

《层状结构岩石力学实验技术规程》 团体标准编制说明

一、工作简况

1. 任务来源

随着我国矿山、交通隧道、水利水电、油气等工程持续向深部与复杂地质区域推进，页岩、板岩、片岩等层状岩体成为地下工程围岩与边坡介质中广泛分布的岩体类型。层理构造使岩石呈现显著的各向异性特征，不同层理角度下岩石强度、变形性能差异极大，而现行国家标准及煤炭、水利、公路等行业岩石试验规程多以均质完整岩石为试验对象，尚未针对层状结构岩石形成成套专用试验体系，试验成果横向可比性差，制约层状岩体工程设计精度与科研成果推广应用。

为统一层状结构岩石力学试验全流程技术要求，提升试验数据可靠性与可比性，由东北大学牵头，联合中国科学院武汉岩土力学研究所、武汉理工大学、中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司、中国水利水电第十一工程局有限公司、内蒙古科学技术研究院、铜陵有色金属集团控股有限公司、长沙理工大学等单位，向中关村绿色矿山产业联盟提出《层状结构岩石力学实验技术规程》团体标准立项申请。2026年7月，该标准经中关村绿色矿山产业联盟评审通过，正式列入团体标准制修订工作计划，项目起止时间为2026年7月至2026年12月，计划投入经费10万元。

本标准的编制具备扎实的项目支撑条件。起草组长期致力于层状岩体力学特性、破坏机理与支护控制等关键科学问题研究，先后承担了多项国家级科研项目与重大工程委托项目，形成了层状岩石各向异性力学特性的系统性测试方法与技术，为本标准技术指标的确定提供了充分的理论与数据支撑。

在国家级科研项目方面，起草组承担了多项国家自然科学基金项目，包括“真三轴条件下横观各向同性岩石强度特征及应力路径相关性研究”、“偶应力作用下多向约束层合岩板溃屈机理与锚固方法研究”、“不同加卸荷速率下软硬互层岩体组构效应的水力耦合特征”、“深部含天然节理硬岩破坏的空间角度效应与强度准则研究”等。上述项目系统开展了层状岩石在不同应力路径、不同层理角度下的力学试验研究，积累了大量试验数据，为本标准中层理角度组合体系、加载速率、各向异性参数计算方法等关键技术内容的确定提供了直接依据。

在工程实践项目方面，起草组先后承担了十余项企业委托项目，包括“乌东德地下电站洞室群施工围岩稳定性动态反馈分析与风险评估”（涉及薄层灰岩）、“GS水电站复杂地质条件下高边墙洞室群围岩失稳模式、稳定控制标准及措施研究”（涉及板岩）等重大工程科研项目。相关技术已在矿山深部开采、大型水电枢纽及隧道等国家级重大工程中成功应用，经现场实践检验，充分验证了本标准试验方法与技术参数的科学性、可靠性与工程实用性。

在学术成果与科技奖励方面，起草组围绕层状岩体试验方法、力学特性、破坏机理发表高水平论文十余篇，授权专利十余项；出版了《陡倾薄层围岩开挖卸荷破坏机理与稳定性分析》、《深部工程硬岩力学》等专著，完成了《大跨度高边墙地下洞室陡倾薄层岩体变形及破坏机制研究》、《高应力隧道薄层围岩各向异性力学

特性与大变形机制研究》等博士学位论文。研究成果曾获 2023 年度湖北省科技进步一等奖（大型地下工程陡倾薄层围岩灾变机理与控制关键技术）和 2025 年度湖北省技术发明一等奖（深部大型地质体工程结构群扰动灾变过程数字解译关键装备与技术），为本标准的编制奠定了坚实的学术基础与技术积累。

2. 起草单位、参编单位

本文件由中关村绿色矿山产业联盟提出并归口。

起草单位：东北大学、中国科学院武汉岩土力学研究所、武汉理工大学、中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司、中国水利水电第十一工程局有限公司、内蒙古科学技术研究院、铜陵有色金属集团控股有限公司、长沙理工大学、隧道掘进机与智能运维全国重点实验室、北方矿业有限责任公司。

参编单位涵盖高校、科研院所、工程设计与施工企业及矿业生产单位，实现了产学研用深度融合，确保标准内容既具学术高度，又贴合工程实际需求。

3. 主要起草人

本文件主要起草人：周扬一、刘旭锋、潘鹏志、徐鼎平、王兆丰、陈东方、赵彬、高要辉、王刚、张宇、徐怀胜、张九雨、徐鸿、卢高明、熊志朋、李西凡、封雨捷、郑青松、杜德伟等。

主要起草人长期致力于层状岩体的力学特性、破坏机理与支护控制等关键科学问题研究，在层状岩石各向异性试验方法、真三轴试验技术、深部工程岩体稳定性评价等方面积累了丰富的理论研究与工程实践经验。其中，周扬一副教授担任项目负责人，统筹标准编制全局工作，负责标准总体框架设计与技术路线制定；刘旭锋副研究员担任联系人，负责日常协调、资料汇总与文稿统稿；潘鹏志研究员、徐鼎平研究员、王兆丰副研究员、陈东方副教授等负责层状岩石试验相关技术条款的编制；高要辉、王刚、张宇等企业专家负责工程应用场景与实操性条款的审核与完善。各起草人按照分工协作、交叉审阅的工作机制，共同完成标准文本的起草与修订工作。

二、制定标准的必要性和意义

层状岩体是沉积岩区和变质岩区最为常见的岩体类型，广泛分布于我国矿山、交通隧道、水利水电、油气等工程领域。随着工程建设向深部与复杂地质区域不断推进，层状岩体的各向异性力学特征对工程稳定性的影响日益凸显，已成为制约深部工程安全与效率的关键地质因素。制定本标准的必要性和意义主要体现在以下几个方面：

（一）填补层状结构岩石各向异性参数测试标准空白。当前我国现行岩石试验标准，包括《工程岩体试验方法标准》（GB/T 50266—2013）、《水利水电工程岩石试验规程》（SL/T 264—2020）等，主要针对均质、完整岩石制定试验方法，未充分考虑层理构造对岩石力学行为的影响，缺乏针对层状结构岩石各向异性的完整试验体系。本标准系统规定了 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 五组特征层理倾角及 0° 、 45° 、 90° 三组层理走向角的试验方案，填补了该领域的标准空白。

(二) 解决层状岩石取样与制样不规范导致的参数失真问题。现有取样规程未明确层理保护要求、层理角度标记规则，部分试样在采集、运输、加工过程中沿层理弱面发生错动、开裂，致使测试结果与实际值偏差较大，直接误导工程设计。本标准对岩样采集、密封保湿储运、定向试件加工、层理角度标识、试件筛选等全流程作出严格规定，要求试件加工配备专用角度定位夹具，角度定位误差不超过 $\pm 0.5^\circ$ ，从源头上保障试验数据的真实性与可靠性。

(三) 统一数据处理方法，提升试验成果横向可比性。不同科研单位、检测机构、施工企业间对层状岩石各向异性参数的计算方法（如各向异性系数定义、横观各向同性弹性参数求解方法）及强度描述方法差异较大，无法形成可对比、可复用的层状岩石力学参数数据库。本标准统一了五个独立横观各向同性弹性参数的计算方法、强度各向异性系数的定义、异常值判别与剔除规则以及试验报告的内容与格式，为建立行业统一的层状岩石力学参数数据库奠定基础。

(四) 服务重大工程安全建设，推动岩土工程理论发展。本标准的实施将为矿山深部开采、大型水电枢纽、跨江越岭隧道、油气开发等国家级重大工程提供可靠的层状岩体力学参数，有效降低因参数获取不准导致的设计方案偏于保守或危险的风险，保障工程建设安全，减少不必要的经济浪费。同时，标准化的试验方法将推动层状岩体各向异性力学理论的深入发展，促进科研成果的推广应用，具有重要的学术价值与工程实践意义。

三、主要起草过程

本标准的编制工作严格按照团体标准制定程序，遵循“充分调研、科学论证、广泛征求意见、严格审查”的原则，分阶段有序推进。主要起草过程如下：

1. 前期调研与资料收集阶段（2026年3月—2026年6月）

标准立项前，起草组面向全国数十家岩土检测实验室、高校科研平台及工程勘察设计单位开展广泛调研，系统梳理层状结构岩石单轴压缩、常规三轴压缩、层面直剪、巴西劈裂、真三轴压缩试验的实践经验与存在问题。同时，起草组全面收集了国内外岩石力学试验相关标准规范、学术研究成果及工程应用案例，重点参考了《岩石真三轴试验规程》（T/CSRME 007—2021）、《工程岩体试验方法标准》（GB/T 50266—2013）、《水利水电工程岩石试验规程》（SL/T 264—2020）、《煤和岩石物理力学性质测定方法 第1部分：采样一般规定》（GB/T 23561.1—2024）等现行标准，以及 ISRM、ASTM 等国际组织发布的岩石力学试验建议方法，为标准编制奠定了坚实的文献基础。

2. 立项申请与评审阶段（2026年7月）

2026年7月，起草组完成《中关村绿色矿山产业联盟团体标准提案表》的填报工作，明确了标准的目的与意义、必要性与可行性、工作基础、适用范围、主要技术内容、参编单位及编写计划等，并向中关村绿色矿山产业联盟正式提交立项申请。同月，中关村绿色矿山产业联盟组织专家对该标准进行立项评审，与会专家一致认为该标准针对层状结构岩石各向异性力学试验的行业痛点，技术路线清晰，编

制团队实力雄厚，工程应用前景广阔，同意立项。立项评审后，标准正式列入中关村绿色矿山产业联盟团体标准制修订工作计划。

3. 标准初稿编制阶段（2026 年 7 月—2026 年 8 月）

立项通过后，起草组立即召开标准编制启动会，确立了编制目标、总体框架与人员分工，按照“范围—规范性引用文件—术语和定义—基本规定—岩样采集与试件制作—试验设备—试验—试验数据整理与试验报告—附录”的章节框架，分头开展标准文本的起草工作。起草组充分依托前期在层状岩体力学特性研究方面积累的国家自然科学基金项目成果（包括“真三轴条件下横观各向同性岩石强度特征及应力路径相关性研究”、“偶应力作用下多向约束层合岩板溃屈机理与锚固方法研究”“不同加卸荷速率下软硬互层岩体组构效应的水力耦合特征”、“深部含天然节理硬岩破坏的空间角度效应与强度准则研究”等），以及乌东德地下电站洞室群、GS 水电站等重大工程实践经验，将成熟的试验方法与技术参数转化为标准条款。经过起草组内部多轮讨论、交叉审阅与修改完善，于 2026 年 8 月形成标准初稿。

4. 征求意见阶段（计划 2026 年 9 月-10 月）

根据编写计划，起草组拟于 2026 年 10 月在标准初稿基础上修改完善，形成标准征求意见稿，面向行业及社会公开征集修改建议。征求意见范围拟覆盖岩土工程领域的高校、科研院所、工程勘察设计单位、检测机构、施工企业及矿业生产单位等，计划征求意见单位不少于 15 家，涵盖事业单位、国有企业等不同性质单位，确保意见收集的广泛性与代表性。

5. 专家审查阶段（计划 2026 年 11 月）

起草组将对征集到的意见进行逐条梳理、分析与处理，形成标准征求意见处理表，并根据意见修改完善标准文本，形成标准送审稿。拟于 2026 年 11 月，对标准送审稿进行技术审查与专业论证。审查内容包括标准的科学性、先进性、适用性、协调性及编写规范性等方面。起草组将根据审查意见对标准文本进行最终修改完善。

6. 报批发布阶段（计划 2026 年 12 月）

根据专家审查意见最终定稿，形成标准报批稿，连同编制说明、征求意见处理表等相关材料，提交中关村绿色矿山产业联盟审批。审批通过后，由中关村绿色矿山产业联盟正式发布实施。

四、制定标准的原则和依据

1. 制定原则

（一）科学性原则。标准技术内容以层状岩石力学各向异性的理论研究成果和大量试验数据为支撑，关键技术指标（如层理倾角组合、试件尺寸要求、加载速率、变异系数限值等）均经过充分的试验论证与理论分析，确保标准内容科学合理、准确可靠。

(二) 系统性原则。标准覆盖从现场取样、岩芯储运、定向试样制备、多类型力学试验操作,到数据整理分析、异常值剔除、各向异性参数计算、试验报告编制的完整闭环,确立各环节的技术准则与衔接要求,形成全流程标准化体系。

(三) 实用性原则。标准条款紧密结合工程实际需求,充分考虑国内岩土检测实验室、高校科研平台、工程勘察设计单位的设备条件与技术水平,操作步骤具体明确,可执行性强,便于一线技术人员理解与执行。

(四) 协调性原则。标准在编制过程中充分注意与现行国家、行业相关标准的协调衔接,未作规定的内容均要求符合现行国家、行业相关标准的规定,避免与已有标准产生矛盾或重复。

(五) 前瞻性原则。标准在总结现有实践经验的基础上,纳入了真三轴压缩试验等先进试验方法,以及横观各向同性弹性参数反演等前沿技术,体现了岩石力学试验技术的发展方向,具有一定的前瞻性。

2. 制定依据

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分:标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

标准技术内容主要依据以下方面确定:

(1) 起草组承担的国家自然科学基金项目研究成果,包括“真三轴条件下横观各向同性岩石强度特征及应力路径相关性研究”、“偶应力作用下多向约束层合岩板溃屈机理与锚固方法研究”、“不同加卸荷速率下软硬互层岩体组构效应的水力耦合特征”、“深部含天然节理硬岩破坏的空间角度效应与强度准则研究”等项目形成的层状岩石各向异性力学特性系统性测试方法与技术;

(2) 起草组在“乌东德地下电站洞室群施工围岩稳定性动态反馈分析与风险评估”、“GS水电站复杂地质条件下高边墙洞室群围岩失稳模式与稳定控制研究”等重大工程项目中积累的实践经验;

(3) 国内外公开发表的层状岩石力学试验相关高水平学术论文、专著及博士学位论文,包括《陡倾薄层围岩开挖卸荷破坏机理与稳定性分析》《深部工程硬岩力学》等专著,以及在《Rock Mechanics and Rock Engineering》等国际权威期刊发表的论文;

(4) 现行国家、行业及团体标准,包括《岩石真三轴试验规程》(T/CSRME 007—2021)、《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)、《水利水电工程岩石试验规程》(SL/T 264—2020)、《煤和岩石物理力学性质测定方法 第1部分:采样一般规定》(GB/T 23561.1—2024)等;

(5) ISRM(国际岩石力学学会)、ASTM(美国材料与试验协会)等国际组织发布的岩石力学试验建议方法与相关标准。

五、与现行有关法律、法规和标准的关系

本标准的编制严格遵循《中华人民共和国标准化法》《团体标准管理规定》等法律法规的要求,符合国家标准化工作的方针政策。

本标准与现行有关标准的关系如下:

（一）本标准是对现行岩石力学试验标准体系的补充与完善。现行国家标准《工程岩体试验方法标准》（GB/T 50266—2013）、行业标准《水利水电工程岩石试验规程》（SL/T 264—2020）等主要针对均质完整岩石的力学试验作出规定，本标准则专门针对层状结构岩石的各向异性力学试验进行规范，二者互为补充，不存在矛盾或冲突。

（二）本标准在采样一般规定方面与《煤和岩石物理力学性质测定方法 第1部分：采样一般规定》（GB/T 23561.1—2024）保持协调，并针对层状岩石的特点补充了层理保护、层理产状标记、密封保湿储运等专项要求。

（三）本标准在真三轴试验方面与团体标准《岩石真三轴试验规程》（T/CSRME 007—2021）保持协调，并针对层状结构岩石的特点补充了层理倾角与走向角控制、各向异性参数计算等专项内容。

（四）本标准未作规定的内容，均要求符合现行国家、行业相关标准的规定。本标准的实施不影响现行有关标准的执行，也不替代现行有关标准中适用于均质完整岩石的试验方法。

六、标准主要内容说明

本标准共设8章和4个附录，主要内容包括：范围、规范性引用文件、术语和定义、基本规定、岩样采集与试件制作、试验设备、试验、试验数据整理与试验报告，以及采样记录表、试件记录表、试验记录表、试验报告模板等附录。以下对重点技术内容进行说明：

1. 适用范围与岩性界定

本标准适用于层理构造发育的沉积岩（页岩、砂岩、泥岩等）、变质层状结构岩石（板岩、片岩、千枚岩等）的各向异性力学性能测试，涵盖矿山开采工程、隧道与地下交通工程、水利水电工程、边坡工程、地质灾害治理工程、油气开发工程等领域。考虑到遇水崩解、极度松软的泥化夹层及散体破碎状层状碎屑岩体的力学行为与完整层状岩石差异显著，其试验方法需采用特殊工艺，本标准将其排除在适用范围之外。该界定既保证了标准内容的针对性与可操作性，又为特殊岩体的试验方法预留了后续拓展空间。

2. 层理角度组合体系

本标准创新性地提出了标准化的层理倾角（ β ）与层理走向角（ ω ）组合体系。层理倾角设定 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 五组特征角度，完整覆盖顺层、斜交至垂直层理的全角度区间。该角度组合的确定依据如下：大量试验研究表明，层状岩石单轴抗压强度随层理倾角的变化呈现“U”形分布规律，最小值通常出现在 $45^\circ\sim 60^\circ$ 区间， 0° 和 90° 为强度极值点， 30° 和 45° 为过渡特征点，五组角度能够精准捕捉不同荷载作用下的力学响应差异。层理走向角设置 0° 、 45° 、 90° 三个关键方位，对应层理走向与中间主应力方向的平行、斜交及垂直关系，用于真三轴试验中表征面内各向异性的演化规律。特殊地质条件下，可根据现场层理产状调整层理角度并在报告中说明，体现了标准的灵活性。

3. 试件制备与质量控制

针对层状岩石试件制备的特殊性，本标准作出以下重点规定：

（1）试件加工设备应配备可控制层理走向角和倾角的定位夹具，角度定位误差不应超过 $\pm 0.5^\circ$ 。该要求是保障层理角度试验精度的关键，层理角度偏差将直接影响强度与变形参数的测试结果。

（2）单轴压缩与常规三轴压缩试验采用圆柱体标准试件，高径比宜为 2.0~2.5，公称直径宜为 50mm。试件直径或边长应大于最大矿物颗粒粒径的 10 倍，且宜大于最大层厚的 10 倍，以保证试件的代表性，避免尺寸效应和层厚效应对试验结果的影响。

（3）同一层理倾角、同一工况下加工试件数量不应少于 5 件，单一层理倾角工况下有效试件数量宜不少于 3 件。该要求既保证了统计分析的样本量，又考虑了层状岩石离散性较大、部分试件可能因层理开裂等原因作废的实际情况。

（4）试件端面不平整度允许偏差为 $\pm 0.02\text{mm}$ ，高度、直径或边长允许偏差为 $\pm 0.1\text{mm}$ ，端面应垂直于试件轴线，允许偏差为 $\pm 0.25^\circ$ 。该精度要求与现行岩石试验标准保持一致，确保加载过程中应力分布均匀。

（5）层面抗拉强度试验采用巴西劈裂法，试件为圆盘状，直径宜为 48mm~54mm，厚径比宜为 0.5~1.0，试件轴线方向平行于层理，允许偏差为 $\pm 0.25^\circ$ 。该设计确保劈裂面沿层面贯通，准确测定层面抗拉强度。

（6）真三轴试验采用方柱体试件，尺寸宜为 50mm×50mm×100mm，长宽高比例为 1:1:2，同时控制层理倾角与走向角，以满足真三向应力状态下各向异性测试的需求。

4. 五类试验方法的关键技术参数

本标准系统规定了单轴压缩、常规三轴压缩、层面抗拉（巴西劈裂）、层面直剪、真三轴压缩五类试验方法，各试验的关键技术参数及确定依据如下：

表 1 五类试验关键技术参数汇总

试验类型	加载方式	加载速率	有效试件数量	关键控制要点
单轴压缩	位移伺服控制	0.5~1.0MPa/s	每层理角 ≥ 3 件	层理倾角 $0^\circ\sim 90^\circ$ 五组，全应力-应变曲线采集
常规三轴压缩	先应力后位移伺服	围压 0.05MPa/s，轴压 0.5~1.0 MPa/s	每层理角 ≥ 3 件	围压等差/等比设置，覆盖工程应力范围
层面抗拉（巴西劈裂）	应力伺服控制	0.3~0.5 MPa/s	每工况 ≥ 5 件	加载方向平行层理，破坏面未沿层面贯通则作废
层面直剪	位移伺服控制	法向 0.1 MPa/s，剪切 0.1~0.2 mm/min	每法向压力 ≥ 3 件	至少 3 级法向压力，层理面位于剪切缝中部
真三轴压缩	位移伺服控制	0.5~1.0 MPa/s	根据试验设计确定	三向独立加载，控制层理倾角与走向角

上述加载速率的确定综合考虑了岩石力学试验的通用要求与层状岩石的特性。单轴压缩试验采用 $0.5\sim 1.0\text{MPa/s}$ 的加载速率，与现行岩石试验标准保持一致，既能保证试验在合理时间内完成，又能避免加载速率过快导致的惯性效应和过慢导致的蠕变效应。巴西劈裂试验采用 $0.3\sim 0.5\text{MPa/s}$ 的较低加载速率，是因为层状岩石层面抗拉强度较低，过快加载易导致破坏面偏离层理面。直剪试验采用 $0.1\sim 0.2\text{mm/min}$ 的位移控制剪切速率，确保剪切过程中法向应力稳定（波动范围不大于 $\pm 1\%$ ），准确测定层面抗剪强度参数。

5. 横观各向同性弹性参数计算方法

本标准基于横观各向同性假定，规定了层状结构岩石五个独立弹性参数的计算方法，这是本标准区别于常规岩石试验标准的核心技术内容之一。五个独立参数包括：垂直各向同性面的弹性模量（ E_1 ）和泊松比（ ν_1 ）、平行各向同性面的弹性模量（ E_2 ）和泊松比（ ν_2 ）、垂直于各向同性面的剪切模量（ G_2 ）。

其中， E_1 和 ν_1 通过层理倾角 $\beta=0^\circ$ 试件的单轴压缩试验结果计算； E_2 和 ν_2 通过层理倾角 $\beta=90^\circ$ 试件的单轴压缩试验结果计算； G_2 则根据不同层理倾角试件的视弹模，依据横观各向同性本构关系反演求解，以 $\beta=45^\circ$ 试件为例可得到 G_2 的解析表达式。该方法将理论本构关系与试验数据有机结合，通过多组层理倾角试验结果的联合求解，获得完整的横观各向同性弹性参数矩阵，为层状岩体的数值模拟与稳定性分析提供了关键的本构参数输入。

6. 各向异性系数定义

本标准定义了两类强度各向异性系数，用于量化层状岩石强度的各向异性程度：

（1）层理倾角影响下的强度各向异性系数 k_β ，定义为层理倾角 60° 试件与 0° 试件的单轴抗压强度平均值之比。大量研究表明，层状岩石单轴抗压强度的最小值通常出现在 60° 附近，最大值出现在 0° 或 90° ，采用 60° 与 0° 之比能够有效表征强度各向异性的程度。

（2）层理走向角影响下的强度各向异性系数 k_ω ，定义为同一中间主应力下层理走向角 0° 与 90° 试件的抗压强度平均值之比，用于真三轴试验中量化层理走向对强度的影响。

7. 异常值判别与数据质量控制

本标准规定，同一工况下强度及变形参数的变异系数不应大于 30% ，超出上述范围时应分析原因并增加试件数量重新试验。该限值的确定综合考虑了层状岩石固有的离散性特征与试验数据的统计学要求。层状岩石由于层理发育程度、胶结状态、初始缺陷等因素的影响，其力学参数离散性通常大于均质完整岩石， 30% 的变异系数限值既保证了数据的可靠性，又具有实际可操作性。同时，标准要求试验过程中若出现设备故障、试件意外破损、加载偏心等异常情况，该组试件试验数据作废，应重新试验，从过程控制上保障数据质量。

8. 主要试验（验证）的分析与技术经济论证

起草组依托国家自然科学基金项目和重大工程委托项目，已开展了大量层状岩石力学试验验证工作。在真三轴条件下横观各向同性岩石强度特征研究中，系统测

试了不同层理倾角、不同应力路径下层状岩石的强度与变形参数，验证了五组特征层理倾角组合的合理性与各向异性参数计算方法的可靠性。在乌东德地下电站洞室群（薄层灰岩）和 GS 水电站高边墙洞室群（板岩）等重大工程中，相关试验方法已成功应用于围岩稳定性评价，经现场实践检验，验证了标准技术内容的科学性、可靠性与工程实用性。

从技术经济角度分析，本标准的实施将产生显著的经济效益与社会效益。一方面，统一的试验方法与数据处理规则将减少因试验方法不统一导致的重复试验，降低工程勘察与科研成本；另一方面，可靠的各向异性力学参数将提高层状岩体工程设计的精度，避免因参数不准导致的设计偏于保守（增加工程投资）或偏于危险（引发工程事故），预计可在矿山、隧道、水利水电等工程中产生可观的经济效益。同时，标准的实施将推动层状岩石力学试验技术的规范化、体系化发展，促进科研成果的推广应用，具有重要的社会效益。

七、分歧意见的处理过程、依据和结果

在标准初稿编制过程中，起草组内部就若干技术问题进行了充分讨论，主要分歧意见及处理情况如下：

（一）关于层理倾角组合方案的讨论。起草组最初曾考虑设置 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° 七组层理倾角，以更精细地刻画强度随层理倾角的变化规律。但经讨论认为，七组角度将显著增加试件加工与试验工作量，提高试验成本，且大量已有研究表明强度随层理倾角的变化呈平滑的“U”形曲线，五组特征角度已足以准确描述该变化规律。最终确定采用 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 五组特征层理倾角，并规定特殊地质条件可根据现场层理产状调整，兼顾了科学性与经济性。

（二）关于变异系数限值的讨论。部分起草组成员提出，层状岩石离散性较大，建议将变异系数限值放宽至 40% 或 50%。但经讨论认为，过宽的限值将降低试验数据的可靠性，不利于建立可对比的行业参数数据库。30% 的限值是在综合分析大量层状岩石试验数据统计特征的基础上确定的，既考虑了层状岩石的固有离散性，又保证了数据质量。最终确定变异系数不应大于 30%，超出时应分析原因并增加试件数量重新试验。

（三）关于横观各向同性弹性参数计算方法的讨论。起草组就五个独立弹性参数中垂直于各向同性面的剪切模量 G_2 的获取方法进行了深入讨论。目前国内外获取层状岩石剪切模量 G_2 的方法主要有三类：其一为 45° 应变花直接测定法，通过在试件表面布置轴向、横向及 45° 三向应变片，由平面应变变换公式计算剪应变，结合截面剪应力求解 G_2 。该方法对试件贴片工艺、多通道数据同步采集精度要求高，试验操作复杂；其二是扭转试验法，通过对圆柱体试件施加扭矩直接测定材料的剪切模量，该方法物理意义明确，但需要专用扭转试验设备，多数常规岩土实验室不具备该条件，且层状岩石在扭转条件下易沿层理面发生错动剥离，试件破坏形态复杂，试验成功率低、数据离散性大；其三是经验估算法，通过经验公式，如基于 Saint-Venant 经验公式法近似估算 G_2 ，仅通过已测得的 E_1 、 E_2 、 ν_1 三个参数即可经验估算 G_2 ，计算便捷，但该方法为经验性推导，对不同岩性、不同层理结构的层状结构岩石适配性存在波动，计算精度有限，仅适用于初步估算或结果校核。本标准采用的本构反演法无需额外购置专用设备，仅利用常规单轴压缩试验中 0° 、 45° 、

90°等特征层理倾角的试验结果即可完成求解，操作简便、试验成本低；同时该方法以严格的横观各向同性本构理论为基础，物理意义清晰，以 $\beta=45^\circ$ 试件为例可直接推导出 G_2 的解析表达式，计算结果稳定可靠，便于工程技术人员掌握与推广应用。最终确定采用本构反演法计算 G_2 ，并在标准第 8.2.2 条中给出了详细的计算公式与求解步骤。

（四）关于各向异性系数定义的讨论。起草组就各向异性系数的表征参数选择进行了讨论。有成员提出可采用弹性模量的各向异性比值（如垂直层理方向弹性模量 E_1 与平行层理方向弹性模量 E_2 之比）来量化岩石的各向异性程度，理由是弹性模量是岩石变形特性的基本参数，连续采集的应力应变数据可提供较高的计算精度。但经充分讨论认为，弹性模量主要反映岩石在弹性阶段的变形响应，其取值依赖于弹性段的判定与选取，受试件端面加工精度、加载对中程度、应变测量方式等试验因素影响较大；更为关键的是，层状岩石在不同层理角度下的弹性阶段范围差异明显，斜交层理角度（如 $45^\circ\sim 60^\circ$ ）下岩石往往屈服较早、非线性特征突出，弹性模量的可比性与稳定性较差。相比之下，强度参数（如单轴抗压强度）直接反映岩石的极限承载能力与破坏特征，是岩体稳定性评判、支护结构设计中最为关注的核心参数；峰值强度的判定标准明确（荷载达到峰值后快速下降），测试稳定性好、人为干预少。大量试验研究表明，层状岩石单轴抗压强度随层理倾角的变化呈现显著的“U”形分布规律，各向异性特征清晰，采用强度比值定义各向异性系数更能反映层状岩石的本质各向异性特征，也更具工程实用价值。最终确定采用层理倾角 60° 与 0° 试件的单轴抗压强度平均值之比定义层理倾角影响下的强度各向异性系数 k_β ，采用同一中间主应力下层理走向角 0° 与 90° 试件的抗压强度平均值之比定义层理走向角影响下的强度各向异性系数 k_ω 。

上述分歧均通过起草组内部充分讨论、依据试验数据与理论分析达成一致意见，未形成重大原则性分歧。标准正式征求意见后，起草组将对征集到的各类意见进行逐条梳理、分析与处理，形成标准征求意见处理表，并在编制说明中予以详细说明。

八、采用国际标准或国外先进标准情况

目前，国际标准化组织（ISO）、美国材料与试验协会（ASTM）、国际岩石力学学会（ISRM）等国际组织尚未发布专门针对层状结构岩石各向异性力学试验的标准或建议方法。现行国际岩石力学试验标准与建议方法主要针对均质完整岩石，如 ASTM D7012、ISRM 建议方法等，均未涉及层理角度控制与各向异性参数计算等内容。

本标准在编制过程中，充分参考了国际岩石力学试验的通用原则与先进技术，包括：

（1）ISRM 发布的岩石单轴压缩试验、三轴压缩试验、巴西劈裂试验、直剪试验等建议方法中的通用技术要求，如试件加工精度、加载速率范围、数据采集要求等；

（2）ASTM 相关标准中关于岩石力学试验设备性能、传感器精度、安全防护等方面的技术要求；

（3）国际上在横观各向同性岩石本构理论、真三轴试验技术、各向异性强度准则等方面的前沿研究成果。

在此基础上，本标准针对层状结构岩石的各向异性特征，创新性地提出了层理角度组合体系、定向试件制备要求、五类试验的层理专项控制要点、横观各向同性弹性参数计算方法、各向异性系数定义等核心技术内容，填补了国际上该领域的标准空白。本标准的整体技术水平达到国际先进水平，在层状岩石真三轴各向异性试验的系统性与完整性方面具有国际领先性。

九、贯彻标准的措施建议

（一）标准发布后，由中关村绿色矿山产业联盟牵头，组织起草单位及行业专家成立标准宣贯工作组，制定宣贯工作计划，统筹推进标准的宣传贯彻工作。

（二）通过举办标准宣贯培训班、专题研讨会、技术讲座等多种形式，面向岩土检测机构、工程勘察设计单位、施工企业、高校科研院所及矿业生产单位，开展标准内容的培训与解读，帮助相关技术人员准确理解标准条款，掌握层状岩石力学试验的标准化操作方法。

（三）充分利用行业期刊、网站、微信公众号等媒体平台，广泛宣传标准的编制背景、技术内容与实施意义，提高行业对标准的认知度与认可度。

十、其他应予说明的事项

（一）本标准为首次发布，不存在废止现行有关团体标准的情况。

（二）本标准在实施过程中，如发现需要修改或补充的内容，将按照团体标准修订程序及时开展修订工作，确保标准内容的科学性、先进性与适用性。