

岩石流变学原理在构造成矿研究中的应用

——以 BIF 型富铁矿床为例

许德如¹, 吴传军^{1,2}, 吕古贤³, 周岳强^{1,2}, 于亮亮^{1,2},
张建岭^{1,2}, 胡国成^{1,2}, 侯茂洲^{1,2}

(1.中国科学院 广州地球化学研究所 矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081)

摘要: 根据岩石流变学的基本原理与研究进展及在成矿学中的应用, 初步讨论了构造成矿与岩石流变在研究内容、研究目标等方面的一致性问题, 并以世界上变质条带状铁建造(BIF)型富铁矿床为例, 综合分析了构造变形和岩石流变在该类矿床形成过程中的地位与作用。由于岩石流变行为存在差异, 褶皱变形及伴随的韧性剪切和高温塑性流动是高位 BIF 型富铁矿床形成的关键。文章指出, 深入开展特色和重要矿床的构造物理化学研究将是实现成矿学与岩石流变学有机结合的重要方向, 并有可能为创新成矿地质理论、发现一批大型、超大型矿床提供重要依据。

关键词: 构造成矿; 岩石流变; 条带状铁建造(BIF); 高位富铁矿成因; 构造物理化学

中图分类号: P589; P611 文献标志码: A 文章编号: 1001-1552(2015)01-0093-017

0 引言

来源于海相化学沉积的条带状铁建造型(简称 BIF)(Gross, 1980; James, 1983)铁矿是我国乃至全球最重要的铁矿类型, 几乎发生在所有前寒武纪地盾区(Klein, 2005; Li et al., 2014)。对世界上 BIF 型铁矿、特别是其中高位富铁矿的研究成果的综合分析表明(Zhai and Windley, 1990; Kaufman, 1996; 沈其韩, 1998; Barley et al., 1999; Dalstra and Guedes, 2004; Rosière and Rios, 2004; 沈保丰等, 2004; Belykh et al., 2007; Wang et al., 2014), 大多数条带状铁建造不仅经历了低-中级、甚至更高级的变质作用, 而且与强烈的构造变形和大规模流体活动密切相关。然而, 目前国际矿床学界关于 BIF 型铁矿床

的成因仍存在很大争议(Xu et al., 2013, 2014), 尤其是构造变形与变质的 BIF 中高位富铁矿的成因还长期困惑着地质学者(Khan and Naqvi, 1996; Powell et al., 1999; Rosière et al., 2001; Lascelles, 2006; Siemes et al., 2008)。鉴于此, 本文试图从构造变形与岩石流变学的角度, 探讨 BIF 型铁矿、特别是 BIF 型高位富铁矿的形成机理, 以期为深入揭示 BIF 型铁矿床的成因提供启示。

1 岩石流变学原理与研究进展及在成矿学中的应用

岩石流变学是 20 世纪 80 年代逐渐发展和形成的一门新型固态流动地球科学(Kirby, 1983; Ranalli,

收稿日期: 2013-11-15; 改回日期: 2014-05-14

项目资助: 国家自然科学基金(批准号: 41472171)、国家 973 项目(编号: 2012CB416806)和“135”项目(编号: Y234141A07)联合资助。

第一作者简介: 许德如(1966-), 男, 博士, 研究员, 主要从事成矿构造与矿产预测研究。Email: xuderu@gig.ac.cn

1997; Ji and Xia, 2002), 其目标是研究地球各层圈物质在不同物理化学环境下(温度、压力、差异应力、流体和水等)的变形、流动及其机制(金振民和姚玉鹏, 2004; 嵇少丞等, 2008)。岩石流变学的基本原理如岩石圈不均一性及流变学分层、应变局部化、变形分解作用、力学及热不稳定性、多矿物岩石复合流变及变形机制转换等, 为解释岩石圈内近水平大型拆离构造、推覆和滑覆构造、造山带和盆地、裂谷和地堑等形成的几何学、运动学和动力学提供了重要依据(Ranalli and Murphy, 1987; Molnar, 1988; Ji and Zhao, 1994; 周真恒等, 1999; Jin et al., 2002; Burov and Watts, 2006; 索书田等, 2008; Corti et al., 2010)。人们不仅已发现固体地壳岩石的变形并不是传统意义上的弹性变形, 其实包含了岩石本身的塑性变形及固态岩石中一定量的流体作用, 而且还认识到大陆岩石层或造山带的形成和演化实质上是地球物质在差异应力、时间、热状态、温度、压力和流体因素综合制约下流动和重新定位的结果(Karato and Wu, 1993; Ji, 2008; 金振民, 1997; 李德威和纪云龙, 2000; 杨恒和白武明, 2000), 从而将流变学基本理论及塑性变形、塑性流动引入构造变形分析, 加深了人们对地壳、上地幔物质宏观变形机理、现象及成层性的理解。Fyfe (1992)因而指出: 地球科学的许多分支学科所研究的各种尺度的构造形迹(板块运动、板内变形、岩石节理、矿物晶格变形等), 都可以说是地球物质在不同尺度内变形和流动的结果, 本质上与流变学有着内在联系。从这个意义上讲, 如果我们将矿石看作是一种特殊的岩石类型, 那么就不难理解, 自然界所形成的任何矿床/矿体实际上都是与岩石流变行为有关的系列变形地质体。

岩石流变学的基本原理及在构造变形中的广泛应用有可能为阐明成矿物质的富集机理和矿床的成因提供重要启示。然而, 将岩石流变学基本理论应用于矿床的成因、特别是解决金属矿床的富集过程与机理等问题, 国际矿床学界尚未引起重视。目前国内外所报道的相关研究成果大多数系高温高压实验的探索(吴学益等, 1984, 2006; Lagoeiro, 1998; 金扰, 1997; Siemes et al., 2003; 郑远川等, 2009), 且未能信服地解释构造应力与地壳物质(包括各种地质体、岩石、矿石、矿物、元素等)的变形、流动和成矿物质富集的机理。自 20 世纪 50 年代末, 陈国达先生就将构造活动与成矿物质的运动结合起来开展成矿学研究, 强调构造(包括大、中、小、微各级构造)对矿床的形成不仅仅起控制作用,

更重要的是它在成矿作用中占有主导地位(陈国达, 1978)。经过几十年的不断完善, 陈国达先生在“成矿构造”的基础上, 又提出了“构造成矿”的概念, 认为矿床可以通过构造作用及与之相关的岩浆活动、变质作用、沉积作用等过程, 在一个统一的热动力构造-物理化学系统中形成(张湘炳等, 1992)。吕古贤等(1999, 2006)则将构造动力成岩成矿理论(杨开庆, 1986)上升到构造物理化学新领域, 提出“构造作用力通过控制压力、温度和其他物理化学条件来影响成岩成矿地球化学过程”, 认为构造物理化学就是“通过分解构造力来研究构造引起的压力等物理和化学条件的变化, 以及物理和化学变化之间的物理化学关系”(吕古贤, 1991), 从而深化了“构造作用引起地壳物质变形、产生各种构造形迹的同时, 也引起物质成分变化”的认识(Harker, 1932; 王嘉荫, 1978)。构造物理化学概念的提出, 事实上已体现将岩石流变学的基本理论纳入成矿学研究范畴的思想, 从而有可能正确理解构造应力作用下岩石矿物在形成、形变与相变过程中成矿元素的迁移、沉淀和富集的机理。如张秋生等(1984)、刘连登等(1994)就曾提出, 我国红透山铜-锌块状硫化物矿床中富矿体的形成是固态再活化的产物, 而这种再活化是由原始块状矿石中不同硫化物因塑性流动性的差异所引起的, 就体现了富矿体系固态流变成因的思想。大量研究成果和实验数据也表明, 韧性剪切带型或造山型金矿的形成实质上是岩石矿物、乃至成矿元素的流变行为结果(孙胜龙, 1995; McCuaig and Kerrich, 1998; 杨晓勇, 2005; Lawley et al., 2013), 金元素的富集与差异流动应力、剪切变形的温度、深度和应变速率等有着密切联系。其原因是韧性剪切动力能通过位错滑动、位错蠕变及扩散蠕变等晶格变形机制, 促使矿物岩石内部变形、破裂, 产生应力场和应变能, 增加元素的地球化学活性和扩散速度, 进而导致成矿流体的形成与运移、金的活化、搬运与沉淀富集(Zhong and You, 1995; 王春增等, 2009)。此外, 中高温韧性剪切带递进变形过程还常伴有不同程度的同构造熔融作用(嵇少丞, 1988; 许志琴等, 1994; France-Lanord et al., 1998; Schofield and D'Lemos, 1998; Nabelek et al., 2001; 戚学祥等, 2003), 不仅对确定构造变形方式、构造活动的时代、岩石的各向异性及其在造山带演化中的作用有重要意义, 对深入理解韧性剪切带型金矿床的成因也有着特殊的指示作用(杨晓松等, 2003; 李兆麟等, 2004)。

2 构造成矿研究中蕴涵的流变学原理

由于构造变形与矿床的形成、演化有着密切的关系,我国历代地质学家、矿床学家和找矿勘查专家向来重视构造与成矿的研究,所取得的研究成果极大地推动了成矿构造学的发展(陈国达, 1978; 翟裕生等, 1981; 曾庆丰, 1982; 杨开庆, 1986; 裴荣富等, 1999; 等等)。近三十年来,随着构造与成矿关系研究的普遍深入,不同尺度、不同构造体制和不同地球动力学背景下的构造成矿模式,如俯冲增生造山模式、碰撞造山模式、伸展或变质核杂岩构造模式、韧性剪切带模式、逆冲推覆和重力滑覆模式等已相继提出(Spencer and Welty, 1986; Cameron, 1989; Lister and Davis, 1989; 傅昭仁等, 1992; Groves, 1993; 胡正国等, 1994; 陈衍景, 1996, 2013; 何绍勋等, 1996; Groves et al., 1998; 陈柏林, 1999; Goldfarb et al., 2001; 翟裕生, 2002; Hou and Cook, 2009; 侯增谦, 2010)。这些模式的建立为深入阐明成矿作用过程构造变形与岩石流变的贡献提供了基础。

结合以往大量研究成果和事实,不难发现,构造成矿在研究内容和研究目标上与岩石流变学具有较好的一致性。首先,从构造与成矿的关系上讲,构造成矿实质上是成矿参量(如构造动力、温度、压力、深度、 f_{O_2} 等控矿物理化学参数)的临界转换的结果,具体表现为构造应力体制转换所诱发的不同尺度(如全球的、区域的、矿田/矿床的、露头的、显微的)的突发地质事件造成和改变了构造物理化学参量、导致有利的成矿环境和赋矿容矿空间(吕古贤, 1991; 吕古贤等, 1999, 2001; 邓军等, 1998, 2000; 翟裕生等, 2001; 范宏瑞等, 2005),并包涵了在地壳演化过程中,由地幔热流驱动所引起的构造应力场、构造地球物理场和构造地球化学场对地壳物质的变形和流动以及变形过程中成矿物质的迁移和聚集的联合控制(陈国达, 1978)。例如,对世界范围内各类型铁矿床统计分析表明,绝大多数矿床如我国海南石碌铁矿(许德如等, 2009; Xu et al., 2013)、华北鞍山式铁矿(王永基, 2007; Li et al., 2014)、内蒙古白云鄂博超大型 Fe-Nb-REE 矿床(张玉清等, 2003)、新疆蒙库铁矿(李嘉兴等, 2003)、甘肃镜铁山铁铜矿(Sun et al., 1998)、安徽长龙山铁矿(Xu and Lin, 2000)和江西新余式铁矿(曾书明等, 2011)以及西澳 Hamersley 铁矿省(Lascelles, 2006)、巴西南部的巨型 Quadrilátero Ferrífero 铁矿省(Spier et al., 2007)等,均赋存于叠加褶皱次一级向斜核部或两翼,且该部位的矿体常加

厚变富,反映了褶皱变形与(高品位)富铁矿的形成密切相关。如果从褶皱过程物质的运动方式来考虑,褶皱的形成实质上是物质在不同性质构造应力作用下差异流动或滑动的结果;而多期褶皱叠加(即构造应力转换)又常导致构造穹隆、构造盆地和鞍状构造等(Ramsay, 1967),进而引起不同尺度的地质体(包括地层、岩体、矿体、岩石、矿石、矿物等)的重叠、减薄和加厚变富(Ghosh and Mukhopadhyay, 2007)。又如国内外一系列 MVT、SEDEX、SST 和 VMS 等类型铅锌矿床,如美国密西西比河谷铅锌矿床(Leach and Sangster, 1993)、西班牙中北部 Picos de Europa 地区铅锌矿床(Gómez-Fernández et al., 2000)、加拿大魁北克阿巴拉契亚 Upton 铅锌钒矿床(Paradis et al., 2004)、斯洛文尼亚 Topla-Mežica 铅锌矿床(Spangenberg and Herlec, 2006)、瑞士加里东造山带层控型硫化物矿床(Sundblad and Stephens, 1983)、挪威中北部 Helgeland 地区铅锌矿床(Birkeland et al., 1993)、瑞典 Laisvall 层控砂岩型铅锌矿床(Rickard et al., 1979)、比利时 La Calamine 氧化物硫化物铅锌矿床(Coppola et al., 2008)、欧洲伊比利亚黄铁矿带 Tharsis 块状硫化物矿床(Chauvet et al., 2004)、挪威 Trondheim 和 Sulitjelma 地区块状硫化物矿床(Fox et al., 1988)、澳大利亚巨型 Broken Hill 铅锌银矿床(Spry et al., 2008)、以及我国云南金顶(He et al., 2009)和广东矾口铅锌矿床(梁新权和温淑女, 2009),等等,也反映这些矿床的形成和定位与碰撞造山过程的逆冲推覆、走滑和伸展等变形构造有着密切的关系。逆冲推覆构造的形成除涉及断裂的形成、滑移、扩展等过程外,与伸展、走滑、褶皱等构造也有密切的时空关系(朱志澄, 1991)。逆冲推覆作用及伴随的系列构造实际上是岩石流变的具体表现,尤其是深层次的韧性推覆剪切过程常产生糜棱岩、混合岩和花岗岩三位一体的组合(张开均等, 1996),导致成矿环境物理和化学条件的变化,从而对金、银、铁、铜、铅、锌、钨、钼、铀和油气、煤等矿产的形成起重要控制作用(彭少梅, 1992; 余心起等, 2008; 张元厚等, 2009; 以及文内相关文献)。其原因在于:一方面因强烈的构造变形导致动力变质作用,不仅使围岩中的金属元素活化、迁移、富集,也使来自深部的矿液伴随逆冲推覆运动沿逆冲断层滑动面运行,而有利于矿体的形成;另一方面在推覆体沿逆冲断面运移过程中,形成大量类型多样的诸如层滑断裂、褶皱等控矿构造,并产生动力变质和分异作用,以致成矿物质更为活化、集中

和交代成矿(孙岩等, 1984)。此外, 推覆体因前锋带、中带、根带的变形强度、变形特征不同, 成矿特征也彼此不同, 从而出现推覆体水平构造分带控矿现象。如在推覆体的根带, 韧性、脆-韧性变形发育, 加之下切较深, 不仅常成为沟通含矿流体层及浅层岩浆房的导矿构造, 而且也使根带岩石所含的成矿元素活化、转移和富集, 提供部分成矿热液来源(刘肇昌和刘晓杰, 1991)。

其次, 构造成矿研究的逐步深入以及成矿构造学的发展趋势(李德威, 1993; 翟裕生, 1996, 2002, 2007; 吕古贤等, 1999), 在突出构造变形和流体活动对成矿起关键因素的同时, 事实上隐含了岩石流变所起的特殊作用。如国内外相关研究成果表明, 造山过程及伴随的构造作用(如逆冲推覆、向斜褶皱和剪切变形等)或岩石流变所触发的大规模热液流体运移或周期性循环是形成有经济意义的巨型 BIF 型赤铁矿矿床的主要因素(如巴西 Carajás 和 Quadrilátero Ferrífero 铁矿省、澳大利亚 Hamersley 铁矿省、乌克兰 Krivoy Rog 铁矿省、印度 Bailadila 铁矿省以及南非 Thabazambi 铁矿省等: Powell et al., 1999; Taylor et al., 2001; Dalstra and Guedes, 2004; Rosière and Rios, 2004; Rasmussen et al., 2007; Dalstra and Rosière, 2008)。大规模热液活动对热液 IOCG 型铁氧化物-铜-(金)-钴-稀土矿床形成所起的关键作用, 则缘于其形成时期的伸展构造环境(如陆内非造山岩浆环境、俯冲相关的大陆边缘弧伸展环境、陆内造山垮塌环境)及同时期的脆-韧性剪切有利于大规模流体和成矿物质运移(Hitzman et al., 1992; Porter, 2002; Sillitoe, 2003; Williams, 2010)。构造与流体是成矿作用中一对基本控制因素, 其相互作用过程实质上是成矿物质活化、迁移、聚集定位, 即矿床的形成过程, 具体体现为: 构造是驱动和控制成矿流体运移和循环的主要因素, 而流体通过水-岩反应等反过来又影响构造作用的物理和化学效应, 诱发新的流变或变形和新的矿化构造的产生(Fyfe and Kerrich, 1985; Koons et al., 1998; Sibson and Scott, 1998; Travé et al., 2000; Ghisetti et al., 2000; Craw, 2000; Craw et al., 2002; Robl et al., 2004; Bellot, 2007; 万天丰, 2008)。由此说明, 流体活动在成矿作用过程中实际上是和构造变形、岩石流变相辅相存、密不可分的。目前, 人们普遍赞同, 构造变形就是岩石流变的结果, 而固体地球内不同深度所存在的含量不等、性质不同的流体对构造变形又起非常巨大的作用(万天丰, 2008)。因此, 加强不同构造体制下或复合构造体制下构造-流体或流变-成矿

及其动力学的研究、尤其是大型、超大型矿床形成过程中流体的特殊作用的研究, 无疑具有重大的理论与实际意义。

综上所述, 构造成矿与岩石(圈)流变学在研究范畴、研究目标等方面显然具有学科间有机融合的特点, 但如何理解流体在构造成矿中的行为与作用将是正确运用岩石流变学原理分析矿床成因的关键。如果我们将流体同样视作是一种自然物质, 那么就能很好地理解岩石流变与地质流体间的关系及其在成矿作用中的地位。由于岩石的流变学与力学表现直接受控于不同大地构造环境下错综复杂的变形条件(Bozkurt and Park, 1997; Venera et al., 2000); 而大陆岩石圈的变形, 无论是脆性、脆-韧性, 还是塑性变形, 受组成物质的差异、流体相的存在及其活动性、应变分解与分异等制约(Storti et al., 2003), 因而岩石或矿石与岩石圈流动的制约因素就主要表现在二个重要方面: 即岩石内在的物质成分与结构、岩石变形的物理化学环境(Shimada, 1993; Sibson and Scott, 1998)。其中, 物理化学环境的变化则通过影响岩石圈物质的内在属性变化而起作用。近期研究就显示, 岩石变形的化学环境(水、氧逸度、硅的活动性等)、岩石变形过程中岩浆的活动性(熔融与熔体的含量、熔体成分与性质等)对于岩石的物理-力学性质、岩石的变形性质、流动机制和相应不同尺度上的变形构造、显微构造的发育都有着深刻的影响(刘俊来, 2004; 邵同宾等, 2011)。因此, 在开展矿物、岩石或矿石、岩石圈流动及成矿作用事件研究时, 就必须综合考虑岩石圈内部物质所处的物理-化学环境及其变化。

3 变质条带状铁建造(BIF)型富铁矿床的成因启示

变质条带状铁建造(即 BIF)中高品位富铁矿的形成是矿床学界长期争论的热点, 主要原因是未能将矿石矿物(赤铁矿、磁铁矿等)的内部显微构造分析与区域构造变形(构造流变)和/或大规模流体活动有机结合, 以正确理解其富集机理。岩石流变学的应用有可能为解决此类矿床铁的富集机理与成因提供重要证据。下面举四个例子来说明构造变形和岩石流变是如何控制富铁矿形成的。

3.1 巴西 Quadrilátero Ferrífero (简称 QF)地区 BIF 型铁矿

巴西南部 Minas Gerais 州 QF 地区巨型变质条带

状铁建造(BIF)型铁矿省是世界铁矿石主要生产基地, 其产量在 2003 年占全世界的 16%(Spier et al., 2007)。该铁矿赋存于变质的古元古代 Minas 群条带状铁建造中, Spier et al. (2007)曾将其归为苏必利尔 BIF 型铁矿。据 Spier et al. (2003)的描述, QF 地区 BIF 型铁矿由一系列连续产出的、略呈扁状、透镜状的矿体组成, 包含两种矿石类型: 即韧性的(soft)高品位(铁的含量超过 64%)铁矿石和脆性的(hard)高品位铁矿石。然而, 关于 QF 地区高品位富铁矿的成因仍存在不同的看法。基于世界上高品位 BIF 型铁矿床中铁的富集机理问题, Taylor et al. (2001)、Beukes et al. (2002)和 Morris (2002)曾各自提出过多种成因模式。Spier et al. (2003)则认为, QF 地区 BIF 型韧性的富铁矿的成因与次生风化淋滤有关, 而脆性的高品位富铁矿系深成作用的结果, 但他们同时也认为构造变形控制了地下水的循环, 进而影响了铁的富集度。

Lagoeiro (1998)、Rosière et al. (2001)则从构造变形角度对 QF 地区变质条带状铁建造的构造变形与富赤铁矿形成关系进行了研究, 结果表明: 剪切变形和变质作用将会导致氧化条件(流体产生和铁离子活动)、赤铁矿含量的增加以及结晶优选方位发育(CPO: Crystallographic Preferred Orientation); 而赤铁矿 CPO 的形成不仅与晶体塑性变形行为有关, 而且与替代磁铁矿后的板状镜铁矿的同构造变形增长有关, 因此, 强烈变形过程条带状铁建造的柔性化或塑性变形与温度、压力、应变速率(图 1)和流体含量的改变密切相关, 并由此影响赤铁矿结晶优选方位的发展。随后, Rosière et al. (2001)、Siemes et al. (2003, 2008)开展了显微结构和构造分析以及三轴变形实验, 他们的结果进一步表明: 赤铁矿矿石的变形有三个主要机制: 即基底滑移(basal slip)、扩散流动(diffusion process)和各向异性的颗粒增长(anisotropic grain growth), 而剪切变形过程中因铁矿层矿石矿物(赤铁矿、磁铁矿、镜铁矿)和脉石矿物(石英、方解石、白云石)在流变行为上存在差异, 从而导致富铁矿的形成。这些研究成果从而揭示了高品位富铁矿的形成与剪切动力引起的岩(矿)石间差异流变的密切关系。

Hippertt and Davis (2000)还对发生在 QF 地区包含 BIF 铁建造的花岗岩-绿岩地体中的大型向斜和花岗岩穹隆的形成机制进行了详细研究, 认为这些穹隆和向斜构造的形成与演化以及发生在穹隆与表壳岩界面的倾滑(Dip-slip)韧性剪切带主要起因于 0.8~0.6 Ga 期间的泛非造山事件。由于花岗岩-片麻岩物质与富铁的表壳岩(即 BIFs)存在显著的密度差

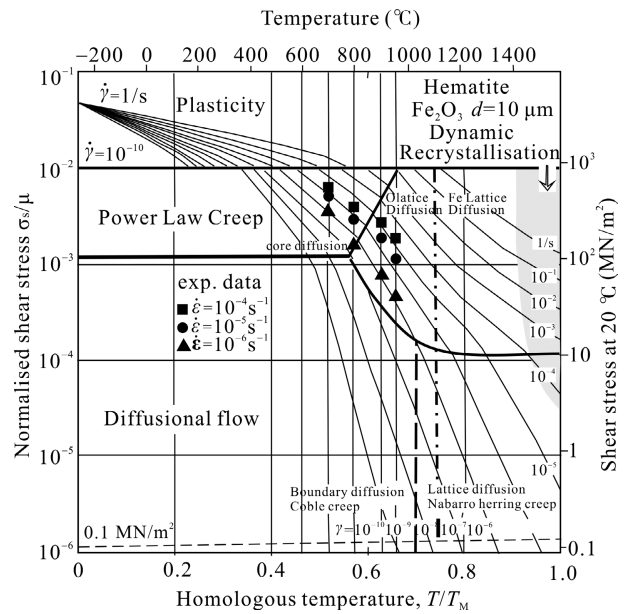


图 1 直径 10 mm 的赤铁矿的应力-温度变形图(据 Siemes et al., 2003)(图中不同符号标识的数据点表示实验应变速率 $\dot{\epsilon}$)

Fig.1 Stress vs temperature deformation map for hematite with a grain size of 10 μm(after Siemes et al. (2003). The data labeled with different symbols in the map represent the experimental strain rate $\dot{\epsilon}$)

异, 就为围岩(包括 Minas 群 BIF 铁建造层)向下的流动提供了重力上的有利环境, 进而易于使围岩物质围绕花岗岩-片麻岩穹隆陡倾斜向下流动、发生物质迁移, 结果在剪切动力作用下因岩石流变差异导致了密度较大的 BIF 铁建造形成富铁矿(图 2)。尽管对 QF 地区构造变形的动力学机制仍存在不同理解(Hippertt and Davis, 2000), 但所有研究均直指韧性剪切作用下岩石的差异流动和/或流体活动是形成 BIF 型高品位富铁矿的主要原因。

3.2 西澳 Hamersley 省 BIF 型高品位铁矿

澳大利亚北西部的 Hamersley 省发育一系列世界级超大型 BIF 铁矿床, 这些矿床均赋存于太古宙-古元古代(2.6~2.4 Ga)Mount Bruce 巨厚 BIF 层序内, 且显示异常强烈的褶皱变形, 褶皱形态多样(如直立平行/同心褶皱、寄生褶皱、V 字型褶皱、紧闭旋转褶皱、开阔褶皱), 断裂和逆冲推覆构造发育, 并伴有广泛的劈理或片理构造(Brown et al., 2004)。据 Barley et al. (1999)资料, Hamersley 省 BIF 巨型铁矿床铁矿石几乎由纯铁氧化物组成, 可划分为两种类型: 即致密坚硬的至脆性的假像赤铁矿-针铁矿和磷的、具鳞片变晶结构的假像赤铁矿。关于 Hamersley 省巨型高品位富铁矿矿床的成因、

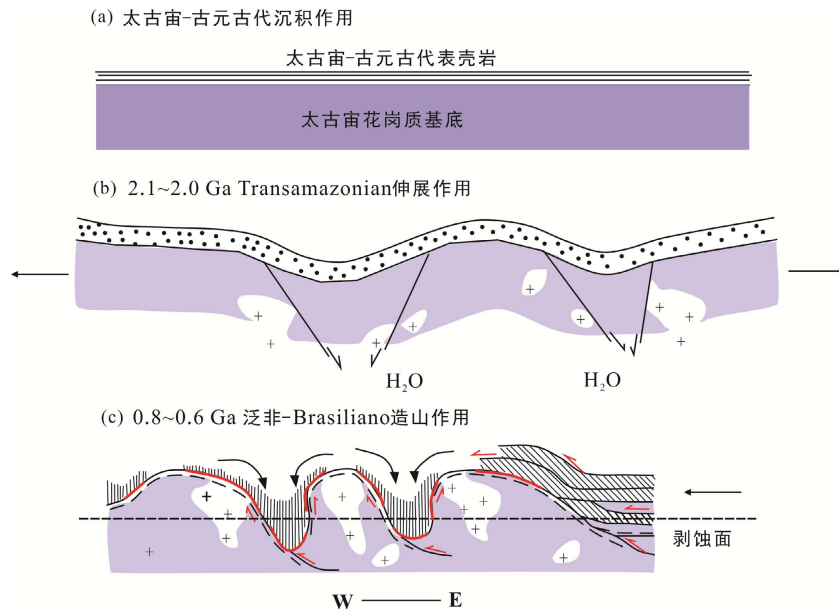


图 2 巴西东南部 QF 地区穹隆/向斜构造发展导致花岗岩-绿岩带表壳岩中富铁矿(红色条带示)形成模式(据 Hippert and Davis, 2000 修改)

Fig.2 Model for the development of the dome/syncline architecture of the Quadrilátero Ferrífero (QF), southeastern Brazil (modified from Hippert and Davis, 2000)

特别是假像赤铁矿-针铁矿矿石的成因,目前普遍接受的观点是,这些矿床是在伴有硅酸盐和碳酸盐矿物淋滤条件下因 BIF 次生氧化的结果。然而,关于第二类矿石的成因却存在较大的争议,主要是由于含这类矿石的矿床不仅有较大的延伸深度(大于 400 m),而且受构造显著控制。Powell et al. (1999)曾认为 Hamersley 省 BIF 型富铁矿的形成与 Ophthalmian 逆冲褶皱带抬升或垮塌所引起的大规模流体有关。Barley et al. (1999)则将 Hamersley 省以假像赤铁矿矿石为主的 Mount Tom Price 铁矿床的形成与 2.0 Ga 时期裂谷环境下热卤水和大气降水的混合相联系。不过,所有这些关于 Hamersley 省 BIF 型巨型鳞片状赤铁矿矿床的成因模式均强调了流体在物质迁移中的重要性。

据 Campana (1966)资料,Hamersley 省高品位(铁含量在 58%以上)BIF 型铁矿床的成矿作用受三个方面的因素控制,即地层、构造(铁的富集发生于向斜部位)和古气候,并认为构造作用、特别是褶皱变形是形成高品位铁矿必不可少的因素。Barley et al. (1999)也认为, BIFs 所表现的构造式样主要来源于古元古代挤压环境下的变形结果。Lascelles (2006)还详细描述了 Hamersley 省 Hope Downs BIF 型铁矿床的矿石结构、构造,认为该矿床不仅具有显著的条带状构造,颈缩状或香肠状构造、透镜状构造和糜棱岩结构、定向结构、重结晶结构也异常发育,而多期褶皱叠加的结果则导致一系列不同规模的穹隆

和盆地构造。Lascelles (2006)最后指出, Hamersley 省 BIFs 所表现的强烈褶皱变形构造与岩层厚度和岩石的能干性有着密切的关系,因而暗示了岩石流变与富铁矿的成生联系。Brown et al. (2004)还以 Hamersley 省东部最大的鳞片状赤铁矿矿床——纽曼附近的 Mt. Whaleback 矿床为研究对象,重点讨论了该矿床 BIFs 围岩中广泛发育的、与鳞片状赤铁矿矿化有密切关系的裂隙脉的构造发展特点及其与成矿前、成矿期和成矿后流体的活动关系。Brown et al. (2004)认为裂隙脉的空间分布及其变形特征受多种因素控制,如褶皱变形、流体活动、岩石流变性质和区域或局部应力场,因而也控制了高品位鳞片状赤铁矿矿床。由此可见,褶皱与剪切变形和岩石流变及伴随的流体运移是形成 Hamersley 省高品位 BIF 型铁矿床不可或缺的重要因素。

3.3 辽宁鞍山-本溪铁矿

条带状铁建造(BIF)型铁矿是中国工业铁矿中最主要的经济类型,已探明储量 291 亿吨,其开采量占年铁矿石总产量的 57%以上。时、空分布上,中国境内 BIF 型铁矿尤集中于华北鞍山-本溪、冀东-密云、五台-吕梁、安徽霍邱、山东鲁西、河南鲁山-登封-许昌等地,主要产于太古宙及古元古代古老变质地层中(沈其韩, 1998)。但与国外同类型铁矿床相比(Li et al., 2014; Zhang et al., 2014),中国境内 BIF 型铁矿不仅经历了强烈的变形与变质,而且富

矿少、品位偏低(普遍在 25%~35%之间)。

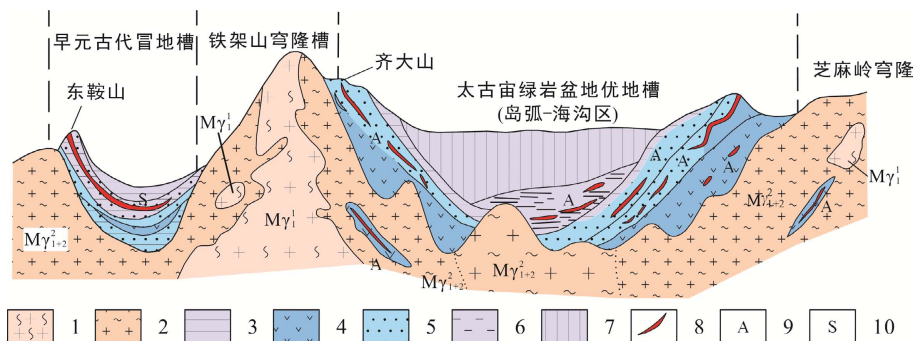
辽宁省鞍山-本溪地区的 BIF 型铁矿是我国最大的铁矿石资源基地, 也是我国铁矿研究最早、最典型的地区之一, 以鞍山式铁矿为代表, 主要超大型、大型矿床包括东鞍山、西鞍山、弓长岭、歪头山、祁家沟、徐家堡等 18 个。虽然鞍山式富铁矿(如弓长岭大型磁铁富矿床)的富集机理长期存在争议(程裕淇, 1957; Li et al., 2014; Wang et al., 2014), 但据以往研究成果分析, 构造改造和/或流体叠加对鞍山式富铁矿的成因可能起关键控制作用。例如, 李鸿业(1974)就认为, 区内赋矿地层——太古宙鞍山群从沉积后到寒武系前曾发生过三次构造活动, 导致了鞍山群地层反复重熔, 形成大面积片麻岩状、花岗岩状的混合岩; 随着大规模的混合岩化、花岗岩化和动力作用, 区域变质更加强烈, 再加之晚期的热液沿断裂集中和上升, 从而导致鞍山式铁矿的变质和富化作用。蔡秀成等(1979)、李纯阳(1996)也认为鞍山式富铁矿的形成与三个因素有关, 一是受混合岩化气热影响, 使沉积变质贫铁矿就地重结晶; 二是沿古断裂迁移富集; 三是混合岩化碱性热液淋滤去硅加富作用, 但他们同时还强调了褶皱和与之伴生的层间滑脱剪切断裂对富铁矿形成的作用。王永基(2007)则提出了向斜构造控矿模式。另外, 从以往对鞍山式铁矿构造变形的描述来看, 太古宙鞍山群曾发生过强烈的中深层次韧性剪切变形, 可能也是造成鞍山式铁矿富化的重要原因。例如, 鞍山式铁矿床鞍山群岩系不仅具较高的变质级别(达角闪岩-麻粒岩相), 剪切褶皱和塑性构造也显著发育(李鸿业和赵秀德, 1999), 矿床除受大致南北向的紧闭复式向斜构造控制外, 向斜核部及转折端因发生塑

变迁还使矿体变厚(图 3; 李纯阳, 1996; Fan et al., 2014)。此外, 根据前人调查资料, 在弓长岭铁矿区富铁矿除与贫铁矿、赋矿围岩均呈层状、似层状产出外, 也显示了强烈的揉皱和塑性变形(Wang et al., 2014)。这些特征均暗示鞍山式富铁矿的形成与固态岩石高温塑性流变有着密切的关系。赵斌和李统锦(1979)的高温高压实验就曾表明, 弓长岭大型磁铁富矿床的形成是在高温下(大于 450)去硅富铁的结果。

3.4 海南石碌式富铁矿

海南省石碌富铁矿是我国著名的以赤铁矿为主、共生或伴生铜、钴、镍、铅锌等多金属的超大型矿床, 以其储量大(探明的铁矿石达 5 亿吨以上)、品位高(铁、钴、铜矿石平均品位分别为 51.15%、0.294%和 1.18%)而引起国内学者的长期关注。石碌富铁矿已有五十多年地质勘探和开采历史, 但关于该矿床的成因类型和成矿物质富集机理等一直存在诸多分歧(许德如等, 2009)。最近, Xu et al. (2013, 2014)将该矿床归为受构造和热液叠加改造的条带状铁建造(BIF)型铁矿。

矿山地质调查和找矿勘查实践表明, 石碌矿区矿体的赋存部位、形态产状与厚度变化明显受复式向斜及叠加于之上的次一级褶皱所控制(图 4a, b 和图 5; Xu et al., 2013)。从矿体空间分布来看, 无论是上部铁矿体、还是下部的钴铜矿体, 整体上呈层状、似层状赋存于 NW 向复式向斜的槽部及两翼向槽部过渡的部位。结合前人的研究(杨开庆等, 1988), 构造地质填图还发现, 早期 NW 向复式向斜两翼发育有一系列规模稍小的、晚期 NE-NNE 向次级褶皱, 且两期褶皱的叠加部位往往导致近矿围岩和矿体的加厚或剥露, 特别是两期向斜褶皱叠加的地段如北



1. 太古宙早期钠质混合花岗岩(M_{Y1}^1); 2. 太古宙晚期钾质混合花岗岩(M_{Y1+2}^2); 3. 辽河群沉积岩系; 4. 超基性-基性火山岩; 5. 中酸性火山岩; 6. 泥沙岩; 7. 后期沉积盖层; 8. 磁铁石英岩; 9. 阿尔戈马型铁矿; 10. 苏必利尔型铁矿。

图 3 华北鞍山-本溪地区太古宙变质 BIF 型(富)铁矿成矿模式(据 Fan et al., 2014)

Fig.3 Metallogenic model for the metamorphosed, Archean BIF (banded iron formations)-type iron ore deposits in the Anshan-Benxi area, North China Block (after Fan et al., 2014)

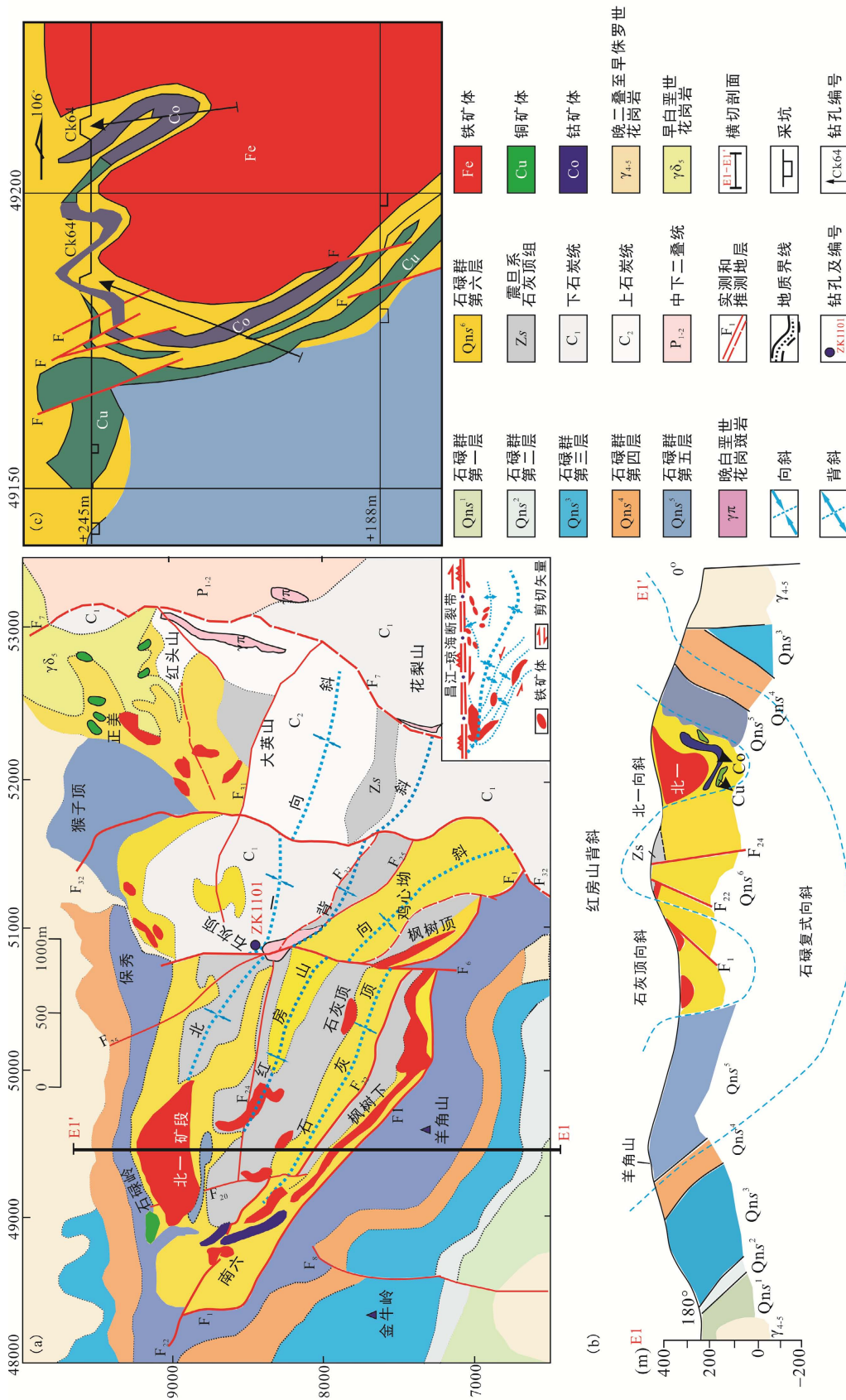


图4 海南石碌富铁矿矿区地质略图(a)、横截NW向石碌复式向斜剖面图(b)和北一矿段局部垂直剖面图(c)(图中显示了石碌矿区控矿构造样式、矿体形态及铁矿体与铜矿矿体的空间关系;图(c)同时表明铁矿体与铜矿矿体强烈揉皱、协调变形)

Fig. 4 Sketch map (a), enclosed by the section E1-E1' (b) across the NW trending synclinorium and the locally vertical section (c) at the Beiyi mine (showing structural ore morphologies and spatial relationship between Fe- and Co-Cu orebodies in the Shilu district. Fig. c also indicates that all the Fe-, Co- and Cu orebodies are characterized by strong folding but are parallel to each other)

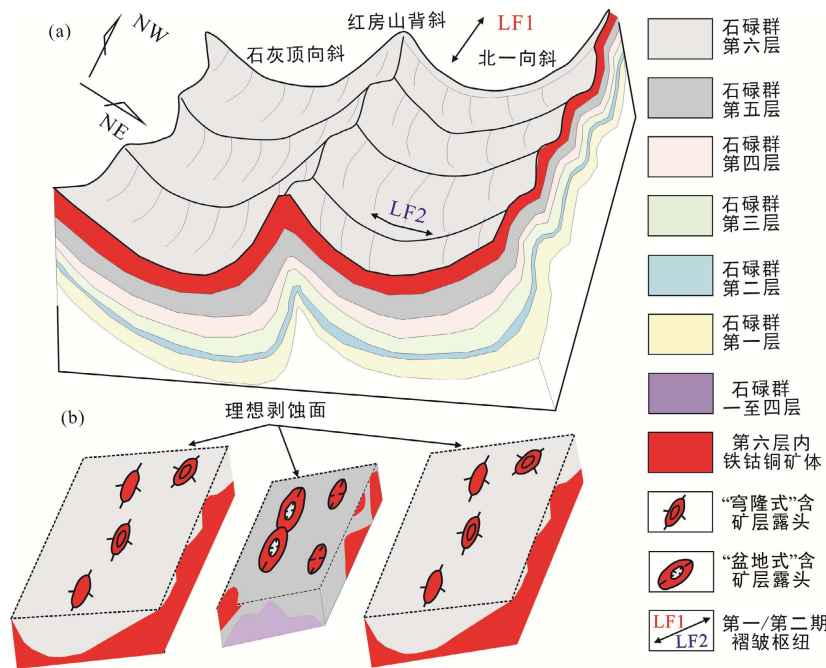


图 5 石碌矿区叠加褶皱立体形态(a)和理想剥蚀水平(b)示意图

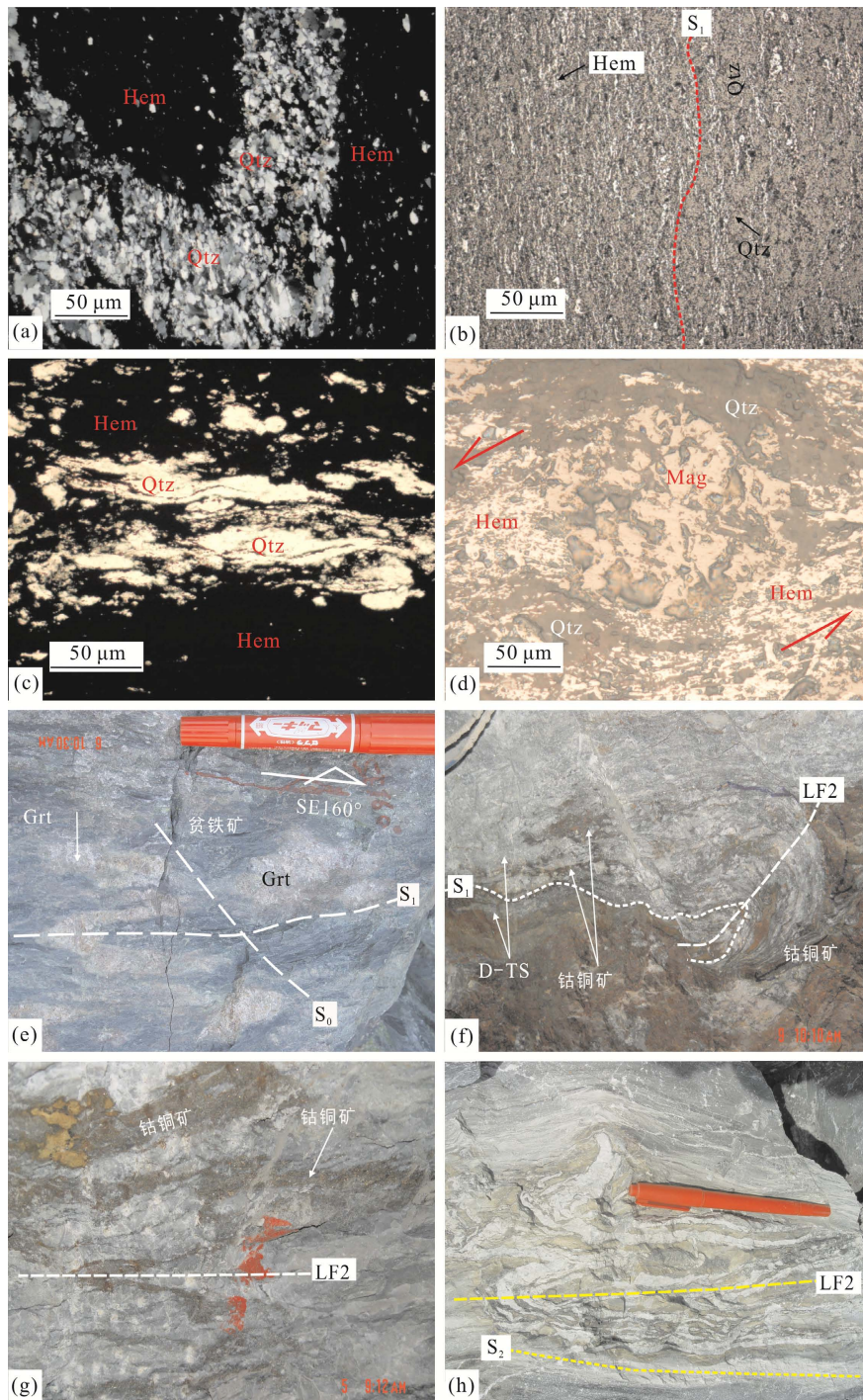
Fig.5 Sketch maps showing three-dimensional configuration of the superposed buckling (a) and its ideal erosion planes (b) in the Shilu district

一、三棱山-鸡心岭-鸡心坳、枫树下(石灰顶)-鸡心坳等(许德如等, 2011), 第六层二透岩等近矿围岩埋藏深度逐渐变大, 预示这些地段的深部是铁矿体的有利找矿靶区。经勘探证实, 目前在两期向斜褶皱叠加的石灰岭-三棱山-鸡心岭地段发现了超过 4500 万吨的富铁矿体; 其他地段(枫树下-鸡心坳等)的勘探工作仍在进行中。

构造变形分析和显微组构观察已揭示矿区剪切变形构造对矿体形成和定位不可忽视(许德如等, 2011; Xu et al., 2013, 2014)。矿山勘探已揭示, 上部铁矿体和下部钴铜矿体一同揉皱变形、蛇形弯曲(图 4c); 矿体除表现强烈塑性变形和糜棱岩化外(图 6a-d), 其形态也严格受一对近 EW 向和 NW-SE 向 X 型共轭剪张节理控制, 并表现旋转变形。此外, 富铁矿体与近矿围岩(主要是条带状二透岩)主要呈突变关系, 但在强烈剪切变形地段, 出现由含铁围岩、强硅化含铁围岩向含石榴子石条带的贫铁矿体(局部出现富铁矿)和富铁矿体的过渡特征。特别是石榴子石条带往往呈香肠状、囊状和无根钩褶皱, 表现出强烈的塑性流动和压扁拉长(图 6e)。这些特征不仅反映富铁矿体的形成与强烈剪切变形密切, 而且暗示剪切变形同时有高温塑性流体的出现和成矿物质的活化、迁移、富集。钴铜矿体与剪切变形构造的关系尤为显著。产于白云岩、条带状或不纯白云岩

等近矿围岩中的钴铜矿体往往呈 S 形小透镜体(中间膨大部位厚 7~9 m)连续产出, 矿物生长线理、S-C 组构、顺层剪切褶皱、无根钩状褶皱等构造发育(图 6f-g)。推测矿体的再富化与一组 NW-SE 向和近 EW 向的 S-C 组构发展有关。

石碌矿区所发生的肿缩石香肠和能干层褶皱实际上反映构造变形时的温压条件下岩石的流变性质(曾佐勋和付永涛, 1997)。矿区韧性剪切断层带内所产生的箭鞘褶皱(剪切褶皱)、膝折或尖棱褶皱和无根钩状褶皱(图 6h), 均是岩石在塑性状态下剪切作用的结果; 矿区赋矿围岩和矿体广泛发育的 S-C 组构、旋转应变以及矿物线理和伸展线理的出现, 又反映岩石变形和变质过程固态物质的塑性流动和压溶及重结晶的出现。矿区赤铁矿显微组构观察(Xu et al., 2013, 2014)进一步反映石碌富铁矿是受构造应力控制的变形体, 最可能的形成因素是在定向剪切应力和高温控制下, 具特征结晶方位和形体特征的赤铁矿集合晶出、变形和重结晶效应。这个过程不仅对矿石结构构造起控制作用, 也使石碌铁矿在初始贫富分布的基础上, 进一步分异富集, 并成为赤铁矿多晶集合体发育为强优选方位的主导因素。因此, 褶皱变形及伴随的韧性剪切和高温塑性流动是造成石碌富铁矿形成的直接原因(Xu et al., 2013)。该结论也得到冷盛强和李佩兰(1979)的高温高压实验所证实。



(a) 石英铁英岩(或富赤铁矿)中重结晶石英(Qtz)集合体显示“W-型”褶皱, 正交偏光; (b) 糜棱岩化石英铁英岩, 显示赤铁矿(Hem)沿构造面理 S_1 分布, 并由富赤铁矿条带与富石英条带组成, 反射光; (c) 石英铁英岩中石英“变形鱼”, 正交偏光; (d) 石英铁英岩中显示左旋剪切变形的 σ -型磁铁矿(Mag)变斑晶(由箭头表示), 注意赤铁矿(Hem)显示“拨丝”结构, 反射光; (e) 闪岩质铁英岩(或贫铁矿)中石榴子石(Grt)集合体显示 N-型无根钩状褶皱; (f) 条带状白云岩(D-TS)及其内层状钴铜矿显示条带状构造和层内剪切褶皱; (g) 条带状白云岩(D-TS)内钴铜矿显示无根钩状褶皱; (h) 二透岩中发育的无根钩状褶皱。图 e 中的 S_0 代表推测的原始层理; 图 b、e、f 和 h 中 S_1 、 S_2 分别代表第一期和第二期片理; 图 f-h 中的 LF2 代表第二期褶皱轴; 图 a-e 和 h 来自北一矿段(见图 4a)+60 m 标高铁矿体采面, 图 f、g 来自北一矿段-150 m 标高钴铜矿体采坑; 图 e 和 h 中红色记号笔代表尺度。

图 6 石碌富铁矿区矿石和近矿围岩野外和室内照片, 反映它们的结构、构造和矿物组合特征

Fig.6 Field photographs and photomicrographs showing texture, structure and mineral assemblage of the ores and interbedded host rocks from the Shilu district

4 结束语

成矿构造,是指与矿床形成及改造有关的大、中、小、微各级地质构造。构造成矿在研究范畴和研究目标、甚至研究手段和技术方法上,与岩石流变学是基本一致的。构造应力是导致不同尺度地质体(地层、岩体、矿体、岩石/矿石、矿物、甚至元素等)构造变形的基础,而岩石流变性差异则控制和影响了不同规模地质体的变形强度、方式和岩石运动特征等;构造变形和岩石流变的过程同时也是流体(包括成矿流体)的形成、演化和迁移的过程,前者不仅控制和影响后者,后者反过来又将影响地质体的变形程度、显微构造和岩石流变性差异。从这一点来看,矿床/矿体的形成过程实际上是应力作用下的构造变形、岩石差异流动或流体活动的相互作用过程。

变质条带状铁建造(BIF)型富铁矿的成因存在长期的争论,其原因在于:以往要么重视流体活动的影响、要么重视次生淋滤的贡献,而相对忽视了构造变形(特别是褶皱和剪切)与岩石流变(如高温塑性流动)所起的深刻影响。岩石(圈)流变学的引入有可能为解决此类矿床的成因提供重要启示。作者据此认为,深入开展特色和重要矿床的构造物理化学研究将是实现成矿学与岩石流变学有机结合的重要方向,并有可能为我们创新成矿理论、发现一批大型、超大型矿床提供科学依据。

致谢:研究过程中得到翟裕生院士、林舸研究员的指导;海南省地质局肖勇教授级高工、刘朝露研究员及海南矿业联合有限公司郭凤芳总工程师、陈福雄高级工程师等在作者进行石碌铁矿地质调查和科研工作期间给予了极大支持和帮助;嵇少丞教授和另一位匿名评审专家为本文质量的提高提出了建设性意见。在此一并表示感谢!

参考文献(References):

蔡秀成,温桂兰,富毓德,唐荣炳. 1979. 关于弓长岭磁铁矿床形成条件讨论 // 铁矿地质地球化学研究. 中国科学院地球化学研究所参加全国铁矿科学讨论会文集: 62-71.

陈柏林,董法宪,李中坚. 1999. 韧性剪切带型金矿成矿模式. 地质论评, 45(2): 187-190.

陈衍景. 1996. 陆内碰撞造山体制的流体作用模式及与成矿的关系. 地学前缘, 3(3-4): 282-289.

陈衍景. 2013. 大陆碰撞成矿理论的创建及应用. 岩石学

报, 29(1): 1-27.

程裕淇. 1957. 中国东北部辽宁山东等省前震旦纪鞍山式条带状铁矿中富矿的成因问题. 地质学报, 37(2): 153-180.

邓军, 吕古贤, 杨立强, 郭涛, 方云, 舒斌. 1998. 构造应力场转换与界面成矿. 地球学报, 19(3): 244-250.

邓军, 杨立强, 孙忠实, 彭润民, 陈学明, 杜子图. 2000. 构造体制转换与流体多层循环成矿动力学. 地球科学——中国地质大学学报, 25(4): 397-403.

范宏瑞, 胡芳芳, 杨进辉, 沈昆, 翟明国. 2005. 胶东中生代构造体制转折过程中流体演化和金的大规模成矿. 岩石学报, 21(5): 1317-1328.

傅昭仁, 李德威, 李先福. 1992. 变质核杂岩及剥离断层的控矿构造解析. 武汉: 中国地质大学出版社: 8-16.

何绍勋, 段嘉瑞, 刘继顺, 张曾荣. 1996. 韧性剪切带与成矿. 北京: 地震出版社: 1-174.

侯增谦. 2010. 大陆碰撞成矿论. 地质学报, 84(1): 30-58.

胡正国, 钱壮志, 阎广民. 1994. 小秦岭拆离变质核杂岩构造与金矿. 西安: 陕西科学技术出版社: 1-238.

嵇少丞. 1988. 部分熔融的构造地质意义(I): 变形机制转变的实验研究. 地质科学, (4): 347-356.

嵇少丞, 钟大赉, 许志琴, 夏斌. 2008. 流变学: 构造地质学与地球动力学的支柱学科. 大地构造与成矿学, 32(3): 257-264.

金扰. 1997. 我国高温高压实验研究进展和展望. 地球物理学报, 40(增刊): 70-81.

金振民. 1997. 我国高温高压实验研究进展和展望. 地球物理学报, 40(增刊): 70-81.

金振民, 姚玉鹏. 2004. 超越板块构造——我国构造地质学要做什么? 地球科学——中国地质大学学报, 29(6): 644-650.

冷盛强, 李佩兰. 1979. 海南岛石碌矿区富铁矿形成的物理化学条件实验研究. 中南大学学报, 3: 116-128.

李纯阳. 1996. 浅谈鞍山式铁矿床的构造控矿作用. 鞍钢矿山, 91(1): 5-8.

李德威. 1993. 成矿动力学刍议. 地球科学——中国地质大学学报, 18(4): 407-413.

李德威, 纪云龙. 2000. 大陆下地壳层流作用及其大陆动力学意义. 地震地质, 22(1): 89-96.

李鸿业. 1974. 鞍山地区鞍山式铁矿地质特征和成因问题. 地质与勘探, (5): 7-17.

李鸿业, 赵秀德. 1999. 鞍本地区鞍山式铁矿地质构造. 前寒武纪研究进展, 22(3): 22-29.

李嘉兴, 姜俊, 胡兴平, 康吉昌, 尹意求. 2003. 新疆富蕴县蒙库铁矿床地质特征及成因分析. 新疆地质, 31(3): 307-311.

- 李兆麟, 张文兰, 翟伟, 孙凯, 文拥军. 2004. 韧性剪切带型金矿床矿物中熔融包裹体与矿床成因研究. 矿物岩石地球化学通报, 23(2): 109-111.
- 梁新权, 温淑女. 2009. 广东凡口铅锌矿床的走滑构造及成矿模式. 大地构造与成矿学, 33(4): 556-566.
- 刘俊来. 2004. 变形岩石的显微构造与岩石圈流变学. 地质通报, 23(9-10): 980-985.
- 刘连登, 朱永正, 戴仕炳. 1994. 金矿与韧性剪切带及叠加构造 // 张贻侠和刘连登. 中国前寒武纪矿床和构造. 北京: 地震出版社: 39-78.
- 刘肇昌, 刘晓杰. 1991. 成矿构造研究新进展: 推覆构造及其控矿与成矿(第三讲). 矿山地质, 12(3): 232-243.
- 吕古贤. 1991. 构造物理化学的初步探讨. 中国区域地质, (3): 254-261.
- 吕古贤, 邓军, 李晓波, 倪师军, 郭涛. 2006. 构造物理化学的思路、研究和问题. 地质学报, 80(10): 1616-1626.
- 吕古贤, 林文蔚, 郭涛, 殷秀兰, 舒斌, 郭初笋. 2001. 金矿成矿过程中构造应力场转变与热液浓缩-稀释作用. 地学前缘, 8(4): 253-264.
- 吕古贤, 林文蔚, 罗元华, 李晓波, 倪师军, 邓军, 周绍东, 曹志敏, 张均. 1999. 构造物理化学与金矿成矿预测. 北京: 地质出版社: 1-300.
- 裴荣富, 翟裕生, 张丰仁. 1999. 深部构造作用与成矿. 北京: 地质出版社: 1-167.
- 彭少梅. 1992. 粤北新洲逆冲推覆构造及金矿成矿系列. 武汉: 中国地质大学出版社: 1-132.
- 戚学祥, 李海兵, 张建新, 蔡金郎. 2003. 韧性剪切带的变形变质与同构造熔融作用——以中祁连地块宝库河韧性走滑剪切带为例. 地质论评, 49(4): 413-422.
- 邵同宾, 嵇少丞, 王茜. 2011. 部分熔融岩石流变学. 地质论评, 57(6): 851-869.
- 沈保丰, 杨春亮, 翟安民, 胡小蝶, 曹秀兰, 宫晓华. 2004. 中国前寒武纪矿床时空分布. 矿床地质, 23(增刊): 62-70.
- 沈其韩. 1998. 华北地台早前寒武纪条带状铁英岩地质特征和形成的地质背景 // 程裕祺. 华北地台早前寒武纪研究论文集. 北京: 地质出版社: 1-30.
- 孙胜龙. 1995. 韧性剪切带中金成矿机理浅析. 大地构造与成矿学, 19(4): 375-381.
- 孙岩, 沈修志, 黄钟瑾, 邓锡秧, 刘寿和. 1984. 层滑断裂与层控矿床——以苏皖南部上古生界的地层为例. 地质论评, 30(5): 430-436.
- 索书田, 钟增球, 周汉文, 游振东. 2008. 大别-苏鲁区 UHP 变质岩构造学及流变学演化. 地学前缘, 15(3): 150-167.
- 万天丰. 2008. 关于中国构造地质学研究中几个问题的探讨. 地质通报, 27(9): 1441-1450.
- 王春增, 李晓峰, 易先奎. 2009. 江西金山金矿控矿韧性剪切带的递进变形成矿机理: 显微构造证据. 桂林工学院学报, 29(2): 169-182.
- 王嘉荫. 1978. 应力矿物概论. 北京: 地质出版社: 1-238.
- 王永基. 2007. 中国铁矿勘查回顾. 江苏地质, 31(3): 161-164.
- 吴学益, 卢焕章, 吕古贤, 王中刚, 胡瑞忠, 陈文一, 朱笑青. 2006. 黔东南锦屏-天柱地区构造控岩控金特征模拟实验及其力学分析. 大地构造与成矿学, 30(3): 355-368.
- 吴学益, 钟德义, 梁宁, 王杰, 周文华, 耿建民. 1984. 构造地球化学高温高压模拟试验及其结果. 大地构造与成矿学, 8(3): 251-260.
- 许德如, 吴俊, 肖勇, 陈福雄, 王力, 刘朝露, 王智琳. 2011. 海南石碌铁矿床构造变形特征及与铁多金属成矿富集的关系. 地质通报, 30(4): 553-564.
- 许德如, 肖勇, 夏斌, 蔡仁杰, 侯威, 王力, 刘朝露, 赵斌. 2009. 海南石碌铁矿床成矿模式与找矿预测. 北京: 地质出版社: 1-331.
- 许志琴, 徐惠芬, 张建新, 李海兵, 朱志直, 曲景川, 陈代璋, 陈金禄, 杨开春. 1994. 北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体及其动力学. 地质学报, 68(1): 1-15.
- 杨恒, 白武明. 2000. 岩石圈流变实验研究的进展. 地球物理学进展, 15(2): 79-89.
- 杨开庆. 1986. 动力成岩成矿理论的研究内容和方向 // 中国地质科学院地质力学研究所所刊, 第7号: 1-14.
- 杨开庆, 董法先, 王建平, 李中坚, 吕古贤, 杨玉东. 1988. 海南石碌矿区铁、金、铜、钴矿构造动力成矿作用的研究 // 中国地质科学院地质力学研究所所刊, 第11号: 83-152.
- 杨晓松, 马瑾, 张先进. 2003. 大陆壳内低速层成因综述. 地质科技情报, 22(2): 35-41.
- 杨晓勇. 2005. 论韧性剪切带研究及其地质意义. 地球科学进展, 20(7): 765-771.
- 余心起, 吴淦国, 张达, 狄永军, 代堰锴, 邱骏挺. 2008. 北武夷地区逆冲推覆构造的特征及其控矿作用. 地质通报, 27(10): 1667-1677.
- 曾庆丰. 1982. 矿田构造发展特征. 地质科学, (1): 47-55.
- 曾书明, 周建廷, 王学平, 刘川, 董国臣. 2011. 江西新余铁矿田铁矿成矿地质特征与成因分析. 地质与勘探, 47(2): 187-196.
- 曾佐勋, 付永涛. 1997. 利用两种天然构造变形估算岩石古流变参数. 地球科学——中国地质大学学报, 22(4): 391-394.

- 翟裕生. 1996. 关于构造-流体-成矿作用研究的几个问题. 地学前缘, 3(3-4): 230-236.
- 翟裕生. 2002. 成矿构造研究的回顾和展望. 地质论评, 48(2): 140-146.
- 翟裕生. 2007. 地球系统、成矿系统到勘查系统. 地学前缘, 14(1): 172-181.
- 翟裕生, 邓军, 丁式江, 彭润民, 王建平. 2001. 关于成矿参数临界转换的探讨. 矿床地质, 20(4): 301-306.
- 翟裕生, 石准立, 曾庆丰. 1981. 矿田构造与成矿. 北京: 地质出版社: 1-79.
- 张开均, 施央申, 黄钟瑾, 王良书. 1996. 逆冲推覆构造最新研究进展评述. 地质与勘探, 32(2): 23-28.
- 张秋生, 李守义, 刘连登. 1984. 中国早前寒纪地质及成矿作用. 长春: 吉林人民出版社: 1-536.
- 张湘炳. 1992. 论构造成矿规律及其动力学机制. 大地构造与成矿学, 6(2): 113-122.
- 张玉清, 王搜, 贾和义, 尚恒胜. 2003. 白云鄂博叠加褶皱及其变形机制. 华南地质与矿产, (1): 23-26.
- 张元厚, 李宗彦, 张孝民, 钱明平, 杨志强, 何岳, 张帅民, 张力智, 王建明. 2009. 小秦岭金(钼)矿田北矿带推覆构造演化与成矿作用. 吉林大学学报: 地球科学版, 39(2): 244-254.
- 赵斌, 李统锦. 1979. 鞍山弓长岭型磁铁富矿床形成物理化学条件的实验研究 // 铁矿地质地球化学研究. 中国科学院地球化学研究所参加全国铁矿科学讨论会文集: 295-320.
- 郑远川, 顾连兴, 汤晓茜, 王子江, 吴昌志, 张文兰, 吴学益. 2009. 天然矿石中硫化物的同构造再活化实验研究. 地质学报, 83(1): 31-42.
- 周真恒, 邓万明, 向才英. 1999. 岩石圈流变学研究进展. 地震地质, 21(1): 88-96.
- 朱志澄. 1991. 逆冲推覆构造. 北京: 地质出版社: 1-111.
- Barley M E, Pickard A L, Hagemmann S G and Folkert S L. 1999. Hydrothermal origin for the 2 billion year old Mount Tom Price giant iron ore deposit, Hamersley Province, Western Australia. *Mineralium Deposita*, 34(8): 784-789.
- Bellot J P. 2007. Extensional deformation assisted by mineralised fluids within the brittle-ductile transition: Insights from the southwestern Massif Central, France. *Journal of Structural Geology*, 29(2): 225-240.
- Belykh V I, Dunai E I and Lugovaya I P. 2007. Physicochemical formation conditions of banded iron formations and high-grade iron ores in the region of the Kursk magnetic anomaly: Evidence from isotopic data. *Geology of Ore Deposits*, 49 (2): 147-159.
- Beukes N J, Gutzmer J and Mukhopadhyay J. 2002. The geology and genesis of high-grade iron ore deposits, Iron Ore 2002. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Perth: 23-29.
- Birkeland A, Ihlen P M and Bjorlykke A. 1993. The sources of metals in sulfide deposits in the Helgeland nappe complex, North-Central Norway: Pb isotope evidence. *Economic Geology*, 88(7): 1810-1829.
- Bozkurt E and Park R G. 1997. Microstructures of deformed grains in the Augen gneisses of southern Menderes Massif (western Turkey) and their tectonic significance. *Geologische Rundschau*, 86(1): 103-119 .
- Brown M C, Oliver N H S and Dickens G R. 2004. Veins and hydrothermal fluid flow in the Mt. Whaleback Iron Ore District, eastern Hamersley Province, Western Australia. *Precambrian Research*, 128(3-4): 441-474.
- Burov E B and Watts A B. 2006. The long-term strength of continental lithosphere: “jelly sandwich” or “crème brûlée”? *GSA Today*, 16 (1): 4-10.
- Cameron E M. 1989. Derivation of gold by oxidative metamorphism of a deep ductile shear zone: Part 1. Conceptual model. *Journal of Geochemical Exploration*, 31(2): 135-147.
- Campana B. 1966. Stratigraphic-structural-paleoclimatic controls of the newly discovered iron ore deposits of Western Australia. *Mineralium Deposita*, 1: 53-59.
- Chauvet A, Onézime J, Charvet J, Barbanson L and Faure M. 2004. Syn- to late-tectonic stockwork emplacement within the Spanish section of the Iberian pyrite belt: Structural, textural, and mineralogical constraints in the Tharsis and Lazarza areas. *Economic Geology*, 99(8): 1781-1792.
- Coppola V, Boni M, Gilg H A, Balassone G and Dejonghe L. 2008. The “calamine” nonsulfide Zn-Pb deposits of Belgium: Petrographical, mineralogical and geochemical characterization. *Ore Geology Reviews*, 33(2): 187-210.
- Corti G, Ranalli G, Mulugeta G, Agostini A, Sani F and Zugu A. 2010. Control of the rheological structure of the lithosphere on the inward migration of tectonic activity during continental rifting. *Tectonophysics*, 490: 165-172.
- Craw D. 2000. Fluid flow at fault intersections in an active oblique collision zone, Southern Alps, New Zealand. *Journal of Geochemical Exploration*, 69: 523-526
- Craw D, Koons P O, Horton T and Chamberlain C P. 2002. Tectonically driven fluid flow and gold mineralization

- in active collisional orogenic belts: Comparison between New Zealand and western Himalaya. *Tectonophysics*, 348(1-3): 135-153.
- Dalstra H J and Guedes S. 2004. Giant hydrothermal hematite deposits with Mg-Fe metasomatism: A comparison of the Carajas, Hamersley, and other iron ores. *Economic Geology*, 99(8): 1793-1800.
- Dalstra H J and Rosière C A. 2008. Structural controls on high-grade iron ores hosted by banded iron formation: A global perspective. *Reviews in Economic Geology*, 15: 73-106.
- Fan Z G, Huang X Z, Tan L, Yang X, Zhang H R, Zhou D Q, Liu Q K and Cao B B. 2014. A study of iron deposits in the Anshan area, China based on interactive inversion technique of gravity and magnetic anomalies. *Ore Geology Reviews*, 57: 618-627.
- Fox J S, Farquhar R, Rui I and Cook N. 1988. Genesis of basalt-hosted massive sulphide deposits from the Trondheim and Sulitjelma districts, Norway: Ore lead isotopic considerations. *Mineralium Deposita*, 23(4): 276-285.
- France-Lanord C, Derry L and Galy A. 1998. Continental erosion and CO (sub 2) uptake inferences from the Himalayan system. *Mineralogical Magazine*, 62(1): 466-467.
- Fyfe W S. 1992. Metamorphic fluids. *Earth Science Review*, 32(1-2): 1-146.
- Fyfe W S and Kerrich R. 1985. Fluids and thrusting. *Chemical Geology*, 49(1-3): 353-362.
- Ghisetti F, Kirschner D and Vezzani L. 2000. Tectonic controls on large-scale fluid circulation in the Apennines (Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, 69: 533-537.
- Ghosh G and Mukhopadhyay J. 2007. Reappraisal of the structure of the Western Iron Ore Group, Singhbhum craton, eastern India: Implications for the exploration of BIF-hosted iron ore deposits. *Gondwana Research*, 12(4): 525-532.
- Goldfarb R J, Groves D I and Gardoll S. 2001. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis. *Ore Geology Reviews*, 18(1-2): 1-75.
- Gómez-Fernández F, Both R A, Mangas J and Arribas A. 2000. Metallogenesis of Zn-Pb carbonate-hosted mineralization in the southeastern region of the Picos de Europa (Central Northern Spain) Province: Geologic, fluid inclusion, and stable isotope studies. *Economic Geology*, 95(1): 19-39.
- Gross G A. 1980. A classification of iron formations based on depositional environments. *Canadian Mineralogist*, 18: 215-222.
- Groves D I. 1993. The crustal continuum model for late-Archaean lode-gold deposits of the Yilgarn Block, Western Australia. *Mineralium Deposita*, 28(6): 366-374.
- Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, Hagemann S G and Robert F. 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, 13(1-5): 7-27.
- Harker A. 1932. Study on metamorphism-rock transformation. Translated by Jiang Y C. 1981. Beijing: Geological Publishing House: 1-373.
- He L Q, Song Y C, Chen K X, Hou Z Q, Yu F M, Yang Z S, Wei J Q, Li Z and Liu Y C. 2009. Thrust-controlled, sediment-hosted, Himalayan Zn-Pb-Cu-Ag deposits in the Lanping foreland fold belt, eastern margin of Tibetan Plateau. *Ore Geology Reviews*, 36(1-3): 106-132.
- Hippert J and Davis B. 2000. Dome emplacement and formation of kilometre-scale synclines in a granite-greenstone terrain (Quadrilátero Ferrífero, southeastern Brazil). *Precambrian Research*, 102(1-2): 99-121.
- Hitzman M W, Oreskes N and Einaudi M T. 1992. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research*, 58(1-4): 241-287.
- Hou Z Q and Cook N J. 2009. Metallogenesis of the Tibetan collisional orogen: A review and introduction to the special issue. *Ore Geology Reviews*, 36(1-3): 2-24.
- James H L. 1983. Distribution of banded iron-formation in space and time // Trendall A F and Morris R C. Banded Iron-Formation: Facts and Problems. Amsterdam: Elsevier: 471-490.
- Ji S C. 2008. Deformation Mechanisms, Rheology, and Seismic Properties of Rocks. Beijing: Geological Publishing House: 1-539.
- Ji S C and Xia B. 2002. Rheology of Polyphase Earth Materials. Polytechnic International Press, Montreal (Canada): 1-260.
- Ji S C and Zhao P L. 1994. Layered rheological structure of subducting oceanic lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 124(1-4): 75-94.
- Jin Z M, Zhang J F, Green H W and Jin S Y. 2002.

- Rheological properties of deep subducted oceanic lithosphere and their geodynamic implications. *Science in China (series D-Earth Sciences)*, 45(11): 969–977.
- Karato S L and Wu P. 1993. Rheology of the upper-mantle: A synthesis. *Science*, 260(5109): 771–778.
- Kaufman A J. 1996. Geochemical and mineralogic effects of contact metamorphism on banded iron-formation: An example from the Transvaal Basin, South Africa. *Precambrian Research*, 79: 171–194.
- Khan R M K and Naqvi S M. 1996. Geology, geochemistry and genesis of BIF of Kushtagi schist belt, Archaean Dharwar Craton, India. *Mineralium Deposita*, 31: 123–133.
- Kirby S H. 1983. Rheology of the lithosphere. *Reviews of Geophysics*, 21(6): 1458–1487.
- Klein C. 2005. Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: Their age, geological setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origin. *American Mineralogist*, 90: 1473–1499.
- Koons P O, Craw D, Cox S C, Upton P, Templeton A S and Chamberlain C P. 1998. Fluid flow during active oblique convergence: A Southern Alps model from mechanical and geochemical observations. *Geology*, 26(2): 159–162.
- Lagoeiro L E. 1998. Transformation of magnetite to hematite and its influence on the dissolution of iron oxide minerals. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(3): 415–423.
- Lascelles D F. 2006. The genesis of the Hope Downs iron ore deposit, Hamersley Province, Western Australia. *Economic Geology*, 101(7): 1359–1376.
- Lawley C, Imber J and Selby D. 2013. Structural controls on orogenic Au mineralization during transpression: Lupa goldfield, Southwestern Tanzania. *Economic Geology*, 108(7): 1615–1640.
- Leach D L and Sangster D F. 1993. Mississippi Valley-type lead zinc deposits. *Geological Association of Canada Special Paper*, 40: 289–314.
- Li H M, Zhang Z J, Li L X, Zhang Z C, Chen J and Yao T. 2014. Types and general characteristics of the BIF-related iron deposits in China. *Ore Geology Reviews*, 57: 264–287.
- Lister G S and Davis G A. 1989. The origin of metamorphic core complexes and detachment fault formed during Tertiary continental extension in the north Colorado River region, U. S. A. *Journal of Structural Geology*, 11(1–2): 65–94.
- McCuaig T C and Kerrich R. 1998. *P-T-t* deformation-fluid characteristics of lode gold deposits: Evidence from alteration systematics. *Ore Geology Review*, 12(6): 381–453.
- Molnar P. 1988. Continental tectonics in the aftermath of plate tectonics. *Nature*, 335(6186): 131–137.
- Morris R C. 2002. Iron ore genesis and post-ore metasomatism at Mount Tom Price // Proceedings of the Iron Ore 2002 conference, Perth, 2002, Australasian Institute of Mining and Metallurgy: 3–13.
- Nabelek P I, Liu M and Sirbescu M-L. 2001. Thermo-rheological, shear heating model for leucogranite generation, metamorphism, and deformation during the Proterozoic Trans-Hudson orogeny, Black Hills, South Dakota. *Tectonophysics*, 342(3–4): 371–388.
- Paradis S, Chi G X and Lavoie D. 2004. Fluid inclusion and isotope evidence for the origin of the Upton Ba-Zn-Pb deposit, Quebec Appalachians, Canada. *Economic Geology*, 99(4): 807–817.
- Porter T M. 2002. Hydrothermal iron oxide copper-gold & related deposits: A global perspective. Geoconsulting Publishing, Linden Park: 1–377.
- Powell C M, Oliver N H S, Li Z X, Martin D M and Ronaszeki J. 1999. Synorogenic hydrothermal origin for giant Hamersley iron oxide ore bodies. *Geology*, 27: 175–178.
- Ramsay J G. 1967. Folding and fracturing of rocks. New York: McGraw-Hill: 1–568.
- Ranalli G. 1997. Rheology of the lithosphere in space and time // Orogeny through time. *Geological Society Special Publications*, 121: 19–37.
- Ranalli G and Murphy D C. 1987. Rheological stratification of the lithosphere. *Tectonophysics*, 132(4): 281–295.
- Rasmussen B, Fletcher I R, Muhling J R, Thorne W S and Broadbent G C. 2007. Prolonged history of episodic fluid flow in giant hematite ore bodies: Evidence from in situ U–Pb geochronology of hydrothermal xenotime. *Earth and Planetary Science Letters*, 258(1–2): 249–259.
- Rickard D T, Willdén M Y, Marinder N-E and Donnelly T H. 1979. Studies on the Genesis of the Laisvall Sandstone Lead-Zinc Deposit, Sweden. *Economic Geology*, 74(5): 1255–1285.
- Robl J, Fritz H, Stüwe K and Bernhard F. 2004. Cyclic fluid infiltration in structurally controlled Ag–Pb–Cu occurrences (Schladming, Eastern Alps). *Chemical Geology*, 205(1–2): 17–36.

- Rosière C A and Rios F J. 2004. The origin of hematite in high-grade iron ores based on infrared microscopy and fluid inclusion studies: The example of the conceicao mine, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Economic Geology*, 99(3): 611–624.
- Rosière C A, Siemes H, Quade H, Brokmeier H G and Jansen E M. 2001. Microstructures, textures and deformation mechanisms in hematite. *Journal of Structural Geology*, 23: 1429–1440.
- Schofield D I and Lemos R S. 1998. Relationships between syntectonic granite fabrics and regional PTtd paths: An example from the Gande-Avalon boundary of NE Newfoundland. *Journal of Structural Geology*, 20(4): 459–471.
- Shimada M. 1993. Lithosphere strength inferred from fracture strength of rocks at high confining pressures and temperatures. *Tectonophysics*, 217(1–2): 55–64.
- Sibson R H and Scott J. 1998. Stress-fault controls on the containment and release of overpressured fluids: Examples from gold-quartz vein systems in Juneau, Alaska; Victoria, Australia and Otago, New Zealand. *Ore Geology Reviews*, 13(1–5): 293–306.
- Siemes H, Klingenberg B, Rybacki E, Naumann A, Schäfer W, Jansen E and Kunze K. 2008. Glide systems of hematite single crystals in deformation experiments. *Ore Geology Reviews*, 33(3–4): 255–279.
- Siemes H, Klingenberg B, Rybacki E, Naumann M, Schafer W, Jansen E and Rosière C A. 2003. Texture, microstructure, and strength of hematite ores experimentally deformed in the temperature range 600–1100°C and at strain rates between 10^{-4} and 10^{-6} s⁻¹. *Journal of Structural Geology*, 25(9): 1371–1391.
- Sillitoe R H. 2003. Iron oxide-copper-gold deposits: An Andean view. *Mineralium Deposita*, 38(7): 787–812.
- Spangenberg J E and Herlec U. 2006. Hydrocarbon biomarkers in the Topla-Mežica zinc-lead deposits, Northern Karavanke/Drau Range, Slovenia: Paleoenvironment at the site of ore formation. *Economic Geology*, 101(5): 997–1021.
- Spencer J E and Welty J W. 1986. Possible controls of base-and precious-metal mineralization associated with Terriary detachment faults in the lower Colorado River Trough, Arizona and California. *Geology*, 14(3): 195–198.
- Spier C A, de Oliveira Sonia M B and Rosière C A. 2003. Geology and geochemistry of the Águas Claras Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Mineralium Deposita*, 38(6): 751–774.
- Spier C A, de Oliveira Sonia M B, Sial A N and Rios F J. 2007. Geochemistry and genesis of the banded iron formations of the Cauê Formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, 152(3–4): 170–206.
- Spry P G, Plimer I R and Teale G S. 2008. Did the giant Broken Hill (Australia) Zn-Pb-Ag deposit melt? *Ore Geology Reviews*, 34(3): 223–241.
- Storti F, Holdsworth R E and Salvini F. 2003. Intraplate strike-slip deformation belts // Storti F, Holdsworth R E and Salvini F. Intraplate strike-slip deformation belts. Geological Society Special Publications: 210: 1–14.
- Sun H, Wu J, Yu P and Li J. 1998. Geology, geochemistry and sulfur isotope composition of the Late Proterozoic Jingtieshan (Superior-type) hematite-jasper-barite iron ore deposits associated with stratabound Cu mineralization in the Gansu Province, China. *Mineralium Deposita*, 34(1): 102–112.
- Sundblad K and Stephens M B. 1983. Lead isotope systematics of strata-bound sulfide deposits in the Higher Nappe Complexes of the Swedish Caledonides. *Economic Geology*, 78(6): 1090–1107.
- Taylor D, Dalstra H J, Harding A E, Broadbent G C and Barley M E. 2001. Genesis of high-grade hematite ore bodies of the Hamersley province, Western Australia. *Economic Geology*, 96(4): 837–873.
- Travé A, Calvet F, Sans M, Vergé J and Thirlwall M. 2000. Fluid history related to the Alpine compression at the margin of the south-Pyrenean Foreland basin: the El Guix anticline. *Tectonophysics*, 321(1): 73–102.
- Venera Z, Schulmann K and Kroener A. 2000. Intrusion within a transtensional tectonic domain, the Cista Granodiorite (Bohemian Massif): Structure and rheological modeling. *Journal of Structural Geology*, 2(10): 1437–1454.
- Wang E D, Xia J M, Fu J F, Jia S S and Men Y K. 2014. Formation mechanism of Gongchangling high-grade magnetite deposit hosted in Archean BIF, Anshan-Benxi area, Northeastern China. *Ore Geology Reviews*, 57: 306–321.
- Williams P J. 2010. Classifying IOCG deposits // Corriveau L and Mumin H. Exploring for iron-oxide copper-gold deposits: Canada and global analogues. *Geological Association of Canada Short Course Notes*, 20: 11–19.
- Xu D R, Wang Z L, Cai J X, Wu C J, Bakun-Czubarow N,

- Wang L, Chen H Y, Baker M J and Kusiak M A. 2013. Geological characteristics and metallogenesis of the Shilu Fe-ore deposit in Hainan Province, South China. *Ore Geology Reviews*, 53: 318–342.
- Xu D R, Wang Z L, Chen H Y, Hollings P, Jansen N H, Zhang Z C and Wu C J. 2014. Petrography and geochemistry of the Shilu Fe-Co-Cu ore district, South China: Implications for the origin of a Neoproterozoic BIF system. *Ore Geology Reviews*, 57: 322–350.
- Xu G and Lin X. 2000. Geology and geochemistry of the Changlongshan skarn iron deposit, Anhui Province, China. *Ore Geology Reviews*, 16(1–2): 91–106.
- Zhai M G and Windley B F. 1990. The Archaean and early Proterozoic banded iron formations of North China: Their characteristics, geotectonic relations, chemistry and implications for crustal growth. *Precambrian Research*, 48: 267–286.
- Zhang Z C, Hou T, Santosh M, Li H M, Li J W, Zhang Z H, Song X Y and Wang M. 2014. Spatio-temporal distribution and tectonic settings of the major iron deposits in China: An overview. *Ore Geology Reviews*, 57: 247–263.
- Zhong Z Q and You Z D. 1995. Compositional variation and volume loss of a shear zone-Hetai shear zone as a case history. *Chinese Science Bulletin*, 40(19): 1638–1641.

Application of Lithospheric Rheology in Structural Metallogenesis: Taking BIF-type Iron-rich Ore Deposits as an Example

XU Deru¹, WU Chuanjun^{1,2}, LV Guxian³, ZHOU Yueqiang^{1,2}, YU Liangliang^{1,2}, ZHANG Jianling^{1,2}, HU Guocheng^{1,2} and HOU Maozhou^{1,2}

(1. CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the basic theory and recent progresses of rock rheology, this paper addresses the critical role of rock rheological properties in the structural metallogenesis. The worldwide, metamorphic banded iron formation-type (BIF) iron-ore deposits are referred as example to delineate and evaluate the influences of structural deformation and rock rheological properties on the formation of this type of ore deposit. It is concluded that due to rheological differentiation, folding induced by ductile shearing and high-temperature plastic flow played a particularly key role in the formation of the high-grade, BIF-type Fe-rich ore deposits. Therefore, we propose that a combination between structural metallogenesis and rock rheology may be of help to our understanding of the tectono-physicochemical characteristics of large to super-large ore deposits.

Keywords: structural metallogenesis; rheological strength; banded iron formation (BIF); genesis of the high-grade iron-rich ore deposits; tectono-physicochemistry