

藏东南缝合带蛇绿岩高温蚀变特性及其微观机制

李青春¹, 朱鸯², 冉从彦¹, 赵小平¹, 顾东明^{2*}

(1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430000)

摘要: 藏东南雅鲁藏布江缝合带蛇绿岩体在深部地质过程及工程热效应下处于高温环境, 其蚀变特性直接影响岩体力学行为。通过宏观力学测试与微观分析, 研究了蛇绿岩高温蚀变损伤机制。结果表明, 高温导致岩石力学性能显著劣化, 抗拉强度在 200-400°C 和 600-800°C 区间线性衰减, 1000°C 时强度衰减超 80%。微观分析显示, 600-800°C 为含水矿物脱水分解临界温度, 孔隙率骤增 47% 以上, 裂纹网络化扩展。XRD 与 SEM 分析表明, 绿泥石和白云母分别在 800°C 和 1000°C 分解消失, 其脱水相变主导结构失稳; 石英在超过 800°C 时的重结晶与非晶化熔融是强度崩塌的微观诱因。研究揭示了蛇绿岩“脆性断裂-热化学损伤-熔融破坏”的渐进式破坏机制, 为理解构造缝合带蛇绿岩力学演化提供了理论支撑。

关键词: 高温; 蛇绿岩; 裂纹; 热化学损伤

中图分类号: P642.3

收稿日期: 2025-11-05

The characteristics of high-temperature alteration of ophiolites in a suture zone in southeastern Tibet and its microscopic mechanism

Li Qingchun¹, Zhu Yang², Ran Congyan¹, Zhao Xiaoping¹, Gu Dongming^{2*}

(1. Power China Chengdu Engineering Corporation Limited;

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430000, China)

Abstract: The ophiolite massif in the southeastern Tibet Yarlung Zangbo suture zone is subjected to high-temperature conditions due to deep geological processes and engineering thermal effects, with its alteration characteristics directly influencing the mechanical behavior of the rock mass. Through a combination of macroscopic mechanical tests and microscopic analysis, the damage mechanism of ophiolite under high-temperature alteration was investigated. The results indicate that high temperatures significantly degrade the mechanical properties of the rock, with tensile strength exhibiting linear attenuation in the 200–400°C and 600–800°C intervals, and a reduction exceeding 80% at 1000°C. Microscopic analysis reveals that 600–800°C is the critical temperature range for the dehydration and decomposition of hydrous minerals, during which porosity increases by over 47% and crack networks develop extensively. XRD and SEM analyses demonstrate that chlorite and muscovite decompose and disappear at 800°C and 1000°C, respectively, with their dehydration-induced phase transitions governing structural instability. Additionally, the recrystallization and amorphous melting of quartz above 800°C are identified as the microscopic triggers for strength collapse. This study elucidates the progressive failure mechanism of ophiolite, characterized by “brittle fracture–thermochemical damage–melting failure,” providing theoretical support for understanding the mechanical evolution of ophiolite in tectonic suture zones.

Key words: high temperature; ophiolite; cracks; thermochemical damage

基金项目: 国家自然科学基金 (U22A20601)

作者简介: 李青春(1983 -), 男, 正高级工程师, 博士, 从事工程地质与岩石力学方面的研究工作。E-mail: 52880335@qq.com, ORCID:0009-0003-3925-4577

0 引言

雅鲁藏布江缝合带位于印度大陆与亚洲大陆之间，这条缝合线被认为是晚白垩世到早第三纪，由于印度大陆向北漂移并最终与亚洲大陆南缘发生碰撞形成的。雅鲁藏布江缝合带内广泛分布的蛇绿岩是由一系列在成因上有联系的岩石组成的岩石序列，代表了古大洋岩石圈的残片，并常常侵位大陆边缘，是古板块缝合线的重要标志 (Dilek and Furnes, 2011; 刘飞等, 2018)。发育于该缝合带的蛇绿岩是新特提斯洋岩石圈的残余，它们受印度-亚洲大陆碰撞的影响而解体，呈串珠状分布 (Fures et al., 2020)。因此，蛇绿岩对于研究古大洋板块和造山带早期演化历史，恢复古板块的构造格局和构造拼合过程，认识板块拼合过程中的变质作用和流体交代作用具有重要意义。但当前对蛇绿岩的研究大多关注其起源、构造环境等 (张继恩等, 2021; 张旗等, 2022; Alshehri et al., 2024)。部分研究聚焦于蛇绿岩内部结构 (何兰芳等, 2025)。然而对蛇绿岩的高温蚀变研究则较少。雅鲁藏布江缝合带构造活动强烈，地热梯度异常，岩石普遍经历高温蚀变作用，深刻影响其力学特性与工程稳定性 (孙强等, 2013)。因此对蛇绿岩高温蚀变的研究对于理解蛇绿岩的组成、成因和就位机制研究具有重要的意义。

高温条件下岩石物理力学行为的研究在深部资源开发、高放废物地质处置及地热能利用等工程领域具有重要理论价值与现实意义，近年来已积累了大量室内试验、微观观测与数值模拟成果。在宏观力学性能研究方面，不少学者通过系统的热力试验，揭示了温度对岩石强度、变形及破裂特性的影响规律。研究人员 (Zhang et al., 2020; 赵怡晴等, 2020) 采用不同温度条件下的微观与宏观试验方法系统开展岩石热力学特性研究，发现温度变化过程中，岩石不仅在宏观形态上呈现出显著差异，其微观结构及矿物相变的演化路径也展现出规律性，这种多尺度物性变化会直接影响材料的热力响应，进而引发其宏观力学性能的显著弱化。Liu (2014) 对秦岭花岗岩在 25-1000°C 高温环境下力学性能的研究表明，其单轴抗压强度与巴西劈裂强度随温度升高显著劣化，在 1000°C 时分别降至常温状态的

18.7% 与 22.3%。Dwivedi 等 (2008) 通过在 30-160°C 温度范围内进行花岗岩的多场耦合试验，揭示了花岗岩的物理力学参数、渗透特性及微观损伤与温度场的相关性。

在微观结构演化与多尺度损伤机制方面，研究人员借助先进观测与表征技术，揭示热损伤过程中微-宏观力学性能的关联。例如，不少学者采用偏光显微和 SEM 技术对高温后花岗岩进行分析，研究花岗岩热裂纹的扩展规律 (李春等, 2020; 黄彦华等, 2023)。席道瑛等 (2007) 则发现花岗岩在 500-600°C 时微裂隙演化与石英相变强耦合。谌伦建等 (2005) 和赵亚永等 (2017) 指出，石英相变、云母滑移及长石双晶化引发的晶界弱化是砂岩、花岗岩等强度劣化的主控因素。陈世万等 (2017) 基于 CT 与渗流试验，阐明了热-力耦合下裂隙网络演化可使渗透率剧增 2-3 个量级，且与分形维数呈指数正相关。Faoro et al. (2013) 建立了裂纹密度 - 渗透率动态演化的理论模型，实现了对热损伤花岗岩渗透性演化规律的预测。

然而，现有关于岩石高温蚀变的研究大多集中于常见岩类 (如花岗岩、砂岩、大理岩) 或通用模型，而针对特定构造背景下的蛇绿岩系高温蚀变行为及其机制研究仍相对薄弱。藏东南雅鲁藏布江缝合带作为印度板块与欧亚板块碰撞的关键部位，蛇绿岩广泛分布，是深部地质过程和地热异常区的典型代表。同时该区域地热梯度高，隧道、边坡及深部能源工程 (如地热开采) 常面临高温环境，岩体在高温蚀变下力学性能劣化，易诱发滑坡、围岩大变形等地质灾害。例如，位于江达县金沙江右岸的白格滑坡，曾分别于 2018 年 10 月 11 日和 11 月 3 日发生两次大规模滑动，导致金沙江断流并在泄洪后冲毁下游多座桥梁、造成巨大经济损失 (许强等, 2019)，Tian 等 (2020) 指出水体渗入所引发的岩体极端风化 (如蛇绿岩蚀变) 是其形成的关键影响因素。因此，系统研究蛇绿岩高温蚀变特性与微观机制，对评估该地区工程岩体稳定性和深部地质过程具有重要理论意义与工程价值。

1 试验方法及过程

1.1 岩样制备与热处理方案

试验岩样取自西藏林芝市米林县，自然状态下

呈现青灰色，平均密度 2.83 g/cm^3 。该岩石的矿物成分主要有石英、钠长石、绿泥石、伊利石以及少量白云母等。根据国际岩石力学学会 (ISRM) 标准，对岩样进行加工处理，将岩样制备成直径为 36 mm 、高度为 80 mm 的圆柱体试样，并进一步加工为直径 15 mm 的圆形薄片和岩粉。为最大限度降低岩石非均质性对试验结果离散性的影响，所有试样均采用同一岩板。

将加工后的蛇绿岩试件实施热处理，热加工采用定制分体式 SX3-5-12A 马弗炉 (合肥科晶材料技术有限公司，中国)，该炉炉腔尺寸为 $300 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ ，其温控精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ ，最高温度可达 1200°C ，满足试验要求。如图 1 所示，以 $8^\circ\text{C}/\text{min}$ 的加热速率分别将蛇绿岩试样升温至 200°C 、 400°C 、 600°C 、 800°C 和 1000°C ，达到目标温度后，保温 10 h 。加热前后的岩样如图 2 所示。

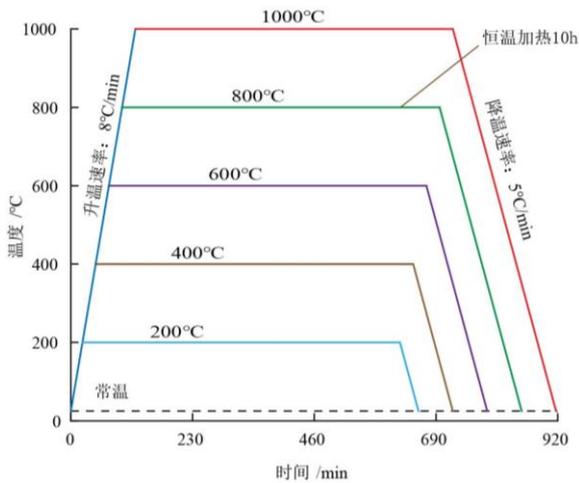


图 1 岩样热处理方案图

Fig.1 Rock sample heat treatment plan diagram



图 2 不同温度处理后岩样表面特征

Fig.2 Surface characteristics of rock samples after treatment at different temperatures

1.2 试验设备与试验方案

(1) 声波测试

为研究蛇绿岩试样的热损伤特性，对不同温度处理后的试样进行纵波波速测试。测试采用 Pundit Lab 非金属超声波检测仪 (瑞士博赛公司，瑞士)，

如图 3 所示。波速测量过程中，为防止超声探头与岩样两端之间的空气对测试结果产生影响，使用凡士林 (上海金山精细化工厂，上海) 充当耦合剂，以减小测量误差。

(2) 回弹测试

为了获得更精准的试验结果，采用施密特 L 型回弹仪 SH-70 (瑞士博赛公司，瑞士) 测量岩石回弹值，如图 3 所示。在试验前期对岩石进行测点分布的预设，按回弹仪的测试标准，分别对蛇绿岩表层岩块和加工后不同温度下的岩石试样进行测试，在相同测试位置冲击 10 次，去掉最大值最小值，取 10 次冲击值的平均值得到最终回弹值。

(3) 抗压强度测试

对热处理后的岩样进行静态抗拉试验，试验采用 WAW-1000 kN 电液伺服加载系统 (美特斯工业系统 (中国) 有限公司，中国)，如图 3 所示。该设备最大承载能力为 1000 kN ，试验采用位移控制模式，设定加载速率为 $0.1 \text{ mm}/\text{min}$ 。加载持续进行直至试样发生破坏，系统随即自动停止。

(4) 微观测试

使用光学显微镜对不同温度下的蛇绿岩进行微观观测并结合扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope SEM; 蔡司，德国) 与 X 射线衍射仪 (X-Ray Diffractometer XRD; 布鲁克，德国) 对热处理后的蛇绿岩的断裂断口微观形貌及矿物组含量进行分析，如图 3 所示。为了保证检测准确性，将常温及各温度处理条件下的岩样碎屑均等分为两份，其中一份挑选尺寸约为 10 mm 、具有相对规则几何形状且可用于扫描电镜观察的平整断口区域的碎块，喷镀金膜处理后进行 SEM 观察；另一份则研磨成约 200 目 (对应粒径约 $74 \mu\text{m}$) 的粉末，进行 X 射线衍射分析。



图3 主要试验设备与测试内容

Fig.3 Major experimental equipment and test contents

2 试验结果及分析

2.1 纵波波速变化规律

岩石纵波波速是表征其内部结构变化的重要指标。高温作用后，蛇绿岩内部发生的热开裂及矿物弱化将显著改变其弹性波各向异性特征。因此，可通过监测不同热处理条件下蛇绿岩样品的纵波波速变化，定性评估其内部结构的热损伤程度。测得蛇绿岩表面已蚀化部分的纵波波速为 1680 m/s，加热前试件平均纵波波速为 3750 m/s，加热前后各温度下试件的平均纵波波速如表 1 所示。

表 1 高温前、后蛇绿岩平均纵波波速对比情况

Table 1 Contrast of average longitudinal wave velocity before and after high temperature

温度/°C	纵波波速/(m/s)	
	同批未热处理对照样的波速	热处理后波速
25	3720	3670
200	3716	3565
400	3721	2967
600	3719	1981
800	3720	875
1000	3722	734

为进一步分析高温对蛇绿岩力学损伤特性的影响规律，采用热损伤 D 对蛇绿岩纵波波速的衰减规律进行计算。参照郑亚东（2025）的研究方法，热损伤值 D 与纵波波速的关系的计算公式如下：

$$D = 1 - \frac{v}{v_0} \quad (1)$$

式中： D 为热损伤值； v_0 为加热前蛇绿岩试样的纵波波速（m/s）； v 为加热后蛇绿岩试样的纵波波速（m/s）。

由式 1 可计算出不同温度下蛇绿岩波速的热损伤变化与纵波波速的演化规律，结果如图 4 所示。蛇绿岩的纵波波速与热损伤因子随温度升高呈现协同演化的规律。在 25–200°C，波速衰减与损伤均不明显，但整体结构稳定；在 200–600°C 时，波速下降梯度增大，损伤开始逐渐累积；温度区间为 600–800°C 时，波速急剧下降，损伤加速发展，损

伤因子增幅显著，热衰减幅度最高达 29.8%；800°C 为关键拐点，损伤因子开始缓慢上升，同时波速呈现下降减缓。这表明高温损伤在 600°C 后被显著激活，并于 800°C 后主导岩体劣化。这进一步验证了高温对蛇绿岩内部结构影响的显著性且在 600–800°C 的温度范围内影响最大。

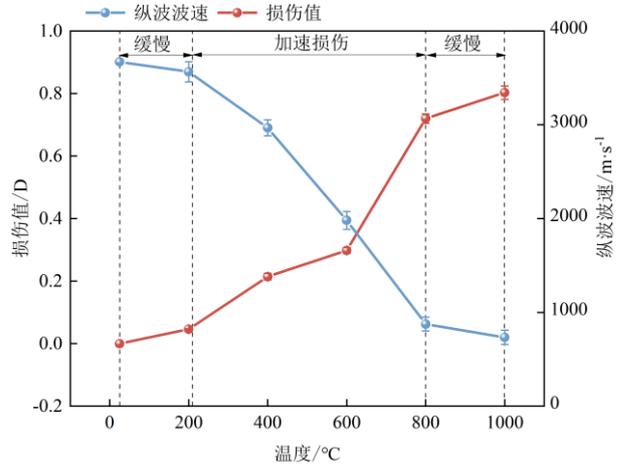


图 4 岩石损伤值及纵波波速随温度变化规律

Fig.4 Variation of rock damage value and P-wave velocity with temperature

2.2 力学特征变化规律

(1) 抗拉强度

在岩石抗拉强度测试中，岩石破坏时峰值应力是表征材料抗拉强度与破坏阈值的核心参数，是揭示脆性材料损伤演化机制及指导工程抗裂设计的关键科学依据。本试验中，峰值应力 σ_{peak} 的试验数据和拟合曲线如图 5 所示，曲线数据拟合较好 ($R^2=0.95$)，峰值应力随温度的上升均呈线性下降。

从图 5 可看出，抗拉强度整体呈现非线性衰减特征，从常温 5.75 MPa 降至 1000°C 时的 1.23 MPa，其转折温度与矿物相变具有显著相关性。在 200–400°C 时，蛇绿岩的抗拉强度显著降低。相较于常温状态 5.75 MPa，经 200°C 和 400°C 热处理后，其抗拉强度分别下降至 5.42 MPa 和 3.77 MPa。通过计算可得，200°C 和 400°C 条件下的抗拉强度相对于常温值分别下降了 5.69% 和 34.34%。在 600–800°C 时，蛇绿岩的抗拉强度处于 1.47–3.52 MPa。在这一温度区间内，试样的抗拉强度劣化幅度相对其他温度范围更强烈。

从试验结果可以看出，蛇绿岩抗拉强度随温度升高呈递减趋势，从常温到 1000°C，抗拉强度由初始值持续下降。特别是在 600–800°C 高温区间内，抗拉强度下降速率显著加快，表现出更明显的衰减

趋势，说明此温度范围对蛇绿岩力学性能的弱化作用最为显著。因此，该温度区间成为蛇绿岩抗拉强度衰减最快、力学性能弱化最为显著的阶段。

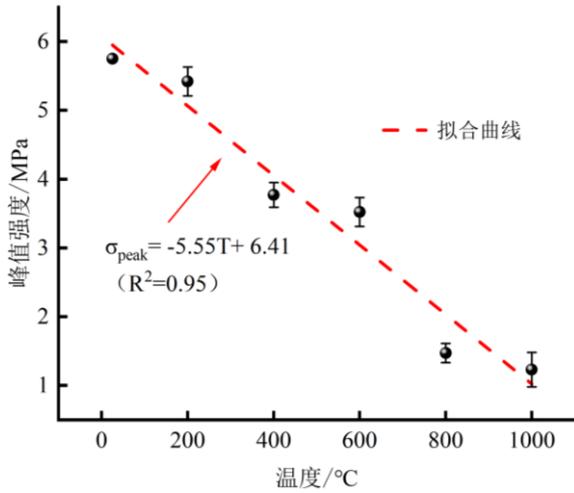


图5 岩石峰值强度随温度变化规律

Fig.5 Variation of rock peak strength with temperature

(2) 回弹值

受现场测试设备及技术条件限制，野外地质调查中难以实现岩石关键力学参数的原位精准测定。基于表面回弹值与力学性质的经验关系式，常采用回弹仪无损检测技术，间接表征岩体表层硬度、单轴抗压强度等力学特性，进而为工程地质评价提供量化依据。通过不同温度下梯度回弹测试揭示了蛇绿岩回弹值的温度响应规律，如图6所示。

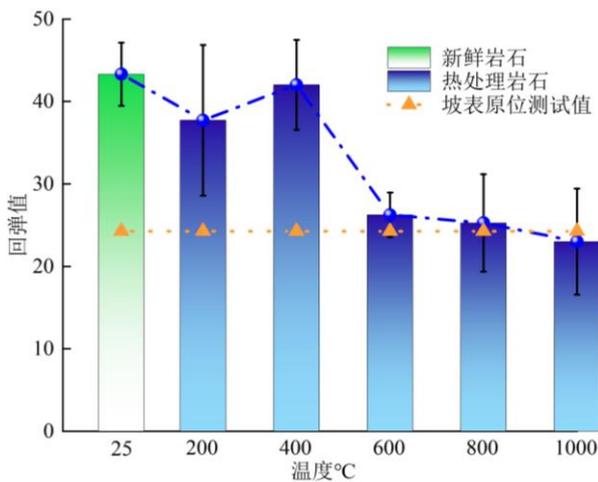


图6 岩石回弹值随温度变化规律

Fig.6 Variation of rock rebound value with temperature

从图6可以看出，岩石回弹值随温度升高呈现非线性衰减趋势：在低温段 0-400°C 仅下降约 12.3%，此时岩石内部结构尚未发生显著热损伤，力学强度基本保持稳定；在 400-600°C 的温度范围

内，岩石回弹显著下降，反映出岩石发生明显劣化，抗压强度和弹性模量较于常温状态显著降低；600-1000°C 的温度范围内岩石的回弹值趋于稳定，高温作用后岩石逐渐趋于塑性状态，力学性能衰减速率减缓，温度对其强度的影响减弱。对比自然条件下已经蚀化的蛇绿岩基准回弹值（24.27），热处理下的岩石在 600-800°C 温度区间的回弹表现出显著的趋同性，相对差异率波动范围仅为 -1.94% 至 4.37%，能够进一步揭示出 600-800°C 下岩石的热力学状态与岩石表层物理特性具有等效特征。

2.3 微观结构变化

(1) 裂纹破坏特征

蛇绿岩圆盘试样在经过热处理后，其破裂断口形貌精确记录了材料在高温下的损伤与失效过程，蕴含着揭示其损伤力学行为的关键信息。通过系统分析试样破裂模式的演化规律，可以定量揭示不同高温区间对岩石内部变形机制、裂纹成核与扩展行为，乃至最终宏观断裂特征的深层影响。从图7可以看出，在 200-400°C 温度范围内，试样呈现单一径向主裂纹扩展，断口平整，属典型脆性拉伸破坏，对应的抗拉强度缓降 20-30%；在 600-800°C 温度区间时，裂纹复杂化，形成放射状分叉裂纹，断口粗糙；温度达到 1000°C 时试样完全碎裂，断口呈现熔融玻璃质，强度衰减超 80%，证实了高温熔融导致结构失稳。



图7 岩石劈裂破坏状态

Fig.7 Rock splitting failure state

岩石宏观断裂的本质，可追溯至其内部初始微裂纹的萌生、稳定扩展及最终贯通，这一过程归根结底是岩石矿物颗粒与晶体结构在应力下发生渐进性劣化的直观体现。为系统地揭示温度对蛇绿岩微观损伤演化规律的影响，对热处理后的岩石试件 SEM 图像进行分析。图8为蛇绿岩在相同观测位置

于不同温度处理后的扫描电镜拍摄的 SEM 图像，放大倍率依次为 2000、6000、20000 倍。

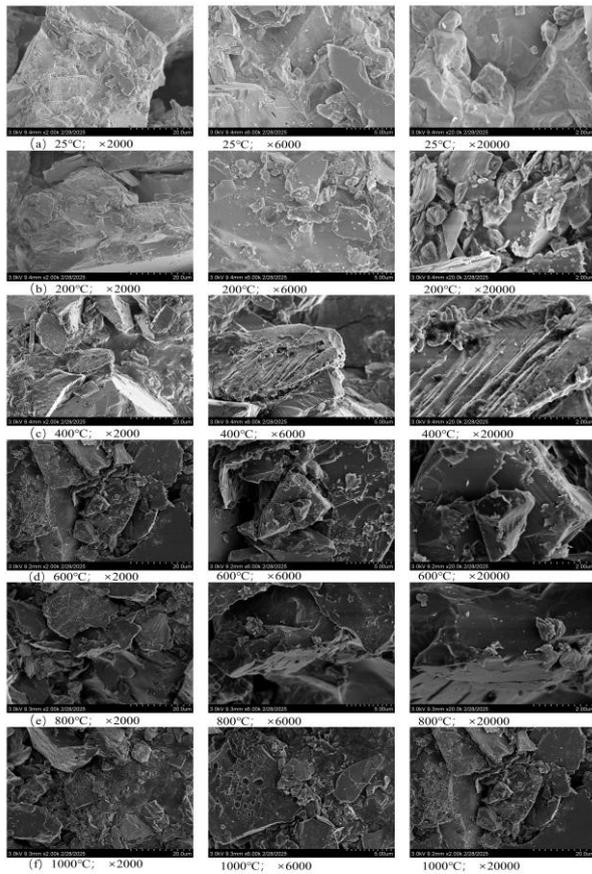


图 8 加热对试样显微结构的影响
放大倍率为 2000, 6000 和 20000

Fig.8 Effect of heating on the specimen microstructure
shown at magnifications of 2000, 6000, and 20000

研究表明蛇绿岩的热损伤演化在不同观测尺度下呈现互补性结构信息。2000 倍图像清晰揭示了断口宏观形貌的阶段剧变：从 25-400°C 的表面粗糙化与轻微分层，到 600-800°C 关键区间内裂纹网络化、孔隙贯通及熔融包裹体出现，直至 1000°C 时棱角消失并被熔蚀曲面与蜂窝孔洞取代，显示出结构彻底重塑。6000 倍图像进一步聚焦于细观尺度上裂纹与孔隙的协同演化：400°C 后新生微裂纹与溶蚀孔洞在尺寸和数量上同步增长，600°C 后裂纹呈现发散性增宽且孔隙相互连接形成通道雏形，清晰地展现了损伤连通性发展的细观过程。20000 倍图像则提供了矿物颗粒界面的微观证据：常温下可见少量定向排列的原生微裂纹；200-400°C 时晶体热膨胀差异导致原裂纹扩展并产生新的粒间裂纹网络；600°C 这一临界温度下，可明确观察到颗粒显著分离、局部熔融边缘（玻璃化）等矿物相变起始的直接证据；800-1000°C 时，晶体表面布满裂纹并

发育强烈熔洞，尤其可见蛇纹石等矿物脱水分解与熔融导致的晶界彻底失效。三个不同倍数的观测共同表明，600-800°C 的温度区间对岩石微裂隙的发展影响达到最大。600°C 已超越蛇绿岩中蛇纹石矿物的稳定域，进入热液蚀变与部分熔融共存阶段。蛇纹石作为蛇绿岩中的特征矿物，其脱水分解是导致岩石结构失稳的关键因素。800°C 时熔融主导的结构崩塌显著加速，原始粒状结构完全消失，此时的岩石力学强度也会急剧下降。其中高倍数揭示了相变与晶界失效的微观机理，中低倍数则分别刻画了细观损伤连通路径与宏观形貌破坏格局，三者有机结合完整揭示了热损伤的多尺度演化本质。

(2) 矿物成分及含量

图 9 是原岩在不同温度下的 X 射线衍射图谱。根据图谱定性分析，蛇绿岩主要有石英、钠长石、绿泥石、伊利石以及白云母，其中石英含量最为丰富，占比 45.5%，钠长石次之，占比 45.2%，而云母、伊利石和绿泥石的含量则相对较低，分别为 7.3%、1.3% 和 0.8%。同时，力学实验表明，石英与钠长石的含量对试样的力学特性具有显著影响，二者在力学行为中作用关键。随着热处理温度升高，图谱中矿物相的衍射峰位置与强度呈现规律性变化，系统揭示了矿物组成在热作用下的动态响应。在 200-400°C 区间，衍射峰向低角度轻微偏移，主要因热膨胀引起晶格常数增大所致；温区在 600-800°C 时，相变反应趋于显著，其中最突出的特征是源自图 9 中绿泥石等层状硅酸盐对应的特征衍射峰强度显著衰减，并最终完全消失，标志着该类矿物发生彻底分解，其结构由长程有序向无序态转变；当温度达到 1000°C 时，石英与钠长石等主要矿物的衍射峰出现明显宽化，并伴随非晶态弥散峰的形成，表明部分矿物发生熔融，晶体长程有序结构进一步破坏。这些衍射峰强度的系统变化，与矿物含量随温度的演变直接相关，图谱中原生矿物衍射峰的衰减与新生物相衍射峰的增强在时序上相互对应，完整记录了高温条件下蛇绿岩所经历的“脱羟基—分解—熔融”这一阶梯式连续反应路径。

经历不同高温作用后的蛇绿岩主要矿物成分与常温下的蛇绿岩成分大致相似，但当温度升高至 600-800°C 时，观察到蛇绿岩中矿物的衍射角峰值出现细微变化，证实在此温度区间内岩石的矿物组成发生改变。而不同温度条件下矿物最大衍射强度的变化现象与其相变过程呈现出密切关联。高温下岩

石矿物相变通常会造成矿物体积发生变化，引起岩石内部结构局部损伤，这也在一定程度上造成了蛇绿岩宏观力学参数的劣化（Wu et al., 2019）。

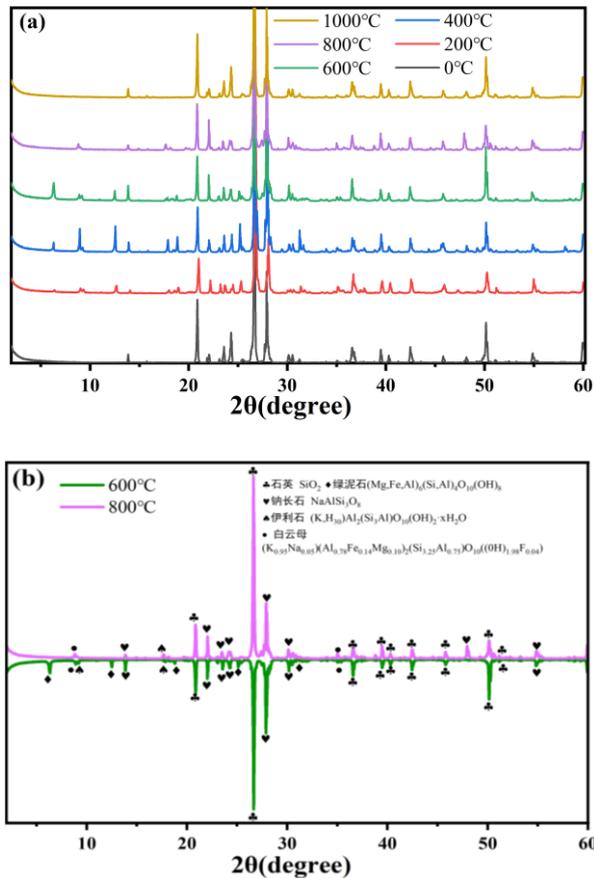


图9 不同温度下蛇绿岩试样 X 射线衍射图谱

Fig.9 XRD spectra of ophiolite samples at different temperatures

采用基于 Rietveld 全谱拟合的相定量方法，并结合参考强度比对含水矿物及少量组分进行校正，以获得各矿物相的体积分数。不同温度下蛇绿岩矿物含量变化如图 10 所示。当温度在 25-600°C 时，蛇绿岩各矿物含量相对变化较大，当温度超过 600°C 后，矿物含量变化较小。当温度达到 800°C 时，反映绿泥石的衍射峰消失，温度升至 1000°C 时，伊利石和白云母矿物晶格消失。

随温度升高，石英含量从 25°C 的 45.4% 增加至 1000°C 的 72.2%，表明石英具有高温稳定性；而钠长石含量呈现先减后增的趋势，绿泥石、伊利石和白云母等含水矿物随温度升高逐渐减少，其 1000°C 时完全分解，这主要是由于含水矿物晶格在高温下发生脱水分解反应，结构遭到破坏。在 800-1000°C 温度区间内矿物的消失标志着蛇绿岩在极端高温条

件下发生了彻底的矿物相变。含水矿物的分解也会进一步导致岩石孔隙结构和力学性质的显著改变，该变化规律与俯冲带或深部地壳环境的变质过程具有良好对应关系（Gualtieri et al., 2006），为理解高温条件下岩石的物理化学演化机制提供了依据。

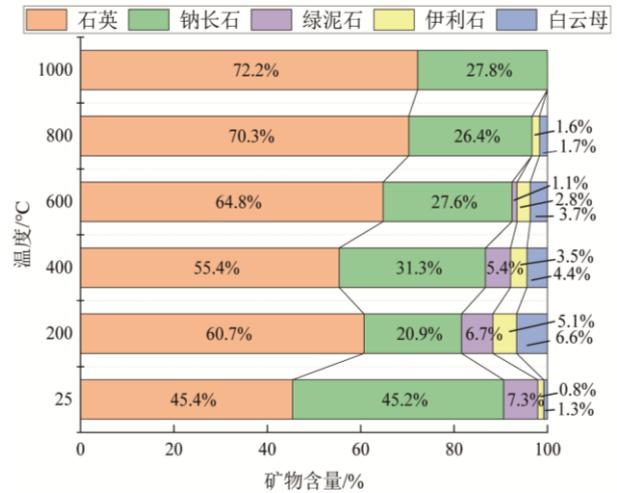


图 10 岩石矿物含量随温度变化曲线

Fig.10 The rock mineral content-temperature variation curve.

3 讨论

3.1 高温作用后蛇绿岩力学性能的阶段性劣化机制

结合光学显微镜观测、矿物相相变分析及力学试验结果可发现，蛇绿岩在高温作用下的力学性能劣化总体呈现由“脆性断裂—热化学损伤—熔融破坏”控制的阶段性演化特征：随着温度由室温升至 1000°C，抗拉强度先缓慢衰减，后急剧降低直至几乎完全丧失，其临界温度区间与橄榄石、蛇纹石等典型矿物的相变阈值高度吻合，凸显出热损伤行为的岩性依赖性与多尺度耦合性。

基于光学显微镜正交偏光图像（图 11）分析，未经高温处理的蛇绿岩主要由石英（Qtz）、白云母（Ms）、铬铁矿（Chr）、橄榄石（Ol）和蛇纹石（Srp）等矿物组成。在 25-400°C 区间内，具有高正突起的橄榄石颗粒边缘裂隙处逐渐被蛇纹石替代，形成叶片状蚀变结构，表明岩石正处于蛇纹石化过程中，该阶段以热膨胀引起的沿晶微裂纹扩展为主，热应力导致晶界滑移，含水矿物（如绿泥石、伊利石）晶格尚未发生明显分解，抗拉强度降幅一般低于 30%，力学弱化主要源于热应力驱动的脆性损伤；当温度升至 600 - 800°C 时，橄榄石蚀变进一步加

剧，裂纹显著发育，生成了大量蛇纹石。这些蛇纹石在镜下多呈低至中正突起，且边界模糊。同时可见钠长石蚀变形成的斜长石（Pl），其仍保留较为完整晶形和清晰环带，此时穿晶裂纹呈网络化发育，XRD 图谱中绿泥石衍射峰消失，标志含水矿物发生脱水分解并引发显著热化学损伤，释放的流体促进裂纹网络贯通，孔隙率急剧增大，抗拉强度降幅可达 70%。其中孔隙率是基于 SEM 图像的二值化处理对岩石孔隙结构进行定量表征得到的（张旭，2024）。该阶段力学响应由矿物相变与热开裂协同控制。与已有研究中砂岩热损伤阈值多处于 400-600°C 相比（薛圣泽，2023），蛇绿岩中富铁镁矿物的低热稳定性可能导致其主导相变与强度突降温度更高，从而体现出岩性对热损伤行为的关键控制作用。在 600-800°C 的高温区内，蛇绿岩的强度演化由多种相

互竞争的物理化学过程共同主导：一方面，自由水、结合水、结晶水及结构水的持续逸散削弱了颗粒粘结并增加孔隙度，部分矿物相变或分解破坏原始结构骨架，矿物颗粒间显著的热膨胀系数差异引发不协调变形与热开裂扩展以及整体热膨胀加剧微应变，这些都显著劣化了蛇绿岩的强度。另一方面，局部矿物重结晶可能形成更稳定的晶格联结，同时部分低熔点矿物熔融产生的熔体可能短期填充裂缝并产生局部粘结效应。虽然存在潜在的强度增强机制，但此温度区间内强度劣化效应通常占据主导地位，导致蛇绿岩的整体强度呈现持续下降趋势，所以在 600-800°C 的温度范围内，岩石的抗拉强度衰减更快，其对蛇绿岩试样的力学特性弱化作用最大。

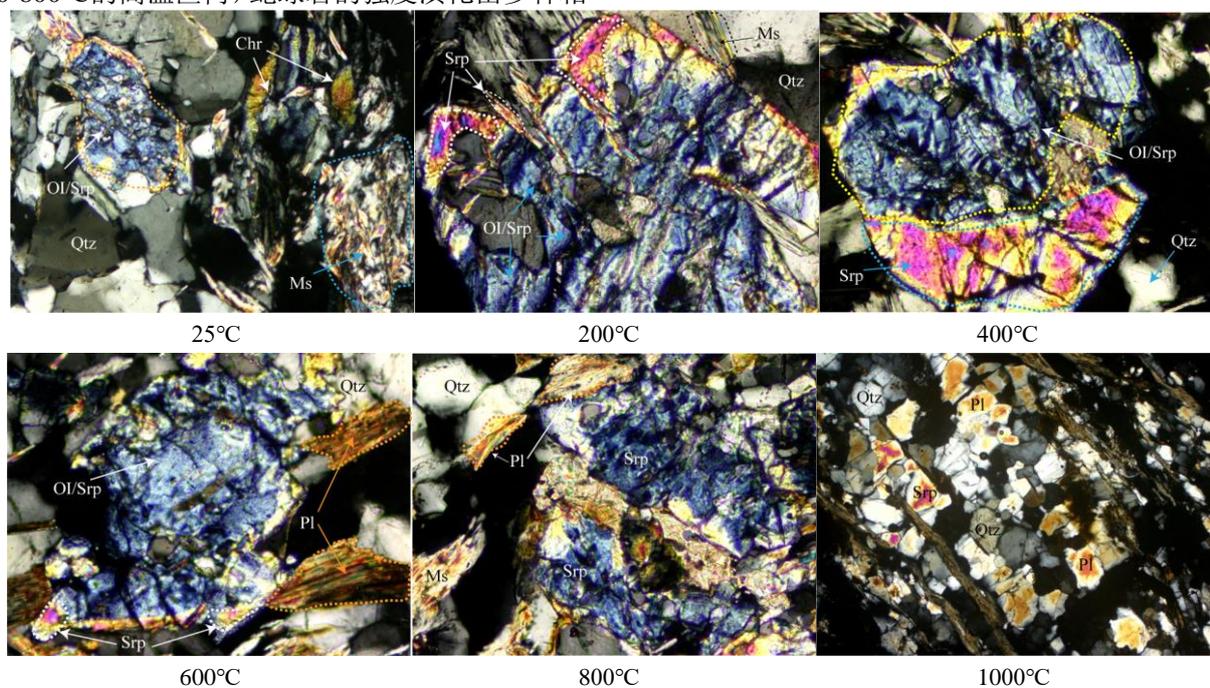


图 11 不同温度下蛇绿岩试样光学显微观测（正交镜，5×10）

Fig.11 Optical micrographs of Ophiolite samples at different temperatures (Orthogonal Mirror, 5×10)

在 800-1000°C 的超高温阶段，石英发生重结晶与非晶化熔融，熔融相沿晶界及裂隙渗透，原始岩石结构基本解体，力学性能进入由熔融主导的失稳状态，强度几乎完全丧失。为系统揭示蛇绿岩在高温作用下从微观结构演化至宏观力学响应的完整损伤路径，结合上述多尺度试验结果构建了蛇绿岩温

度损伤机理示意图（图 12），综合体现了矿物相变、孔隙结构与力学性能之间的耦合关系，不仅直观印证了前述波速衰减、回弹趋同及强度劣化等宏观规律，也为理解藏东南高地质灾害的热力学成因及深部工程岩体稳定性评估提供了理论模型依据。

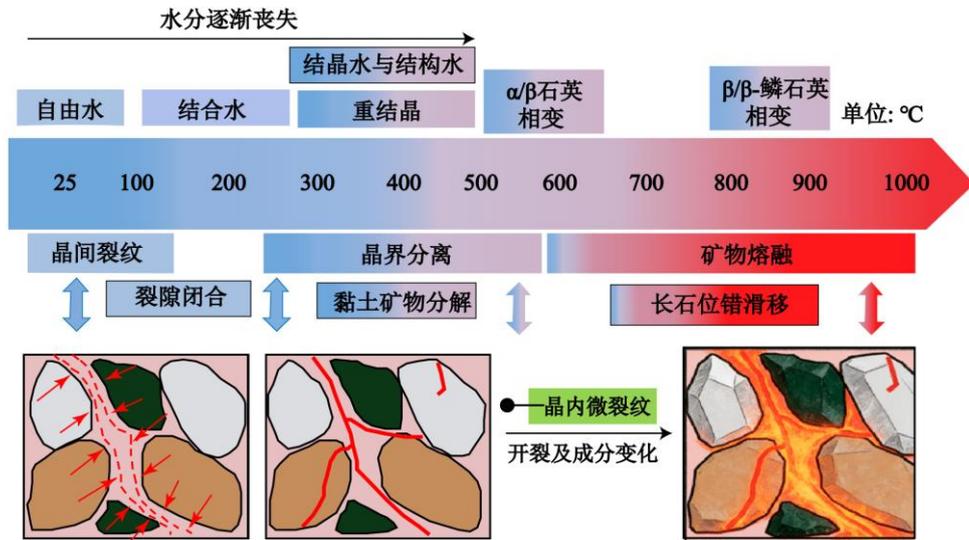


图 12 蛇绿岩温度损伤示意图

Fig.12 Schematic diagram of temperature-induced damage in Ophiolite

3.2 对工程稳定性与深部地质过程的启示

在工程实践方面，蛇绿岩在 600-800°C 区间内含水矿物的阶梯式分解与力学参数急剧劣化，这略高于花岗岩中 500-600°C 的相变区间与砂岩中 400-600°C 的相变区间（高志恒，2025；薛圣泽，2023），藏东南工程评价应采用蛇绿岩自身的温度阈值、并重点监测防控进入该区间后的快速劣化。藏东南地区位于高温地热活动带的边坡、隧道围岩及深部能源开采层系极易发生热损伤诱发的岩体失稳，进而引发高位滑坡和围岩大变形等地质灾害，这与张永双等（2024）研究类似。本研究通过揭示蛇绿岩高温损伤机制，为藏东南地区工程地质灾害的成因解释和防控提供了具体理论支撑。同时建议在该类地区开展工程勘察与稳定性评价时，引入红外热成像与原位地温监测技术，识别潜在热损伤岩体，并建立温度阈值预警机制。

在地质科学研究层面，该成果为理解雅鲁藏布江缝合带深部物质组成与构造演化提供了实验依据。Zhang 等（2017）采用传统 Mg-Fe 交换温度计计算表明，该地区蛇绿岩曾经历超过 900°C 的峰值温度；同时，蛇绿岩在 600°C 以上出现的脱水分解与局部熔融等特征，与俯冲带蛇纹岩的变质演化过程高度相似，暗示该缝合带深部可能存在以流体为媒介的脱水致脆化和部分熔融层，这可能对深部地震成核和地壳流变行为具有控制作用。本研究从微观机制上连接了矿物相变与宏观力学响应，为开展俯冲带热-化学-力学耦合数值模拟提供了关键参数，对深化认识大陆碰撞带深部物质循环和动力学过程具有重要意义。

需要指出的是，本文结论基于藏东南构造背景

蛇绿岩在单轴无围压条件下获得，其高温损伤主要由含水矿物脱水分解与高温熔融共同控制。该机制对富蛇纹石化、含水矿物较多且经历明显蚀变与流体改造的蛇绿岩具有一定参考意义，但不同构造环境（洋中脊、岛弧等）蛇绿岩的原岩矿物组合、蛇纹石化程度及热—流体演化历史差异可能使损伤主控温度区间与力学响应发生偏移；同时围压可抑制热诱导裂纹扩展并延缓宏观破坏，因此本文结果更适用于无围压或低围压的极限劣化情形。未来需开展考虑围压效应的三轴高温试验，以验证并完善其在真实三向应力状态下的适用性。

4 结论

（1）蛇绿岩的波速衰减率随温度升高而逐渐变大，且在 400-800°C 温度范围内处于快速下降阶段。在 600-800°C 范围内，波速衰减率显著增大，最高达到 80%，岩石严重损伤。

（2）蛇绿岩的力学性质受温度的影响。抗拉强度和回弹值随温度升高呈下降趋势，在 600-800°C 温度范围内，力学特性弱化作用最大，当温度超过 800°C 时，温度升高对岩石力学强度的影响削弱。

（3）受不同温度作用影响，蛇绿岩内部孔隙与裂隙的发育程度存在显著差异。试验发现，随温度升高，岩石中微裂纹数量急剧增多，且其相互贯通程度显著提高，呈现出明显的热诱导微裂隙网络。温度达到 600°C 时，矿物发生明显相变，熔融-重结晶现象主导结构演化，裂纹连通性达到临界状态，岩石的力学强度近乎丧失。

(4) 在热处理过程中, 蛇绿岩内部的矿物成分比例及衍射强度均随温度发生显著改变。随着热处理温度升高, 石英相对含量持续增加, 而长石矿物的含量则呈现先降后升的演化特征。同时 400°C 被确认为各类矿物衍射强度变化趋势的临界温度点。

(5) 蛇绿岩高温损伤机制具有三阶段演化特征: 低温段 ($\leq 400^\circ\text{C}$) 以热膨胀微裂纹为主导, 中温临界相变段 ($600\text{--}800^\circ\text{C}$) 受热-化学协同损伤控制, 超高温段 ($\geq 800^\circ\text{C}$) 由熔融非晶化引发结构崩塌, 三阶段抗拉强度衰减率分别为 30.4%、70.1% 和 63.8%, 矿物相变阈值 (绿泥石脱水、石英熔融) 与力学拐点高度关联。

参考文献

- Alshehri, F., Mokhles, K., Paul, D. et al., 2024. Gold and sulfide-bearing listvenite in the mantle section of the Tays ophiolite in the Arabian Shield, Saudi Arabia. *Geochemistry*, 84(2): 126081
- Dilek, Y., Fures, H., 2011. Ophiolite genesis and global tectonics: geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. *Bulletin*, 123(3-4), 387-411.
- Dwivedi, R.D., Goel, R.K., Prasad, V.V.R., et al., 2008. Thermo-mechanical properties of Indian and other granites. *International Journal of Rock mechanics and mining Sciences*, 45(3): 303-315.
- Faoro, I., Vinciguerra, S., Marone, C., et al., 2013. Linking permeability to crack density evolution in thermally stressed rocks under cyclic loading. *Geophysical Research Letters*, 40(11): 2590-2595.
- Fures, H., Dilek, Y., Zhao, G., et al., 2020. Geochemical characterization of ophiolites in the Alpine-Himalayan Orogenic Belt: Magmatically and tectonically diverse evolution of the Mesozoic Neotethyan oceanic crust. *Earth-Science Reviews*, 208: 103258.
- Gualtieri, A.F., Ferrari, S., 2006. Kinetics of illite dehydroxylation. *Physics and Chemistry of Minerals*, 33: 490-501.
- Liu S, Xu J. 2014. Mechanical properties of Qinling biotite granite after high temperature treatment. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 71: 188-193.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.07.008>
- Tian, S.F., Chen, N.S., Wu, H., et al., 2020. New insights into the occurrence of the Baige landslide along the jinsha River in Tibet. *Landslides*, 17(5): 1207-1216.
- Wu, X.G., Huang, Z.W., Cheng, Z., et al., 2019. Effects of cyclic heating and LN2-cooling on the physical and mechanical properties of granite. *Applied Thermal Engineering*, 156: 99-110.
- Zhang, L.Y., Mao, X.B., Li, M., et al., 2020. Brittle-ductile transition of mudstone in coal measure rock strata under high temperature. *International Journal of Geomechanics*, 20(1): 04019149.
- Zhang, Y.L., Sun, Q., He, H., et al., 2017. Pore characteristics and mechanical properties of sandstone under the influence of temperature. *Applied Thermal Engineering*, 113: 537-543.
- 谌伦建, 赵洪宝, 顾海涛, 等, 2005. 煤层顶板砂岩在高温下微观结构变化的研究. *中国矿业大学学报*, 34(4): 443-446.
- 陈世万, 杨春和, 刘鹏君, 等, 2017. 热损伤后北山花岗岩裂隙演化及渗透率试验研究. *岩土工程学报*, 39(08): 1493-1500.
- 高志恒, 2025. 高温-冷却循环后花岗岩物理力学特性演化及微观机制研究(博士学位论文). 吉林: 吉林大学.
- 何兰芳, 王绪本, 熊发挥, 等, 2025. 蛇绿岩内部结构. *岩石学报*, 41(2): 657-668.
- 黄彦华, 陶然, 陈笑, 等, 2023. 高温后花岗岩断裂特性及热裂纹演化规律研究. *岩土工程学报*, 45(04): 739-747.
- 李春, 胡耀青, 张纯旺, 等, 2020. 不同温度循环冷却作用后花岗岩巴西劈裂特征及其物理力学特性演化规律研究. *岩石力学与工程学报*, 39(9): 1797-1807.
- 刘飞, 连东洋, 牛晓露, 等, 2018. 雅鲁藏布江缝合带西段东波 MORB 型均质辉长岩的大洋核杂岩成因. *地球科学*, 43(04): 952-974.
- 孙强, 张志镇, 薛雷, 等, 2013. 岩石高温相变与物理力学性质变化. *岩石力学与工程学报*, 32(5): 935-942.
- 赵亚永, 魏凯, 周佳庆, 等, 2017. 三类岩石热损伤力学特性的试验研究与细观力学分析. *岩石力学与工程学报*, 36(1): 142-151.
- 赵怡晴, 吴常贵, 金爱兵, 等, 2020. 热处理砂岩微观结构及力学性质试验研究. *岩土力学*, 41(7): 2233-2240.
- 席道瑛, 唐杰, 陶月赞, 等, 2007. 岩石的微细缺陷对外载响应概率的实验与模拟, *中国科学技术大学学报*, 37(8): 904-910.
- 许强, 董秀军, 李为乐, 2019. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警. *武汉大学学报(信息科学版)*, 44(07): 957-966.
- 薛圣泽, 2023. 热解条件下富油煤热力学响应与热损伤机制研究(博士学位论文). 陕西: 西安科技大学.
- 张继恩, 陈艺超, 肖文交, 等, 2021. 蛇绿岩与蛇绿混杂带结构. *地质科学*, 56(02): 560-595.
- 张旗, 任纪舜, 赵磊, 等, 2022. 中国蛇绿岩清理—兼论蛇绿岩研究的新思路. *地质论评*, 68(03): 1061-1078.
- 张旭, 2024. 冻融循环作用下细粒含量对冰碳土特性的影响研究(博士学位论文). 西藏: 西藏大学.
- 张永双, 王冬兵, 李雪, 等, 2024. 青藏高原构造混杂岩带的孕灾地质基因为与重大工程地质问题研究. *地质学报*, 98(03): 992-1005.
- 郑亚东, 2025. 考虑温度与升温速率效应的煤系砂岩损伤演化及破裂机理研究(博士学位论文). 江苏: 中国矿业大学.