

文章编号: 1000-4750(2014)08-0189-08

高温后大理岩力学性质及其破坏规律研究

陈国飞, 杨圣奇

(中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏, 徐州 221008)

摘 要: 基于大理岩在常温至高温 800℃ 后的力学试验结果, 分析了高温后大理岩峰值强度、峰值应变、弹性模量、变形模量以及应力-应变全过程曲线等随温度的变化规律, 同时采用岩石声发射仪与扫描电镜测试仪, 对高温后大理岩破坏规律进行了探讨。结果表明: 高温后大理岩试样高度和直径将变大, 质量和密度减小, 但在 200℃ 时变化不明显; 在常温至高温 200℃ 后, 大理岩的力学性质变化不大; 高温 400℃~800℃, 大理岩峰值强度、弹性模量和变形模量随着温度的升高而减小, 而峰值应变则变大, 并且随着温度的升高, 变化越明显; 声发射试验得到的振铃计数与应力-时间曲线具有较好地对应关系, 充分反映了岩石在不同阶段内的破裂演化规律; 温度对大理岩的破坏规律有着显著影响, 温度升高使大理岩由脆性破坏向延性破坏的方向发展。

关键词: 高温; 大理岩; 力学特性; 破坏规律; 振铃计数

中图分类号: TU452 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.05.0485

STUDY ON FAILURE MECHANICAL BEHAVIOR OF MARBLE AFTER HIGH TEMPERATURE

CHEN Guo-fei, YANG Sheng-qi

(State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: Laboratory tests were made to study the mechanical properties of marble from room temperature of 800℃. The changes of peak intensity, peak strain, the modulus of elasticity, the modulus of the deformation and complete stress-strain curve of marble after high temperature were analyzed in detail. An acoustic emission instrument and a scanning electron tester were used at the same time. The failure law of marble after high temperature was studied. The results showed that the length and diameter of a marble specimen after high temperature increase, the mass and density decrease, but change little at 200℃; The mechanical properties of marble change little when the temperature keeps to 200℃; The peak intensity, the modulus of elasticity and deformation modulus of marble decrease and peak strain becomes large as the temperature increases when the temperature is between 400℃ to 800℃, the changes became more obvious as the temperature increase; The ringing count of the acoustic emission has a good corresponding relationship with a stress curve, which fully reflects the rupture evolution law of marble in different stages; Temperature has a significant effect on the destruction law of marble, as temperature rise, the failure of marble is from brittle failure to ductile failure.

Key words: high temperature; marble; mechanical behavior; failure rule; ringing count

近年来, 在矿山开采、能源、地质以及土木工程等众多领域中涉及到高温岩石, 岩石在高温作用后强度以及变形特性发生变化, 这严重影响到地热开发与利用, 地下矿山开采以及地下空间开发利

用, 因此, 高温后岩石的物理性质及力学特性研究成为了岩石力学及工程研究的新课题。

国内外学者对高温岩石进行了大量的研究工作并取得了较多的成果。邵保平、赵阳升^[1]研究了

收稿日期: 2013-05-27; 修改日期: 2013-10-31

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0961); 国家自然科学基金项目(41272344); 江苏省自然科学基金项目(BK2012568)

通讯作者: 杨圣奇(1978—), 男, 江苏阜宁人, 教授, 博士后, 博导, 主要从事岩石力学与工程方面的研究(E-mail: yangsqi@hotmail.com).

作者简介: 陈国飞(1990—), 男, 江苏盐城人, 硕士生, 从事岩土力学与地下工程方面的研究工作(E-mail: guoifeichencumt@126.com).

600℃内高温状态花岗岩遇水冷却后的力学特性；许锡昌等^[2]研究了不同温度(20℃~600℃)下花岗岩基本力学性质，探讨了其弹性模量、单轴抗压强度以及泊松比随温度的变化规律；夏小和等^[3]分析了高温作用对大理岩强度及变形特性影响规律；杜守继等^[4]研究了花岗岩高温后的强度和变形特征；Lau等^[5]研究了低围压下花岗岩的弹性模量、泊松比、抗压强度随温度的变化规律。Dawn等^[6]对10种不同的沉积岩进行了循环冻融试验，得到不同种类沉积岩破坏时所经历的冻融循环次数，分析了冻融后岩石的质量损失，并提出岩石已有缺陷对岩石影响的4种岩石劣化模型，试验得到的结果可以用于为岩石耐久性试验挑选岩样，特别是强度较高的坚硬岩石；赵洪宝等^[7]以砂岩试件为研究对象，通过研究高温后砂岩的超声波速变化，孔隙率变化规律，得到了温度对砂岩损伤的影响规律；朱合华、闰治国等^[8]对3种高温后岩石力学性质的进行了试验研究，分析比较了3种岩石峰值应力、峰值应变及弹性模量随温度的变化规律，并研究了峰值应力与纵波波速、峰值应变与纵波波速的关系；徐小丽、高峰等^[9]进行了温度作用下花岗岩力学性质变化及结构效应研究，探讨了高温作用下岩石力学性质的变化与结构晶体学性质变化的相关性；杨圣奇等^[10-11]进行了两条断续预制裂纹粗晶大理岩强度参数的研究，但没有研究高温后的力学特性；朱珍德等^[12]进行了高温作用对大理岩强度及变形特性影响的试验研究，但是没有涉及声发射的研究。

鉴于此，本文基于对不同温度后大理岩的试验结果，分析了不同高温后大理岩的强度与变形特性，同时采用岩石声发射仪与扫描电镜试验仪，对高温后大理岩的破坏规律进行了探讨。

1 试验概况

1.1 岩性特征和试样制作

本文所选用的大理岩取自徐州，岩样新鲜、完整性好，主要矿物成分为方解石、白云石、伊利石和石英等，各组份含量如图1所示。该大理岩呈白色、块状、粒状变晶结构，均质性较好，平均密度为2716kg/m³。

现场采集大理岩试块，按照国际岩石力学学会推荐标准，经实验室精细加工制备成50mm×100mm圆柱形试样，如图2所示。结合试验目的，共加工了20个大理岩试样，按温度的不同(25℃、200℃、

400℃、600℃、800℃)分为5组，同一温度下4个试样，如表1所示。

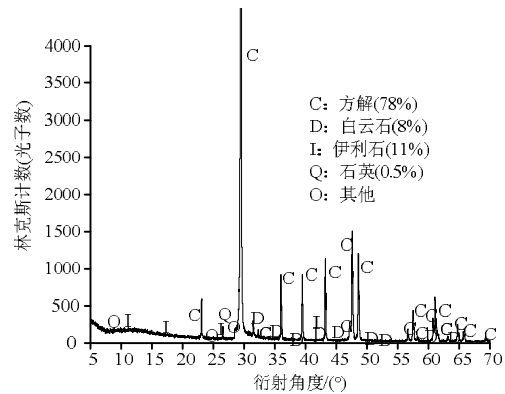


图1 大理岩 XRD 结果

Fig.1 The XRD results of marble



图2 大理岩试样

Fig.2 The marble sample

表1 各温度组大理岩岩样数量

Table 1 Quantities of marble specimens in different temperature groups

温度/(℃)	岩样编号	数量/个
25	M1~M4	4
200	M5~M8	4
400	M9~M12	4
600	M13~M16	4
800	M17~M20	4

1.2 试验设备

选用上海西格马高温电炉有限公司制造的高温箱对试样进行加温，该加温设备是具有温度控制精度高、冲温小等特点，其最高施加温度可达到1100℃。采用美国Quanta 250环境扫描电子显微镜系统测试试样微观结构。大理岩单轴压缩试验采用微机控制电液伺服万能试验机进行。并利用DS2系列全信息声发射信号分析仪采集大理岩压缩试验过程中的声发射信息。

1.3 试验程序

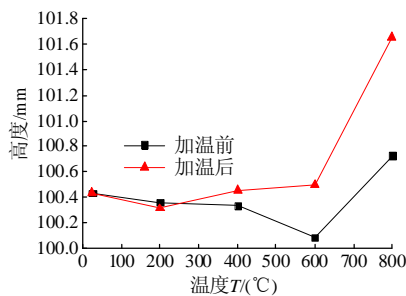
首先，测量加温前各大理岩试样高度、直径、质量以及密度。其次，将同一温度下4个大理岩试样放入电烤炉中，设定高温箱控制参数，快速加热20min达到所需温度，恒温两小时后使其自然冷却。

测量加温后试样高度、直径、质量及密度。然后，观察大理岩在不同温度后的微观结构。最后，对大理岩试样进行单轴压缩试验，试验采用位移控制，加载速率为 0.2mm/min。在进行单轴压缩试验的同时，利用声发射信号分析仪采集声发射信息。

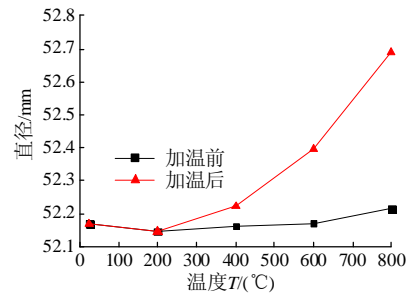
2 试验结果分析

2.1 高温对大理岩物理性质的影响

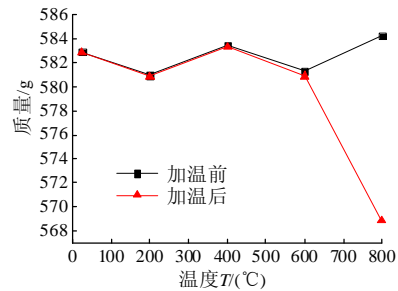
为研究大理岩加温前后物理性质和几何尺寸的变化，取同一温度下 4 组试样的高度、直径、质量、密度的平均值。图 3(a)给出了大理岩试样高度随温度的变化曲线，加温处理后大理岩试样物理性质发生了显著的变化，试样高度整体上随着温度的升高而增大，加温到 200℃，试样高度变化的不是很明显，而当加温到 400℃、600℃、800℃，试样高度变化较为显著。在高温 800℃后，高度由加温前的 100.44mm 增大到 101.66mm，增幅达到了 1.2%。图 3(b)给出了大理岩试样直径随温度的变化曲线，直径随温度的变化规律与高度随温度的变化规律相似，均随着温度的升高而变大。主要是由于试样在高温作用后，伊利石发生热膨胀，这一过程不可逆，所以冷却后，试样尺寸不会回复原状。图 3(c)是试样质量随温度的变化曲线，在常温至高温 600℃之间，试样质量变化不明显，在高温 800℃后，质量由 582.9g 减小到 568.8g，减小了 2.4%。这是因为高温作用使得大理岩内部伊利石发生热分解，但变化很小，当温度达到 700℃后，白云石将发生热分解，试样质量变化大。图 3(d)则是大理岩密度随温度的变化曲线，试样密度整体上随温度的增大而减小的，加温到 200℃试样密度变化不明显，当温度加温到 400℃、600℃、800℃时，密度减小的幅度较大，在 800℃时，密度由 2715kg/m³减小到 2566kg/m³，减小了 5.5%。由此可见，温度对大理岩的物理性质影响较大，温度越高，影响越显著。



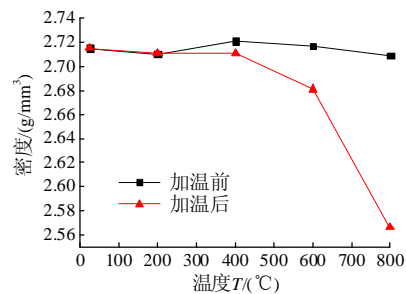
(a) 加温前后大理岩试样平均高度的比较



(b) 加温前后大理岩试样平均直径的比较



(c) 加温前后大理岩试样平均质量的比较



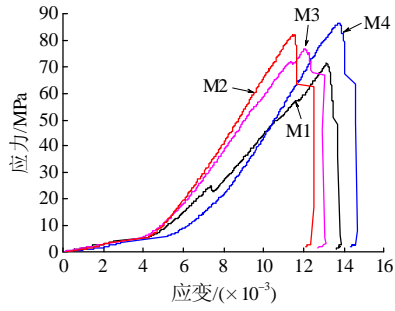
(d) 加温前后大理岩试样平均密度的比较

图 3 大理岩试样加温前后的几何尺寸和物理性质比较

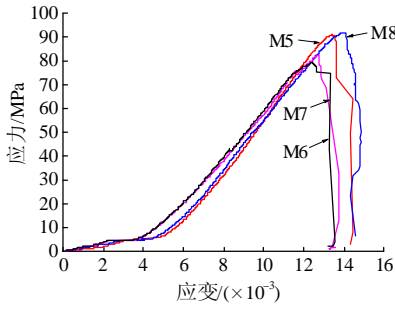
Fig.3 Comparison of the size and physical properties of marble sample heated before and after

2.2 大理岩单轴压缩应力-应变曲线分析

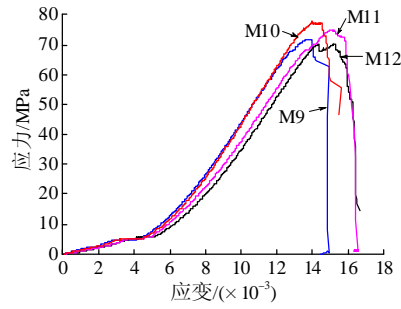
图 4 是大理岩在不同高温后单轴压缩全应力-应变曲线。图 4 所示，经历不同高温后，大理岩单轴压缩全应力-应变曲线变化规律大致经历压密、弹性、屈服和破坏 4 个阶段。首先是压密阶段，曲线呈上凹型，变形随着应力的增加发展较快，这是因为岩石内部微裂隙在载荷作用下快速闭合，并且温度越高，压密阶段就越长，这说明温度越高，内部产生的微裂隙越多；随后进入弹性阶段，这一阶段应力-应变呈比例关系，此时曲线基本上是直线，直线的斜率就是岩石的平均切线弹性模量；接着进入塑性变形阶段，在这一阶段，应力增加很小，而应变却急剧增大，温度越高，塑性变形越明显；最后是破坏阶段，此时的轴向应力达到了峰值强度，岩石破坏，破坏后的大理岩仍具有一定的承载能力。



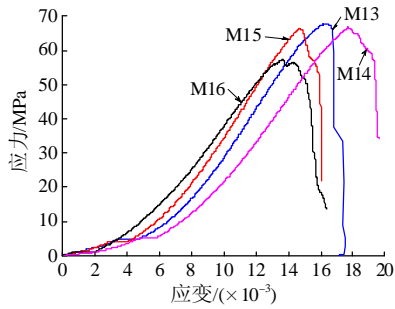
(a) $T=25^{\circ}\text{C}$



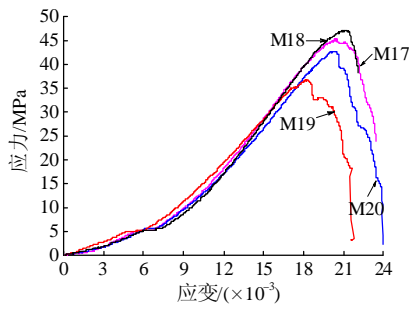
(b) $T=200^{\circ}\text{C}$



(c) $T=400^{\circ}\text{C}$



(d) $T=600^{\circ}\text{C}$



(e) $T=800^{\circ}\text{C}$

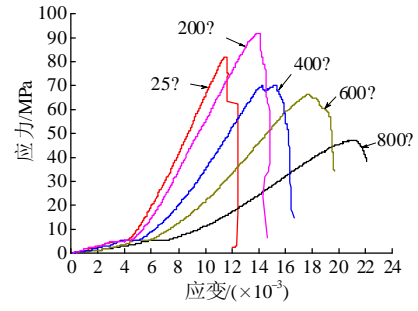


图 4 不同温度后大理岩的应力-应变曲线

Fig.4 The uniaxial compressive stress - strain curve of marble after different temperature

随着温度升高，大理岩的脆性减弱，延性增强，峰后塑性显著增强，常温至 600℃ 高温后大理岩试样主要表现为脆性破坏；800℃ 高温后大理岩试样的延性明显增强，应力达到峰值后应变仍缓慢增加，随应变的增大，应力逐渐减小，形成缓和的应力-应变全过程曲线。

2.3 峰值强度随温度的变化规律

图 5 为大理岩峰值强度与温度的关系曲线。同一温度条件下大理岩的峰值强度具有离散性，但是从整体的变化趋势可以看出，大理岩的峰值强度随着温度的升高而降低。由图 5 可以看出，峰值强度均值随温度呈先增大后减小变化的趋势。在 200℃ 前，峰值强度随温度的升高而增大，平均值由 79.4MPa 增大为 86.3MPa，升高为 8.7%，这是由于高温作用产生的热应力使得岩石内部空隙结构有着容纳变形和阻止裂纹扩展的作用，同时岩石内部的矿物颗粒受热膨胀也可能造成大理岩中原生裂隙逐渐闭合，大理岩试样的裂隙数量减少，密实程度提高，从而强度增加。在 200℃~400℃，峰值强度随温度升高而降低，平均值由 86.3MPa 降到 73.7MPa，降低了 14.6%。从 400℃ 到 600℃ 时峰值强度继续下降，降低幅度约为 12.5%。而在 600℃~800℃，峰值强度下降幅度相对比较大，下降的幅度达到了

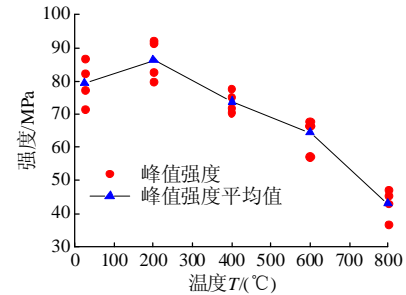


图 5 大理岩峰值强度与温度的关系

Fig.5 The relationship between the peak stress of marble and the temperature

33.3%，主要是因为高温后大理岩内部结构热应力达到或超过材料的极限强度，此时岩石内部产生微裂隙，导致大理岩试样承载能力和抗变形能力减弱，并且随温度的升高，热应力的影响越加明显，热应力增大，大理岩内部产生更多微裂隙，原生裂纹在热应力的作用下扩展、加宽和贯通，从而使得岩石的峰值强度降低。

2.4 峰值应变随温度的变化规律

高温后大理岩的峰值应变随温度的变化如图 6 所示。由图 6 可以看出，大理岩的峰值应变随温度的升高而增大。温度在 200℃ 以内时峰值应变略有增大，但变化不明显。而在 200℃ 升高到 600℃ 过程中，峰值应变随温度的增大而增大，上升幅度达到 18.9%。当温度超过 600℃ 时，峰值应变随温度的升高迅速增长，峰值应变由 15.6×10^{-3} 上升为 20.1×10^{-3} ，上升幅度达到了 28.8%。与常温试样的峰值应变相比，温度 400℃、600℃、800℃ 下试样的峰值应变分别增加了 15%、24%、59%。这是由于高温作用使大理岩的延性提高，温度升高使得岩石内部分子的热运动增强，使其粘聚力减弱，从而大理岩的晶粒面更容易产生滑移。温度越高，大理岩内部产生微裂纹的机会越大，从而使大理岩的应变增加。

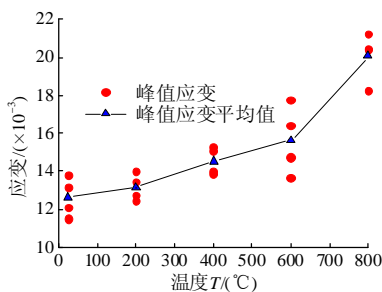


图 6 大理岩峰值应变与温度的关系

Fig.6 The relationship between the peak strain of marble and the temperature

2.5 弹性模量随温度的变化规律

为了研究弹性模量与变形模量与温度的关系，取 0.3 倍峰值应力与 0.7 倍峰值应力两处连线的斜率为弹性模量，取 0.5 倍峰值应力处与原点连线的斜率为变形模量。

图 7 给出了大理岩的弹性模量与温度的关系，总体上弹性模量是随着温度的升高而降低的，且经历的温度越高，弹性模量下降的幅度越大。200℃ 前，弹性模量随温度的升高而降低，弹性模量从 10.57GPa 降到 10.32GPa，下降了 2.4%，变化较小。

在 200℃~400℃，弹性模量从 10.32GPa 降到 8.59GPa，降幅为 16.8%，弹性模量的变化较为明显。在 400℃~600℃，弹性模量从 8.59GPa 降到 6.52GPa，此时的降幅达到了 24.1%。当温度大于 600℃ 时，弹性模量从 6.52GPa 减小为 3.26GPa，整个过程减少了 50%，变化显著。

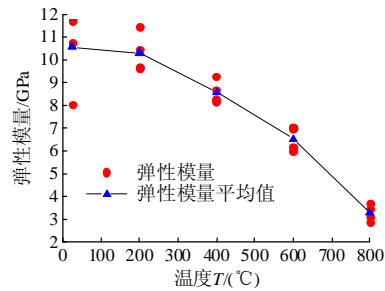


图 7 大理岩弹性模量与温度的关系

Fig.7 The relationship between the elastic modulus of marble and the temperature

图 8 给出了大理岩的变形模量与温度的关系。从图 8 可以看出，变形模量整体上是随着温度的升高而减小。在 25℃~200℃ 这一过程中，变形模量随着温度的升高而变大，其变形模量从 4.55GPa 增大为 4.99GPa，增幅为 9.7%；在 200℃~400℃ 这一过程中变形模量则是随着温度的升高而减小，其值从 4.99GPa 下降到 3.82GPa，降幅达到了 23.4%。在 400℃~600℃ 的过程中，变形模量同样是随着温度的升高而降低，其值从 3.82GPa 降到 3.17GPa，整个过程的降幅为 17%。当温度大于 600℃ 时，变形模量的变化将会很明显，这一过程中变形模量从 3.17GPa 减小为 1.65GPa，降幅达到了 47.9%。由此可以看出，温度越高，变形模量变化越明显。

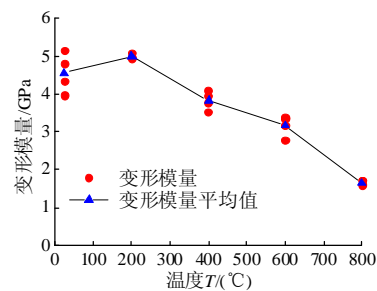


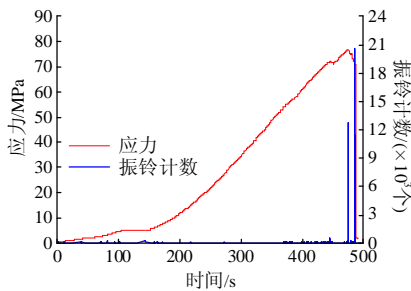
图 8 大理岩变形模量与温度的关系

Fig.8 The relationship between deformation modulus of marble and the temperature

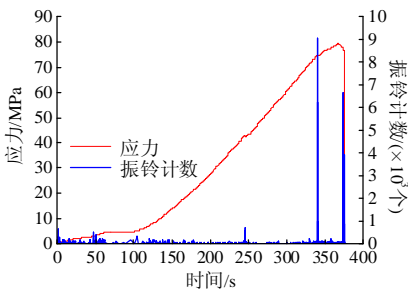
2.6 大理岩试样声发射数据分析

图 9 为不同温度后大理岩声发射振铃计数与时间、应力的关系曲线。从图 9 可以看出，当岩石内部产生裂隙时会有一定的声发射产生，所以声发

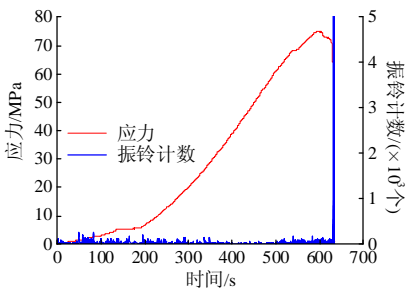
射产生的过程与岩石压缩过程的4个阶段相对应。在压紧阶段,大理岩内部的裂隙由于受到压力作用逐渐闭合,闭合的过程中裂隙由于受到压力作用产生微裂隙,此时将会产生微弱的声发射。随着压力的增大,大理岩进入弹性变形阶段,这一阶段没有产生塑性变形,岩石内部没有产生明显的裂纹,这一阶段的声发射信息较少。当进入塑性变形阶段,岩石内部裂隙大量生成,表面形成肉眼可见的宏观裂隙,此时声发射振铃计数迅速增加,当加载的压力达到大理岩的极限荷载时,大理岩将失稳破坏,此时声发射强度达到最大值。



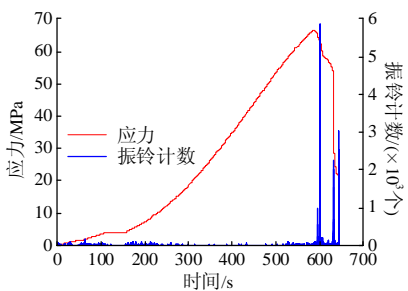
(a) 25°C的应力、振铃计数、时间的关系



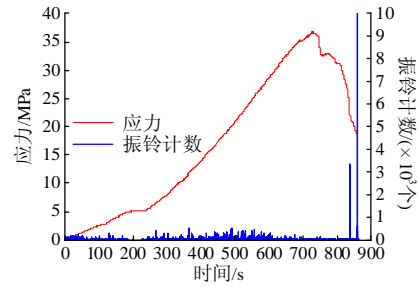
(b) 200°C的应力、振铃计数、时间的关系



(c) 400°C的应力、振铃计数、时间的关系



(d) 600°C的应力、振铃计数、时间的关系



(e) 800°C的应力、振铃计数、时间的关系

图9 不同温度后大理岩应力、振铃计数、时间的关系
Fig.9 The relationship between stress, ring-down count and time of marble after different temperatures

分析不同温度后试样声发射数据,可以发现温度对声发射有着显著的影响。常温 25°C时加压 450s左右时振铃计数将会达到了峰值,当温度达到 200°C时振铃计数的峰值在加压 400s左右就产生了。结合应力与时间的关系,则可以看出 25°C~200°C这一过程,热应力的作用使大理岩中原生裂隙逐渐闭合,裂隙数量减少,密实程度提高,从而大理岩强度得到提高,岩石主要是脆性破坏,所以峰后的声发射信息很少。400°C和 600°C的振铃计数峰值出现的时间相比较变化不是很大,都是在 600s左右出现,此时岩石由于热应力作用,岩石内部产生微裂隙,使得承载能力变弱,同时表现出一定的延性破坏,所以在峰后仍有少量的声发射信息。对于高温 800°C后的大理岩,振铃计数最大值则出现在 800s左右,变化非常明显,增幅达到了 33%,此时岩石延性破坏比较显著,声发射信号强度在试样破坏后减小,并持续较长时间。大理岩发生破坏后,声发射信号很少,主要是压实小碎片形成的。结合上文数据分析可以看出,随着温度的升高,出现明显声发射信号的时间逐渐推移,峰后声发射信息增加。

2.7 温度对大理岩破坏规律的影响

大理岩由各种矿物结晶组成,具有区域性、非连续性和非均质性等物理特性。大理岩在不同高温后,岩性发生了一定的变化,内部颗粒结构变化导致岩石受力破坏规律不同。

图 10 为不同高温后大理岩试样的单轴压缩的破坏形式。从图 10 可以看出,大理岩在五组不同温度后的破坏模式基本上都是轴向劈裂破坏,同时在裂隙口周围产生细小的裂隙。大理岩在高温后整体的脆性减弱,延性增强,且随着温度的升高,这种变化就越明显。在 200°C之前,大理岩的破坏模式基本上是垂直劈裂破坏,周围很少存在横向的细

小裂隙，内部空隙结构在高温作用产生的热应力作用时起起到容纳变形和阻止裂纹扩展的作用，同时岩石内部的矿物颗粒受热膨胀也可能造成大理岩中原生裂隙逐渐闭合，裂隙数量减少，密实程度提高，抗变形能力得以强化。而在高温 400℃~800℃后，高温对大理岩破坏模式的影响就很明显，在劈裂裂隙周围形成了许多细小的横向裂隙，裂隙分布在大理岩整个表面，没有明显的分布规律，延性破坏现象变得明显。相对于低温时平滑的破裂面，高温后的破裂面变得粗糙，在破裂口上由于摩擦作用产生白色粉末，温度越高，现象越明显。

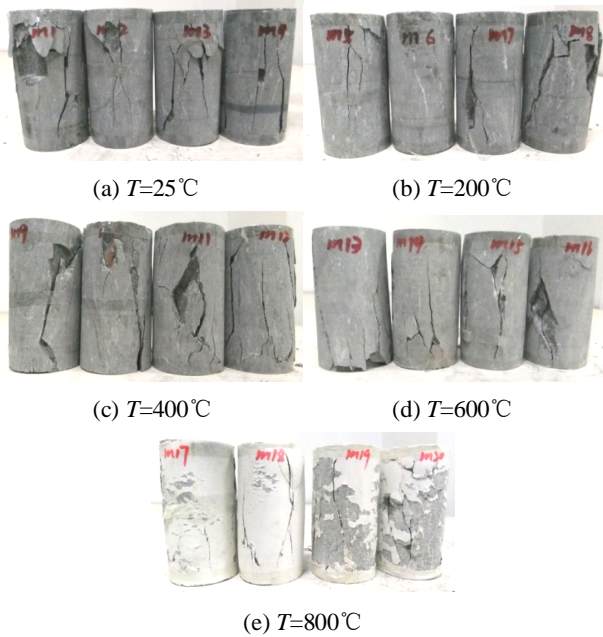


图 10 不同温度后大理岩的破坏模式

Fig.10 The failure modes of marble after different temperatures

2.8 高温大理岩的细观结构分析

图 11 为不同高温后大理岩的扫描电镜照片。由图 11(a)可以看出，常温下大理岩试样颗粒结合不是十分紧密，内部存在许多空隙和裂隙，颗粒表面光滑，整体性较好，试样的强度较大；由图 11(b)可知，大理岩经过高温 200℃加温后，热应力阻止内部裂隙扩展，同时矿物颗粒的受热膨胀也可能造成粗砂岩中原生裂隙逐渐闭合，岩石裂隙数量减少，密实程度提高，这使得大理岩强度增加，抗变形能力变强，大理岩主要表现为脆性破坏。

由图 11(c)、图 11(d)、图 11(e)可以看出，岩样颗粒随着温度的升高，颗粒表面变得粗糙，粉状颗粒较多，部分区域可以看见细小的裂纹。这是由于大理岩内部矿物颗粒存在着结构热应力，约束颗粒

间不协调膨胀，保持试样的整体性。当结构热应力超过材料极限强度，大理岩试样内部产生微裂隙，岩石整体性变差，强度变小，此时大理岩表现出一定的延性破坏。温度继续升高，岩石内部应力增大，颗粒间产生更多的微裂隙，原生裂隙扩展、加宽和贯通，最终导致大理岩的力学性质劣化，表现出的延性破坏更加明显。

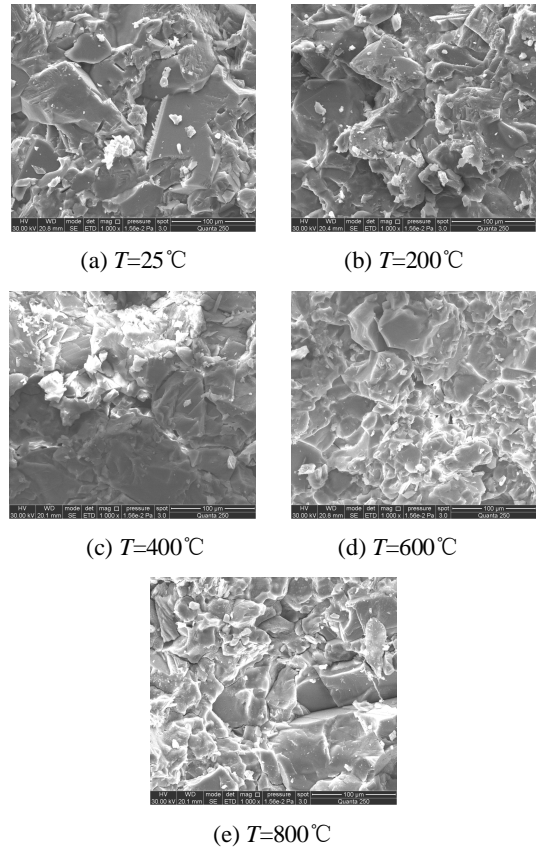


图 11 高温大理岩扫描电镜图像

Fig.11 SEM-photos of marble after different temperatures

3 结论

本文主要研究了高温后大理岩的力学特性和破坏规律，主要结论如下：

(1) 温度对大理岩物理性质和几何尺寸有着很大的影响，大理岩试样长度与直径随着温度的升高而增大，而质量和密度则随着温度的升高逐渐减小。在常温到 200℃之间，大理岩物理性质和几何尺寸变化不明显，而在 400℃~800℃的变化比较显著，温度越高，变化越显著。

(2) 高温后大理岩力学特性与温度有着紧密的联系。在常温至 200℃后，峰值强度和变形模量随着温度的升高而增加，在高温 400℃~800℃后，则随着温度的升高而减小。常温至 800℃后大理岩峰

值应变随着温度的升高而增大, 弹性模量随着温度的升高而减小。

(3) 常温至 200℃后大理岩出现振铃计数峰值的时间随温度升高而减小; 而 200℃~800℃后大理岩出现振铃计数峰值的时间随温度升高而增大。温度越高, 峰后的声发射信息越多。

(4) 温度不仅影响大理岩的强度, 还会改变大理岩的破坏形态, 不同高温后大理岩破坏形式以轴向劈裂为主, 温度升高, 延性破坏变得显著, 岩石表面的裂纹数将会增多并且分布的越来越不规则。高温后大理岩颗粒表面变得粗糙, 岩样内部产生细小的裂纹, 岩样力学性质弱化。

参考文献:

- [1] 邵保平, 赵阳升. 600℃内高温状态花岗岩遇水冷却后力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 892—898.
Shao Baoping, Zhao Yangsheng. Experimental research on mechanical properties of water-cooled granite under high temperatures within 600℃ [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 892—898. (in Chinese)
- [2] 许锡昌, 刘泉声. 高温下花岗岩基本力学性质初步研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 332—335.
Xu Xichang, Liu Quansheng. A preliminary study on basic mechanical properties for granite at high temperature [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 332—335. (in Chinese)
- [3] 夏小和, 王颖轶, 黄醒春, 等. 高温作用对大理岩强度及变形特性影响的试验研究[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(6): 996—1002.
Xia Xiaohe, Wang Yingyi, Huang Xingchun, et al. Experimental study on high temperature effects on the strength and deformation quality of marble [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(6): 996—1002. (in Chinese)
- [4] 杜守继, 刘华, 职洪涛, 等. 高温后花岗岩力学性能的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2359—2364.
Du Shouji, Liu Hua, Zhi Hongtao, et al. Testing study on mechanical properties of post-high-temperature granite [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14): 2359—2364. (in Chinese)
- [5] Lau J S O, Gorski B, Jackson R. The effects of temperature and water-saturation on mechanical properties of Lacdu Bonnet pink granite [M]. 8th International Congress on Rock Mech., Tokyo, 1995: 1167—1172.
- [6] Dawn T Nicholson, Frank H Nicholson. Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze-thaw weathering [J]. Earth Surface Process and Landforms, 2000, 25(12): 1295—1307.
- [7] 赵洪宝, 尹光志, 谌伦建. 温度对砂岩损伤试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 2784—2788.
Zhao Hongbao, Yin Guangzhi, Chen Lunjian. Experimental study on effect of temperature on sandstone damage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 2784—2788. (in Chinese)
- [8] 朱合华, 闰治国, 邓涛, 等. 3种岩石高温后力学性质的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 1945—1950.
Zhu Hehua, Yan Zhiguo, Deng Tao, et al. Testing study on mechanical properties of tuff, granite and breccia after high temperatures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 1945—1950. (in Chinese)
- [9] 徐小丽, 高峰, 高亚楠, 等. 温度后花岗岩力学性质变化及结构效应研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(3): 402—406.
Xu Xiaoli, Gao Feng, Gao Ya'nan, et al. Effect of high temperatures on the mechanical characteristics and crystal structure of granite [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 37(3): 402—406. (in Chinese)
- [10] 杨圣奇, 蒋昱州, 温森. 两条断续预制裂纹粗晶大理岩强度参数的研究[J]. 工程力学, 2008, 25(12): 127—134.
Yang Shengqi, Jiang Yuzhou, Wen Sen. Study on the strength parameters of coarse marble with two pre-existing cracks [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(12): 127—134. (in Chinese)
- [11] 杨圣奇, 苏承东, 徐卫亚. 岩石材料尺寸效应的试验和理论研究[J]. 工程力学, 2005, 22(4): 112—118.
Yang Shengqi, Su Chengdong, Xu Weiya. Experimental and theoretical study of size effect of rock material [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(4): 112—118. (in Chinese)
- [12] 朱珍德, 方荣, 朱明礼, 等. 高温周期变化与高围压作用下大理岩力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2279—2255.
Zhu Zhende, Fang Rong, Zhu Mingli, et al. Study of mechanical performance of marble under high pressure and cyclic temperature [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(11): 2279—2255. (in Chinese)