DOI：10. 12090/j. issn. 1006 – 6616. 2019. 25. S1. 028

构造-流体耦合有限元模拟：以石英脉型钨矿为例

刘向冲[1,2]
（1. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；
2. 中国地质科学院地质力学研究所动力成岩成矿实验室，北京 100081）

摘　要：热液矿床成矿作用动力学过程涉及多时空高度耦合的物理和化学过程。数值模拟是研究这一复杂动力学过程的重要而有效的工具之一，也可在找矿预测等方面发挥重要作用。以南岭地区石英脉钨矿床为例，利用计算机求解控制构造-流体的物理和化学方程，定量揭示成矿热液聚焦流动与“五层楼”成矿的对应关系，正演高压成矿流体致使围岩发生水力破裂及其成矿效应。模拟结果与石英脉型钨矿床的构造地球化学特征相符。

关键词：钨矿；数值模拟；聚焦流动；五层楼；水力破裂；黑钨矿沉淀；CO_2 逃逸
中图分类号：P612；P541　　**文献标识码**：A

FINITE-ELEMENT SIMULATIONS OF STRUCTURE-FLUID COUPLING: A CASE STUDY IN VEIN-TYPE TUNGSTEN DEPOSITS

LIU Xiangchong[1,2]
（1. *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*;
2. *The Laboratory of Dynamic Digenesis and Metallogenesis*, *Institute of Geomechanics*, *CAGS*, *Beijing* 100081, *China*）

Abstract: The dynamic process of hydrothermal ore-forming involves highly coupled physical and chemical processes at different spatial and temporal scales. Numerical simulation is one of important and effective tools to decipher these complex processes and aids in prospecting. The vein-type tungsten deposits in the Nanling Range are taken examples to show how to solve the physical and chemical equations controlling the coupled structure-fluids using numerical simulation, decipher the relationships between fluid focusing and the tungsten mineralization in the five-floor vertically morphological zonation quantitatively, and reproduce the influences of hydraulic fracturing driven by high-pressure fluids on wolframite precipitation. The numerical results are consistent with the geochemical characteristics constrained by previous studies.

Key words: tungsten deposits; numerical simulation; fluid focusing; five-floor zonation; hydraulic fracturing; wolframite precipitation; CO_2 escaping

基金项目：国家自然科学基金（41602088）；中国地质科学院基本科研业务费（JYYWF20180602，DZLXJK201603）
作者简介：刘向冲（1987-），男，副研究员，从事成矿动力学数值模拟和数学地质等研究。E-mail：xcliu@ cags. ac. cn
引用格式：刘向冲. 构造-流体耦合有限元模拟：以石英脉型钨矿为例［J］. 地质力学学报，2019，25（S1）：163 – 169　DOI：10. 12090/j. issn. 1006 – 6616. 2019. 25. S1. 028

LIU Xiangchong. Finite-element simulations of structure-fluid coupling: a case study in vein-type tungsten deposits［J］. Journal of Geomechanics, 2019, 25（S1）: 163 – 169　DOI: 10. 12090/j. issn. 1006 – 6616. 2019. 25. S1. 028

0 引言

矿床是一种复杂系统，矿床成因的基本问题归根结底是成矿作用的动力学问题[1-2]。热液矿床成矿动力学过程通常包括成矿元素的萃取、运移和沉淀。这一复杂过程涉及多时空多尺度相互作用的热液流动、构造变形和化学反应。数值模拟是研究这一复杂动力学过程的重要而有效的工具之一。利用数值模拟研究成矿动力学的技术手段是针对成矿过程的某个或者某几个子过程（如流体流动、热传输、变形和化学反应等）建立相应的数学物理模型，根据矿地质和地球化学特征设置相适应的初始和边界条件，利用计算机求得相应的数学物理方程的数值解（如达西定律、流体连续性方程、热传输方程、岩石变形的本构方程等），直观地再现成矿系统时空演化细节，从而提高对成矿物理化学过程的认识和找矿预测的能力。由此可知，该领域研究内容涉及矿床学、地球化学、流体力学、岩石力学等多个学科的交叉融合[3-4]。近年来，数值模拟已在揭示斑岩型铜矿[5]、热液金矿[6-7]、矽卡岩型矿床[8-9]、不整合型铀矿[10-11]等多种类型矿床的成矿过程和找矿预测发挥了积极作用。

文章介绍近年来在石英脉型钨矿构造-流体耦合成矿过程的研究进展，相关数值模拟实验所用的软件是中国海洋大学邢会林教授开发多年的PANDAS（Parallel Adaptive Nonlinear Deformation Analysis System）。PANDAS是一套基于有限元方法（FEM）和格子Boltzmann方法（LBM）开发的一个创新性软件平台，可用于模拟地下含裂隙非均质地层中“应力变形/破坏—流体流动—热传导—化学反应”等多场高度非线性耦合的问题，解决从微孔隙尺度到实验室以及油气田尺度甚至全球等多尺度下的相关地球科学和地质资源工程中的主要科学和工程技术挑战[12-14]。

1 热液聚焦流动与五层楼成矿

南岭地区石英脉型钨矿床根据矿体与岩体的空间关系可分为外接触带型和内接触带型钨矿。外接触带型钨矿床多为近直立脉体系统，脉体系统在垂向上具有形态分带，自上而下为：线脉带、细脉带、薄脉带、大脉带和消失带，俗称“五层楼”[15]。该模式是中国地质工作者提出的经验成矿模式，在钨矿找矿中发挥了重要作用[16-17]。在某些脉体系统根部（如大吉山钨矿）或岩体接触带也发育的层状或透镜状浸染型钨矿体，有学者称之为“地下室”[18-20]。从热液流动的角度来看，脉型矿体的流动模式是以节理为通道的渠道化流动，而浸染型矿体的热液流动模式以多孔介质渗流为主。前者热液与围岩接触有限，以充填作用为主，交代作用为辅[21]；后者热液与围岩充分接触，交代作用直接影响热液渗流与成矿[22]。因而，构造与热液流动的相互作用对于热液充填形成脉型钨矿至关重要。

通常含钨脉体系统的中下部位，即“五层楼”分带的大脉带和薄脉带，最具有工业价值[15]。为什么会存在这一成矿规律呢？钨成矿系统其实发育了大量陡倾节理，如大吉山钨矿[23]，钨矿脉也几乎利用了这些陡倾节理。这些陡倾节理可能与成矿岩体侵位形成的应力场有关（最大主应力在垂直方向）[24]。钨成矿流体温度在160～390 ℃[25-27]，压力可达90～160 MPa[28-30]，成矿深度约在4～8 km[31-33]。发育大量陡倾节理的围岩拥有较高的渗透率和孔隙度，那么在高压流体从挥发分饱和岩浆释放时，这些高渗透率的节理如何影响热液流动的趋势？有限元数值方法可以再现这一水动力学过程。根据石英脉型钨矿的构造和地球化学特征建立图1所示的二维模型[34]。模型的初始和边界条件根据其他学者约束的物理化学参数设置。所求解的偏微分方程包括达西定量、流体连续性方程和热传输（热对流和热传导）方程。热液自岩浆释放后，首先淋滤裂隙系统深部较大范围的围岩，然后在裂隙内聚焦流动，最后在裂隙系统顶部向围岩分散。热液流通量主要集中在垂直裂隙系统的中下部，在其周边围岩较小。垂直裂隙系统整体的几何形态与渗透能力显著影响成矿流体聚焦流动的构造部位和水平[31]。裂隙系统在垂直剖面上越狭长，渗透率越高，就越有利于成矿流体聚焦于深部，为深部形成大脉和成矿提供必要非充分条件（图2）。这一结果与脉幅分形统计结果一致[35-37]。

初始裂隙系统对于脉型矿床的形成至关重要[38]。上述数值模拟实验表明，这些裂隙系统显著影响热液流动的趋势，因而了解这些初始裂隙

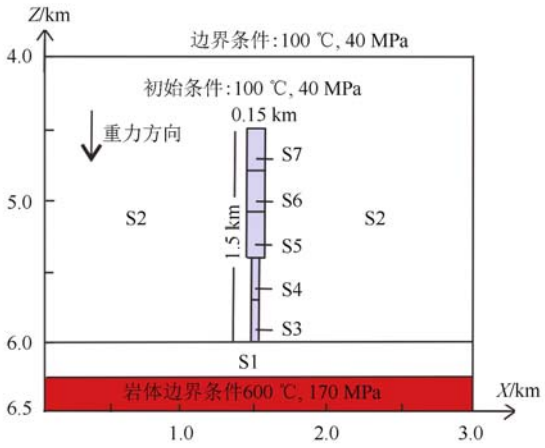

图 1　石英脉型钨矿床成矿流体流动二维模型

Fig. 1　A two-dimensional model of hydrothermal flow at vein-type tungsten deposits

的成因将会有助于理解钨成矿就位机制和深部找矿预测。充足的热液流通量是成矿的必要条件之一，上述数值模拟实验利用其他学者已获得的成矿地质和地球化学特征参数，着重分析这一必要条件与成矿的关系。虽然该模型与真实的复杂成矿模型尚有较大差距，但从水动力学的角度解释了控制钨成矿有利部位的机制。随着逐步深入地认识钨成矿动力学过程，根据相关科学问题的复杂程度，也需要对模型作相应地改进和完善。

该模型为横切脉体系统的剖面，只截取了 4 ~ 6.5 km 的深度。根据五层楼分带划分了五层裂隙带，自下至上分别为 S3、S4、S5、S6、S7。每一层节理区是 0.3 km 高，上三层 0.015 km 宽，下两层宽 0.06km。高压热流体由岩浆顶部释放。边界条件包括：顶部的温度和压力分别为 100 ℃和 40 MPa，岩浆的温度和压力分别为 600 ℃和 170 MPa。模型的初始温度和压力分别是 100 ℃和 40 MPa。各个单位的水力学参数见表 1。

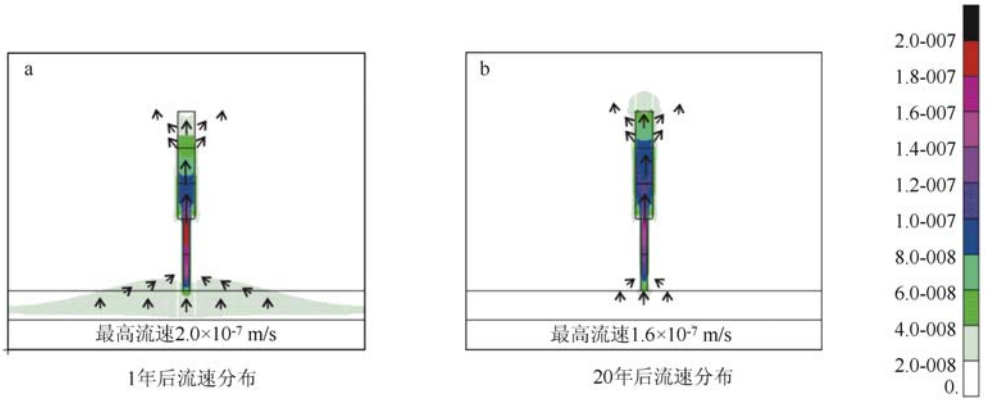

图 2　数值模拟实验 1 的流速场（m/s）

Fig. 2　The distribution of fluid velocity in the experiment 1 (m/s)

表 1　数值模拟实验 1 各个单元的水力学参数

Table 1　Hydraulic parameters of each unit in the experiment 1

参数	岩体	S1	S2	S3, S4	S5, S6, S7
渗透率/m^2	1.0×10^{-18}	1.0×10^{-16}	2.0×10^{-16}	7.0×10^{-14}	3.0×10^{-15}
孔隙度	0.0015	0.015	0.02	0.14	0.05

箭头代表流体流动的方向，底部数值是最高流速。

2　水力破裂与黑钨矿沉淀

CO_2 是国内外钨成矿流体重要的挥发分之一[39-40]。近年来多位学者在黑钨矿、黄玉等矿物发现含 CO_2 的包裹体，并提出 CO_2 逃逸触发的流体不混溶是黑钨矿沉淀的重要机制之一[41-43]。刘向冲和张德会通过多组分平衡反应热力学模型计算发现，流体从静岩压力将至静水压力的泄压可造成 CO_2 溶解度显著下降，并促使钨溶解度降低 27% ~47%[44]。然而，岩石破裂并不一定会使流体压力从静岩压力直接降至静水压力，而是处在介于静岩压力（或超静岩压力）与静水压力的周期性震荡状态[45-47]。钨成矿流体压力较高，与岩石破裂（如水力破裂[48]）、渗透率升高、流体充填成矿有着密切联系[49]。那么水力破裂后的流体压力变化能否显著降低 CO_2 和钨溶解度？根据钨矿的构造地质特征，建立有限元数值模型，模拟高压成矿流体导致的水力破裂过程，定量分析该过程对热液流动和 CO_2 溶解度的影响[50-51]。

建立 4 km 深处建立 100 m × 100 m 的二维有限

元模型（图3）。横轴（X 轴）代表垂直脉体的水平方向，纵轴（Y 轴）为重力方向。模型的运行分为两步。第一步，固定底部在 Z 方向的位移，在顶部加载100 MPa向下的压力，在两侧加载指向模型内部的60 MPa压力，这些边界条件形成4 km深的初始应力场。第二步，在模型底部加压力为200 MPa和温度为350 ℃的流体，模型的初始流体压力为40 MPa。模型使用的流体是盐度10%的NaCl水溶液。岩石的抗张强度为5 MPa。模型使用毛世德提出的 CO_2 溶解度模型[52]。

释放流体附近的节点在极短的时间内发生破裂（图4）。由于温度在这么短时间内不会发生显著变化，故主要考虑流体压力变化对石英和 CO_2 溶解度的影响。水力破裂发生后，流体压力在震荡中快速下降，盐水溶液中 CO_2 的溶解度从11 mol/kg降至7 mol/kg，降幅36%。

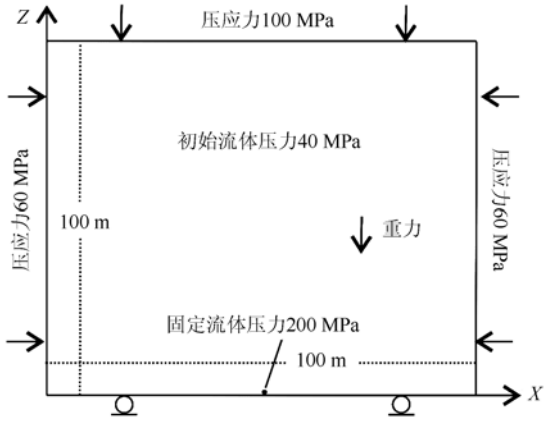

图3 截取4 km深处100 m×100 m的水力破裂二维模型

Fig. 3 A 100 m×100 m two-dimensional model of hydraulic fracturing at a depth of 4 km

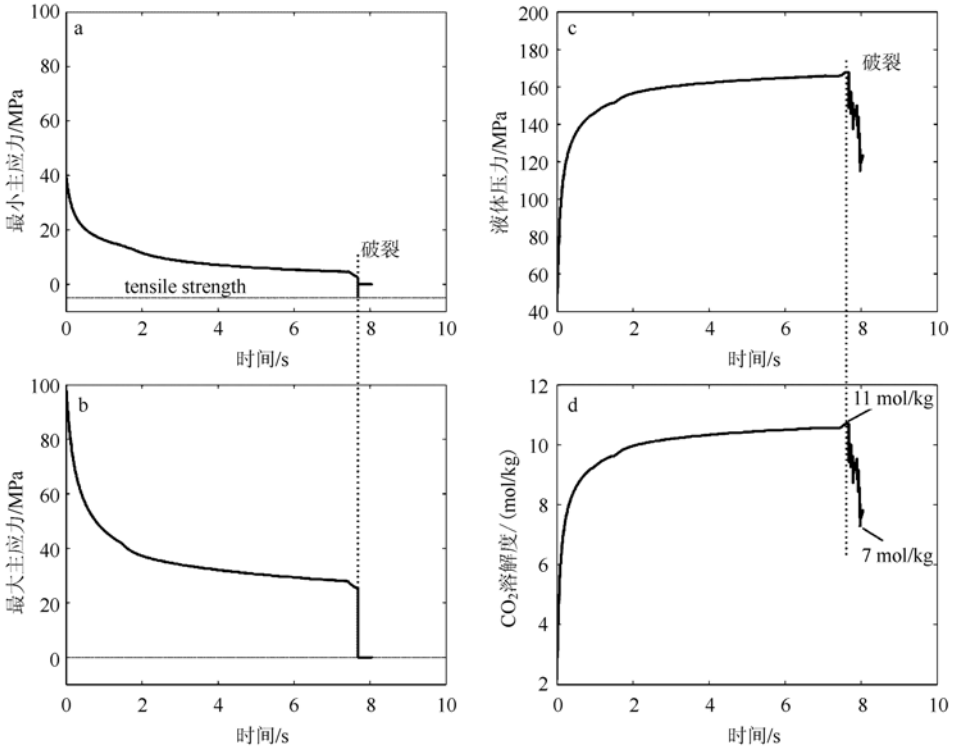

图4 施加流体附近节点在水力破裂后应力场和流体压力变化

Fig. 4 The change of the stress and fluid pressure after hydraulic fracturing at a reference node closed to the fixed fluid pressure

超压流体在水力破坏后的快速泄压的确可显著降低 CO_2 的溶解度。CO_2 逸出会使pH升高，故可造成黑钨矿溶解度较低，发生矿石沉淀。最新研究结果表明，水力破裂还受热液的压缩系数、粘度、应力场、初始流体压力等因素的影响。因而，上述数值模拟实验证实水力破裂后流体泄压是中国脉型钨矿中黑钨矿沉淀的重要机制之一。此数值模拟结果也有助于理解其他对pH敏感的矿石（如锡石、金等）沉淀机制。

3　结论

成矿系统具有高度的复杂性且跨越巨大的时空尺度，现有的物理化学实验模拟手段难以再现成矿系统的演化过程，表述成矿物理化学过程的微分方程组也未找到解析解，计算机模拟已成为再现成矿系统时空演化过程的唯一研究手段，也成为找矿预测的重要工具之一。通过构造-流体耦合模拟实验，再现了钨成矿过程的流体聚焦流动和水力破裂过程，模拟结果与石英脉型钨矿床的构造地球化学特征相符。上述工作显示数值模拟在成矿机制研究和找矿预测等方面发挥重要作用。

致谢：文章模型计算使用了昆士兰大学的超级计算机 Savanna 和毛世德教授提供的 CO_2 溶解度计算程序，在此一并表示感谢。同时感谢审稿人和编辑部提出的指导和修改意见。

参考文献/References

[1] 於崇文. 热液成矿作用动力学 [M]. 武汉：中国地质大学出版社，1993：224.
YU Chongwen. Dynamics of the hydrothermal ore-forming processes [M]. Wuhan：China University of Geosciences Press，1993：224.（in Chinese）

[2] 於崇文，岑况，鲍征宇，等. 成矿作用动力学 [M]. 北京：地质出版社，1998：310.
YU Chongwen，CEN Kuang，BAO Zhengyu，et al. Dynamics of ore-forming processes [M]. Beijing：Geology Publishing House，1998：310.（in Chinese）

[3] 池国祥，薛春纪. 成矿流体动力学的原理、研究方法及应用 [J]. 地学前缘，2011，18（5）：1－18.
CHI Guoxiang，XUE Chunji. Principles，methods and applications of hydrodynamic studies of mineralization [J]. Earth Science Frontiers，2011，18（5）：1－18.（in Chinese with English abstract）

[4] 赵崇斌，HOBBS B E，ORD A. 用计算地球科学研究方法探讨地质现象的动力学机制——以断层中等距成矿分布为例 [J]. 中国科学 D 辑：地球科学，2008，38（5）：646－652.
ZHAO Chongbin，HOBBS B E，ORD A. Investigating dynamic mechanisms of geological phenomena using methodology of computational geosciences：An example of equal-distant mineralization in a fault [J]. Science in China Series D：Earth Sciences，2008，51（7）：947－954.

[5] WEIS P，DRIESNER T，HEINRICH C A. Porphyry-copper ore shells form at stable pressure-temperature fronts within dynamic fluid plumes [J]. Science，2012，338（6114）：1613－1616.

[6] ELDURSI K，BRANQUET Y，GUILLOU-FROTTIER L，et al. Numerical investigation of transient hydrothermal processes around intrusions：Heat-transfer and fluid－circulation controlled mineralization patterns [J]. Earth and Planetary Science Letters，2009，288（1－2）：70－83.

[7] 王偲瑞，杨立强，孔鹏飞. 焦家断裂渗透性结构与金矿床群聚机理：构造应力转移模拟 [J]. 岩石学报，2016，32（8）：2494－2508.
WANG Sirui，YANG Liqiang，KONG Pengfei. Permeability structure and gold deposits cluster mechanism along the Jiaojia fault，China：Structure stress transfer modeling [J]. Acta Petrologica Sinica，2016，32（8）：2494－2508.（in Chinese with English abstract）

[8] 刘亮明，周瑞超，赵崇斌. 构造应力环境对浅成岩体成矿系统的制约：从安庆月山岩体冷却过程动力学计算模拟结果分析 [J]. 岩石学报，2010，26（9）：2869－2878.
LIU Liangming，ZHOU Ruichao，ZHAO Chongbin. Constraints of tectonic stress regime on mineralization system related to the hypabyssal intrusion：Implication from the computational modeling experiments on the geodynamics during cooling process of the Yuenshan intrusion in Anqing district，China [J]. Acta Petrologica Sinica，2010，26（9）：2869－2878.（in Chinese with English abstract）

[9] LI X H，YUAN F，ZHANG M M，et al. 3D computational simulation-based mineral prospectivity modeling for exploration for concealed Fe-Cu skarn-type mineralization within the Yueshan orefield，Anqing district，Anhui Province，China [J]. Ore Geology Reviews，2019，105：1－17.

[10] CUI T，YANG J，SAMSON I M. Tectonic deformation and fluid flow：implications for the formation of unconformity-related uranium deposits [J]. Economic Geology，2012，107（1）：147－163.

[11] LI Z H，CHI G X，BETHUNE K M，et al. Structural controls on fluid flow during compressional reactivation of basement faults：insights from numerical Modeling for the formation of unconformity-related uranium deposits in the Athabasca Basin，Canada [J]. Economic Geology，2017，112（2）：451－466.

[12] LIU X C，MA Y，XING H L，et al. Chemical responses to hydraulic fracturing and wolframite precipitation in the vein-type tungsten deposits of southern China [J]. Ore Geology Reviews，2018，102：44－58.

[13] LIU X C，XING H L，ZHANG D H. The mechanisms and time scale of alteration halos in vein-type tungsten deposits in southern China [J]. Ore Geology Reviews，2017，89：1019－1029.

[14] XING Huilin. Finite element modelling of biogas process from coal [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics，2016，33（4）：637－642.

[15] 古菊云. 华南钨矿脉的形态分类 [C] //余鸿彰. 钨矿地质讨论会论文集. 北京：地质出版社，1984：35－45.
GU Jiyun. Morphological zonation of tungsten deposits in South China [C] //YU Hongzhang. Proceedings of Symposium on Tungsten Geology. Beijing：Geological Publishing House，1984：35－45.（in Chinese）

[16] 陈毓川，裴荣富，张宏良，等. 南岭地区与中生代花岗岩类有关的有色及稀有金属矿床地质 [M]. 北京：地质出版

社, 1989: 507.
CHEN Yuchuan, PEI Rongfu, ZHANG Hongliang, et al. The geology of nonferrous and rare metal deposits related to mesozoic granitoids in Nanling Region, China [M]. Beijing: Geological Publishing Housing, 1989: 507. (in Chinese)

[17] 李吉明, 李永明, 楼法生, 等. 赣北发现“五层楼”式石英脉型黑钨矿矿床——东坪黑钨矿矿床的发现及其地质意义[J]. 地球学报, 2016, 37 (3): 379-384.
LI Jiming, LI Yongming, LOU Fasheng, et al. A "five-storey" style quartz vein wolframite deposit in northern Jiangxi province: the discovery of the Dongping wolframite deposit and its geological significance [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37 (3): 379-384. (in Chinese with English abstract)

[18] 王登红, 唐菊兴, 应立娟, 等. “五层楼+地下室”找矿模型的适用性及其对深部找矿的意义 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40 (4): 733-738.
WANG Denghong, TANG Juxing, YING Lijuan, et al. Application of "Five levels + Basement" model for prospecting deposits into depth [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40 (4): 733-738. (in Chinese with English abstract)

[19] 赵正, 王登红, 陈毓川, 等. “九龙脑成矿模式”及其深部找矿示范: “五层楼+地下室”勘查模型的拓展 [J]. 地学前缘, 2017, 24 (5): 8-16.
ZHAO Zheng, WANG Denghong, CHEN Yuchuan, et al. "Jiulongnao metallogenic model" and the demonstration of deep prospecting: the extended application of "Five levels + Basement" exploration model [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24 (5): 8-16. (in Chinese with English abstract)

[20] 许建祥, 曾载淋, 王登红, 等. 赣南钨矿新类型及“五层楼+地下室" 找矿模型 [J]. 地质学报, 2008, 82 (7): 880-887.
XU Jianxiang, ZENG Zailin, WANG Denghong, et al. A new type of tungsten deposit in southern Jiangxi and the new model of "Five floors + Basement" for prospecting [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82 (7): 880-887. (in Chinese with English abstract)

[21] 祝新友, 王京彬, 王艳丽, 等. 论石英脉型钨矿成矿系统的相对封闭性——以湖南瑶岗仙脉型钨矿床为例 [J]. 地质学报, 2014, 88 (5): 825-835.
ZHU Xinyou, WANG Jingbin, WANG Yanli, et al. Relative closed ore-forming system in the Tungsten-Bearing quartz vein: a case study of the Yaogangxian deposit, Hunan Province [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88 (5): 825-835. (in Chinese with English abstract)

[22] WU M Q, SAMSON I M, ZHANG D H. Textural and chemical constraints on the formation of disseminated granite-hosted W-Ta-Nb mineralization at the Dajishan Deposit, Nanling Range, Southeastern China [J]. Economic Geology, 2017, 112 (4): 855-887.

[23] 周利敏. 江西省全南县大吉山钨矿构造应力场数值模拟与成矿预测 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2009: 67.
ZHOU Limin. Numerical modeling of paleo tectonic stress field and metallogenic prognosis in Dajishan tungsten deposit, Quannan, Jiangxi [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009: 67. (in Chinese with English abstract)

[24] KOIDE H, BHATTACHARJI S. Formation of fractures around magmatic intrusions and their role in ore localization [J]. Economic Geology, 1975, 70 (4): 781-799.

[25] NI P, WANG X D, WANG G G, et al. An infrared microthermometric study of fluid inclusions in coexisting quartz and wolframite from Late Mesozoic tungsten deposits in the Gannan metallogenic belt, South China [J]. Ore Geology Reviews, 2015, 65: 1062-1077.

[26] WEI W F, HU R Z, BI X W, et al. Infrared microthermometric and stable isotopic study of fluid inclusions in wolframite at the Xihuashan tungsten deposit, Jiangxi province, China [J]. Mineralium Deposita, 2012, 47 (6): 589-605.

[27] 曹晓峰, 吕新彪, 何谋春, 等. 共生黑钨矿与石英中流体包裹体红外显微对比研究——以瑶岗仙石英脉型钨矿床为例[J]. 矿床地质, 2009, 28 (5): 611-620.
CAO Xiaofeng, LV Xinbiao, HE Mouchun, et al. An infrared microscope investigation of fluid inclusions in coexisting quartz and wolframite: A case study of Yaogangxian quartz-vein wolframite deposit [J]. Mineral Deposits, 2009, 28 (5): 611-620. (in Chinese with English abstract)

[28] 黄惠兰, 常海亮, 付建明, 等. 西华山脉钨矿床的形成压力及有关花岗岩的侵位深度 [J]. 矿床地质, 2006, 25 (5): 562-571.
HUANG Huilan, CHANG Hailiang, FU Jianming, et al. Formation pressure of wolframite-vein deposits and emplacement depth of related granite in Xihuashan, Jiangxi Province [J]. Mineral Deposits, 2006, 25 (5): 562-571. (in Chinese with English Abstract)

[29] 王巧云, 胡瑞忠, 彭建堂, 等. 湖南瑶岗仙钨矿床流体包裹体特征及其意义 [J]. 岩石学报, 2007, 23 (9): 2263-2273.
WANG Qiaoyun, HU Ruizhong, PENG Jiantang, et al. Characteristics and significance of the fluid inclusions from Yaogangxian tungsten deposit in south of Hunan [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (9): 2263-2273. (in Chinese with English abstract)

[30] 席斌斌, 张德会, 周利敏, 等. 江西省全南县大吉山钨矿成矿流体演化特征 [J]. 地质学报, 2008, 82 (7): 956-966.
XI Binbin, ZHANG Dehui, ZHOU Limin, et al. Characteristics of ore-forming fluid evolution in Dajishan tungsten deposit, Quannan County, Jiangxi [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82 (7): 956-966. (in Chinese with English abstract)

[31] 芮宗瑶, 李荫清, 王龙生, 等. 从流体包裹体研究探讨金属矿床成矿条件 [J]. 矿床地质, 2003, 22 (1): 13-23.
RUI Zongyao, LI Yinqing, WANG Longsheng, et al. Approach to ore-forming conditions in light of ore fluid inclusions [J]. Mineral Deposits, 2003, 22 (1): 13-23. (in Chinese with English abstract)

[32] BAKER T, POLLARD P J, MUSTARD R, et al. A comparison

of granite-related tin, tungsten, and gold – bismuth deposits: implications for exploration [J]. Society of Economic Geologists Newsletter, 2005, 61: 5 – 17.

[33] 刘向冲. 江西大吉山石英脉型黑钨矿床“五层楼”垂直形态分带动力学机制 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2014: 114.
LIU Xiangchong. The mechanisms of the five-floor vertical morphological zonation at the Dajishan vein-type tungsten deposit, Jiangxi [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014: 114. (in Chinese with English abstract)

[34] LIU X C, XING H L, ZHANG D H. Fluid focusing and its link to vertical morphological zonation at the Dajishan vein-type tungsten deposit, South China [J]. Ore Geology Reviews, 2014, 62: 245 – 258.

[35] 刘向冲, 张德会, 赵波, 等. 漂塘钨矿床“五层楼”垂直形态分带定量分析 [J]. 高校地质学报, 2017, 23 (3): 408 – 416.
LIU Xiangchong, ZHANG Dehui, ZHAO Bo, et al. Quantitative Analysis of the “five-floor” vertical morphological zonation in the Piaotang tungsten deposits, south China [J]. Geological Journal of China Universities, 2017, 23 (3): 408 – 416. (in Chinese with English abstract)

[36] 汪劲草, 韦龙明, 朱文凤, 等. 南岭钨矿“五层楼模式”的结构与构式——以粤北始兴县梅子窝钨矿为例 [J]. 地质学报, 2008, 82 (7): 894 – 899.
WANG Jincao, WEI Longming, ZHU Wenfeng, et al. Texture and tectonic style of “five-storeyed type” for the tungsten deposits in the Nanling Mountains, Southern China——An example from the Meiziwo tungsten deposit [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82 (7): 894 – 899. (in Chinese with English abstract)

[37] 韦安伟, 汪劲草, 莫志明, 等. 介于岩浆岩型与剪切带型之间的脉状钨锡矿床——广西珊瑚钨锡矿床新认识 [J]. 桂林理工大学学报, 2015, 35 (1): 8 – 14.
WEI Anwei, WANG Jincao, MO Zhiming, et al. A kind of tungsten-tin vein deposit between magmatic rock type and shear zone type-New acknowledge on Shanhu tungsten-tin deposit in Guangxi [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2015, 35 (1): 8 – 14. (in Chinese with English abstract)

[38] SANDERSON D J, ROBERTS S, GUMIEL P, et al. Quantitative analysis of tin-and tungsten-bearing sheeted vein systems [J]. Economic Geology, 2008, 103 (5): 1043 – 1056.

[39] NAUMOV V B, GIRNIS A V, DOROFEEVA V A, et al. Concentration of ore elements in magmatic melts and natural fluids as deduced from data on inclusions in minerals [J]. Geology of Ore Deposits, 2016, 58 (4): 327 – 343.

[40] WOOD S A, SAMSON I M. The hydrothermal geochemistry of Tungsten in Granitoid environments: I. relative solubilities of ferberite and scheelite as a function of T, P, pH, and mNaCl [J]. Economic Geology, 2000, 95 (1): 143 – 182.

[41] CHEN L L, NI P, LI W S, et al. The link between fluid evolution and vertical zonation at the Maoping tungsten deposit, Southern Jiangxi, China: Fluid inclusion and stable isotope evidence [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2018, 192: 18 – 32.

[42] LI W S, NI P, PAN J Y, et al. Fluid inclusion characteristics as an indicator for tungsten mineralization in the Mesozoic Yaogangxian tungsten deposit, central Nanling district, South China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2018, 192: 1 – 17.

[43] 周龙全, 李光来, 苏晔, 等. 赣南茅坪钨矿床黄玉单晶流体包裹体研究 [J]. 矿床地质, 2017, 36 (4): 921 – 934.
ZHOU Longquan, LI Guanglai, SU Ye, et al. A preliminary study of fluid inclusions of topaz crystal from Maoping tungsten deposit, southern Jiangxi Province [J]. Mineral Deposits, 2017, 36 (4): 921 – 934. (In Chinese with English abstract)

[44] 刘向冲, 张德会. 黑钨矿有效沉淀机制: CO2 逃逸 [J]. 地质力学学报, 2019, 25 (1): 19 – 26.
LIU Xiangchong, ZHANG Dehui. The efficient mechanisms for precipitating wolframite: CO2 escaping [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25 (1): 19 – 26. (in Chinese with English abstract)

[45] 陈柏林. 从成矿构造动力学探讨脉状金矿床成矿深度 [J]. 地质科学, 2001, 36 (3): 380 – 384.
CHEN Bolin. Calculation of metallogenic depth of lode gold deposits from mineralization structure-dynamics [J]. Chinese Journal of Geology, 2001, 36 (3): 380 – 384. (in Chinese with English abstract)

[46] SIBSON R H. Conditions for fault – valve behaviour [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1990, 54 (1): 15 – 28.

[47] COX S F. The application of failure mode diagrams for exploring the roles of fluid pressure and stress states in controlling styles of fracture-controlled permeability enhancement in faults and shear zones [J]. Geofluids, 2010, 10 (1 – 2): 217 – 233.

[48] 徐兴旺, 牛磊, 洪涛, 等. 流体构造动力学与成矿作用 [J]. 地质力学学报, 2019, 25 (1): 1 – 8.
XU Xingwang, NIU Lei, HONG Tao, et al. Tectonic dynamics of fluids and metallogenesis [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25 (1): 1 – 8. (in Chinese with English abstract)

[49] 於崇文. 多重水力断裂的分形扩张 [J]. 地学前缘, 2004, 11 (1): 11 – 44.
YU Chongwen. Fractal dilatation of multiple hydraulic fracturing [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11 (3): 11 – 44. (in Chinese with English abstract)

[50] LIU X C, XING H L, ZHANG D H. Influences of hydraulic fracturing on fluid flow and mineralization at the vein-type tungsten deposits in southern China [J]. Geofluids, 2017, 2017: 4673421.

[51] LIU X C, XING H L, ZHANG D H. Hydraulic fracturing leads to wolframite deposition at magmatic-hydrothermal transition [J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92 (2): 862 – 863.

[52] MAO S D, ZHANG D H, LI Y Q, et al. An improved model for calculating CO_2 solubility in aqueous NaCl solutions and the application to CO_2 – H_2O – NaCl fluid inclusions [J]. Chemical Geology, 2013, 347: 43 – 58.