

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0405

高温大理岩的动态能量耗散机理及破坏特征*

张旭^{1,2}, 刘晓辉^{1,2}, 刘楚佳^{1,2}, 罗盈^{1,2}

(1. 西华大学能源与动力工程学院, 四川 成都 610039;
2. 西华大学流体及动力机械教育部重点实验室, 四川 成都 610039)

摘要: 为探究高温对大理岩能量特性的影响, 利用 ANSYS/LS-DYNA 对大理岩开展了 6 级温度梯度、5 种冲击速度的动态压缩试验, 分析了高温动载作用下大理岩力学特性、能量演化的温度效应, 最终从能量耗散角度探讨高温大理岩强度失效的能量判据。研究表明: (1) HJC 本构模型能够合理有效模拟不同温度下大理岩动态变化破坏过程; (2) 随着温度的增加, 大理岩动态峰值强度和动弹性模量与温度呈二次函数负相关, 动态峰值应变与温度呈二次函数正相关, 破坏形态由“X 型”共轭剪切破坏向粉碎性破坏转变, 破碎细粒尺寸减小; (3) 当温度到达 600 °C 时, 峰值强度大幅降低, 大理岩延性增加, 呈现粉碎性破坏, 耗散应变能达到最大值, 600 °C 可作为大理岩脆延转化的阈值温度; (4) 依据能量演化过程特征, 将耗散应变能陡增点视为大理岩整体失稳破坏前兆信息点, 根据应力-弹性能耗比-应变关系曲线界定弹性能耗比增长速率首次出现的拐点作为大理岩的强度失效能量判据。

关键词: 高温大理岩; SHPB; 能量耗散; 失效判据

中图分类号: O345

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

Study on dynamic energy dissipation mechanism and damage characteristics of high-temperature marble

ZHANG Xu^{1,2}, LIU Xiaohui^{1,2}, LIU Chujia^{1,2}, LUO Ying^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, Sichuan, China;

2. Key Laboratory of Fluid and Power Machinery, Ministry of Education, Xihua University, Chengdu 610039, Sichuan, China)

Abstract: To investigate the effect of high temperature on the energy characteristics of marble, ANSYS/LS-DYNA was used to carry out dynamic compression simulation tests on marble with six temperature gradients at five impact velocities to analyze the mechanical properties of marble under high-temperature dynamic loading and the temperature effect on energy evolution, and to explore the energy criterion for strength failure of high-temperature marble from the perspective of energy dissipation. The results show that the Holmquist-Johnson-Cook (HJC) constitutive model can reasonably and effectively simulate the dynamic damage process of marble under different temperatures. With the increase in temperature, the dynamic peak strength and dynamic elastic modulus of marble exhibit a quadratic negative correlation with temperature, the dynamic peak strain exhibits a quadratic positive correlation with temperature, and the damage morphology is changed from X-type to conjugate shear damage. The increase in temperature reduces the energy storage capacity of the marble specimen to a certain extent, while the effect of high temperature on the energy dissipation capacity of marble is transformed from a facilitating effect to an inhibiting effect with 600 °C as the cut-off point. When the temperature reaches 600 °C, the peak strength is significantly reduced, the ductility of the marble increases, crushing damage is presented, and the dissipated strain energy reaches the maximum value. 600 °C can be used as the threshold temperature for the brittle-delayed transformation of the marble. Based on

* 收稿日期: 2024-10-24; 修回日期: 2024-12-02

基金项目: 四川省自然科学基金 (2022NSFSC0279)

第一作者: 张旭 (1999—), 女, 硕士, 15690861127@163.com

通信作者: 刘晓辉 (1977—), 女, 博士, 教授, liuxh@mail.xhu.edu.cn

the characteristics of the energy evolution process, the point of a steep increase in dissipated strain energy is regarded as a precursor information point of the precursor of overall instability and damage of marble. The inflection point at which the growth rate of the elastic energy consumption ratio first appears is defined according to the curve of the stress-elastic energy consumption ratio-strain relationship as the energy criterion of the strength failure of marble.

Keywords: high temperature marble; SHPB; energy dissipation; failure criterion

在向多元化“新能源时代”转型的大趋势下,为实现绿色低碳可持续发展,涌现出大量高温工程,如矿产资源开发^[1]、地热开发^[2-3]、核废料处置、高地温隧道施工^[4]等,促使高温岩石力学和岩石损伤破坏等课题得到更多关注。实验研究表明^[5-6],温度是影响岩石动态力学响应的重要因素之一,能量是驱动岩石变形破坏的本质因素。因此,分析高温岩石动态力学响应及能量演化的温度效应,可为高温岩石工程在复杂赋存环境下的损伤破坏机理研究提供理论依据。

近年来,高温岩石动态的力学响应得到大量研究,Wang 等^[7]、蔚立元等^[8]、Ping 等^[9-10]针对花岗岩、砂岩开展了高温(25~1000 °C)动态压缩试验,研究了动态抗压强度、动峰值应变、动弹性模量、破坏程度等受温度的影响规律,发现温度对岩石力学特性的影响存在阶段性,温度越高,岩石的动态强度劣化越明显、动态峰值应变越大、动弹性模量越小、破碎程度越严重,岩石由脆性破坏转化为延性破坏。然而,岩石对温度的响应临界阈值具有差异性,尚未达成一致:田文岭等^[11]得到花岗岩在温度低于 450 °C 时峰后表现为脆性破坏,高于 600 °C 时峰后表现出明显的塑性特征,450 °C 为阈值温度;吴顺川等^[12]认为花岗岩热损伤阈值温度在 400 °C~600 °C 范围内,此时 P 波波速骤降且试样切片的裂纹密度骤增;夏开文等^[13]指出大理岩的拉伸强度弱化现象在热处理温度超过 450 °C 后更为明显;张平等^[14]发现砂岩的力学特性在 25~400 °C 范围内变化较小,但在 400~800 °C 范围内变化显著;Li 等^[15]认为 400 °C 是促进较小孔径比花岗岩样品中二次水平拉伸裂纹的重要温度,而 600 °C 是圆形花岗岩水平裂纹对称特性发生显著变化的临界温度。因此不难发现,以温度阈值为临界点,岩石的力学特性及破坏特征发生显著影响,获取准确的温度阈值对高温岩石工程的安全具有重要意义。

上述研究大多集中在室内试验,但面对深部高温工程中的复杂赋存环境模拟,室内试验存在耗时长、耗材大、花费高、高温赋存环境难复现等的缺陷,因此利用数值模拟分析可以更为便利、高效地开展相关研究。刘锦等^[16]、李睿等^[17]、Tian 等^[18]利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件开展高温复杂赋存环境下岩石动态特性研究,分别阐述了大理岩、煤岩、石灰岩的动态破坏特征和损伤演化过程。赖玉彰^[19]基于 PFC 离散元软件有效还原不同冲击速度下高温花岗岩的动态压缩实验。离散元法更适合处理岩石破裂和细观尺度等非连续问题模拟,而有限元法则更适用于连续介质的热力耦合。面对大变形、高应变率下冲击、爆炸等问题中,Holmquist-Johnson-Cook (HJC) 损伤本构综合考虑了压缩强度的压力相关性、应变率效应和损伤积累。宋帅等^[20]、程树范等^[21]、夏文彬^[22]分别验证了 HJC 本构模型在单向板爆炸试验、低静水压力下红砂岩动态压缩试验以及热损伤花岗岩的动态试验中的适用性。可以看出,对于高温岩石动态试验数值模拟多集中于室内试验验证及其力学特性变化分析,而利用数值模拟方法获取对应的能量演化规律研究相对较少,从能量角度结合力学响应开展相关分析值得进一步深入探讨。

本文利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对高温大理岩开展 6 级温度梯度、5 种冲击速度下的动态压缩试验,研究高温大理岩在破坏过程中的力学特征及能量特征的温度效应,综合力学响应与能量耗散规律分析大理岩高温劣化的温度阈值,并从能量耗散的角度探讨高温大理岩失效能量判据,为高温岩石工程的安全运行提供理论指导。

1 数值模拟试验

1.1 高温大理岩 HJC 模型参数标定

Holmquist-Johnson-Cook (HJC) 损伤本构模型从压实压碎效应、损伤破坏效应、应变率效应多方面综合考虑,应用于高应变率、强动载工况下岩石等材料的数值模拟试验,具备一定的准确性;同时,该模型

参数确定方法成熟, 参数数量相对较少, 大多参数可基于静态试验的基本物理参数根据经验公式获得, 具备准确性的同时平衡了冗杂的工作量。

大理岩的 HJC 本构模型涉及 21 个参数, 为保证数值模拟的科学有效性, 本文依据张志华^[23] 的高温静态物理实验获取的反映高温损伤的物理力学参数, 结合相关岩石的 HJC 本构模型参数确定方法^[24-25] 进行初步拟定, 然后经过大量试错优化, 最终调整确定相关参数, 见表 1 和表 2。为凸显温度对模型参数的影响, 分别设置温度无影响参数和温度影响参数两类。

表 1 高温大理岩温度无影响参数

Table 1 Temperature unaffected parameters of high temperature marble

<i>A</i>	<i>B</i>	<i>N</i>	<i>C</i>	p_{lock}/GPa	ϵ_0/s^{-1}	S_{max}
0.355	2.003	0.849	0.008	1.2	0.001	6.0
K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa	D_1	D_2	破坏类型	$\epsilon_{t,min}$
44	39	3.8	0.04	1	2.0	0.03

注: *A* 为归一化黏性强度系数, *B* 为归一化压力硬化系数, *N* 为压力硬化指数, *C* 为应变率系数, p_{lock} 为压实点静水压力, ϵ_0 为参考应变率, S_{max} 为归一化最大强度, K_1 、 K_2 、 K_3 为压力参数, D_1 、 D_2 损伤参数, $\epsilon_{t,min}$ 为材料断裂时最小塑性应变。

表 2 高温大理岩受温度影响参数

Table 2 Parameters of high temperature marble affected by temperature

温度/°C	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	抗压强度/MPa	剪切模量/GPa	抗拉强度/MPa	压溃点静水压力/MPa	压溃点体积应变/ 10^{-2}	压实点体积应变/ 10^{-2}
25	2.73	73.6	14.2	6.82	24.5	0.19	2.22
100	2.74	83.7	13.3	6.64	27.9	0.15	2.19
200	2.72	51.5	12.1	6.44	17.2	0.12	2.03
400	2.58	42.9	9.40	6.80	14.3	0.12	2.03
600	2.67	54.4	7.93	6.48	18.1	0.19	2.04
800	1.86	34.2	1.89	3.40	11.4	0.49	2.04

1.2 数值模型建立

为探究高温下大理岩动态破坏过程, 本文利用 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟模块建立大理岩与 SHPB 杆件的有限元模型。入射杆和透射杆选用线弹性模型, 相关尺寸参数与材料参数见表 3。大理岩尺寸为 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的圆柱形标准试样, 选用 HJC 损伤本构模型。杆与大理岩试样的网格划分均采用三维八节点六面体单元, 如图 1 所示。

网格划分结束对模型各部分赋予材料属性, 并通过 LS-PREPOST 设置加载应力波、接触和边界条件。以入射杆端面加载半正弦应力波^[26] 的形式来代替子弹冲击:

$$p(t) = \begin{cases} p_{max} [1/2 - (1/2)\cos(2\pi\omega t)] & t < 1/\omega \\ 0 & t \geq 1/\omega \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω 为动载作用频率, p_{max} 为入射脉冲应力幅值, 表达式为^[27]:

表 3 杆件有限元模型参数
Table 3 Parameters of finite element model for rods

入射杆长度/m	透射杆长度/m	直径/mm	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
1.0	1.0	75	7.80	211	0.3

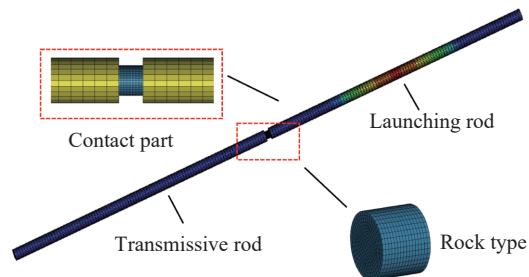


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

$$p_{\max} = -\rho c v_0 / 2 \quad c^2 = E / \rho \quad (2)$$

式中: c 为波速, ρ 为杆件密度, E 为杆件弹性模量, v_0 为冲击速度。

根据上述试验数据, 分别设置冲击速度为 10.0、11.5、12.5、13.5、14.5 m/s, 分别对应施加入射波应力幅值为 200、225、250、275、300 MPa, 延时 200 μs 的半正弦波。

1.3 可靠性验证

为了定量分析高温大理岩动态压缩试验的动态平衡状况, 通过动态应力平衡因子 η 随时间演化趋势反映入射杆与透射杆两端应力的差异:

$$\eta = \frac{2[\sigma_i(t) + \sigma_r(t) - \sigma_t(t)]}{\sigma_i(t) + \sigma_r(t) + \sigma_t(t)} \quad (3)$$

式中: $\sigma_i(t)$ 、 $\sigma_r(t)$ 、 $\sigma_t(t)$ 分别为入射应力、反射应力、透射应力。

如图 2(a) 所示, 入射应力与反射应力之和与透射应力的波形基本重合, 在应力波传播周期的开始与结束吻合性略差, 对应应力平衡因子大致呈波动-稳定-波动的趋势, 其原因是初期应力波在岩石中的传播时间较短, 入射杆与透射杆两端应力存在差异, 应力平衡因子波动较大, 最大值达到 11; 中期大理岩达到应力平衡状态, 应力平衡因子稳定在 0 附近; 末期大理岩破坏失稳, 应力平衡因子出现振荡。综上大理岩试样两端所受应力基本相等, 符合应力均匀性假设。

沙漏能 E_h 与总能量 E_{tot} 之比和 LS-DYNA 能量比如图 2(b) 所示。能量比在 1.01~1.10 范围内, 岩样沙漏能与总能量之比在 0.000 805~0.006 5 范围, 满足 LS-DYNA 能量要求^[28], 即能量比小于 2 且沙漏能小于总能量的 10% 的。图 2(c) 为高温大理岩数值模拟与试验得到的应力-应变曲线(以 $v=10$ m/s 为例)对比, 可以看出基于 HJC 损伤本构所获得的应力-应变曲线与室内实测结果吻合较好。

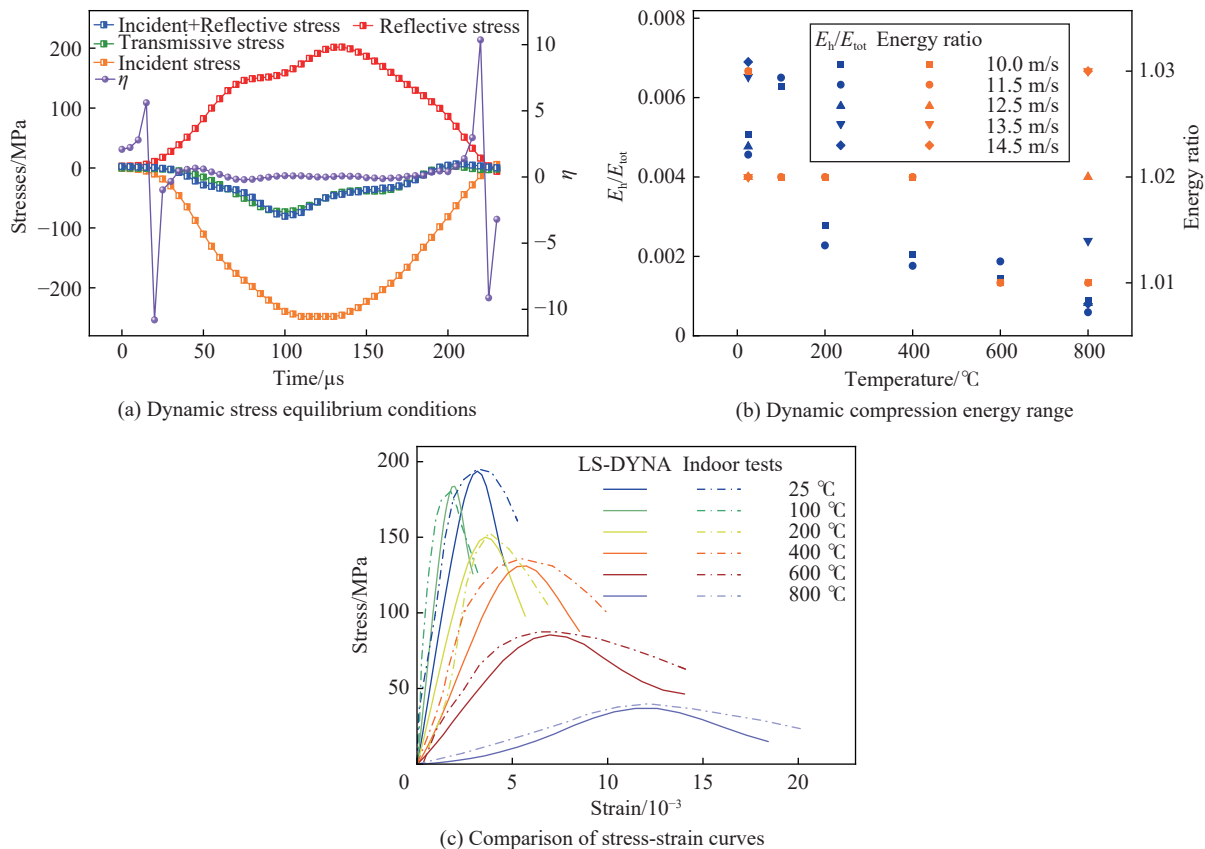


图 2 合理性验证

Fig. 2 Validation of rationality

综上所述, 结合应力均匀性假设、能量合理范围以及应力-应变曲线对比三方面的验证, 基本可以确定 HJC 本构模型参数拟定方法合理有效, 取值可靠, 且 SHPB 数值模拟实验具有准确性。

2 高温大理岩动态压缩试验结果分析

2.1 应力-应变曲线及破碎情况

基于平面和应力均衡假设, 利用一维应力波理论, 根据应力 σ 、应变 ε 和应变率 $\dot{\varepsilon}$ 来表征应力波:

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}(t) = \frac{c}{l_0}(\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) \\ \varepsilon(t) = \frac{c}{l_0} \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) dt \\ \sigma(t) = \frac{A_G}{2A_0} E(\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: A_G 、 A_0 分别为杆和大理岩的截面积, l_0 为试件原始长度, ε_i 、 ε_r 、 ε_t 分别为入射应变、反射应变和透射应变。

图 3 显示高温大理岩的动态典型应力-应变曲线及破碎情况。不同于静态应力-应变曲线, 高温后大理岩动态压缩应力-应变曲线无裂缝压实阶段, 常分为弹性变形、塑性变形和破坏三个阶段。这是由于动力学试验的加载速率远高于静态试验, 岩石中微裂隙来不及充分闭合。在弹性变形阶段, 应变随着应力的增加而增大, 此阶段曲线斜率为定值, 表示为大理岩的动弹性模量, 随温度升高以 100 °C 为拐点曲线斜率先增后减, 作用温度超过 400 °C 后, 变化幅值明显变大。在塑性变形阶段, 随着应力的增加, 曲线的斜率逐渐减小, 当达到峰值应力时, 斜率为零。在失效破坏阶段, 应力-应变曲线快速下降, 曲线斜率为负, 大理石的承载力降低。

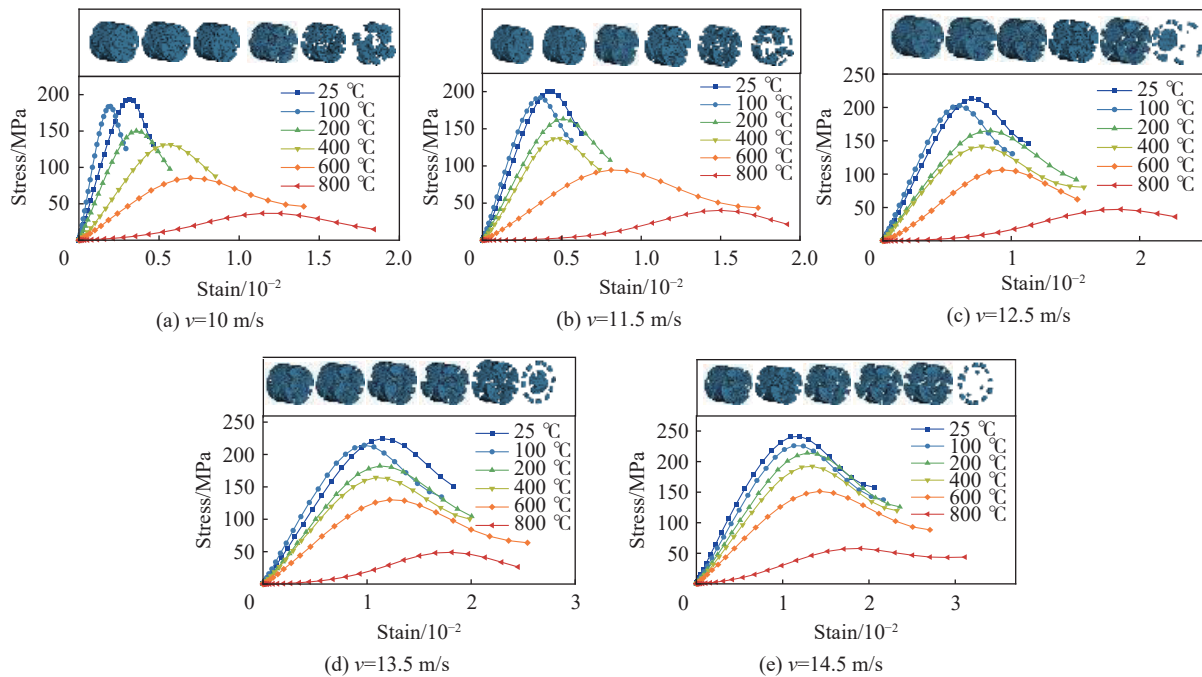


图 3 高温大理岩动态压缩应力-应变曲线及破碎情况

Fig. 3 Dynamic compressive stress-strain curves and fragmentation of high-temperature marbles

随着温度的升高, 在温度达到 100 °C 时, 应力-应变曲线整体呈一定的右移下降趋势, 弹性变形阶段的曲线斜率逐渐减小; 当温度到达 600 °C 时, 应力-应变曲线斜率呈明显的减小趋势, 应力峰值明显减小, 轴向应变呈现增大的趋势, 表明高温促进大理岩局部塑性变形及裂纹扩展, 使得大理岩的屈服强度逐步

降低, 弹性模量逐渐减小, 损伤逐渐增大。根据与之对应的破碎情况可知, 随着温度的增加, 大理岩破碎更加明显, 破碎形态由“X 型”共轭剪切破坏转变为粉碎性破坏, 其原因是高温使得岩石内部赋存的水分蒸发, 分子间黏结力逐渐变小, 温度达到 600℃ 后方解石分解, 诱发大量随机分布的微裂纹快速交汇形成网状结构, 叠加动态加载的高应变率抑制塑性变形, 使得大理岩表现为粉碎性破坏。据此初步得到大理岩在 600℃ 附近损伤劣化明显。

不同冲击速度和温度下大理岩的破坏过程相似。如图 4 所示, 12.5 m/s、200℃ 条件下大理岩试样表面受力先集中后均匀分布, 裂隙由边缘向中心发展, 表现为裂隙不断发育后贯穿岩样, 形成明显的 X 型共轭剪切破坏。结合图 3, 在 484 μs 时岩样内部有裂隙发育, 对应应力-应变曲线从零增大并呈线性变化; 在 525 μs 时大理岩开始发生破坏, 对应应力应变曲线转化为非线性塑性变化; 在 559 μs 时大理岩完全破坏, 对应应力-应变曲线达到峰值点直至 895 μs 计算时长结束, 大理岩呈最终破坏形态。

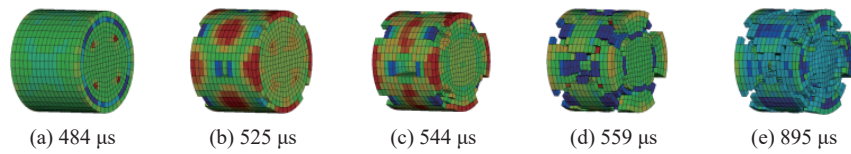


图 4 高温大理岩破坏过程 (12.5 m/s, 200 °C)
Fig. 4 Damage process of high temperature marble (12.5 m/s, 200 °C)

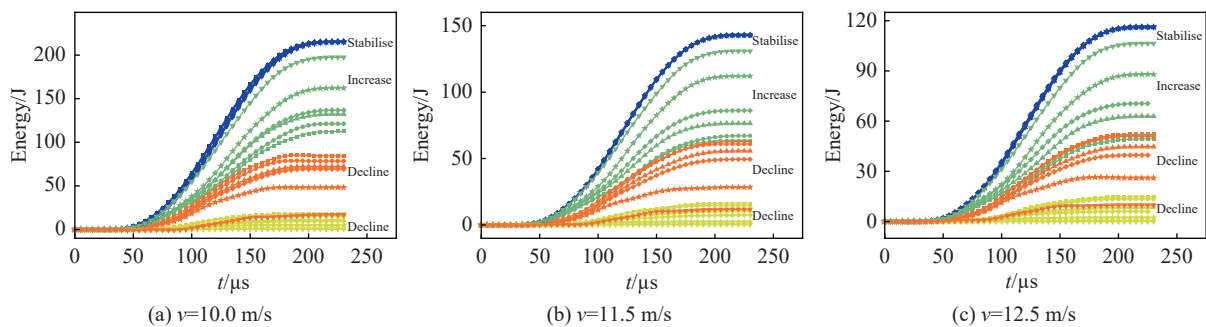
2.2 能量变化情况

在动态压缩试验中, 入射能量被吸收、反射和透射, 其中入射、反射、透射能量分别为:

$$\begin{cases} W_i = A_G c E \int_0^t \varepsilon_i^2 dt \\ W_r = A_G c E \int_0^t \varepsilon_r^2 dt \\ W_t = A_G c E \int_0^t \varepsilon_t^2 dt \end{cases} \quad (5)$$

高温大理岩动态能量时程曲线见图 5。不同冲击速度下大理岩能量演化随温度的变化规律具有类似性, 随着温度的升高, 大理岩孔隙率增加, 透射能量随加热温度的升高而减小, 反射能量随加热温度的升高而增大, 吸收能则随温度升高呈减小趋势, 最终降为最小值, 是由于在 800℃ 时, 矿物间和矿物内部的黏聚力减弱, 此时岩样破碎所需的能量相对较少。

为消除相同冲击载荷下入射能量分类的误差, 分别定义能量比率为反射能、透射能和吸收能与入射能的比值, 图 6 更直观准确地展现大理岩的能量演化趋势。图 6(a) 给出了能量比率与温度的关系, 反射比率随温度的升高而增加, 而透射能量所占的比例则降低。当大理岩温度从 25℃ 升高到 400℃ 时, 透射能从 10.36% 下降到 4.79%, 吸收能下降到 33.20%。加热至 800℃ 时, 大理岩的透射和反射能量占比分别为 0.35% 和 9.14%。图 6(b) 表示能量比率与应变率之间的关系, 其规律与温度类似, 反射比率随应变率的升高而增加, 而透射能量、吸收能量所占的比例则降低。



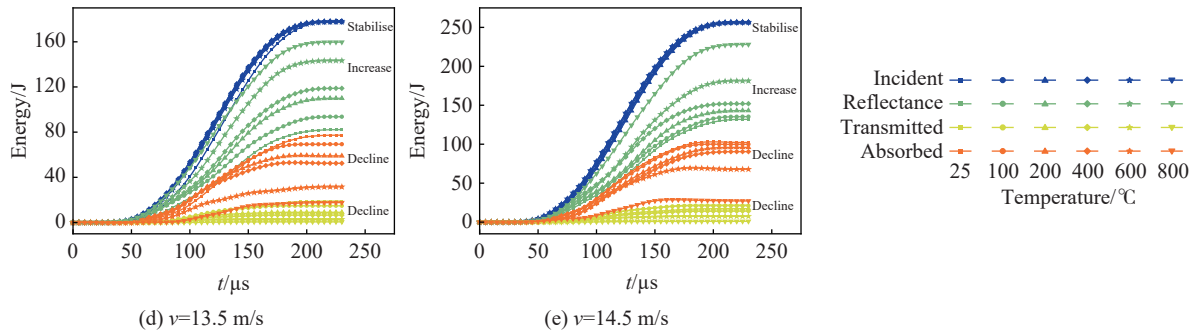


图 5 高温大理岩动态能量时程曲线

Fig. 5 Dynamic energy-time curve of high-temperature marble

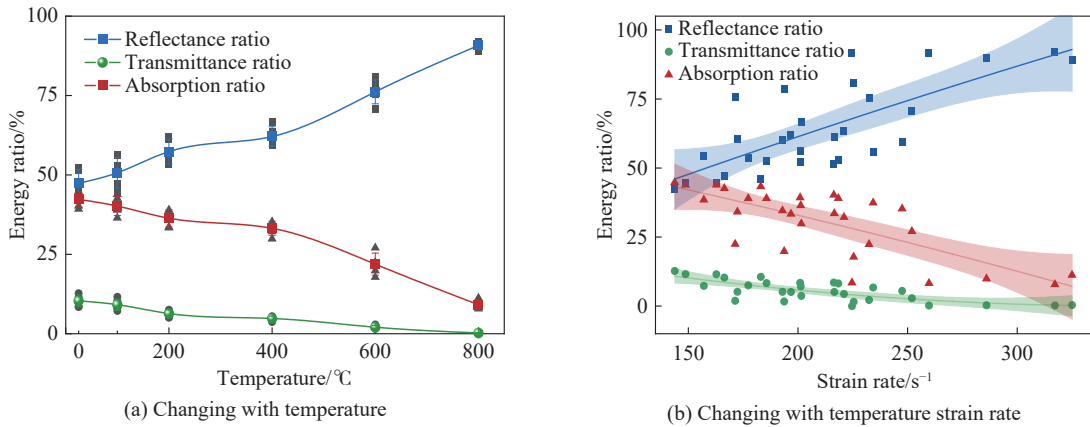


图 6 高温大理岩能量比率变化情况

Fig. 6 Changes in energy ratios of high-temperature marble

3 高温大理岩动态压缩的温度效应

3.1 动态抗压强度的温度效应

图 7 为高温大理岩动态峰值应力 σ 与温度 T 的关系, 动态峰值应力随温度呈非线性减小:

$$\sigma_{\text{peak}} = 214.5099 - 0.1074T - 1.28031 \times 10^{-4}T^2$$

$$R^2 = 0.996 \quad (6)$$

式中: σ_{peak} 和 T 的单位分别为 MPa 和 $^{\circ}\text{C}$ 。

与 25°C 相比, 在 200°C 之前, 峰值应力下降趋势较小。在 100°C 时, $v=10.0, 11.5, 12.5, 13.5, 14.5$ m/s 时的峰值应力的下降幅度分别为 5%、4%、5%、4% 和 6%; 在 200°C 时, 峰值应力的下降幅度分别为 18%、14%、19%、15% 和 6%; 从 400°C 开始, 曲线越来越陡, 即峰值应变随温度升高的下降程度越来越明显; 当温度达到 800°C 时, 峰值应力的下降幅值高达 57%、57%、56%、62%、62%。

3.2 动态峰值应变的温度效应

图 8 为高温大理岩动态峰值应变与温度的关系, 动态峰值应变随温度非线性增大, 拟合关系为:

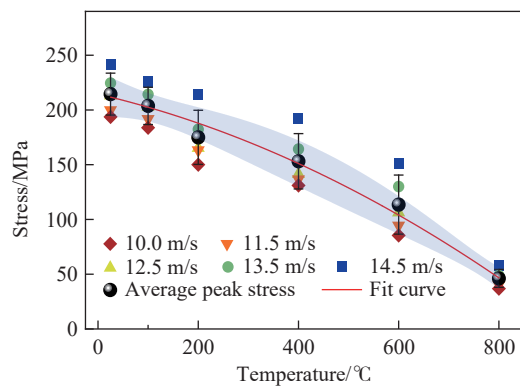


图 7 动态抗压强度与温度的关系

Fig. 7 Dynamic compressive strength as a function of temperature

$$\varepsilon_{\text{peak}} = 7.89148 - 0.00894T + 2.37903 \times 10^{-5}T^2 \quad R^2 = 0.959 \quad (7)$$

式中: T 的单位为 $^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon_{\text{peak}}$ 的单位为 10^{-3} 。

与峰值应力不同, 由于大理岩组分及微观裂隙分布的随机性, 温度低于 400°C 时, 同一冲击速度下的峰值应变随温度的增大存在一定的离散性; 温度超过 400°C 后, 同一冲击速度下的峰值应变随温度的增加而增大。温度低于 100°C 时, 相同冲击速度下的峰值应变随温度变化相对较小; 当温度达到 200°C 时, 峰值应变显著增强, 与 100°C 时相比, $v=10.0, 11.5, 12.5, 13.5, 14.5$ m/s 时的峰值应变分别增加了 81%、39%、40%、15% 和 13%; 而当温度达到 400°C 时, 峰值应变较 200°C 呈轻微的下趋势; 800°C 时不同冲击速度下的峰值应变分别为 0.011、0.15、0.18、0.018 以及 0.019。

3.3 动态弹性模量的温度效应

将峰值应力的 50% 与应力-应变曲线上应力达到峰值的 50% 时的轴向应变的比作为试样的动态弹性模量^[29]。如图 9 所示, 动弹性模量随温度的增加非线性减小:

$$E_d = 46.7943 - 0.0532T + 9.3601 \times 10^{-7}T^2 \quad R^2 = 0.999 \quad (8)$$

式中: E_d 和 T 的单位分别为 GPa 和 $^{\circ}\text{C}$ 。

总体而言, 动弹性模量约在 100°C 时达到峰值, 在 $v=10.0, 11.5, 12.5, 13.5, 14.5$ m/s 时分别为 27、28、42、64 和 124 GPa。当温度达到 200°C 之后, 不同冲击速度下的弹性模量均随温度升高而降低, 从 400°C 后均呈线性下降。当温度达到 800°C 时, 不同冲击速度下的弹性模量分别为 1.6、1.5、1.6、1.5 和 1.4 GPa, 与 25°C 时相比分别降低了 97%、98%、96%、94% 和 95%。

3.4 比能吸收值的温度效应

岩石的变形破坏是一个能量不可逆的转换过程, 其内部能量的吸收、储存及释放的综合结果能够从本质上反映岩石的破坏特征。为消除尺寸效应对试验结果的影响, 定义比能吸收值:

$$E_v = \frac{A_G E}{A_0 l_0} \int_0^t [\varepsilon_i^2(t) - \varepsilon_r^2(t) - \varepsilon_l^2(t)] dt \quad (9)$$

如图 10 所示, 随温度的增加, E_v 呈现递减的趋势, 在温度低于 400°C 时, 降幅相对较小; 温度达到 400°C 后降幅逐级增大; 温度达到 800°C 时, 耗散能密度分别降为 0.125、0.151、

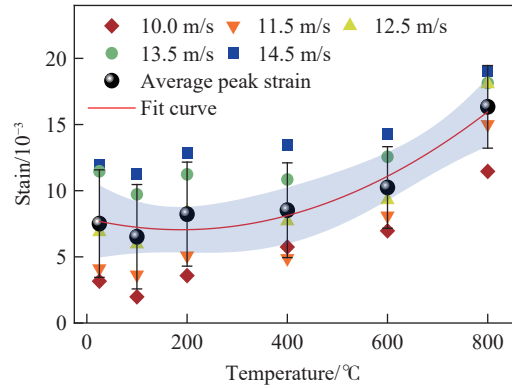


图 8 动态峰值应变与温度的关系

Fig. 8 Dynamic peak strain as a function of temperature

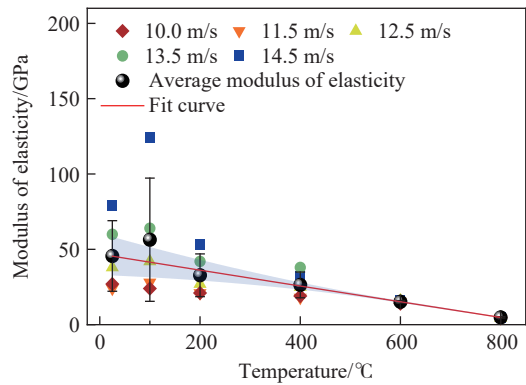


图 9 动弹性模量与温度的关系

Fig. 9 Dynamic modulus of elasticity as a function of temperature

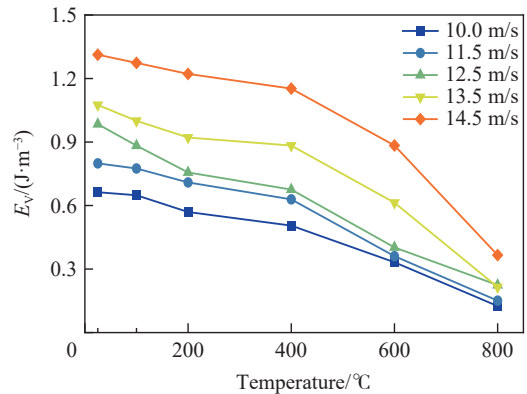


图 10 比能吸收值与温度的关系

Fig. 10 Specific energy absorption rate as a function of temperature

0.224、0.215、0.360 J/m³, 是因为矿物间和矿物内部的黏聚力减弱, 岩石破碎所需的能量相对较少。高温会导致非常严重的内部损伤, 当温度低于 600 °C 时, 大理岩吸收的能量主要用于若干宏观裂纹的扩展和贯通, 相应地大理岩破碎块体较大。当温度达到 600 °C 后, 大理岩吸收的能量更多地转化为试样内部裂纹的表面能和岩石碎块的动能, 岩石的破坏更明显, 在 800 °C 时几乎碎成粉末状。

3.5 峰值应变能的温度效应

岩石峰值强度处存储和消耗的能量与岩石破坏程度紧密相关。图 11 综合反映温度与冲击速度对峰值应变能的影响程度。可以看出, 不同温度下大理岩试样的弹性能 U_e 、耗散能 U_d 和总应变能 U_{tot} 均随冲击速度的变化具有一致性, 即随冲击速度增加大致呈增加趋势。同一冲击速度下, 大理岩的 U_{tot} 和 U_e 随着温度升高而逐渐减小, U_d 表现为随温度升高呈先增后减的趋势, 表明温度的升高在一定程度上降低了大理岩试样的储能能力, 对大理岩试样的能量耗散能力的影响以 600 °C 为分界点, 由促进作用转变为抑制作用。当温度到达 600 °C 时, 岩样内部萌生大量裂纹利于水分蒸发, 且高温改变了矿物内部晶粒的初始结构使得岩石在受到外荷载作用时, 裂隙压密、矿物颗粒的错位运动产生的滑移以及塑性流动、内部损伤等耗能行为更为突出, 表现为 600 °C 时大理岩试样的 U_d 变化最明显。这从能量的角度解释了 600 °C 之后大理岩试样抵抗外部荷载而发生变形破坏的能力显著减弱, 这与大理岩试样的峰值抗压强度变化趋势以及岩石破坏的剧烈程度十分吻合。

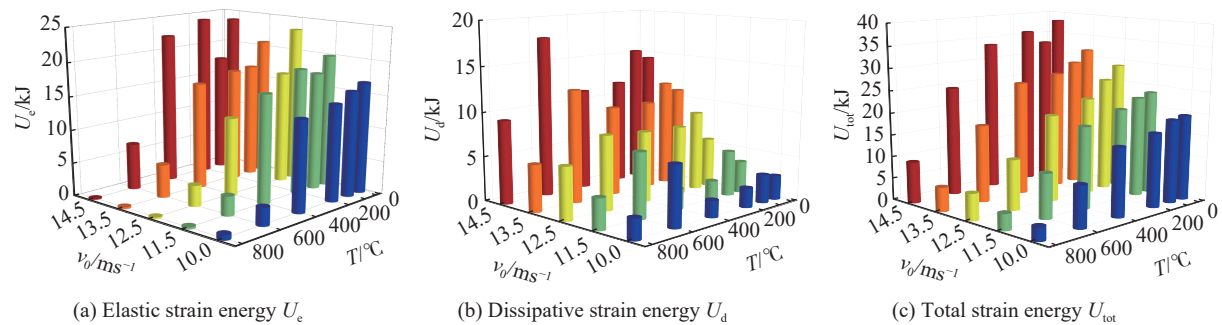


图 11 高温大理岩的应变能变化趋势

Fig. 11 Trends in strain energy of high-temperature marbles

4 基于能量耗散的岩石失效判据分析

4.1 应变能演化过程

ANSYS/LS-DYNA 数值分析中大理岩应变能以内能的形式输出, 其中岩样内能是单元受到荷载后发生变形但未破坏时产生的能量, 侵蚀内能则是单元受到荷载发生破坏而消失所产生的能量, 故将岩样内能作为弹性应变能, 侵蚀内能作为耗散应变能。

应变能变化规律与轴向应力应变关系曲线变化趋势密切相关, 不同冲击速度下大理岩破坏的应变能变化情况呈类似规律, 考虑到冲击速度越大, 大理岩受动载影响破坏更为剧烈, 峰值强度更高, 故选用 14.5 m/s 时不同温度梯度下的大理岩试验为例, 如图 12 所示。在弹性阶段, 总输入应变能主要转化为可释放弹性应变能, 表现为能量积聚。进入塑性阶段, 积聚的弹性应变能突然释放, 表现为出现裂隙扩展破坏。最后, 在达到峰值应力后弹性应变能呈明显下降趋势, 反之耗散能急剧升高, 动能出现小幅度增长, 即储存在大理岩内部的弹性应变能以动能、辐射能、热能及耗散应变能等形式快速释放, 使得大理岩整体失稳。故此, 可推断当大理岩整体失稳时耗散应变能出现明显的台阶状上升。

应变能变化规律也存在明显的温度效应, 100 °C 之后随着温度的升高, 峰值强度逐渐变小, 弹性应变能所占份额逐渐减小, 反之耗散应变能所占份额逐渐增加。在 600 °C 时峰值强度下降明显, 与之对应的弹性应变能大幅下降, 耗散应变能上升比例大幅增加, 且在温度高于 600 °C 时, 随着应力-应变曲线出现明显的右下偏移, 大理岩破坏时耗散更多能量, 塑性应变能峰后升高稳定值大于弹性应变能峰后跌落

稳定值,表明在 600℃ 后,矿物分解引发结构松散化,使得大理岩由弹性储能主导转化为塑性变形和密集脆性断裂耗散主导,从能量分配转化的角度验证了 600℃ 为高温大理岩的损伤劣化阈值点。结合图 4 可知,当到达峰值强度时,大理岩表现为宏观裂纹的起裂扩展,此时动能得以释放,耗散应变能呈陡增现象。且随着温度的增加,大理岩破碎更为剧烈,应力降低现象情况更明显,与之对应的耗散应变能陡增程度更大,动能增幅越大。因此,耗散应变能陡增现象的发生,从一定程度上可以视为大理岩整体失稳破坏的前兆信息。

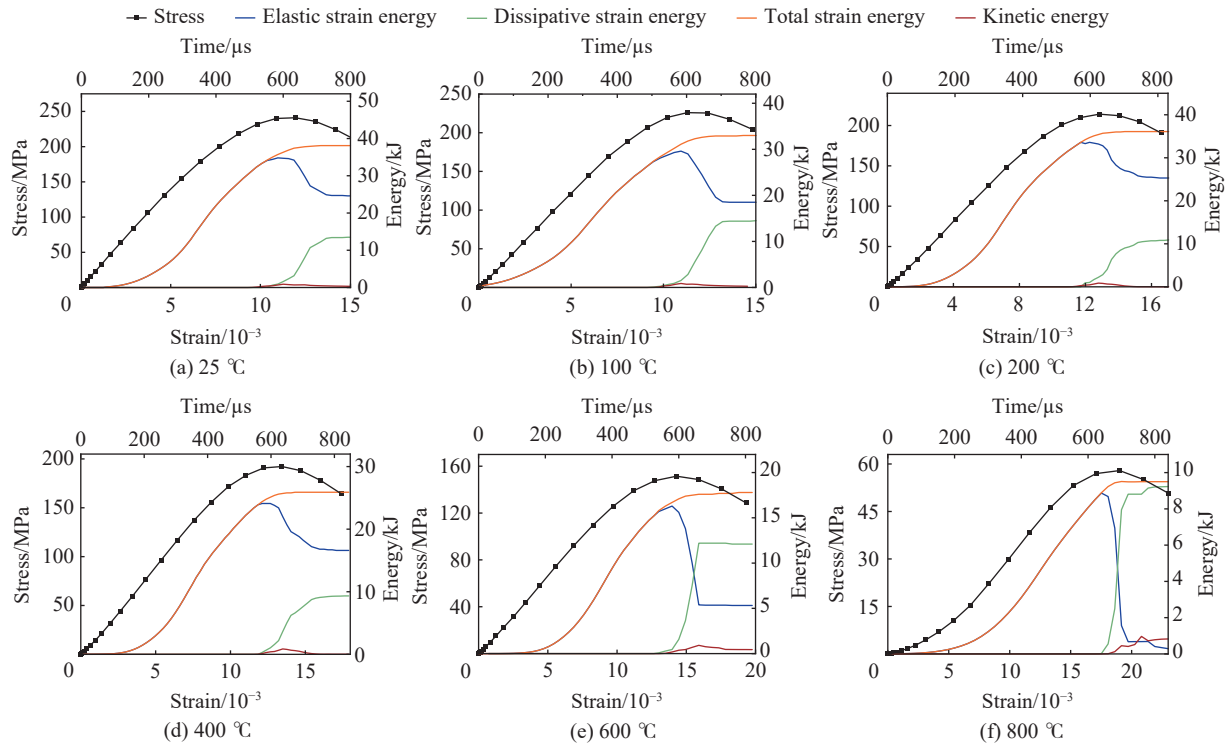


图 12 不同温度梯度下应变能演化曲线(以 $v=14.5 \text{ m/s}$ 为例)

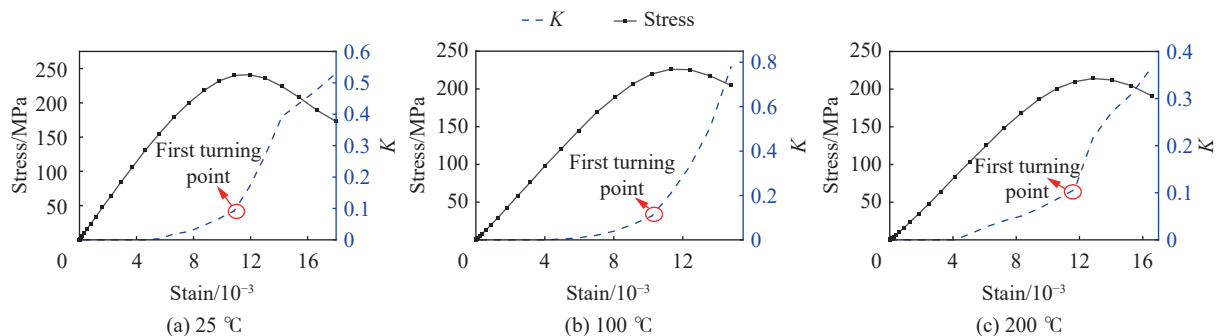
Fig. 12 Strain energy evolution curves at different temperature gradients (with $v=14.5 \text{ m/s}$)

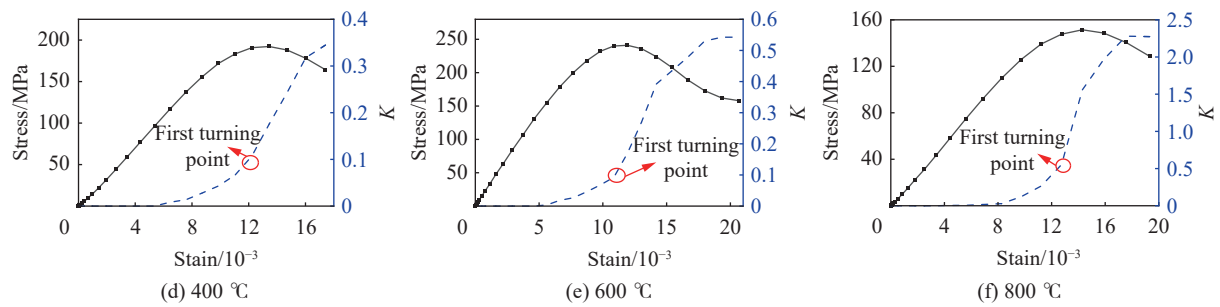
4.2 弹性能耗比

为直观地反映大理岩能量储存、耗散的情况,定义弹性能耗比为耗散应变能与弹性应变能之比:

$$K = U_d / U_e \tag{10}$$

图 13 给出了 6 种温度梯度下大理岩应力-弹性能耗比-应变关系曲线。随应变的增加,岩样弹性能耗比近似呈幂函数增长。随着温度的增加,岩样弹性能耗比整体有所提升。由于冲击荷载加载速率过快,曲线无压密阶段,在弹性阶段大理岩内部开始生成裂纹并逐渐扩展,耗散能增长速率逐渐变大,弹性应变能增长缓慢并逐渐达到储能极限,对应弹性耗散比 K 呈现上升趋势,随着应力-应变曲线由峰值点



图 13 典型高温大理岩应力-弹性能耗比 (K)-应变关系曲线 ($v=14.5$ m/s)Fig. 13 Relationship curves between stress, elastic energy ratio (K) and strain for a typical high-temperature marble ($v=14.5$ m/s)

进入峰后阶段, 耗散能增长迅速, 弹性应变能迅速降低, 大量能量被释放, 能耗比增长速率出现的首次拐点, 大理岩失稳破坏。

对比不同温度梯度下大理岩弹性能耗比首次拐点的位置发现, 首次拐点对应的应力与峰值应力比值随温度升高逐渐变小, 表明高温降低了大理岩弹性储能能力, 加快裂纹扩展速度, 从而提前激活耗散能, 使得大理岩在高温作用下损伤破坏提前、强度失效加速。这与上述强度、能量等指标的变化情况存在一致性, 表明在不同温度下大理岩均具有失稳代表性。弹性能耗比本质为通过能量转化幅值突然变大捕捉岩样强度失效点, 因此将弹性能耗比增长速率首次出现的拐点作为大理岩的强度失效判据。

5 结 论

本文利用 ANSYS/LS-DYNA 模拟分析高温大理岩 6 级温度梯度、5 种冲击速度下的动态压缩试验, 揭示了大理岩在不同温度下破坏过程中力学特征及能量特性, 从能量耗散的角度探讨脆延转化温度阈值与能量失效判据。主要结论如下:

(1) 结合应力均匀性假设、能量合理范围以及应力应变曲线三方面的验证, 表明 HJC 本构模型能够合理有效模拟不同温度下大理岩动态变化破坏过程;

(2) 随着温度的增加, 大理岩动态峰值强度和动弹性模量呈非线性函数减小, 动态峰值应变呈非线性函数增大, 破坏形态由“X 型”共轭剪切破坏向粉碎性破坏转变, 破碎细粒尺寸减小;

(3) 温度的升高在一定程度上降低了大理岩试样的储能能力, 而高温对大理岩能量耗散能力的影响则以 600 °C 为分界点, 由促进作用转变为抑制作用; 综合应力-应变曲线、动态峰值强度、破碎情况、应变能变化情况, 当温度到达 600 °C 时, 峰值强度大幅降低, 大理岩损伤增加, 呈现粉碎性破坏, 耗散应变能达到最大值, 600 °C 可作为大理岩损伤劣化的阈值温度;

(4) 应变能在弹性阶段表现为能量积聚, 进入塑性阶段, 积聚的弹性应变能释放表现为裂纹扩展, 在达到峰值应力储存在岩石内部的弹性应变能主要以动能、表面能及辐射能等耗散应变能的形式在一瞬间进行释放, 使得岩样整体失稳, 因此将耗散应变能陡增点视为大理岩整体失稳破坏前兆信息点; 大理岩弹性能耗比近似呈幂函数增长, 温度越高, 岩样弹性能耗比随之变大, 可以通过能量转化幅值突然变大捕捉岩样强度失效点, 将弹性能耗比增长速率首次出现拐点作为大理岩的强度失效判据。

参考文献:

- [1] ROCCHI V, SAMMONS P R, KILBURN C R J. Fracturing of Etnean and Vesuvian rocks at high temperatures and low pressures [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2004, 132(2/3): 137–157. DOI: 10.1016/S0377-0273(03)00342-1.
- [2] PARK J W, LEE Y K, PARK C, et al. Crack initiation and propagation thresholds of Hwangdeung granite under elevated temperature [J]. *Geosciences Journal*, 2022, 26(6): 715–729. DOI: 10.1007/s12303-022-0015-0.

- [3] KWON S, XIE L M, PARK S, et al. Correction to characterization of 4.2-km-deep fractured granodiorite cores from Pohang geothermal reservoir, Korea [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(1): 453. DOI: 10.1007/s00603-019-01925-2.
- [4] HAJPÁL M. Changes in sandstones of historical monuments exposed to fire or high temperature [J]. *Fire Technology*, 2002, 38(4): 373–382. DOI: 10.1023/A:1020174500861.
- [5] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(17): 3003–3010. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.17.001.
XIE H P, JU Y, LI L Y. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(17): 3003–3010. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.17.001.
- [6] 谢和平, 鞠杨, 黎立云, 等. 岩体变形破坏过程的能量机制 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(9): 1729–1740. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2008.09.001.
XIE H P, JU Y, LI L Y, et al. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(9): 1729–1740. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2008.09.001.
- [7] WANG Z L, SHI H, WANG J G. Mechanical behavior and damage constitutive model of granite under coupling of temperature and dynamic loading [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(10): 3045–3059. DOI: 10.1007/s00603-018-1523-0.
- [8] 蔚立元, 武东阳, 张涛, 等. 高温–水冷却花岗岩动态压缩力学特性的应变率效应研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(S1): 2615–2625. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.0316.
WEI L Y, WU D Y, ZHANG T, et al. Study on strain rate effect of dynamic compression mechanical properties of high-temperature granite after cooling with water [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(S1): 2615–2625. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.0316.
- [9] PING Q, ZHANG C L, SUN H J, et al. Dynamic mechanical properties and energy dissipation analysis of sandstone after high temperature cycling [J]. *Shock and Vibration*, 2020(5): 8848595. DOI: 10.1155/2020/8848595.
- [10] 平琦, 吴明静, 袁璞, 等. 冲击载荷作用下高温砂岩动态力学性能试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(4): 782–792. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1299.
PING Q, WU M J, YUAN P, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of high temperature sandstone under impact loads [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(4): 782–792. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1299.
- [11] 田文岭, 杨圣奇, 黄彦华, 等. 花岗岩高温高压损伤破裂微观机制模拟研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(9): 1810–1819. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.1260.
TIAN W L, YANG S Q, HUANG Y H, et al. Meso-fracture mechanism of granite specimens under high temperature and confining pressure by numerical simulation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(9): 1810–1819. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.1260.
- [12] 吴顺川, 郭沛, 张诗淮, 等. 基于巴西劈裂试验的花岗岩热损伤研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(S2): 3805–3816.
WU S C, GUO P, ZHANG S H, et al. Study on thermal damage of granite based on Brazilian splitting test [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(S2): 3805–3816.
- [13] 夏开文, 蔡英鹏, 徐颖, 等. 静水压下热损伤大理岩动态拉伸特性研究 [J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2020, 53(11): 1136–1145. DOI: 10.11784/tdxbz202001002.
XIA K W, CAI Y P, XU Y, et al. Experimental study of dynamic tensile failure of thermally damaged Fangshan marble subjected to hydrostatic confinement [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2020, 53(11): 1136–1145. DOI: 10.11784/tdxbz202001002.
- [14] 张平, 任松, 张闯, 等. 循环扰动和高温作用下砂岩的岩爆倾向性及破坏特征研究 [J]. *岩土力学*, 2023, 44(3): 771–783. DOI: 10.16285/j.rsm.2022.0448.
ZHANG P, REN S, ZHANG C, et al. Rockburst tendency and failure characteristics of sandstone under cyclic disturbance and high temperature [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(3): 771–783. DOI: 10.16285/j.rsm.2022.0448.
- [15] LI P F, SUN Q, GAO Q, et al. Size effect of failure mode of thermally damaged torus granite [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 163: 105331. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2023.105331.
- [16] 刘锦, 李峰辉, 刘秀秀. 基于 HJC 模型的煤岩冲击损伤特性研究 [J]. *工程爆破*, 2021, 27(2): 35–42, 65. DOI: 10.19931/j.EB.20200159.
LIU J, LI F H, LIU X X. Study on impact damage characteristics of coal-rock based on HJC model [J]. *Engineering Blasting*, 2021, 27(2): 35–42, 65. DOI: 10.19931/j.EB.20200159.

- [17] 李睿, 刘磊, 张志华, 等. 基于 HJC 模型高温后大理岩 SHPB 实验数值模拟研究 [J]. *工程爆破*, 2022, 28(1): 37–44. DOI: 10.19931/j.EB.20210138.
LI R, LIU L, ZHANG Z H, et al. Numerical simulation of marble damaged by high temperature in SHPB experiment based on HJC model [J]. *Engineering Blasting*, 2022, 28(1): 37–44. DOI: 10.19931/j.EB.20210138.
- [18] TIAN X C, TAO T J, LOU Q X, et al. Modification and application of limestone HJC constitutive model under the impact load [J]. *Lithosphere*, 2022, 2021(Special 7): 6443087. DOI: 10.2113/2022/6443087.
- [19] 赖玉彰. 热-力耦合作用下岩石力学特性及破坏机理研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2023. DOI: 10.27176/d.cnki.gnfyc.2023.000655.
LAI Y Z. Study on mechanical properties and failure mechanism of rock under thermal-mechanical coupling [D]. Ganzhou, Jiangxi: Jiangxi University of Science and Technology, 2023. DOI: 10.27176/d.cnki.gnfyc.2023.000655.
- [20] 宋帅, 杜闯, 李艳艳. 超高性能混凝土 HJC 本构模型参数确定及应用 [J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(5): 053102. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0343.
SONG S, DU G, LI Y Y. Determination and application of the HJC constitutive model parameters for ultra-high performance concrete [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(5): 053102. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0343.
- [21] 程树范, 叶阳, 曾亚武, 等. 基于损伤-虚拟张拉裂纹模型的地下爆炸围岩破坏规律研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(5): 055201. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0414.
CHENG S F, YE Y, ZENG Y W, et al. Failure law of surrounding rock under underground explosion based on a new damage-virtual tensile crack model [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(5): 055201. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0414.
- [22] 夏文彬. 热损伤花岗岩动态力学特性及数值模拟研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2023. DOI: 10.27176/d.cnki.gnfyc.2023.000090.
XIA W B. Study on dynamic characteristics and numerical simulation of thermally damaged granite [D]. Ganzhou, Jiangxi: Jiangxi University of Science and Technology, 2023. DOI: 10.27176/d.cnki.gnfyc.2023.000090.
- [23] 张志华. 高温条件下大理岩的动、静态力学性能研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019. DOI: 10.27200/d.cnki.gkmlu.2019.000115.
- [24] JOHNSON H G R. A computational constitutive model for glass subjected to large strains, high strain rates and high pressures [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2011, 78(5): 051003. DOI: 10.1115/1.4004326.
- [25] 毕程程. 华山花岗岩 HJC 本构参数标定及爆破损伤数值模拟 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
BI C C. Calibration of HJC constitutive parameters of Huashan granite and its blasting damage numerical simulation [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [26] 李夕兵, 李地元, 郭雷, 等. 动力扰动下深部高应力矿柱力学响应研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(5): 922–928. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2007.05.008.
LI X B, LI D Y, GUO L, et al. Study on mechanical response of highly-stressed pillars in deep mining under dynamic disturbance [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(5): 922–928. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2007.05.008.
- [27] 余同希, 邱信明. 冲击动力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [28] 邱薛, 刘晓辉, 胡安奎, 等. 煤岩动态 RHT 本构模型数值模拟研究 [J]. *煤炭学报*, 2024, 49(S1): 261–273. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0540.
QIU X, LIU X H, HU A K, et al. Research on numerical simulation of coal dynamic RHT constitutive model [J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(S1): 261–273. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0540.
- [29] LI D Y, HAN Z Y, ZHU Q Q, et al. Stress wave propagation and dynamic behavior of red sandstone with single bonded planar joint at various angles [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 117: 162–170. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.03.011.

(责任编辑 王小飞)