

岩石撞击的热红外成像探测研究进展与方向

吴立新^{1, 2, 3}, 吴育华³, 钟声², 王川婴², 李国华³

(1. 东北大学 3S 与数字矿山研究中心, 辽宁 沈阳 110004; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071;
3. 中国矿业大学 3S 与沉陷工程研究所, 北京 100083)

摘要: 岩石撞击的热红外成像探测是遥感技术的一项新颖而颇具潜力的应用, 亦是遥感-岩石力学交叉学科的重要研究内容。分析岩石撞击热红外成像探测的试验技术原理与特点, 介绍前期试验探索成果及新近研究进展。主要包括: 热红外技术用于固体撞击瞬态过程监测的试验探索、Hopkinson 压杆撞击(包括不同角度、含水岩石靶元的撞击)、岩石与岩石之间的撞击、不同类型岩石的落球撞击、基于红外辐射特征的撞击参数反演研究以及矿山诱灾分析的应用基础研究。讨论岩石撞击辐射升温的物理机制, 包括岩石破裂作用机制、岩石热弹效应以及岩石物理学机制。指出岩石撞击热红外成像探测的未来发展方向为辐射规律与物理机制、定量分析与遥感模型、谱段优选与实用技术。

关键词: 岩石力学; 岩石撞击; 遥感-岩石力学; 遥感应用; 热红外成像; 反演

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2006)11-2180-07

RESEARCH PROGRESSES AND DIRECTIONS OF DETECTION ON ROCK IMPACTION WITH THERMAL INFRARED IMAGING

WU Lixin^{1, 2, 3}, WU Yuhua³, ZHONG Sheng², WANG Chuanying², LI Guohua³

(1. Center for RS/GPS/GIS and Digital Mine Research, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 3. Institute of RS/GPS/GIS and Subsidence Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Detection on rock impaction with thermal infrared(TIR) imaging is not only a creative and prospective application of remote sensing technology, but also one of the important contents of the new inter-discipline called remote sensing rock mechanics(RSRM). The experimental technology of TIR imaging on rock impaction is analyzed; and the experimental exploration results at the early stage as well as recent research achievements are introduced. The main experiments conducted include the experimental exploratory to TIR imaging for detecting the transient process of solid impact, projectile impaction on rock by a Hopkinson compression bar(at different impacting angle or with water in rock body), free-fall impaction between rocks, free-ball impaction on different types of rocks. Based on the results from the above experiments, two kinds of application foundations are researched, i.e. the back analysis of the impact-related quantities of rock impaction and the analysis of the possibilities for the disasters induced by rock impaction in mining area. It is shown that (1) the impact-related quantities can be back analyzed quantitatively/qualitatively by the TIR detection; for example, the impacting velocity or impacting energy can be back analyzed quantitatively; and the accuracy of the back analysis lies on the homogeneity of rocks, and the errors of back analysis based on the impaction on homogeneous marble are less

收稿日期: 2006-02-13; **修回日期:** 2006-04-13

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(50525414); 国家自然科学基金资助项目(10172090); 中国科学院武汉岩土力学研究所领域前沿基金项目(Q110307); 全国优秀博士学位论文专项基金项目(200046)

作者简介: 吴立新(1966-), 男, 博士, 1988年毕业于中国矿业大学矿山测量专业, 现任长江学者特聘教授、东北大学 3S 与数字矿山研究中心主任、中国科学院武汉岩土力学研究所研究员、中国矿业大学 3S 与沉陷工程研究所所长, 主要从事遥感应用、遥感-岩石力学、GIS 理论与算法、3D 地学建模、数字矿山与数字城市方面的教学与研究工作。E-mail: awulixin@263.net

than 12%; and (2) the increment of temperature due to rock impactation could probably ignite the gas in coal mine, therefore, it can be helpful to the analysis or the remote detecting/forecasting of disasters that may be induced by rock impactation. The mechanisms of the TIR radiation temperature variation due to rock impactation are discussed, including the rock fracturing, rock thermo-elastic effect and rock physics. It is pointed out that the future research directions include the radiation laws and physical mechanism, the quantitative analysis and remote sensing model, and the spectrum optimization and practical technology.

Key words: rock mechanics; rock impactation; remote sensing rock mechanics(RSRM); application of remote sensing; thermal infrared(TIR) imaging; inversion

1 引言

撞击问题广泛存在于各类工程领域, 其速度范围包括低速、高速乃至超高速^[1~4], 如落体撞击、穿甲、鸟撞、爆破、弹击、飞块撞等。其中, 岩石、混凝土撞击问题是研究热点之一^[5, 6], 涉及岩石破碎、巷道掘进以及岩石切割等。如何实时地遥感遥测撞击目标的特征变化, 并快速地反演其撞击相关的物理力学参数, 是改良设备制造和实现工程作业动态监控的基础, 亦是遥感遥测技术应用于动力学与岩石(体)力学领域中亟待解决的关键理论与技术问题。

针对撞击的监测技术与研究手段主要有: 传统的直接接触式方式(应力、应变传感器等)^[1, 7], 数值分析与模拟(离散元、有限元等)^[8, 9]以及非接触式方法(干涉云纹、数字摄影等)^[6, 10]。由于撞击问题的复杂性, 以上手段各有优势和局限, 还需探索新技术、新手段来研究撞击问题。

撞击过程总是伴随着物理温度的变化, 而物理温度的变化可利用热红外(thermal infrared, TIR)成像技术来进行探测^[11~14]。笔者所在的课题组自 1999 年首次利用 TIR 成像技术进行固体撞击瞬态探测^[15]以来, 一直将 TIR 成像技术应用于岩石撞击瞬态探测作为遥感-岩石力学(remote sensing rock mechanics, RSRM)的重要内容^[16~22], 陆续开展了大量的基础试验工作, 其成果也引起同行的广泛关注, 如余为等^[23]就岩石撞击升温的机制问题进行了探讨, 并利用 TIR 成像技术进行了初步验证。

利用 TIR 成像技术进行各类撞击条件下的试验, 一旦确定了某一类撞击因子与 TIR 辐射特征之间的定性定量关系, 就可实现基于遥测方式的岩石撞击过程的动态监测与反演分析, 亦可为因撞击而引发的灾害提供实用的监测预警技术。

本文旨在对岩石撞击 TIR 成像探测的研究成果进行系统总结与分析, 并提出其发展方向。

2 前期试验探索

2.1 试验技术分析

目前, 用于撞击监测的热像仪为 TVS-8100 MKII, 该仪器具有很高的温度灵敏度(0.025 °C)和较高的空间分辨率(0.22 mm²), 成像速度最快为 60 fps(帧/s)。图 1 为撞击试验中撞击前后目标区域的 TIR 图像(以下简称热像, 热像仪均采用最快成像速率, 即 60 fps)。

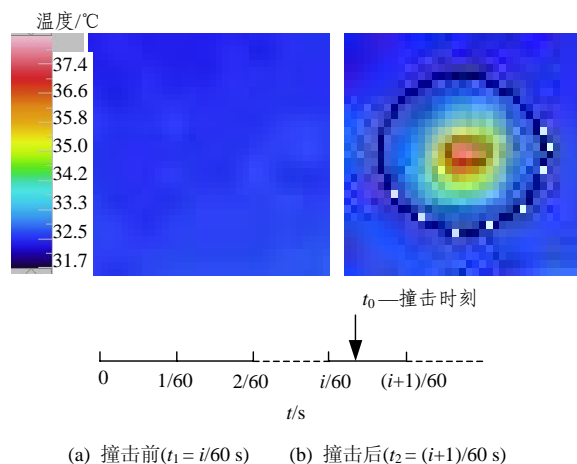


图 1 岩石撞击前后靶区的热像
Fig.1 TIR images of rock target area before and after impactation

如图 1 所示, 假定 t_0 为某一次撞击试验中的撞击时刻, 图 1(a)与(b)分别为 t_1 , t_2 瞬时的热像。由图可见, 所获得的撞击后瞬间热像(即图 1(b))实际上是撞击发生后延迟了 $[(i+1)/60 - t_0]$ s ($0 \sim 1/60$ s)时的热像。由于每次撞击时, t_0 是随机变化的, 即使是相同条件下的重复试验, 所获数据之间必然存在一定差异。这种差异的存在是否会影响 TIR 监测的结果与精度尚不清楚, 因此, 有必要对 TIR 技术应用

于撞击监测的可行性进行分析与探讨。

一方面,上述差异与固体材料的热传导特性相关,固体的热传导率可由傅里叶定律^[11]表示,即

$$\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

式中: $\frac{dQ}{dt}$ 为热量的时间传导率(W/s), k 为材料的热传导系数($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$), A 为面积(m^2), $\frac{dT}{dx}$ 为沿某一方向的温度梯度($^\circ C/m$)。

不同固体的热传导系数相差较大。岩石材料的热传导系数相对很低,如大理岩的 $k = 2 \sim 3 W/(m \cdot ^\circ C)$,而金属相对较高,如银的 $k = 300 \sim 400 W/(m \cdot ^\circ C)$ 。显然,对于岩石材料的撞击试验,由于岩石的热传导率较低,在撞击后的 1/60 s 内温度变化很小,即这种由热像仪成像速度引起的误差可以忽略不计。

另一方面,为尽量减小这种误差的影响,在同一条件下的撞击试验中,重复一定次数进行试验,如在初期的探索试验中,同一条件下的撞击试验均重复 10 次。

2.2 试验探索结果

1999年9月,笔者所在的课题组首次利用 TVS-8100 MKII 高精度红外热像仪,通过试验探索了大理岩、花岗岩、混凝土等受落球撞击瞬间的红外辐射(infrared radiation, IRR)规律。研究揭示:(1)靶元辐射温度场梯度分割十分清晰;(2)球体大小不变时,靶元受撞击瞬间的辐射升温幅度与落球势能线性相关;(3)撞击后靶元的辐射升温幅度与靶元材料及靶面光洁度有关,升温幅度依次为混凝土、未抛光大理石、钢板、木板、抛光花岗岩、抛光大理石和有机玻璃板。研究表明,一旦确定了与弹体特征和靶体材料相对应的撞击势能-靶元辐射升温幅度的关系函数与有关参数,就可以实现基于 TIR 遥感成像技术的固体撞击瞬态过程的侦测与分析^[15]。

继而,作者围绕岩石类固体材料进行了大量的撞击 TIR 监测试验,发现了许多岩石撞击的物理力学现象,获得了一批定量定性结果,为推动 RSRM 由定性研究向定量研究迈出了坚实的一步。

3 新近研究进展

3.1 Hopkinson 压杆撞击

在前期试验探索的基础上,为提高撞击速度,

笔者所在的课题组借助 Hopkinson 压杆装置,设计了 3 类撞击试验,即以大理岩为主的岩性的法向撞击、不同角度倾斜撞击及不同表面条件(含水)的法向撞击^[18~20, 22]。所取得的主要成果有:

(1)不同岩性的岩石在相同条件下垂直撞击时具有不同的辐射特征,不同岩石分别存在某一临界撞击速度。在此临界速度以内撞击时,目标区域的热像均匀对称,以大理岩为例,其临界速度值约为 15 m/s。

(2)在临界速度以内,撞击因子与靶元的 IRR 特征及热像的几何特征密切相关:弹体动能与靶元的 IRR 通量增量线性相关,而弹体速度与靶元的 IRR 温度增量二次相关;撞击热辐射影响区域周长与撞击速度直线相关,其面积与弹体动能也直线相关。

(3)不同入射角度的倾斜撞击试验表明,当速度一定时,倾斜撞击时辐射强度基本都比垂直撞击时强,且在 45°角撞击时达到峰值。

对于 45°时 TIR 辐射最强的解释,初期分析认为不仅与摩擦力做功有关,还与岩石材料的力学特性相关(45°撞击时岩石受到的剪应力达最大值)。进一步的分析揭示,此类红外特征与 J. F. Archard^[24]提出的点接触瞬时升温的计算方法相一致:

$$\Delta T = \frac{0.31Q}{r\lambda} \sqrt{\frac{a}{vr}} = \frac{0.31\mu Mv^2}{2r\lambda} \sqrt{\frac{a}{vr}} \sin 2\theta \quad (2)$$

式中: Q 为撞击产生的总热量, r 为接触圆的半径, λ 为岩石的热传导系数, a 为导温系数, v 为撞击速度, μ 为摩擦因数, M 为撞击体质量, θ 为撞击角度。

显然,若保持其他撞击条件不变,当撞击角度 θ 为 45°时,其升温幅度最大。

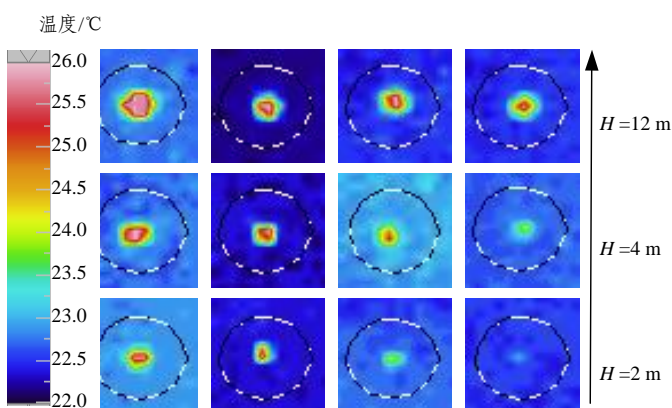
(4)不同表面条件(潮湿与干燥大理岩)的撞击试验表明,含水量对岩石撞击引起的靶元 IRR 有影响,其辐射特征的变化趋势与撞击速度有关。

3.2 落球撞击

为进一步揭示岩石在撞击载荷作用下的 TIR 辐射规律及其辐射机制,针对靶元因子对 4 类典型地壳岩石(大理岩、辉长岩、花岗闪长岩、花岗岩)受落球撞击过程中的辐射特性进行了系统的试验研究。与初期的落体撞击探索试验主要区别在于:落体的高度 H 大幅度提高(探索试验: $H = 0.1 \sim 2.0 m$; 本次试验: $H = 2 \sim 15 m$)。取得的主要成果^[20]有:

(1) 试验发现, 在 12 m 高度以内时, 4 类岩石的撞击区域均无明显损伤, 其热像均近似为圆形; 而在 12 m 以上时, 某些岩石(如花岗岩)发生破裂, 热像出现飞溅图斑且不规则。这与 Hopkinson 压杆撞击试验结果一致, 即不同岩石的撞击均存在某一临界速度, 此临界速度可由撞击瞬间的热像直观判别。

(2) 岩石靶元撞击瞬间的辐射特征与岩石类型密切相关, 相同撞击条件下, 红色花岗岩及花岗闪长岩辐射升温相对小于辉长岩及大理岩; 同一岩石辐射升温与撞击高度正相关。图 2 为 4 种岩石靶元不同高度撞击瞬间的典型热像。



(a) 大理岩 (b) 辉长岩 (c) 花岗闪长岩 (d) 花岗岩

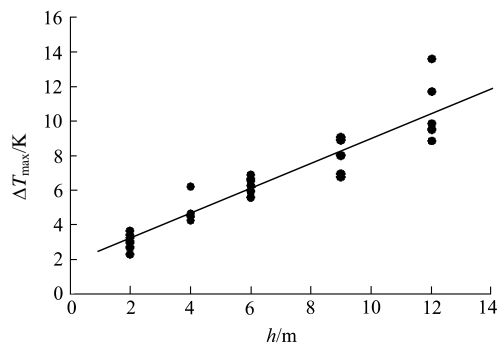
图 2 4 种岩石不同落高撞击瞬间的典型热像

Fig.2 Typical transient TIR images of four rocks at different impacting heights

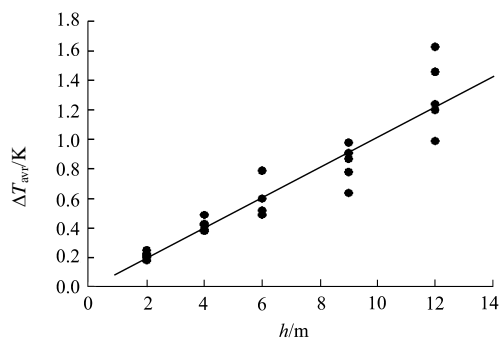
(3) 4 种岩石靶元的撞击热辐射具有相似的规律, 即撞击区域的辐射温度增量(最高辐射升温 ΔT_{max} 及平均辐射升温 ΔT_{avr})与撞击高度均线性相关。相关程度由高到低分别为: 相对均质的大理岩(相关系数 $R = 0.93 \sim 0.95$)、非均质花岗岩($R = 0.88 \sim 0.92$)、花岗闪长岩及辉长岩($R = 0.76 \sim 0.84$)。图 3 为大理岩与花岗闪长岩辐射升温与撞击高度的线性关系。

3.3 岩石之间的撞击与矿山诱灾分析

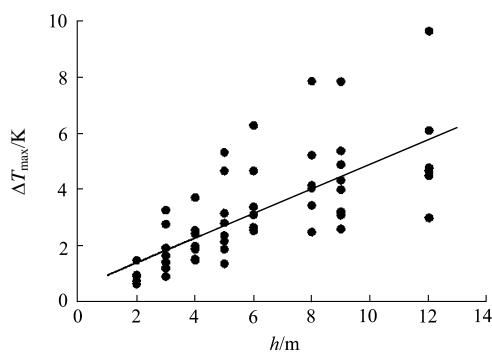
前述的试验中, 均以刚性金属体作为撞击体, 而实际中, 岩石本身也常作为撞击体出现。例如, 煤矿采掘作业中, 常发生岩石之间的撞击: 垮落岩石与底板岩石、垮落岩石与已垮落岩石之间的撞击等, 特别是当煤岩动力灾害——冲击矿压、煤与瓦斯突出等发生时, 弹射煤岩与周围物体发生剧烈撞击。这种撞击作用很有可能引发火源, 进而引发矿



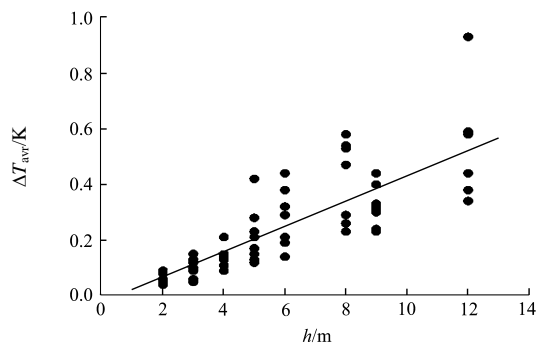
(a) 大理岩 ΔT_{max} -h 关系



(b) 大理岩 ΔT_{avr} -h 关系



(c) 花岗闪长岩 ΔT_{max} -h 关系



(d) 花岗闪长岩 ΔT_{avr} -h 关系

图 3 岩石撞击瞬间 IRR 温度增量与撞击高度的关系
Fig.3 Relations between IRR temperature increment and impacting height for marble and granodiorite

山灾害(瓦斯爆炸、矿井火灾等)。对此,笔者所在的课题组设计进行了沉积岩石的撞击试验,利用 TIR 技术监测岩石相互撞击的升温规律,并探讨了升温机制。

岩石之间的撞击试验方案:以石灰岩和砂岩为例,先进行规则形状岩石间的撞击,再进行不规则形状岩石间的撞击。分 5 组进行试验,即(1) 规则砂岩的撞击;(2) 规则石灰岩的撞击;(3) 不规则砂岩的撞击;(4) 不规则石灰岩的撞击;(5) 规则潮湿石灰岩的撞击。主要结论^[21]有:

(1) 撞击瞬间岩石撞击点或飞溅的岩石破碎体温度最大,撞击升温可达 218 °C;之后温度经历突降→平缓下降过程,且温度保持 100 °C 以上的时间超过 1 min。图 4 为石灰岩撞击瞬间的典型 TIR 图像,可见撞击中心点位置升温最高(约 200 °C),飞溅岩石碎屑的温度约 100 °C,图 5 为石灰岩撞击后温度随时间变化的特征曲线(即时延特性)。

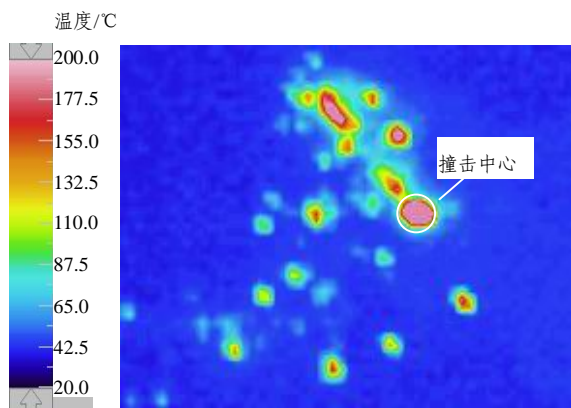


图 4 岩石相互撞击瞬间的典型热像

Fig.4 Typical TIR image for rock impacted by rock

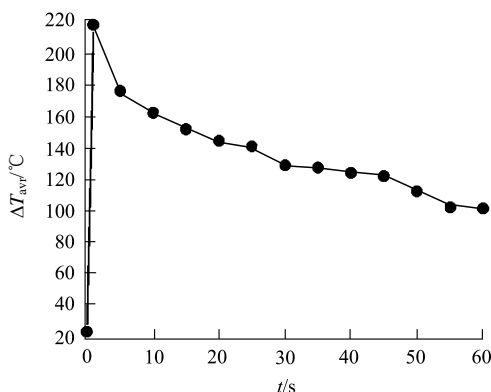


图 5 石灰岩撞击后 IRR 温度的时延特征

Fig.5 Time-delay character of IRR temperature after impactation of limestone

煤矿采掘过程中,岩块质量必然大于试验样品,

几何形状也很不规则,且摩擦作用普遍存在(如斜向撞击),特别是发生岩爆或煤与瓦斯突出时,岩块的撞击能与撞击速度将远大于本次试验情形,故煤矿采掘过程中岩石撞击升温幅度应更高,并可能维持较长时间的高温。此时,沉积岩石中的易燃固体矿物(如黄磷的燃点约 34 °C,硫的燃点约 207 °C),很容易被点燃而形成火源,进而引发矿井瓦斯爆炸或引发矿井火灾。

(2) 就撞击升温幅度而言,干燥岩石高于潮湿岩石(如石灰岩,其最高升温平均差约 60 °C),不规则岩石高于规则岩石(如石灰岩,其最高升温平均差约 50 °C),石灰岩高于砂岩(以规则岩石为例,其最高升温平均差约 40 °C)。

3.4 反演研究

利用 TIR 成像遥感方式探测岩石低速撞击瞬间的 IRR 特征,进而反演岩石靶元及撞击体的相关参数,这是 TIR 遥感技术应用于实际问题的试验基础。反演内容主要包括 2 类,即岩石靶元参数的反演及撞击体参数的反演。前者包括岩石类别、岩石物理力学参数反演等;后者包括对撞击体速度(撞击能)、质量、形状等进行反演。另一方面,反演又分为定性与定量反演,如岩石靶元类别的反演就属于定性,而定量反演则是基于试验建立的统计模型。

岩石撞击反演研究^[20, 22]表明:一方面,可根据靶元辐射特征定性推估岩石的类别,岩石撞击瞬间的热像、辐射升温大小及变化趋势特征均可作为岩石类别推估的有效参数;另一方面,根据靶元辐射参量可较高精度地定量反演撞击因子。

在 Hopkinson 压杆撞击的反演试验中,基于撞击瞬间的辐射通量增量指标反演弹体动能的平均误差仅为 4.6%(最大 11.0%),而基于辐射温度增量 ΔT_{max} , ΔT_{avr} 反演弹体速度时,其平均误差分别为 5.3% 和 6.0%。在落球撞击试验中,反演精度与岩石均质程度相关,基于均质类岩石靶元的定量反演具有较高的精度(以大理岩为例,由辐射温度反演撞击高度,其相对误差均值小于 12%),而非均质类岩石反演精度较低。

4 撞击升温机制分析

岩石撞击的辐射升温特征是多种因子综合作用的结果,具体分析如下。

4.1 岩石破裂作用机制

前期试验表明, 岩石发生撞击破坏时的辐射升温更为剧烈, 如 Hopkinson 压杆撞击试验中, 大理岩在较高速度撞击下发生局部破坏时引起的辐射升温超过 200 K^[21]。在落球撞击试验中再次证明这一点, 如花岗岩在 13 m 撞击时, 辐射升温约 30 K, 远大于未发生破坏时的升温情形^[20]。当岩石发生破裂时, 撞击体与岩石之间或岩石与岩石碎屑之间发生摩擦而产生大量的热。由此可见, 岩石的破裂作用是撞击辐射升温的主要机制。

4.2 岩石热弹效应机制

固体变形会导致热力耦合(thermo-mechanical coupling)效应, 不同材料及同一材料不同应力阶段的热力耦合效应不同。发生在弹性体或弹性应力阶段的热力耦合效应称为热弹效应^[25]:

$$\Delta T = -KT \sum \delta_i \quad (3)$$

式中: K 为材料的热弹常数, T 为物体的绝对温度, δ_i 为应力张量。

由式(3)可见, 在弹性限度内, 温度的变化与应力大小成正比关系。岩石在低速撞击时, 靶元岩石仅发生弹性变形, 其升温来源主要应为热弹效应。当撞击速度提高, 靶元瞬间应力也增大^[26], 靶元辐射升温也愈大, 这与试验结果一致。

4.3 岩石物理学机制

试验表明, 不同类型岩石撞击瞬间及撞击后的 IRR 特征有一定差异^[20]。从岩性来分, 辉长岩、花岗岩和花岗闪长岩属于典型的火成岩, 而大理岩则属于变质岩, 因此这几类岩石的物理性质(如组分、均质度、颗粒半径等)均有相当差异。一方面, 岩石材料的非均匀性决定了相同撞击条件下辐射升温的离散特点, 对于相对均质的岩石(如大理岩), 其组成矿物的粒径较小且分布基本均匀, 故撞击瞬间的辐射规律性较好; 另一方面, 辐射升温幅度与岩石中矿物成分有关, 以辉长岩为例, 试验发现, 当撞击点为白色的斜长石类矿物时, 辐射升温则较低, 而当撞击点为黑云母时, 辐射升温则较高。

5 未来发展方向

岩石撞击的 TIR 成像探测与应用作为 RSRM 的重要内容之一, 尽管取得了一系列试验研究成果, 但离其成熟和实际应用尚有相当距离。作者认为,

岩石撞击 TIR 成像探测研究的未来方向主要包括:

(1) 辐射规律与物理机制。通过广泛而系统、深入的基础试验研究, 揭示各类岩石受不同方式撞击后的辐射特征及其时延规律; 同时, 结合物理学、化学、固体力学、岩石物理学和岩石矿物学的相关知识, 研究解释岩石撞击辐射的物理机制。

(2) 定量分析与遥感模型。目前所得结论多偏于定性, 如岩石的含水性、撞击角度对靶元热辐射的影响等, 已经建立的定量关系也属于基于试验数据的经验方程, 且均为单一因子的回归方程(如撞击速度 - 辐射温度方程, 撞击动能 - 辐射通量方程等)。需要在单因子分析的基础上, 进行多因子的综合分析, 并确定影响岩石撞击热辐射的关键因子及其权重, 从而建立岩石撞击的 TIR 遥感物理模型。

(3) 谱段优选与实用技术。目前所进行的试验研究是在 3.6~4.6 μm 波段上进行的, 由于固体物质发生电磁辐射的波段分异性、窗口性和岩石矿物组分的多样化、复杂性, 不同岩石必然对应某一或某些最佳 IRR 波段, 这就需要进行遥感物理学和岩石物理学的交叉研究, 揭示不同岩石各自的最佳 IRR 波段, 进而针对不同的岩石类别和不同的工程应用, 进行不同波段的红外遥感成像仪器的定制, 既降低仪器成本, 又提高可探测性和探测精度, 形成可靠、便捷的实用技术。

致谢 感谢国内外专家同行对本项研究的关注和支持, 感谢本刊副主编余诗刚研究员的约稿与帮助!

参考文献(References):

- [1] 钱伟长. 穿甲力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.(Qian Weichang. Piercing Mechanics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984.(in Chinese))
- [2] 马晓青. 冲击动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1991.(Ma Xiaqing. Impact Dynamics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1991.(in Chinese))
- [3] 张庆明, 黄风雷. 超高速碰撞动力学引论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.(Zhang Qingming, Huang Fenglei. Introduction to Hypervelocity Impact Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2000.(in Chinese))
- [4] Abrate S. Impact on Composite Structures[M]. London: Cambridge University Press, 1998.
- [5] 刘小虎, 刘吉, 王乘, 等. 弹丸低速垂直侵彻无钢筋混凝土的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(4): 323 - 328.(Liu Xiaohu, Liu Ji, Wang Cheng, et al. Experimental studies on the projectile penetrating normally into a plain concrete[J]. Explosion and Shock

- Waves, 1999, 19(4): 323 - 328.(in Chinese))
- [6] Gilbert M, Hobbs B, Molyneux T C K. The performance of unreinforced masonry walls subjected to low-velocity impacts: experiments[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, 27(3): 231 - 251.
- [7] Corbett G G, Reid S R, Johnson W. Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: a review[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1996, 18(2): 141 - 230.
- [8] Kay L, Podoleanu A, Seeger M, et al. A new approach to the measurement and analysis of impact craters using low-coherence interferometry and Zernike polynomial analysis[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(8): 739 - 753.
- [9] Andersson M, Nilsson F. A perturbation method used for static contact and low velocity impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1995, 16(5/6): 759 - 775.
- [10] Kokidko D, Gee L, Chou S C, et al. Method for measuring transient out-of-plane deformation during impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(2): 127 - 133.
- [11] Xavier P V M. *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*[M]. New York: John Wiley and Sons Inc., 2001.
- [12] Potet P, Bathias C, Degriigny B. Quantitative characterization of impact damage in composite materials: a comparison of computerized vibrothermography and X-ray topography[J]. *Materials Evaluation*, 1988, 46: 1 050 - 1 054.
- [13] Ball R J, Almond D P. The detection and measurement of impact damage in thick carbon fibre reinforced laminates by transient thermography[J]. *NDT and E International*, 1998, 31(3): 165 - 173.
- [14] 徐西鹏, Malkin S. 双色红外系统测量脆性材料磨削温度的研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2002, 21(2): 99 - 103.(Xu Xipeng, Malkin S. Measurement of temperatures in grinding of brittle materials using two-color infrared system[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2002, 21(2): 99 - 103.(in Chinese))
- [15] 吴立新, 李国华, 吴焕萍. 热红外成像用于固体撞击瞬态过程监测的试验探索[J]. *科学通报*, 2001, 46(2): 172 - 176.(Wu Lixin, Li Guohua, Wu Huanping. Experimental exploratory to IR imaging for detecting the transient process of solid impact[J]. *China Science Bulletin*, 2001, 46(2): 172 - 176.(in Chinese))
- [16] 吴立新. 遥感岩石力学及其新近进展与未来发展[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(2): 139 - 146.(Wu Lixin. Remote sensing rock mechanics and its recent achievements and future development[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(2): 139 - 146.(in Chinese))
- [17] Wu L X, Cui C Y, Geng N G, et al. Remote sensing rock mechanics (RSRM) and associated experimental studies[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(6): 879 - 888.
- [18] 吴立新, 吴育华, 刘善军, 等. 遥感 - 岩石力学(VII)——岩石低速撞击的热红外遥感成像试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(9): 1 439 - 1 445.(Wu Lixin, Wu Yuhua, Liu Shanjun, et al. Remote sensing-rock mechanics(VII)—thermal infrared imaging detection of rock impaction with low velocity[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(9): 1 439 - 1 445.(in Chinese))
- [19] Wu L X, Wu Y H, Liu S J, et al. Infrared radiation of rock impacted at low velocity[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(2): 321 - 327.
- [20] Wu L X, Wu Y H, Shi W Z, et al. Comparisons of thermal radiation characteristics between rocks and PMMA subjected to free-fall impacts[A]. In: *Thermosense XXVII*, Proceedings of SPIE[C]. Florida: [s. n.], 2005. 264 - 271.
- [21] 吴育华, 吴立新, 钟声, 等. 岩石撞击引发矿井瓦斯爆炸可能性的试验探索[J]. *煤炭学报*, 2005, 30(3): 278 - 282.(Wu Yuhua, Wu Lixin, Zhong Sheng, et al. Experimental exploration to gas explosion induced by rock impact[J]. *Journal of China Coal Society*, 2005, 30(3): 278 - 282.(in Chinese))
- [22] 吴育华, 吴立新, 史文中, 等. 岩石低速撞击的遥感特征提取与反演[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(1): 61 - 66.(Wu Yuhua, Wu Lixin, Shi Wenzhong, et al. Thermal infrared characteristics and quantitative back analysis of low-velocity rock impaction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(1): 61 - 66.(in Chinese))
- [23] 余为, 缪协兴, 茅献彪, 等. 岩石撞击过程中的升温机制分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(9): 1 535 - 1 538.(Yu Wei, Miao Xiexing, Mao Xianbiao, et al. Analysis of the heating-up mechanism in the course of the rock ram[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(9): 1 535 - 1 538.(in Chinese))
- [24] Archard J F. The temperature of rubbing surfaces[J]. *Wear*, 1958, 2(6): 438 - 455.
- [25] Harwood N, Cummings W M. *Thermoelastic Stress Analysis*[M]. Bristol: IOP Publishing Ltd., 1991.
- [26] Zukas J A. *Impact Dynamics*[M]. New York: John Wiley and Sons Inc., 1982.