

华北奥陶系含膏角砾岩气爆成因探讨

任新红¹ 赵文¹ 文江泉¹ 郑立宁²

(1.西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川成都 610031; 2.中国建筑西南勘察设计院有限公司, 四川成都 610081)

摘要:根据华北奥陶系含膏角砾岩形态特征,对其成因进行初步分析。利用数值方法分析含膏角砾岩形成期地温特征,表明其存在粘土矿物及石膏脱水的温度条件。对加温条件下含膏泥岩孔隙气体压力进行实验研究,显示在较高温度条件下,含膏泥岩石膏脱水将产生极高的孔隙水压力。扫描电镜和能谱分析结果反映出高温条件下石膏矿物结构发生了较大的变化。分析结果表明,华北奥陶系含膏角砾岩具备气爆成因条件。

关键词:含膏角砾岩;气爆;孔隙气压;扫描电镜;能谱分析

中图分类号:P588.24*5 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2013)02-0612-07

碳酸盐岩地层中分布的角砾岩成因是一个复杂的问题,一直受到许多学者的注意,并提出了各种各样的成因观点。断层角砾、沉积角砾、风暴波浪海底滑坡角砾、膏的相转化角砾及盐溶坍塌角砾等观点都曾被提出^[1-3]。自然界往往还存在与断裂作用无关,分布却十分普遍、产状呈筒状、囊状、脉状及似板状,而且类似于断层角砾岩的系列岩石,关于其成因主要有爆发角砾成因说^[4]。汪劲草等^[5]提出该系列角砾岩的形成皆与地下流体源(主要是液体H₂O)所产生的异常高压有关,是以流体能量释放为主的流体动力作用过程的产物。本文通过数值分析和实验,对含膏角砾岩气爆成因进行探讨。

1 华北奥陶系含膏角砾岩分布特征

对于华北地台中奥陶统稳定分布的三层含膏角砾岩,国内学者大多认为是膏溶(或盐溶)角砾岩^[6-7]。但认真分析其依据和结论,结合石太客专线工程揭露地层不难发现有的依据并不充分。纵观华北地台奥陶系含膏角砾岩及其特征,以及现有膏溶(盐溶)坍塌成因说的依据不足和相互矛盾,膏溶坍塌成因是值得怀疑的。主要表现在:(1)无论地表和地下开挖显示,在垂直方向上,整个华北地区都是三层稳定

分布,且每一层角砾都有下部细小,向上逐渐过渡到大角砾的特征或趋势,而坍塌成因应该不会有此规律。(2)角砾越细,泥质含量越高。有些层位的大角砾有大量“外包泥”,也称“泥包石”。这种角砾特征不符合坍塌成因。(3)地表所看到的一些空洞,貌似溶蚀作用形成,实际并非如此。(4)华北地台奥陶纪地层火成岩侵入成矿作用极明显,铁矿化岩体主要是沿中奥陶统的几层角砾岩层产出,此密切关系实质上反映了含膏角砾岩层与岩体的密切关系。(5)有的碳酸盐岩角砾有重结晶现象和大理岩化现象,这明显地受了温度的影响,而周边又无侵入岩体,应是深部岩体热传导影响所致。深部岩体侵入有深有浅,侵入较浅的部位地区,可以使石灰岩变质形成大理岩,例如长治地区及邯邢地区局部等。(6)角砾岩层位中,可以看出有位移痕迹,这种位移不是坍塌的张裂特征,而是挤压弯曲,滑移特征,揭示的是在强大的水压-气压作用下所反映的特征。另外,杂乱分布的复杂的角砾岩成分也是在气爆作用过程中形成的角砾,有一定的位移和定向。(7)在太原至灵石一带的石膏岩各种产状中,常见有石膏脉,围岩为角砾状泥灰岩或泥灰岩。

有一些可以支持膏溶坍塌成因的依据可以是角



图 1 华北地台奥陶系含膏角砾岩特征

Fig.1 Characteristics of Ordovician gypsum-bearing breccia in North China

砾岩形成以后的地质作用产物。有的依据本身与水压-气压爆发成因并不矛盾。为此,提出一种新的成因观点,即水压-气压爆发成因。

2 含膏角砾岩形成期温度条件数值模拟

地质历史上,华北地区的岩浆活动较为频繁,岩石类型较为复杂,超基性岩、基性岩、中性岩、中酸性岩、酸性岩、碱性岩及偏碱性岩均有发育。从中新太古代、元古宙、中生代到新生代均有不同类型岩浆岩形成,其中以新太古代(五台期)、早元古代(吕梁期)及中生代(燕山期)岩浆活动最为强烈。

利用 ANSYS 对地温场进行模拟,分析燕山期岩浆活动过程中,各地层地温的情况,判断是否具备粘土矿物失水及石膏脱水的温度条件。在常压下粘土矿物颗粒外的结合水失水温度约 105°C , 具有层间水的粘土矿物失水温度约 200°C , 粘土矿物的结

构水脱水温度都在 500°C 以上,石膏脱失结晶水的温度大约为 175°C 。根据分析可以了解在不同情况下奥陶系含膏角砾岩层的原始地温特征,为分析含膏角砾岩的形成过程提供依据。

由于原始地层无法真实再现,因此取山西省地质志及忻州幅区调报告中所列地层为代表地层,建立分析模型如图 2 所示,图中 A1~A31 代表不同时代不同类型的岩层。燕山期岩浆活动侵入的层位在华北地区也各不相同,在分析中,岩浆侵入最高层位分别为寒武系及前寒武系(长城系)地层底部两种情况。此外,侵入体温度考虑 3 种情况,即 450°C 、 500°C 、 550°C , 地表温度取 0°C 。

岩石热学参数根据相关资料取值如表 1 示^[8]。不同材料热学参数理论上随温度而变化,但由于缺乏相关资料,在数值分析时采用定值。

不同分析模型下,地层温度分布如图 3、图 4 所示。从图中可以清楚地看出岩浆侵入不同层位时上

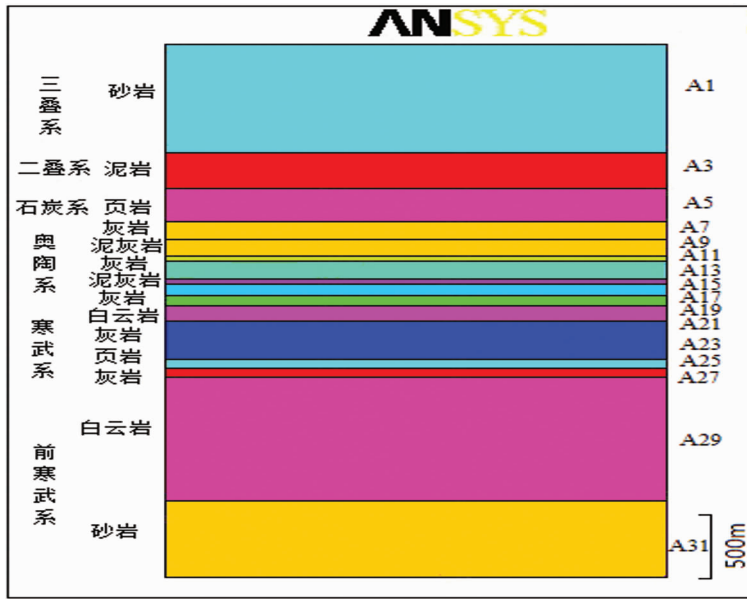


图 2 初始地层温度场分析模型

Fig.2 Analytical model of initial strata temperature field

表 1 地层热学参考

Table 1 thermal parameters of stratum

岩石	比热容 J/(kg·K)	导热系数 W/(m·K)	密度 kg/m ³
白云岩	749.4	3.55	2650
灰岩	908.5	2.09	2600
页岩	774.6	1.72	2550
砂岩	762~1071.8	2.18~5.1	2550
泥岩	858.3	1.44~3.68	2550
泥灰岩	908.5~925.3	2.32~3.23	2630

表 2 奥陶纪含膏角砾岩层地温

Table 2 Strata temperature of Ordovician gypsum-bearing breccia

资料来源	岩浆侵入前寒武纪地层 侵入体温度 /°C			岩浆侵入寒武纪地层 侵入体温度 /°C		
	450	500	550	450	500	550
山西地质志	193~218	214~242	236~267	275~310	304~345	336~379
忻州幅地层	156~226	173~251	191~276	188~272	210~302	230~332

覆岩层地温的分布特征。图中标示出含膏角砾岩层位位置，并得到含膏角砾岩层原始地温如表 2 所示。从表中可以看出，当采用山西省地质志地层资料时，若岩浆侵入前寒武纪地层，则奥陶纪含膏角砾岩地层原始温度为 193°C~267°C；若岩浆侵入寒武纪地层，则奥陶纪含膏角砾岩地层原始温度为 275°C~379°C。当采用忻州幅地层资料时，若岩浆侵入前寒武纪地层，则奥陶纪含膏角砾岩地层原始温度为 156°C~276°C；若岩浆侵入寒武纪地层，则奥陶纪含膏角砾岩地层原始温度为 188°C~332°C。总的看来，含膏角砾岩层原始地温在 156°C~379°C，平均在 240°C 左右。因此认为，在燕山期岩浆活动过程中，含膏角砾岩层位具备粘土矿物失水及石膏脱水的温度条件。

3 加热条件下含膏泥岩孔隙气压实验

3.1 实验概况

实验在气体介质高温高压三轴试验系统上进行，该系统的压力均匀，温度精度高，适于研究封闭环境液体随温度升高所产生的孔隙压力变化。设备由数字液压伺服机控制。温度用 YAMATAKE DCP30 型控温仪，通过可控硅调节加热炉的功率来控制，设计最高温度为 250°C。

实验样品为圆柱状，高 40 mm，直径为 20 mm，整个样品、碳化钨以及刚玉柱都封装在退火的壁厚为 0.35 mm 的铜管中，并在铜管和加热炉之间的空隙中填充氮化硼粉末，用于传热并阻止气体对流，使样品的上下温度保持均匀，试验装置如图 5 所示。为

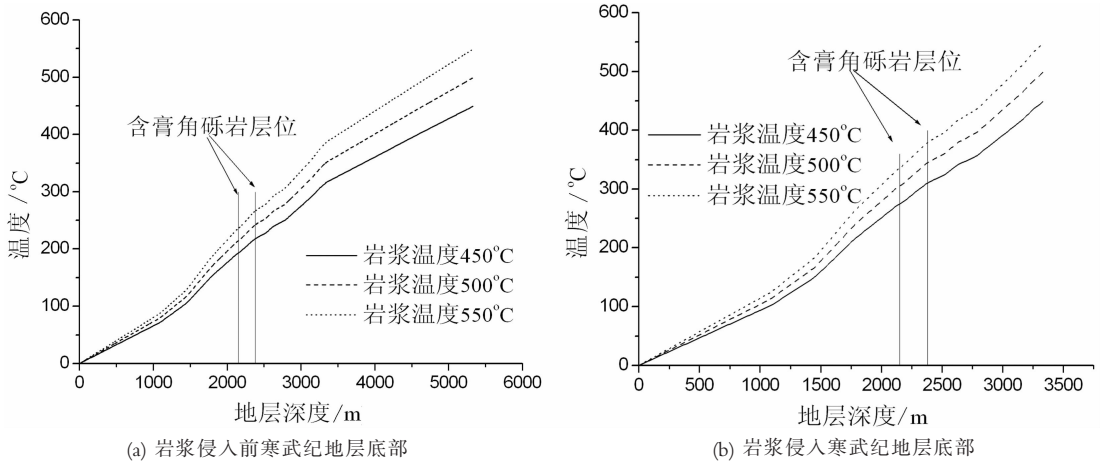


图 3 地层温度分布(据山西地质志地层)

Fig.3 Temperature distribution of strata (after Stratigraphic Part of Shanxi Geological Records)

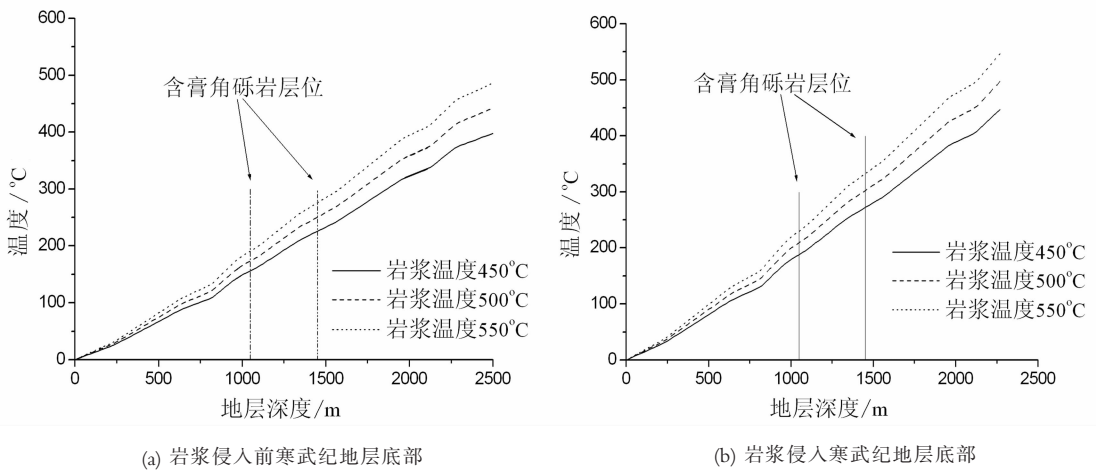


图 4 地层温度分布(据忻州幅区调地层)

Fig.4 Temperature distribution of strata (after Regional Geological Survey of Xinzhou Sheet)

了消除高压气体对流引起的轴向温度不均匀, 本实验采用两段炉体分别加温的方式, 根据对流的强弱设定上、下两段炉体的加温比例。

实验目的包括两个方面, 一是在恒定围压条件下, 通过逐级加温, 测定泥岩样在不同温度下, 孔隙水气化及泥岩中粘土矿物脱水体积膨胀所产生的孔隙气体压力。二是在恒定围压条件下, 通过逐级加温, 测定含膏泥岩样在不同温度条件下, 孔隙水气化及粘土矿物脱水和石膏脱水发生相变体积膨胀所产生的孔隙气体压力。

试样采用重塑泥岩样和含膏泥岩样, 将含膏角砾岩(取自太行山隧道 DK85+993)和石膏碾磨, 过 2

mm 筛, 含水量都按 10% 配制, 一组不加石膏, 一组加 10% 的石膏, 试样为圆柱状, 尺寸为直径 20 mm、高 40 mm, 密度为 2.25~2.3 g/cm³。

含膏角砾岩上覆地层平均厚度约 1600 m, 岩层竖向自重应力约 40 MPa, 不考虑构造应力时, 水平应力约 20 MPa, 故实验设计围压为 40 MPa。试样在 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 40$ MPa 的条件下, 分别升温至 120°C、150°C、175°C、210°C、250°C, 升温速度为 2.5°C/min, 在每级温度条件下达到稳定状态, 观测记录其产生的孔隙气体压力。

3.2 孔隙气压随温度变化特征

泥岩样和含膏泥岩样孔隙气压随温度变化特征

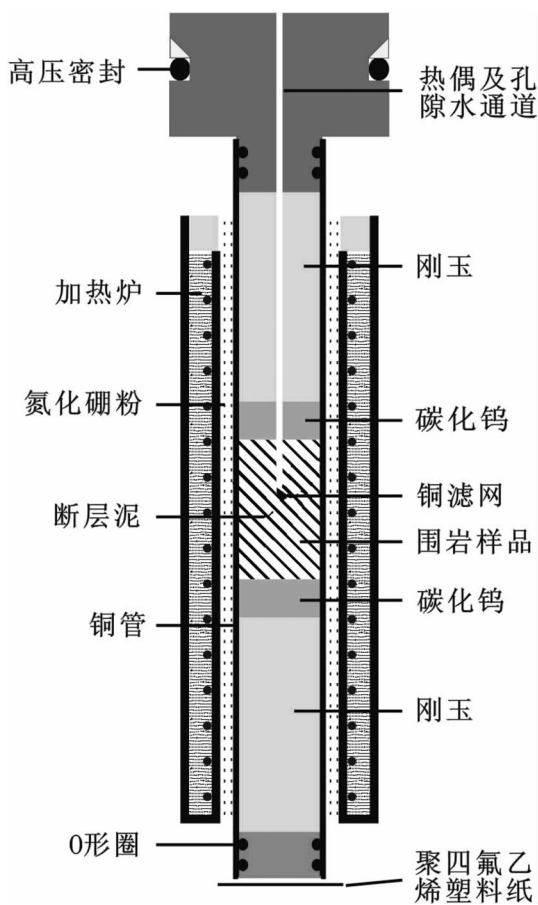


图5 三轴实验系统示意图

Fig.5 Diagram of triaxial experimental system

(图6)显示泥岩样孔隙气体压力随着温度的升高是逐渐增大的(图6-a)。温度从0℃升高到105℃时,孔隙气体压力变化不大,仅为0.07 MPa,水随着温

度的升高,体积开始膨胀,但膨胀的幅度较小。当温度从105℃升高到150℃时,孔隙气体压力开始逐渐增大,增长幅度为0.13 MPa,粘土矿物中的结合水开始脱水,水的体积继续膨胀,孔隙气体压力继续增大。当温度稳定在150℃时,孔隙气体压力随时间开始显著增大,增长幅度为0.16 MPa,液态水开始气化,粘土矿物中的层间水开始脱水,体积快速膨胀。温度从150℃升高到250℃时,孔隙气体压力继续增大,水蒸气随着温度的继续升高,体积继续膨胀,产生较大的孔隙气体压力,增长幅度为3.1 MPa。

图6-b中1号和2号含膏泥岩样为同一组试验,二者所做的是一组平行实验。图中显示,含膏泥岩样孔隙气体压力随着温度的升高是逐渐增大的,压力最大可达到26.66 MPa。温度从0℃升高到105℃的过程中,孔隙气体压力变化不大,而孔隙水随着温度的升高,体积开始膨胀,但膨胀的幅度较小,故产生的孔隙气体压力比较小。温度从105℃升高到150℃的过程中,孔隙气体压力开始逐渐增大,粘土矿物中的结合水开始脱水,孔隙水的体积继续膨胀,产生了较大的孔隙气体压力。当温度稳定在150℃时,孔隙气体压力随时间开始显著增大,液态水开始气化,粘土矿物中的层间水开始脱水,体积快速膨胀,产生了很大孔隙气体压力。温度从150℃升高到250℃过程中,孔隙气体压力继续增大,石膏中的结晶水开始脱水、水蒸气随着温度的继续升高,体积继续膨胀,产生了极大的孔隙气体压力。

实验结果表明,含膏泥岩在温度上升到250℃的过程中,将产生极高的孔隙气体压力,实验中最高

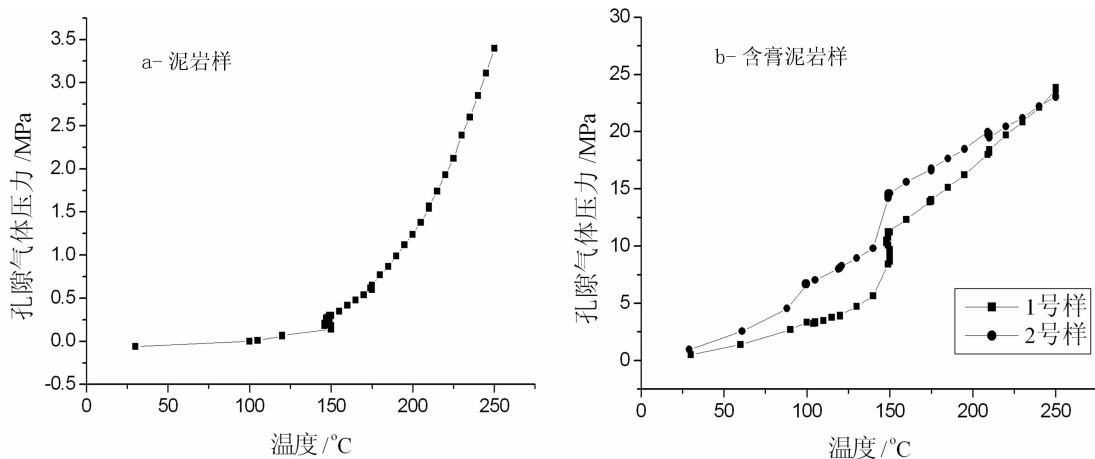
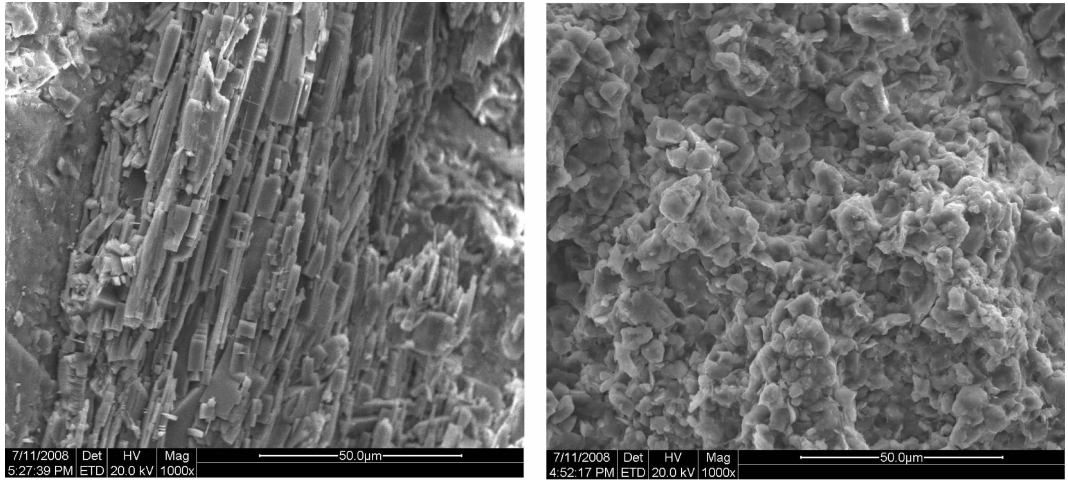


图6 孔隙气体压力随温度变化曲线

Fig.6 Variation of pore gas pressure with temperature

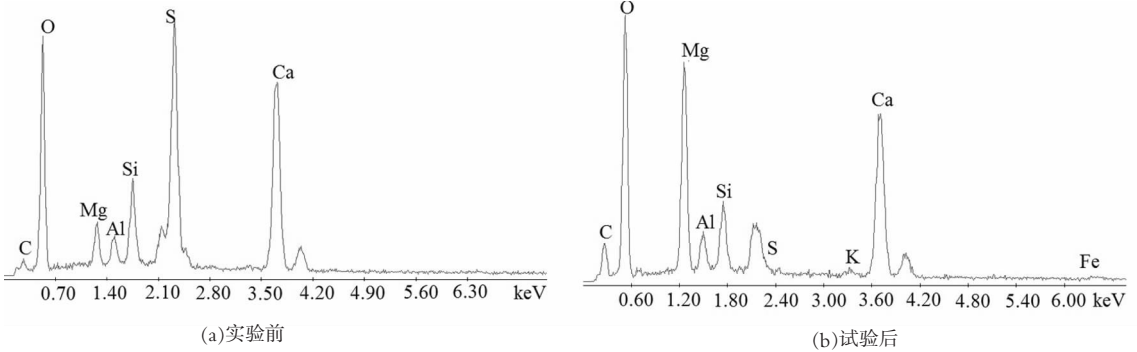


(a)实验前

(b)试验后

图 7 含膏泥岩样品扫描电镜图(1000×)

Fig.7 SEM image of gypsum-bearing mudstone sample



(a)实验前

(b)试验后

图 8 含膏泥岩样品能谱分析

Fig. 8 Energy spectrum analysis of gypsum-bearing mudstone sample

压力可达 26.66 MPa。古生代软岩由于结构致密,单轴抗压强度多为 20~40 MPa,抗拉强度为 1~2 MPa^[9]。因此,在较高的孔隙气体压力作用下,岩体产生破坏,气爆形成含膏角砾岩。

3.3 试样微观分析

扫描电镜及能谱分析结果(图 7~8)反映出,实验前含膏泥岩的主要矿物成分为白云石、粘土矿物和石膏。未作高温高压实验时,石膏在扫描电镜及能谱分析都分别能看到其形貌及元素含量;高温高压实验以后,则很难找到石膏的晶体。说明在石膏脱水的气化过程当中,各种成分可能是分化了,有些成分以离子状态存在。而不加石膏的泥岩样品,高温高压实验前后结构变化不大,粘土矿物本身没有什么变化,成分也未发生改变。

4 结论

华北奥陶系含膏角砾岩分布特征分析表明含膏角砾岩具有大小混杂、无磨圆、挤压弯曲、滑移等气爆特征。对燕山期岩浆侵入活动过程中初始地层温度场数值分析,表明含膏角砾岩层原始地温约在 156℃~379℃,平均 240℃左右,具备粘土矿物脱水及石膏脱水的温度条件。加温至 250℃时,含膏角砾岩可产生 26.66 MPa 左右的孔隙气压,且矿物成分和粘土结构均发生了较大的变化,在较高的孔隙气体压力作用下,含膏岩层可受气爆作用形成含膏角砾岩。

参考文献(References):

[1] 王兆升,沙庆安.华北地区中奥陶统蒸发盐岩溶解坍塌角砾岩化

- 作用[J]. 地质科学, 1991, 3:246-253.
- Wang Zhaosheng, Sha Qingan, Solution-collapse brecciation of the middle Ordovician evaporates in North China[J]. Scientia Geologica Sinica, 1991, 3:246-253 (in Chinese with English abstract).
- [2] 张瑞锡, 乐昌硕, 田成. 关于我国的盐溶角砾岩 [J]. 地球科学, 1988, 13(1):1-7 .
- Zhang Ruixi, Yue Changshuo, Tian Cheng. The salt-solution Breccia of China [J]. Earth Science, 1988, 13 (1):1-7 (in Chinese with English abstract).
- [3] 魏东岩. 论中国盐溶角砾岩的特征和分类[J]. 岩石学报, 1991, 3: 73-81.
- Wei Dongyan, On the characteristics and classification of evaporate-solution breccia in China [J]. Acta Petrologica Sinica, 1991, 3, 73-81(in Chinese with English abstract).
- [4] 章增凤. 隐爆角砾岩的特征及其形成机制[J]. 地质科技情报, 1991, 10(4):1-5.
- Zhang Zengfeng. General features and genetic mechanism of crypto-explosive breccias [J]. Geological Science and Technology Information, 1991, 10(4):1-5(in Chinese with English abstract).
- [5] 汪劲草, 彭恩生, 孙振家. 流体动力角砾岩分类及其地质意义[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(1):18-23.
- Wang Jincuo, Peng Ensheng, Sun Zhenjia. Classification and geological significance of fluid dynamic breccia [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2000, 30(1): 18-23(in Chinese with English abstract).
- [6] 奚家琨. 山西省临汾中奥陶统膏盐沉积环境及其形成机理 [J]. 陕西地质, 1986, 4(1):19-38.
- Xi Jiakun. Study on the tidal-flat sedimentary characteristics of gypsum and the geological condition of mineralization in middle Ordovician period, Linfen, Shanxi [J]. Geology of Shaanxi, 1986, 4 (1):19-38(in Chinese with English abstract).
- [7] 崔云昊. 河北省邯邢地区中奥陶统膏溶角砾状灰岩成因探讨[J]. 华北水利水电学院学报, 1983, 2:74-88.
- Cui Yunhao. A study on the cause of formation of mid-Ordovician selenite breccia limestone on Han-Xing area of Hebei[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 1983, 2:74-88(in Chinese with English abstract).
- [8] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2005.
- Liu Yourong, Tang Huiming. Rock Mechanics[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2005(in Chinese).
- [9] 何满潮. 软岩工程力学[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- He Manchao. Weak Rock Engineering Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2003(in Chinese).

A tentative discussion on the air burst genesis of the Ordovician gypsum-bearing breccia in North China

REN Xin-hong¹, ZHAO Wen¹, WEN Jiang-quan¹, ZHENG Li-ning²

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 2. China Southwest Geotechnical Investigation & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: Based on its morphological characteristics, this paper made a preliminary analysis of the genesis of the Ordovician gypsum-bearing breccia in North China. The geothermal characteristics during the formation stage of the gypsum-bearing breccia were analyzed with the numerical method, and the results show that the temperature condition for the dewatering of clay minerals and gypsum did exist. The pore gas pressure of gypsum-bearing mudstone at high temperature was analyzed with the experimental method, and the result shows that extremely high pore gas pressure will be generated by gypsum dewatering at high temperature. The SEM and energy spectrum analysis show that the mineral structure of gypsum is changed at high temperature. It is thus held that the gypsum-bearing breccia in North China might have been generated by air burst.

Key words: gypsum-bearing breccia; air burst; pore gas pressure; SEM; energy spectrum analysis

About the first author: REN Xin-hong, male, born in 1963, associate professor, doctor candidate, engages in the study of geological engineering; E-mail: zhengning2003@163.com.