

提名国家科技进步奖项目公示

项目名称	岩土体预应力锚索锚固效果控制与监测关键技术
提名单位	山东省科技厅
<div>一、提名者与提名意见</div> <div>提名者：山东省科技厅</div> <div>提名意见：<p>预应力锚索应用领域十分广泛，且用量巨大；但因锚索锚固力损失而导致的锚固事故却频繁发生。因此，开展锚索锚固力损失机理、控制补偿技术、受力状态实时监测技术和开发新型锚索研究，具有重要的工程价值。</p><p>该项目依托国家自然科学基金等科研项目，历时十余年，围绕“岩土体预应力锚索锚固力损失机理、控制补偿技术、受力状态监测技术和新型锚索开发”进行了系统化研究，取得了一定的研究成果。</p><p>系统地研究了预应力锚索锚固力损失的影响因子，构建了预应力锚索锚固值的确定、施加与控制方法；建立了工程岩体峰后损伤裂化模型；建立了穿层复合软岩顶板力学模型；建立了锚索锚固力损失控制技术；建立了锚固力损失补偿技术。研制了压力均布型锚索、U型锚索、让压锚具及可回收使用型锚索、差动式工具锚等系列产品，发明了一种预应力锚索施工的注浆工法及密封注浆系统。开发了高性能锚索测力系统，并研发了系列多功能监测仪器；研制了大量程预应力锚索光纤光栅传感器；开发了锚索锚固力受力状态智能化实时监测系统。</p><p>研究成果已成功应用于边坡、深基坑和隧（巷）道等大型支护工程，取得了良好的技术经济和社会效益。</p><p>提名该项目为国家科学技术进步奖二等奖。</p></div> <div>二、项目简介</div> <div><p>预应力锚索锚固技术不但应用领域十分广泛而且用量巨大，但是因锚索锚固力损失而导致的锚固失效事故不但频繁发生而且损失巨大。关键科学问题是：1）锚固力损失定性分析和定量计算的相关理论和计算方法还不成熟；2）锚固力损失和控制技术依赖于工程经验而不是工程理论；3）缺乏高性能预应力锚索及配套机具；4）预应力锚索受力状态无法把控。课题组在国际自然科学基金等项目的支持下，联合科研院所、设计单位、生产单位、施工运行管理等单位联合攻关，取得了系统性创新性成果，具有重要的理论意义和工程价值。</p><div>1、主要技术内容</div><div><p>（1）发展完善了预应力锚索锚固力损失理论，建立了预应力损失控制与补偿技术</p><p>构建了新的锚索预应力变化与岩土体蠕变的耦合效应模型；建立了工程岩体峰后损伤裂化模型；建立了复合软岩顶板力学模型；揭示了各影响因子引起预应</p></div></div>	

力损失的规律和特征，建立了锚索预应力损失定量计算技术；建立了锚索锚固力损失控制技术，开发了预应力损失补偿技术。

(2) 发明了高性能预应力锚索及配套机具，建立了相应施工工法及技术

研制了压力均布型锚索；研制了 U 型锚索；研制了让压锚具及可回收使用型锚索；研制了差动式工具锚；发明了一种有一定倾角的预应力锚索施工的注浆工法及密封注浆系统。

(3) 研制了高性能锚索测力传感器，开发了锚索受力状态监测系统

开发了高性能锚索测力传感器，并研发了系列多功能监测仪器；研制了大量程预应力锚索光纤光栅传感器；开发了锚索受力状态智能化实时监测系统。

## 2、授权专利情况

获授权发明专利 12 项，其他专利 10 余项，软件著作权 5 项。

## 3、技术经济指标

(1) 锚索预应力损失机理及控制补偿方面：构建了新的锚索锚固力变化与岩土体蠕变的耦合效应模型，推导了耦合效应的本构方程、松弛方程和蠕变方程。建立了工程岩体峰后损伤裂化模型，提出了深部工程岩损伤劣化算法流程；建立了穿层复合软岩顶板力学模型，提出了复合软岩锚固效应量化评价方法。系统地研究了锚索预应力损失的影响因子，揭示了各影响因子引起预应力损失的规律和特征，建立了锚索预应力损失定量计算技术。建立了预应力损失控制技术，形成了预应力损失补偿技术。

(2) 锚索应用技术开发方面：研制了压力均布型锚索；研制了 U 型锚索；研制了让压锚具及可回收使用型锚索；研制了差动式工具锚；发明了预应力锚索施工的注浆工法及密封注浆系统。

(3) 锚固力实时监测方面

建立了振弦式锚索测力传感器新型数学模型，能够准确描述振弦式传感器特性；设计了锚索测力传感器新型结构，解决了量程限制和偏载影响难题；设计了高增益弱激发电路，解决了激发频率不一致、不稳定和分辨率低的技术难题。建立了振弦与工作膜匹配技术，减小了温度和介质压力对仪器频率的影响；建立了检测系统电路设计补偿技术，抵消且补偿了极性相反、同温度漂移值大小相等的信号；建立了数学模型修正技术，实现了温度误差补偿；开发了系列多功能检测仪器。

研制了一种凹槽预压式预应力锚索光纤光栅传感器，实现了对预应力锚索全生命周期的受力状态监测。

开发了基于振弦传感技术的预应力锚索受力状态智能监测系统，能够实现三维立体直观显示和智能化分析预测，达到了国际领先水平。

## 4、应用推广及效益情况

所开发的预应力锚索系列产品及其配套锚夹具、锚索测力传感器、锚索监测系统均实现了产业化，项目研究成果已成功应用于高陡边坡、深基坑、水库大坝、隧（巷）道等各类工程领域，在设计、施工、运营管理、监测等单位等得到了广

泛应用，取得了良好的技术经济效益和社会效益，。

### 三、客观评价

#### 1.查新报告

2016 年 4 月 10 日，教育部科技查新工作站对“预应力锚索预应力损失机理及其控制补偿技术(The Prestress Loss Mechanism of Prestressed Anchor Cables and Its Control Compensation Technology)”进行了成果查新。查新报告编号：201636000G080099；国内检索策略：预应力\*锚索\*锚固力\*损失，预应力\*锚索\*蠕变；国外检索策略：(prestress\* or pre-stress\*) and cable and anchor\* and (load or force) and loss；(prestress\* or pre-stress\*) and cable and creep and anchor\*；查新结论：“在检索范围内，除该查新项目申请人的研究文献外，国内外未见与该查新项目研究内容完全相同的文献报道。”

2016 年 4 月 14 日，教育部科技查新工作站对“基于振弦传感技术的预应力锚索受力状态实时监测成套技术(The Comprehensive Technology for Monitoring the Loading State of Prestressed Anchor Cables Based on Vibrating-wire Sensor Technology)”进行了成果查新。查新报告编号：201636000G080098；国内检索策略：振弦\*传感器\*抛物线，振弦\*传感器\*修正，振弦\*传感器\*(弱激发+自激发+弦\*膜\*匹配+测频)，(锚索+锚杆)\*受力状态\*监测；国外检索策略：vibrate wire sensor parabola, vibrate wire sensor and (amend or correct), vibrate wire sensor and (accuracy or precision), prestressed anchor and (cable or bolt) and monitor；查新结论：“在检索范围内，除课题组的研究成果外，国内外未见与本课题研究内容相同的文献报道。”

#### 2.鉴定证书

2009 年 6 月，柳州市科学技术局组织专家对“预应力锚索传感器及智能化检测系统”项目成果进行鉴定，鉴定结果为：预应力锚索传感器及智能化监测系统的研制开发是成功的，可推广的；该项目的研究成果具有自主知识产权，达到国内领先水平。

2011 年 12 月广西省科学技术厅组织专家对“OVM.YJM 压力均布型锚索体系”项目成果进行鉴定，鉴定委员会一致认为：OVM.YJM 压力多级分布型锚索体系的研制和应用是成功的，达到国内领先水平。

2016 年 4 月，中国岩石力学与工程学会组织专家对“预应力锚索预应力损失机理及其控制补偿技术”课题研究成果进行了鉴定，以中国工程院康红普院士为主任委员的鉴定委员会认为：达到了国际领先水平。

2016 年 4 月，中国岩石力学与工程学会组织专家对“基于振弦传感技术的预应力锚索（杆）受力状态实时监测技术”课题研究成果进行了鉴定，以中国工程院康红普院士为主任委员的鉴定委员会认为：项目达到了国际领先水平。

#### 3.技术检测报告

**中国计量科学院测试**

中国计量科学研究院对课题组研制的锚索测力传感器进行了测定。

计量器具名称：锚索测力传感器；

型号规格： MGH-4000，出厂编号： No.35；

测试依据： JJG391-1985 《负荷传感器试行检定规程》；

所使用的计量标准器： 5MN 基准测力机，不确定度为  $k=3$ ；

计量标准器证书编号：（92）技监局量证字第 1 号；

测试环境条件：温度 24℃、湿度 52%RH；

测量范围： 500kN~4000kN；

测试结果：重复性为 0.04%FS，滞后为 0.5%FS；

测试证书：证书编号： LXfd2001-1285。

**4.重要科技奖励**

序号	获奖时间	奖项类型	等级	授奖部门	项目名称
1	2015.03	中国煤炭工业专利奖	一等奖	中国煤炭工业协会	基于振弦传感技术的预应力锚索受力状态实时监测系统
2	2016.12	中国岩石力学与工程学会科技进步奖	一等奖	中国岩石力学与工程学会	预应力锚索预应力损失机理及其控制补偿与监测技术
3	2018.01	广西科学技术奖（技术发明奖）	二等奖	广西壮族自治区人民政府	岩土体预应力锚索施工控制及其配套锚索关键技术
4	2018.03	山东省科学技术奖	三等奖	山东省人民政府	岩土体预应力锚索锚固力损失控制补偿与安全监测关键技术

**四、应用情况**

本项目成果在柳州欧维姆机械股份有限公司、威海晶合数字矿山技术有限公司、中铁十四局集团下多家子公司等施工、设计单位得到应用，应用涉及边坡支护、隧（巷）道支护、地质灾害治理与监测等领域，取得了显著的技术经济效益和社会效益。

## 五、主要知识产权和标准规范等目录

知识 产权 (标 准)类 别	知识产 权(标 准)具体 名称	国家 (地 区)	授权 号(标 准编 号)	授权 (标 准发 布)日 期	证书编 号 (标准 批准发 布部 门)	权利人(标 准起草单 位)	发明人(标 准起草人)	发明 专利 (标 准) 有效 状态
发明 专利	基于锚 索预应 力损失 与岩土 体蠕变 耦合的 预应力 损失计 算方法	中国	ZL20 14103 89291 .8	2016- 10-26	228354 7	山东科技大 学;王清标	王清标;张 聪;施振 跃;温小 康;王辉; 吕荣山;许 垒;张军 贤;王天 天;胡忠 经;白云	有权
发明 专利	基于锚 索预应 力损失 与岩土 体蠕变 耦合的 边坡蠕 变量计 算方法	中国	ZL20 14103 89327 .2	2016- 11-09	229086 3	山东科技大 学;蒋金泉; 王清标	蒋金泉;王 清标;张聪; 施振跃;温 小康;王辉; 胡忠经;许 垒;吕荣山; 王天天;白 云;张军贤	有权
发明 专利	基于振 弦传感 技术的 预应力 锚索受 力状态 实时监 测系统	中国	ZL20 11103 17968 .3	2014- 10-19	141630 5	山东科技大 学	王清标	有权
发明 专利	压力均 布型锚 索	中国	ZL20 08100 07371 4.X	2012- 08-15	102285 1	柳州欧维姆 机械股份有 限公司	甘国荣;刘 璇;周丹丹	有权
发明 专利	U 型锚 索	中国	ZL20 07100	2011- 09-28	139893 3	柳州欧维姆 机械股份有 限公司	甘国荣;谭 柳芳	有权

			77822 .X					
发明专利	让压锚具及可回收使用型锚索	中国	ZL2000810073713.5	2012-08-15	1023027	柳州欧维姆机械股份有限公司	甘国荣;刘璇;周丹丹	有权
发明专利	差动式工具锚	中国	ZL200310103952.8	2009-04-15	487047	柳州欧维姆机械股份有限公司	刘璇;甘国荣;吕兵;廖松山;杨雄文;陈文杰;甘秋萍	有权
发明专利	竖管真空预压双向注浆工法及其密封注浆系统	中国	ZL021562812.4	2008-07-02	406972	柳州欧维姆机械股份有限公司	甘国荣;刘璇;刘成州	有权
发明专利	一种智能钢绞线端部光纤接头封装连接器及其安装方法	中国	ZL201710284209.9	2018-09-28	3092018	桂林理工大学	覃荷瑛;朱万旭;罗伯光	有权
标准规范	建筑边坡工程技术规范	中国	GB50330-2013	2013.11.01	国家住房和城乡建设部	重庆市设计院;中国建筑技术集团有限公司;中国人民解放军后勤工程学院;中冶建筑研究总院有限公司;重庆市建筑科学研究院;重庆交通大学等	郑生庆;郑颖人;黄强;陈希昌;汤启明;刘兴远;陆新;胡建林;凌天清;黄家愉;周显毅;何平等	现行规范

## 六、主要完成人情况

1. 姓名：王清标

排名：1

行政职务：副主任

技术职务：教授

工作单位：山东科技大学

完成单位：山东科技大学

对本项目贡献：

对创新点 1 的贡献：构建了新的锚索预应力变化与岩土体蠕变的耦合效应模型；揭示了各影响因子引起预应力损失的规律和特征，建立了锚索预应力损失定量计算技术；建立了锚索锚固力损失控制技术，开发了预应力损失补偿技术；

对创新点 3 的贡献：开发了高性能锚索测力系统，并研发了系列多功能监测仪器。

2. 姓名：甘国荣

排名：2

行政职务：无

技术职务：教授级高工

工作单位：柳州欧维姆机械股份有限公司

完成单位：柳州欧维姆机械股份有限公司

对本项目贡献：

对创新点 2 的贡献：研制了压力均布型锚索；研制了 U 型锚索；研制了让压锚具及可回收使用型锚索；研制了差动式工具锚；发明了预应力锚索施工的注浆工法及密封注浆系统。

积极推进了项目产品的市场化，为技术应用的成果推广做出了巨大贡献。

3. 姓名：胡建林

排名：3

行政职务：无

技术职务：教授级高工

工作单位：中冶建筑研究总院有限公司

完成单位：中冶建筑研究总院有限公司

对本项目贡献：

对创新点 2 的贡献：参与编制了北京市地方标准《可拆除锚杆技术规程》DB11/T1366-2016、国标《建筑边坡工程技术规范》（GB50330-2013）、国标《建筑边坡工程鉴定与加固技术规范》（GB50843-2013）、中国工程建设标准化委员会标准《岩土锚杆设计与施工》规范（CECS22：2005）。

积极推动了科研成果推广应用，有效推动了成果应用标准化和规范化。

4. 姓名：蒋力帅

排名：4

行政职务：无

技术职务：讲师

工作单位：山东科技大学

完成单位：山东科技大学

对本项目贡献：

对创新点 1 的贡献：研究了锚索预应力损失影响因子，揭示了各影响因子引起预应力损失的规律和特征，解决了孔道摩阻、锚塞及钢绞线等回缩、钢绞线松弛、温度变化、锚口摩阻等影响因子对锚固力损失的定量计算问题。

5. 姓名：施振跃

排名：5

行政职务：无

技术职务：无

工作单位：山东科技大学

完成单位：山东科技大学

对本项目贡献：

对创新点 1 作出的贡献：与第一完成人一起构建了新的锚索预应力变化与岩土体蠕变的耦合效应模型，推导了耦合效应的本构方程。

对创新点 3 作出的贡献：与第一完成人一起开发了基于振弦传感技术的预应力锚索受力状态智能监测系统，实现了锚索受力状态的室内实验监测、现场施工监测、运行期监测的自动化监测。

6. 姓名：褚晓威

排名：6

行政职务：无

技术职务：副研究员

工作单位：煤炭科学研究总院

完成单位：煤炭科学研究总院

对本项目贡献：

与完成人何杰（10）共同研究了锚杆杆体破断的内因与外因，提出了包括改善受力状态全长锚固、优化外形防腐蚀处理等减少破断的综合方法。

7. 姓名：覃荷瑛

排名：7

行政职务：无

技术职务：教授

工作单位：桂林理工大学

完成单位：桂林理工大学



对本项目贡献:

对创新点3的贡献:研制了一种凹槽预压式预应力锚索光纤光栅传感器,实现了对预应力锚索全生命周期的受力状态监测。预应力锚索光纤光栅传感器的性能如下:量程:量程可依工程需要定制,大量程可监测预应力锚索应变 $15000\mu\epsilon$ 以上;分辨率: $1\mu\epsilon$ ;精度:不低于 $0.5\%F\cdot S$ ;通道数: $2\sim 64$ 通道可定制。

8. 姓名: **赵增辉**

排名: 8

行政职务: 无

技术职务: 副教授

工作单位: 山东科技大学

完成单位: 山东科技大学

对本项目贡献:

对创新点1的贡献:研究了锚杆杆体破断的内因与外因,提出了包括改善受力状态全长锚固、优化外形防腐蚀处理等减少破断的综合方法。

9. 姓名: **王日东**

排名: 9

行政职务: 无

技术职务: 无

工作单位: 威海晶合数字矿山技术有限公司

完成单位: 威海晶合数字矿山技术有限公司

对本项目贡献:

对创新点3的贡献:开发了快速三维建模、三维显示界面web系统,采用实时数据差分拟合方法,实现了预应力锚索受力状态的三维立体模型直观显示。

开发了大数据解算与分析系统,实现了锚索受力预警、报警和发展趋势预测的自动化与智能化。开发了液压传感器数据采集软件和网络远程监测系统,系统包括系统管理、告警及处理、统计数据、资源管理和系统帮助五个分项。

积极开发了项目监测软件服务系统和部分监测设备,为本项目提供了重要技术支持。

10. 姓名: **何杰**

排名: 10

行政职务: 无

技术职务: 副研究员

工作单位: 煤炭科学研究总院

完成单位: 煤炭科学研究总院

对本项目贡献:

对创新点 1 的贡献：与完成人褚晓威（6）共同研究了锚杆杆体破断的内因与外因，提出了包括改善受力状态全长锚固、优化外形防腐蚀处理等减少破断的综合方法。

## **七、主要完成单位及创新推广贡献**

### **1、山东科技大学**

山东科技大学作为本项目的第一完成单位，为本项目组织实施、理论研究和应用推广做出了重大贡献。

#### **（1）理论研究方面**

构建了新的锚索预应力变化与岩土体蠕变的耦合效应模型；建立了工程岩体峰后损伤裂化模型；建立了穿层复合软岩顶板力学模型；揭示了各影响因子引起预应力损失的规律和特征，建立了锚索预应力损失定量计算技术；建立了锚索锚固力损失控制技术，开发了预应力损失补偿技术；

开发了高性能锚索测力系统，并研发了系列多功能监测仪器；开发了锚索锚固力受力状态智能化实时监测系统。

#### **（2）推广应用方面**

山东科技大学依托学科优势、科研优势和地缘优势，建立了技术推广产学研合作平台，技术开展技术研发和推广应用，开展了丰富的现场应用活动，解决了实际生产问题，积极与相关科研单位、生产单位和设计单位加强联络，积极促成了泰安科大洛赛尔传感技术有限公司、山东润龙机电科技有限公司、泰安思科赛德电子科技有限公司、威海晶合信息技术有限公司、威海晶合数字矿山有限公司的成立和发展，为本项目技术推广和应用做出了巨大贡献。

### **2、煤炭科学研究总院**

煤炭科学研究总院一直致力于国家煤炭事业的发展，为国家煤炭开产做出了突出贡献，在本项目中的创新推广贡献如下：

#### **（1）理论研究方面**

通过理论分析、化学成分分析、力学性能测试、金相显微分析等综合试验方法，研究了锚杆杆体破断的内因与外因，提出了包括改善受力状态全长锚固、优化外形防腐蚀处理等减少破断的综合方法。

#### **（2）推广应用方面**

煤炭科学研究总院在本项目成果技术推广中贡献巨大，依托煤炭科学研究总院煤矿科研和应用平台，将岩土体预应力锚索锚固效果控制与监测关键技术推广到煤矿边坡、井巷支护等项目中，并开展了预应力锚索应用试验，取得了丰富的数据，为技术的完善和升级提供了重要支持。

### **3、柳州欧维姆机械股份有限公司**

柳州欧维姆机械股份有限公司是国际著名的预应力器具生产企业，在预应力产品开发中一直追求卓越、精益求精，在本项目中的创新推广贡献如下：

#### **（1）理论研究方面**

开发了研制了压力均布型锚索；研制了 U 型锚索；研制了让压锚具及可回收使用型锚索；研制了差动式工具锚；发明了预应力锚索施工的注浆工法及密封注浆系统等五项技术产品。

#### （2）推广应用方面

柳州欧维姆机械股份有限公司在产品推广中贡献巨大，新产品已成功应用于日本、巴基斯坦、越南等海内外各大工程中，技术应用成果显著，经济效益明显。

### 4、中冶建筑研究总院有限公司

中冶建筑研究总院有限公司在本项目成果标准化应用方面做出了突出贡献，形成相关标准 4 项：北京市地方标准《可拆除锚杆技术规程》DB11/T1366-2016、国标《建筑边坡工程技术规范》（GB50330-2013）、国标《建筑边坡工程鉴定与加固技术规范》（GB50843-2013）、中国工程建设标准化委员会标准《岩土锚杆设计与施工》规范（CECS22：2005）。

中冶建筑研究总院有限公司对本项目成果的标准化和规范化应用起到了重要推动作用，为技术应用提供了可靠依据。

### 5、桂林理工大学

桂林理工大学在大量程预应力锚索光纤光栅传感器研发方面做出了突出贡献，在本项目中的创新推广贡献如下：

#### （1）理论研究方面

分析了嵌入式 FBG 传感器与基体之间的应变传递率，对凹槽的截面尺寸、传感器的黏结长度记忆封装材料的弹性模量提出了设计要求，以中心丝持荷值伪变化参数，对 FBG 智能钢绞线进行不同检测量程的张拉试验，解决了 FBG 传感器封装存活率低和检测量程不够的问题，实现了对钢绞线全生命周期的监测。

#### （2）推广应用方面

桂林理工大学依托其科研平台，建立了产学研合作平台，推广了锚索自动化监测技术，为技术推广做出了重要贡献。

### 6、威海晶合数字矿山技术有限公司

威海晶合数字矿山技术有限公司一直致力于监测系统开发研究，在行业计算机软件系统开发方面具有丰富经验和显著优势，对本项目的创新推广贡献如下：

#### （1）理论研究方面

开发了快速三维建模、三维显示界面 web 系统，采用实时数据差分拟合方法，实现了预应力锚索受力状态的三维立体模型直观显示；开发了大数据解算与分析系统，实现了锚索受力预警、报警和发展趋势预测的自动化与智能化；开发了液压传感器数据采集软件和网络远程监测软件系统，系统包括系统管理、告警及处理、统计数据、资源管理和系统帮助五个分项。

#### （2）推广应用方面

威海晶合数字矿山技术有限公司依托科技成果，积极推广成果应用，在地压监测、地质灾害监测方面均有应用，该公司被评为山东省高新技术企业和泰山产业领军人才单位。

## 八、完成人合作关系说明

完成人之间存在以下合作关系：

项目负责人王清标（1）全面负责项目研发，在山东科技大学致力于预应力锚索预应力损失机理与控制补偿技术、预应力锚索受力状态实时监测系统研究，开展了理论分析、模型试验、室内试验和现场试验等研究工作。在创新点 1 中构建了新的锚索预应力变化与岩土体蠕变的耦合效应模型；揭示了各影响因子引起预应力损失的规律和特征，建立了锚索预应力损失定量计算技术；建立了锚索锚固力损失控制技术，开发了预应力损失补偿技术；在创新点 3 中开发了振弦式传感器制造技术；建立了振弦式传感器量测技术，开发了系列多功能监测仪器；开发了锚索锚固力受力状态实时监测系统。

完成人甘国荣（2）在柳州欧维姆机械股份有限公司工作，开发了压力分散型锚索、可回收型锚索、差动式工具锚等新产品和张拉施工设备及工法，授权发明专利 6 项；王清标（1）与甘国荣（2）在 2018 年 1 月与我共同获得广西省科学技术奖（技术发明奖）二等奖，项目名称为《岩土体预应力锚索施工控制及其配套锚索关键技术》，甘国荣（2）排名第 3 位。

完成人胡建林（3）在中冶建筑研究总院有限公司工作，有非常丰富的现场和设计经验，主编和参编了多部行业规范标准，完成人胡建林（3）与完成人甘国荣（2）2008 年已经开始合作，完成人胡建林（3）对完成人甘国荣（2）及其单位承担的项目进行了多次指导，从设计和应用角度提出了宝贵的改进意见。

完成人蒋力帅（4）在山东科技大学矿业与安全工程学院工作，与王清标（1）是同事关系，蒋力帅（4）在本项目中建立了工程岩体峰后损伤裂化模型，提出了深部工程岩体损伤劣化算法流程，揭示深部工程岩体峰后损伤劣化引起的变形破坏效应与围岩稳定性变异，阐明基于峰后损伤劣化效应的围岩变形破坏机制和控制原理。发表相关论文 2 篇。2018 年 3 月与王清标（1）共同获得山东省科学技术奖三等奖，项目名称为《岩土体预应力锚索锚固力损失控制补偿与安全监测关键技术》，蒋力帅（4）排名第 5 位。

完成人施振跃（5）是山东科技大学在读博士，2012 年开始与完成人王清标（1）一起进行预应力锚索预应力损失机理与控制补偿技术、预应力锚索受力状态实时监测系统研究，与王清标（1）一同发表相关科技论文 3 篇、专利 3 项。

完成人覃荷瑛（7）在桂林理工大学工作，长期致力于锚索监测技术研发，在大量程预应力锚索光纤光栅传感器方面做出了突出贡献，发表相关论文 1 篇、专利 1 项。2018 年 1 月与王清标（1）共同获得广西省科学技术奖（技术发明奖）二等奖，项目名称为《岩土体预应力锚索施工控制及其配套锚索关键技术》，覃荷瑛（7）排名第 6 位。

完成人赵增辉（8）在山东科技大学矿业与安全工程学院工作，与王清标（1）、蒋力帅（4）是同事，赵增辉（8）在本项目中建立了穿层复合软岩顶板力学模型，提出了复合软岩锚固效应量化评价方法，揭示了横向荷载和节理面影响下锚杆折

弯变形特征与岩体破坏行为。发表相关论文 4 篇。2018 年 3 月与王清标（1）共同获得山东省科学技术奖三等奖，项目名称为《岩土体预应力锚索锚固力损失控制补偿与安全监测关键技术》，赵增辉（8）排名第 3 位。

完成人王日东（9）为威海晶合数字矿山技术有限公司法人，主要致力于智能监测设备系统的开发研究，在本项目中获得授权软件著作权 3 项；王清标（1）与王日东（9）在锚索锚固力受力状态智能化实时监测系统方面共同开发研究，王日东（9）主要负责多功能数据采集和分析设备开发及智能检测系统和网络远程监测系统开发研究。2018 年 3 月与王清标（1）、赵增辉（8）、蒋力帅（4）共同获得山东省科学技术奖三等奖，项目名称为《岩土体预应力锚索锚固力损失控制补偿与安全监测关键技术》，王日东（9）排名第 10 位。

完成人褚晓威（6）与完成人何杰（10）均就职于煤炭科学研究总院，两人是同事关系，两人分析了锚杆杆体破断原因，建立了减少杆体破断几率的综合方法。发表相关论文 1 篇。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者	合作时间	合作成果	证明材料	备注
1	共同知识产权	王清标（1）； 张聪；施振跃（5）；温小康；王辉；吕荣山；许垒；张军贤；王天天；胡忠经；白云	2016.01.26	基于锚索预应力损失与岩土体蠕变耦合的预应力损失计算方法	附件 1	列入附件
2	共同获奖	王清标（1）；朱万旭；甘国荣（2）；李居泽；李海民；覃荷瑛（7）；廖振天	2018.01	广西省科学技术奖（技术发明奖）	附件 4	列入附件
3	共同获奖	王清标（1）；张培鹏；赵增辉（8）；刘小果；蒋	2018.03	山东省科学技术奖	附件 4	列入附件

			力帅 (4); 李居泽; 王 学敬; 马志 涛; 王立华; 王日东 (9); 王辉; 张建 中					
	4	论文 合著	Lishuai Jian (4) ; Peipeng Zhang; Lianjun Chen; Zhen Hao; Atsushi Sainok; Hani S. Mitri; Qingbiao Wang (1)	2017.07	Numerical Approach for Goaf-Side Entry Layout and Yield PillarDesign in Fractured Ground Conditions	-	未列入 附件	
	5	论文 合著	吴拥政; 褚 晓威 (6); 吴建星; 何 杰 (10)	2017.03	强力锚杆杆体断裂 失效的微细观试验 研究	-	未列入 附件	