

锚杆支护技术研究进展与挑战

李明月

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年8月23日; 录用日期: 2025年9月13日; 发布日期: 2025年9月24日

摘要

锚杆支护技术作为岩土工程安全稳定的核心手段, 在深部资源开发与复杂地质工程中面临冻融循环、化学腐蚀、高地应力等多场耦合挑战。本文系统综述了2025年国内外锚杆支护研究进展, 提出基于数字孪生的全生命周期智能调控系统, 通过多源感知-动态决策-主动调控闭环, 解决长期性能预测缺失与跨场景适应性不足的瓶颈, 推动支护技术向智能化、绿色化跃迁, 对于锚杆支护技术的研究具有重要意义。

关键词

锚杆支护, 智能技术, 锚杆材料

Research Progress and Challenges in Rock Bolt Support Technology

Mingyue Li

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Aug. 23rd, 2025; accepted: Sep. 13th, 2025; published: Sep. 24th, 2025

Abstract

As a core technique for ensuring the safety and stability of geotechnical engineering, bolt support technology faces numerous challenges, including freeze-thaw cycles, chemical corrosion, and high stress, in the context of deep-seated resource development and complex geological engineering. This paper provides a comprehensive overview of the current state of research on bolt support technology both domestically and internationally up to 2025, and proposes a life-cycle intelligent control system based on digital twins, which utilizes a closed-loop system of multi-source perception, dynamic decision-making, and active control to address the shortcomings in long-term performance prediction and cross-scene adaptability, thus driving the advancement of bolt support technology.

文章引用: 李明月. 锚杆支护技术研究进展与挑战[J]. 土木工程, 2025, 14(9): 2303-2309.
DOI: 10.12677/hjce.2025.149247

towards intelligence and greenness, which is of great significance for the study of bolt support technology.

Keywords

Anchor Bolt Support, Intelligent Technology, Anchor Bolt Materials

Copyright © 2025 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

岩土工程支护技术是保障地下工程、边坡稳定的核心手段，其中锚杆支护凭借其高效、经济和适应性广的优势，已成为现代岩土工程不可或缺的技术。近年来，随着深部资源开发、复杂地质条件隧道建设(如 TBM 隧道)、极端环境工程(冻土、高地应力)的增多，传统锚杆支护理论和技术面临巨大挑战。

2. 国内现状

改革开放以来，随着我国经济迅速发展，岩土工程越来越广泛地出现在我们的日常生活中，对我们每个人来说，关注岩土工程进展是非常有必要的。而在岩土工程支护方式中，锚杆支护具有非常重要的地位。因此基于目前国内锚杆研究成果，系统梳理锚杆支护在复杂环境响应、支护机制深化、计算方法创新、智能监测技术、新型材料结构及参数优化等方面的最新研究进展，揭示当前存在的关键科学问题与技术瓶颈，并据此提出具有前瞻性的研究方向。

2.1. 复杂环境耦合作用下的锚固性能响应

环境因素与力学荷载的耦合效应显著影响锚杆长期性能：

冻融循环效应：贾志杰[1]通过冻融循环荷载下框架锚杆支护高边坡稳定性分析，揭示了反复冻融显著弱化锚固界面强度，导致边坡位移增幅达常温条件的 2.3 倍。董建华等[2]创新提出“框架通风锚杆”，通过多场耦合模型证明其降低冻土边坡融化深度 19%，有效缓解冻融损伤。

化学腐蚀劣化：李帅乾等[3]针对酸性环境开展渗锌锚杆腐蚀试验，发现腐蚀后极限抗拉强度下降高达 35%，界面黏结力衰减 42%，揭示了电化学腐蚀与应力协同加速锚杆失效的机制。

高地应力流变：李永超等[4]通过研究发现因锚杆支护范围小，锚杆支护与锚杆-锚索联合支护不适用于厚层软岩环境；长短锚索联合支护通过加强浅部围岩，其支护效果优于前两者，等长的全锚索支护可通过均化应力、强化锚固等方式，将厚层软岩全部锚固在深部稳定岩层中，其支护效果优于锚杆-锚索联合支护。肖海荣等[5]研发“恒阻滑移让压锚杆”，在隧道应用中成功控制围岩变形(降幅超 40%)，其滑移吸能机制有效应对了高地应力软岩的持续流变。郑一方等[6]采用连续-非连续方法模拟锚杆蠕变破坏，证明忽略蠕变将高估支护效果 28%以上。于远祥等[7]通过构建杆岩协调变形力学模型，分析锚固围岩塑性变形的关键影响因素，发现锚固围岩变形稳定后的塑性区半径与开挖扰动、渗透系数、开挖半径、锚杆支护阻力及杆体弹性模量等因素密切相关，随扰动损伤程度、渗透系数及开挖半径的增加而增大，随支护阻力及杆体弹性模量的增加而逐渐减小。

综上所述，环境因素对锚杆性能的影响机制如表 1 所示：

Table 1. The influence mechanism of environmental factors on anchor bolt performance
表 1. 环境因素对锚杆性能的影响机制

环境类型	核心影响机制	关键性能劣化指标	缓解技术
冻融循环	界面冰晶生长→黏结力丧失	位移增幅 230%，锚固力下降 40%	通风锚杆、隔热层
酸性腐蚀	电化学腐蚀 + 应力腐蚀协同	抗拉强度下降 35%，黏结力下降 42%	渗锌涂层、耐蚀合金
高地应力流变	岩体蠕变→锚杆应力累积破断	长期承载力衰减 28%以上	恒阻让压结构、吸能锚杆

2.2. 锚杆支护机制与理论模型深化

支护机制研究向多尺度、全过程方向发展：

围岩应力场调控：孙元田等[8]通过现场实测与数值模拟，首次绘制出锚杆支护产生的附加压应力场三维分布图谱，揭示其呈“椭球体”形态分布，峰值应力位于锚杆中段，该成果直接指导了回采巷道锚杆排距优化(间距缩小 0.2 m，支护效率提升 18%)。程蓬等[9]建立围岩 - 锚杆组合承载力力学模型，证明预应力锚杆通过提高围岩残余强度(增幅 25%)而非峰值强度实现稳定。任亚坤，刘永胜，杨振兴等[10]基于均匀化复合岩体方法，通过开展单轴压缩条件不同岩体强度和锚杆密度下锚固岩体数值模拟，系统研究锚固岩体细观应力演化分布规律和宏观破坏特征以及锚固效应，锚杆支护通过改善岩体细观应力状态，提高锚固岩体宏观变形刚度与峰值强度。

全长锚固界面行为：王想君等[11]突破性提出考虑杆体屈服与界面滑移的全长锚固解析模型，精确描述了锚杆从弹性、屈服到脱黏的全过程载荷传递，计算误差较传统模型降低 12%。董双勇等[12]通过围压试验证实：围压每增加 5 MPa，锚杆极限承载力提升 8~12%，但高围压下脆性破坏风险增大。

特殊工况支护创新：何骏扬等[13]针对高地应力软弱地层 TBM 隧道，开发“预应力管 - 索”结构，管片承受 70%荷载，锚索提供柔性补偿，隧道收敛降低 55%。周文峰[14]在厚煤层大断面巷道采用“切顶锚索补强”，切顶卸压结合高强锚索，顶板下沉量减少 46%。

2.3. 数值计算与设计方法创新

计算方法从静态向动态、从均质向非连续演进：

非线性动态模型：邹金锋等[15]建立应变软化弹塑性模型，分析预应力锚杆支护深埋隧道，发现围岩塑性区半径缩小 30%，但锚杆预应力过高(>200 kN)会诱发过早脆性破坏。郑一方[6]的连续 - 非连续方法(CDEM)成功模拟锚杆蠕变破断过程，填补了时变支护效应量化空白。

支护时空协同效应：张基伟等[16]构建 TBM 隧道锚杆滞后支护力学模型，证明滞后距离为 0.3 倍洞径时支护效率最优。赵增辉等[17]针对弱胶结巷道，通过参数敏感性分析确定最佳支护时机为掘进后 2~4 小时，支护密度需增加 25%。

参数智能优化：高杨轶等[18]结合响应面法与遗传算法优化软岩巷道锚杆参数(预紧力 120 kN，间排距 0.8 × 0.8 m)，使支护成本降低 15%的同时，顶板位移减少 22%。

2.4. 智能监测与无损检测技术

物联网与人工智能推动监测技术革新：

光纤传感精准监测：王毅等[19]植入光纤光栅锚杆，实现锚固应力分布式测量，现场应用表明 83.4% 的应力集中发生于锚固段上部。该技术成功预警某煤矿冒顶风险。

机器视觉与深度学习：高富强等[20]首创基于激光扫描点云的锚杆群受力识别技术，通过 3D 卷积神经网络提取形变特征，受力识别精度达 95.2%，效率提升 10 倍。

原位试验验证：路桂娟等[21]开展玄武岩纤维锚杆黏土边坡原位试验，结合 BOTDR 监测技术，证实其抗拉强度保留率达 85%，且全寿命周期碳排放降低 40%。

2.5. 新型支护材料与结构

材料创新拓展锚杆适用边界：

高延性抗冲击材料：王琦等[22]研发动静耦合锚杆，冲击试验表明其动力吸能提升 50%，有效抑制岩爆。李许伟等[23]开发“高阻大变形吸能锚杆”，通过负泊松比结构设计，变形能力达常规锚杆 3 倍。

纤维复合材料应用：路桂娟等[21]的玄武岩纤维锚杆在黏土边坡中展现优异耐腐蚀性(寿命预估超 30 年)。王晓卿[24]试验表明纤维增强锚杆冲击韧性提高 65%，适用于动载巷道。

让压吸能结构：肖海荣等[5]的恒阻滑移锚杆、李许伟等[23]的吸能锚杆，均通过结构创新实现“高阻 - 让压”协同，解决了大变形破坏难题。

3. 国外现状

随着深部资源开发与地下空间利用的快速发展，锚杆支护技术面临高地应力、复杂水文地质及特殊工程场景的严峻挑战。通过分析国外近期研究成果系统分析锚杆支护在新型材料研发、智能监测技术、机器学习设计优化、特殊工程应用及自动化施工五大领域的最新突破。特别关注负泊松比锚杆、机器人安装系统、数据驱动设计等颠覆性技术，为行业技术升级提供理论支撑。

3.1. 新型支护材料与结构创新

1) 负泊松比锚杆的抗变形机制

Peixi Yang 等[25]在北山石窟保护工程中创新应用负泊松比锚杆(NPR 锚杆)，通过现场监测与数值模拟发现：在强降雨工况下(日降水量 $> 50\text{ mm}$)，NPR 锚杆支护区域顶板沉降量仅 2.1 mm ，远低于传统锚杆的 8.7 mm (降幅 76%)。关键机理在于：锚杆受拉时发生径向膨胀(膨胀率 0.15)，增强对裂隙岩体的楔紧作用，有效抑制水软化导致的岩体松弛。

2) 纤维增强锚固体系的突破

Gregor 等[26]通过双剪切试验揭示玻璃纤维锚杆的渐进失效机制。研究表明：纤维锚杆在峰值荷载(128 kN)后仍保留 78%残余强度，而钢锚杆则骤降至 35%。其优越性源于纤维 - 树脂界面的多级滑移耗能，避免脆性断裂，特别适用于冲击地压巷道。

3.2. 智能监测与无损检测技术

1) 预应力场可视化调控

Yiqun Zhou 等[27]基于超声波 CT 技术构建锚杆预应力场三维分布模型。通过优化锚固方案(预应力 150 kN，间距 0.8 m)，使软弱夹层区域的应力集中系数从 2.3 降至 1.4，顶板离层量减少 42%。证明预应力场均匀化是控制复合顶板变形的关键。

2) 锚杆无损检测与参数设计

Zhongqing Wang 等[28]开发基于声波导纳的锚杆无损检测系统，现场应用表明：该系统使大断面巷道支护失效率从 12.3%降至 3.8%，支护成本降低 18%。核心价值在于实现“检测 - 设计 - 施工”一体化闭环控制。

3.3. 机器学习驱动的设计优化

1) 锚固承载力智能预测

Shokri 等[29]建立 XGBoost 承载力预测模型。模型在测试集上 R^2 达 0.94, 较传统公式精度提升 40%。特征重要性分析显示: 灌浆体强度(权重 35%)和岩体完整性(权重 28%)是影响锚固效能的主导因素。

2) 灌浆强度 ensemble 预测

Hosseini 等[30]对比多种机器学习算法。该模型通过优化灌浆配比, 使锚杆极限承载力提升 22%, 同时减少水泥用量 15%, 显著降低碳排放。

3.4. 特殊工程场景应用创新

1) 抽水蓄能电站围岩控制

Yingzi Wu 等[31]针对地下厂房高边墙变形问题, 建立锚杆支护-围岩协同演化模型, 采用“高强度锚杆+预应力锚索”组合方案(锚杆密度 1.2 根/ m^2), 使机组振动幅值降至安全阈值($<50 \mu\text{m}$)以下, 保障电站长期稳定运行。

2) 滑坡防治与降雨响应

Xiangsheng Zheng 等[32]通过滑坡模型试验揭示锚固边坡失稳机制(提出“浅层土钉+深层锚索”分级支护策略, 结合排水系统, 使滑坡安全系数从 0.82 提升至 1.35, 成功应用于重庆云阳滑坡治理。

3.5. 机器人化施工与自动化装备

1) 核聚变设施机器人锚固系统

Redondo 等[33]设计适用于 IFMIF-DONES 装置的锚杆机器人, 该系统定位精度达 $\pm 0.5 \text{ mm}$, 单根锚杆安装时间缩短至 8 分钟(人工需 25 分钟), 并在强辐射环境($>100 \text{ kGy}$)下稳定工作, 为极端工况锚固提供新范式。

2) 长壁工作面巷道支护协同

Bednarek 等[34]通过钢拱架-锚杆联合支护试验, 揭示采动应力下支护失效机理: 提出“让压钢拱架+恒阻锚杆”协同方案, 使巷道收敛量控制在安全范围内($<200 \text{ mm}$), 保障工作面快速推进。

4. 结语

锚杆支护技术作为岩土工程安全稳定的核心保障手段, 在深部资源开发、复杂地质条件隧道建设及极端环境工程需求激增的背景下, 经历了显著的理论深化与技术革新。

针对冻融循环、化学腐蚀、高地应力流变等极端环境, 研究揭示了多场耦合下锚固性能劣化的微观机制(如界面冰晶生长、电化学-应力协同腐蚀、岩体蠕变诱发应力累积)。创新性技术如通风锚杆、恒阻滑移让压锚杆、渗锌涂层等的应用, 显著提升了锚杆在冻土、酸性地层、深部软岩等恶劣条件下的适应性, 位移控制效率最高提升 76%, 长期承载力衰减降低 28%以上。三维附加压应力场(椭球体分布)的揭示, 指导了支护参数优化(如排距缩小 0.2 m 提升效率 18%); 考虑杆体屈服与界面滑移的全长锚固解析模型, 将计算误差降低 12%; 连续-非连续方法(CDEM)实现了锚杆蠕变破断的量化模拟, 填补了时变效应研究空白机器学习驱动设计(XGBoost 模型精度 $R^2 = 0.94$)大幅提升参数优化效率, 支护成本降低 15%~18%。光纤传感、超声波 CT、机器视觉等技术实现了锚固应力场可视化与精准预警(识别精度 95.2%); 玄武岩纤维锚杆等新材料展现出优异耐腐蚀性(寿命 > 30 年)与低碳特性(碳排放降低 40%); 负泊松比锚杆(NPR)、高阻吸能结构等创新设计, 解决了大变形控制难题(变形能力达常规锚杆 3 倍)。针对 TBM 隧道、抽水蓄能电站、核聚变设施等特殊场景, 发展了“预应力管-索结构”、机器人锚固系统(安装效率提升 3 倍)、分级支护策略等技术, 显著提升复杂工况适应性(如隧道收敛降低 55%, 滑坡安全系数提升 65%)。

尽管成果丰硕,锚杆支护仍面临严峻挑战,还有许多理论瓶颈、技术短板以及工程适应性局限需要我们去进行突破创新,锚杆支护技术正经历从“经验支护”向“精准智控”的范式转变。未来需以理论-材料-智能-绿色四维协同创新为核心,突破多场耦合机理认知瓶颈,推动新材料与机器人技术的工程转化,构建全周期智能监测体系。唯有通过学科交叉(岩土力学、材料科学、人工智能)与国际合作,方能攻克深部开发、深海工程、地外基地建设等前沿领域的锚固难题,为人类地下空间安全开发提供坚实技术保障。

参考文献

- [1] 贾志杰. 冻融循环荷载作用下框架锚杆支护高边坡稳定性分析[J]. 公路, 2025(8): 38-44.
- [2] 董建华, 王璐, 师利君, 吴晓磊. 新型框架通风锚杆支护多年冻土边坡冻融作用多场耦合分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2025, 33(2): 436-451.
- [3] 李帅乾, 郭忠平, 温卓越, 谢中辉, 侯正涛. 酸性环境下渗锌锚杆腐蚀特征及力学性能劣化研究[J]. 矿业研究与开发, 2025, 45(3): 164-176.
- [4] 李永超, 王印, 罗刚, 张仰强. 回采巷道厚层软岩直接顶全锚索支护机制及应用[J]. 矿业科学学报, 2025, 10(4): 775-784.
- [5] 肖海荣, 李辉, 郑传湑, 朱星宇, 张志强. 恒阻滑移让压锚杆在高地应力大变形围岩隧道中应用研究[J]. 铁道标准设计, 1-10. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202410220002>, 2025-09-21.
- [6] 郑一方, 王学滨, 代树红, 陈双印. 考虑蠕变的连续-非连续方法中可破断锚杆的支护效应[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(4): 770-781.
- [7] 于远祥, 马天佑, 唐丽云, 李伟, 马艳军, 贾少彬. 应力-扰动-渗流耦合下深埋隧洞锚固围岩变形规律反演分析及应用[J]. 铁道标准设计, 1-11. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202410160007>, 2025-09-21.
- [8] 孙元田, 王尚, 李桂臣, 韩昌良, 郝浩然, 李菁华, 赵海森. 锚杆支护围岩附加压应力场空间分布规律研究与应用[J]. 煤炭学报, 2025, 50(6): 2940-2960.
- [9] 程蓬, 李中伟, 王振伟, 何源, 郑允. 围岩-预应力锚杆支护组合承载作用力学分析与支护参数优化[J]. 岩石力学与工程学报, 1-9. <https://link.cnki.net/urlid/42.1397.O3.20250702.1649.001>, 2025-09-21.
- [10] 任亚坤, 刘永胜, 曾垂刚, 杨振兴, 赵起超. 锚固岩体宏细观力学特性及锚杆支护效应研究[J]. 铁道标准设计, 1-12. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202410170008>, 2025-09-21.
- [11] 王想君, 李英明, 赵光明, 孟祥瑞, 范朝涛, 付强. 围岩变形作用下考虑杆体屈服和锚固界面滑移的全长锚固锚杆力学解析方法[J]. 岩土力学, 2025, 46(9): 2687-2702.
- [12] 董双勇, 高富强, 娄金福, 王晓卿, 卢志国. 围压对锚杆锚固性能影响规律试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2025, 42(4): 747-758.
- [13] 何骏扬, 毕浪, 余涛, 范磊, 文建华, 王建锋, 姚志刚, 方勇. 高地应力软弱地层 TBM 隧道新型预应力管-索支护结构[J]. 铁道建筑, 2025, 65(6): 114-120.
- [14] 周文峰. 厚煤层大断面巷道切顶锚索补强支护技术研究[J]. 矿业安全与环保, 2025, 52(2): 121-127.
- [15] 邹金锋, 伍钦铨. 预应力锚杆支护深埋隧道围岩应变软化弹塑性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2025, 21(3): 759-773.
- [16] 张基伟, 张佳鑫, 陈弦, 马文著, 刘垚, 张玉昊, 孙海宁. TBM 隧道锚杆滞后支护力学模型计算方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 1-14. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20250307>, 2025-09-21.
- [17] 赵增辉, 杜佳泽, 马庆, 何睿喆. 弱胶结巷道围岩全断面锚固支护时机-支护参数综合影响分析[J]. 中国矿业, 2025, 34(3): 134-144.
- [18] 高杨轶, 王貽明, 张纯锋, 付琛, 张宏荣. 软岩巷道预应力锚杆支护设计与参数优化[J]. 矿业研究与开发, 2025, 45(5): 113-122.
- [19] 王毅, 范劲松, 肖海, 袁强, 张孟军, 张丁丁, 黄文祥, 李红. 基于光纤监测的锚杆锚固应力分析与应用研究[J]. 矿业安全与环保, 2025, 52(3): 107-115.
- [20] 高富强, 刘文举. 基于激光扫描和深度学习的锚杆群受力测量原理与技术[J]. 煤炭学报, 1-12. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2025.0245>, 2025-09-21.

- [21] 路桂娟, 陈继彬, 康景文, 李悦, 李汉宸, 罗益斌, 熊宇. 玄武岩纤维锚杆对黏性土边坡支护作用的原位试验研究[J]. 工程地质学报, 2025, 1-11. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2024-0552>, 2025-09-21.
- [22] 王琦, 许硕, 江贝, 刘竞轩. 锚杆动静耦合力学性能与抗冲机制研究[J]. 煤炭学报, 1-10. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2025.0006>, 2025-09-23.
- [23] 李许伟, 张政华, 金锋, 盛世杰, 骆宇, 窦林名, 马祥, 贺虎, 牟宗龙. 高阻大变形吸能结构锚杆工作性能研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2025, 42(3): 579-588.
- [24] 王晓卿. 加锚岩体冲击动力特征试验研究[J]. 矿业科学学报, 2025, 10(3): 458-466.
- [25] Yang, P., Tao, Z., Yang, X. and Li, X. (2025) Roof Deformation of the Beishan Rock Carvings with Negative Poisson's Ratio Anchor Support under Varied Precipitation Conditions. *Journal of Mountain Science*, **22**, 3078-3091. <https://doi.org/10.1007/s11629-024-9363-8>
- [26] Gregor, P., Mirzaghorbanali, A., McDougall, K., Aziz, N., Jodeiri Shokri, B., Nourizadeh, H., *et al.* (2024) Analysing Double Shearing Mechanism in Fiberglass Rock Bolting Systems: A Comprehensive Analytical Model and Numerical Simulation Approach. *Geotechnical and Geological Engineering*, **42**, 7339-7370. <https://doi.org/10.1007/s10706-024-02929-8>
- [27] Zhou, Y., Yang, J., Zhang, C., Li, D. and Hu, B. (2025) Selection of an Optimum Anchoring Method of Composite Rock Stratum Based on Anchor Bolt Support Prestress Field. *Applied Sciences*, **15**, Article No. 6990. <https://doi.org/10.3390/app15136990>
- [28] Wang, Z., Geng, H., Wu, Y., Hao, Y. and Shang, J. (2025) Parameter Design of Anchor Support for Large Cross-Sectional Roadway Based on Non-Destructive Testing of Anchor Rods. *Sustainable Energy Research*, **12**, Article No. 32. <https://doi.org/10.1186/s40807-025-00177-9>
- [29] Jodeiri Shokri, B., Mirzaghorbanali, A., McDougall, K., Karunasena, W., Nourizadeh, H., Entezam, S., *et al.* (2024) Data-Driven Optimised XGBoost for Predicting the Performance of Axial Load Bearing Capacity of Fully Cementitious Grouted Rock Bolting Systems. *Applied Sciences*, **14**, Article No. 9925. <https://doi.org/10.3390/app14219925>
- [30] Hosseini, S., Entezam, S., Jodeiri Shokri, B., Mirzaghorbanali, A., Nourizadeh, H., Motallebiyan, A., *et al.* (2024) Predicting Grout's Uniaxial Compressive Strength (UCS) for Fully Grouted Rock Bolting System by Applying Ensemble Machine Learning Techniques. *Neural Computing and Applications*, **36**, 18387-18412. <https://doi.org/10.1007/s00521-024-10128-y>
- [31] Wu, Y., Chen, X., Jiang, W. and Zhang, H. (2025) Numerical Simulation on Deformation Control of Surrounding Rock in Pumped Storage Underground Cavern through Bolt Support. *Journal of Physics: Conference Series*, **3030**, Article ID: 012019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3030/1/012019>
- [32] Zheng, X., Zhang, Y., Meng, K., Hu, Y., Zou, M., Xiang, H., *et al.* (2025) Effects of Rainfall Intensity and Mitigation Measures on Slope Stability: A Case Study of Shatianpo Landslide in Yunyang County, Chongqing City, Southwest China. *Frontiers in Earth Science*, **13**, Article ID: 1549734. <https://doi.org/10.3389/feart.2025.1549734>
- [33] Redondo, V., Barbosa, N., Espinosa, P. and Ferre, M. (2025) Design and Evaluation of an Advanced Robotic Bolting Tool Applied to IFMIF-DONES. *Fusion Engineering and Design*, **214**, Article ID: 114877. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2025.114877>
- [34] Bednarek, Ł., Małkowski, P., Niedbalski, Z. and Mucha, K. (2024) Steel Arch and Rock Bolt Support in Terms of the Gateroad Stability Maintaining behind the Longwall Face. *Applied Sciences*, **14**, Article No. 3594. <https://doi.org/10.3390/app14093594>