

瓦屋 IV 矿段岩爆倾向性红外特性分析

摘要：随着磷矿资源开发深入，岩爆灾害频繁发生，对矿山安全构成严重威胁，亟需有效的预警方法。本研究采用热红外技术对瓦屋 IV 矿段岩爆前兆进行探测，旨在提出一种无接触、实时且精准的岩爆灾害预警方法。通过在井下采集岩样后加工进行单轴加载试验，并结合热红外技术进行观测，本文成功识别了两种岩爆预兆现象：大面积高温预兆和多斑点或多微条带高温预兆。此外，将试验结果应用于现场观测，系统分析了矿柱和巷道侧壁等关键区域的红外特性，揭示了岩爆倾向区的应力集中特点和红外辐射异常模式。通过单轴加载试验，捕捉到岩石应力状态变化引发的热异常现象。试验结果表明：岩石在接近破裂前会出现显著的热红外异常，为岩爆预警提供了可靠的物理依据。矿柱和巷道侧壁是岩爆高发区，尤其是矿柱上半部与顶帮连接区域以及巷道侧壁与顶帮连接处的应力集中现象最为显著。掌子面中心区域的圆斑状红外辐射值异常指示了能量的集中释放，为岩爆灾害的早期识别创造了新的视角。本研究不仅为磷矿山岩爆灾害防治提供技术手段，还为其他深部工程的岩爆灾害预警提供了新的方法支撑，也为进一步发展热红外技术在地下工程安全监测中的应用奠定了基础。通过实验与现场观测相结合的方法，为矿山安全管理和灾害预防提供了科学依据和理论指导。

关键词：红外热成像；岩爆倾向性；红外特性分析；

1 引言

岩爆是地下工程中常见的灾害，由于其具有突发性、随机性和危害性，预测和防控难度较大。随着我国矿山行业的深部开采，岩爆灾害的诱因更加难以判断及预测，因此，找到一个高效直观的岩爆预测方式成为矿山行业发展的重中之重。目前已有的岩爆预测方法有微震监测、声波监测、应力监测、地质雷达等，但这些方法都有其局限性。针对深部开采岩爆的发生原理以及如何防控，国内外做了许多研究。其中，热红外监测被发现具有非接触、实时监测，以及直观性强的优点，因此被应用于岩爆的研究中。通过室内试验和现场应用，发现热红外技术在岩爆预测中具有较好的应用前景。在室内试验方面，通过模拟岩爆发生的环境和条件，利用红外成像技术对岩石的红外辐射特性进行测量和分析，可以发现岩石在破裂前会发出明显的红外辐射异常信号。这些异常信号可以反映岩石内部的应力状态和损伤程度，为岩爆的预测提供依据。在现场应用方面，通过在矿柱、掌子面、侧壁等不同场合进行红外辐射测量，可以发现不同场合的红外辐射特性存在差异。这些差异可能与岩石的应力状态、损伤程度、含水率等因素有关。通过对这些差异进行分析和归纳总结，可以得出井下各种场合的红外特性规律，为岩爆的预测和防控提供参考。热红外技术在岩爆预测中具有较好的应用前景。通过室内试验和现场应用，可以深入了解岩石的红外辐射特性和岩爆发生机理，为岩爆的预测和防控提供新的思路和方法。虽然目前该技术的应用还处于探索阶段，但随着技术的不断发展和完善，相信其在未来的矿山安全生产中会发挥越来越重要的作用。

2 红外成像机理

红外成像技术基于一个物理原理，即所有温度高于绝对零度（ -273.15°C ）的物体都会发射出红外辐射。这种辐射不仅与物体的温度有关，还携带着物体表面和内部状态的信息。热红外成像仪利用斯特藩-玻尔兹曼定律(Stefan-Boltzmann

Law)，该定律指出，物体的辐射能流密度（即单位面积上的辐射功率）与其绝对温度的四次方成正比 **Error! Reference source not found.**。因此，通过捕捉不同物体发出的红外辐射，热红外成像仪可以测量物体的温度分布，无需直接接触，从而在各种应用场合中检测、分析和呈现热门信息。热红外成像仪的工作原理是基于斯特藩-玻尔兹曼定律，通过捕捉物体发出的红外辐射并测量其温度分布，从而检测、分析和呈现物体的热门信息。

具体公式为：

$$M = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

M 是物体表面单位面积的辐射总强度，以瓦特每平方米（W/m²）表示

ε 是物体的发射率，这是一个无量纲的系数，表示物体表面发射红外辐射的能力，其值取决于物体的材质、表面状态等因素；

σ 是斯特藩-玻尔兹曼常数，其值为 5.6696×10^{-8}

T 为物体表面的绝对温度，以开尔文（K）为单位此外，红外成像还涉及热力耦合效应，这是指在物体受到外部力学作用（如应力、应变）时发生的温度变化。**Error! Reference source not found.**热弹效应和热摩擦效应是热力耦合效应的两个重要方面。热弹效应描述的是物体在受到外部力作用时，由于其内部的变形和位移导致分子和原子之间相对位置的变化，进而引起内部能量的转换和热量的产生，从而影响物体的温度。这一过程表明，岩石或任何固体材料在受到力学加载时，不仅会发生形变，同时还会引起温度的变化，这种变化可以通过热红外成像技术进行捕捉和分析。利用热红外成像技术，可以在不同场合如工业检测、医疗诊断、建筑评估以及地质勘探等领域进行温度分布的实时监测和分析。这种技术的优势在于它提供了一种非侵入式、快速且精确的温度测量方法，能够在不接触物体的情况下远距离监测物体的热状态，尤其适用于那些因高温或难以接近而不宜直接接触的对象。**Error! Reference source not found.**通过分析红外图像，可以识别出材料的热特性、缺陷位置、热量损失等重要信息，为科研、生产和维护提供了重要的技术支持。

3 单轴试验红外特性分析

试验原材料采用瓦屋 IV 矿段内采出原生矿石制作成标准圆柱试件（底部直径 50mm，高 100mm），使用 RMT-301 岩石与混凝土加载试验机进行单轴加载试验，其中加载速率为 0.005m/s

单轴压缩强度（ σ ）计算公式为：

$$\sigma = P / A \tag{2}$$

在单轴压缩强度中，我们使用以下公式来描述岩石的抗压强度：

其中， σ 是单轴压缩强度，单位为 MPa（兆帕）。P 是岩石破裂时的最大载荷，单位为 N。A 是试件的横截面积，单位为 m²。对于一个底部直径为 50mm 的圆柱试件，其横截面积 A 可以用以下公式来计算：

$$A = \pi \times (D/2)^2$$

其中，D 是试件的底部直径，单位为 mm。这个公式将直径转换为面积，对于描述圆柱体的抗压能力非常重要。

将 D = 50mm 带入公式 $A = \pi \times (D/2)^2$ 中，我们可以求出 A 的值。然后，使用这个 A 值和给定的 P 值，我们可以计算出岩石的单轴压缩强度。

$$A = \pi r^2 \tag{3}$$

计算，其中 r 是圆柱半径

根据破裂载荷 257.86kN 和试件横截面积 0.001942m²，可得试验内原岩的单轴压缩强度（ σ ）为 132.810MPa。

3.1 加载过程试验分析

经过多组单轴加载实验，总结试件形态总共分为四个阶段：压密阶段（OA）、弹性阶段（AB）、屈服阶段（BC）、峰后破坏阶段（CD）^[13]，如图 5 所示，其中岩爆倾向性最强的为破坏前阶段，即屈服阶段。

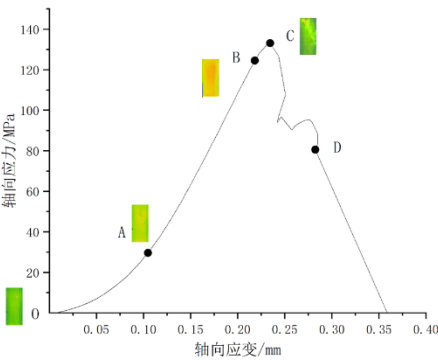


图 5 磷块岩应力应变曲线图

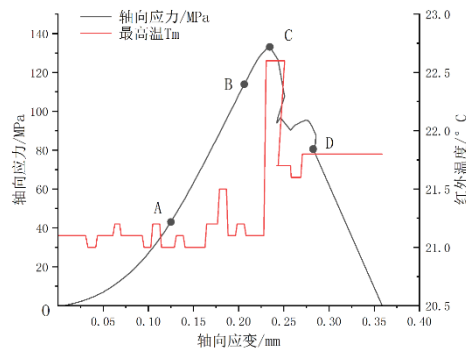


图 6 磷块岩应力应变与最高温对比图

在单轴加载试验中，通过红外成像技术对岩石试件的变形和破坏过程进行详细观察，可以将这一过程细分为四个阶段，每个阶段的物理和热成像特征各不相同^[19]**Error! Reference source not found.**。

（1）压密阶段（OA）

这一阶段开始于加载的初始时刻，以应力—应变曲线的第一个拐点结束。在此阶段，岩石内部的微孔隙和裂缝在外部载荷的作用下逐渐关闭，导致岩石体积略微减小。应力—应变曲线在此阶段呈现非线性增长。这一过程在应力—应变曲线上表现为初期的上凹形态，反映了岩石在初期加载下的体积压缩现象。在此阶段，由于变形主要是岩石内部孔隙的压密，且变化幅度较小，因此在红外图像中很难观察到明显的温度变化，红外辐射值保持相对稳定。

（2）弹性阶段（AB）

压密阶段结束后，岩石进入弹性阶段。此时，岩石的应力—应变关系基本呈线性，遵循胡克定律。岩石的变形完全属于弹性变形，此时的应力—应变关系呈线性，符合胡克定律。岩石内部的微观结构在此阶段没有发生永久性的破坏，变形是完全可逆的。红外成像方面，随着外部载荷的增加，岩石的表面和内部温度会略有上升，导致红外辐射值整体增高。这种温度的增加在红外图像上呈现出从试件上部到下部的水平阶梯状渐变，这可能是由于载荷作用下岩石内部应力分布的差异所致。

（3）屈服阶段（BC）

随着应力的继续增加，岩石开始出现微裂纹的扩展和贯通，表现为应力—应变曲线的非线性增长，直至达到峰值应力。这一阶段，岩石开始从弹性变形转变为塑性变形，即使去除外部载荷，岩石也不能完全恢复到原始状态。屈服阶段标志着岩石由弹性变形过渡到塑性变形的开始，此阶段内部微裂隙的生成和贯通导致应力—应变曲线的斜率发生变化，呈现出一种下凹的形态。红外成像技术在这一阶段尤为重要，因为它可以捕捉到因微裂隙扩展和碎屑脱落引起的局部高温区域。这些区域在红外图像中表现为明显的高温条带或斑点，预示着岩石接近破坏的临界状态。

（4）峰后破坏阶段（CD）

当岩石达到其承载能力的峰值并开始破坏时，进入峰后破坏阶段。在此阶段，应力—应变曲线显示应力水平的急剧下降，而岩石的破坏表现为裂隙的迅速扩展和碎块的弹射。红外成像在这一阶段能够显示出裂隙和碎屑崩出区域的高温现象，温差可达 2.1°C ，从 20.5°C 到 22.6°C 不等，这是由于破裂过程中能量的迅速释放和摩擦产生的热量所致。红外图像为我们提供了一种直观的手段，来观察和分析岩石在单轴加载过程中的破坏模式和能量释放过程。

通过红外成像技术的应用，我们不仅能够实时监控岩石试件在单轴加载过程中的温度变化，还能够深入理解岩石在不同加载阶段的物理变化过程，为地下工程的安全评估提供了重要的技术支持 **Error! Reference source not found.**

3.2 代表性红外特性总结

在通过多组进行热红外成像仪观测单轴加载并对其破坏前以及破坏时热红外成像进行分析，发现其中几例代表性红外图像破裂前特征并对其形成原因进行分析。

为使红外图像能够显示更加清晰并排除环境各类噪点对热红外成像造成的影响，使对比度更加明显。本文针对红外图像使用非局部均值去噪进行平滑优化，并做均衡化处理。

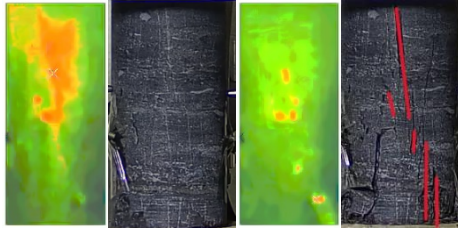


图 7 磷块岩在 0.95σ 、 σ 处的热红外图像与可见光图像

通过详细分析图 7 所示的磷块岩单轴加载实验的红外成像结果，我们可以深入理解岩石在受力过程中的温度变化及其与岩石破裂过程之间的关系。在实验过程中，特别是当轴向应力接近岩石的承载极限时，红外成像技术能够揭示出在可见光波段不易观察到的异常现象。

在 0.95σ ，即使在外观上没有明显的变化，磷块岩内部已经出现了应力集中的现象，这在红外成像中表现为高温异常。高温异常区域的出现，预示着岩石内部已经开始有微观裂纹的形成和扩展，尽管这些变化在可见光下还未成为明显的裂纹或破坏迹象。

随着轴向应力的继续增加，当达到岩石的承载极限时，这些初期形成的微观裂纹开始迅速扩展并贯通，导致岩石的最终破裂。值得注意的是，最终的破坏点正是位于之前在 0.95 应力比例时通过红外成像捕获的高温异常区域内。这说明在岩石破裂过程中，能量的释放和集中主要发生在这些预先存在的高温区域。

破坏发生时，红外图像中高温区域的形状变为圆点状，这表明在破裂过程中，能量主要在这些局部区域聚集，并伴随着高温现象。这种圆点状的高温区域形成，反映了岩石内部能量释放的局部性和集中性，同时也揭示了红外成像技术在捕捉和分析岩石破裂过程中能量动态变化方面的有效性。

综上所述，红外成像技术为我们提供了一种在岩石力学实验中监测和分析岩石内部应力状态和破裂过程的有力工具。通过对磷块岩单轴加载实验的红外成像分析，我们不仅能够在早期识别出潜在的破裂区域，还能够观察到破裂过程中能量释放的具体位置和模式，这对于理解岩石破裂机理以及预测和防控岩石破裂具有重要的科学意义和实际应用价值。

3.3 多斑点或多微条带高温预兆

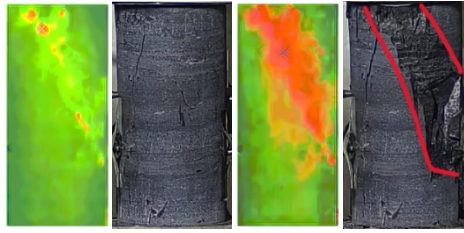


图 8 岩石在 0.95σ 、 σ 处热红外图像与可见光图像

在室内岩石力学试验中，通过热红外成像技术观察到的岩爆前兆现象及其随着应力增加所展现的温度变化规律，揭示了岩石破裂过程中能量释放和应力集中的动态特性。特别是在分析最高温度与最低温度之间的差值变化时，我们可以更深入地理解岩石破裂前后的能量转换和分布情况。

在 0.95 的轴向应力阶段，岩石表面的高温点（包括圆斑状或微型长条状高温点）反映了内部微观裂隙的形成和初步扩展，这些高温点是由于局部应力集中和微裂隙摩擦产生的热量引起的。此时，最高温度和最低温度之间的差值可能相对较小，因为裂隙和高温点尚未充分发展和连接。

随着轴向应力的继续增加，达到岩石的破裂点时，之前观测到的高温点开始扩展并与其他高温点或微裂隙贯通，形成更大范围的高温区域。在这个过程中，最高温度和最低温度之间的差值会显著增加，反映了能量在裂隙扩展和贯通过程中的集中释放。此时的热红外图像会显示出更为明显和广泛的高温区域，与可见光图像中的裂隙扩展和岩石崩出现象相对应。

最终，当岩石完全破裂，形成条带状扩展裂隙时，高温区域的形状和分布将直接反映出裂隙的形态和破坏的最终形态 **Error! Reference source not found.**。此时，最高温度和最低温度之间的差值达到最大，表明破坏时能量释放最为集中，尤其是在剪切应力集中并导致条带状裂隙扩展的区域。

总的来说，最高温度和最低温度之间的差值随着岩石从初始裂隙形成到最终破裂的过程呈现出从小到大的发展趋势。这一变化趋势不仅揭示了岩石内部应力和能量转换的动态过程，也为使用热红外成像技术进行岩爆风险评估和预警提供了重要的量化指标。通过分析这一差值的变化规律，可以有效预测岩石的破裂过程和破裂前的能量集中区域，从而为岩爆预警提供科学依据。

4 瓦屋 IV 矿段现场红外特性分析

在地下矿山工程中，矿柱、掌子面和巷道侧壁是三种具有不同结构功能和工程意义的关键元素。这些元素在维护矿山稳定性、保障采矿作业安全以及实现有效的资源开采中扮演着各自独特的角色。以下是对这三种元素功能性差异的进一步阐述及其在热红外成像观测中的意义。

矿柱是地下矿山中用于支撑上覆岩层和维持巷道稳定的岩体部分，其主要功能是承担重要的支撑作用，防止地表塌陷和维护矿山的整体结构安全。在热红外成像观测中，矿柱因其承受较大的压力，可能表现出较为显著的应力集中现象，特别是在矿柱的上部和与顶板接触的区域。这些区域在热红外图像中可能会显示出较高的温度值，反映了应力集中导致的热效应，这对于评估矿柱的稳定性和预测可能的岩爆风险至关重要。

掌子面是指在掘进或采掘过程中形成的新鲜岩面，其功能主要是作为采矿作业的直接作业面。掌子面的稳定性直接影响到采矿作业的安全和效率。在热红外成像中，掌子面可能会因为新暴露的岩石表面与周围环境的热交换而表现出特定的温度分布特征。特别是在掌子面中心区域，由于岩石破碎和能量释放，可能会观察到圆斑状或其他形式的高温异常，这有助于识别潜在的不稳定区域和预测岩爆等动力灾害。

巷道侧壁是地下巷道两侧的岩体部分，其功能是保持巷道开挖后的稳定，防止岩石崩落和确保作业人员的安全。巷道侧壁的稳定性的受多种因素影响，包括岩石性质、应力状态和巷道设计等。在热红外成像中，巷道侧壁可能会表现出沿裂隙或岩层界面的热异常，这些异常区域可能是应力集中或岩石变形的先兆。通过分析这些热异常，可以评估巷道侧壁的稳定性的，及时发现潜在的危险区域，从而采取相应的支护措施。

通过对矿柱、掌子面和巷道侧壁在热红外成像中的观测，可以有效地识别和评估这些关键结构元素的稳定性和安全状况。这些观测结果不仅能够帮助工程师理解井下各种结构元素在不同功能下的应力状态和潜在风险，还能为采取预防措施和改善矿山安全管理提供科学依据。

4.1 矿柱岩爆倾向性检测

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/248066047052006053>