

水热交替对红层泥岩崩解的影响

郭永春, 谢 强, 文江泉

(西南交通大学地质学院, 成都 610031)

摘要: 在既有研究基础上, 应用岩石热物理学、毛细作用原理重点探讨了温度、水等因素的湿热交替效应对红层泥岩崩解过程的影响, 尤其是水侵入前红层泥岩的结构状态以及水热交替等因素对红层泥岩崩解的促进作用。研究表明: 在周期性热应力的影响下, 在红层泥岩表层 0.3 ~ 0.4 m 深度以上产生较大热应力, 导致岩体内部裂隙发育, 为水的侵入创造了结构条件; 水热交替是导致红层泥岩产生迅速崩解的主要动力; 红层泥岩有效崩解深度为 20 ~ 30 cm/a; 红层泥岩的崩解过程可以分为开挖揭露、温度效应、水的作用、干湿循环(时间效应)、剥落作用五个阶段, 是水、热、力等因素综合作用的结果。

关键词: 崩解; 温度; 水; 泥岩; 红层

中图分类号: TU411.91

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2012)05-0069-05

崩解是粘土岩类岩石普遍存在的水理现象, 已有研究表明^[1~7], 水是导致泥岩崩解的主要诱发因素。关于崩解机理的认识主要有气压致裂效应、水膜膨胀效应、渗透-吸力效应等观点, 重点在于探讨水侵入岩体内部裂隙后的变化机制, 为深入理解红层泥岩崩解机理奠定了基础。然而, 如果将新鲜红层泥岩直接放入水中, 忽略中间的暴露时间, 浸泡 30 天后, 试样仍然完好, 没有发生崩解^[1]。开挖前, 密闭赋存环境下红层泥岩中存在的微小原生裂隙没有外界因素的干扰, 这些细小裂隙在岩体中的破坏作用不显著。由于泥岩本身不透水, 因此, 如果没有足够的结构裂隙, 水是无法深入红层泥岩内部进行破坏的。暴露在地表的红层泥岩接触的主要环境因素是水和热^[8~10], 尤其是水、热因素在年、月、日内的交替变化, 严重影响着红层泥岩中裂隙的发育变化, 控制着红层泥岩的崩解进程。

因此, 研究红层泥岩崩解前的裂隙变化, 尤其是水热交替变化对红层岩体结构的改造机制, 对于深入理解红层泥岩崩解过程, 为红层边坡设计施工防治具有参考意义。本文结合既有研究和四川地区野外红层调查, 在大量崩解模拟实验基础上, 对水热交替对红层泥岩崩解的影响做了进一步探讨。

1 红层泥岩崩解的基本过程

处于裸露环境中的新鲜红层泥岩与温度、水、空气相互作用, 开始崩解的基本过程。图 1 是四川遂宁盆地遂宁组泥岩的崩解过程照片, 图 1a 是新鲜红层泥岩开始放置室外的照片, 岩石表面裂隙较少; 图 1b 是第 3 天的照片, 试样表面产生了显著的网状裂纹, 同时经历 72 h 的湿热变化; 图 1c 是第 5 天的照片, 岩石从内部产生了破裂, 分成了几个部分; 图 1d 是经历 10 天后的照片, 由于期间湿热变化和降雨影响, 岩石完全变成碎屑。导致其发生崩解的过程主要有以下几点: (1) 红层泥岩中原生的微小裂隙为空气和水进一步侵入岩体内部创造了条件, 这些原生微小裂隙是红层泥岩的缺陷和薄弱环节, 为进一步崩解提供最初的条件; (2) 温度影响下的胀缩破裂与蒸发拉裂; (3) 雨水入渗导致破裂扩张与数量增加; (4) 干湿循环的时间效应; (5) 冲刷、风吹和重力作用下的剥落。

2 温度影响下的胀缩破裂与蒸发拉裂

野外调查表明, 高温环境是崩解发生的有利条件^[1]。对于半无限地表面, 假设岩石内部温度成简谐波变化, 可得其内部温度分布随时间 τ 和深度 z 变化的函数^[11]:

$$T(z, \tau) = T_m \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{\alpha\tau_0}}z\right) \cos\left(\sqrt{\frac{\pi}{\alpha\tau_0}}z - \frac{2\pi\tau}{\tau_0}\right) + T_0 \quad (1)$$

式中: $T(z, \tau)$ ——地层中任一点处的温度;

T_0 ——岩土体中近地表常温带温度, 近似等于当

收稿日期: 2011-11-14; 修订日期: 2011-12-31

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目资助
(A09205020511113-139)

作者简介: 郭永春(1973-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为特殊岩土工程。

E-mail: ycguo@home.swjtu.edu.cn

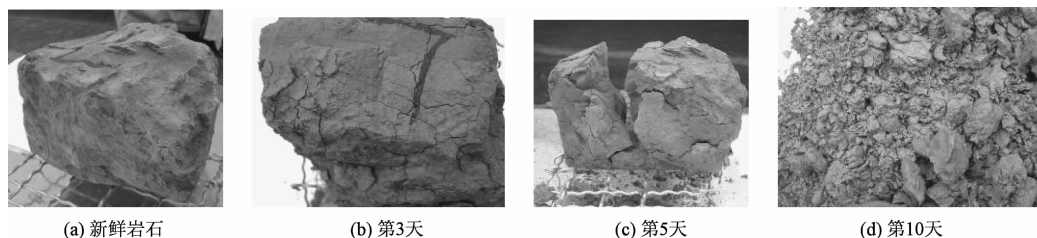


图1 红层泥岩崩解现象

Fig.1 Slaking phenomenon of redbeds

地平均气温;

T_m ——温度振幅,取年、月、日内当地温度变化的最大温差;

τ_0 ——温度变化的时间周期,可取为年、月、日周期;

α ——岩石的导温系数。

其最大波长 $l = 2 \sqrt{\pi \alpha \tau_0}$ 即为热波在相应周期内的最大理论影响深度。

综合四川地区研究资料^[8,10,11],四川地区红层泥岩热应力相关计算参数如表1所示。

表1 红层泥岩热应力计算参数

Table 1 Parameters of thermal-stress of redbeds

参数	红层泥岩	参数	红层泥岩
弹性模量 E (MPa)	2000	导热系数 k (W/m $^{\circ}$ C)	2
热膨胀系数 a ($^{\circ}$ C)	6×10^{-6}	热容 ρ_c (J/m 3 $^{\circ}$ C)	1.64×10^6
抗压强度 σ_c (MPa)	1.2	导温系数 α (m 2 /h)	0.0044
抗拉强度 σ_t (MPa)	0.2	昼夜平均温度 T_0 ($^{\circ}$ C)	20
粘聚力 C (MPa)	0.1	温度变幅 T_m ($^{\circ}$ C)	20
内摩擦角 φ ($^{\circ}$)	25		

根据 $l = 2 \sqrt{\pi \alpha \tau_0}$, 利用表1中的数据,可以得到红层泥岩日周期(τ_0 取24h)最大影响深度约为1.15m,月周期(τ_0 取 30×24 h)最大影响深度6.28m,年周期(τ_0 取 $365 \times 30 \times 24$ h)最大影响深度22m。岩体中的温度变幅:

$$\Delta T = T(z, \tau) - T_0 = T_m \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{\alpha \tau_0}} z\right) \cos\left(\sqrt{\frac{\pi}{\alpha \tau_0}} z - \frac{2\pi \tau}{\tau_0}\right) \quad (2)$$

式(2)是在不同日照时间作用下岩体内温度变化的大小,正是由于温度的变化导致岩土体产生热膨胀变形,进而产生热应力,拉裂岩土体。假设岩石的弹性模量和膨胀系数相同,热应力 σ_{th} 可按式计算:

$$\sigma_{\text{th}} = E \times \varepsilon = E \times a \times \Delta T \quad (3)$$

式中: E ——岩石的弹性模量;

ε ——热应变;

a ——热膨胀系数。

比较岩土体热应力与抗拉强度 R_t 或抗剪强度 τ_t 的大小,即可以判断热应力对岩石的破坏程度。即:

$$\sigma_{\text{th}} \geq R_t \text{ 或 } \sigma_{\text{th}} \geq \tau_t \quad (4)$$

将式(2)代入式(3),根据表1中的数据进行计算,可以得到四川盆地红层泥岩中热应力随深度和时间变化规律。图2是红层泥岩从地表到地下2m深度范围内经历0~3h日照得到的热应力随深度变化曲线。图3是红层泥岩经历日周期24h日照、其内部0~0.8m深度范围内热应力的分布曲线。

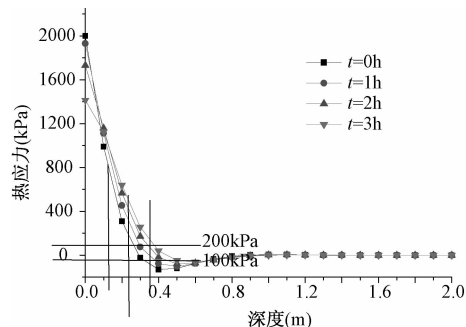


图2 热应力随深度变化曲线

Fig.2 Curve of thermal-stress with depth

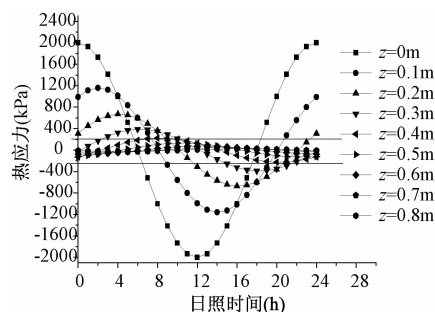


图3 热应力随时间变化曲线

Fig.3 Curve of thermal-stress with time

从图2和图3可知:随着深度增加,热应力急剧减小,其剧烈变化深度在0.3~0.4m,从图2中可看出,在0.4m深度处,经过0~3h的日照,其热应力就可以

达到 100kPa, 在 0.3m 深度处, 日照时间超过 1h, 其热应力就超过 100kPa, 日照达到 3h, 热应力已经超过 200kPa, 达到或超过了红层泥岩的抗拉强度 200kPa 或粘聚力 100kPa, 导致岩石内部裂隙产生, 破坏岩体, 即热应力有效影响深度为 0.3 ~ 0.4m。之后, 热应力在零附近起伏变化, 远小于岩石强度, 不能引起岩石的进一步破坏。由此可以认为: 红层泥岩在日周期热应力影响下的有效破裂深度为 0.3 ~ 0.4m, 这个有效深度可能就是新鲜红层泥岩首次崩解的临界深度。

在热应力的反复作用下, 导致烘干泥岩试样表面常出现网纹状微小裂隙, 遍布整个烘干试样, 切割岩体, 破坏泥岩内部结构, 导致岩石完整性丧失, 为进一步崩解破坏创造了条件。

同时, 岩体内温度变化产生的热能 $E_T = C \times m \times \Delta T$, 利用表 1 参数计算单位体积红层岩体由于温度变化 20℃ 产生的热能 $E_T = 32.8 \times 10^6 \text{ J}$, 足以克服岩体内单位质量水分的蒸发能 $E_w = 2.45 \times 10^6 \text{ J}$, 导致岩体内水分散失, 其产生的单位面积表面张力在 20℃ 时为 $T_s = 72.7 \times 10^{-5} \text{ N/cm}$, 可以克服粘土矿物颗粒之间的分子力约为 $F = \times 10^{-7} \text{ N}^{[2,3]}$, 使粘土矿物颗粒之间拉裂, 产生微观裂隙, 客观上促进了岩体结构的进一步破坏。

实际上, 红层泥岩是热的不良导体, 白天在阳光下曝晒, 表层温度升高很快, 表面体积膨胀, 而内部温度相对较低, 膨胀量较小, 内外不均匀膨胀, 导致拉张裂隙产生。夜间, 外部温度急剧降低, 内部温度相对升高, 外部收缩, 内部膨胀, 在过渡部位产生更多的挤压裂隙, 岩石内部的微小裂隙将比预计的更多。

3 雨水入渗导致的破裂扩张与数量增加

雨水沿着红层泥岩表层裂隙入渗, 使得表层岩体进一步软化, 加剧了不可恢复变形的积累, 另一方面导致既有裂隙深度的进一步扩张和裂隙数量的增加, 破坏岩石的结构连接。

水首先进入岩石表层空隙, 排出气体, 然后水与粘土矿物相互作用, 粘土矿物颗粒表层水膜增厚, 体积膨胀, 挤压周围土颗粒, 使其沿着结构连接相对脆弱的位置开裂, 产生新的裂隙, 增加裂隙数量, 贯通既有裂隙。

雨水的急剧侵入, 迫使水进入岩石内部裂隙, 在热应力有效深度 0.3 ~ 0.4m 内, 水与粘土矿物水化作用, 溶解、溶蚀红层泥岩中的可溶成分, 破坏颗粒间的有效连接, 使得局部裂隙增加, 由于裂隙的切割, 部分细小岩屑与基岩间的胶结连接丧失, 裂隙贯通, 形成微

观裂隙结构面, 细小岩屑呈镶嵌状态附着在岩体表层。毛细水的作用深度 H_k 可用下式计算:

$$H_k = \frac{2T_s \cos \theta}{r \times \gamma_w} \quad (5)$$

式中: T_s ——水的表面张力, 20℃ 时 $T_s = 72.7 \times 10^{-5} \text{ N/cm}$;

θ ——水的接触角, 为简单计, 取 $\theta = 0^\circ$;

r ——裂隙宽度;

γ_w ——水的密度。

代入式(5), 可简化为: $H_k = 0.153/r(\text{cm})$ 。设经热应力作用后, 岩石表面裂隙宽度为 0.01cm, 则 20℃ 时毛细水的有效作用深度约为 15.3cm, 即水对岩体进一步软化、溶蚀的深度, 实际上岩石表面裂隙开度会更小, 毛细水侵入深度可能会更深。

因此, 在这个深度范围内, 泥岩中的粘土矿物吸水膨胀, 可溶盐分溶解, 红层泥岩裂隙会进一步被破坏、泥化、溶解, 使得既有裂隙进一步扩张、润滑。即在 0.15 ~ 0.20m 深度范围内岩土体的破坏将会进一步加剧, 降低已经破裂块体之间的连接强度。

4 冲刷、风吹和重力作用下的剥落

红层泥岩崩解过程中, 雨水冲刷、风吹、重力等因素也在同时对破裂的岩屑进行剥离破坏, 在雨水冲刷力(雨滴溅蚀力)、风压力、重力以及震动作用下, 与岩屑和基岩之间的连接力相互抗衡。随着干湿循环的持续进行, 岩屑与基岩之间的连接逐渐减弱, 因而会在某次暴雨、大风或在重力等因素的单独或综合影响下, 脱离基岩岩体、剥落, 完成一个崩解过程。

5 干湿循环的时间效应

在第一个干湿循环完成后, 岩体内部的裂隙仍然是比较微小的, 但是, 红层泥岩内部破裂会随着时间的积累, 经历周期性的干湿循环影响, 尤其是在南方高温多雨季节, 频繁的干湿变化, 使得红层泥岩崩解破坏逐渐积累, 逐步达到脱离基岩岩体的临界状态。

反复的湿热交替作用, 使得岩土体表层 0 ~ 30cm 范围内岩土体产生疲劳破坏, 破坏碎屑颗粒的大小 2 ~ 5mm, 奠定了 1 次崩解破坏的临界深度, 也就是其 1 次坡面剥落的临界厚度。

干湿循环的时间长度首先是晴天和雨天的频繁变化为天循环, 以积累不可逆微小破裂为主, 同时, 又以季节剧烈变化为更大的周期, 季节剧变, 可以导致红层泥岩积累的微小破裂产生突变, 剥离基岩岩体。野外

观察表明:这个过程多以年为单位,即每年的崩解厚度为 20~30cm,其崩解速率为 0.55~0.82mm/d。

6 讨论与分析

(1) 崩解发生的阶段性

崩解过程包括以下阶段:开挖揭露、温度效应、水的作用、干湿循环(时间效应)、剥落作用五个阶段。开挖揭露使得泥岩赋存环境产生突变,直接与环境因素接触;温度效应导致岩石内部裂隙的扩张和数量的增加,为水的侵入创造了结构基础。水是诱发岩石进一步崩解的促进因素,软化、溶蚀裂隙表面,贯通裂隙,加剧岩石结构的进一步破坏。随着时间的积累,干湿循环效应反复进行,积累不可逆破坏,使得岩石碎屑呈镶嵌状附着在边坡表面。松散镶嵌在边坡表面的岩石碎屑,在雨水冲刷、风吹、重力、震动等因素的作用下,脱离坡体,堆积在坡脚,一次崩解作用完成。

(2) 崩解作用深度

在红层泥岩崩解过程中,热应力的有效作用深度为 0~30cm,毛细水的有效侵入深度为 0~15cm,野外观测^[1,8,9]的每年崩解作用的深度为 10~15cm。综合上述三方面的结果,初步提出红层泥岩在一年内的有效崩解深度约为 15cm,即红层泥岩一年内可能剥落的厚度约为 15cm。实际上,由于已崩解破坏的岩体的覆盖作用,其下部新鲜红层泥岩的崩解速度将会急剧减慢,工程实践中,将开挖的坡面及时进行喷浆、抹面、植被等坡面防护措施也可以起到类似的效果^[8]。

(3) 崩解作用速度

研究资料表明^[1,12],自然状态下裸露泥岩年风化厚度一般平均可达 2~4cm,最高可达 6~8cm,最低在 0.1cm 以下;泥岩岩块在露天条件下自然风化崩解 2 个月,大部分崩解成碎块或碎屑,风化 1 年后,小于 1mm 颗粒平均含量约 18%,最高可达 51%,容易被地表流水带走。烘干或风干红层泥岩岩块放入水中,完全崩解破坏仅需 1min 左右,甚至更短。

如果泥岩岩块侧向密封,仅一面暴露,经历 2 个干湿循环(烘箱烘干、完全浸水),崩解速率显著降低^[1],仅表层出现网纹状裂隙,由于裂隙增加,导致体积膨胀变形,崩解膨胀率约为 3.5%,和野外观察结果接近,说明红层泥岩赋存条件对崩解速率影响较大,室内无约束浸水崩解试验是红层泥岩遭受极端条件下的试验速率,现场有侧向约束条件下的崩解速率要比室内试验结果低得多。现场开挖施工中,在现有的机械化施工条件下,红层泥岩表面防护时间是足够的。

(4) 崩解作用程度

红层泥岩崩解作用程度的判别参考指标有崩解形式、耐崩解指数、崩解率、崩解时间等。耐崩解指数是国际岩石力学学会实验室委员会推荐的方法,主要用来评估岩石遭受极端干湿循环之后对软化和崩解所表现的抵抗能力,它用干湿循环过程中岩石试样质量损失来衡量岩石的耐崩解性。由于实验是在岩石含水量急剧变化和在动力扰动环境中进行,故与一般岩石崩解的静态环境差异较大。对于易于崩解的泥岩、粉砂岩等红层岩石,崩解多在短时间内完成,崩解率和崩解时间等指标差异不大。对比研究表明^[1]:崩解形式指标简单明了,使用方便。其主要是根据烘干泥岩试样浸入水中崩解速度和破碎程度来判别,可以分为泥状崩解、碎屑状、碎块状、块状、不崩解五个等级,可以作为崩解程度的初步判别指标。

7 结论与建议

(1) 红层泥岩的崩解过程受岩体结构、温度、水等环境因素的影响显著,尤其是水热交替、含水量的变化对红层泥岩的影响较大,是这些因素综合作用的结果。

(2) 红层泥岩崩解过程大体分为开挖揭露、温度效应、水的作用、干湿循环(时间效应)、剥落作用五个阶段。

(3) 新鲜红层泥岩首次崩解的有效深度约为 20cm,其崩解速率受具体条件影响较大,评价其崩解程度的指标建议选用崩解形式,较为方便和实用。

限于条件,文中讨论的泥岩和环境条件仅限于四川盆地红层泥岩,其它地区的崩解问题还需要结合具体条件,进行讨论。

参考文献:

- [1] 郭永春. 红层岩土物理化学效应及其工程应用研究 [D]. 成都:西南交通大学,2007:100-141. [GUO Y C. Study and practice of water rock physical and chemical interaction in red beds region [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007: 100-141. (in Chinese)]
- [2] 奥西波夫. 粘土类土和岩石的强度与变形性能的本质 [M]. 李生林, 张之一(译), 张宗祜(校). 北京:地质出版社,1985:152-168. [Osipov. Properties of stress and strain of clayey soils & rocks [M]. Translated by LI S L and ZHANG Z Y. Checked by ZHANG Z H. Beijing: Geology Publishing House, 1985:152-168. (in Chinese)]

- [3] Mitchell J K. 岩土工程土性分析原理[M]. 高国瑞(等译). 南京:南京工学院出版社,1988:208-230. [Mitchell J K. Fundamentals of soil behavior [M]. Translated by GAO G R, *et al.* Nanjing: Publishing House of Technical College of Nanjing, 1988:208-230. (in Chinese)]
- [4] 谭罗荣,孔令伟. 特殊岩土工程土质学[M]. 北京, 科学出版社,2006:54-73. [TAN L R, KONG L W. Soils tectonics of special geotechnic [M]. Beijing: Sciences Press, 2006: 54-73. (in Chinese)]
- [5] 郭永春,谢强,文江泉. 红层软岩结构特征与工程评价初探[J]. 水文地质工程地质,2010,37(6):86-90. [GUO Y C, XIE Q, WEN J Q. Engineering criterion of structure-stability of soft rocks of red beds [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 37(6): 86-90. (in Chinese)]
- [6] 郭永春,谢强,文江泉. 红层岩土水理性质工程判别准则试验研究[J]. 岩水文地质工程地质,2008,34(4):71-74. [GUO Y C, XIE Q, WEN J Q. Experimental study on engineering criterion of water-physical property of red beds rock [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008,34(4):71-74. (in Chinese)]
- [7] 朱效嘉. 软岩的水理性质[J]. 矿业科学技术,1996(3~4):46-50. [ZHU X J. Water-physical properties of soft rocks [J]. Mining Sciences and Technic,1996(3~4):46-50. (in Chinese)]
- [8] 谢强. 铁路岩石边坡研究[D]. 成都:西南交通大学,1991:102-119. [XIE Q. Study of rock slopes of railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,1991:102-119. (in Chinese)]
- [9] 张俊云,周德培. 红层泥岩边坡快速风化规律[J]. 西南交通大学学报,2006(1):74-79. [ZHANG J Y, ZHOU D P. Fast weathering of red beds mudstone slope [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2006(1): 74-79. (in Chinese)]
- [10] 王贤能,黄润秋,黄国明. 边坡岩体浅层破坏的热应力效应研究[J]. 工程地质学报,1997,5(3):262-268. [WANG X N, HUANG R Q, HUANG G M. Study on the thermal stress effect on large failure of shallow of slope rock mass [J]. Journal of Engineering Geology, 1997, 5(3): 262-268. (in Chinese)]
- [11] 林睦曾. 岩石热物理学及其工程应用[M]. 重庆:重庆大学出版社,1991:93-101. [LIN M Z. Rock thermal physics and applying [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1991: 93-101. (in Chinese)]
- [12] 中国科学院成都分院土壤研究室. 中国紫色土(上篇)[M]. 北京:科学出版社,1991:1-119. [Institute of Soil of Chengdu Branch of Chinese Academy of Science. Chinese purple soils (first portion) [M]. Beijing: Science Press, 1997: 1-119. (in Chinese)]

Effect of the alternation of heat and water on the slaking phenomenon of redbeds

GUO Yong-chun, XIE Qiang, WEN Jiang-quan

(Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on previous studies, rock thermal physic and wicking action theories are used to examine the effect of the alternative change of heat and water on the slaking of redbeds, especially the rock structure before they are impacted by water and the alternative change of heat and water to the slaking. The results suggest that the alternative change of water and heat is the engine to the mudstone slaking. During the alternation, the fissures are built and the rock structure is created for the water permeation by the thermal stress within 0.3 ~ 0.4 m of mudstone from the surface. The effective slaking depth is about 20 ~ 30 cm/a and the slaking process can be separated into five parts: excavation, thermal effect, water action, wetting and drying cycle (time effect) and peeling off. The slaking phenomenon is caused by the coactions of water, heat and force.

Key words: slaking; heat; water; mudstone; red beds

责任编辑:张明霞