

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2015.01.019

重庆地区红层泥岩球状风化剥落特征及其形成机制

丁 瑜^{1,2}, 周忠浩³, 吴立新³, 杨 奇^{1,2}, 胡文静^{1,2}

(1. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 3. 重庆市地质矿产勘查开发局 205 地质队, 重庆 402160)

摘要: 以重庆地区红层泥岩为对象, 对其球状风化剥落的形貌、剥落层序、剥落层层数、剥落层厚度、剥落物形态及其堆积特征等进行了分析。调查和分析表明, 泥岩球状风化是水分场、温度场有关的各种风化作用共同作用的结果, 其风化剥落经历了局部变形与应力集中、风化裂隙切割、椭球化、拱形开裂与球状逐层剥落的过程。红层泥岩球状风化剥落速度快, 风化球因分叉明显, 稳定性差, 难以长久保留。

关键词: 红层; 泥岩; 球状风化; 膨胀-收缩; 风化裂隙

中图分类号: P588.22; P512.1

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2015)01-0108-05

Characteristics and mechanism of spheroidal weathering exfoliation of reded mudstone in Chongqing

DING Yu^{1,2}, ZHOU Zhonghao³, WU Lixin³, YANG Qi^{1,2}, HU Wenjing^{1,2}

(1. College of Civil Engineering & Architecture, Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. Key Laboratory of MOE Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area, Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3. No. 205 Geological Brigade, Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 402160, China)

Abstract: In this paper, the redbed mudstone in Chongqing is presented to study the spheroidal weathering exfoliation. Characteristics of exfoliation morphology, exfoliation sequence, exfoliation shells, shell thickness, exfoliation shape and exfoliation deposits are analyzed, respectively. Field investigation and analysis reveal that spheroidal weathering of mudstone is the product of weathering processes related to moisture and temperature fields. It also shows that spheroidal weathering exfoliation experience a process from local deformation and stress concentration, weathering-induced fracturing, ellipsoidal processing to arch cracking and hierarchical exfoliating. It is obvious that spheroidal weathering exfoliation of redbed mudstone is rapid and the mudstone corestone is too poorly stable to persist for a long time due to the apparent corestone branching and poor stability.

Keywords: redbed; mudstone; spheroidal weathering; expansion-shrinkage; weathering-induced fracture

0 引言

球状风化是风化过程中伴随裂隙开裂岩石中形成椭球状岩核, 岩核在后续风化中产生完整的同心壳状层并继剥落后的过程, 因其形似洋葱, 故亦被成为洋葱

状风化^[1]。以斜长石、橄榄石、辉石等矿物为主的岩石的球状风化十分突出, 如片麻岩、页岩、安山岩、砂岩、流纹岩、花岗岩等岩石^[1-2]。球状风化过程一般可归结为节理切割阶段、风化初期、风化晚期几个阶段^[3]。对砂岩球状风化的研究表明, 层状硅酸盐黏土

收稿日期: 2014-11-26; 修订日期: 2014-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41002100)

第一作者: 丁 瑜(1980-), 男, 博士, 副教授, 主要从事滑坡机理与防治、岩石风化方面研究。E-mail: thirding@163.com

矿物的膨胀是产生剥落的根本原因^[4]。根据长石、辉石、磁铁矿矿物含量对玄武岩球状风化的分析结果表明,球状剥落是岩石风化过程中体积膨胀的结果^[5]。

因富含黏土矿物、岩性软弱,红层泥岩风化异常明显,引发的各种环境地质问题十分突出,其风化规律、风化特征、风化机理等方面研究引起广泛关注^[6-9]。研究发现,温度变化、降雨对泥岩快速风化具有重要影响,红层泥岩坡面快速风化深度集中在表层10 cm深度内^[10]。受高温、降雨影响,开挖暴露的红层边坡坡面最初的风化剥落在10 d左右就可以完成^[9]。对于红层快速风化破坏,文献[10]总结了碎粒状、碎片状、碎块状崩解以及块状剥落几种破坏形式,但未进行深入分析。目前,有关泥岩球状风化的报道极少,对其球状风化特征、风化机制以及形成过程有待深入。

为此,以重庆地区侏罗系中统沙溪庙组、侏罗系上统遂宁组红层泥岩为对象,对其球状风化剥落形态、剥落层层序和厚度、剥落物进行了分析。在此基础上,对红层泥岩球状风化的机制和进程进行了探讨。本文研究对深入认识泥岩风化特性、系统研究泥岩风化机理具有重要的意义。

1 红层泥岩球状风化分布发育特征

红层以中生代特别是从侏罗纪到新近纪的岩层最为发育,四川、重庆、云南等地区,三叠系、侏罗系和白垩系红层集中分布,砂岩、泥页岩、泥岩交错互层出露^[11]。在四川盆地,受气候、植被、地理环境控制,红层风化-侵蚀循环过程形成了典型的盆地地貌景观^[12]。

研究区红层砂岩、泥岩交替出露,岩层倾角较缓,一般10°左右。砂岩多为中厚层,泥岩以薄层、中厚层为主。由于岩性差异,暴露的泥岩风化较砂岩强烈。

调查发现,泥岩球状风化在各种坡度地形中均有

发现。在较缓坡面上,出露泥岩不同部位均见球状风化,由于风化岩屑不像在陡坡坡面上会迅速剥落,加之风化球较小,揭露表层后,可见球状风化呈鳞状分布。在较陡的坡面上,在厚度较小(0.5~1.0 m)的泥岩中,球状风化不明显;中厚层、厚层泥岩陡坡坡面上,中下部球状风化十分明显。

2 红层泥岩球状风化剥落特征

2.1 形貌特征

根据现场调查,泥岩的典型球状风化剥落形态为不同尺寸大小的椭球岩核被壳状风化层围绕,壳状风化层由外向内不断剥落,层状剥落形迹清晰,最终呈现出不同大小的同心椭圆或近圆形态(图1、图2)。由于风化进程和风化程度差异,泥岩表面的风化裂隙数量和分布呈现差异。新近暴露的岩面,风化进程持续时间短,风化程度低,裂隙数量少。随着风化持续,岩面风化程度加剧,裂隙数量大大增加,裂隙交错密布切割整个岩面。次级裂隙沿各个方向萌生导致初期切割裂隙边角不断钝化,形成椭圆或近圆形风化球。

除上述特征外,红层泥岩球状风化剥落在形态上还呈现出明显的分叉特征,即较大的椭圆岩核受后续风化裂隙切割分叉,进一步分解形成多个较小的椭球岩核。较大椭球岩核在后期风化中分解为2~3个较小风化球(图1、图2)。因此,泥岩球状风化剥落过程中,风化球大小变化较大。在风化前期,形成的较大风化椭球为10~20 cm;而在后期,风化球进一步风化形成的次级小风化球大小为3~8 cm。

尽管所处局部环境条件有差异,不同岩组泥岩风化的形貌特征总体上是相同的。形貌上的共性特征表明,在物理风化、化学风化共同作用下,红层泥岩风化反应机理及演变过程具有相同的特征。

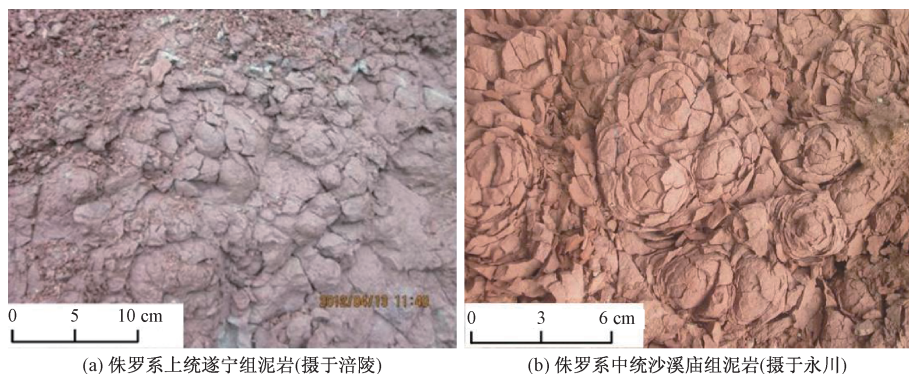


图1 红层泥岩球状风化剥落典型照片(拍摄时间2012.04、2012.08)

Fig.1 Typical photos of spheroidal exfoliation redbed mudstone

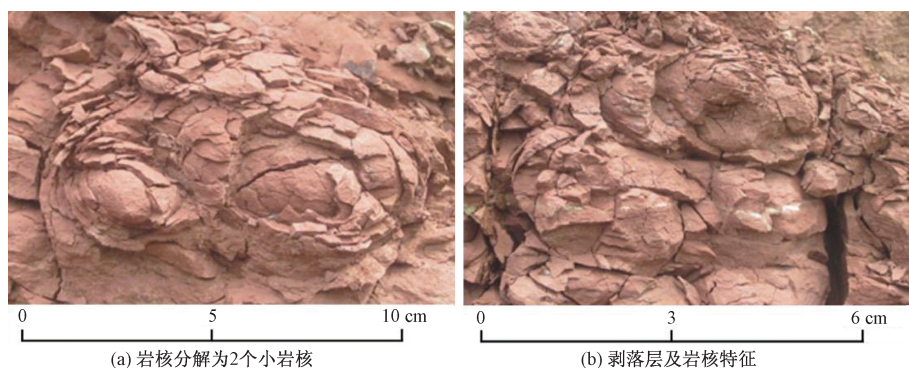


图2 球状风化剥落形态与剥落层特征(摄于永川)

Fig. 2 Characteristics of exfoliation shape and concentric shells

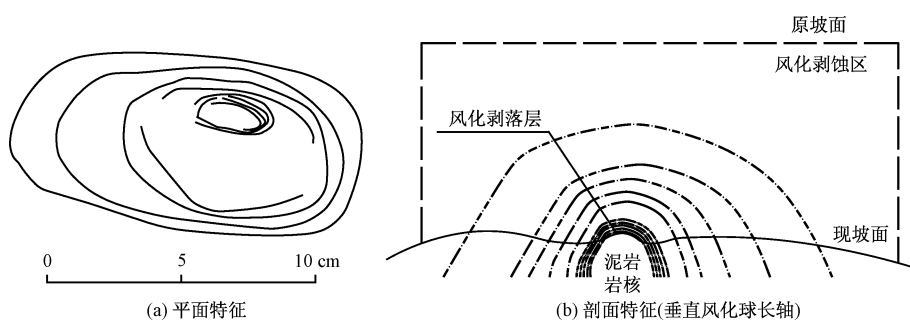


图3 典型红层泥岩球状风化剥落层平面及剖面示意图

Fig. 3 Schematic planar and profile diagrams of typical shells exfoliating for red bed mudstone

2.2 风化剥落层层序与厚度特征

泥岩球状风化过程中,剥落层形成具有明显由外到内的层序特征(图3)。风化球最外部的椭圆壳状层形成在先并继而产生剥落,靠近岩核的内层椭圆壳状层随着持续风化形成后逐次剥落,最终呈现出层序清晰的球状风化剥落特征。

红层泥岩因水分、温度变化球状风化壳状层迅速形成,在持续强烈风化作用下,壳状层会在较短时间内快速剥落。而且,因次级风化裂隙扰动,球状风化的层序存在明显的分叉。由于风化壳状层成层与剥落向岩核快速延续、分叉,泥岩球状风化剥落层稳定性较差。因此,与硬质岩石相比,红层泥岩风化球尺度较小,稳定性差,难以长久保留。

总体上,泥岩球状风化剥落层层数特征表现为随着风化进程持续而增加,而剥落层厚度具有由椭球形岩核的外层向内层逐渐减小的特征。一般地,形迹清晰的剥落层在5~8层左右,随着风化持续,剥落层可以达到10层以上(图1~图3)。而且,剥落层厚度变化明显,外层厚度约2~5 cm,中间层厚度1~2 cm,越往内层厚度越小,一般仅为数毫米(图3(b))。此外,在外层,长轴两端的剥落层厚度多大于短轴两侧;随着

风化向内层延续,剥落层厚度在长轴与短轴两侧差异越来越小(图3)。

2.3 风化剥落物特征

泥岩球状风化剥落过程中,壳状层受风化裂隙切割,部分块体与岩石完全分离并剥落。在平缓坡面,风化剥落物多停留在母岩附近,当坡面陡倾或受外力搬运时,岩块剥落后多沿坡面滚动并于坡脚处堆积。

在母岩风化原地附近,风化剥落物形态主要呈不规则块状、壳形片层状、扇形块层状,少数呈碎粒状。剥落的块体一般以2~6 cm大小为主,碎粒体1~2 cm。在剥落后的短期内,剥落物主要以不规则块状、壳形片层状、扇形块层状为主。随着剥落块体进一步风化破碎,粒状比例大大增加,但由于坡面的降雨汇流冲刷或风力搬运,碎粒体沿坡面向下滚落堆积于坡脚。坡脚堆积的风化物性状主要以碎块状、颗粒状为主,具有一定的磨圆性。

3 泥岩球状风化剥落机制

3.1 风化机制

岩性特征决定岩石的风化性能,而水分场、温度场等环境条件控制风化进程和风化速度。结合现场调查

和室内试验对泥岩风化机制进行了分析。

当水进入泥岩表层时,泥岩中黏土矿物的层间阳离子和晶层表面因水合作用会产生水合晶层膨胀。泥岩吸水时,随着水分子进入晶层间水分子增多,相互平行晶层之间形成的扩散层相互重叠将产生双电层斥力,进而导致矿物晶体进一步膨胀^[13]。相应地,当泥岩失水时,随着矿物中水合物水分子流失,矿物晶体将产生不均匀收缩。在循环失水—吸水过程中,反复的不均匀收缩、膨胀促使细观尺度上的岩体结构扰动和拉裂损伤,导致岩石拉裂^[14]。

根据永川侏罗系溪庙组泥岩试样(初始含水量约2%)的侧限自由膨胀试验(图4),其自由膨胀率平均为20%左右。而且,红层泥岩遇水后快速膨胀,在1小时内的膨胀程度可达到60%~70%,整个膨胀可在5~6 h内完成。调查发现,微风化泥岩岩块一旦开挖,表层水分迅速流失,数小时内就会产生风化裂隙。可见,在水分循环变化过程中,黏土矿物因水合作用产生吸水膨胀、失水收缩是导致泥岩快速风化的主要原因。

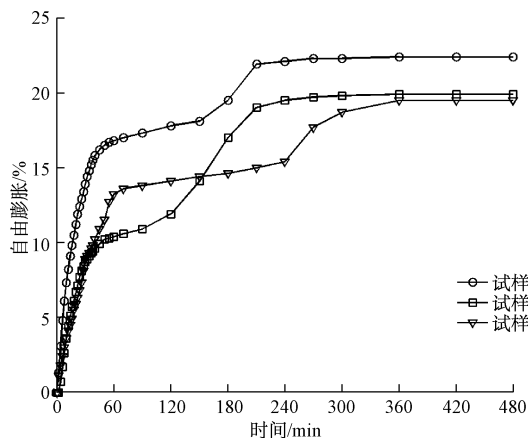


图4 红层泥岩侧限自由膨胀试验曲线

Fig. 4 Confined free expansion curve of redbed mudstone

在温度循环作用下,反复温差波动引起岩石内矿物不均匀热膨胀—收缩,产生的热应力可导致岩石裂化和开裂破坏。在80℃温度下,对永川侏罗系溪庙组泥岩试样进行了初步的室内热风化试验。结果表明,泥岩膨胀变形极小,其热膨胀率约为1.0%左右;而且,经6次循环加热—冷却,试样未发现明显开裂。可见在自然环境下,热风化作用在短期之内并不足以直接促使红层泥产生快速风化破坏。

尽管水分变化是影响红层泥岩风化最敏感的因素,但长期的温度变化可以导致岩石不断裂化,对风化起到促进作用^[10-11]。此外,温度与水分相互作用可能导致溶解、水解、水合、氧化等水岩化学作用加剧,也将

促进和加速岩石风化。

3.2 泥岩球状风化剥落进程

结合上述分析与现场调查,红层泥岩球状风化形成与剥落可概括为如下过程:表层强烈风化作用产生局部体积变形,引起局部应力集中——开裂导致风化裂隙在泥岩表层交错切割——交错风化裂隙边角钝化(椭圆化)——进一步风化产生“应力拱效应”触发泥岩岩核球状剥落。

暴露的泥岩表层既是水分交换与运移、温度变化最剧烈、频繁的区域,相关的各种风化作用在表层持续进行,局部产生膨胀、收缩的体积变形。由于变形受到约束,随着体积变形加剧,局部应力集中导致表层泥岩微观结构裂化,内部出现微观裂纹。

初始裂纹的产生扩大了后续风化作用的边界,会在局部加剧风化作用。因此,初始裂纹的形成被认为是岩石风化的第一个阶段^[15]。由于损伤裂化加剧,微裂纹将不断发生断裂、扩展,形成宏观风化裂隙。根据调查和简易试验,吸水—失水循环作用下,泥岩表层将快速形成较大尺度的交错风化裂隙(图5(a))。

受前期风化裂隙切割,风化作用在切割边界剧烈,新的次生裂隙将沿着边界集中产生。同时,大的风化裂隙边界由于两侧临近的次生裂隙的产生将产生剥落、分裂。如图5(b)所示,随着上述过程的不断进行,风化裂隙边角不断钝化,逐渐形成明显的椭圆岩核。

当椭圆岩核形成后,黏土矿物因风化作用产生体积膨胀时将会形成“应力拱效应”。此时,较小的膨胀变形就会产生明显的拱形开裂。根据文献[2]数值模拟表明,总膨胀只需达到0.25%就足以产生球状风化。由于拱形开裂,泥岩将形成椭圆壳状风化层并向内逐层剥落(图2、图5(c))。

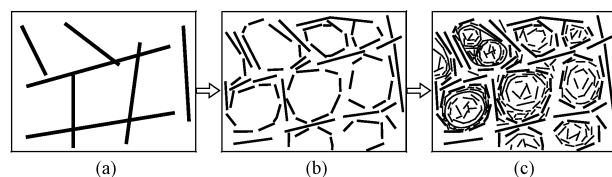


图5 泥岩球状风化形成与剥落过程示意图

Fig. 5 Schematic diagrams of formation and exfoliation for mudstone spheroidal weathering

4 结论

(1)红层泥岩球状风化的形态为椭圆或近圆形,初期为10~20 cm的典型风化球,后期分叉形成的更小的风化球;球状风化剥落具有明显由外到内的层序

特征,常见层数为 5~8 层,层厚由外向内逐渐减小。

(2)水合膨胀是红层泥岩块速风化的主要机制,因太阳辐射产生的温度变化通常不直接导致风化,但温度与水分共同作用可加剧风化进程。

(3)自然环境下,泥岩风化经过局部变形与应力集中、风化裂隙切割、椭球化、拱形开裂与球状逐层剥落等过程,最终形成风化球。

(4)球状风化是红层泥岩典型的风化破坏形式之一,具有风化剥落速度快、风化球分叉明显的显著特征,因此,与硬质岩石相比,其尺度小,稳定性差,难以长久保留。

参考文献:

- [1] Royne A, Jamtveit B, Mathiesen J, et al. Controls on rock weathering rates by reaction-induced hierarchical fracturing[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 275(3-4): 364-369.
- [2] Fletcher R C, Buss H L, Brantley S L. A spheroidal weathering model coupling porewater chemistry to soil thicknesses during steady-state denudation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 244(1-2): 444-457.
- [3] 夏邦栋. 普通地质学[M]. 北京:地质出版社, 1995.
- [4] XIA Bangdong. General geology [M]. Beijing: Geological publishing House, 1995.
- [4] Heald M T, Hollingsworth T J, Smith R M. Alteration of sandstone as revealed by spheroidal weathering[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1979, 49(3): 901-909.
- [5] Chatterjee A, Raymahashay B C. Spheroidal weathering of deccan basalt: a three-mineral model [J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 1998, 31(3): 175-179.
- [6] 朱宝龙, 胡厚田, 陈强. 红层 M 形路堑边坡特征及病害的初步研究[J]. *工程地质学报*, 2003, 11(4): 411-415.
- [6] ZHU Baolong, HU Houtian, CHEN Qiang. Preliminary study on the characteristics and hazards of M-shaped roadcut slope in red beds[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2003, 11(4): 411-415.
- [7] 郭永春, 谢强, 文江泉. 我国红层分布特征及主要工程地质问题[J]. *水文地质工程地质*, 2007(6): 67-71.
- [7] GUO Yongchun, XIE Qiang, WEN Jiangquan. Red beds distribution and engineering geological problem in China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2007(6): 67-71.
- [8] 程强, 寇小兵, 黄绍彬, 等. 中国红层的分布及地质环境特征[J]. *工程地质学报*, 2004, 12(1): 34-40.
- [8] CHENG Qiang, KOU Xiaobing, HUANG Shaobin, et al. The distributes and geologic environment characteristics of red beds in China[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2004, 12(1): 34-40.
- [9] 钟凯, 刘爱萍, 谢强. 红层边坡风化剥落过程的调查与试验研究[J]. *路基工程*, 2000(4): 53-56.
- [9] ZHONG Kai, LIU Aiping, XIE Qiang. Survey and experimental study on the weathering and flaking process of red bed slope[J]. *Subgrade Engineering*, 2000(4): 53-56.
- [10] 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, 41(1): 74-79.
- [10] ZHANG Junyun, ZHOU Depei. Fast weathering law of red-bed mudstone slope[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2006, 41(1): 74-79.
- [11] 张述兴. 重庆地区泥岩组成特征与力学参数关系研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2008.
- [11] ZHANG Shuxing. Research on relationship between substantial composing and mechanical parameters of mudstone in Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008.
- [12] 朱波, 高美荣, 刘刚才. 紫色泥页岩的风化侵蚀与工程建设增沙[J]. *山地学报*, 2001, 19(增1): 50-55.
- [12] ZHU Bo, GAO Meirong, LIU Gangcai. Weathering erosion and sediment yield from construction in purplish shale area [J]. *Journal of Mountain Research*, 2001, 19(S1): 50-55.
- [13] 贾景超. 膨胀土膨胀机理及细观膨胀模型研究[D]. 大连:大连理工大学, 2010.
- [13] JIA Jingchao. Study on the swelling mechanism and mesomechanical swelling model of expansive soils[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [14] 谭罗荣. 关于黏土岩崩解、泥化机理的讨论[J]. *岩土力学*, 2001, 22(1): 1-5.
- [14] TAN Luorong. Discussion on mechanism of disintegration and argillitization of clay-rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(1): 1-5.
- [15] Eppes M C, McFadden L D, Wegmann K W, et al. Cracks in desert pavement rocks: Further insights into mechanical weathering by directional insolation[J]. *Geomorphology*, 2010, 123(1-2): 97-108.