

煤矿螺纹钢锚杆螺帽 - 盖板连接松脱扭矩合理性研究

张立强*, 张智斌, 王贝贝

陕西蒲白矿山支护有限公司, 陕西 渭南

收稿日期: 2026年4月24日; 录用日期: 2026年5月20日; 发布日期: 2026年7月7日

摘要

针对煤矿井下螺纹钢锚杆安装过程中螺帽 - 盖板连接件松脱困难、施工设备负荷偏大、单根锚杆安装时间延长以及锚固质量波动等问题, 在现场调查基础上, 采用机理分析、分组试验、统计评价框架和文献对比相结合的方法, 对螺帽 - 盖板连接松脱扭矩的合理取值进行了研究。结果表明, 松脱扭矩的本质是施工启动扭矩, 其主要作用是保证盖板在安装初期顺利松脱, 使锚杆进入连续旋转搅拌状态, 而不是通过提高该数值直接提高锚固性能。据此设计实验, A、B、C、D四组平均锚固力分别为261.1、254.3、258.7和218.1 kN。当松脱扭矩处于60~120 N·m时, 盖板松脱顺畅, 树脂搅拌状态较稳定, 锚固力满足现场支护要求; 当松脱扭矩超过120 N·m后, 钻机启动负荷和操作阻力明显增加; 当扭矩达到180~200 N·m时, 常规锚杆钻机难以稳定开启盖板, 部分试件出现搅拌不连续和混合不均现象, 锚固力明显降低。结合螺纹连接扭矩控制、树脂锚固剂搅拌及锚杆安装质量研究, 松脱扭矩应与施工设备额定能力、锚固剂搅拌工艺和现场可操作性协同确定, 避免将其简单理解为“越大越好”。研究结果可为煤矿螺纹钢锚杆产品设计、现场施工和质量控制提供参考。

关键词

煤矿支护, 螺纹钢锚杆, 螺帽 - 盖板连接, 松脱扭矩, 树脂锚固剂, 统计分析, 施工适配性

Research on the Rationality of Loosening Torque for Nut-Plate Connection of Threaded Steel Bolts in Coal Mines

Liqiang Zhang*, Zhibin Zhang, Beibei Wang

Shaanxi Pubai Mine Support Co., Ltd., Weinan Shaanxi

Received: April 24, 2026; accepted: May 20, 2026; published: July 7, 2026

*通讯作者: 张立强(1956—), 男, 陕西渭南人, 陕西蒲白矿山支护有限公司董事长, 主要从事矿山巷道支护管理等方面工作。

文章引用: 张立强, 张智斌, 王贝贝. 煤矿螺纹钢锚杆螺帽-盖板连接松脱扭矩合理性研究[J]. 矿山工程, 2026, 14(4): 907-914. DOI: 10.12677/me.2026.144089

Abstract

In view of the practical problems of difficult loosening of the nut-plate connection, excessive equipment load, prolonged installation time, and fluctuation of anchoring quality during the installation of threaded steel bolts in coal mines, the rational range of the loosening torque was studied by means of mechanism analysis, grouped tests, statistical evaluation framework, and literature comparison based on field investigations. The results show that the loosening torque is essentially a construction starting torque. Its main role is to ensure that the cover plate can be released smoothly at the initial installation stage and that the bolt can enter a continuous rotating and mixing state, rather than directly improving anchoring performance by increasing the torque value. Experiments were designed accordingly: the average anchoring forces of groups A, B, C, and D were 261.1, 254.3, 258.7, and 218.1 kN, respectively. When the loosening torque was controlled within 60~120 N·m, the plate could be released smoothly, the resin mixing process was relatively stable, and the anchoring force met the field support requirements. When the torque exceeded 120 N·m, the starting load and operating resistance of the bolting machine increased significantly. When the torque reached 180~200 N·m, the conventional bolting machine could hardly release the plate stably, and discontinuous mixing and non-uniform resin distribution occurred in some specimens, leading to a significant decrease in anchoring force. Combined with studies on torque control of threaded connections, resin grout mixing and bolt installation quality, the loosening torque should be determined in coordination with equipment capacity, resin mixing requirements, and field operability, rather than being simplistically interpreted as “the larger, the better”. The results provide reference for product design, on-site construction, and quality control of threaded steel bolts in coal mines.

Keywords

Coal Mine Support, Threaded Steel Bolt, Nut-Plate Connection, Loosening Torque, Resin Anchoring Agent, Statistical Analysis, Construction Adaptability

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

螺纹钢锚杆是煤矿井下巷道围岩控制中应用最广泛的支护构件之一，其安装质量直接关系到巷道支护效果、围岩稳定性和作业安全[1]。完整的树脂锚固锚杆安装过程一般包括钻孔、装填锚固剂、插入锚杆、旋转搅拌、托盘就位、螺帽拧紧和预紧力形成等环节[2]。其中，树脂锚固剂能否在规定时间内被充分搅拌，并在锚杆-锚固剂-孔壁之间形成连续、密实且强度稳定的黏结界面，是决定锚固质量的关键[3]。

在工程实践中，部分单位将螺帽-盖板连接松脱扭矩简单理解为“越大越安全”，在产品设计和出厂验收或现场使用中盲目提高该指标，导致盖板开启困难、钻机启动负荷偏大、设备高负荷运转时间延长、施工效率下降以及螺帽、螺纹、盖板等局部构件损伤。尤其在采用额定转矩有限的气动锚杆钻机时，过大的松脱扭矩会直接压缩有效搅拌时间，破坏锚固剂搅拌过程的连续性，从而造成锚固质量波动[4][5]。

需要明确的是，螺帽-盖板连接松脱扭矩与锚杆安装完成后的预紧扭矩并非同一概念。预紧扭矩作用于终拧阶段，目的是形成必要的轴向预拉力和支护构件贴合力；松脱扭矩则作用于施工初始阶段，本

质上是使盖板脱离约束并使锚杆进入正常旋转状态的启动力矩[6][7]。若将终拧阶段的力学目标错误移植到施工启动力矩控制中, 容易导致技术指标失真和现场控制混乱[8]。

2. 研究思路与方法

本文围绕“施工可开启、搅拌可连续、锚固可达标”的主线开展研究。对井下螺帽-盖板连接开启困难、设备负荷偏大和施工效率下降等问题进行归纳; 结合螺纹连接和树脂锚固锚杆施工机理, 分析松脱扭矩的功能边界及其与树脂搅拌过程之间的关系; 通过分组试验比较不同松脱扭矩水平下盖板松脱状态、钻机负荷表现、树脂混合均匀性和锚固力差异; 将试验结果与已有螺栓扭矩控制、锚杆组件匹配性、树脂锚固剂搅拌和锚固质量研究进行对比, 提出工程控制建议。

采用现场调查梳理典型施工问题及其表现形式; 机理分析松脱扭矩和预紧扭矩的作用时点、目标和评价逻辑; 试验验证不同扭矩区间下施工适配性和锚固效果; 统计分析锚固力均值、标准差、变异系数和组间差异; 文献对比本研究与既有研究之间的继承、补充和修正关系。

3. 作用机理分析

3.1. 松脱扭矩与预紧扭矩的区别

螺帽-盖板连接松脱扭矩发生在锚杆安装初始阶段, 其作用是克服连接件之间的初始摩擦阻力、局部嵌合作用和装配阻力, 使盖板从约束状态转变为可随锚杆安装过程正常运行的状态[9]。该扭矩属于施工启动力矩, 其合理性应从“能否被施工设备稳定开启”和“是否妨碍锚固剂规定搅拌工艺”两个方面评价。

预紧扭矩则发生在树脂锚固剂固化并完成锚杆终拧阶段, 其目标是使锚杆杆体产生轴向预拉力, 并通过托盘、螺帽等构件使围岩获得必要约束。预紧扭矩与预紧力之间受螺纹摩擦、端面摩擦、表面状态和润滑条件等因素影响, 并存在较大离散性[10][11]。因此, 松脱扭矩不能作为预紧扭矩的替代指标, 也不能以“数值越大越可靠”的逻辑进行评价。

3.2. 松脱扭矩对树脂搅拌和锚固质量的影响路径

树脂锚固剂的成锚质量主要取决于锚固剂药卷破碎、树脂与固化剂混合、旋转搅拌时间、搅拌转速、推进速度、孔径与锚杆直径匹配以及围岩孔壁条件等因素[12]。松脱扭矩本身并不直接提高树脂材料强度, 也不直接增加锚固界面黏结强度[13]。其对锚固质量的影响主要表现为间接路径: 当松脱扭矩处于设备可顺利开启区间时, 施工过程连续, 锚固剂可以按规定时间和转速完成搅拌; 当松脱扭矩过大时, 钻机启动受阻、转速波动和搅拌中断增加, 进而造成树脂混合不均或有效搅拌时间不足, 最终降低锚固性能[14]。

由此可见, 松脱扭矩的控制目标不是追求高值, 而是在保证盖板可靠松脱的基础上, 尽量降低对设备启动和连续搅拌过程的干扰。对于现场常用额定转矩约 110 N·m 的气动锚杆钻机, 若松脱扭矩长期接近或超过额定转矩, 设备将处于高负荷状态, 施工稳定性和锚固质量均难以保证[15]。

4. 试验设计与数据处理

4.1. 试验材料与设备

试验选取 MSGLW-500-22×2400 mm 螺纹钢锚杆及配套螺帽、托盘, 锚固材料采用现场常用 K 型快速树脂锚固剂和 Z 型中速树脂锚固剂。试验设备为 MQT-110/2.5 型气动锚杆钻机, 额定转矩 110 N·m, 失速转矩 210 N·m; 配套扭矩测试仪量程为 0~500 N·m, 精度为±1 N·m; 锚杆拉拔仪量程为 0~500 kN, 具体见表 1。

Table 1. Experimental materials and equipment
表 1. 试验材料与设备

类别	型号或参数	用途	备注
锚杆	MSGLW-500-22 × 2400 mm	试验杆体	与现场常用支护规格一致
螺帽 - 盖板连接件	配套螺帽、盖板、托盘	形成待松脱连接	按设定扭矩分组装配
锚固材料	K 型快速、Z 型中速树脂锚固剂	形成锚固体	按现场工艺组合使用
锚杆钻机	MQT-110/2.5 型气动锚杆钻机	驱动锚杆旋转搅拌	额定扭矩 110 N·m，失速扭矩 210 N·m
扭矩测试仪	0~500 N·m，精度±1 N·m	测试松脱扭矩	用于分组控制与校核
锚杆拉拔仪	0~500 kN	测试锚固力	用于固化后拉拔试验

4.2. 分组方案

为考察不同松脱扭矩水平对施工和锚固效果的影响，将试验分为 4 组，每组 10 根锚杆，分别设置不同的螺帽 - 盖板连接松脱扭矩，如表 2 所示。A 组为 60~80 N·m，用于验证较低扭矩下盖板能否顺利松脱；B 组为 100~120 N·m，用于模拟与钻机额定扭矩较为匹配的合理区间；C 组为 140~160 N·m，用于考察偏高扭矩水平下设备负荷和施工状态；D 组为 180~200 N·m，用于模拟接近失速扭矩时的极限工况。

Table 2. Grouping schemes based on different breakaway torque values
表 2. 不同松脱扭矩的分组方案

组别	松脱扭矩范围/N·m	样本量/根	设计目的	相对钻机额定扭矩关系
A	60~80	10	验证较低扭矩下施工可行性	低于额定扭矩
B	100~120	10	模拟推荐控制区间上部水平	接近额定扭矩
C	140~160	10	考察偏高扭矩对设备负荷影响	超过额定扭矩
D	180~200	10	模拟接近失速扭矩极限工况	接近失速扭矩

4.3. 试验步骤

按工艺要求装填锚固剂并插入锚杆；安装托盘和螺帽 - 盖板组件；采用扭矩测试仪校核连接件松脱扭矩；采用锚杆钻机驱动锚杆旋转，记录盖板松脱过程、启动状态、转速稳定性和设备运行现象；按锚固剂规定时间完成搅拌；待树脂固化达到测试要求后进行拉拔试验；最后对典型试件进行剖样检查，观察树脂混合均匀性、结块、空洞和药卷残膜等现象。

4.4. 数据处理与统计分析方法

锚固力数据以均值 ± 标准差表示，并计算变异系数 CV，以评价同组内数据离散性。不同扭矩组之间的锚固力差异拟采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)进行检验；若方差分析达到显著水平，则进一步采用 Tukey 法或 LSD 法进行多重比较。显著性水平取 $\alpha = 0.05$ ， $p < 0.05$ 表示差异显著， $p < 0.01$ 表示差异极显著。

在剖样照片中选取锚固剂混合区作为感兴趣区域，计算灰度均值、灰度标准差和灰度变异系数 CV_I，并定义混合均匀性指数 $U = (1 - CV_I) \times 100\%$ 。U 值越高，表明树脂与固化剂混合越均匀。

5. 试验结果与分析

5.1. 盖板松脱与设备运行状态

各组盖板松脱和设备运行状态见表 3。A 组(60~80 N·m)盖板能够顺利松脱，钻机运行平稳，无明显超负荷现象；B 组(100~120 N·m)同样能够顺利开启，设备运行基本正常；C 组(140~160 N·m)虽可实现松脱，但钻机负荷明显增大，出现启动困难和轻微异响；D 组(180~200 N·m)盖板难以正常松脱，钻机负荷过大，常规工况下难以保证稳定施工。该结果表明，当松脱扭矩超过设备额定转矩后，施工可操作性开始下降；当接近失速转矩时，松脱工序本身已成为制约施工连续性的主要因素[16] [17]。

Table 3. Cover plate loosening and equipment operating status under different loosening torques
表 3. 不同松脱扭矩下盖板松脱与设备运行状态

组别	扭矩范围/N·m	盖板松脱情况	设备运行表现	施工适配性评价	建议量化指标
A	60~80	顺利松脱	运行平稳，无明显超负荷	适配性好	开启成功率、峰值扭矩、负荷率
B	100~120	顺利松脱	基本正常，接近额定能力	适配性较好	开启时间、负荷率、转速波动
C	140~160	可松脱	负荷明显增大，偶有启动困难和轻微异响	适配性下降	峰值扭矩、气压/电流波动、启动延迟
D	180~200	难以正常松脱	负荷过大，常规工况下难以稳定施工	不推荐	失败率、失速次数、搅拌中断次数

5.2. 树脂搅拌均匀性

从剖样观察结果看(具体见表 4)，A 组、B 组和 C 组未见明显结块和空洞，树脂基本能够实现均匀混合；D 组由于盖板开启困难和搅拌过程不连续，部分试件出现树脂混合不均现象。该结果说明，树脂搅拌效果主要受搅拌时间、转速、推进速度、药卷破碎程度和孔壁条件控制，只要松脱扭矩处于设备可顺利开启并能维持连续搅拌的区间，并不会因适度提高松脱扭矩而获得额外改善。相反，过高松脱扭矩会通过破坏施工连续性而降低混合均匀性[18] [19]。

Table 4. Quantitative evaluation indicators for equipment load and mixing uniformity
表 4. 设备负荷与搅拌均匀性量化评价指标

指标类别	量化指标	计算或记录方法	评价意义	本研究应用建议
设备负荷	负荷率 η	$\eta = \text{实测峰值启动扭矩} / \text{钻机额定转矩} \times 100\%$	反映钻机是否长期接近过载	建议 $\eta \leq 100\%$ 为宜，超过时需校核设备匹配性
启动过程	开启时间 t_0	从钻机启动至盖板松脱的时间	反映施工启动力矩对效率的影响	建议记录每根锚杆 t_0 并统计均值 $\pm$ SD
旋转稳定性	转速波动率	搅拌阶段转速标准差/平均转速	反映搅拌过程连续性	可用转速传感器或钻机数据采集装置记录
搅拌均匀性	图像均匀性指数 U	$U = (1 - CV_I) \times 100\%$	反映剖样中树脂与固化剂混合均匀程度	建议对剖样照片进行灰度或颜色通道分析
缺陷状态	结块、空洞、残膜比例	剖样统计缺陷面积占比	反映局部未混合或药卷残留	建议作为定性观察的量化补充

5.3. 锚固力结果与统计分析

平均锚固力分别为：A 组 261.1 kN、B 组 254.3 kN、C 组 258.7 kN、D 组 218.1 kN。A~C 组三组平均锚固力较为接近，均满足现场支护要求；D 组平均锚固力明显低于 A~C 组，与其盖板开启困难、设备

负荷过大和搅拌不连续现象相一致。

统计结果显示，A~C 组之间差异不显著，而 D 组显著低于 A~C 组，在设备可稳定开启的范围内，适度改变松脱扭矩不会显著提高锚固力；当松脱扭矩过高并干扰搅拌工艺时，锚固性能才会发生显著劣化。

5.4. 结果讨论

从工程现象和平均锚固力变化趋势来看，A、B、C 三组的锚固力结果差别较小，而 D 组显著降低。这一现象与机理分析相符：松脱扭矩对锚固力的影响并非直接来源于扭矩数值本身，而是来源于其对施工启动、旋转稳定性和树脂搅拌连续性的影响。当松脱扭矩低于或接近设备可稳定输出能力时，锚固剂能按规定时间完成搅拌，锚固性能总体稳定；当松脱扭矩接近失速转矩时，钻机难以稳定开启盖板，搅拌过程被压缩或中断，锚固力随之下降[20]。

从合理区间看，60~120 N·m 能够兼顾盖板顺利松脱、设备负荷可接受和锚固质量稳定；140~160 N·m 虽然仍可实现松脱，但已超过钻机额定转矩，施工风险和设备负荷明显增加；180~200 N·m 接近失速转矩，已不适合作为常规产品控制目标。由于井下钻机型号、气压条件、工人操作方式和锚固剂类型存在差异，本文建议将 60~120 N·m 作为本文设备和材料条件下的合理控制区间，并在工程应用中根据设备额定转矩和现场工况进行校核。

6. 与已有研究的对比及学术贡献

Table 5. Comparison of the results of this study with existing research

表 5. 本文结果与已有研究的对比

文献或研究方向	主要结论	与本文结果的关系	本文补充或修正之处
螺纹连接扭矩 - 预紧力研究	拧紧扭矩与预紧力受螺纹摩擦、支承面摩擦和装配状态影响，二者并非简单线性稳定关系	支持本文区分松脱扭矩和预紧扭矩的观点	将传统螺纹连接扭矩控制思想扩展到锚杆施工启动力矩评价中
振动条件下螺纹松动研究	横向振动、相对滑移和摩擦状态变化会引起预紧力衰退和连接松动	说明螺纹连接安全性不能仅依靠提高某一扭矩值评价	本文进一步指出松脱扭矩过高并不等于安装完成后的支护可靠性更高
树脂锚固剂搅拌参数研究	搅拌时间、转速和推进速度显著影响树脂混合状态和锚固力	与本文“锚固质量取决于搅拌工艺连续性”的结论一致	本文补充了松脱扭矩通过影响施工连续性间接影响搅拌质量的路径
锚杆安装质量与树脂包裹研究	药卷未充分破碎、gloving 和未混合树脂会削弱锚杆荷载传递能力	解释 D 组混合不均和锚固力下降的可能机制	本文从盖板开启阻力角度补充了造成搅拌不连续的工艺原因
锚杆构件匹配性研究	锚杆杆体、托盘、螺母及锚固材料应作为系统进行匹配设计	支持本文关于设备、构件和锚固剂协同设计的建议	本文给出了螺帽 - 盖板松脱扭矩与钻机额定转矩匹配的工程控制思路

如表 5 所示，已有螺栓连接研究多集中于拧紧扭矩、预紧力、摩擦状态和振动松动机制，强调扭矩控制与连接可靠性之间的复杂关系[21]-[23]。本文在吸收该类研究结论的基础上，进一步指出煤矿螺纹钢锚杆螺帽 - 盖板连接松脱扭矩并不是终拧预紧扭矩，其功能目标应定位为施工启动力矩控制。该认识有助于纠正工程中将松脱扭矩误解为“越大越安全”的倾向。

树脂锚固剂相关研究表明，树脂分布、药卷破碎、搅拌时间、转速、推进速度以及孔壁条件均会影响锚固质量。本文试验结果与上述研究总体一致，即锚固质量的核心在于搅拌和固化过程，而非单纯提高某一连接阻力。本文的补充贡献在于将“盖板松脱是否顺畅”纳入锚杆安装质量控制链条，指出过高

松脱扭矩会通过增加设备负荷和中断搅拌过程而降低锚固性能。

与既有研究相比,本文的创新点主要体现在三个方面:第一,明确区分松脱扭矩和预紧扭矩,建立了施工启动力矩评价逻辑;第二,提出松脱扭矩影响锚固质量的间接作用路径,即“过高松脱扭矩-设备负荷增加-搅拌不连续-混合均匀性下降-锚固力降低”;第三,结合MQT-110/2.5型钻机能力,提出60~120 N·m的合理控制区间,并强调不同设备和工况下应进行匹配校核。

7. 工程控制建议

1) 在产品技术文件、出厂检验记录和现场施工交底中,应明确区分“螺帽-盖板连接松脱扭矩”和“锚杆安装完成后的预紧扭矩”。前者用于评价施工初始阶段盖板能否顺利松脱,后者用于评价终拧阶段支护构件能否形成必要预拉力,二者不能混用。

2) 对采用额定转矩约110 N·m的常规锚杆钻机,建议螺帽-盖板连接松脱扭矩优先控制在60~100 N·m;考虑加工、装配和现场波动时,上限不宜明显超过120 N·m。若采用其他型号钻机,应根据额定转矩、失速转矩、气压或电源条件、启动特性和现场工况进行重新校核。

3) 现场质量控制不宜仅以单一松脱扭矩指标作为判定依据,应同步控制锚固剂型号、药卷组合、搅拌时间、钻机转速、推进速度、孔径匹配、终拧工艺和锚固力抽检。建议采用“松脱顺畅性+设备负荷率+规定搅拌时间+剖样均匀性+锚固力抽检”的联合控制方式。

4) 对需提高连接可靠性的产品,不宜简单通过提高松脱扭矩实现,而应从连接结构、盖板形状、螺纹配合、表面处理、加工一致性和施工设备匹配等方面综合优化。

5) 后续研究应增加不同钻机型号、不同锚固剂类型、不同孔径、不同围岩条件和不同施工气压下的对比试验,并采用传感器采集峰值扭矩、转速、气压或电流数据,以提高结论的适用范围和统计稳健性。

8. 结论

1) 螺帽-盖板连接松脱扭矩的本质是施工启动力矩,其主要作用是保证盖板在安装初期顺利松脱并使锚杆进入连续旋转搅拌状态,而不是通过提高该扭矩值直接增强锚固可靠性。

2) 松脱扭矩与锚固剂搅拌效果、锚固性能之间不存在简单正相关关系。其影响主要通过施工过程实现:当松脱扭矩处于设备可稳定开启区间时,锚固性能总体稳定;当松脱扭矩过高并导致设备启动困难或搅拌不连续时,树脂混合均匀性和锚固力会下降。

3) 在本文试验条件下,A、B、C、D组平均锚固力分别为261.1、254.3、258.7和218.1 kN。60~120 N·m的松脱扭矩区间可兼顾施工可操作性、树脂搅拌稳定性和锚固力要求;扭矩超过120 N·m后施工阻力明显增加;达到180~200 N·m时,常规钻机难以稳定开启盖板,并会导致锚固性能明显劣化。

4) 螺帽-盖板连接松脱扭矩的合理设定应以施工设备能力、锚固剂工艺要求和现场可操作性为依据。建议将松脱扭矩作为施工适配性指标进行控制,并与设备负荷率、搅拌时间、搅拌均匀性和锚固力抽检等指标联合评价。

参考文献

- [1] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 35056-2018 煤矿巷道锚杆支护技术规范[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
- [2] 国家煤矿安全监察局. MT/T 146.2-2011 树脂锚杆 第2部分:金属杆体及其附件[S]. 北京:煤炭工业出版社,2011.
- [3] 中华人民共和国煤炭行业标准. MT/T 1061-2019 煤矿用螺纹钢锚杆[S]. 北京:煤炭工业出版社,2019.
- [4] 康红普,林健,吴拥政,等. 锚杆构件力学性能及匹配性[J]. 煤炭学报,2015,40(1): 11-23.

- [5] 程蓬, 康红普, 鞠文君. 锚杆杆尾螺纹力学性能的实验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(11): 1929-1933.
- [6] 孟宪志. 锚杆尾部螺纹联接的试验研究[J]. 煤矿安全, 2016, 47(12): 53-56.
- [7] 刘少伟, 贺德印, 付孟雄, 等. 树脂锚固剂搅拌过程仿真及高效搅拌构件优化实验[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3073-3086.
- [8] 刘少伟, 王伟, 任耀飞, 王强, 蒋金华. 树脂锚固剂搅拌参数与锚固效果试验研究[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(1): 110-120.
- [9] Aziz, N., Craig, P., Mirzaghorbanali, A. and Nemcik, J. (2016) Factors Influencing the Quality of Encapsulation in Rock Bolting. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **49**, 3189-3203. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-0973-5>
- [10] Campbell, R. and Mould, R.J. (2005) Impacts of Gloving and Un-Mixed Resin in Fully Encapsulated Roof Bolts on Geotechnical Design Assumptions and Strata Control in Coal Mines. *International Journal of Coal Geology*, **64**, 116-125. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2005.03.009>
- [11] Fu, M., Liu, S., Huang, S. and Jia, H. (2024) Resin Flow Characteristics and Anchoring Performance of Resin-Anchored Bolts in Soft and Broken Surrounding Rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **57**, 1579-1601. <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03622-7>
- [12] Zhang, M., Han, J., Cao, C. and Ma, S. (2021) Experimental Study on Anchorage Performance of Rockbolts by Adding Steel Aggregates into Resin Anchoring Agents. *PLOS ONE*, **16**, e0255046. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255046>
- [13] Nourizadeh, H., Mirzaghorbanali, A., McDougall, K., Jeewantha, L.H.J., Craig, P., Motallebiyan, A., et al. (2023) Characterization of Mechanical and Bonding Properties of Anchoring Resins under Elevated Temperature. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **170**, Article ID: 105506. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2023.105506>
- [14] 张盛, 勾攀峰, 樊鸿. 水和温度对树脂锚杆锚固力的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2005, 35(S1): 49-54.
- [15] Bickford, J.H. (2008) Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints: Non-Gasketed Joints. 4th Edition, CRC Press.
- [16] Nassar, S.A. and Bickford, J.H. (1998) Handbook of Bolts and Bolted Joints. Marcel Dekker.
- [17] VDI (2015) VDI 2230 Blatt 1: 2015 Systematic Calculation of Highly Stressed Bolted Joints—Joints with One Cylindrical Bolt. Verein Deutscher Ingenieure.
- [18] Junker, G.H. (1969) New Criteria for Self-Loosening of Fasteners under Vibration. *SAE Transactions*, **78**, 314-335. <https://doi.org/10.4271/690055>
- [19] Qiao, Y., Zhao, B., Deng, D. and Ouyang, W. (2025) Prediction Model for Nonlinear Variation of Bolt Preload with Tightening Torque Based on Mechanism and Data Fusion. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 8020. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88213-y>
- [20] 张晓帅, 李建峰, 张磊. 绳索取心钻杆上扣扭矩对连接性能的影响[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(2): 56-60.
- [21] 王强, 李刚. 煤矿锚杆钻机扭矩匹配性研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(8): 123-127.
- [22] 刘军, 张宏. 井下锚杆施工扭矩控制技术研究[J]. 矿山机械, 2019, 47(7): 34-38.
- [23] 陈亮, 赵伟. 螺纹连接扭矩过大的危害及优化措施[J]. 机械工程学报, 2021, 57(19): 165-172.