体数量与应识别的实体(所有实体)之间的参数。R 的公式如式(12)所示。

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \times 100\% \quad (12)$$

综合评价指标(F_1 分数)、精确度和召回率对模型进行综合评价。 F_1 的公式(13)所示

$$F_1 = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision + Recall} \times 100\% \quad (13)$$

2.2 本体模型构建

2.2.1 实体标注及词典构建

采用了 Doccano 免费开源标注平台对语料库中进行序列标注,构建实体及关系的样本集。Doccano 平台提供了文本分类、序列标注和序列到序列的标注功能^[23],将数据以 Textline 格式导入,标注完成后导出序列标注数据转换为 BIO 形式。

基于标准规范中的结构化知识可以确定实体内容,标准规范中以表格或条目的形式明确显示了工艺方法、地质环境、机械设备等概念,因此可以导入 doccano 中以用于人工标注原始文本中的实体边界及类型。通过“Labels”功能创建实体标签,人工手动标注文本中的专业术语边界,标注示例如图 5 所示,彩色横线为相应的实体标签,可设定不同标签颜色方便标注过程中直观区别不同的标签类型。

环境、组织人员及工艺方法类型中, F_1 值均大于 0.6, 因训练数据中分布密集且语义边界清晰, 模型可有效捕捉上下文关联性。除材料消耗外, 其他实体类型均高于 0.6, 其多与施工场景高度相关, 实体特征明显, 识别效果较好。而材料消耗标签 F_1 较低, 原因在于其实体内容较少并较为重复单一, 需进一步调整训练策略。总体而言, BERT-BiLSTM-CRF 具有较高的实体识别精度。

2.2.4 实体关系抽取

关系抽取本质上是对句子中的语义关系进行判断。针对爆破工艺安全管理领域的结构化、半结构化采取了基于规则的抽取方法。由于标准规范文件内容具有较强的层次性特征, 属于半结构化数据, 因此可通过结构化文本解析实现工艺参数及安全要素的自动提取。采用 open 函数逐行读取标准文件的 txt 文本, 每行作为独立条目, 通过层级编号解析与语义片段分割完成实体与关系的抽取。具体步骤如下:

首先, 根据编号归属规则对补充了规范文本中开头的层级编号进行解析, 建立中文数字与单位(如“章”“节”“条”)的映射表, 通过加权规则确定条目的归属关系。其次, 根据关键词定位规则当检测到如“第 3 章 爆破工程”下的条目内容时, 将该条目的文本定义为与工艺方法相关的实体; 若检测到“条”单位且内容涉及如“炸药装填”、“填塞长度”、“警戒距离”等表述时, 则提取为具体爆破工艺或安全管理要素, 通过分句分析与量化提取, 从“填塞长度不小于孔深 1/3”中提取量化属性, 构建以“填塞长度—包含—孔深”为主干的三元组并根据上下文分析赋予相应的实体属性。

针对标准文件的细化条目及研究文献等非结构化的描述性文本, 采用预训练模型编码文本后, 通过跨度标注识别实体边界及关系类型; 例如“炮孔装药量不得超过标准规定, 且填塞长度应不小于孔深的 1/3”, 采用分号或逗号切分子句, 利用 find 函数定位关键词, 从“装药量”至数值描述前的文本段提取核心工艺参数, 同时提取量化描述作为属性存储并根据其所属段落归属建立与爆破设计、施工检查、安全要求等类别之间的基本关系, 形成标准化的实体关系三元组。

通过以上过程, 可系统性地解析数据库中的工艺设计、安全控制及异常防范等核心内容, 并以实体-关系-属性三元组的形式规范化存储, 支持后续的问答系统应用。

2.3 图数据库储存

2.3.1 基于 Neo4j 的知识存储

Neo4j 图数据库以“键-值”对的形式组织、索引和存储节点之间的关系, 支持完整的事务管理, 具有高可用性和拓展性, 非常适合表示和存储关联密集型数据^[25]。因此, 采用 Neo4j 图数据库对包含大量非结构化数据的露天煤矿成本因素进行存储。

将语料库中抽取出的实体、关系、属性借助 Cypher 命令实现批量导入, 具体存储过程如下:

- (1) 使用 cypher 语句中的 load 命令进行 csv 文件的读取;
- (2) 按行读取节点, 判断节点是否存在, 若不存在则拼接 create 语句新建节点;
- (3) 循环遍历所有节点进行步骤 2;
- (4) 按行读取关系节点, 判断头尾节点是否存在, 若不存在则进行新建都存在则使用 match 语句匹配到头尾节点;
- (5) 用 create 创建关系及其属性并指向头尾节点;
- (6) 遍历所有关系完成步骤 5;
- (7) 根据文件手动添加不符合模式的节点和关系。

2.3.2 知识图谱可视化

构建后的知识图谱如图所示。其中实体以圆圈表示, 关系以带箭头的线段表示, 知识图谱右侧的圆角矩形代表此图所包含的所有实体类型。基于前文的知识抽取与知识导入工作, 共得到 3995 个实体, 6035 个关系, 如图 8 所示, 为 neo4j 导入的数据显示界面。将其进行存储, 以便有效查询。

2.4 知识查询

知识图谱的可视化界面将爆破工艺安全管理中的关键实体及其关系清晰展示, 构建成一张完整的爆破安全知识网络。通过查询具体实体信息, 可以快速了解与爆破操作相关的作业要素及其安全管理要求。例如, 当查询“装药操作”时, 系统可扩展出相关的“装药方法”“爆破器材类型”“填塞要求”“起爆方式”等多个实体类别, 帮助用户系统掌握作业规范。

此外, 通过实体标准化和上下文关联映射, 解决了传统安全管理中术语混用、责任边界不清等问题。系统通过结构化关系展示, 如“装药人员”与“爆破器材管理”的职责关联、“起爆操作”与“警戒范围设定”的流程衔接, 帮助现场管理人员梳理作业流程中各节点的具体要求。例如, 能够准确区分“深孔爆破”与“浅孔爆破”在装药方式与填塞要求上的差异, 从而保障各类作业按规范实施。

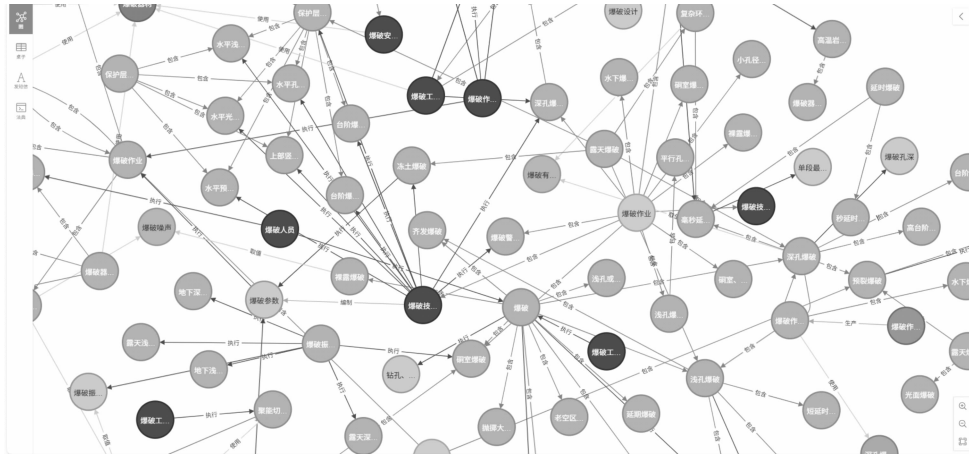


图 8 爆破工艺安全管理知识图谱

Fig. 8 Knowledge mapping of blasting process safety management

3 爆破安全知识问答系统

3.1 知识问答系统架构

在前文所述的知识图谱与知识推理的基础上,设计并实现了露天煤矿成本知识问答系统,基于露天煤矿爆破安全工艺管理的智能问答模块主要包括工艺安全知识问答、知识图谱管理等功能,并可根据后续数据的更新、新兴技术的发展对知识库进行管理 & 更新。

露天煤矿成本知识问答系统基于用户登录后的

交互流程展开,实现从问题输入到知识呈现的整体处理,其系统架构如图 9 所示。当用户在网页端提交安全管理的相关问题时,问题集合模块通过 Atlas 三元组问题转换及数据增强技术扩展原始语料库,将工艺描述、设备维护等非结构化数据转化为标准化问题集;问题相似度计算模块采用 SimBERT 模型,快速筛选与用户提问最接近的预存问题。若匹配度达到阈值,则直接调用内置答案反馈至从业人员界面。

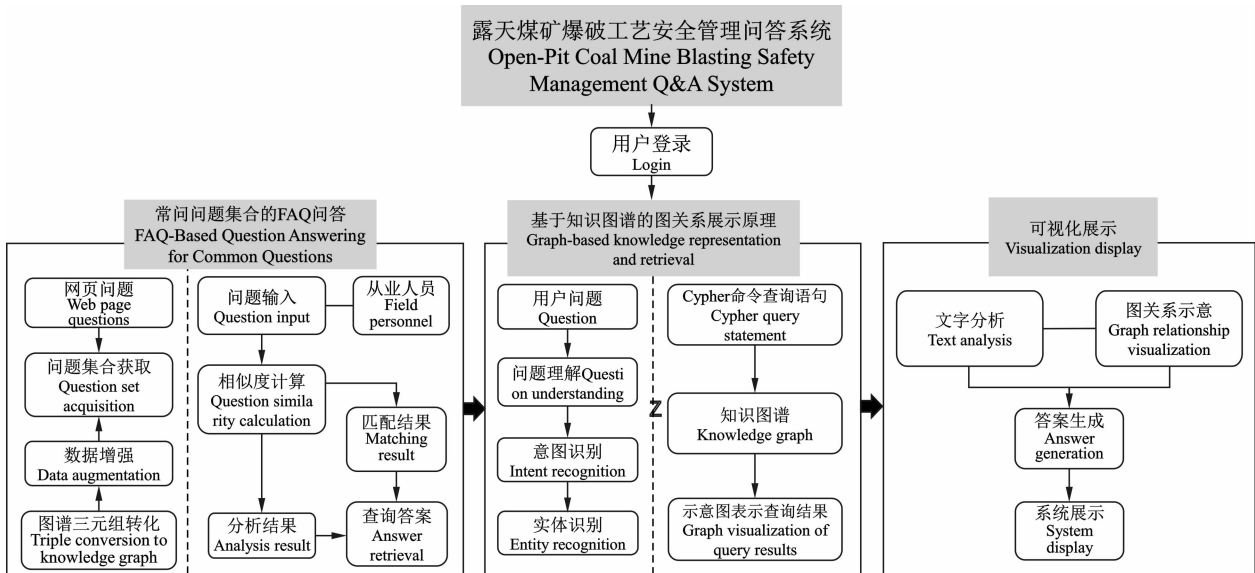


图 9 问答系统架构

Fig. 9 Q&A system architecture

对于涉及不同工艺的复杂查询,则调用知识图谱解析通道。问题理解模块同步执行意图识别与实体抽取,定位具体三元组,并转化为结构化查询指令,支持从业人员通过拖拽交互探索不同安全管理方法。

3.2 系统展示

本节将对研发的露天煤矿爆破工艺安全管理问答系统通过网页方式进行展示并实现交互。如图 10 即为知识图谱问答系统的主界面。



图 10 问答系统登录界面

Fig. 10 Q&A system login interface

问答系统主界面分为两个板块,左侧功能列表显示界面和右侧的问答实现界面。当用户使用问答功能时,在问题输入界面用户可以文字的方式键入

自己想要咨询的问题,如:“发生拒爆情况时现场人员应如何处理?”如图 11 所示,是输入问题及生成答案的状态显示。



图 11 问答主界面

Fig. 11 Q&A system home screen

当用户使用关系可视化功能进行检索时,基于模糊搜索,用户只需键入任意关键字或关键词,即可得到所有与其相关的实体和关系图,并予以展示,如图 12 所示。此功能可以帮助用户获得工艺及管理间关系更加清晰直观地了解。所设计的问答系统相较于传统搜索引擎及成本分析方法,具有系统化、精确化的优点。

4 结论

本研究构建的露天煤矿爆破工艺安全管理知识有效破解了爆破知识碎片化问题,知识问答系统为

安全管理决策优化提供了新的方法支持。然而,系统仍存在局限性,尤其是数据源有限,在超出知识范围时无法提供有效回答。具体结论如下:

(1)通过整合包含标准规范文件、爆破相关研究文献及企业爆破应急预案共 88 篇文献,构建了覆盖全生产周期的爆破工艺安全管理知识。采用 BERT-BiLSTM-CRF 模型,实现了对非结构化文本的自动信息抽取,解决了传统方法在复合实体识别中的精度问题。知识网络共包含 3995 项成本因素实体和 6035 类关联关系,提出的人工与机器结合的知识抽取方法为领域知识集成提供了依据。

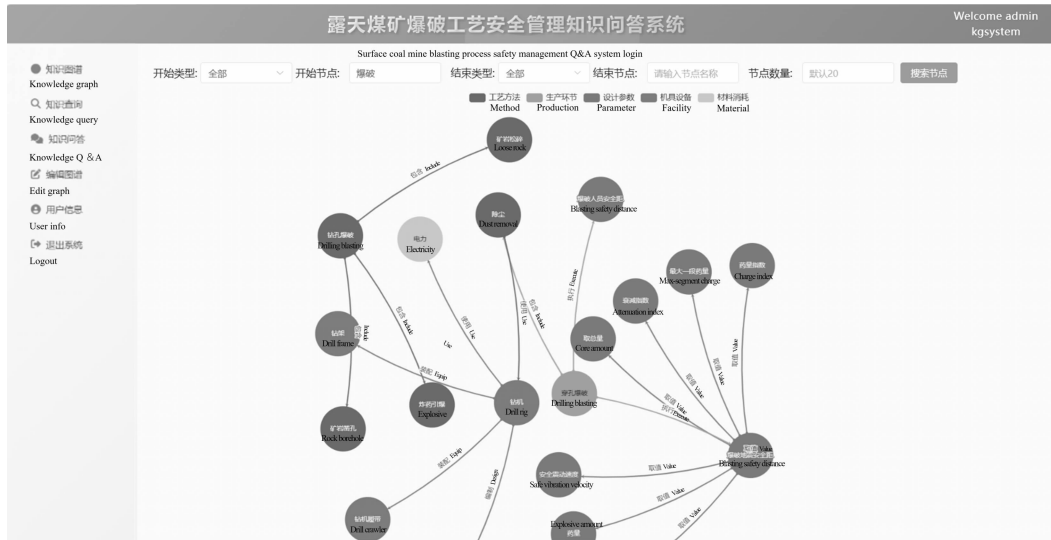


图 12 知识图谱查询界面

Fig. 12 Knowledge graph query interface

(2) 基于 Neo4j 可视化平台支持交互式图谱查询,结合语义检索技术,形成双通道智能识别系统,提高了成本知识查询及分析效率。当前模型在少样本实体标注场景下仍存在 10% ~ 25% 的识别误差,需通过主动学习机制优化标注数据质量。

目前知识图谱数据主要来源于标准规范与文献资料,存在实时性与动态适应性不足的问题。后续发布新的规范标准后,可采用预训练的 Bert-BiLSTM-CRF 模型通过结构化规则解析与人工辅助标注方式提取新增实体和关系,并利用 Neo4j 的 Cypher API 实现图谱的增量更新。同时,系统预留人工审核接口,便于领域专家参与校正与补充,确保图谱内容的准确性与时效性,形成“标准更新—规则解析—图谱拓展”的更新流程。为进一步提升系统对复杂作业场景的感知能力,未来研究将引入多模态数据源,包括爆破现场的传感器监测数据、作业日志、图像视频等,通过时间同步与语义映射方法将多源数据融合入知识图谱,构建支持实时预警与动态决策的多模态爆破安全管理系统。且当前采用的基于规则的实体关系抽取方法其泛化能力受限于人工定义的逻辑边界,难以覆盖复杂语境下的语义关联,未来将着重于端到端的实体关系联合抽取框架的改进方向,通过共享编码层同步优化实体识别与关系分类任务,利用注意力机制强化跨实体语义交互,并结合预训练语言模型的迁移学习能力,突破传统规则方法的泛化瓶颈,为矿山爆破安全管理提供更加准确的决策支持。

参考文献 (References)

[1] 卢文波,孟 婷,胡英国. 岩石爆破破碎模拟和块度预

报的研究现状与展望[J]. 工程爆破,2024,30(5):20-28.

[1] LU Wen-bo, MENG Ting, HU Ying-guo. A review of numerical simulation of rock fragmentation by blasting and prediction of fragments [J]. Engineering Blasting, 2024, 30(5):20-28. (in Chinese)

[2] 梁亚男,武文越,宿海芬. 露天矿爆破安全事故树分析[J]. 现代矿业,2015,31(11):42-44.

[2] LIANG Ya-nan, WU Wen-yue, SU Hai-fen. Analysis of blasting safety accident trees in open pit mines [J]. Modern Mining, 2015, 31(11):42-44. (in Chinese)

[3] 刘佳兴,何华刚,周应江,等. 煤矿事故原因知识图谱构建技术[C]//中国职业安全健康协会. 2023 年度中国职业安全健康协会科技大会暨安全科学与安全工程国际会议摘要集,2023:098403.

[3] LIU Jia-xing, HE Hua-gang, ZHOU Ying-jiang, et al. Construction technology of knowledge graph of coal mine accident cause [C] // Abstracts of the 2023 Chinese Occupational Safety and Health Association Science and Technology Conference and International Conference on Safety Science and Safety Engineering, 2023:098403. (in Chinese)

[4] 祝 楷,傅 贵,阚 瞳,等. 煤矿爆破作业的不安全动作研究[J]. 煤炭工程,2015,47(12):65-68.

[4] ZHU Kai, FU Gui, KAN Tong, et al. Study on unsafe act of mine blasting operation [J]. Coal Engineering, 2015, 47(12):65-68. (in Chinese)

[5] 程 磊,孙 洁. 2016—2022 年我国煤矿事故统计与规律分析[J]. 煤炭工程,2023,55(11):125-129.

[5] CHENG Lei, SUN Jie. Statistics and law analysis of coal mine accidents in China from 2016 to 2022 [J]. Coal Engineering, 2023, 55(11):125-129. (in Chinese)

- [6] MOHAMMAD Rezaei, M Monjezi, FARIBORZ Matinpoor, et al. Simulation of induced flyrock due to open-pit blasting using the PCA-CART hybrid modeling[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2023, 129:102844.
- [7] LIU Can, WANG Fei-fei, REN Qing-yang, et al. Field test of blasting vibration and adjacent slope stability under the influence of blasting vibration in mining. [J]. Journal of Vibroengineering, 2023, 25(4):713-728.
- [8] MARAL Malekian, M Momayez, P Bellett, et al. Wall control and blast pattern analysis using blast vision[®] technology[J]. The American Journal of Interdisciplinary Innovations and Research, 2023, 5(4):31-37.
- [9] 柯丽华, 陈魁香, 胡南燕, 等. 基于 SNA 的露天矿爆破安全风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(10):4856.
- [9] KE Li-hua, CHEN Kui-xiang, HU Nan-yan, et al. Safety risk assessment of blasting in open-pit mine based on SNA [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(10):4856. (in Chinese)
- [10] 岳中文, 吴羽笛, 魏正, 等. 基于 PSO-LSSVM 模型的露天矿爆破振动效应预测[J]. 工程爆破, 2020, 26(6):1-8.
- [10] YUE Zhong-wen, WU Yu-shao, WEI Zheng, et al. Prediction of blasting vibration effect in open-pit mine based on PSO-LSSVM model[J]. Engineering Blasting, 2020, 26(6):1-8. (in Chinese)
- [11] 李爱陈, 马建军, 池恩安, 等. 基于改进 AHP 法的露天矿爆破效果影响因素分析[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(10):5-10.
- [11] LI Ai-chen, MA Jian-jun, CHI En-an, et al. Influence factors of open-pit blasting effect based on improved AHP [J]. Mining Research and Development, 2019, 39(10):5-10. (in Chinese)
- [12] 张华, 鞠兴军, 张津鹏, 等. 基于模糊综合-集值统计法的露天煤矿爆破安全风险评价[J]. 工业安全与环保, 2024, 50(4):50-54.
- [12] ZHANG Hua, JU Xing-jun, ZHANG Jin-peng, et al. Safety risk assessment of open pit coal mine blasting based on fuzzycomprehensive evaluation and set value statistics [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2024, 50(4):50-54. (in Chinese)
- [13] NADEAU D, SEKINE S. A survey of named entity recognition and classification [J]. Lingvisticae Investigationes, 2007, 30(1):3-26.
- [14] SONG Jian-wei, DENG Yi-chuan, SU Cheng. Research on named entity recognition of construction safety accident text based on pre-trained language model[J]. Journal of Graphics, 2021, 42(2):307.
- [15] 刘辉, 童炳瑞, 潘锴, 等. 我国应急管理标准化研究进展文献计量与知识图谱分析[J]. 中国应急管理科学, 2025(3):80-97.
- [15] LIU Hui, TONG Bing-rui, PAN Kai, et al. Bibliometric analysis of progress in emergency management standardization research in China[J]. Journal of China Emergency Management Science, 2025(3):80-97. (in Chinese)
- [16] SHAH Jahan, MUHAMMAD Khan, HABIB Ullah, et al. Bidirectional Language Modeling: A Systematic Literature Review, Scientific Programming [J]. Scientific Programming, 2021, 2021(1):6641832.
- [17] 王君仙. 基于 BERT-BiLSTM-CRF 模型的中文命名实体识别研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023: 000891.
- [17] WANG Jun-xian. Research on chinese named entity recognition based on BERT-BiLSTM-CRF Model [D]. Beijing: China University of Petroleum, Beijing, 2023: 000891. (in Chinese)
- [18] 张念, 周彩凤, 万飞, 等. 基于 BERT-BiLSTM-CRF 的隧道施工安全领域命名实体识别[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(12):56-63.
- [18] ZHANG Nian, ZHOU Cai-feng, WAN Fei, et al. Tunnel construction safety domain named entity recognition based on BERT-BiLSTM-CRF [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(12):56-63. (in Chinese)
- [19] JIN Jian-gang. Fault diagnosis of coal mine equipment based on improved ga optimized BP neural network [J]. International Journal of Smart Home, 2016, 10(5):275-284.
- [20] 潘理虎, 张佳宇, 张英俊, 等. 煤矿领域知识图谱构建[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(8):47-64.
- [20] PAN Li-hu, ZHANG Jia-yu, ZHANG Ying-jun, et al. Construction of knowledge graph in coal mine domain [J]. Computer Applications and Software, 2019, 36(8):47-64. (in Chinese)
- [21] 刘永立, 王海涛. 基于知识图谱的火灾及耦合灾害应急处置管理[J]. 煤矿安全, 2022, 53(9):144-150.
- [21] LIU Yong-li, WANG Hai-tao. Fire and coupling disaster emergency management based on mapping knowledge domain [J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(9):144-150. (in Chinese)
- [22] MENG Fan-qi, YANG Shuai-song, WANG Jing-dong, et al. Creating knowledge graph of electric powerequipment faults based on BERT - BiLSTM - CRF model [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2022, 17(4):2507-2516.
- [23] 焦凯楠, 李欣, 朱容辰. 中文领域命名实体识别综述[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(16):1-15.
- [23] JIAO Kai-nan, LI Xin, ZHU Rong-chen. Overview of chinese domain named entity recognition [J]. Computer En-

- gineering and Applications, 2021, 57 (16) : 1-15. (in Chinese)
- [24] ROSSI A, BARBOSA D, FIRMANI D, et al. Knowledge graph embedding for link prediction: A comparative analysis[J]. ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data (TKDD), 2021, 15(2) : 1-49.
- [25] BYTYCI Aurite, LORIK Ramosaj, Eliot Bytyci. Review of automatic and semi-automatic creation of knowledge graphs from structured and unstructured data. [C] // RTA-CSIT, 2023 : 72-79.
-
- (上接第181页)
- [4] 付俊,周罕,徐继刘,等. 露天矿山石灰岩边坡爆破振动特性及规律研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(1) : 32-34.
- [4] FU Jun, ZHOU Han, XU Ji-liu, et al. Study on characteristics and law of blasting vibration for open-pit slopes in limestone mine [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(1) : 32-34. (in Chinese)
- [5] 陈明,卢文波,李鹏,等. 岩质边坡爆破振动速度的高程放大效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11) : 2189-2195.
- [5] CHEN Ming, LU Wen-bo, LI Peng, et al. Elevation amplification effect of blasting vibration velocity in rock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11) : 2189-2195. (in Chinese)
- [6] 贾晓敏. 爆破振动作用下台阶边坡的动力响应及稳定性分析[J]. 矿冶工程, 2018, 38(3) : 35-39.
- [6] JIA Xiao-min. Dynamic response and stability analysis for a bench slope under blasting vibration [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018, 38(3) : 35-39. (in Chinese)
- [7] 孙鹏昌,卢文波,雷振,等. 单薄山体岩质高边坡爆破振动响应分析及安全控制[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5) : 877-885.
- [7] SUN Peng-chang, LU Wen-bo, LEI Zhen, et al. Blasting vibration response and control of high rock slopes of thin mountain [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(5) : 877-885. (in Chinese)
- [8] 朱传统,刘宏根,梅锦煜. 地震波参数沿边坡坡面传播规律公式的选择[J]. 爆破, 1988(2) : 30-31.
- [8] ZHU Chuan-tong, LIU Hong-gen, MEI Jin-yu. Selection of formulas for the propagation law of seismic wave parameters along the slope surface [J]. Blasting, 1988(2) : 30-31. (in Chinese)
- [9] 贺高威,窦超杰,轩朴实,等. 露天矿山高台阶爆破振动分析[J]. 化工矿物与加工, 2020, 49(3) : 12-16.
- [9] HE Gao-wei, DOU Chao-jie, XUAN Pu-shi, et al. Vibration analysis of high bench blasting in open-pit mine [J]. Industrial Minerals & Processing, 2020, 49(3) : 12-16. (in Chinese)
- [10] 周同岭,杨秀甫,翁家杰. 爆破地震高程效应的实验研究[J]. 建井技术, 1997(S1) : 32-36.
- [10] ZHOU Tong-ling, YANG Xiu-fu, WENG Jia-jie. Experimental study on the altitude effect of blasting seismicity [J]. Mine Construction Technology, 1997(S1) : 32-36. (in Chinese)
- [11] 何理,钟冬望,陈晨,等. 岩质高边坡开挖施工的爆破振动监测与分析[J]. 金属矿山, 2017(1) : 6-10.
- [11] HE Li, ZHONG Dong-wang, CHEN Chen, et al. Monitoring and analysis of blasting vibration in high rocky slope excavation [J]. Metal Mine, 2017(1) : 6-10. (in Chinese)
- [12] 叶海旺,袁尔君,雷涛,等. 基于量纲分析的爆破振动质点峰值速度预测公式[J]. 金属矿山, 2019(5) : 56-61.
- [12] YE Hai-wang, YUAN Er-jun, LEI Tao, et al. Blasting vibration peak particle velocity prediction formula based on dimensional analysis method [J]. Metal Mine, 2019(5) : 56-61. (in Chinese)
- [12] YE Hai-wang, YUAN Er-jun, LEI Tao, et al. Blasting vibration peak particle velocity prediction formula based on dimensional analysis method [J]. Metal Mine, 2019(5) : 56-61. (in Chinese)
- [13] 包松,郭连军,莫宏毅,等. 高程影响下爆破振动速度衰减模型优选研究[J]. 有色金属工程, 2022, 12(9) : 115-121.
- [13] BAO Song, GUO Lian-jun, MO Hong-yi, et al. Preferred model for blast vibration velocity attenuation under the influence of elevation [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(9) : 115-121. (in Chinese)
- [13] BAO Song, GUO Lian-jun, MO Hong-yi, et al. Preferred model for blast vibration velocity attenuation under the influence of elevation [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(9) : 115-121. (in Chinese)
- [14] 蒋楠,周传波,平雯,等. 岩质边坡爆破振动速度高程效应[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(1) : 237-243.
- [14] JIANG Nan, ZHOU Chuan-bo, PING Wen, et al. Altitude effect of blasting vibration velocity in rock slopes [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(1) : 237-243. (in Chinese)
- [14] JIANG Nan, ZHOU Chuan-bo, PING Wen, et al. Altitude effect of blasting vibration velocity in rock slopes [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(1) : 237-243. (in Chinese)
- [15] 周文海,梁瑞,余建平,等. 边坡抛掷爆破峰值质点振动速度的无量纲分析[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(5) : 76-83.
- [15] ZHOU Wen-hai, LIANG Rui, YU Jian-ping, et al. Dimensionless analysis on peak particle vibration velocity induced by slope casting blast [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(5) : 76-83. (in Chinese)
- [15] ZHOU Wen-hai, LIANG Rui, YU Jian-ping, et al. Dimensionless analysis on peak particle vibration velocity induced by slope casting blast [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(5) : 76-83. (in Chinese)
- [16] 钟冬望. 爆炸荷载下岩质边坡动力响应及控制[M]. 北京: 科学出版社, 2011.