

恐龙化石风化效应的 TM 耦合分析研究

杜圣贤¹,张尚坤¹,于学峰¹,陈军¹,宋香锁¹,贾超²,张国荣²

(1.山东省地质科学研究所,山东 济南 250013;2.山东大学土建与水利学院,山东 济南 250013)

摘要:恐龙化石对研究地球演化、生物进化、地层对比、地质年代、古环境、古地理、古气候等方面具有重要的科学价值。但恐龙化石发掘后面临着严重的风化问题,许多化石发掘后十几年甚至几年内就迅速遭受风化破坏。为深入研究探索恐龙化石地质遗迹的深层次风化原因和机理,该文采用 TM(温度和应力)耦合分析方法,对山东诸城恐龙化石风化规律进行深入分析研究。根据化石与围岩间膨胀的不协调性,探索在温度变化情况下化石与围岩间的相互作用规律及对风化造成的影响。结果揭示了温度作用下化石风化的初步原因和规律,可为化石保护提供参考科学依据。

关键词:恐龙化石;风化;围岩;温度应力;TM 耦合

中图分类号: TN814

文献标识码: B

引文格式:杜圣贤,张尚坤,于学峰,等.恐龙化石风化效应的 TM 耦合分析研究[J].山东国土资源,2015,31(10):65-70. DU Shengxian, ZHANG Shangkun, YU Xuefeng, etc. Analysis and Study on TM Coupling Method to Weathering Effect of Dinosaur Fossil [J]. Shandong Land and Resources, 2015,31(10):65-70.

温度变化是造成化石及其围岩石风化的主要因素之一^[1],在外界温度作用下,由于热胀冷缩,化石和围岩受温度影响到的部分会产生体积变化,产生热应变。由于化石和围岩之间热膨胀系数的差异,产生热应力^[2-3]。同时,非均匀的温度分布即温度梯度也产生热应力。当化石或围岩不能适应此附加应力时,就将产生裂隙,循环往复,裂隙不断扩大,导致化石风化。露天的化石白天受烈日暴晒,表面受热膨胀,而化石内部则受到的影响较小;夜晚化石表面又比内部冷却、收缩快,风化作用更加严重。而处于室内的化石虽然受温度影响膨胀相对较小,但是这样引起的不均匀膨胀也会使化石产生裂隙和表面片状剥落^[4-7]。同时,温度会加速化学腐蚀的进行,影响内部结构的强度;温度也会加速水的作用,是造成恐龙化石风化的重要影响因素^[8-10]。该文针对以上情况,采用 TM 耦合方法对诸城恐龙化石风化机理进行分析研究^[11-14]。

1 计算原理及参数确定

1.1 本构模型

该文化石和围岩的热力耦合本构方程如式(1)~(4)^[15]

$$-\nabla \cdot \sigma = F_v, \sigma = s \quad (1)$$

$$s - s_0 = C : (\varepsilon - \varepsilon_0 - \varepsilon_{inel}), \varepsilon_{inel} = \alpha(T - T_{ref}) \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} [(\nabla u)^T + \nabla u] \quad (3)$$

式中: ε 为应变, ∇u 为位移梯度; C 为第四阶弹性张量; s_0 为初始应力; ε_0 为初始应变; α 为热膨胀系数; s 为应力; T 为温度; T_{ref} 为应变参考温度; ε_{inel} 为热应变。

化石和围岩的热传导本构方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (4)$$

式中: ρ 为材料密度; C_p 为比热容; k 为热传导系数; Q 为热源; T 为温度。力学传导本构方程和热传导本构方程,通过热应变相互影响。

1.2 参数确定

根据实验结果及查阅相关资料取得模型参数,

收稿日期:2015-01-29;修订日期:2015-03-04;编辑:曹丽丽

基金项目:中国地质调查局项目“胶莱盆地白垩纪脊椎动物化石保护、开发方案与规划”(1212011120107)基金支持

作者简介:杜圣贤(1975—),男,四川通江人,研究员,主要从事地层古生物与地质矿产研究;E-mail: dushengxian@126.com

结果如表 1 所示。

表 1 热力耦合参数

类别	密度 参数 (kg/m ³)	弹性模量 (GPa)	泊松比	比热容 [J/(kg·k)]	热膨胀系数 (1/k)	热传导系数 [W/(m·k)]
围岩	2469	10	0.25	80	3×10^{-5}	$1.241467 + 0.005733333 \times T$ $11.28342 - 0.02833641 \times T + 2.570169 \times 10^{-5} \times T^2$
化石	1765	4	0.35	90	1.5×10^{-5}	

该文假定初始状态化石及围岩的初始温度为诸城地区多年平均温度 12℃, 诸城地区某日实际的温度变化情况如图 1 所示。

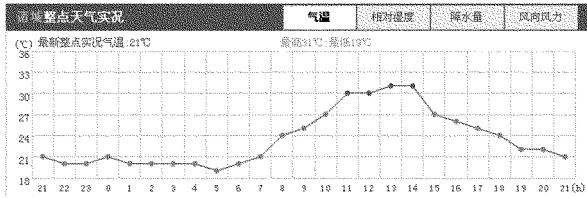


图 1 诸城地区某日温度变化过程曲线

2 模型概化及计算情景

2.1 计算模型概化

将恐龙骨骼化石概化为柱体, 分析开挖揭露后的化石风化情景, 骨骼化石一部分暴露在围岩外部, 其余部分置于围岩内部, 建立如图 2 所示计算模型。模型前后左右边界取为对称边界; 下边界固定, 约束 x, y, z 方向位移; 上边界为自由边界; 化石及围岩的上表面均与外界存在热对流作用。化石和围岩的内部初始温度均为 12℃。

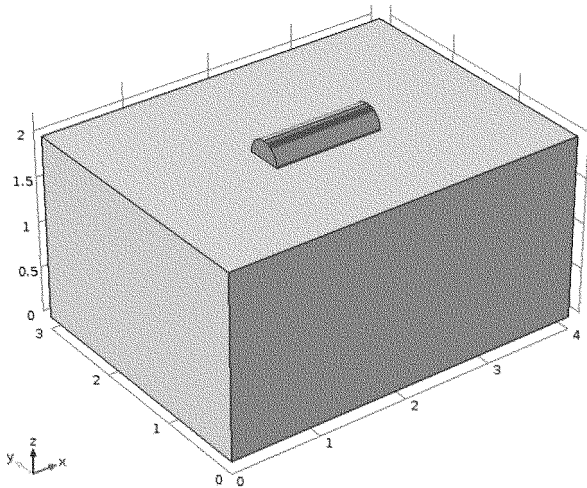


图 2 数值分析模型

2.2 计算情景设置

该文分别分析温度上升及温度下降 2 个阶段的化石与围岩相互作用 TM 耦合规律, 随时间变化外界温度升高阶段的 TM 过程, 温度-时间变化曲线如图 3 所示; 随时间变化温度降低阶段的 TM 过程, 温度-时间变化曲线如图 4 所示。

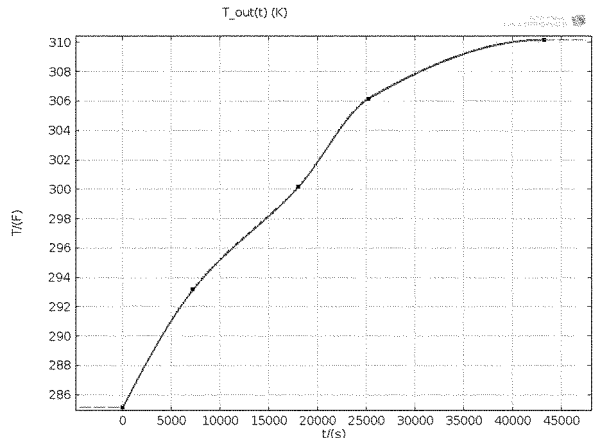


图 3 升温阶段时间-温度曲线

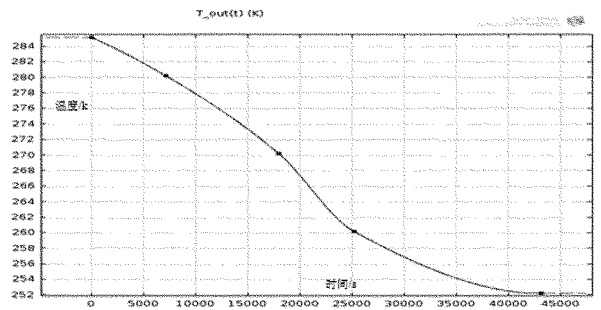


图 4 降温阶段时间-温度曲线

3 计算结果及分析

3.1 温度升高 TM 计算及分析

应用图 3 所示升温曲线进行 TM 升温计算, 结果显示, 随外界温度变化, 化石及围岩内部温度变化情况, 由模型内部温度变化情况可以看出: 当外界温度持续升高时, 化石和围岩表面温度先升高, 内部温度几乎不变; 由于热胀冷缩作用, 可以看到化石和围岩均出现了膨胀现象(图 5)。

计算得到温度应力如图 6 所示。由图 6 可知, 在受外界温度变化影响 1 h 后, 受到温度应力的作用, 在化石和围岩的表面, 都受到拉应力的作用; 而在化石和围岩接触区却受到了压应力的作用。分析

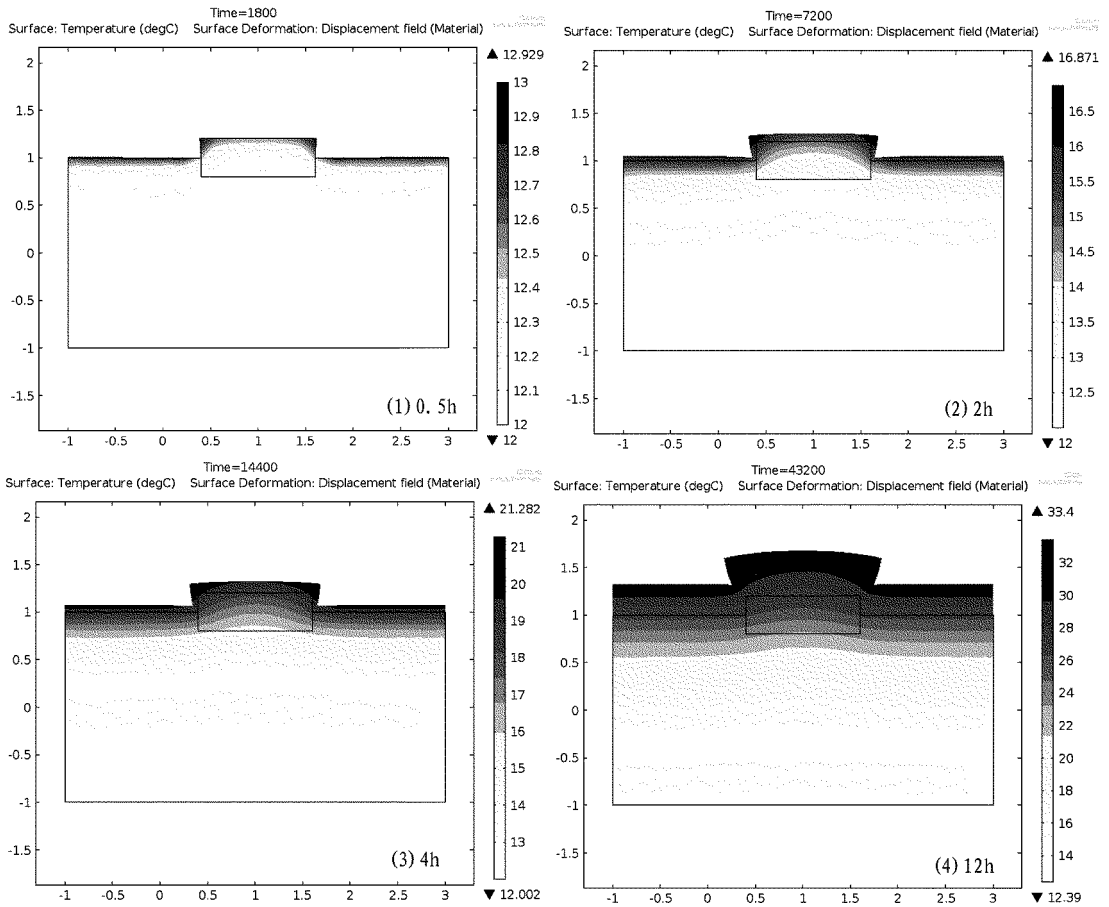


图 5 升温阶段化石内部温度变化过程

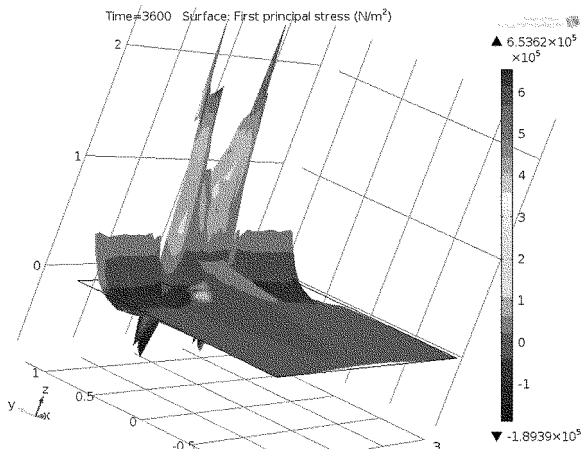


图 6 1h 时,第一主应力分布图

其原因,由于热胀冷缩的作用,当外界温度升高时,化石和围岩表面温度迅速升高,而内部温度不受影响,由于温度梯度的作用,化石和围岩表面产生了拉应力;而化石和围岩的热力学参数并不相同,故其拉应力大小不同;在化石和围岩接触区,由于他们之间相互约束,故会产生压应力区。

另外,对其位移变化进行分析,对化石裸露区左边界随外界温度变化,其整体位移变化如图 7 所示。

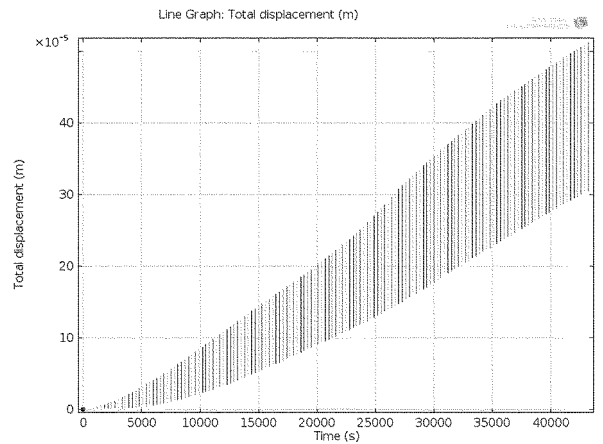


图 7 化石位移变化

分析可知,随外界温度不断升高,位移逐渐增大,在化石物理力学性质一定的情况下,位移越大,则化石越容易产生裂缝,越易风化。

综合分析化石表面应力、内部应力及温度分布

如图 8 所示(时间为 3 h 时),化石裸露程度为二分之一。

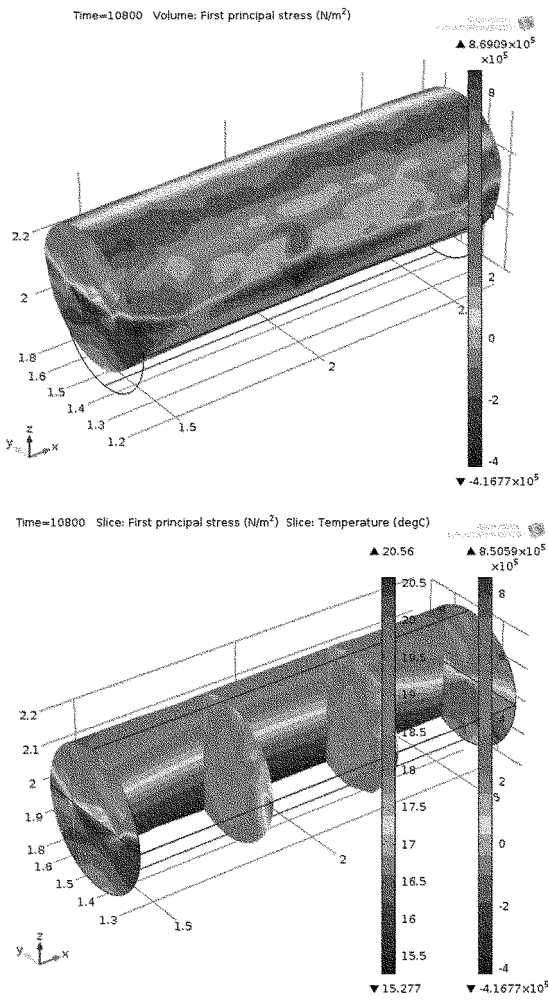


图 8 化石表面应力分布图、内部应力切片及内部温度切片图

在外界温度变化 3 h 后(图 3),化石内部温度升高较快,此时最高温度为 20.56℃,化石端部温度传递比中间快,此时化石内部温度分布极不均匀。

从 YZ 切片可以看出,化石中间部分最大拉应力集中区出现化石内部中间部分往下延伸,不同部位分布近似,呈发散状分布,而两侧最大拉应力出现在化石裸露部分,最大拉应力为 1.2 MPa。

3 h 时,化石裸露的表面均受拉应力影响,分布不均,最大拉应力约为 0.86 MPa,而埋于围岩内部部分受压应力的作用,化石与围岩表面接触处,化石所受压应力最大,最大为 0.42 MPa。

综上分析,在温升阶段,化石受外界温度变化影响而产生的表面拉应力较大,因此暴露于空气中的

骨骼化石越多,其受温度影响的程度越大。

3.2 温度降低 TM 计算及分析

化石和围岩在温度降低过程中,若温度降至冰点以下,赋存在化石或围岩内的水将会结冰产生冻胀作用,由于化石和围岩两种材料的变形不协调将会产生相互作用,如此反复必然会加速化石风化,造成化石破坏(图 9)。

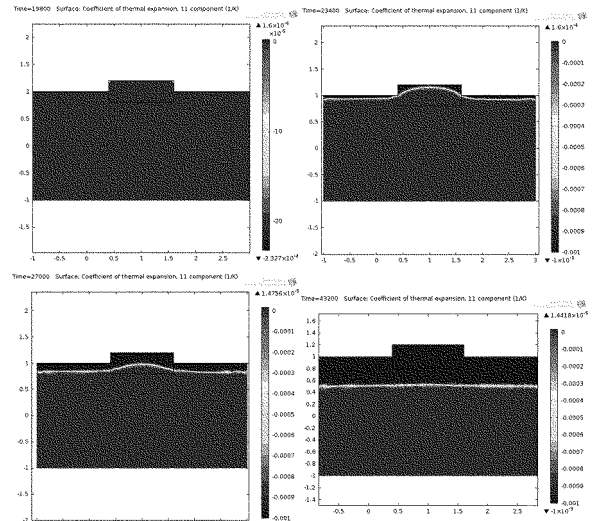


图 9 随外界温度降低化石和围岩内部孔隙水结冰变化过程

由计算结果可见,裸露化石及围岩裂隙中所含水分均已完成相变成为固体冰。化石临空棱角处会最先受外界温度影响而使孔隙水结冰,随后内部温度逐渐降低,孔隙水结冰程度增加。随外界低温持续,空隙水结冰程度继续增加,化石和围岩内部应力持续变化,孔隙水结冰后产生较大的冻胀应力,变形的不协调导致化石持续风化(图 10、图 11)。

由 TM 计算,化石和围岩的表面在孔隙水冰点温度后均产生了一定的张拉力,但是由于表层不受约束,故应力从外向内有所增加;在冰点时,化石和围岩内部均产生了压应力;同时由于热胀冷缩作用,化石和围岩本身有体积收缩的趋势,而内部空隙水结冰后体积膨胀,故外界温度降低时化石和围岩内部应力大于温度升高时的内部应力。

4 结论

研究发现,由于化石和围岩对温度变化的响应参数的不同,导致温度变化时两者的变形不协调,由此产生相互作用,导致化石的损伤破坏。由温升及

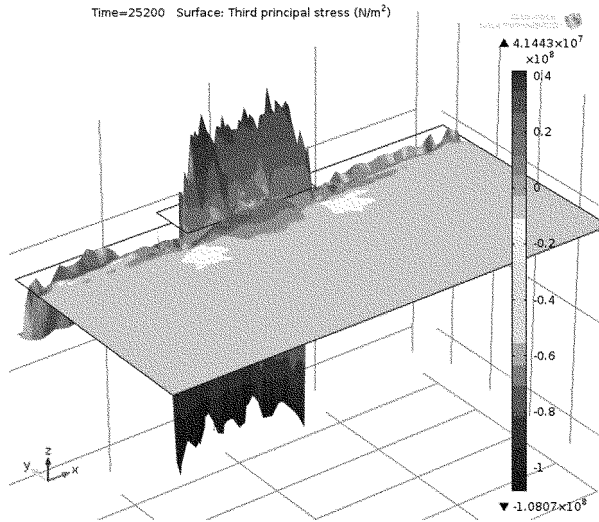


图 10 化石与围岩应力分布图

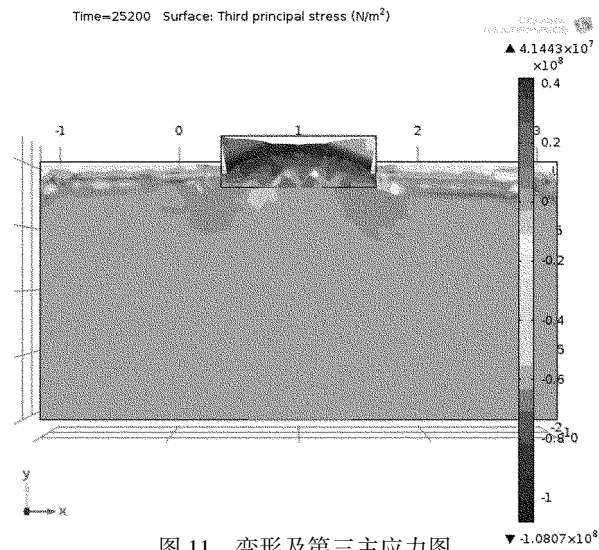


图 11 变形及第三主应力图

温降阶段的 TM 计算结果可知,在温度变化过程中,化石及围岩内部的温度应力响应过程是不同的,接触空气部分的材料温度应力最先变化,并逐渐向内部进行传导。对比分析得到温度降低过程对化石造成的损伤程度要强于温度升高时对化石造成的损伤程度,特别是温度降低至冰点以下后,效果更为显著,其本质作用是水的冷冻膨胀效应,这点在将来的化石防护时尤其要加以注意。

除此以外,对其他因素的研究,如热流耦合分析等,对进一步揭示化石风化深层机理也非常重要。在 TM 耦合分析,流固耦合分析等方面应进一步加强系统深入的研究,逐步建立起化石风化研究领域的力学分析系统,为化石风化防护奠定科学及技术基础。

参考文献:

- [1] ZHANG Yanxia. The impact of change climate on the mass mortality of Zhucheng dinosaur [A]. The Abstract Book on the Eleventh National Congress cum 27th Annual Symposium by the Palaeontological Society of China [C]. Palaeontological Society of China: , 2013.
- [2] Jiuzuo Zhou, Dongqing Li. Numerical analysis of coupled water, heat and stress in saturated freezing soil [J]. Cold Regions Science and Technology. 2011
- [3] Ning Li, Bo Chen, Feixong Chen, Xiaozu Xu. The coupled heat - moisture - mechanic model of the frozen soil [J]. Cold Regions Science and Technology. 2000.
- [4] ZHU Wancheng, WEI Chenhui, TIAN Jun, et al. Coupled thermal-hydraulic - mechanical model during rock damage and its preliminary application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (12) : 3851 - 3857.
- [5] ZHANG Yujun. Coupled thermo - hydro - mechanical model and finite element analyses of dual - porosity fractured medium for ubiquitous - joint rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (5) : 947 - 955.
- [6] TONG F G, JING L R, ZIMMERMAN R W. A fully coupled thermo - hydro - mechanical model for simulating multiphase flow, deformation and heat transfer in buffer material and rock masses [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47 (2) : 205 - 217.
- [7] ZHUANG Zhuo. Extended finite element method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 48 - 61.
- [8] TANG Chun an, MA Tianhui, LI Lianchong, et al. Rock failure issues in geological disposal of high - level radioactive wastes under multi - field coupling function [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (Supp. 2) : 3932 - 3938.
- [9] LI Lianchong, YANG Tianhong, TANG Chun an, et al. Study on coupled thermalmechanical - damage model in rock failure process [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 (10) : 1727 - 1732.
- [10] ZHAO Hongbao, YIN Guangzhi, CHEN Lunjian. Experimental study on effect of temperature on sandstone damage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (Supp. 1) : 2784 - 2788.
- [11] LIU Quansheng, XU Xichang. Damage analysis of brittle rock at high temperature [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19 (4) : 408 - 411.
- [12] LIU Quansheng, LIU Xuewei. Preliminary research on numerical manifold method for temperature field of fractured rock mass [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (4) : 635 - 642.
- [13] CHEN Yifeng, ZHOU Chuangbing, MAO Xinying, et al. Numerical simulation of coupled thermal elastic behaviors for hard rock pillar in sp Pillar stability experiment, Sweden [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32 (8) : 1200 - 1206.
- [14] KOYAMA T, CHIJIMATSU M, SHIMIZU H, et al. Numerical

modeling for the coupled thermo - mechanical processes and spalling phenomena in sp pillar stability experiment (APSE) [J] . Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering ,

2013,5(1);58-72.

[15] Comsol A B. Multiphysics version 3. 2,uses guide and reference guide[M].Stockholm:[s.n.],2005.

Analysis and Study on TM Coupling Method to Weathering Effect of Dinosaur Fossil

DU Shengxian¹, ZHANG Shangkun¹, YU Xuefeng¹, CHEN Jun¹, SONG Xiangsuo¹, JIA Chao², ZHANG Guorong²

(1. Shandong Institute of Geological Sciences, Shandong Jinan 250013, China; 2. Civil Engineering College of Shandong University, Shandong Jinan 250061, China)

Abstract: Dinosaur fossils has great scientific value in studying earth evolution, biological evolution, stratigraphic correlation, geological time identify and paleoenvironment reconstruction. But weathering is a serious problem after the dinosaur fossils have been excavated. As many fossils have been destroyed by weathering in a few years or even more quickly. In this article, in order to explore the weathering cause and mechanism of dinosaur fossil geological relics furtherly, TM coupling method is used for analyzing weather regularity of dinosaur fossil in Zhucheng city of Shandong province. The interaction law between fossil and surrounding rock under temperature change has been analyzed in considering their deformation incongruity. Its effect on weathering has also been discussed. Finally, preliminary cause and regularity of weathering has been revealed to provide scientific references for fossil protection.

Key words: Dinosaur fossil; weathering; surrounding rock; temperature stress; TM coupling