

项目名称：地下工程破碎围岩准三维预应力锚注加固技术与应用

项目等级：泰安市科技进步一等奖

完成单位：山东农业大学水利土木工程学院、山东科技大学、泰安方舟矿业科技有限公司、山东丰源宏科矿业科技有限公司

完成人情况：张进鹏、刘立民、李扬、程广坦、高强、任喆、许可、赵政

提名单位意见：

山东农业大学水利土木工程学院岩土工程团队一直致力于工程岩体灾害防控研究。该项目针对地下工程破碎围岩控制的难题，基于自应力注浆材料和预应力注浆结构，提出了地下工程破碎围岩准三维预应力锚注复合加固方法。通过预应力锚固和自应力注浆加固作用，使被加固破碎围岩形成形态完整、结构致密的复合结构，围岩承载能力得到大大提高。该技术在多个地下工程及矿井巷道进行了工程应用，取得了良好的应用效果，为大松动圈巷道支护提供了一种良好的工程加固方法。并且围绕该成果授权发明专利 5 项、实用新型专利 5 项，发表 SCI/EI 论文 10 篇，所提供申报材料齐全，三年多来获得的经济效益颇丰。具备申报学会科技进步奖的条件，推荐为泰安市科技进步一等奖。

项目简介：

在井巷、隧道、峒室等地下工程施工过程中时常遇到高地压、围岩破碎等不稳定地质体，其围岩控制难度较大，给施工安全造成很大威胁。在复杂地质条件下单一的锚网支护难以达到预期支护目标。所以在预应力锚固的基础上附加注浆加固正成为一种广泛使用的复合支护加固方法。本创新成果的特点是基于自应力注浆材料和预应力注浆结构，实现了对极松软破碎围岩巷道先预应力锚后自应力注浆的复合工程加固方法。本成果以高地应力大松动圈破碎围岩巷道和特松软全煤巷道围岩控制为应用背景，提出了准三维预应力锚注加固方法。

该方法在我国多个矿区如枣矿集团滕东煤矿、柴里煤矿、山东丰源煤电集团张集煤矿、云南石垭口煤矿、贵州邦达能源老洼地煤矿、昌兴煤矿、红果煤矿、平煤集团十矿、陕煤集团韩城矿业桑树坪二号井、下峪口煤矿等十多个矿井获得了成功应用。本项目重点介绍了该方法在平煤十矿和韩城矿业桑树坪二号井的应用效果。桑树坪二号井悬臂梁软煤加固后，前期煤体发生了一定下沉，后期煤体

下沉不明显，逐渐趋于稳定，总体下沉量较小，说明新型预应力锚注的控制效果较好。平煤十矿变电所巷道原尝试高强锚网索支护、U36 型钢支架支护、普通锚注支护等方法，但围岩控制效果均不佳，采用准三维预应力锚注加固后，变电所巷道基本趋于稳定状态，巷道表面最大位移为 83mm，真正实现了高应力破碎围岩巷道维修后的零修复。

本成果的创新点主要体现在如下三个方面：

(1) 提出了裂隙围岩预应力锚注加固方法：通过在岩体裂隙天然约束状态下浆液结石体体积膨胀产生膨胀应力，改善浆液结石体的密实度和固结体的受力状态；锚杆对岩体的轴向约束应力和自应力注浆对岩体的膨胀约束应力共同形成对岩体近似三维的加固状态。准三维预应力锚注具有恢复与改善岩体应力状态，强化与修复破碎围岩区，提高岩体固有强度的作用。

(2) 研发了超细硅质自应力复合注浆加固材料：分别得出了浆液结石体纵向自由膨胀率、约束浆液结石体强度、浆液结石体微观结构与膨胀剂掺量的关系，综合确定 U 型膨胀剂最佳掺量为 10%；超细硅质自应力复合注浆加固材料的配方为超细水泥掺量 79%、粘土掺量 5%、膨胀剂掺量 10%、硅粉掺量 6%、速凝剂掺量 2.9%、减水剂掺量 2.5%；该新型注浆材料具有初凝快、流动性好、膨胀性好、强度高特点。

(3) 研发了一种新型高强预应力注浆锚杆系统，实现了先预应力后自应力注的工程锚注加固方法：高强预应力注浆锚杆结构包括左旋螺纹杆体、出浆孔、止浆塞、新型海星型高强托盘、焊接压盖式阻尼螺母、球面垫圈、减阻特制塑料垫圈，具有预应力大、应力施加更标准、锚固力高、杆体强度高、托盘强度高、密封效果好等优势。

第三方评价：

项目鉴定意见：

(1) 基于 Hoek-Brown 强度理论，结合圆形硐室围岩弹塑性解析解，获得裂隙岩体围岩塑性区扩展半径、塑性区应力等参数的计算公式，通过现场监测验证，该计算公式对巷道支护具有指导意义。

(2) 结合裂隙破碎岩体地质特点，研发了具有一定膨胀性、早强性、减水浆材料添加剂，通过实验对比确定了注浆材料中合理的添加剂掺量占比，实现了预

应力注浆加固效果。

(3) 针对现有注浆锚杆强度低、不能施加较大预应力的特点，设计研发出杆高，可施加一定预应力，并与普通锚杆施工工艺一致的高强度预应力锚杆。

(4) 研究成果成功应用于多对类似条件矿井，解决了巷道安全支护问题，巷道支护成本，实现了快速掘进。

桑树坪二号井项目评价：

项目实施过程通过综合技术与现场综合观测，获得了注浆扩散半径分布规律，煤体裂隙的发育规律，优化了此地质采掘条件下的注浆工艺参数。在特松软破碎煤层条件下，完成了异型综放切眼沿底安装特殊条件下的安全支护问题。通过采用煤体加固技术及合理的支护方案，将采煤工作面沿顶安装工艺改为沿底安装，减少了初采初放期间工作面留顶煤下扎回采时易出现漏顶、冒顶等安全问题，降低了工作面顶板管理难度。由于回采时直接采用沿底回采，避免了采空区留煤释放瓦斯，降低了工作面瓦斯管理等困难，保证了安全高效回采。避免了工作面初采初放以及工作面下扎至煤层底板后所造成的底煤浪费情况，提高了资源回收率，经济效益和安全效益明显。项目试验的成功，相关技术可在桑树坪二号井进行推广应用，韩城矿区类似地质条件也可采用此技术。

项目实施过程中采用的施工工艺简单，工程材料少，对特殊条件下的矿山巷道支护提供了一种新的工程技术方法以及采煤工作面安装工艺。项目实施提高了采面资源回收率。项目实施复合节能减排政策，经济效益、社会效益、安全效益和环境效益显著。

桑树坪二号井项目验收意见：

(1) 通过现场实测和室内数值模拟，获得了不同注浆压力条件下的浆液扩散规律；最大扩散半径 3.5 米，最小扩散半径 0.5m,这与裂隙的不均匀发育有关。

(2) 通过现场测试与观测分析得出了桑树坪二号井 3#煤层其裂隙发育的三种情况：

①裂隙强发育区：在注浆压力 3MPa 的情况下，此时的注浆扩散半径可以达到 3.5m 以上；②裂隙中等发育区：在注浆压力 3MPa 的情况下，此时的注浆扩散半径可以达到 1.0-3.5m；③裂隙不发育区：在注浆压力 3MPa 的情况下，此时的注浆扩散半径小于 1.0m。

(3) 在注浆压力 3MPa 注浆深度 4.5m 的条件下,通过注浆量反推法,在 3308 切眼正帮注浆区内煤体的裂隙率在 7%~9%,平均 8.0%。

(4) 自巩固注浆锚杆的初始预应力达到 20KN,最大拉拔力达到 120KN 以上。

(5) 通过对煤体注浆固结体的室内强度测试表明:煤体注浆固结体的强度最大达到 15.6MPa,注浆加固后煤体的抗压强度提高了 2-3 倍,达到了中硬偏上的水平。

(6) 通过对原煤体和煤体注浆固结体的室内显微分析表明:超细硅质自应力(膨胀)注浆材料的应用可有效的提高松软破碎煤体抗压强度。

(7)左旋高强预应力锚杆在 3308 切眼拉底大高度副帮的应用表明,矿井 3# 煤层可以应用高强预应力锚杆进行树脂锚固,其锚固效果可以达到巷道支护工程。高强预应力锚杆具有较高预应力,在使用扭矩放大器的情况下可以产生大于 50KN 的预应力,其最大锚固力可以达到 20 吨以上,对煤岩体的主动控制效果大大加强。

(8) 通过对高强预应力和锚杆锚索受力观测表明:锚杆锚索工作阻力增加较小,锚杆锚索工作效率系数均小于 0.5 (锚杆或锚索工作阻力与其屈服强度的比值)。所以矿井的顺槽支护还有较大的优化空间。

从项目的实际观测和综合研究表明:矿井静压较小,二回顺槽严重破坏的主要原因是动压影响。因此,矿井区段煤柱也有一定的优化空间。通过现场实验研究表明,该注浆工艺简单,注浆材料经济,为固松软破碎裂隙发育煤体大断面异型切眼支护加固提供了一种全新的工程施工方法。对松软煤层矿区具有很好的借鉴作用,并具有良好的推广应用前景。项目研究成果在韩城矿区类似条件进行推广应用。

主要完成人情况:

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
张进鹏	1	无	副教授	山东农业大学	山东农业大学	项目总体布局,并提出准三维预应力锚注技术
刘立民	2	无	教授	山东科技大学	山东科技大学	开展新型锚注系列试验与工程应用

李扬	3	无	研究生	山东科技大学	山东科技大学	研发超细硅质自应力复合注浆加固材料
程广坦	4	无	讲师	山东农业大学	山东农业大学	研发一种新型高强预应力注浆锚杆系统
高强	5	无	副教授	山东农业大学	山东农业大学	研发了一种新型高强预应力注浆锚杆系统
任喆	6	无	讲师	山东农业大学	山东农业大学	研发超细硅质自应力复合注浆加固材料
许可	7	总经理	工程师	泰安方舟矿业科技有限公司	泰安方舟矿业科技有限公司	研发新型高强预应力注浆锚杆系统并进行工程应用
赵政	8	董事长	工程师	山东丰源宏科矿业科技有限公司	山东丰源宏科矿业科技有限公司	对超细硅质自应力复合注浆加固材料和新型锚杆进行批量化生产

完成人合作关系说明：

完成人均为该项目的完成人，其中张进鹏作为项目总结设计与实施负责人，负责项目总结设计与实施；刘立民作为项目技术专家，负责开展新型锚注系列试验与工程应用等；李扬和任喆主要负责超细硅质自应力复合注浆加固材料地研发，为该技术提供注浆材料的保障；程广坦、高强和许可主要负责一种新型高强预应力注浆锚杆系统地研发，通过该新型锚杆系统实现锚注一体化，为该锚注技术提供方法地支持；许可同时负责新型高强预应力注浆锚杆系统的设计与生产，与赵政共同进行该锚注技术的工程应用与观测。

推广应用情况：

山东农业大学和山东科技大学联合提出的地下工程破碎围岩准三维预应力锚注加固技术已经通过泰安方舟矿业科技有限公司应用于平煤集团十矿变电所巷道、枣庄大兴煤矿、滕东生建煤矿、韩城煤业桑树坪二号井等煤矿围岩加固中，大大提高了围岩控制效果，基本取消了巷道反复维修；研发的相关产品已大规模应用于贵州邦达能源集团、陕煤韩城矿业集团等。该技术通过山东丰源宏科矿业

科技有限公司生产的高强预应力注浆锚杆、新型海星型托盘、新型预应力注浆材料已经应用于山东丰源煤电集团张集煤矿和云南石垭口煤矿，取得了良好的工程应用效果，带来了丰厚的利润。

主要知识产权情况：

[1] 刘立民,张进鹏,张付涛,曹君陟,闫旭,李延辉. 一种边坡孔隙土体预应力锚注加固方法[P]. 国家发明专利：CN108222032B, 2019-10-01. 专利权人：山东科技大学

[2] 刘立民,张进鹏,张付涛,王鹤,曹君陟,闫旭,李延辉. 破碎围岩预应力锚注加固模拟试验装置及试验方法[P]. 国家发明专利：CN108181178B,2020-02-21. 专利权人：山东科技大学

[3] 刘立民,张进鹏,闫旭,曹君陟,孙伟,付彪,李扬. 一种巷道锚网索系统支护效果评价方法[P]. 国家发明专利：CN106885705B, 2019-01-29. 专利权人：山东科技大学

[4] 张进鹏,刘立民,付彪,李扬,曹君陟,张付涛. 矿柱支撑系统动载稳定性试验系统及试验方法[P]. 国家发明专利：CN108398330B,2020-09-01. 专利权人：山东科技大学

[5] 刘立民,闫旭,张进鹏,付彪,吕国娜,曹君陟,孙伟,李扬. 一种井下换装硐室支-吊组合装置及其施工方法[P]. 国家发明专利：CN107060835B, 2019-02-05. 专利权人：山东科技大学

[6] 刘立民;张进鹏;张杰;孙立庆;邸广强;许可. 一种锚杆固力工作阻力监测装置[P]. 实用新型专利：CN212621230U, 2021-02-26. 专利权人：泰安方舟矿业科技有限公司

[7] 刘立民,惠兴田,许可,梁东升. 一种新型海星式高强锚杆托盘[P]. 实用新型专利：CN211258667U,2020-08-14. 专利权人：泰安方舟矿业科技有限公司

[8] 赵政,张晓明,朱应泉,孙学安. 一种焊接压盖式锚杆阻尼螺母[P]. 实用新型专利：CN209724925U, 2019-12-03. 专利权人：山东丰源宏科矿业科技有限公司

[9] 赵政,张晓明,朱应泉,黄井武. 一种加装于采煤工作面刮板输送机上的辅

助装煤装置[P]. 实用新型专利: CN210084323U, 2020-02-18. 专利权人: 山东丰源宏科矿业科技有限公司

[10] 王鹤,张进鹏,李延辉. 一种新型高强锚杆托盘[P]. 实用新型专利: CN207647531U, 2018-07-24.

主要论文目录:

[1] 张进鹏; 刘立民*; 刘传孝; 孙东玲; 邵军; 李扬; 基于预应力锚和自应力注的深部裂隙岩体锚注加固机制研究, *岩土力学*, 2020, 41(11): 3651-3662. (第一单位: 山东农业大学)

[2] 张进鹏; 刘立民*; 刘传孝; 刘延保; 文光才; 孙东玲; 邵军; 深部裂隙岩体硅质自应力注浆加固机制与试验研究, *煤炭学报*, 2020, 45: 1-10. (第一单位: 山东农业大学)

[3] 张进鹏; 刘立民*; 刘传孝; 文光才; 李青海; 孙东玲; 邵军; 张杰; 孙立庆; 邸广强; 松软厚煤层异型切眼新型预应力锚注支护研究与应用, *煤炭学报*, 2021, 46:1-12. (第一单位: 山东农业大学)

[4] Zhang Jinpeng; Liu Limin*; Cao Junzhi; Yan Xu; Zhang Futao; Mechanism and application of concrete-filled steel tubular support in deep and high stress roadway, *Construction and Building Materials*, 2018, 186: 233-246. (第一单位: 山东科技大学)

[5] Zhang Jinpeng; Liu Limin*; Li Qinghai; Peng Wei; Zhang Futao; Cao Junzhi; Wang He; Development of cement-based self-stress composite grouting material for reinforcing rock mass and engineering application, *Construction and Building Materials*, 2019, 201: 314-327. (第一单位: 山东科技大学)

[6] Zhang Jinpeng; Liu limin*; Shao jun 等 . Mechanical properties and application of right- hand rolling-thread steel bolt in deep and high stress roadway. *Metals*, 2019,9,346:1-15. (第一单位: 山东科技大学)

[7] Zhang Jinpeng; Liu limin*; Zhu zhende. Flexural Fracture Toughness and First-Crack Strength Tests of Steel Fiber-Silica Fume Concrete and Its Engineering Applications. *Strength of Materials*. 2018, 50(1):166-175. (第一单位: 山东科技大学)

[8] Li Qinghai; Li Jingkai; Zhang Jinpeng*; Wang Changxiang; Fang Kai; Liu Limin; Wang Wenjing. Numerical Simulation Analysis of New Steel Sets Used for Roadway Support in Coal Mines. *Metals*, 2019, 9, 606:1-19. (第一单位: 山东科技大学)

[9] Jinpeng Zhang; Limin Liu*. R&D and Application of Curved D-Shape Concrete- Filled Steel Tube Support in Roadway Support. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2018, 36:551-566. (第一单位: 山东科技大学)

[10] Limin Liu; Jinpeng Zhang*. Study on Micro-expansive Concrete-Filled Steel Tube Support for Controlling the Stability of Surrounding Rock in Deep Roadway, *Geotechnical and Geological Engineering*. 2018, 36:2343-2350. (第一单位: 山东科技大学)