

不同冷却方式对高温花岗岩巴西劈裂特性的影响

梁 铭^{1,2}, 张绍和^{1,2}, 舒 彪^{1,2}

(1. 中南大学 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 深部高温岩石在人为及自然因素下往往受到不同冷却方式的作用, 其力学性质的劣化对各类地下工程均具有重要影响。在考虑自然冷却和遇水冷却两种冷却方式的基础上, 对不同热处理花岗岩冷却前后物理特性参数及纵波波速的变化、冷却后的巴西劈裂特性进行了研究。结果表明: 当热处理温度为 25 ~ 200℃ 时, 冷却方式的不同对花岗岩试样的物性、纵波波速、巴西劈裂变形及强度特性影响较小。随着热处理温度进一步提高, 各项测试参数的衰减幅度均越来越大, 且遇水冷却的方式使上述参数的衰减速度进一步加剧; 纵波波速可较好反映岩石内部的损伤情况, 基于波速衰减可确定花岗岩的损伤因子, 可直接用于对不同热处理方式后的花岗岩的劈裂强度进行估算。

关键词: 自然冷却; 遇水冷却; 高温花岗岩; 巴西劈裂; 纵波波速; 孔隙率

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)02-0186-08

Effect of different cooling ways on Brazilian tension characteristics of heat – treated granite

LIANG Ming^{1,2}, ZHANG Shaohe^{1,2}, SHU Biao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Non – ferrous Metals and Geological Environment Monitor, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China; 2. School of Geosciences and Info – physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Deep high – temperature rock is often subjected to different cooling ways under both artificial and natural factors, and the deterioration of its mechanical properties has an important impact on all kinds of underground engineering. Based on the two cooling ways, natural cooling and water cooling, the changes of physical parameters and longitudinal wave velocity before and after cooling as well as the characteristics of Brazilian tension after cooling of different heat – treated granites, were studied. The results show that: when the heat treatment temperature is between 25 – 200 °C, the effect of cooling ways on the physical properties, longitudinal wave velocity and the deformation and strength characteristics of Brazilian tension is not obvious. With the further increase of the heat treatment temperature, the decay rate of each test parameter is also increasing, and the decay rate of the above parameters of the samples is further aggravated in the way of water cooling. The longitudinal wave velocity can better reflect the internal damage of the samples. Based on the decrease of the wave velocity, the damage factor of the sample can be determined, which can be directly used to estimate the tension strength of the sample after different heat treatment methods.

Key words: natural cooling; water cooling; high temperature granite; Brazilian tension; longitudinal wave velocity; porosity

收稿日期: 2017-11-13; 修回日期: 2017-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41702387); 中国博士后科学基金一等项目(2017M610507); 中南大学中央高校基本科研业务费专项基金项目(2017zzts786); 国土资源部深部地质钻探技术重点实验室开放基金项目(K201701)

作者简介: 梁 铭(1992-), 男, 广西河池人, 硕士研究生, 研究方向为地质勘察及非常规能源开采。

通讯作者: 舒 彪(1986-), 男, 湖南双峰人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为岩土力学与工程。

1 研究背景

随着地热储层、深部煤炭及核废料储存等深部岩石力学工程的进一步发展,高温条件对岩石力学性质的影响越来越受到学者们的关注。在常见地下工程中,深部干热岩的开采温度为 $150\sim 650^{\circ}\text{C}$,核废料储层区域温度则达到了 600°C ,煤炭气化时其最高温度则可达 700°C ^[1-3],高温环境使岩石各方面的性质产生不同程度的劣化,研究高温作用对岩石物理及力学性质的影响,可为预测及评估地下工程的安全性提供科学依据。

在高温条件下,岩石将发生热破裂现象并造成岩石的孔隙率、变形模量、力学强度等性质等发生变化^[4]。目前国内外学者对岩石在实时高温或热冷循环(即热处理)下的物理及力学特性已开展了广泛研究,但多数仅针对于岩石的抗压特性,而对其抗拉特性的研究则相对缺乏。实际上,一般岩石的抗拉强度仅为抗压强度的 $1/10\sim 1/20$ ^[5],尽管工程上岩石多处于受压的状态,但地下洞室围岩的冒顶和片帮等现象说明^[6],在仅受压应力作用的情况下,其内部也将产生较明显的拉应力集中现象并在局部发生受拉破坏^[7]。而岩石在受热后,其内部所产生的热应力将加速拉应力的积累^[8],从而造成岩石的强度与变形特征的劣化程度上升。Yin等^[9]对热处理后Laurentian花岗岩的动、静态抗拉强度进行了研究,指出试样的静态抗拉强度随热处理温度的上升而下降,而其动态抗拉强度则表现为先上升后下降的趋势。Liu Shi等^[10]发现当热处理温度为 $200\sim 400^{\circ}\text{C}$ 时,秦岭花岗岩的抗拉强度下降较为缓慢,而当热处理温度为 $400\sim 800^{\circ}\text{C}$ 时其抗拉强度则发生急剧下降。支乐鹏等^[11]通过试验研究建立了热处理后花岗岩抗拉强度与其超声特性间的联系。方新宇等^[8]则建立了热处理后花岗岩巴西劈裂的热-力损伤模型。

深部工程岩体往往经历了升温及冷却的过程。尽管学者们从不同的角度开展了热处理后岩石的抗拉强度研究,但以上研究的热处理方式多为缓慢升温后自然冷却,而在干热岩开发、核废料埋藏及深部矿采等地下工程方面,均涉及到岩石遇水急剧冷却的情况。尽管在此方面已有部分研究成果^[2, 12-13],但针对高温岩石遇水冷却后的抗拉特性研究却仍较为鲜见。

因此,为探明不同冷却方式对岩石物理及抗拉性质的影响,本文以花岗岩作为研究对象,对不同温

度加热后的花岗岩在遇水冷却和自然冷却后的物理参数、声波特征及巴西劈裂特性进行了测定,并通过以上参数的变化情况分析温度及冷却方式对试样物理性质的劣化作用,同时借助声波测量结果对不同条件下花岗岩的抗拉力学特性进行了量化。预计研究成果可为地下高温岩土工程提供参考及依据。

2 试验概况

2.1 试样样品

试验所用花岗岩采自福建晋江某采石场。常温下样品整体呈灰白色,主要成分为50%斜长石、30%石英、6%黑云母、1%白云母及1%其他微量矿物。密度约为 $2.60\sim 2.63\text{ g/cm}^3$,孔隙率为 $1.41\sim 2.18\%$ 。平均波速约为 4146 m/s 。巴西劈裂是获得试样抗拉强度的常用方法。因此为进行巴西劈裂试验,将样品按照国际岩石力学规范要求加工为直径 50 mm 、高度 25 mm 的圆柱体,并测得试样在常温下的平均巴西劈裂强度约为 5.2 MPa 。

2.2 试验方法

试验所设置温度为 $100、200、300、400、500$ 和 600°C 。每个温度点选取波速相近的6个试样进行测试。为减小升温过程中热冲击的影响,设置升温速率为 5°C/min ,达到设定温度点后保温 2 h 以保证试样均匀受热^[14]。之后,通过两种方式对试样进行冷却:(1)将一半试样取出炉腔后于室温环境(25°C)下自然冷却(模拟深部开挖工程中自然对流对岩体表面温度的影响^[15]);(2)将另一半试样取出炉腔后置入盛满常温蒸馏水的器皿中快速冷却(模拟干热岩压裂等人为工程的急剧扰动^[2])。器皿中的蒸馏水需保证试样完全浸没且水温不会发生明显上升。在将样品取出后,利用高温陶瓷黏结剂将热电偶黏结于试样表面以获得两种冷却方式下试样表面的温度变化曲线,所得典型温度变化曲线见图1。在对浸没于水中的样品进行温度测试时,由于水温的干扰所测得的曲线往往波动较大,但与自然冷却的温度曲线相比,遇水冷却的温度曲线仍近似表现为线性变化。

需指出,试样的冷却速度与其体积大小及环境温度有关。而在实际地下高温工程如干热岩勘察钻井过程中,外部泵入流体的流速及体积更大,受影响的岩体范围也更广,高温岩体除与外部流体接触发生急剧热对流外,远离井孔的岩体也将通过热传导的形式对井壁岩体进行加热。在此过程中井壁与流体间将维持更长时间的较大的温差,其所受的热力

作用也更为显著。因此,在室内将加热温度提高可部分考虑此过程中时间因素及外部热源的影响。待样品完全冷却后,将样品放入干燥箱(105℃)中进行24 h干燥以避免冷却时所带入的水分的影响。由岩石的热凯塞效应可知^[16],干燥时温度的影响可忽略不计。对以上试样,在其热处理前后均进行了重量、尺寸、纵波波速等物性测量。随后进行的巴西劈裂试验所设置的加载速率为0.2 mm/min。

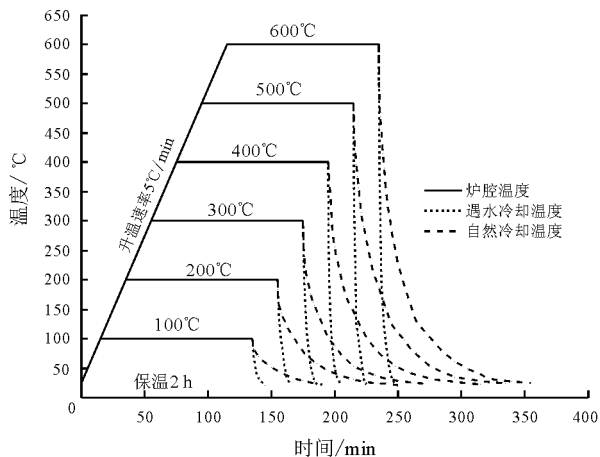


图1 岩石试样两种冷却方式的温度变化曲线

3 试验结果与分析

3.1 物理性质变化

3.1.1 表面形貌 岩石内部矿物的变化包括氧化、分解及相变等都将反映于其宏观形貌,且在高温热处理后此变化不可逆转。图2为不同条件处理后典型样品的表面形貌示意图。图中黑色区域主要为黑云母,白色部分为斜长石或石英,红色部分则主要为钾长石或云母中的 Fe^{2+} 在高温下经氧化所形成的 Fe^{3+} 。尽管不同样品间组成成分具有一定的差异,但从图2中可看出,随着热处理温度的提高,两种冷却方式下样品的表面颜色均有缓慢由灰色转变为白色的趋势。但在遇水冷却模式下,岩石表面黑云母周围区域的颜色相较于自然冷却模式下有一定的加深,且样品表面也更为粗砺,在肉眼下可观察到更为明显的微小凹坑及微裂隙。这表明样品在遇水冷却过程中,矿物所发生的劣化反应更为剧烈,具体表现为冷却时样品自表面放出大量热量并伴有大量蒸汽产生,样品内部所产生的温度梯度更显著,因此使得矿物的膨胀量更大,造成试样内部及表面的损伤更为明显。

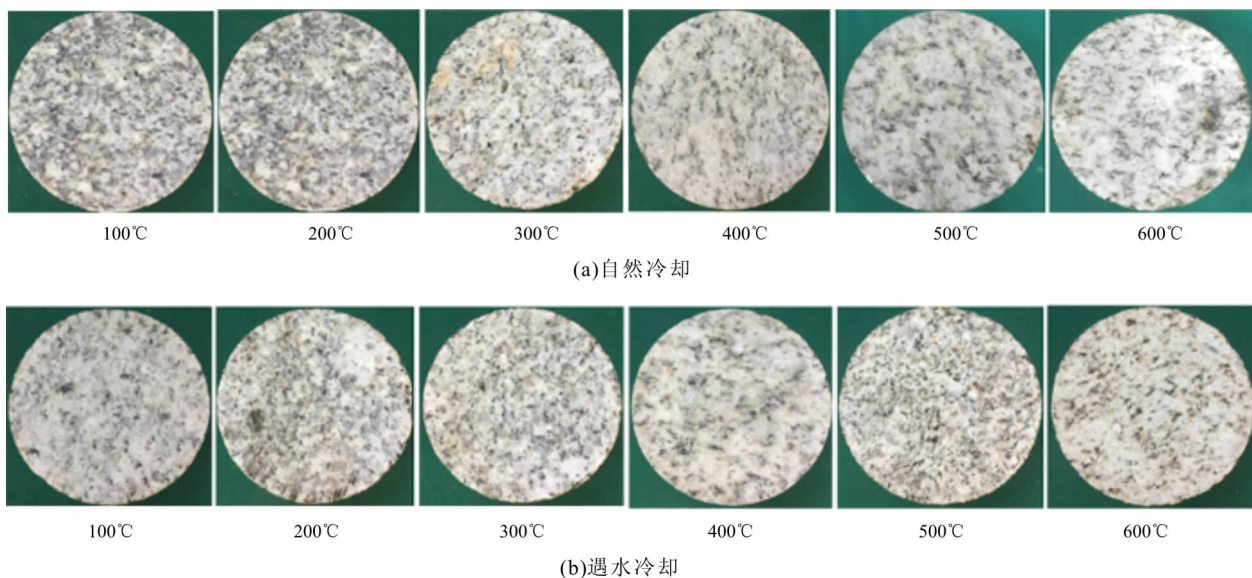


图2 高温试样自然冷却及遇水冷却后表面形貌

3.1.2 密度与孔隙率 样品密度反映了样品在不同热处理方式下内部的劣化情况,孔隙率则与试样的热传导、渗透性及力学强度等均具有一定的相关性。样品密度通过对热处理前后样品的尺寸重量及测量后计算得到。表1为试样在不同温度 T 热处理前后的物理性质包括密度 ρ 、孔隙率 ϕ 、纵波波速 V 。表1中字母下标 b 和 a 分别表示热处理前和热处理

后。为方便说明,以下讨论内容中各项数据均取各组样品的平均值。样品内部总孔隙率 ϕ 通过下式进行计算:

$$\phi = (1 - \rho_o/\rho) \times 100\% \quad (1)$$

式中: ρ_o 为样品的表观密度, g/cm^3 ; ρ 为样品的真密度, g/cm^3 ,由测试得试样的真密度为 $2.6559 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。在此仅考虑样品内部的总孔隙率。

表 1 不同温度试样热处理前后的物理性质

处理方法	$T/^{\circ}\text{C}$	$\rho_b /(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\rho_a /(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\phi_b / \%$	$\phi_a / \%$	$V_b /(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_a /(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
自然冷却	100	2.6188	2.6190	1.40	1.39	4147	3720
	200	2.6145	2.6120	1.56	1.65	4420	3404
	300	2.6083	2.6014	1.79	2.05	4322	2920
	400	2.6302	2.6157	0.97	1.52	4070	2635
	500	2.6178	2.5896	1.44	2.50	4456	2017
	600	2.6165	2.5540	1.49	3.84	4112	1386
遇水冷却	100	2.6114	2.6066	1.68	1.86	3904	3393
	200	2.6139	2.6092	1.58	1.76	3992	3132
	300	2.6177	2.6037	1.44	1.97	4253	2587
	400	2.6154	2.5880	1.53	2.56	3962	2285
	500	2.6197	2.5725	1.36	3.14	4127	1478
	600	2.6126	2.5336	1.63	4.61	4388	964

图 3 为不同热处理温度及方式下试样的相对密度及孔隙率(相较初始值所增长的百分数) 的变化情况。比较表 1 与图 3, 可知两种冷却方式下样品密度均有下降的趋势, 但在常温至 200℃ 范围内样品密度无明显变化且在 100℃ 自然冷却时稍有增加。随着热处理温度的进一步提高, 样品密度的下降速度加快, 而遇水冷却下的样品密度下降更为明显。相应地, 样品的孔隙率则随着热处理温度的提高而不断上升, 而其提高速率的临界点也同为 200℃。在 100 ~ 600℃ 范围内, 随温度的上升密度的相对变化较小(0 ~ 3. 0%), 而孔隙率则发生了明显的变化(0 ~ 182. 8%)。

当温度低于 500℃ 时, 失水作用是其内部损伤的主要原因。随着温度的上升, 其内部附着水(70 ~ 100℃)、沸石水(80 ~ 110℃)、结合水(150 ~ 300℃) 及结晶水和结构水(400 ~ 500℃) 相继逃逸或分解(晶格水以 OH^- 或 H^+ 的形式脱离使得矿物微观结构破坏)^[17], 促使试样内部微观结构发生改变, 同时也削弱了矿物颗粒间的结合力。当温度较低时, 失水作用不明显, 矿物的膨胀使已有裂隙或孔隙闭合, 造成试样的密度和孔隙率变化不大甚至孔隙率轻微降低。当温度逐渐上升时, 失水和矿物膨胀双重作用使得内部缺陷不断增多, 并在其表面脱落一定的碎屑, 造成密度和孔隙率的变化不断加剧; 而当温度大于 500℃ 时, 某些矿物颗粒如石英等将发生相变造成体积的膨胀。对于花岗岩而言, 其石英含量往往较大, 因此石英的相变将对岩石内部造成明显损伤, 表现为试样密度和孔隙率的急剧变化。

在试样遇水冷却过程中, 尽管流体可进入样品再次吸附形成沸石水, 但样品表面内外的温度梯度更大, 内部产生的热应力更强, 流体在样品孔隙中的快速蒸发对样品形成了更大的冲击, 因而造成样品内部结构变化也更大。

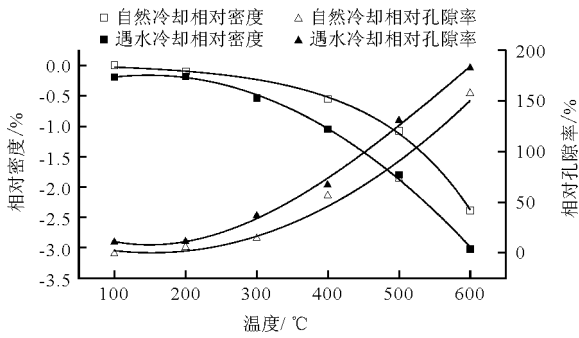


图 3 不同温度试样热处理前后相对密度及孔隙率

3.2 超声特性

试样热处理前后平均纵波波速测试结果如表 1 所示。图 4 为两种不同热处理方式前后试样的平均纵波波速的变化。由图 4 可知, 波速的变化趋势与试样密度及孔隙率相同, 在 200℃ 内, 波速的衰减较为缓慢, 而在 200 ~ 600℃ 时试样波速急剧衰减, 自 100℃ 始每隔 100℃ 自然冷却后试样平均波速分别衰减至初始平均波速的 89. 7%、78. 0%、60. 6%、45. 3% 和 33. 7%, 而遇水冷却后试样分别衰减至 87. 0%、71. 9%、52. 2%、37. 9% 和 21. 9%。如 3. 1. 1 节中对样品失水、矿物膨胀及相变的分析, 遇水冷却使得样品内部缺陷数目增多且尺寸变大, 声波信号在试样内传播时其部分高频波将被吸收(裂

隙长度大于高频波长或裂隙延伸方向与波的传播方向之间角度过大使得声波无法穿过^[17]),因而造成试样的声波衰减更为显著。纵波波速对岩石内部结构的微小变化具有较好的敏感性并可直观反映试样内部的微观损伤情况,因此试样经热处理后其内部损伤因子 D 可由前后波速进行表示:

$$D = 1 - (V_a/V_b)^2 \quad (2)$$

所得结果见表 2。

图 4 中波速衰减趋势与大部分文献所得结果相同,但也有文献指出在 200℃ 时试样的纵波波速会略微增长^[18],其原因可能在于热处理的方式不同及试样本身的组成成分差异。

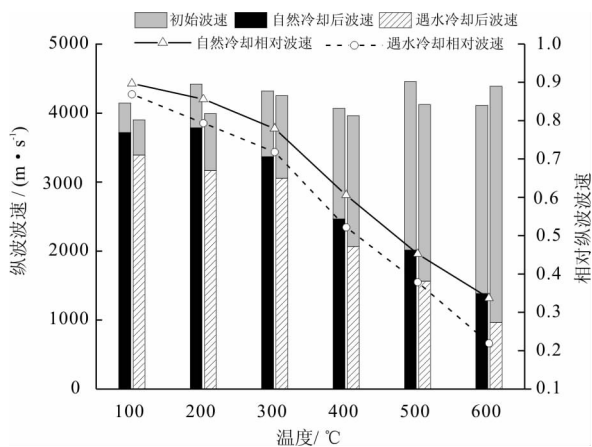


图 4 不同温度试样热处理前后纵波波速

表 2 试样损伤因子 D

$T/^\circ\text{C}$	自然冷却	遇水冷却
100	0.195	0.245
200	0.266	0.370
300	0.392	0.484
400	0.633	0.728
500	0.795	0.856
600	0.886	0.952

3.3 巴西劈裂特性

3.3.1 破坏形态 图 5 为经历不同热处理的样品在巴西劈裂试验后的代表性形态。图 5 中每个温度点下从左至右依次为经自然冷却及遇水冷却处理的试样。由图 5 中可知,不同条件下试样的巴西劈裂破坏形态无明显变化,所产生宏观裂隙均近似为连接试样两端加载点的平面。部分试样的断裂面于中心处表现出一定的曲折,其原因在于受热处理后,内部损伤使其内部强度各向异性增强,在劈裂过程中有沿颗粒黏结力较弱的面滑移的倾向,此时试样除

主要发生张拉破坏外还发生了一定的剪切破坏^[19]。随着温度的上升,劈裂造成断面周围所脱落的碎粒数量增多,断裂面也由致密平整逐渐转变为粗糙破碎。其原因在于样品经热处理后内部的失水及热应力作用使得矿物颗粒间的黏结力下降,从而使主拉应力区的破碎程度加剧^[8]。

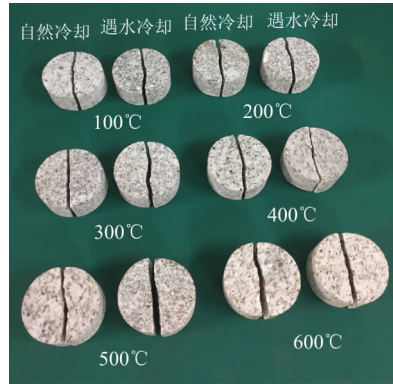


图 5 试样巴西劈裂破坏特征

3.3.2 荷载-位移曲线及巴西劈裂强度 图 6 为具有代表性的不同热处理后试样的巴西劈裂荷载-位移曲线。从图 6 可知,不同的处理温度及冷却方式下,样品的曲线趋势基本相近,均在荷载加载初始阶段呈现出上凹的趋势(压密阶段),随后进入弹性阶段并表现为直线状态并最终发生峰值破坏,而未表现出明显的软化阶段。

当加热温度较低时(25 ~ 200℃),失水作用(附着水、沸石水及弱结合水)及热破裂现象形成的少量裂隙与孔隙使荷载-位移曲线压密阶段有所延长。但由于部分裂隙在矿物膨胀的作用下闭合使得峰值荷载未出现较大的下降。随着温度的进一步提高(200 ~ 400℃),损伤的累积使得加载曲线斜率进一步放缓且峰值荷载出现明显下降。当温度为 400 ~ 600℃ 时,结晶水的逃逸使得矿物的晶格结构发生破坏而造成内部缺陷增大且易产生联通;此外,当温度达到 573℃ 后,内部石英将发生相变使得矿物间的结合被进一步削弱,使得荷载-位移曲线的压密阶段明显延长、弹性阶段缩短及峰值荷载减小。

图 7 为不同条件下试样的巴西劈裂最大径向位移。由图 7 可知温度及冷却方式使得试样的最终破坏变形与荷载-位移曲线的趋势类似并表现出一定的阶段性。随着温度的增加,试样可压密空间的增加及脆性的减小使得其在外力作用下破坏变形量不断增大,当温度为 200 ~ 400℃ 时此趋势最为明显。而随着温度继续提高(400 ~ 600℃),较低的矿物黏结力使试样在较低的荷载下即可发生破坏,因此试

样的最大径向位移变化程度有所降低。对比自然冷却及遇水冷却两种情况,在相同加热温度下,可知遇水冷却对试样的变形特征影响更为显著,在较小的

荷载作用下即可发生明显的变形。因此高温岩体遇水后有产生流变变形的趋势,围岩稳定性下降并最终导致事故发生。

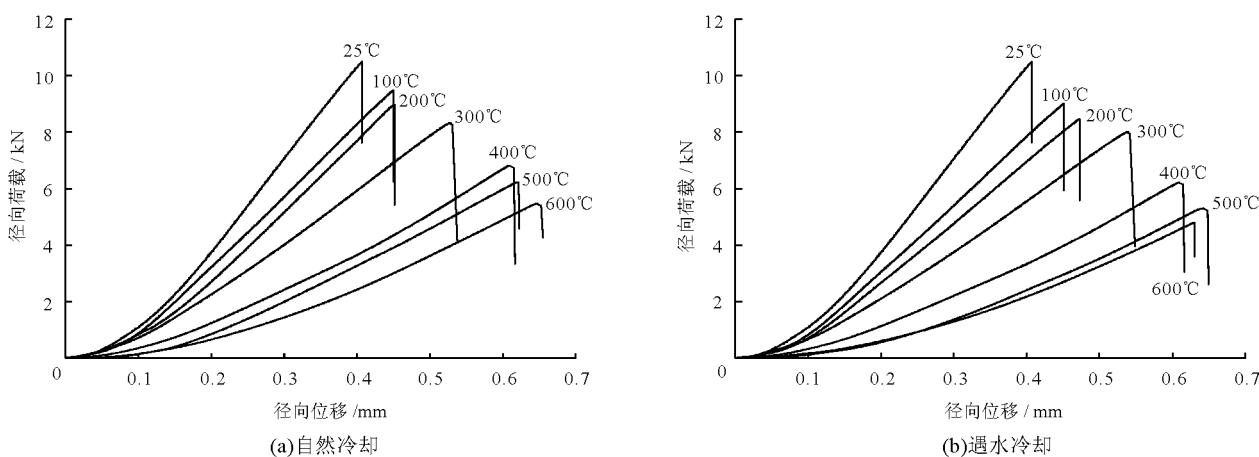


图6 两种冷却方式下试样巴西劈裂荷载-位移曲线

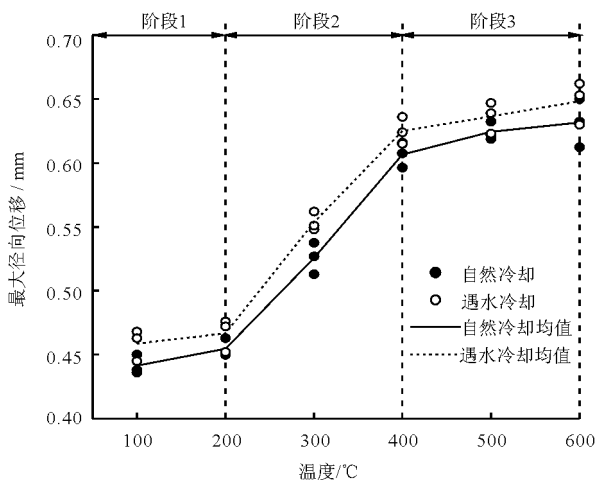


图7 两种冷却方式下试样巴西劈裂最大径向位移

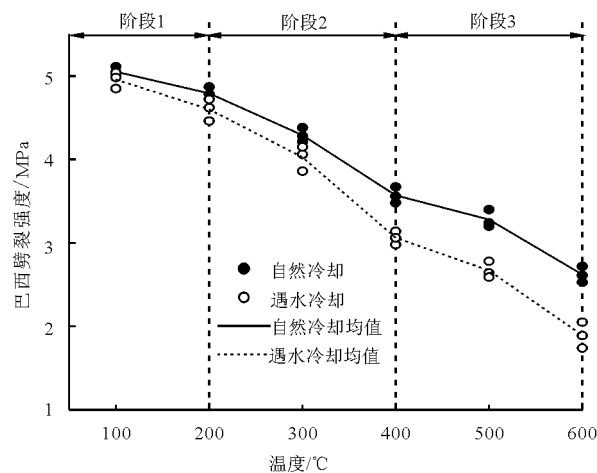


图8 不同高温和两种冷却处理后试样的巴西劈裂强度

图8为不同条件下试样的劈裂抗拉强度。由图8可知,试样的抗拉强度与其内部的损伤情况也具有明显的相关性。与最大径向位移变化规律不同的是,试样抗拉强度下降趋势有不断增大的趋势。相较于常温情况,自100至600℃自然冷却和遇水冷却下试样的平均抗拉强度分别下降了2.9%、8.1%、19.0%、38.0%、53.8%、78.7%和11.1%、12.1%、25.6%、53.2%、82.7%、123.8%。对比已有文献中高温花岗岩自然冷却及遇水冷却后抗压强度的变化趋势^[2, 12-13],可知花岗岩的抗拉强度对温度具有更明显的敏感性,且遇水冷却使其劣化作用进一步加剧。抗拉强度的降低一方面将使围压的稳定性降低,但另一方面又可降低地下钻探的破裂压力,目前热刺激法已在部分地下工程中应用并取得了良好效果^[4],相关基础研究可有助对其机理的了解。

比较抗拉力学性质与物理性质(密度、孔隙率和波速)的变化规律,可知不同温度及冷却方式所造成的结果的差异,其实质上为造成试样内部损伤的程度不同。支乐鹏等^[11]指出对于同一材料,其抗拉强度 σ_t 与纵波波速 V_p 之间主要存在以下关系:

$$\sigma_t = aV_p^b \quad (3)$$

式中: a 和 b 分别为常数且 b 通常为2。

然而在加热冷却过程中,试样自身的抗拉强度和纵波波速均有不同程度的降低,使得公式(3)中 a 和 b 的值也随之改变。因此在此以3.3节中的损伤因子 D 作为衡量试样宏观强度变化的指标,参照公式(2),认为不同热处理后试样抗拉强度与纵波波速之间符合二次多项式关系,将表2中各试样在不同条件下的损伤因子 D 与图8中试样的平均劈裂强度一一对应并绘制如图9所示,对试样抗拉强度 σ_t

与内部损伤因子 D 进行拟合后可得:

$$\sigma_t = -2.01D^2 - 1.34D + 5.25 \quad (4)$$

拟合曲线的相关系数 R^2 为 0.98, 可知两者具有良好的相关性。在给定的此关系下, 对不同温度及冷却方式样品的波速在冷却前后进行测试后, 即可得到不同热处理后样品的宏观力学强度参数。

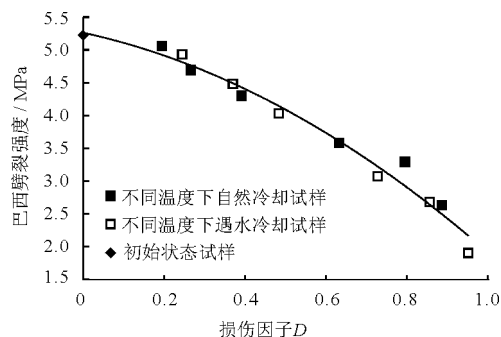


图9 试样损伤因子(D)与其巴西劈裂强度的关系

4 结论及讨论

本文通过对不同热处理温度及自然冷却和遇水冷却后的试样进行了研究, 得出以下结论:

(1) 当加热温度为 25 ~ 200℃ 时, 两种冷却方式对花岗岩试样的物性、纵波波速、巴西劈裂变形量及劈裂抗拉强度影响差别不大。当温度为 200 ~ 600℃ 时, 以上各项参数的衰减速度随温度提高而增大, 且水中冷却的方式将使衰减速度进一步加剧。

(2) 冷却方式的差异其实质为造成试样内部损伤程度的不同。纵波波速可较好地反映样品内部的损伤情况, 以波速的变化作为衡量损伤的指标可建立不同温度冷却处理下试样的劈裂抗拉强度与内部损伤的关系。

本文主要考虑了不同温度及冷却方式对花岗岩性质的影响, 而研究表明岩石所受应力水平也将对其受热损伤程度产生作用^[20]。实际上地下遇冷高温岩体往往处于卸荷的状态, 且遇冷后长期温度的变化将使得原位地应力方向和大小发生改变^[21]。目前大多数研究尚难以在高温试验中考虑应力的影响, 对此方面的研究还需对已有设备进行优化改造。

此外, 在此仅考虑了总孔隙率的变化, 而实际上, 孔隙率对深部高温岩石的影响一方面体现在对渗透率的影响上, 即联通孔隙率的作用, 如 Chaki 等^[22]发现, 当花岗岩加热至 300℃ 后, 其孔隙率增加了仅 0.13%, 而渗透性则将近增加了两倍; 另一方面, 总的孔隙率即孔隙的大小形状又将影响其传热能力。因此后续还需对孔隙率的分类变化及孔径

进行考虑。本试验采用蒸馏水对试样进行水冷处理, 未考虑水岩反应的作用。但实际地下深部的水往往含有不同的微量元素, 外部人为注入的流体(压裂液等)也含有其他的化学成分, 且矿物脱水后还能与外部流体重新结合形成新的水化物等^[23]。由于缺乏必要手段对其进行识别, 因此予以忽略。后续研究将进一步考虑化学因素的影响。

参考文献:

- [1] SIRDESAI N N, SINGH T N, RANJITH P G, et al. Effect of varied durations of thermal treatment on the tensile strength of red sandstone [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(1): 205 - 213.
- [2] KUMARI W G P, RANJITH P G, PERERA S, et al. Temperature - dependent mechanical behaviour of Australian Strathbogie granite with different cooling treatments [J]. *Engineering Geology*, 2017, 229: 31 - 44.
- [3] OLASOLO P, JUÁREZ M C, MORALES M P, et al. Enhanced geothermal systems (EGS): A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 56: 133 - 144.
- [4] SIRATOVICH P A, VILLENEUVE M C, COLE J W, et al. Saturated heating and quenching of three crustal rocks and implications for thermal stimulation of permeability in geothermal reservoirs [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 80: 265 - 280.
- [5] WU Shunchuan, XU Xueliang. A study of three intrinsic problems of the classic discrete element method using flat - joint model [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(5): 1813 - 1830.
- [6] 张国凯, 李海波, 夏祥, 等. 岩石微观结构及参数对宏观力学特性及破坏演化的影响 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(7): 1341 - 1352.
- [7] BLAIR S C, COOK N G W. Analysis of compressive fracture in rock using statistical techniques: Part I. A non - linear rule - based model [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1998, 35(7): 837 - 848.
- [8] 方新宇, 许金余, 刘石, 等. 高温后花岗岩的劈裂试验及热损伤特性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(S1): 2687 - 2694.
- [9] YIN Tubing, LI Xibing, CAO Wenzhuo, et al. Effects of thermal treatment on tensile strength of laurentian granite using Brazilian test [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(6): 2213 - 2223.
- [10] LIU Shi, XU Jinyu. Mechanical properties of Qinling biotite granite after high temperature treatment [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*,

- 2014, 71: 188 – 193.
- [11] 支乐鹏, 许金余, 刘志群, 等. 高温后花岗岩巴西劈裂抗拉实验及超声特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(S1): 61 – 66.
- [12] 黄真萍, 张 义, 吴伟达. 遇水冷却的高温大理岩力学与波动特性分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 367 – 375.
- [13] 王 朋, 陈有亮, 周雪莲, 等. 水中快速冷却对花岗岩高温残余力学性能的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(3): 54 – 57 + 63.
- [14] YANG Shengqi, RANJITH P G, JING Hongwen, et al. An experimental investigation on thermal damage and failure mechanical behavior of granite after exposure to different high temperature treatments[J]. Geothermics, 2017, 65: 180 – 197.
- [15] HOSSEINI M. Effect of temperature as well as heating and cooling cycles on rock properties[J]. Journal of Mining and Environment, 2017, 8(4): 631 – 644.
- [16] CHOI N S, KIM T W, RHEE K Y. Kaiser effects in acoustic emission from composites during thermal cyclic – loading[J]. Ndt & E International, 2005, 38(4): 268 – 274.
- [17] ZHANG Weiqiang, SUN Qiang, HAO Shuqing, et al. Experimental study on the variation of physical and mechanical properties of rock after high temperature treatment[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 98: 1297 – 1304.
- [18] 胡少华, 章 光, 张 森, 等. 热处理北山花岗岩变形特性试验与损伤力学分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3427 – 3436.
- [19] DUAN K, KWOK C Y. Discrete element modeling of anisotropic rock under Brazilian test conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2015, 78: 46 – 56.
- [20] WANG H F, BONNER B P, CARLSON S R, et al. Thermal stress cracking in granite[J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(10): 1745 – 1758.
- [21] PERKINS T K, GONZALEZ J A. The effect of thermoelastic stresses on injection well fracturing[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1985, 25(1): 78 – 88.
- [22] CHAKI S, TAKARLI M, AGBODJAN W P. Influence of thermal damage on physical properties of a granite rock: porosity, permeability and ultrasonic wave evolutions[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(7): 1456 – 1461.
- [23] 申林方, 冯夏庭, 潘鹏志, 等. 单裂隙花岗岩在应力 – 渗流 – 化学耦合作用下的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1379 – 1388.