

牛露, 周永胜, 姚文明等. 2018. 高温高压条件下彭灌杂岩的强度对汶川地震发震机制的启示. 地球物理学报, 61(5): 1728-1740, doi: 10. 6038/cjg2018M0227.

Niu L, Zhou Y S, Yao W M, et al. 2018. Experiments on the strength of Pengguan Complex under high temperature and high pressure and its implication to seismogenic mechanism of the Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 61(5): 1728-1740, doi: 10. 6038/cjg2018M0227.

高温高压条件下彭灌杂岩的强度 对汶川地震发震机制的启示

牛露^{1,2}, 周永胜^{1*}, 姚文明¹, 邵同宾³, 马玺¹, 党嘉祥¹, 何昌荣¹

1 中国地震局地质研究所, 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029

2 河北省地震局, 石家庄 050021

3 中国科学院广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640

摘要 采用汶川地震震源区彭灌杂岩中代表性细粒花岗岩样品, 在固体围压介质三轴实验系统上开展了高温高压流变实验研究. 实验的温度和压力条件按照龙门山断层带 5~30 km 深度对应的温度和压力(静岩压)设定. 利用偏光显微镜和扫描电镜对实验样品进行微观结构观察. 实验结果表明, 实验样品在 10~20 km 深度都具有很高的强度, 彭灌杂岩在该深度处于脆性破裂-脆塑性转化域, 而在 20~30 km 实验样品强度显著降低, 彭灌杂岩进入塑性流变域, 这与流变结构中的极限强度很接近. 以花岗岩为代表的彭灌杂岩的破裂强度决定了中上地壳的强度, 在 15~20 km 深度不仅强度达到最大值, 而且控制了断层不稳定滑动, 具备地震成核条件. 因此, 把彭灌杂岩强度随深度变化规律与流变结构和滑动稳定性参数($a-b$)结合起来得出, 彭灌杂岩在 15~20 km 的高强度是汶川地震的孕育和发生的必要条件.

关键词 彭灌杂岩; 强度; 汶川地震; 高温高压

doi: 10. 6038/cjg2018M0227

中图分类号 P313

收稿日期 2018-03-12, 2018-04-03 收修定稿

Experiments on the strength of Pengguan Complex under high temperature and high pressure and its implication to seismogenic mechanism of the Wenchuan earthquake

NIU Lu^{1,2}, ZHOU YongSheng^{1*}, YAO WenMing¹, SHAO TongBin³,
MA Xi¹, DANG JiaXiang¹, HE ChangRong¹

1 State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2 Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050021, China

3 State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Abstract Two sets of deformation experiments were performed on fine-grained granite collected from the Pengguan Complex in the solid-medium triaxial apparatus under high temperature and high pressure. Temperature and pressure conditions in the experiments were designed based on the in situ conditions of the Longmenshan fault zone at depths of 5~30 km. Microstructures of the

基金项目 国家自然科学基金(41772223)与河北省地震科技星火计划项目(DZ20180321019)资助.

第一作者简介 牛露, 女, 1990 年生, 工程师, 在读博士研究生, 构造地质专业. E-mail: niulu1990@126.com

*** 通讯作者** 周永胜, 男, 1969 年生, 研究员, 主要从事高温高压岩石流变学实验研究. E-mail: zhouysh@ies.ac.cn

experimentally deformed samples were observed under polarizing microscope and scanning electron microscope (SEM). The tested samples from the two sets of experiments have high strength at conditions corresponding to a depth of 10 to 20 km, which corresponds to the brittle fracture to brittle-plastic transition domain. While the strength of the samples reduces obviously at conditions corresponding to the depth of 25 to 30 km, suggesting the samples are in the plastic flow. As a representative rock of the Pengguan Complex, granite has the strongest strength at the depth of 15 to 20 km, which is close to the ultimate strength in rheological profile. In this depth range, the rupture strength of the Pengguan Complex not only determines the strength of middle crust, but also controls unstable slide of fault, which means stick-slip of fault could happen and thus cause earthquake nucleation. Therefore, based on the strength data of the Pengguan Complex with the rheological profile and the frictional velocity dependence value ($a-b$), we conclude that the high strength of the Pengguan Complex at the depth of 10 to 20 km is a crucial factor for the nucleation and generation of the Wenchuan earthquake.

Keywords The Pengguan Complex; Strength; Wenchuan earthquake; High temperature and pressure

0 引言

汶川地震的主发震断层映秀—北川断裂具有高角度逆断层性质(Xu et al., 2009; Zhang et al., 2010; Liu-zeng et al., 2009). 地球物理探测结果、余震分布(Chen et al., 2010; 陈九辉等, 2009)和主震震源机制揭示汶川地震的发震断层在 15 km 以下为缓倾, 倾角 $30^\circ \sim 40^\circ$, 向上变陡, 倾角 $60^\circ \sim 70^\circ$, 是一种上陡下缓的铲式结构, 20 km 以下断层穿过脆韧转换带, 汇入塑性流动层(张培震等, 2008; Zhang et al., 2010; Zhang, 2013a, b). 高角度逆断层通常难以滑动, 需要有特殊的力学条件(周永胜和何昌荣, 2009; Han et al., 2016). 新的研究表明, 震源深度岩石具有极大的强度, 断裂带高压流体的断层阀作用、铲形断裂的应力触发作用和高速摩擦中热压作用对断层强度弱化是汶川地震发生的内在物理机制(张培震等, 2008; Zhang et al., 2010; Zhang, 2013a, b), 其中高温高压岩石力学实验和断层脆塑性转化带岩石变形与流体研究显示, 震源岩石具有极高的强度以及断层带具有高压流体是汶川地震孕育和发生的必备条件(周永胜和何昌荣, 2009; Han et al., 2016); 数字模拟研究表明, 深部缓倾角断层首先开始滑动, 触动浅部高倾角逆断层滑动, 从而发生汶川地震, 其中, 深部缓倾角断层和浅部高倾角逆断层的正应力状态在震前和同震过程互补(Zhu and Zhang, 2010; 2013); 模拟同震断层滑动的高速摩擦实验表明, 高速摩擦中热压作用对断层强度的弱化是汶川地震发生的另一个重要原

因. 由此可见, 地壳脆-塑性转化带和塑性流动层对高角度逆断层滑动和汶川地震孕震和发生有重要影响(张培震等, 2008; Zhang et al., 2010; Zhang, 2013a, b; 周永胜和何昌荣, 2009; Han et al., 2016).

汶川地震的震中位于龙门山构造带的中南段彭灌杂岩体之中, 深部地球物理探测(Liu et al., 2014; Zhao et al., 2012; Zhang et al., 2013a, b), 结合高温高压岩石物理实验表明, 震源深部岩石与彭灌杂岩基本相同(Han et al., 2016). 彭灌杂岩是由中酸性的岩浆岩和变质岩混在一起的复合体, 主要有闪长岩、花岗岩、混合岩、片麻岩等, 主要组成矿物为石英、长石、角闪石和云母等. 其中, 斜长花岗岩、钾长花岗岩和二长花岗岩出露的最多也最典型. 因此, 深入研究彭灌杂岩强度, 及其随深度变化特征是认识汶川地震孕育和发震机制的关键问题之一.

花岗岩破裂和半脆性流变实验(周永胜等, 2002; 周永胜和何昌荣, 2009; Liu et al., 2016, 2017; Dang et al., 2017)与花岗糜棱岩摩擦滑动实验(Zhang and He, 2016)表明, 花岗质岩石在 10~20 km 不仅具备很高的破裂强度和摩擦强度, 而且断层处于黏滑的深度范围, 具备发生大地震的条件. 龙门山断层带流变结构显示, 10~19 km 深度范围内, 断层带以脆性破裂或断层摩擦滑动为主, 而 19~30 km 深度范围内, 花岗岩处于塑性流变范围(周永胜和何昌荣, 2009; Han et al., 2016), 这不仅与汶川地震的发震深度 14~19 km 相吻合, 而且与地壳深部塑性流动驱动脆性断层滑动的动力学模型(张培震等, 2008; Zhang et al., 2010)相吻合. 因此, 基于高温高压岩石力学实验, 可以为认识汶川

地震孕育和发生的物理机制提供必要的力学数据支持. 然而, 目前这些实验结果都是定性研究, 没有专门针对汶川地震震源组成岩石——彭灌杂岩开展高温高压岩石力学实验的研究, 也没有根据龙门山地区实际断层设定实验温压条件.

因此, 本文将根据实际资料分析、结合龙门山地区的岩石组成模型和温度随深度变化模型. 通过开展彭灌杂岩中代表性花岗岩的高温高压变形实验, 获得实验条件下花岗岩的强度随深度变化规律, 分析断层脆塑性转化带的变形机制随深度变化规律, 基于高温高压岩石力学实验讨论汶川地震孕育和发生的物理机制.

1 实验样品和实验条件

1.1 实验样品

为了研究映秀—北川断裂的断层带结构和物理力学性质, 地震动力学国家重点实验室在四川龙门山断裂带打了多口浅钻. 本实验样品采自德阳金河磷矿地区浅钻岩心中的细粒花岗岩, 为新元古代彭灌杂岩代表岩石之一(Duan et al., 2016). X射线衍

射分析得到原岩主要矿物组成: 斜长石(38wt. %)、石英(33wt. %)、微斜长石(11wt. %)、绿泥石(11wt. %)、云母(7wt. %). 样品结构均匀, 无明显定向结构, 矿物随机分布, 表明未经过显著构造变形, 扫描电镜下长石、石英、黑云母等矿物呈半自形-它形, 矿物颗粒表面干净, 无显著风化痕迹, 颗粒间发育微孔隙和微缝隙(图 1).

1.2 实验设备与实验条件

实验是在中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室自主研发的 Griggs 型 3 GPa 熔融盐固体介质三轴高温高压实验系统上进行, 围压和轴压加载系统通过液压伺服油缸控制加载, 实验仪器控制和数据采集通过自主开发的计算机软件实现. 计算机控制软件不仅能够实时显示并记录实验位移、压力和温度信息, 而且能够实现实验中位移控制方式和应力控制方式的平稳切换. 温度控制系统采用 Yamatake-Honeywell DCP-30 型控温仪, 控制精度为 0.1%. 实验前后通过气垫底座方便地移动压力容器, 实验中使用水冷系统对压力容器外部降温. 实验设备、压力容器、装样等参见韩亮等(2009, 2013)、刘照星等(2013)、刘贵等(2013)和 Liu 等(2016).

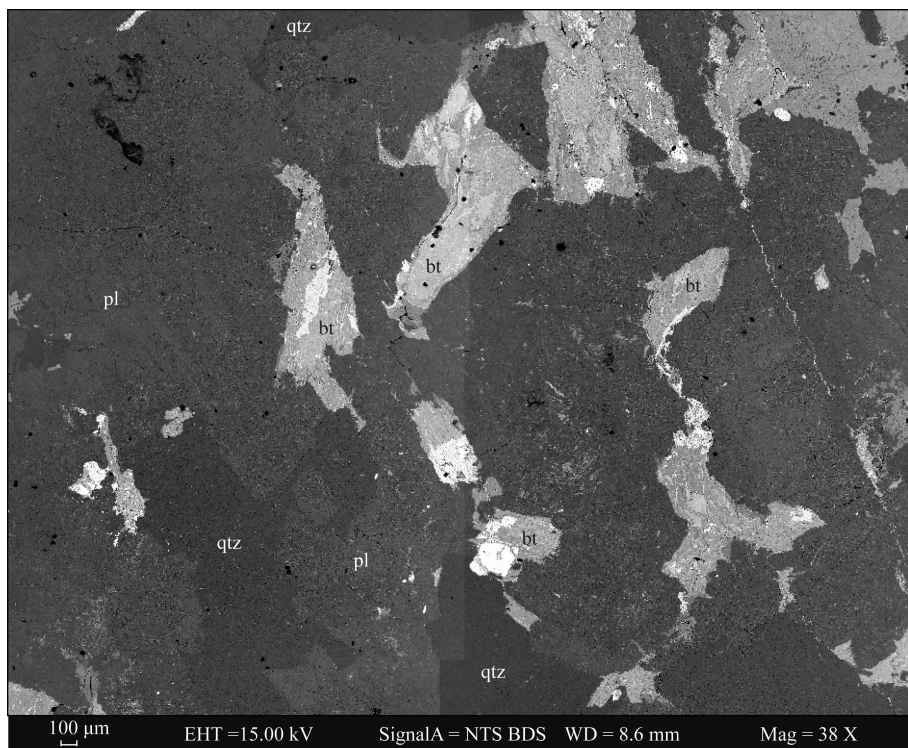


图 1 实验原始样品花岗岩(3S-3)在扫描电镜下的形态特征

矿物缩写: pl-斜长石、qtz-石英、bt-黑云母.

Fig. 1 Microstructure of the starting sample granite (3S-3) observed under scanning electron microscope

Abbreviations of mineral: pl-plagioclase, qtz-quartz, bt-biotite.

实验在压力 250~800 MPa, 温度 200~900 °C 条件下, 采取等应变速率控制, 加载应变速率 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 为了与龙门山地区地壳深度对应的压力和温度匹配, 实验同时改变围压和温度. 实验分为两组, 第 1 组实验的地温梯度选取 $18 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$, 该温度梯度依据龙门山地壳的温度随深度变化模型(周永胜和何昌荣, 2009); 为了对比, 开展了另 1 组高地温梯度实验, 按照 $30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ 设定温度随深度变化, 这样可以给出最低极限强度. 实验围压与深度的关系根据上覆岩层厚度产生的压力进行简单的近似换算. 本实验研究主要是为考察彭灌杂岩在半脆性变形域的强度特征, 在相同温度条件下, 应变速率高, 花岗岩容易出现脆性破裂, 应变速率低, 容易出现塑性变形. 为了在实验给定的温度条件下出现半脆性变形, 根据实验经验, 选择了 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的中等应变速率. 需要说明的是, 由于实验室条件下的应变速率与龙门山地区的实际应变速率相差太大, 实验选取的应变速率无法模拟真实的变形时间条件. 两组实验条件如图 2 所示.

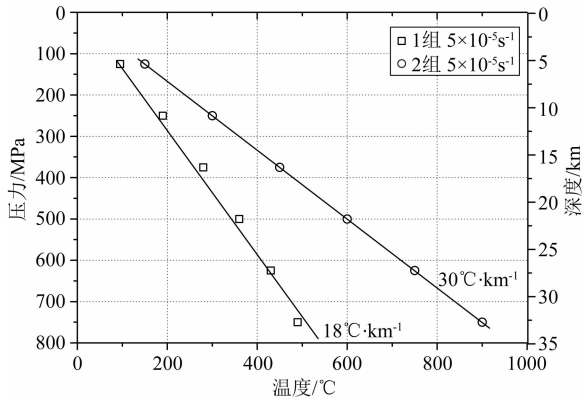


图 2 两组实验的压力和温度条件及其代表的深度条件(假设静岩压以及 $18 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ 和 $30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ 两种地温梯度)
Fig. 2 Pressure and temperature conditions of the two sets of experiments and their corresponding depths (assuming lithostatic pressure and two kinds of geothermal gradients of $18 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ and $30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$)

2 实验力学数据

2.1 实验应力-应变曲线

为得到样品变形真实应力-应变曲线, 对实验记录的原始应力-应变曲线均进行校正, 包括样品标准直径校正、仪器刚度校正、轴压摩擦力校正和样品接触面积校正. 其中轴压摩擦力校正和样品接触面积校正参考刘照星等(2013)、刘贵等(2013)和 Liu 等

(2016). 经过以上校正, 得到的样品真实的应力-应变曲线如图 2 所示. 表 1 给出了实验条件、实验力学数据, 为了对比, 表 1 引用了本课题组其他人开展的长英质岩石的高温高压实验力学数据.

两组实验的应力-应变曲线(图 3)具有类似的特征. 在浅部低温和低围压条件下($190 \text{ }^\circ\text{C}$ 、250 MPa 和 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 、250 MPa), 样品在应变接近 10% 之后显示出显著应变强化特征, 随着应变增加, 应力持续增加, 始终没有出现明显屈服点, 表明样品具有脆性-碎裂的变形特征; 在深部高温和高围压条件下, 部分样品($600 \text{ }^\circ\text{C}$ 、500 MPa 和 $750 \text{ }^\circ\text{C}$ 、625 MPa)在应变超过 12% 时, 应力-应变曲线表现出微弱的应变软化; 其他样品($360 \text{ }^\circ\text{C}$ 、500 MPa; $430 \text{ }^\circ\text{C}$ 、625 MPa; $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 、375 MPa; $490 \text{ }^\circ\text{C}$ 、750 MPa; $750 \text{ }^\circ\text{C}$ 、625 MPa)应力-应变曲线出现明显的屈服点, 在应变 15%~20% 时, 应力基本达到稳态; 在 $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 、750 MPa 时, 样品应力-应变曲线具有稳态流变特征.

2.2 温度与围压变化对花岗岩强度的影响

为了考察温度和压力对花岗岩强度的影响, 图 4 给出了相同围压不同温度条件的两组实验对比. 图 4 中 5 组应力-应变曲线表明, 围压条件不同, 花岗岩强度对于温度的依赖程度有显著区别: ①当围压条件低于 500 MPa, 温差 $110 \sim 240 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 温度对于样品强度影响较小. 例如, 当围压为 250 MPa 时, 温度为 $190 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 强度分别为 694.5 MPa 和 730.16 MPa, 高温比低温时样品强度增大约 5.2%; 当围压为 375 MPa 时, 温度为 $280 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 强度分别为 800.63 MPa 和 720 MPa, 高温比低温时样品强度降低约 10%; 当围压为 500 MPa 时, 温度为 $360 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 强度分别为 779 MPa 和 801.29 MPa, 高温比低温时样品强度增大约 2.8%. ②当围压条件高于 500 MPa, 温差 $320 \sim 410 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 温度对于样品强度影响显著增大, 温度较高的样品强度显著低于温度较低的样品强度. 例如, 当围压为 625 MPa 时, 温度为 $430 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $750 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 强度分别为 613.8 MPa 和 429.1 MPa, 高温比低温时样品强度降低约 30%; 当围压为 750 MPa 时, 温度为 $490 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 强度分别为 816.63 MPa 和 20.4 MPa, 高温比低温时样品强度降低约 97.5%. 由此可见, 在相当于地壳深度 $10 \sim 20 \text{ km}$ 的温度和压力条件下, 花岗岩处于脆性-半脆性状态, 温度对花岗岩强度的影响比较小, 在深度超过 20 km 的温度和压力条件下, 花岗岩进入脆塑性转化到塑性流变域, 温度对花岗岩强度有显著影响.

表 1 实验条件与力学数据

Table 1 Summary of experimental conditions and mechanics data

编号	深度(km)	温度(°C)	围压(MPa)	强度(MPa)	应变速率(s^{-1})	总应变量(%)	SEM	数据来源
G05	10	190	250	695	5×10^{-5}	20.6	Y	本研究
G11	15	280	375	801	5×10^{-5}	21.5	Y	本研究
G02	20	360	500	779	5×10^{-5}	20.3	Y	本研究
G04	25	430	625	614	5×10^{-5}	26	Y	本研究
G03	30	490	750	817	5×10^{-5}	21.6	Y	本研究
G06	10	300	250	730	5×10^{-5}	22.9	Y	本研究
G07	15	450	375	720	5×10^{-5}	21.6	Y	本研究
G08	20	600	500	801	5×10^{-5}	22.2	Y	本研究
G09	25	750	625	429	5×10^{-5}	28.4	Y	本研究
G10	30	900	750	20	5×10^{-5}	9.4	Y	本研究
Am1	—	27	600	421	1×10^{-4}	6.28	—	
Am2	—	620	694	961	1×10^{-4}	22.33	—	刘照星等,(2013)
Am3	—	576	694	1624	1×10^{-4}	29.19	—	
GGn	—	728	800	1098	1×10^{-4}	29.07	—	
Gr2	—	384	637	1650	1×10^{-4}	29.07	—	刘贵等,(2013)
Gr3	—	30	635	1284	1×10^{-4}	29.19	—	
htp30	—	20	100	375	2×10^{-4}	24.64	—	
htp16	—	150	200	446	2×10^{-4}	54.18	—	
htp15	—	150	200	797	2×10^{-4}	32.45	—	
htp12	—	250	300	103	2×10^{-4}	22.17	—	
htp09	—	350	400	1202	1×10^{-4}	24.45	—	
htp17	—	350	400	1165	2×10^{-4}	36.13	—	
htp13	—	450	500	1472	2×10^{-4}	8.77	—	周永胜等,2002
htp14	—	450	500	1550	2×10^{-4}	36.13	—	
htp19	—	550	600	1522	1×10^{-4}	25.07	—	
htp18	—	550	600	1507	2×10^{-4}	7.45	—	
htp29	—	650	700	1824	2×10^{-4}	20.79	—	
htp32	—	850	900	435	2×10^{-4}	22.2	—	

注: * Am1-Am3 引自刘照星等(2013);GGn,Gr2-Gr3 引自刘贵等(2013);htp09-htp32 引自周永胜等(2002).

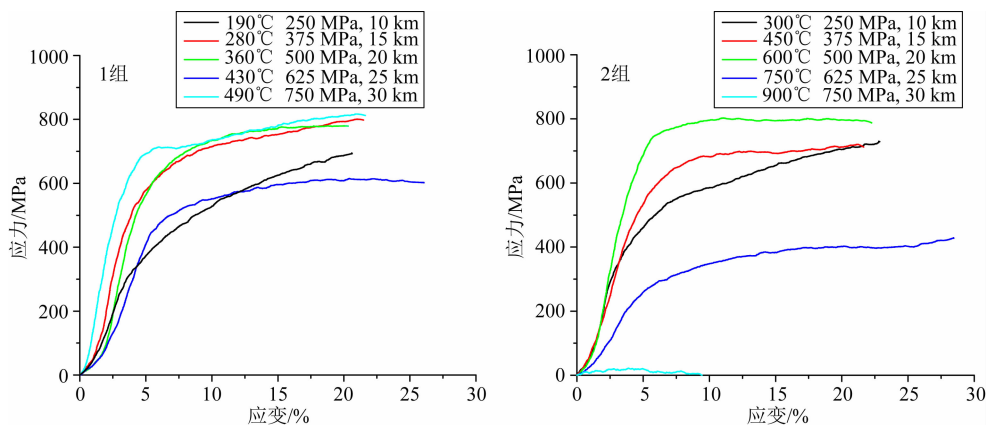


图 3 两组花岗岩高温高压实验的应力-应变曲线

Fig. 3 The stress-strain curves of the two sets experiments of granites under high temperature and pressure

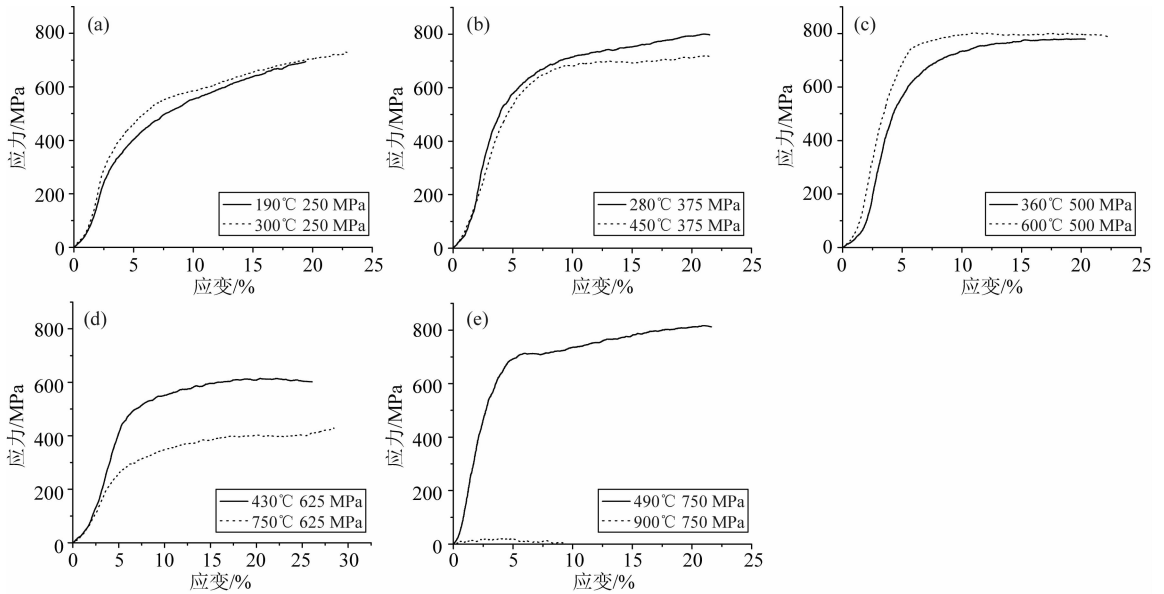


图4 花岗岩在相同围压不同温度条件下的应力-应变曲线

Fig. 4 The stress-strain curves of the granites deformed under the same confining pressure and various temperature conditions

2.3 花岗岩强度随深度变化规律

根据实验围压和温度与深度的对应关系,基于实验应力-应变曲线,得到了花岗岩强度随深度变化曲线(图5)。从图5中得出,两组实验在10~20 km都具有很高的强度,而且随着深度增加,强度缓慢增加。虽然两组实验的温度梯度差别很大,但在10~20 km,强度变化不大,而在25~30 km,第2组高地温梯度实验的强度显著小于第1组低地温梯度的实验。因此,以花岗岩为代表的彭灌杂岩在地壳15~20 km时深度强度达到最大值。

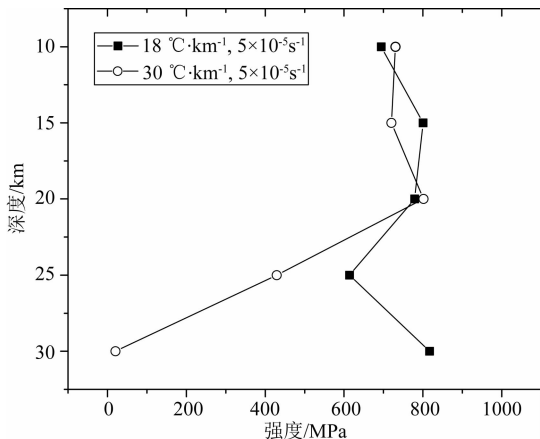


图5 花岗岩强度随深度的变化

Fig. 5 The strength of granite plotted against depth

3 实验变形样品微观结构特征

将所有实验变形样品沿着主轴压缩方向切开并

磨制薄片,分别在偏光显微镜和扫描电镜下对实验初始样品和变形样品进行微观结构分析。样品分析都是在中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室完成。

3.1 第1组(地温梯度:18 °C/km)实验样品变形特征

本组实验围压为250~750 MPa,温度从190~490 °C,地温梯度为18 °C/km。在最低围压250 MPa和最低温度190 °C条件下,样品(G05)沿主压缩轴方向形成一条单斜贯通破裂面,破裂面平直,破裂带内颗粒细化,为典型的脆性破裂(图6a),破裂带外普遍发育粒间和粒内微破裂。在围压375 MPa,温度280 °C时,样品(G11)破裂面由几条断续斜列分布的破裂组成(图6b),长石普遍发育颗粒内微破裂,黑云母被拉长成条带状,石英发育波状消光,这些特征表明该样品为半脆性破裂(周永胜等,2002; Gerald and Stünitz, 1993)。在围压500 MPa,温度360 °C时,样品(G02)整体缩短,但没有出现明显的破裂(图6c),长石以颗粒碎裂为主,黑云母条带发生弯曲变形,因此,该样品以碎裂和塑性变形共存,具备脆塑性转化特征。在围压625 MPa,温度430 °C时,样品(G04)中部向一侧鼓出(图6d),黑云母发生强烈塑性变形,石英和长石颗粒部分边缘出现不规则化,石英波状消光,部分大的石英颗粒边缘形成亚颗粒,长石微破裂、双晶扭折和变形带共存,显示该样品为脆塑性转化变形特征。在围压750 MPa,温度490 °C时,样品(G03)整体均匀压扁,发生强烈流动变形(图6e),黑云母晶体普遍扭折和塑性流动,石

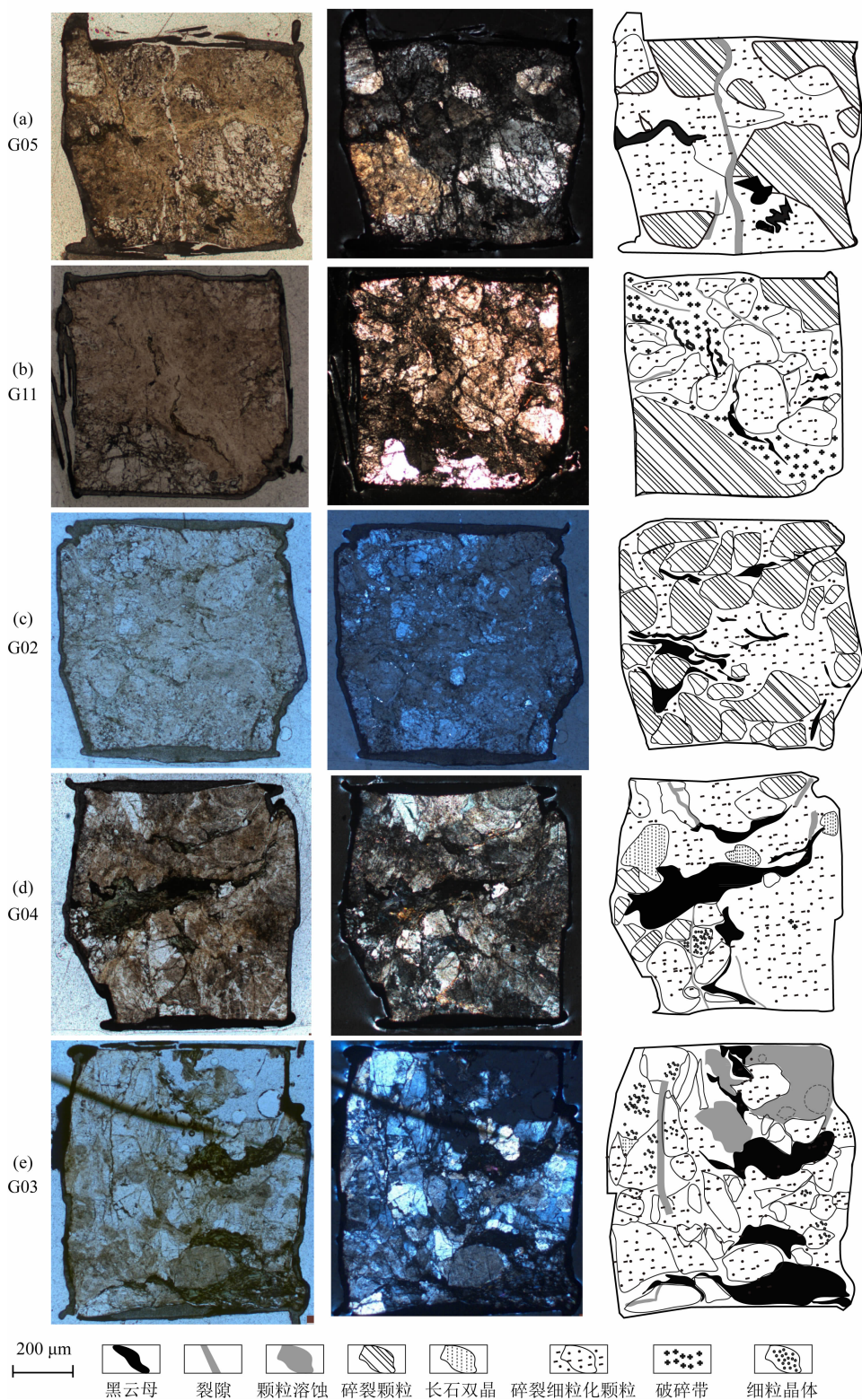


图 6 第 1 组温压条件下实验变形花岗岩在偏光显微镜下的整体形态特征(单偏光、正交偏光、素描)

Fig. 6 The micro-textures of the deformed granites for the first set of experiments (Plane-polarized light, cross-polarized light and sketch)

英波状消光,石英和长石溶蚀边明显,长石碎裂和微破裂现象减少,颗粒边缘及晶内缝隙被细粒晶体充填,说明该样品具有脆塑性转化变形特征。

3.2 第 2 组(地温梯度:30 °C/km)实验样品变形特征

本组实验围压为 250~750 MPa,温度从 300~

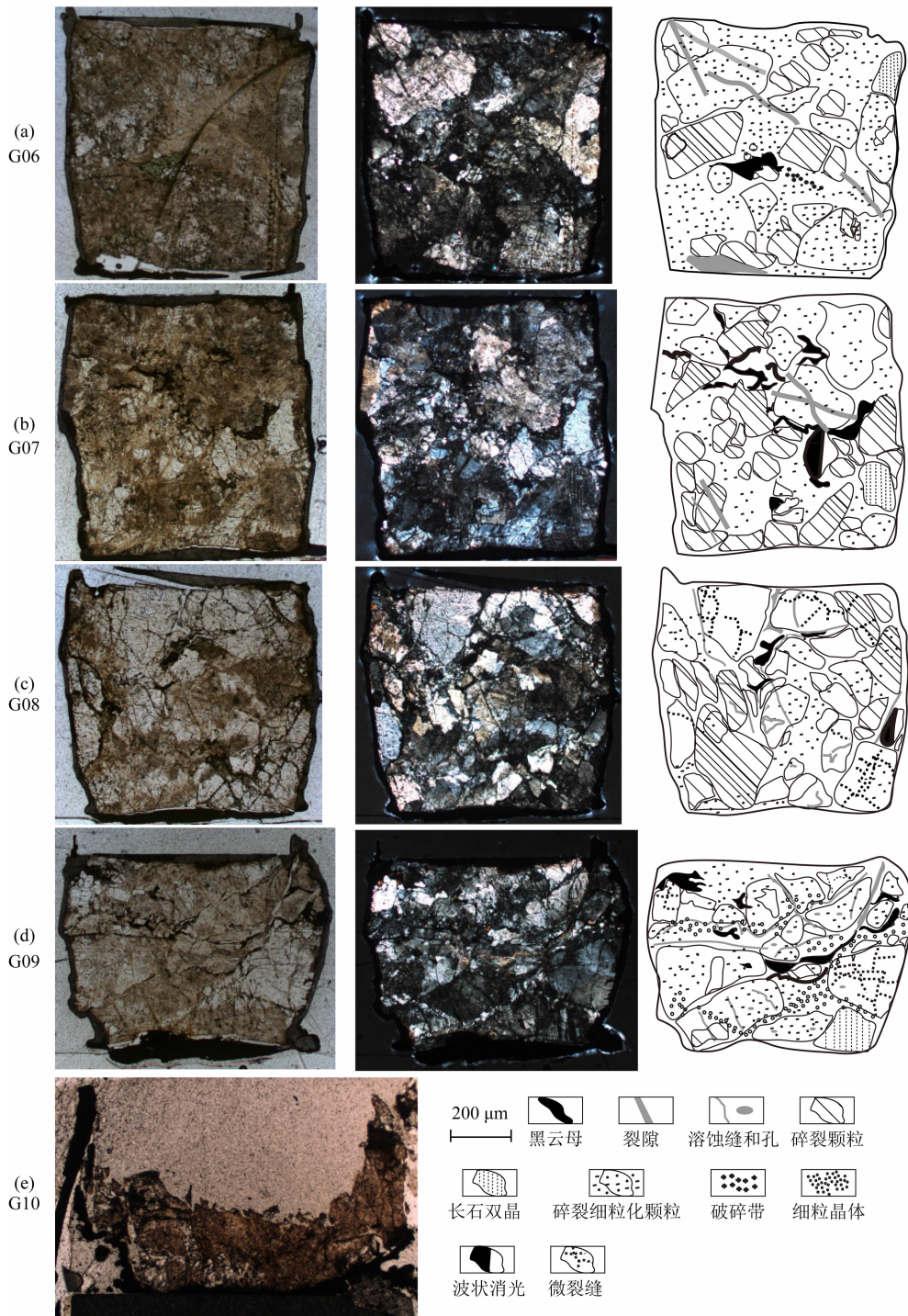


图7 第2组温压条件下实验变形花岗岩的整体形态特征(单偏光、正交偏光、素描)

Fig. 7 The micro-textures of the deformed granites for the second set of experiments
(Plane-polarized light, cross-polarized light and sketch)

900 °C, 地温梯度 30 °C/km. 在围压 250 MPa, 温度 300 °C 时, 样品 (G06) 出现若干不连续破裂面 (图 7a), 长石颗粒碎裂, 边缘棱角化, 未见石英波状消光, 少量黑云母存在塑性变形. 因此, 该样品为脆性破裂. 在围压 375 MPa, 温度 450 °C 时, 样品 (G07) 整体均匀压缩 (图 7b), 长石颗粒普遍碎裂, 具有双

晶结构, 少量黑云母存在晶内扭折, 石英具有波状消光, 因此, 该样品为脆塑性转化变形. 在围压 500 MPa, 温度 600 °C 时, 样品 (G08) 被均匀压缩 (图 7c), 长石发育微裂隙, 但无贯穿大裂隙, 石英和长石颗粒沿着裂缝出现溶蚀现象, 部分颗粒内可见溶蚀孔, 石英波状消光显著, 黑云母塑性变形, 因此, 该样品为脆塑

性转化变形. 在围压 625 MPa, 温度 750 °C 时, 样品 (G09) 被强烈压扁(图 7d), 长石和石英的微裂隙被细粒石英和黑云母填充, 黑云母条带发生强烈塑性变形, 石英和长石颗粒部分边缘出现不规则弯曲, 颗粒内普遍出现溶蚀孔, 石英波状消光显著, 因此, 该样品整体为塑性变形, 局部仍具有脆性变形特征. 在围压 750 MPa, 温度 900 °C 时, 实验样品 (G10) 发生强烈塑性流动, 样品呈弯曲弧形(图 7e). 磨制薄片时出现样品损失.

4 讨论

4.1 花岗岩脆塑性转化特征随温度和压力变化规律对比

大量花岗岩变形实验结果(周永胜等, 2002; 王绳祖和张流, 1982, 1984; 王威等, 1989)表明, 花岗岩的脆塑性转化温压范围较为一致, 在温度小于 300 °C 时, 花岗岩为脆性破裂; 温度大于 800 °C 为晶体塑性变形; 在 300~800 °C 范围, 为脆塑性转化域, 随着温度增加, 由半脆性破裂向碎裂流动和半脆性流动过渡, 转化温度随围压增加而增加. 在本文实验中, 当围压 250 MPa, 温度 190~300 °C 时, 彭灌杂岩表现为典型的脆性变形; 当围压 375~625 MPa, 温度 280~600 °C 时, 彭灌杂岩表现为脆塑性转化变形; 当围压 625~750 MPa, 温度 750~900 °C, 彭灌杂岩表现为塑性变形. 图 8 给出了本实验花岗岩变形特征随温度和压力的变化规律(图 8). 本实验结果与前人的数据进行对比显示, 彭灌杂岩的变形特征随

温度和压力变化规律与其他花岗岩基本一致.

4.2 花岗岩强度随深度变化规律对比

图 5 给出了本研究中的两组实验样品强度随深度变化趋势, 两组地温梯度分别代表了正常地壳温度和极高热流条件下的地壳温度, 对应的强度分别为正常彭灌杂岩强度和可能的强度最小极限. 由于本实验的应变速率为 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 而应变速率对花岗岩的强度具有显著影响, 为了便于对比, 把本研究获得的实验数据与本课题组其他人在应变速率 10^{-4} s^{-1} 条件下开展的长英质岩石与角闪石的强度随深度变化规律进行综合, 结果如图 9 所示.

周永胜等(2002)采用居庸关花岗岩在应变速率 10^{-4} s^{-1} 条件下进行高温高压实验研究结果认为, 在相当于 15~25 km 深度的温压条件下花岗岩具有很高的强度, 可达到 1200~1800 MPa; 结合刘照星等(2013)采用汶川地震龙门山断裂带地区的角闪岩在应变速率 10^{-4} s^{-1} 和刘贵等(2013)采用花岗片麻岩在应变速率 10^{-4} s^{-1} 条件下的高温高压实验研究结果表明, 在相当于 15~25 km 深度的温压条件下实验样品亦具有最高的强度, 可达到 1600 MPa(图 9). 本文实验结果表明, 在相当于 10~20 km 的温压条件下花岗岩样品具有高的强度, 可达到 800 MPa, 在 25~30 km 深度花岗岩样品强度明显降低. 显然, 在应变速率 10^{-4} s^{-1} 条件下获得的强度显著高于本实验在应变速率 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 条件下得到的结果, 居庸关花岗岩强度高的原因一方面与实验应变速率高有关, 另一方面, 与实验样品的结构有关. 如本实验样品花岗岩中的长石、石英、黑云母等矿物呈半自形-

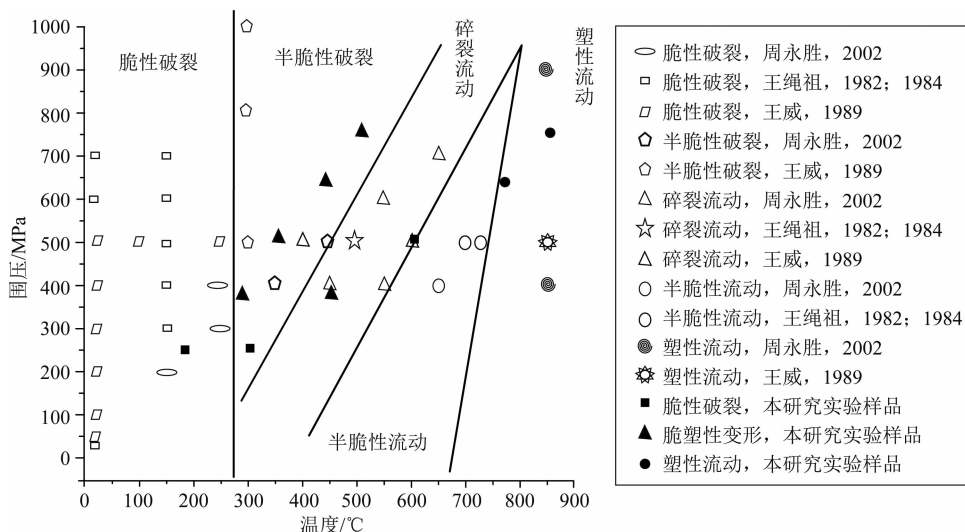


图 8 花岗岩脆塑性转化随温度和围压的变化规律

Fig. 8. The brittle plastic transition of granite with temperature and confining pressure conditions

它形,颗粒间发育微孔隙和微缝隙,而居庸关花岗岩的斜长石和钾长石呈自形-半自形板状,石英呈半自形-它形,无微裂隙和孔隙(周永胜和何昌荣, 2002, 2009). 在相同温度、压力和应变速率等条件下,含自形-半自形板状矿物并且无微裂隙的居庸关花岗岩比含它形矿物和含微裂隙的彭灌杂岩花岗岩强度要高得多. 但所有结果显示,在 15~20 km 深度,花岗岩具有极高的强度,本实验结果的强度随深度变化规律与前人实验结果具有很好的一致性(图 9).

4.3 花岗岩破裂强度和脆塑性转化强度与摩擦强度对比

把本实验两组力学数据用应力莫尔圆表达,结

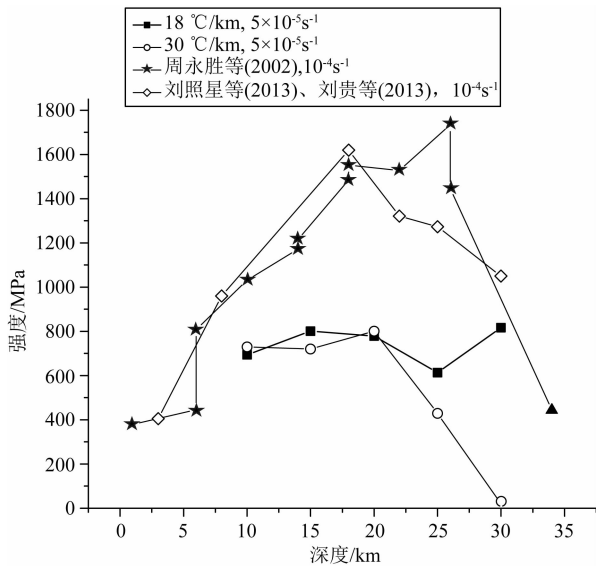


图 9 花岗岩强度随深度变化规律的对比

Fig. 9 The strength of granite with depths compared the data in this study with other data

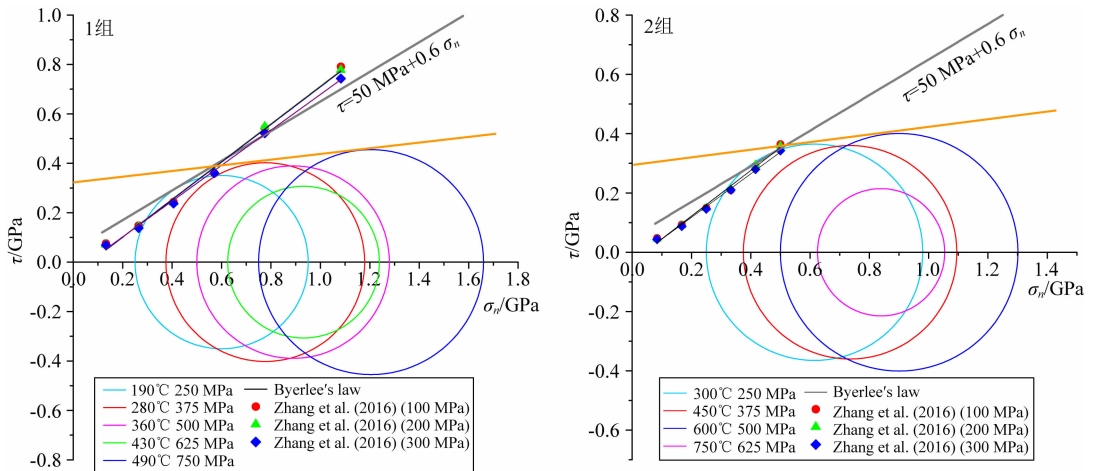


图 10 实验力学数据的应力莫尔圆

Fig. 10 The stress Mohr circle presentation of experimental data and compared with frictional data of Zhang et al. (2016)

果如图 10 所示. 其中,围压 σ_3 为圆心、把差异应力 ($\Delta\sigma$) 换算为剪切应力 τ 作为直径画圆. 大部分圆的包络线为库仑破裂准则给出的破裂强度曲线(图中黄色直线). 从图 10 中可以发现,代表地壳深部的高温塑性变形实验样品,虽然有比较高的实验围压,但由于强度比较小,得到的应力莫尔圆直径小,且远低于破裂包络线.

为了对拼完整岩石的破裂强度和断层摩擦强度,在两组应力莫尔圆中(图 10),增加了拜尔利摩擦曲线(图中黑色直线)和花岗岩糜棱岩的摩擦强度曲线(图中红绿蓝点和对应的直线)(Zhang and He, 2016). 从图 10 中得出,在围压低于 500 MPa 时,断层的摩擦强度小于岩石破裂强度,在围压高于 500 MPa 时,岩石的破裂强度小于断层摩擦强度,这一围压转折点接近于 10 km 深度,这一结果与 Pec 等(2016)的结果类似.

因此,在龙门山地区地壳 10 km 之上,先存断层控制了浅部地壳的强度,在 10 km 之下,彭灌杂岩的破裂强度控制了中部地壳的强度. 由此可见,彭灌杂岩的强度及其随深度变化特征对汶川地震的孕育和发生具有重要控制作用.

4.4 彭灌杂岩强度随深度变化规律揭示的汶川地震孕育和发生机制

根据龙门山断层带的流变结构(图 11a)(周永胜和何昌荣, 2009; 周永胜等, 2014; Han et al., 2016),在间震期平均应变速率约 10^{-15} s^{-1} 和静水压条件下,断层脆塑性转化深度约 19 km,对应的断层极限强度约 800 MPa. 在震前快速加载、同震破裂和震后松弛阶段,应变速率显著增加,可以达到 10^{-12} s^{-1} (Trepmann and Stöckhert, 2003; Wintsch and Yeh,

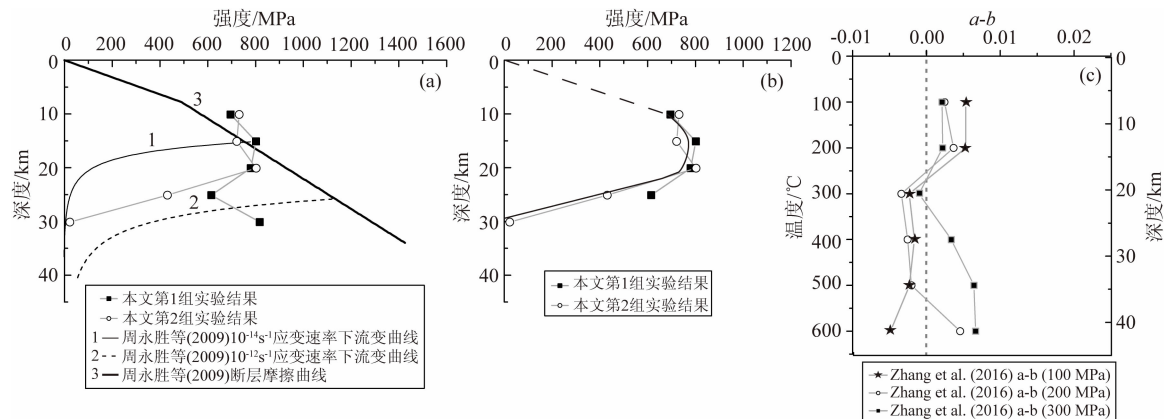


图 11 根据龙门山断层带的流变结构、彭灌杂岩强度随深度变化、摩擦滑动速度依赖性参数($a-b$)给出的地震成核条件

Fig. 11 The earthquake nucleation conditions inferred from rheological profile of the Longmenshan fault zone, strength of the Pengguan Complex as well as frictional velocity dependence value ($a-b$)

2013),脆塑性转化深度也随之增加,达到了 28 km,对应的断层极限强度约 1100 MPa.

把本研究获得的彭灌杂岩强度随深度变化结果与龙门山断层带的流变结构对比(图 11a)发现,彭灌杂岩在 10~20 km 的强度与流变结构中的极限强度很接近. 本实验结果,结合流变结构,确定的彭灌杂岩强度随深度变化剖面(图 11b)表明,10~25 km 具有最高强度,由半脆性向塑性转化发生在 25 km,该深度大于间震期应变速率约 10^{-15} s^{-1} 时的断层脆塑性转化深度 19 km,但很接近在震前快速加载、同震破裂和震后松弛阶段应变速率 10^{-12} s^{-1} 条件下的脆塑性转化深度 28 km. 根据花岗糜棱岩的摩擦滑动稳定性实验(Zhang and He, 2016),基于速度-状态摩擦本构关系,滑动稳定性参数 $a-b < 0$ 对应于断层不稳定滑动,具备地震成核条件,而 $a-b > 0$ 对应于断层稳定滑动,不利于地震孕育. 实验结果显示,在 15~30 km,滑动稳定性参数 $a-b < 0$ (图 11c). 根据汶川地震定位结果,主震的震源深度不超过 19 km,余震分布深度小于 30 km(陈九辉等,2009; Chen et al., 2010),这表明汶川地震深度分布与断层流变结构和彭灌杂岩的强度特征相吻合,主震深度处于彭灌杂岩强度最大的范围,并且断层在该深度范围具备地震成核的条件. 因此,把流变结构、彭灌杂岩强度随深度变化规律和滑动稳定性参数 $a-b$ 结合起来,可以得出,彭灌杂岩在 10~20 km 的高强度是汶川地震孕育和发生的必要条件.

5 结论

(1) 实验结果表明,两组实验样品在 10~20 km

深度都具有很高的强度,彭灌杂岩在该深度处于脆性-脆塑性转化域,而在 25~30 km 实验样品强度显著降低,彭灌杂岩进入塑性流变域.

(2) 以花岗岩为代表的彭灌杂岩在地壳 15~20 km 时深度强度达到最大值,这与流变结构中的极限强度很接近. 在该深度范围彭灌杂岩的破裂强度不仅决定了中部地壳的强度,而且控制了断层不稳定滑动,具备地震成核条件.

(3) 基于彭灌杂岩强度随深度变化规律与流变结构和滑动稳定性参数 $a-b$ 得出,彭灌杂岩在 10~20 km 的高强度是汶川地震的孕育和发生的必要条件. **致谢** 本论文实验是在张培震院士和马胜利研究员的建议下开展的,从实验设计到实验结果都与他们进行了多次讨论,特此致谢!

References

- Chen J H, Liu Q Y, Li S C, et al. 2009. Seismotectonic study by relocation of the Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake sequence. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 52(2): 390-397.
- Chen J H, Froment B, Liu Q Y, et al. 2010. Distribution of seismic wave speed changes associated with the 12 May 2008 $M_w 7.9$ Wenchuan earthquake. *Geophysical Research Letters*, 37(18): L18302, doi: 10.1029/2010GL044582.
- Dang J X, Zhou Y S, Rybacki E, et al. 2017. An experimental study on the brittle-plastic transition during deformation of granite. *Journal of Asian Earth Sciences*, 139: 30-39, doi: 10.1016/j.jseaes.2016.08.023.
- Duan Q B, Yang X S, Ma S L, et al. 2016. Fluid-rock interactions in seismic faults: Implications for the structures and mineralogical and geochemical compositions of drilling cores from the rupture of the 2008 Wenchuan earthquake, China. *Tectonophysics*,

- 666; 260-280.
- Gerald J F D, Stünitz H. 1993. Deformation of granitoids at low metamorphic grade. I: Reactions and grain size reduction. *Tectonophysics*, 221(3-4): 269-297.
- Han L, Zhou Y S, Dang J X, et al. 2009. Temperature calibration for 3 Gpa molten salt medium triaxial pressure vessel. *Chinese Journal of High Pressure Physics* (in Chinese), 25(6): 407-414.
- Han L, Zhou Y S, Yao W M. 2013. A simulating experimental study on crack healing and the formation of high pore fluid pressure in faults of middle crust. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(1): 91-105, doi: 10.6038/cjg20130110.
- Han L, Zhou Y S, He C R, et al. 2016. Sublithostatic pore fluid pressure in the brittle-ductile transition zone of Mesozoic Yingxiu-Beichuan fault and its implication for the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake. *Journal of Asian Earth Sciences*, 117: 107-118, doi: 10.1016/j.jseas.2015.12.009.
- Liu G, Zhou Y S, Yao W M, et al. 2013. Experimental study on the effect of pre-existing fabric to deformation of granitic gneiss under high temperature and pressure. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(7): 2332-2347, doi: 10.6038/cjg20130720.
- Liu G, Zhou Y S, He C R, et al. 2016. An experimental study of effect of pre-existing fabric on deformation of foliated mylonite at high temperature and pressure. *Geological Journal*, 51(1): 92-112, doi: 10.1002/gj.2611.
- Liu G, Zhou Y S, Shi Y L, et al. 2017. Strength variation and deformational behavior in anisotropic granitic mylonites under high-temperature and-pressure conditions-an experimental study. *Journal of Structural Geology*, 96: 21-34.
- Liu Q Y, Van Der Hilst R D, Li Y, et al. 2014. Eastward expansion of the Tibetan Plateau by crustal flow and strain partitioning across faults. *Nature Geoscience*, 7(5): 361-365, doi: 10.1038/NNGEO2130.
- Liu Z X, Zhou Y S, Liu G, et al. 2013. Axial friction calibration for 3 Gpa molten salt medium triaxial pressure vessel under high pressure and high temperature. *Chinese Journal of High Pressure Physics* (in Chinese), 27(1): 19-28.
- Liu-Zeng J, Zhang Z, Wen L, et al. 2009. Co-seismic ruptures of the 12 May 2008, M_s 8.0 Wenchuan earthquake, Sichuan; East-west crustal shortening on oblique, parallel thrusts along the eastern edge of Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 286(3-4): 355-370.
- Pec M, Stünitz H, Heilbronner R, et al. 2016. Semi-brittle flow of granitoid fault rocks in experiments. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(3): 1677-1705.
- Trepmann C A, Stöckhert B. 2003. Quartz microstructures developed during non-steady state plastic flow at rapidly decaying stress and strain rate. *Journal of Structural Geology*, 2003, 25(12): 2035-2051.
- Wang S Z, Zhang L. 1982. Deformation and failure of Zhoukoudian granodiorite at the crustal temperature and pressure. *Seismology and Geology* (in Chinese), 4(4): 68-91.
- Wang S Z, Zhang L. 1984. Shear fracture and stick-slip—a study on shock-generation mechanism of strong shallow earthquakes. *Seismology and Geology* (in Chinese), 6(2): 63-73.
- Wang W, Wang S Z, Cui X F. 1989. Strength Characteristics of Juyongguan granite and Jinan gabbro at geologic crustal conditions. *Modern Crustal Movement Research* (in Chinese), (4): 163-168.
- Wintsch R P, Yeh M W. 2013. Oscillating brittle and viscous behavior through the earthquake cycle in the Red River Shear Zone: Monitoring flips between reaction and textural softening and hardening. *Tectonophysics*, 587: 46-62.
- Xu X W, Wen X Z, Yu G H, et al. 2009. Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake, China. *Geology*, 37(6): 515-518.
- Zhang L, He C R. 2016. Frictional properties of phyllosilicate-rich mylonite and conditions for the brittle-ductile transition. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(4): 3017-3047.
- Zhang P Z, Xu X W, Wen X Z, et al. 2008. Slip rates and recurrence intervals of the Longmen Shan active fault zone, and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 51(4): 1066-1073.
- Zhang P Z, Wen X Z, Shen Z K, et al. 2010. Oblique, high-angle, listric-reverse faulting and associated development of strain: The Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, China. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 38(1): 353-382.
- Zhang P Z. 2013a. Beware of slowly slipping faults. *Nature Geoscience*, 6(5): 323-324.
- Zhang P Z. 2013b. A review on active tectonics and deep crustal processes of the Western Sichuan region, eastern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 584: 7-22.
- Zhao G Z, Unsworth M J, Zhan Y, et al. 2012. Crustal structure and rheology of the Longmenshan and Wenchuan M_w 7.9 earthquake epicentral area from magnetotelluric data. *Geology*, 40(12): 1139-1142, doi: 10.1130/G33703.1.
- Zhou Y S, Jiang H K, He C R. 2002. Experiments of brittle-plastic transition, modes of instability of Juyongguan granite at different T-P condition. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 18(4): 389-400.
- Zhou Y S, He C R. 2009. The rheological structures of crust and mechanics of high-angle reverse fault slip for Wenchuan M_s 8.0 earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 52(2): 474-484.
- Zhou Y S, Han L, Jing C, et al. 2014. The rheological structures of brittle-plastic transition in Longmenshan fault zone and seismogenic mechanism of Wenchuan earthquake. *Seismology and Geology* (in Chinese), 36(3): 882-895.
- Zhu S B, Zhang P Z. 2010. Numeric Modeling of the Strain Accumulation and Release of the 2008 Wenchuan, Sichuan, China, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(5B): 2825-2839.
- Zhu S B, Zhang P Z. 2013. FEM simulation of interseismic and

coseismic deformation associated with the 2008 Wenchuan Earthquake. *Tectonophysics*, 584: 64-80.

附中文参考文献

- 陈九辉, 刘启元, 李顺成等. 2009. 汶川 $M_s 8.0$ 地震余震序列重新定位及其地震构造研究. *地球物理学报*, 52(2): 390-397.
- 韩亮, 周永胜, 党嘉祥等. 2009. 3GPa 熔融盐固体介质高温高压三轴压力容器的温度标定. *高压物理学报*, 25(6): 407-414.
- 韩亮, 周永胜, 姚文明. 2013. 中地壳断层带内微裂隙愈合与高压流体形成条件的模拟实验研究. *地球物理学报*, 56(1): 91-105, doi: 10.6038/cjg20130110.
- 刘贵, 周永胜, 姚文明等. 2013. 组构对花岗片麻岩高温流变影响的实验研究. *地球物理学报*, 56(7): 2332-2347, doi: 10.6038/cjg20130720.
- 刘照星, 周永胜, 刘贵等. 2013. 3 GPa 熔融盐固体介质三轴高温压力容器的轴压摩擦力标定. *高压物理学报*, 27(1): 19-28.
- 王绳祖, 张流. 1982. 地壳温压条件下周口店花岗闪长岩的变形破坏. *地震地质*, 4(4): 68-91.
- 王绳祖, 张流. 1984. 剪切破裂与粘滑—浅源强震发震机制的研究. *地震地质*, 6(2): 63-73.
- 王威, 王绳祖, 崔效峰. 1989. 地壳温压条件下居庸关花岗岩、济南辉长岩的强度特征. *现代地壳运动研究*, (4): 163-168.
- 张培震, 徐锡伟, 闻学泽等. 2008. 2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因. *地球物理学报*, 51(4): 1066-1073.
- 周永胜, 蒋海昆, 何昌荣. 2002. 不同温压条件下居庸关花岗岩脆塑性转化与失稳型式的实验研究. *中国地震*, 18(4): 389-400.
- 周永胜, 何昌荣. 2009. 汶川地震区的流变结构与发震高角度逆断层滑动的力学条件. *地球物理学报*, 52(2): 474-484.
- 周永胜, 韩亮, 靖晨等. 2014. 龙门山断层脆塑性转化带流变结构与汶川地震孕震机制. *地震地质*, 36(3): 882-895.

(本文编辑 胡素芳)