

实时高温三轴压缩下砂岩强度及破裂特征研究

黄彦华^{1,2}, 杨圣奇^{1,2,*}, 田文岭^{1,2}

(1. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 徐州 221116;

2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 徐州 221116)

摘要:深部岩石处于高地应力及高温环境中,使得深部资源开采面临很大挑战,因此研究高温作用下岩石三轴力学行为具有重要意义。本文综合采用室内试验与数值模拟方法,分析了实时温度和围压对砂岩强度及破坏特征的影响,揭示了岩石热裂纹演化规律。首先,对砂岩试样进行了不同实时温度作用三轴压缩试验,获得了温度和围压对砂岩试样力学特性的影响规律。其次,采用三维颗粒程序(PFC^{3D})构建了砂岩三维数值模型,通过与常温条件下三轴试验结果对比,标定了一组能够反映砂岩力学特性的细观参数,在此基础上开展了砂岩实时高温三轴压缩数值模拟,模拟结果与室内试验结果相吻合。数值模拟结果表明,当温度不超过 150℃ 时,砂岩试样内无微裂纹产生,峰值强度变化不明显;当温度超过 150℃ 后,砂岩试样内开始萌生微裂纹,低围压条件下峰值强度随温度升高而降低,高围压致微裂纹的闭合降低了温度对砂岩强度的弱化作用。砂岩破裂形态受温度和围压共同作用,低围压下高温砂岩呈轴向劈裂破坏,高围压下呈剪切破坏。

关键词:岩石力学;实时高温;峰值强度;微裂纹;颗粒流

DOI:10.48014/bcce.20231024002

引用格式:黄彦华,杨圣奇,田文岭. 实时高温三轴压缩下砂岩强度及破裂特征研究[J]. 中国土木工程通报,2023,1(3):18-27.

0 引言

浅部资源逐渐枯竭,资源开采的深度递增^[1]。随着埋深增加,资源赋存的地应力增大、温度升高,如深度 1000m 煤炭开采围岩温度可达 35~45℃^[2],埋深 3~10km 干热岩温度甚至可达到 400℃^[3],高温高压环境成为深部资源开采的常态。因此,研究高温高压作用下岩石力学特性对深部资源开采具有重要意义。

在岩石热力耦合特性室内试验研究方面,受高温高压试验设备限制,研究者往往将岩石加热再冷却至室温后进行力学试验^[4],但是在冷却过程中岩石内部产生微裂纹,岩石孔隙结构发生变化,高温

产生的相变也可能在冷却后消失,导致高温后岩石力学特性不同于实时高温作用^[5,6]。随着试验技术的发展,实时高温高压作用下岩石力学特性研究也取得了较多成果。Chester 等^[7]对高温作用下干燥和饱和岩石进行了三轴试验,研究了温度和加载率效应。Zhang 等^[8]对大理岩和砂岩进行了实时高温三轴压缩试验,对比分析了高温高压作用下两种岩石的峰值强度、弹性模量、泊松比、黏聚力和内摩擦角等。Kumari 等^[9]进行了花岗岩实时高温三轴压缩试验,分析了花岗岩力学参数随温度的变化规律,探讨了花岗岩特征应力与温度之间的关系。蒋海昆等^[10]进行了高温花岗岩三轴压缩试验,系统分析了花岗岩变形特征以及声发射演化规律。李利

* 通讯作者 Corresponding author: 杨圣奇 yangsqi@hotmail.com

收稿日期:2023-10-24; 录用日期:2023-11-19; 发表日期:2023-12-28

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK20221547)资助

峰等^[11]开展了花岗岩实时高温三轴试验,分析了温度和围压对强度、弹性模量及破裂模式的影响,建立了花岗岩冷损伤方程。

在岩石热力耦合特性数值模拟研究方面,研究者通过不同数值分析方法开展了相关工作^[12,13],如 Yu 等^[14]通过岩石破裂过程分析(RFPA)中颗粒受热膨胀方法,模拟了高温作用下花岗岩单轴压缩,分析了温度对花岗岩破裂模式的影响。Yang 等^[15]基于近场动力学计算框架,提出了一种多层计算方法,模拟了高温花岗岩力学行为,对比分析了实时高温和高温作用后花岗岩强度、变形参数以及裂纹扩展特征。杨敏等^[16]在有限元商业软件 ABAQUS 中采用隐式-显式顺序热力耦合方法,模拟了不同温度和升温-水冷循环次数对花岗岩单轴压缩破坏特征的影响规律。孙浩等^[17]通过在颗粒流商业软件 PFC 赋值颗粒热膨胀系数方法,模拟了不同高温作用后砂岩试样巴西劈裂,探究了高温后砂岩试样拉伸强度劣化规律。田文岭等^[18]采用 PFC 模拟了不同高温作用后花岗岩三轴压缩,分析了高温后花岗岩破裂演化过程,揭示了高温损伤花岗岩细观破裂机制。由此可见,数值模拟是一种研究岩石热力耦合特性的有效方法,特别是在揭示高温损伤岩石细观机制上具有明显优势。然而,现阶段热力耦合数值模拟主要是针对实时高温或高温后岩石单轴加载条件开展的,对实时高温高压下岩石力学特性的三维数值模拟研究还较少。

鉴于此,本文采用室内试验与数值模拟相结合方法,系统开展砂岩实时高温三轴压缩特性研究,探究温度和围压对强度及破坏特征的影响,揭示岩石热裂纹演化规律。首先,采用岩石高温高压伺服试验系统对砂岩进行不同实时温度和围压三轴压缩试验。其次,采用三维颗粒流 PFC^{3D} 进行砂岩实时高温三轴压缩数值模拟。在此基础上,分析温度和围压对砂岩强度特性以及破裂特征的影响,并基于微裂纹发育特征解释高温砂岩强度演化规律。

1 试验及数值模拟方法

1.1 岩性特征与试验程序

试验岩石为取自贵州省遵义市的砂岩。X 射线衍射(XRD)结果表明,砂岩主要由石英、少量黏土

矿物和其他矿物(如长石)组成,粗晶结构,粒径相对均匀,孔隙率为 16.2%,干燥密度为 2130kg/m³,纵波波速为 2530m/s。根据试验规程^[19],将岩块加工成直径 50mm、高度 100mm 的标准岩样,岩样干燥后进行力学试验。

本次试验均在中国矿业大学 RTX-4000 岩石高温高压三轴试验系统上进行,如图 1 所示。该试验系统采用两个导热线圈对三轴压力室进行加热,温度由施加围压的硅油传递至待测岩样。压力室外壁和内部温度由温度传感器实时监测,该系统可施加最高温度 150℃,最大轴向压力 4000kN,最大围压 140MPa。实时高温三轴压缩试验步骤如下:(1)将岩样放置在三轴压力室内,安装并调试位移传感器,封闭压力室并充油。施加围压至设定值,采用应力控制方式,速率为 4.0MPa/min;(2)通过温度控制系统缓慢加温至设定值,并恒温 2h;(3)保持围压和温度不变,施加轴向偏应力至岩样破裂,采用位移控制方式,速率为 0.04mm/min。根据加热系统量程,本次试验温度设置为常温、50、90 和 150℃,围压分别为 0、10、20、40 和 60MPa。

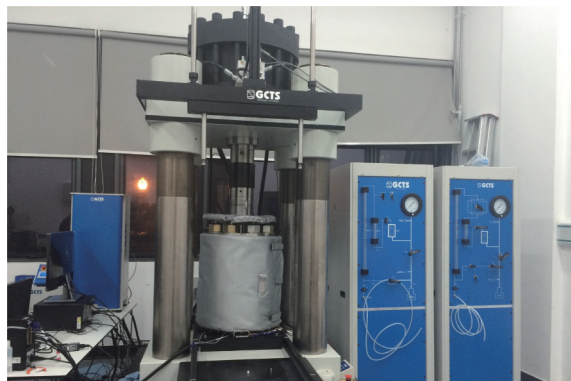


图 1 RTX-4000 岩石高温高压试验系统^[20]

Fig. 1 RTX-4000 rock high temperature high pressure testing system^[20]

1.2 数值模型与细观参数

采用 PFC^{3D} 对室内试验结果进行验证,并探究高于 150℃ 温度砂岩热力耦合特性。选用平行黏结模型构建砂岩数值试样,几何尺寸与室内试验相同,即为 50mm 直径、100mm 高度,如图 2 所示。研究表明当颗粒与试样尺寸的比值在一定范围内时,颗粒尺寸对试样力学性质的影响很小^[21,22]。为提

高计算效率,数值试样中球形颗粒最小半径设定为 1.0mm,最大半径为 1.6mm,约为试验砂岩真实尺寸的 10 倍,数值试样中含 26743 个球形颗粒。通过与室温条件下砂岩不同围压(0~60MPa)常规三轴试验结果对比验证,标定了一组能够反映砂岩力学特性的细观力学参数^[23],如表 1 所示。

在 PFC^{3D} 中温度模块可以模拟材料的瞬态热传导和存储以及热引起的力和位移变化,由热存储器以及热传导管道组成,通过与热存储器相连的热传导管道(被激活状态)进行热传递。每一个颗粒代表一个热存储器,接触代表热传导管道。在默认情况下,只有当两个颗粒重叠或者之间存在接触键时,热传导管道被激活。当表征热的微观特征设定后,后续的加载或者损伤(如黏结断裂)会改变激活热管的数量,进行引起材料热传递能力。如当材料被压缩并产生新的热传导管道,则宏观热传递系数增大;当黏结断裂而相应的热传导管道不激活,则宏观热传导系数减小^[24]。

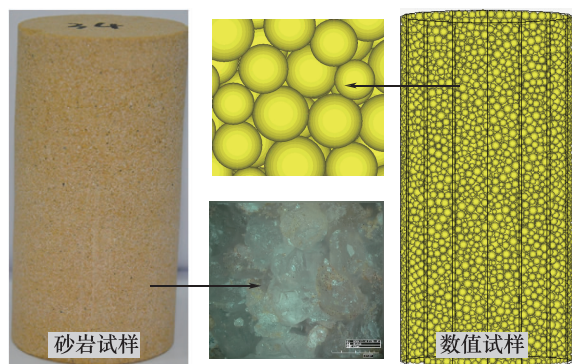


图 2 砂岩试样及 PFC^{3D} 数值模型^[23]

Fig. 2 Sandstone and PFC^{3D} numerical specimens^[23]

表 1 砂岩 PFC^{3D} 细观力学参数^[23]

Table 1 PFC^{3D} micro-parameters for sandstone^[23]

参数	取值	参数	取值
颗粒最小半径/mm	1.0	摩擦系数	1.0
颗粒粒径比	1.6	pb 模量	13
颗粒密度/(kg/m ³)	2130	pb 刚度比	0.75
颗粒模量/GPa	13	pb 法向强度/MPa	40±8
颗粒刚度比	0.75	pb 切向强度/MPa	500±100

注:pb 表示平行黏结

热应变是通过考虑颗粒以及平行黏结的热膨胀实现的。给定一个温度变化 ΔT ,改变颗粒的半

径 R ,则:

$$\Delta R = \alpha' R \Delta T \quad (1)$$

式中: α' 为颗粒的线膨胀系数。

按照砂岩矿物成分和含量,将数值试样中球颗粒分为三类:代表石英颗粒共 25419 个(占总数 95%)、代表长石颗粒共 265 个(占总数 1%)和代表黏土矿物颗粒共 1059 个(占总数 4%),并分别赋值线膨胀系数,如石英 $24.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 、钾长石 $8.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 等^[25]。需要说明的是,当温度高于 500℃ 时岩石内部将发生复杂的矿物分解和化学反应,如 α - β 石英相变,因此在温度不高于 500℃ 时,可以采用线膨胀方法模拟温度效应^[26]。本文 PFC^{3D} 模拟温度设置为常温、50、90、150、200、250 和 300℃。

2 试验及模拟结果

2.1 应力-应变响应

图 3 给出了砂岩实时高温三轴压缩 PFC^{3D} 模拟与试验应力-应变曲线的比较。需要说明的是,本文着重分析温度对砂岩峰值强度的影响,为节省计算时间,数值模拟未考虑残余强度阶段。由图 3 可见,PFC^{3D} 模拟得到的高温砂岩应力-应变曲线与室内试验曲线吻合度较高,尤其是当围压较小时。当围压较大时,模拟的应力-应变曲线峰前阶段斜率略小于试验曲线,这是因为试验砂岩具有较大孔隙,围压对岩样压密效果明显。总体上,在温度从 50℃ 增大到 150℃ 过程中,模拟的应力-应变曲线能反映出试验曲线变化趋势。

将 PFC^{3D} 模拟得到的不同温度和围压条件下砂岩峰值强度与试验值进行比较,如表 2 所示。由表 2 可见,PFC^{3D} 模拟的砂岩峰值强度与试验值之间的差异较小,除高围压 60MPa 条件外,差异程度均在 7% 以内,说明 PFC^{3D} 数值模拟再现了砂岩实时高温三轴压缩室内试验强度变化趋势。

2.2 破裂模式

图 4 给出了实时高温作用下砂岩三轴压缩试验破裂模式。以温度 50℃ 结果为例,单轴压缩下砂岩呈轴向破裂破坏,可见多条轴向拉伸裂纹,而且主裂纹为张开状态。当围压增大至 10MPa 时,砂岩破裂形态不同于单轴压缩条件,可见砂岩由轴向劈裂

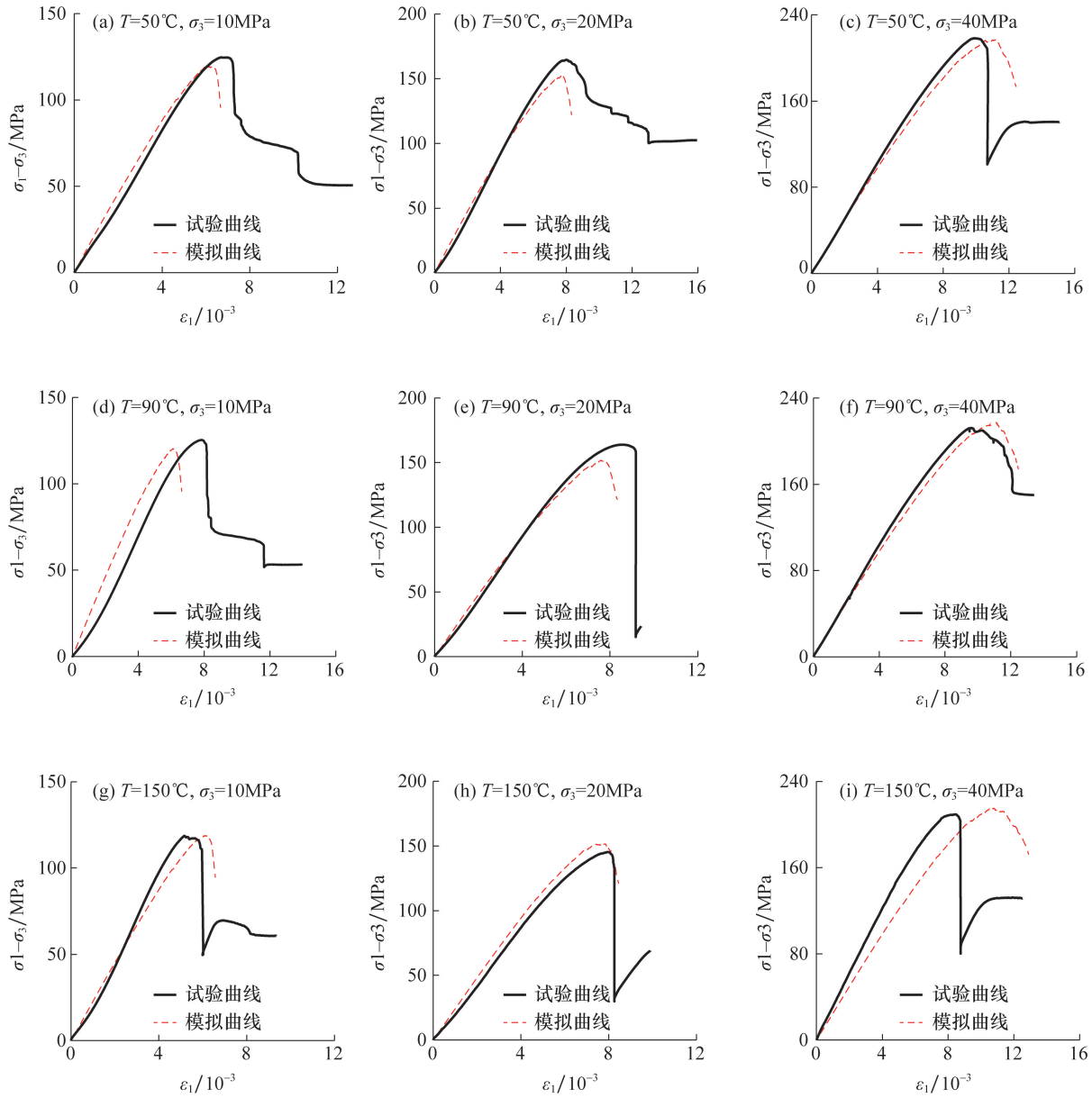


图3 砂岩试样试验和数值模拟应力-应变曲线比较

Fig. 3 Comparison of stress-strain curves between sandstone specimen test and numerical simulation

表2 砂岩试样试验和 PFC^{3D} 模拟峰值强度比较Table 2 Comparison of peak strength of sandstone specimens between experiment and PFC^{3D} simulation

$T=20^{\circ}\text{C}$				$T=50^{\circ}\text{C}$			$T=90^{\circ}\text{C}$			$T=150^{\circ}\text{C}$		
σ_3	σ_{PS}	σ_{PE}	$\eta/\%$	σ_{PS}	σ_{PE}	$\eta/\%$	σ_{PS}	σ_{PE}	$\eta/\%$	σ_{PS}	σ_{PE}	$\eta/\%$
10	130.60	136.14	-4.0	129.63	134.65	-3.7	130.39	135.41	-3.7	128.73	129.20	-0.4
20	173.19	180.43	-4.0	172.70	184.57	-6.4	171.76	183.86	-6.6	171.48	165.32	3.7
40	256.38	257.08	-0.3	256.98	258.25	-0.5	257.61	252.32	2.1	255.42	249.43	2.4
60	344.42	314.58	9.5	343.58	325.63	5.5	343.11	314.28	9.2	342.34	—	—

注:表中 σ_{PS} 表示模拟值; σ_{PE} 表示试验值; η 表示模拟与试验值之间的差异程度。

破坏向单斜面剪切破坏转变。在围压 20MPa 和 40MPa 条件下,砂岩破裂形态与 10MPa 条件类似,均呈剪切破坏,而且在破裂面内可见白色粉末。当围压增大至 60MPa 时,主剪切面倾斜贯穿试样。结合其他温度试验结果可见,随着围压的增大,砂岩破裂模式从单轴压缩的轴向拉伸破裂逐渐向三轴压缩的剪切破裂转化,在本次试验范围内实时温度对砂岩宏观破裂模式没有明显影响。

为进一步分析温度和围压对砂岩破裂特征的影响,对砂岩破裂角(破裂面与水平方向夹角)进行统计。可见,高温砂岩破裂角随着围压的增大而减小,如温度 90℃ 条件下,当围压由 0 增大至 60MPa 时,破裂角分别为 90°、82°、76°、67°和 63°,呈减小趋势,说明围压增大引起了砂岩试样摩擦角减小^[28],高围压下砂岩试样脆性更显著^[29]。本次试验范围内,温度对砂岩破裂角的影响不明显。

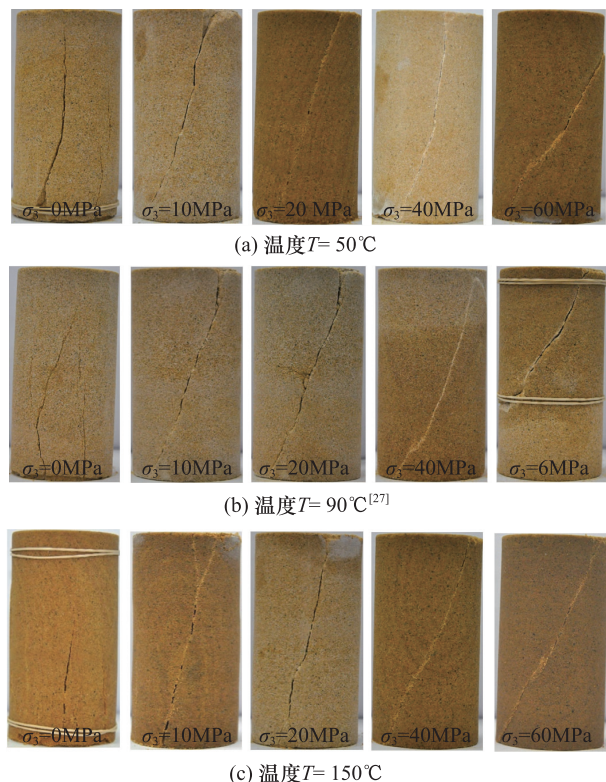


图 4 砂岩高温三轴压缩试验破裂模式

Fig. 4 Experimental triaxial failure modes of sandstone specimens at elevated temperature

图 5 给出了砂岩实时高温三轴压缩数值模拟破裂模式。为了在数值试样中更好地区分破裂面,模拟结果以“Cluster”单元(即将试样中同一区块内的

颗粒以同一种颜色显示^[24])形式显示。以温度 90℃ 模拟结果为例,PFC^{3D} 模拟得到的不同围压作用下试样主破裂面均为剪切裂纹,与室内试验结果相近。在围压 10、20 和 40MPa 条件下,试样破裂角大于试验结果,而当围压为 60MPa 时,破裂角与试验结果接近。尽管存在这些微小差别,PFC^{3D} 模拟总体可以反映砂岩实时高温三轴压缩破裂特征。

由图 5(b)可见,当温度为 200℃ 时,不同围压条件下砂岩裂纹形态与 150℃ 范围内温度作用下相似,在围压 10MPa 和 60MPa 条件下均为宏观剪切破坏,说明 200℃ 以内温度对砂岩的宏观破裂模式无明显影响。但是,当温度升高至 300℃ 时,在围压 10MPa 条件下,宏观裂纹离散分布于试样中,整体呈现为轴向劈裂模式,这与相同围压下 200℃ 以内温度试样的破裂模式有所不同,高温引起的热开裂改变了砂岩的宏观破裂特征。当围压增大至 60MPa 以上时,试样呈现为剪切破裂,与 200℃ 以内温度结果相同,此时围压是砂岩宏观裂纹形态的主控因素。由此可知,温度和围压对砂岩宏观破裂模式的影响规律为:高温作用对低围压条件下的破裂特征影响显著,随着围压的增大,高温作用逐渐减弱,围压成为影响砂岩破裂形态的主导因素。

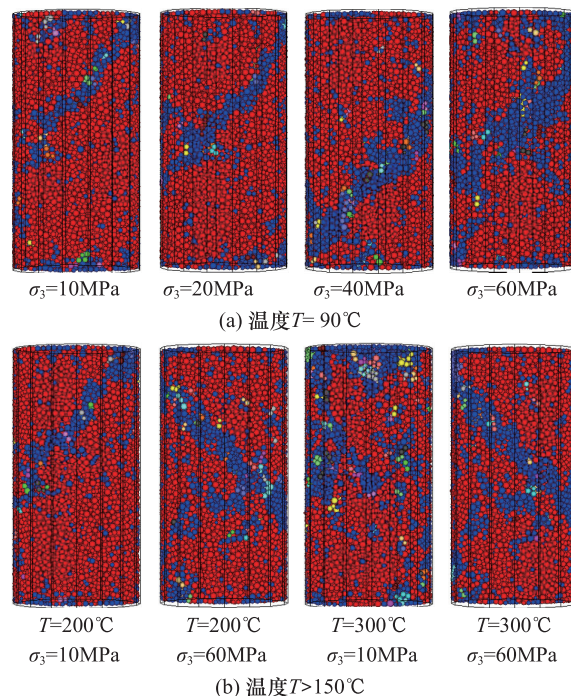


图 5 砂岩高温三轴压缩数值模拟破裂模式

Fig. 5 Numerical triaxial failure modes of sandstone specimens at elevated temperature

3 强度特性分析

3.1 峰值强度

图 6 给出了室内试验和数值模拟得到的不同实时温度作用下砂岩试样峰值强度。由图 6 可见,在 150℃ 温度范围内,砂岩试样的峰值强度受温度的影响无明显变化,如围压 10MPa 条件下砂岩峰值强度分别为 130.60、129.63、130.39 和 128.73MPa。当试验温度高于 150℃ 后,砂岩峰值强度受温度的影响程度随围压增大呈不同变化趋势。在围压 10MPa 和 20MPa 条件下,当温度由 150℃ 增大至 300℃ 时,峰值强度呈明显的减小趋势,如 10MPa 围压下,峰值强度分别为 128.73、117.5、94.50 和 75.73MPa,降幅为 41.2%,而 20MPa 围压条件下,峰值强度降幅为 19.3%。在围压 40MPa 和 60MPa 条件下,当温度由 150℃ 逐渐增大至 300℃ 时,峰值强度无明显变化。从数值模拟结果可见,随着围压的增大,温度对本文砂岩强度的弱化作用降低。

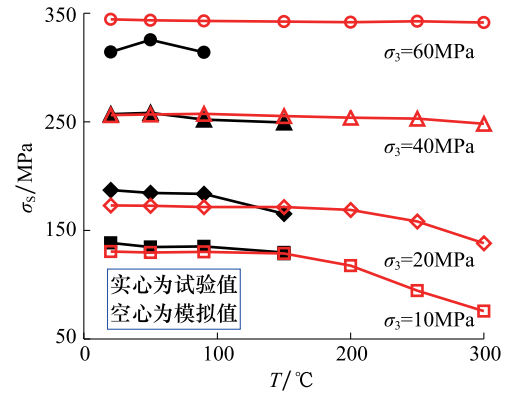


图 6 不同实时温度作用下砂岩试样峰值强度

Fig. 6 Peak strength of sandstone specimen at elevated temperature

图 7 给出了室内试验和数值模拟得到的不同围压条件下高温砂岩峰值强度。由图 7 可见,不同实时温度作用下,PFC^{3D} 模拟的砂岩峰值强度与试验值较为接近,而且峰值强度均随着围压的增大呈线性增大。高压(如 60MPa)条件下,虽然模拟得到峰值强度与试验值有一定差异,但是模拟值均分布在线性回归曲线上。

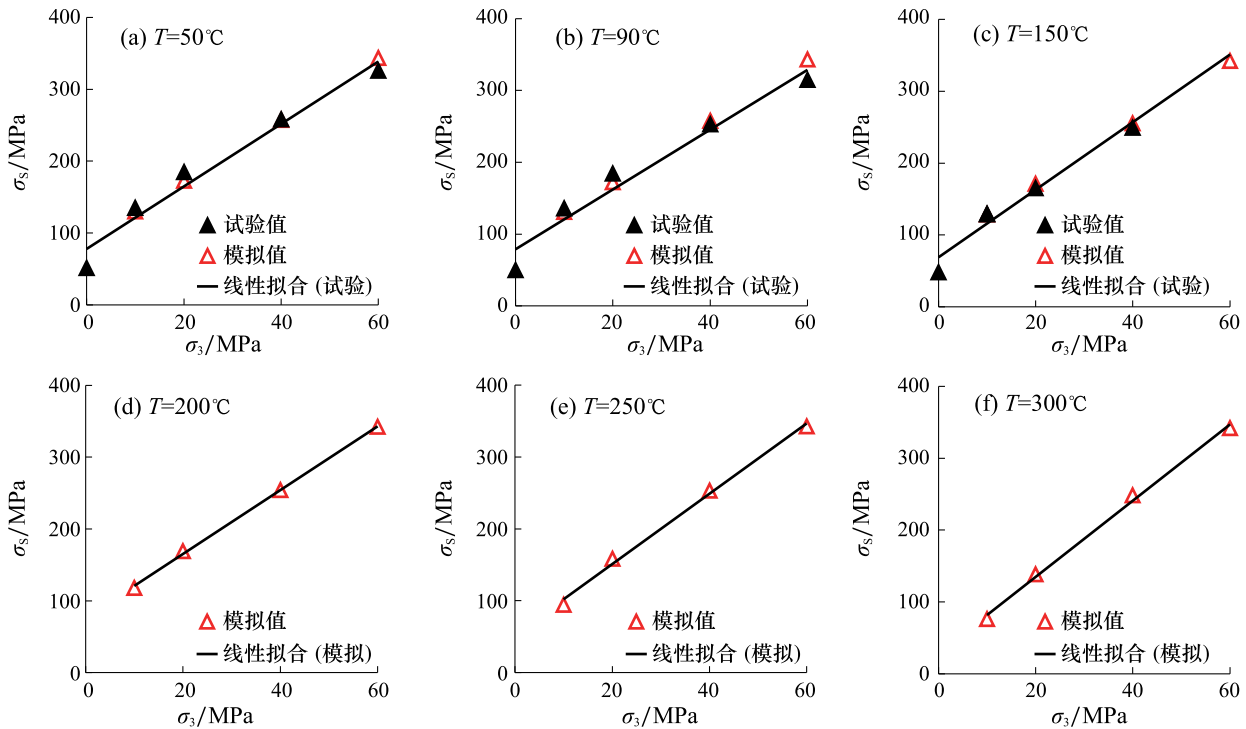


图 7 不同围压条件下高温砂岩峰值强度

Fig. 7 Peak strengths of thermal sandstone specimens at elevated temperature under different confining pressures

结合摩尔-库伦强度准则,计算得到不同温度作用下砂岩黏聚力和内摩擦角,如图8所示。图8结果显示,不同温度作用下砂岩黏聚力和内摩擦角PFC^{3D}模拟值与试验值具有相同变化趋势,而且数值上也较为接近。以室内试验结果为例,当温度由常温增大至90℃时,砂岩黏聚力由18.52MPa增大至19.29MPa。当温度由90增大至150℃时,砂岩黏聚力由19.29MPa减小至15.94MPa,降幅约为17.5%。对于内摩擦角,当温度由常温增大至90℃时,呈小幅减小趋势,分别为38.82°、38.77°和37.8°;当温度由90℃增大至150℃时,砂岩内摩擦角由37.8°增大至40.48°。

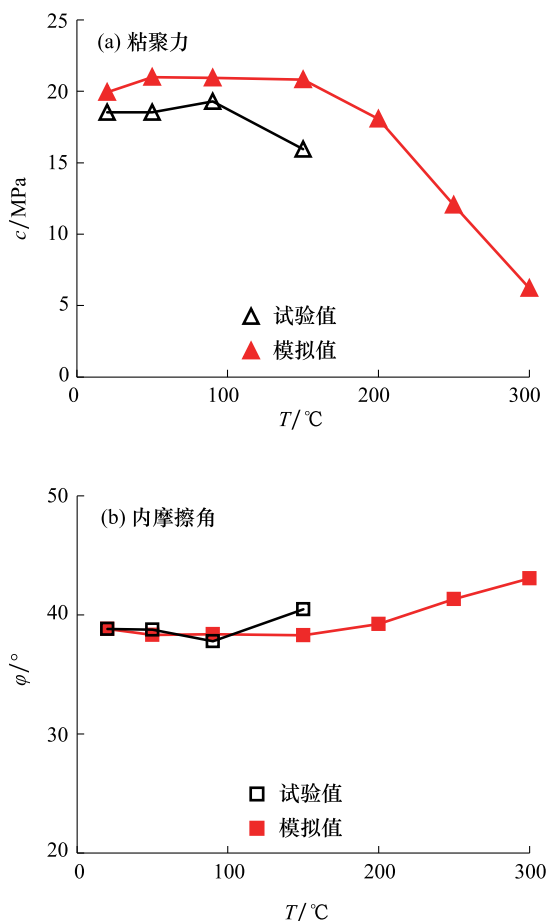


图8 不同温度作用下砂岩黏聚力和内摩擦角

Fig. 8 Cohesion and internal friction angle of sandstone specimen at elevated temperature

当温度由150℃增大至300℃时,PFC^{3D}模拟得到的砂岩黏聚力由20.82MPa降低至6.21MPa,降幅达70.2%,而内摩擦角由38.29°增大至43.06°,涨幅为12.5%。本文砂岩黏聚力和内摩擦角随温

度的变化趋势与花岗岩^[9]相似。

3.2 讨论

上述结果显示,当温度低于150℃时,砂岩试样峰值强度、黏聚力和内摩擦角变化较不明显,而当温度超过150℃后,砂岩试样峰值强度在低围压下呈减小趋势,黏聚力减小,内摩擦角增大。为探究其原因,有必要对岩石内部微观结构加以分析。为此,在PFC^{3D}中通过编程对施加实时温度的岩样(加载应力前)内部微裂纹数量进行统计。

图9给出了不同温度作用下砂岩内部微裂纹分布。由图9可见,在室温~150℃范围内,岩样内几乎没有萌生微裂纹。当温度达到150℃后,岩样内才开始萌生微裂纹,而且随着温度的升高,岩样内微裂纹增多,因此引起岩样内部结构弱化,导致峰值强度和黏聚力降低,同时颗粒之间的摩擦作用变化导致内摩擦角增大。

PFC^{3D}模拟结果还显示,不同围压条件下砂岩峰值强度受温度的影响程度不同,即随着围压的增大,致使岩石强度降幅随围压的增大而减小。该现象与微波热损伤花岗岩三轴压缩试验结果^[30]类似,这主要是受到了高围压对微裂纹的抑制作用^[9,30]。

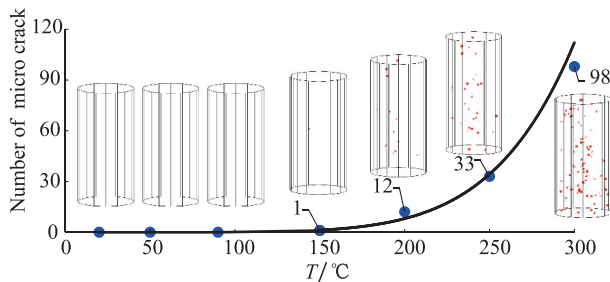


图9 不同温度作用下砂岩试样内部微裂纹数

Fig. 9 Number of micro crack in sandstone specimen under different confining pressures

4 结论

本文开展了不同实时温度作用下砂岩试样三轴压缩室内试验与PFC^{3D}数值模拟,分析了温度和围压对砂岩强度及破裂特征的影响规律,探讨了温度升高过程岩样内部微裂纹发育特征,主要得到如下结论:

(1)在温度不超过150℃时,砂岩峰值强度随温

度升高变化不明显;当温度超过 150℃后,低围压条件下砂岩峰值强度随温度升高而减小。随着围压的增大,温度对砂岩峰值强度的弱化程度降低,高围压条件下峰值强度随温度升高无明显变化。

(2)砂岩三轴压缩破裂模式受温度和围压的共同作用。当温度不超过 200℃时,砂岩破裂形态与常温条件相似,不同围压作用下均呈剪切破坏。当温度超过 200℃后,低围压下砂岩呈轴向劈裂破坏,高围压下砂岩呈剪切破坏。

(3)采用颗粒线膨胀方法,砂岩实时高温三轴压缩数值模拟结果与试验结果相吻合。当温度超过 150℃后,岩样内部开始萌生微裂纹,岩样微观结构弱化,导致强度和黏聚力降低,同时引起颗粒之间的摩擦作用变化,导致内摩擦角增大。

利益冲突:作者声明无利益冲突。

参考文献(References)

- [1] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.
<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2019.6038>
- [2] 何满潮, 郭平业. 深部岩体热力学效应及温控对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2377-2393.
- [3] 李根生, 武晓光, 宋先知, 等. 干热岩地热资源开采技术现状与挑战[J]. 石油科学通报, 2022, 7(3): 343-364.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-1693.2022.03.031>
- [4] Peng J, Rong G, Cai M, et al. Comparison of mechanical properties of undamaged and thermal-damaged coarse marbles under triaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2016, 100(83): 135-139.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.12.016>
- [5] 吴刚, 翟松韬, 李玉寿, 等. 高温下大理岩受压破坏的微观结构分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S2): 3579-3585.
- [6] Yin T B, Shu R H, Li X B, et al. Comparison of mechanical properties in high temperature and thermal treatment granite[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(7): 1926-1937.
[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64311-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64311-X)
- [7] Chester F M, Higgs N G. Multimechanism friction constitutive model for ultrafine quartz gouge at hypocentral conditions[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1992, 97(B2): 1859-1870.
<https://doi.org/10.1029/91JB02349>
- [8] Zhang P, Mishra B, Heasley K A. Experimental investigation on the influence of high pressure and high temperature on the mechanical properties of deep reservoir rocks[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2015, 48(6): 2197-2211.
<https://doi.org/10.1007/s00603-015-0718-x>
- [9] Kumari W G P, Ranjith P G, Perera M S A, et al. Mechanical behaviour of Australian Strathbogie granite under in-situ stress and temperature conditions: An application to geothermal energy extraction[J]. Geothermics, 2017, 65: 44-59.
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.07.002>
- [10] 蒋海昆, 张流. 不同温度条件下花岗岩变形破坏及声发射时序特征[J]. 地震, 2000, 20(3): 87-94.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3274.2000.03.014>
- [11] 李利峰, 邓慧琳, 张晓虎, 等. 加载速率对实时高温花岗岩三轴力学特性影响的实验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(16): 6397-6403.
- [12] Wang Y T, Zhou X P. Peridynamic simulation of thermal failure behaviors in rocks subjected to heating from boreholes[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 117: 31-48.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.03.007>
- [13] 张伟, 曲占庆, 郭天魁, 等. 热应力影响下干热岩水压致裂数值模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 2001-2008.
<https://doi.org/10.16285/j.rsm.2018.0422>
- [14] Yu Q L, Ranjith P G, Liu H Y, et al. A mesostructure-based damage model for thermal cracking analysis and application in granite at elevated temperatures[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(6): 2263-2282.
<https://doi.org/10.1007/s00603-014-0679-5>
- [15] Yang Z, Yang S Q, Tian W L. Peridynamic simulation of fracture mechanical behaviour of granite specimen under real-time temperature and post-temperature treatments[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 138: 104573.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104573>
- [16] 杨敏, 杨磊, 李玮枢, 等. 循环升温-水冷作用下花岗岩的力学特征与破坏模式[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(32): 3828-3836.
- [17] 孙浩, 苏楠, 金爱兵, 等. 温度对不同尺寸砂岩巴西劈裂特性影响[J]. 工程科学学报, 2022, 44(1): 26-38.
<https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2021.07.26.001>

- [18] 田文岭, 杨圣奇, 黄彦华, 等. 花岗岩高温高压损伤破裂细观机制模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(9): 1810-1819.
<https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2021.1260>
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 工程岩体试验方法标准 GB/T 50266-2013[M]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [20] Huang Y H, Yang S Q. Mechanical and acoustic behaviors of brine-saturated sandstone at elevated temperature[J]. Geomechanics and Engineering, 2019, 17(2): 215-225.
<https://doi.org/10.12989/gae.2019.17.2.215>
- [21] Yang B, Jiao Y, Lei S. A study on the effects of micro-parameters on macroproperties for specimens created by bonded particles [J]. Engineering Computations, 2006, 23(6): 607-631.
<https://doi.org/10.1108/026444400610680333>
- [22] Fakhimi A, Villegas T. Application of dimensional analysis in calibration of a discrete element model for rock deformation and fracture[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2007, 40(2): 193-211.
<https://doi.org/10.1007/s00603-006-0095-6>
- [23] Huang Y H, Yang S Q, Tian W L. Crack coalescence behavior of sandstone specimen containing two pre-existing flaws under different confining pressures [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, 99: 118-130.
<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.11.013>
- [24] Itasca Consulting Group Inc. PFC3D manual, version 4.0 [R]. Minneapolis, Minnesota, 2008.
- [25] Fei Y. Mineral physics and crystallography: A handbook of physical constants[M]. AGU, 1995: 29-44.
<https://doi.org/10.1029/RF002>
- [26] Zhao Z. Thermal influence on mechanical properties of granite: a microcracking perspective[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(3): 747-762.
<https://doi.org/10.1007/s00603-015-0767-1>
- [27] Yang S Q, Huang Y H, Tian W L. Influence of water saturation and real-time testing temperature on mechanical behavior of sandstone under conventional tri-axial compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54: 4355-4367.
<https://doi.org/10.1007/s00603-021-02478-z>
- [28] Wong T, Baud P, Klein E. Localized failure modes in a compactant porous rock[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(13): 2521-2524.
<https://doi.org/10.1029/2001GL012960>
- [29] Wasantha P L P, Ranjith P G. Water-weakening behavior of Hawkesbury sandstone in brittle regime[J]. Engineering Geology, 2014, 178: 91-101.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.05.015>
- [30] Lu G M, Feng X T, Li Y H, et al. Influence of microwave treatment on mechanical behaviour of compact basalts under different confining pressures[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020, 12: 213-222.
<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.06.009>

Study on the Strength and Failure Behaviors of Sandstone Specimens at Elevated Temperature under Triaxial Compression

HUANG Yanhua^{1,2}, YANG Shengqi^{1,2,*}, TIAN Wenling^{1,2}

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Deep rocks are in high geostress and high temperature environment, which makes the exploitation of deep resources face great challenges, so it is of great significance to study the triaxial mechanical behaviour of rocks under high temperature. This paper comprehensively adopts indoor test and numerical simulation methods to analyze the influence of real-time temperature and peripheral pressure on the strength and damage characteristics of sandstone, and reveals the law of rock thermal crack evolution. Firstly, triaxial compression tests on sandstone with different real-time temperatures were conducted and the influences of temperature and confining pressure on the mechanical properties of sandstone were obtained. Secondly, a three-dimensional numerical model of sandstone was constructed using PFC^{3D}, and a set of microscopic parameters reflecting the mechanical behavior of sandstone were calibrated by comparing with triaxial compression results at room temperature, on the basis of which a numerical simulation on sandstone under real-time high temperature triaxial compression was carried out, and the numerical results were consistent with the laboratory experimental results. The numerical results show that no microcracks are generated in the specimen and the peak strength changes were not obvious when the temperature does not exceed 150°C; when the temperature exceeds 150°C, microcracks begin to sprout in the sandstone specimen. Under low confining pressure conditions, the peak strength of sandstone decreases with increasing temperature. The closure effect of high confining pressure on microcracks reduces the weakening effect of temperature on peak strength of sandstone. The fracture pattern of thermal sandstone is influenced by both temperature and peripheral pressure. The thermal sandstone exhibits axial splitting failure under low confining pressure, and shear failure under high confining pressure.

Keywords: Rock mechanics; real-time temperature; peak strength; micro cracks; PFC^{3D}

DOI: 10.48014/bcce.20231024002

Citation: HUANG Yanhua, YANG Shengqi, TIAN Wenling. Study on the strength and failure behaviors of sandstone specimens at elevated temperature under triaxial compression [J]. Bulletin of Chinese Civil Engineering, 2023, 1(3): 18-27.

Copyright © 2023 by author(s) and Science Footprint Press Co., Limited. This article is open accessed under the CC-BY License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

