

海南石碌铁矿床构造变形特征及其与铁多金属成矿富集的关系

许德如¹, 吴俊^{1,2}, 肖勇³, 陈福雄⁴, 王力^{1,2}, 刘朝露³, 王智琳^{1,2}

XU De—ru¹, WU Jun^{1,2}, XIAO Yong³, CHEN Fu—xiong⁴,

WANG Li^{1,2}, LIU Zhao—lu³, WANG Zhi—lin^{1,2}

1. 中国科学院广州地球化学研究所石油天然气与矿产资源研究中心, 广东 广州 510640;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3. 海南省地质勘查局资源环境调查院, 海南 海口 570260;

4. 海南矿业联合有限公司, 海南 昌江 572700

1. Research Center of Petroleum and Mineral Resources, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Hainan Bureau of Geology and Exploration, Haikou 570260, Hainan, China;

4. Hainan Mining United CO., LTD, Changjiang 572700, Hainan, China

摘要:海南石碌铁矿曾被誉“亚洲最大的富铁矿”,其形成、定位与褶皱变形及伴随的剪切、塑性流动等构造密切相关。石碌矿区构造变形大致分为早期(D₁)复式向斜的形成时期、晚期(D₂)褶皱叠加和剪切变形时期。后者又进一步分为韧—脆性变形(D_{2a}), 脆—韧性变形、层间滑脱断层形成(D_{2b})和脆性变形、矿体破坏(D_{2c})3个阶段。石碌铁矿床受NW—SE向复式向斜及其与NE—NNE向褶皱叠加所形成的横跨或斜跨褶皱的严格控制;褶皱过程所伴随的剪切变形和高温塑性流动是富铁矿形成的重要机制。复式向斜轴部,尤其是2期向斜褶皱轴的叠加部位往往可发现厚大的富铁矿体。

关键词:构造变形;褶皱控矿;剪切和高温塑性流动;石碌铁矿床;海南省

中图分类号: P618.31; P552

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2011)04-0553-12

Xu D R, Wu J, Xiao Y, Chen F X, Wang L, Liu Z L, Wang Z L. Structural deformation of the Shilu iron ore deposit in Hainan, southern China, and its relationship with the formation and enrichment of iron—polymetallic metals. *Geological Bulletin of China*, 2011,30(4):553–564

Abstract: Shilu iron ore deposit, which is situated at the western Hainan Province of southern China, has been reputed as the biggest hematite—rich ore deposit in Asia. The formation and location of the deposit have close relationship with folds and their incidental shear and plastic flow structures. Based on tectonic styles and deformation mechanism of the orebodies and their host rocks, the strongly structural deformation in the studied ore deposit can be classified into two phases, which are D₁, the early regional—scale synclinorium formation stage and D₂, the late fold superimposition and concomitant shear deformation stage. The latter (D₂) can be further divided into three uninterrupted stages of D_{2a}, D_{2b} and D_{2c}, and represents dynamic transformation from ductile—brittle shear and high—*T* (temperature) plastic flow to low—*T* brittle fracture. The ore—bodies are strictly controlled by the NW—SW trending synclinorium and the superposed folds which were formed due to superposition of the late NE—NNE trending transversal folds on the early syncli-

收稿日期: 2010—11—05; 修订日期: 2011—03—04

资助项目: 全国危机矿山接替资源找矿项目(编号: 200646092)和国家自然科学基金项目(批准号: 40773017)

作者简介: 许德如(1966—), 男, 博士, 研究员, 从事大陆边缘动力学与成矿学研究。E—mail: xuderu@gig.ac.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

norium, whereas the ductile-brittle shear and concomitant high- T plastic flow were main mechanisms for formation of the hematite-rich ore-bodies. Iron-rich ore bodies in the Shilu iron ore deposit often can be found along the synclinorium axis, especially in the positions of the forementioned superposed synclines.

Key words: structural deformation; fold-controlled ore body; shear and high-temperature plastic flow deformation; Shilu iron ore deposit; Hainan Province of southern China

位于海南省昌江县境内的石碌铁矿是中国著名的以富赤铁矿为主,伴生有钴、铜、镍等多金属的超大型矿床,以其储量大(探明的铁矿石超过 4.7×10^8 t)、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。石碌铁矿已有50多年的地质勘探和开采历史,许多学者曾围绕矿床的找矿方向从成矿条件、成矿过程、矿床成因等开展过多方面的研究^[1-2],但目前关于石碌铁矿床,尤其是其中富铁矿体的成矿富集机理等仍未取得统一的认识。由于石碌矿区褶皱、断裂等构造发育,且不同期次的构造相互叠加,而矿体的定位受构造,特别是褶皱构造的严格控制,因此,本文对矿区构造变形及其与成矿的关系进行深入研究,以期正确理解石碌铁矿床铁多金属成矿富集机理、深入揭示其成矿作用规律,并为确定矿体赋存空间、开展矿区深部和近外围找矿预测等提供重要依据。

1 矿床地质特征

海南石碌铁矿床位于华南褶皱系五指山褶冲带的西段^[3],近东西向昌江-琼海断裂带与北东向戈枕剪切带交会部位的东南侧(图1-a)。矿区出露的地层主要有青白口系石碌群、震旦系石灰顶组;矿区东部还广泛分布石炭系南好组-青天峡组和二叠系峨查组-鹅顶组(图1-a)。石碌群是石碌铁矿的主要赋矿围岩,系一套以低绿片岩相为主(局部达角闪岩相),浅海相、浅海-泻湖相含铁火山-碎屑岩建造和碳酸盐岩建造^[4]。石碌群自下而上又分为6个亚层,上部第六亚层是铁、钴铜等矿产的主要赋存层位,岩石组成类型主要为白云岩、条带状二透岩(透辉石、透闪石)化白云岩(或白云岩质铁英岩)、条带状(含石榴子石和/或钾长石)二透岩(或角闪岩质铁英岩)等^[2]。

石碌矿区南、北、西三面均为侵入岩所包围。矿区南部、北部为印支-燕山早期斑状/似斑状角闪黑云二长花岗岩、花岗闪长岩,局部剪切变形强烈^[2];矿区西部为燕山期花岗斑岩、角闪黑云二长花岗岩;矿区内则发育规模不一的燕山晚期中酸性、基性等

岩脉。总体看,石碌群有如一叶孤舟漂浮在印支-燕山期岩体中,可能是一套被后期花岗岩岩浆冲破、支解和部分吞噬的残留体。

石碌矿区褶皱、断裂等构造发育。矿区整体表现为一轴向NW-SE至近EW、局部倒转的复式向斜构造形态,并叠加有次一级的NE至近SN向的横跨或斜跨褶皱(图1)。该复式向斜向NW扬起、收敛而向SE倾伏、撒开,自N而S主要由北一向斜、红房山背斜、石灰顶向斜等组成。矿区断裂构造也较发育,计有NW-NNW、NEE-EW和NNE-近SN向3组。这些构造对赋矿地层和矿体起重要的控制或改造作用。由于多期构造和岩浆活动事件,硅化、绿帘石化、绿泥石化、黄铁矿化、碳酸盐化、透闪石透辉石化、阳起石化、钾长石化、石榴子石化等在矿区广泛发育。

赤铁矿和石英分别是石碌矿区富铁矿石的主要矿石和脉石矿物。贫铁矿石矿物由赤铁矿和磁铁矿共同组成,脉石矿物主要包括石英、透辉石、透闪石、石榴子石、钾长石、白云石、方解石、绿帘石等。富铁矿石以鳞片变晶结构(图版1-a)和块状构造为主,次为变余粉砂结构、鲕状结构和条带状构造(图版1-b)。钴铜矿矿石主要矿石矿物为含钴黄铁矿、含钴磁黄铁矿、黄铜矿,脉石矿物与贫铁矿石类似;矿石以致密块状构造、条带状构造和胶状、隐晶(微晶)质结构为主,次为不规则脉状、网脉状、角砾状构造(图版1-c、d)和细粒、中粗粒、它形-半自形粒状结构。

2 矿区控矿构造特征

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的控制。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,整体上都呈层状、似层状赋存于复式向斜的槽部及两翼向槽部过渡的部位(图1-b、c)。据前人的研究^[5]和笔者进一步开展的构造地质填图,早期NW-SE向复式向斜的两翼还发育一系列

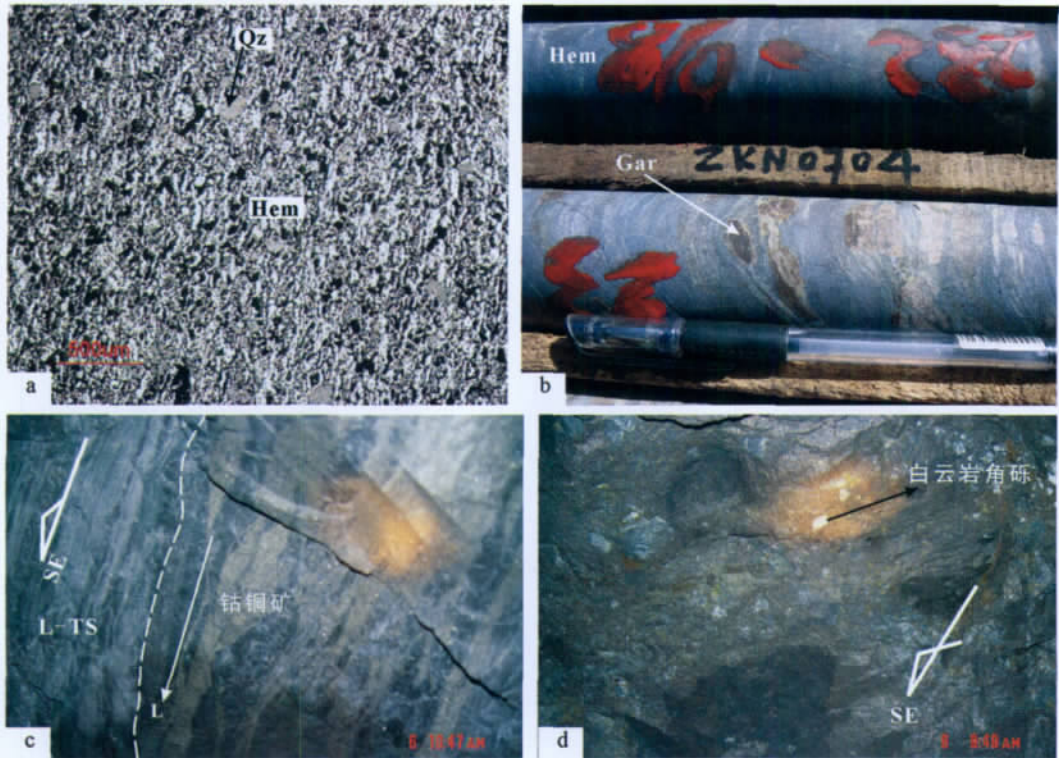
规模稍小的晚期 NE—NNE 向次级褶皱(图 1-a、图 2), 且 2 期褶皱的叠加部位往往导致近矿围岩和矿体的埋深或剥露, 特别是 2 期向斜褶皱叠加的地段, 如北一、三棱山—鸡心岭—鸡心坳、枫树下(石灰顶)—鸡心坳等(图 2), 第六层二透岩等近矿围岩埋藏深度逐渐变大, 预示这些地段的深部是铁矿体的有利找矿靶区。经勘探证实, 目前在有向斜褶皱叠加的石灰岭—三棱山—鸡心岭地段发现了超过 $4500 \times 10^4 \text{t}$ 的富铁矿体, 其它地段(枫树下—鸡心坳等)的勘探工作目前仍在进行中。

矿区多个方向的断裂构造对矿体也有重要的控制或改造。从矿区南部沿 NW—SE 向的 F_1 断裂上盘所分布的系列铁矿体来看(图 1-a、图 2), 矿体形态主要呈 S 形、且走向与 F_1 断层基本一致, 反映 F_1 断裂对矿体定位有重要影响。进一步对矿区南部枫树顶—枫树下矿段进行了构造—地层剖面实测(图 3-a), 发现石碌群第六层条带状二透岩与第五层石英绢云母片岩在产状上存在突变关系, 第六层二透岩有自 E 向 W、自地表至深部产状逐渐变陡的趋

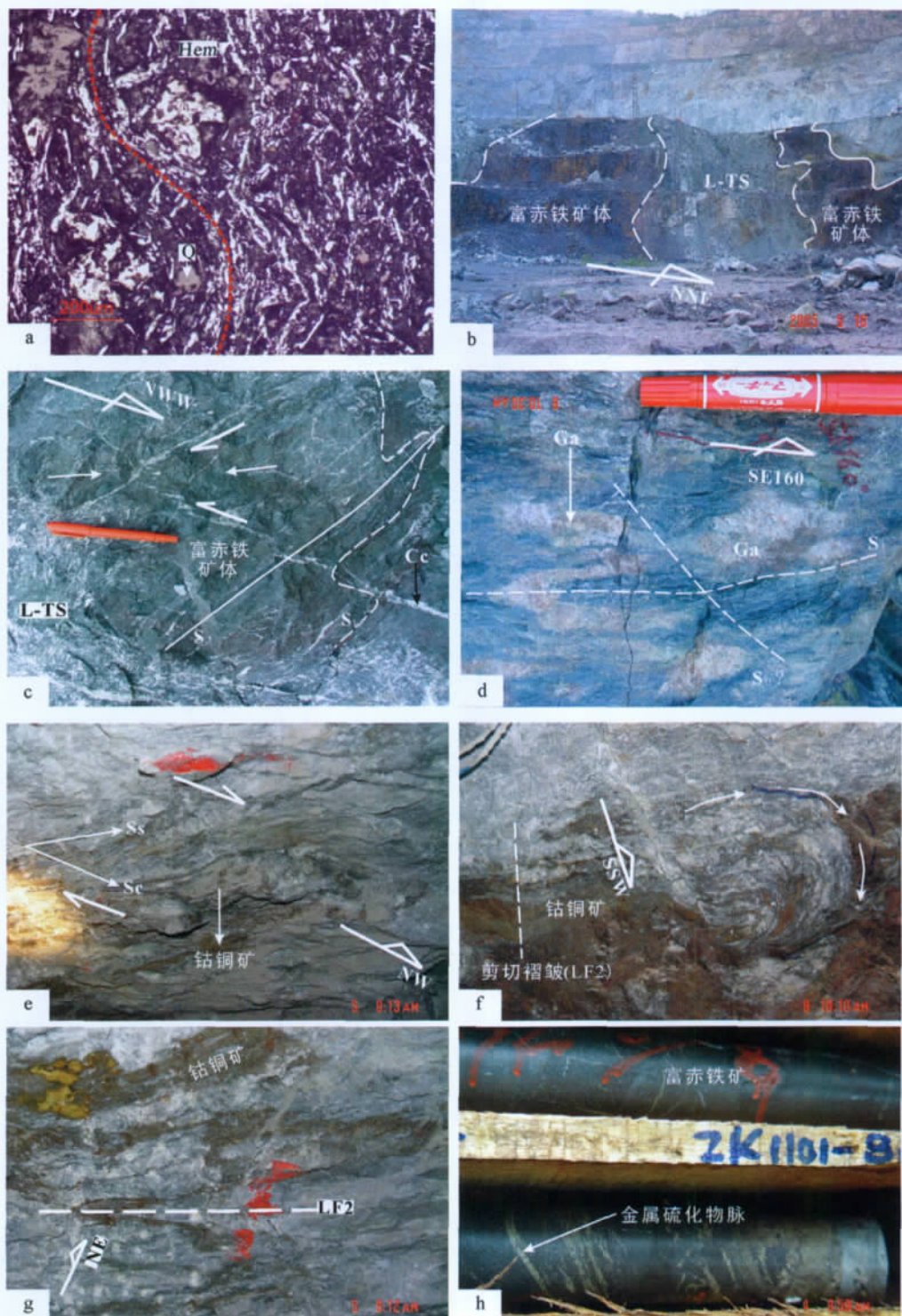
势, 暗示矿区南部南六至枫树顶一带的铁矿体在垂向上有可能向深部延深, 深部应有较好的找矿前景。地层关系和运动学分析结果指示, 石碌群第五层自 SW 向 NE 沿 F_1 断裂逆冲于第六层之上。此外, 矿区受一系列近 SN 向断层如 F_4 、 F_6 、 F_{32} 、 F_7 等所影响的地段(图 1-b), 除岩层表现强烈剪切变形、构造角砾岩发育外, 矿区复式向斜及其所控制的矿体的整体性也受到强烈的破坏。

剪切变形和高温塑性流动对矿体的形成和定位不容忽视。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^[2]; 矿体除表现强烈的塑性变形和糜棱岩化外(图版 I-a 和图版 II-a), 其形态也严格受一对近 EW 向和 NW—SE 向的 X 形共轭剪张节理的控制(图版 II-b), 并表现为旋转变形(图版 II-c)。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)和富铁矿体过渡。特别是石榴子石条带往往呈香肠状、囊状和无根

图版 I Plate I



a—细粒鳞片变晶结构的糜棱岩化赤铁矿矿石(样品 SL8), 反射光照片; b—含石榴子石条带的赤铁矿矿石(ZKN0704 钻孔); c—条带状二透岩白云岩内显示矿物生长线理(L)的钴铜矿矿石; d—胶状角砾型钴铜矿矿石。Hem—赤铁矿, Qz—石英, Gar—石榴子石, L-TS—条带状二透岩白云岩



A—强塑性变形的赤铁矿(Hem)呈S形弯曲(图中红色虚线示),样品 ZSL6-30,Q=石英,反射光;
 b—呈分枝尖灭的透镜状富铁矿体,摄于北—露天采场西部+60m 标高采面, L-TS=条带状二透岩;
 c—旋转变形的富铁矿体,明显受一组X型共轭剪张节理所控制,Cc=方解石;d—贫铁矿中显示
 N-型无根钩状褶皱的石榴子石(Ga);e—一条带状二透岩化白云岩内沿S-C组构产生的似层状钴铜矿
 矿石;f—一条带状二透岩化白云岩内沿顺层剪切面理产生的似层状钴铜矿石,图内箭头示旋转变形;
 g—一条带状二透岩化白云岩内沿S-C组构产生的钴铜矿石显示无根钩状褶皱;h—赤铁矿矿石内沿
 一组片理产生的各种规模的硫化物矿脉,观察于钻孔 ZK1101。LF2代表第二期褶皱轴, S_1 和 S_2 分别
 代表早期和晚期片理, S_0 示原始层理,图c和图e中箭头示剪切或压缩方向

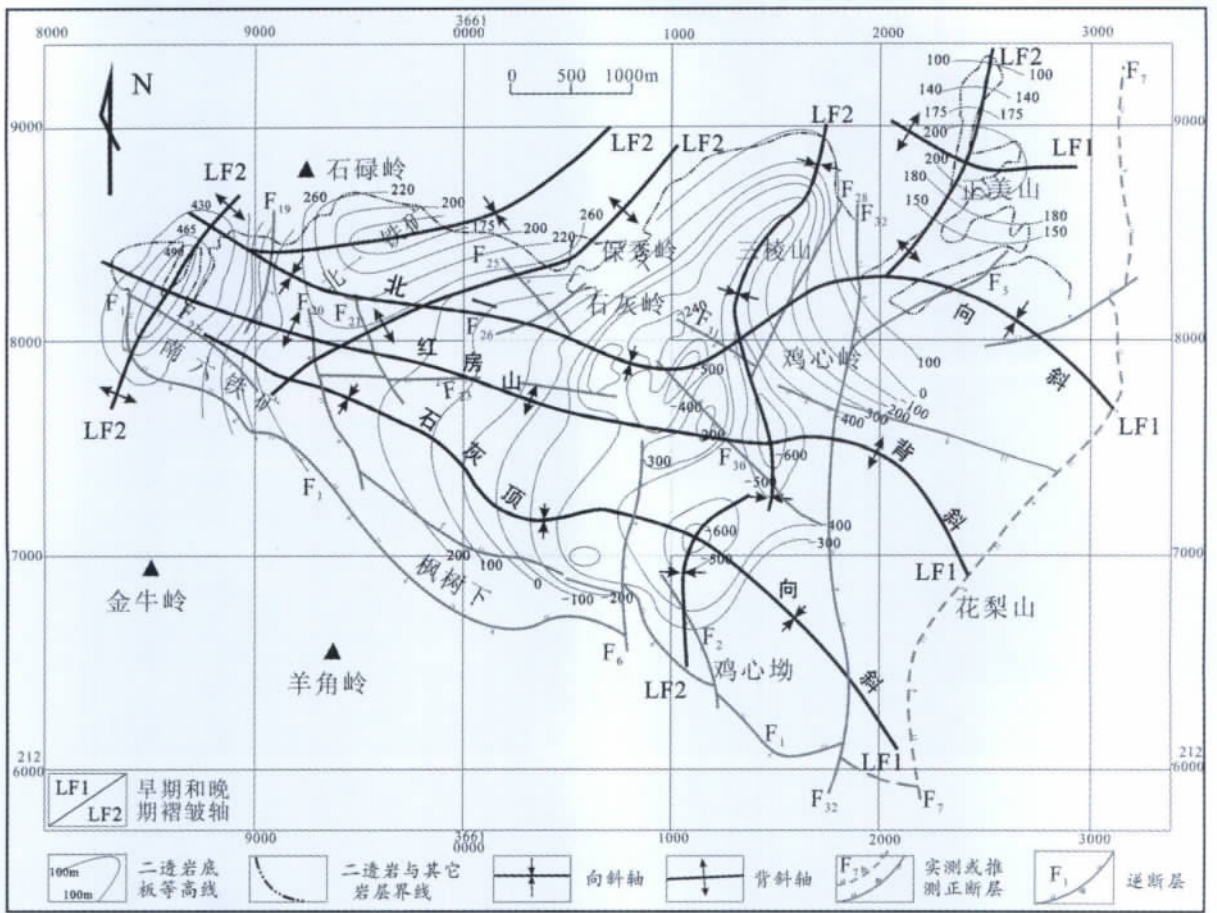


图 2 石碌铁矿区构造及其与石碌群条带状透辉石-透闪石岩底板等高线分布趋势之间的关系

Fig. 2 Map showing structures in the Shilu iron-ore mine and their relationship with bottom contours of the banded diopside-tremolite rocks of the Shilu Group

钩状褶皱(图版 I -b 和图版 II -d),表现为强烈的塑性流动和压扁拉长。这些特征不仅反映富铁矿体的形成与挤压剪切变形密切,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、条带状二透岩化白云岩、条带状二透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(图版 I -c 中的 L)、S-C 组构(图版 II -e)、顺层剪切褶皱(图版 II -f)、无根钩状褶皱(图版 II -g)等构造发育。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。

晚阶段的构造和热液活动在矿区也异常活跃,不仅表现为先前的铁矿体和钴铜矿体呈菱形块状和角砾状,而且此阶段的硫化物矿化呈胶状

角砾状、不规则脉状和网脉状,特别是由黄铁矿±磁黄铁矿±黄铜矿组成的矿脉,形态和规模不一(厚度变化于 0.001~5m 之间),或沿富铁矿体一组片理发生(图版 II -h),或充填在铁矿体裂隙内。另外,铅锌矿化也广泛发育,与其它硫化物矿脉呈互层产出。

3 矿区构造变形序列

根据石碌矿区赋矿围岩和矿体构造形迹的特点,结合构造应力分析和区域构造-岩浆活动事件,初步将矿区构造变形序列划分为 2 个期次:即 D₁ 和 D₂。D₁ 变形期是 NW—SE 向复式向斜形成的主要时期,D₂ 变形期是褶皱叠加及伴随的剪切构造形成时期。根据构造样式和运动学标志分析,将第二期又划分为 D_{2a}、D_{2b}、D_{2c} 三个连续变形阶段,即韧-脆性

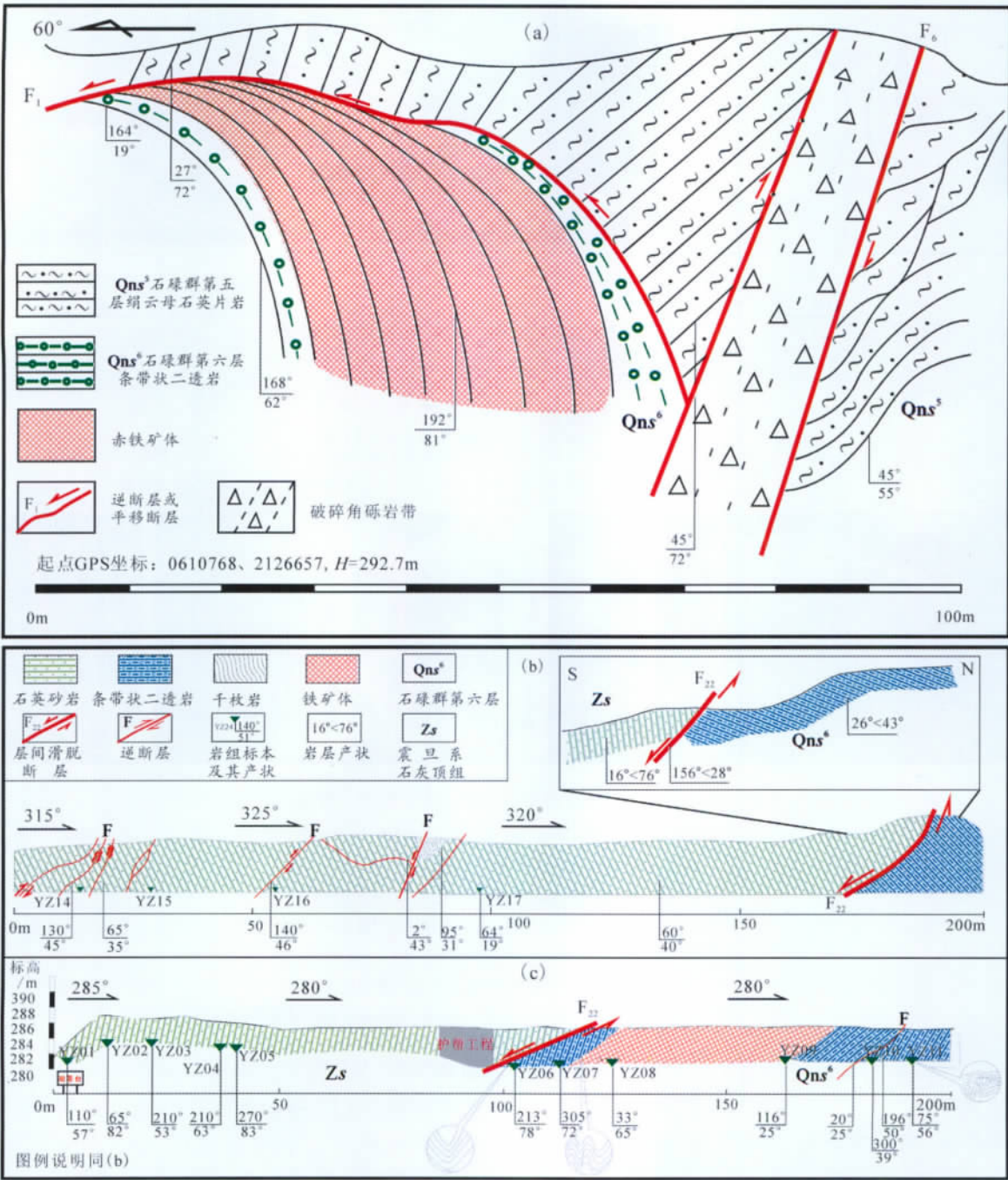


图 3 石碌铁矿区枫树顶(a)、南六(b)和北一(c)矿段构造-地层实测剖面
Fig. 3 Measured structure-stratum sections across the Fengshuding (a),
Nanliu (b) and Beiyi ore-bodies (c) in the Shilu iron-ore mine

变形阶段(D_{2a})、脆-韧性变形阶段(D_{2b})和脆性变形阶段(D_{2c})。

D₁ 构造变形期: 主要形成轴向 NW—SE 至近 EW 的石碌复式向斜(LF1)及伴生的大型褶皱式窗棱构造、NW—SE 向逆断层如 F_1 (图 3-a), 反映了 NE—SW 或近 SN 向的水平挤压。从石碌矿区西部穿过北一矿体的近 SN 向横断剖面(即图 1-b 中的 I—I'剖面)可以看到, 该复式向斜自北而南由北一向

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

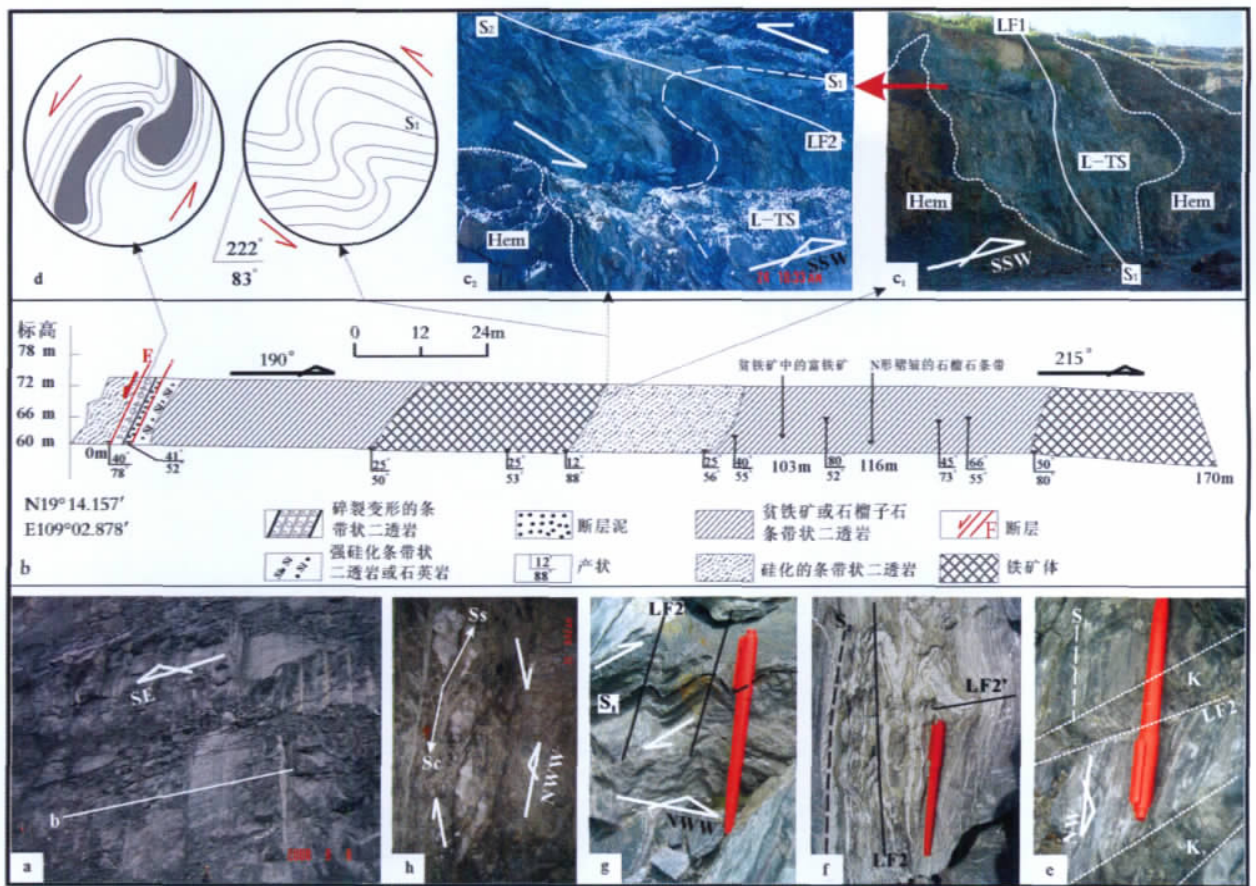


图4 石碌铁矿区北一矿段石碌群第六层第二变形期第一阶段(D_{2a})构造变形

Fig. 4 Across-section and field photographs showing D_{2a} structural deformation of the sixth sequence rocks of the Shilu Group in the Shilu iron-ore mine

a—大型褶皱式窗棱构造；b—北一铁矿露天采坑+60m 标高采面东段构造—岩性剖面图(部分)；c(c₁, c₂)—LF1 褶皱转折端产生的 S 形剪切褶皱；d—大型滑脱剪切带内的旋转构造；e—条带状二透岩(L-TS)内膝褶皱，K 代表膝折带；f—条带状二透岩内无根钩状褶皱；g—含铁千枚岩内顺层剪切褶皱；h—斜列式石英布丁构造，注意 S(Ss)-C(Sc)组构，北一矿段钴铜矿体—150m 中段。

LF1 和 LF2 分别代表第一期(D₁)和第二期(D_{2a})褶皱轴，S₁ 和 S₂ 分别表示第一期和第二期构造面理或片理，Hem=赤铁矿。

除 h 外，其它照片均摄自北一铁矿段采坑+60m 标高采面。箭头示剪切方向

斜、红房山背斜、石灰顶向斜等次级褶皱组成，所形成的片理面 S₁ 方向呈 NW—SE 向(图版 II—d)。因强烈构造置换，原始层面(S₀)已消失，但通过贫铁矿体内强烈的褶皱、压缩变形和主要顺贫铁矿体一组片理面产出的石榴子石条带推测，其原始层理面应近 SN 向。在北一矿体南翼和南六铁矿体内还发现由层面圆筒状起伏所形成的大型褶皱式窗棱构造(图 4-a)，发育于强烈变形的石碌群第六层中。该窗棱构造的近 EW 向长轴代表变形的 b 轴，反映了平行原始层理 S₀ 的挤压和缩短。笔者推测，这种褶皱式窗棱构造应形成于构造变形的早期阶段(即 D₁ 期)。

D₂ 构造变形期：是矿区褶皱叠加及伴随的强烈

剪切变形、早期复式向斜局部倒转时期。本期所产生的褶皱轴向(LF2)指向 NE—NNE，并主要叠加于 D₁ 期复式向斜(LF1)两翼，反映了 NW—近 EW 向的顺层挤压剪切。根据伴随该期褶皱叠加所伴随的其它构造形迹特征，D₂ 变形期又可进一步划分为 D_{2a}、D_{2b}、D_{2c} 三个连续变形阶段，反映了动力学变形条件具有从高温塑性流动到低温脆性转变的特征。

(1)D_{2a} 表现为中深构造层次的韧—脆性顺层剪切变形。这一阶段所产生的构造式样包括：叠加于 D₁ 期复式向斜(LF1)之上的系列 NE—NNE 向背斜和向斜(LF2)(图 1-a、图 2)、层间或顺层剪切褶皱(图 3-c 中素描、图版 II—f 和图 4-c₂、g)、膝褶皱(图 4-

e)、无根钩状褶皱(图版 II-d、g 和图 4-f)、顺层密集流(滑)劈理(片理)、构成 S-C 组构的 NW—SE 向和近 EW 向 2 组构造面理(图版 II-e、图 4-h)、旋转碎斑和斜列式石英布丁构造(图 4-h)、NW—SE 向矿物生长线理(L)(图版 I-c)等,反映左旋剪切为主的特征。特别是该变形阶段所产生的一系列规模不等的褶皱(LF2),因其轴向呈 NE—NNE 向,在与 D_1 变形期所形成的轴向 NW—SE 的复式向斜褶皱(即 LF1)叠加时,呈垂直或小角度交切而构成 Ramsay^[6]的 I 型和 II 型横跨、斜跨褶皱式样(图 1-a、图 2),在 2 期背形叠加处形成穹隆,如南六、正美山等地;2 期向形叠加处形成盆地,如北一、三棱山—鸡心岭—鸡心坳等地;早期的背形与晚期的向形或晚期的背形与早期的向形叠加重叠部分,表现为褶皱构造枢纽的波状起伏,形成鞍状构造,如红房山至花梨山等地。结果因褶皱叠加,矿区总体表现为 NW—SE 向半卵形的向斜盆地,其西部紧闭、抬升而东部倾伏、开阔,在矿区的西部和北东部则出现 NNE 向短轴背斜或穹隆(图 2 和图 5)。

(2) D_2b 主要表现为中浅构造层次的脆—韧性剪切变形,以发育大型滑脱剪切断裂系统为特征,叠加于早期构造之上的主要构造形迹有: NW(W)—SE(E)向大型滑脱剪切断层(图 6-a、b),近 EW 向和 NW—SE 向 X 形共轭剪张节理、旋转构造(图版 II-c、图 4-d),各种破劈理、层间劈理、断层劈理(图 6-c~e)、近 SN 向轴面劈理等。此外,石碌群第五层与第六层、第六层与上覆震旦系石灰顶组之间也均以 NW(W)—SE(E)向大型层间滑脱断层接触(图 3-b、c)。断层带内出现的褶皱层构造或平卧褶皱(图 4-c₂)、旋转构造和不同性质的劈理,显示该变形阶段也具水平左旋剪切的特征。

(3) D_2c 为浅层次脆性变形,主要表现为一系列近 SN 向的平移断层(图 1 和图 3-a)、碎裂岩和张节理,导致矿体和赋矿围岩自 S 向 N、自 W 向 E 的平移和落陷,晚期中酸性—中基性岩脉侵入、脉状金属硫化物矿化(图 7)、胶状角砾型矿化等(图版 I-d)。

石碌矿区赋矿围岩和矿体在第二变形阶段广泛发育的剪切褶皱、膝褶皱、尖棱褶皱、无根钩状褶皱和 S-C 组构、各种劈理等,均反映矿区曾经受了 NW 至近 EW 向的顺层挤压剪切、固态塑性流动、压溶和重结晶,体现了构造动力引起地壳变形、产生各种构造形迹的同时,也引起物质成分的变化^[5,7-11]。

4 构造变形与成矿关系讨论

最近的研究结果^[2,4]表明,石碌铁矿是一个受构造和热液叠加改造的火山—沉积变质型(BIF)矿床,经历了矿源层形成(约 840Ma 以前)、晋宁期以来的褶皱变形和变质成矿(840~250Ma)、印支—燕山早期构造—岩浆改造富化成矿(240~210Ma)、燕山晚期热液叠加成矿(130~90Ma)等多个成矿阶段,揭示矿床的最终形成、定位与大地构造发展及伴随的构造—岩浆事件密切。元古宙基底形成期的长城纪至青白口纪(1440~960Ma^[12-13]),矿区当时处在构造活动区,地壳隆起与拗陷剧烈,再加之剥蚀和沉降交替出现、裂谷式火山岩多旋回喷溢^[14],遂在有利的浅海、浅海—泻湖等盆地形成了一套巨厚的、岩性岩相复杂的、具类复理式韵律的含铁火山—碎屑岩建造和碳酸盐岩建造,即青白口系石碌群,从而奠定了石碌铁矿的矿源层或其基础矿床——火山—沉积矿床^[4]。石碌群沉积成岩以后,又经历了多期次构造—岩浆活动和变质作用,促使铁、钴、铜等矿物质进一步富化。板内造山阶段的晋宁—印支早期^[2],石碌群普遍褶皱、断裂和区域变质,形成一系列 NW—SE 走向的紧闭型背斜、向斜(LF1)及伴生的断裂,不仅改变了早期火山—沉积矿床的形态和产状,而且还导致赋矿地层和早期矿层发生变质和片理化(S_1)。这一时期是石碌铁矿第一次受到改造形成火山—沉积变质矿床的时期,对成矿物质的富化和在向斜槽部的加厚都有重要影响。陆内造山和伸展阶段的中三叠世至第四纪,海南地壳活动性再度增强,石碌矿区及邻区转化为新的活化区,不仅发生中度强烈的 NE—NNE 向褶皱(LF2)和特别强烈发育的块状断裂,而且有大量的以中酸性岩为主的岩浆侵入。在石碌地区,经过第一次改造后的石碌群中的铁矿层再次受到更为强烈的改造。对石碌矿区矿体的产出特征和构造变形的分析揭示,这一大地构造发展阶段所产生的挤压剪切变形和高温塑性流动对石碌矿区富铁矿体的形成可能有重要的影响。

构造变形与变质条带状铁建造(BIF)中富赤铁矿的富集关系早已引起国际矿床学界的重视^[15]。Lagoeiro^[16]、Rosière 等^[15]曾将显微构造分析与区域构造变形相结合,讨论了巴西 Quadrilátero Ferrífero(简称 QF)地区巨型变质条带状铁矿床的构造变形与富赤铁矿形成的关系,认为剪切变形、变质作用和由此

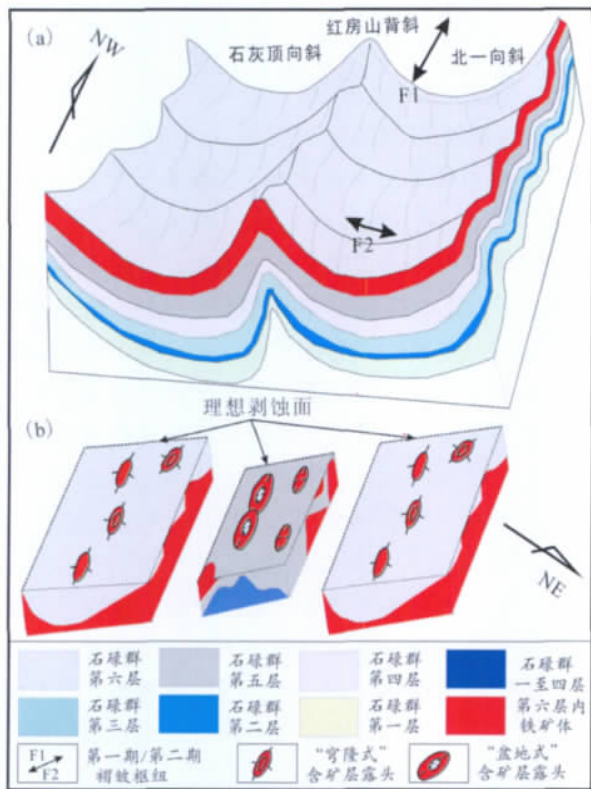


图5 石碌铁矿区叠加褶皱立体形态(a)和理想剥蚀水平(b)
Fig. 5 Sketch maps showing three-dimensional configuration of the superposed buckling (a) and its perfect erosion planes (b) in the Shilu iron-ore mine

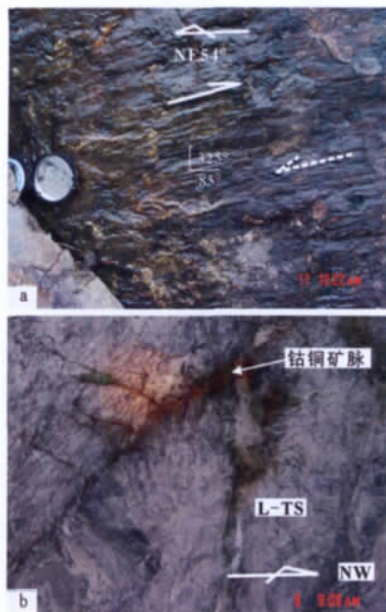


图7 石碌铁矿区北一矿段石碌群第六层第二变形期第三阶段(D_{2c})构造变形
Fig. 7 Field photographs showing D_{2c} structural deformation of the sixth sequence rocks

of the Shilu Group in the Shilu iron-ore mine
a—断层步骤, 示上盘(虚线箭头)相对下盘(实线箭头)左行;
b—条带状二透岩化白云岩内沿主张节理和次级羽状裂隙产生的晚阶段矿化。a 摄于北一露天采场东部+60m 标高采面, b 摄于北一矿段下部钴铜采面

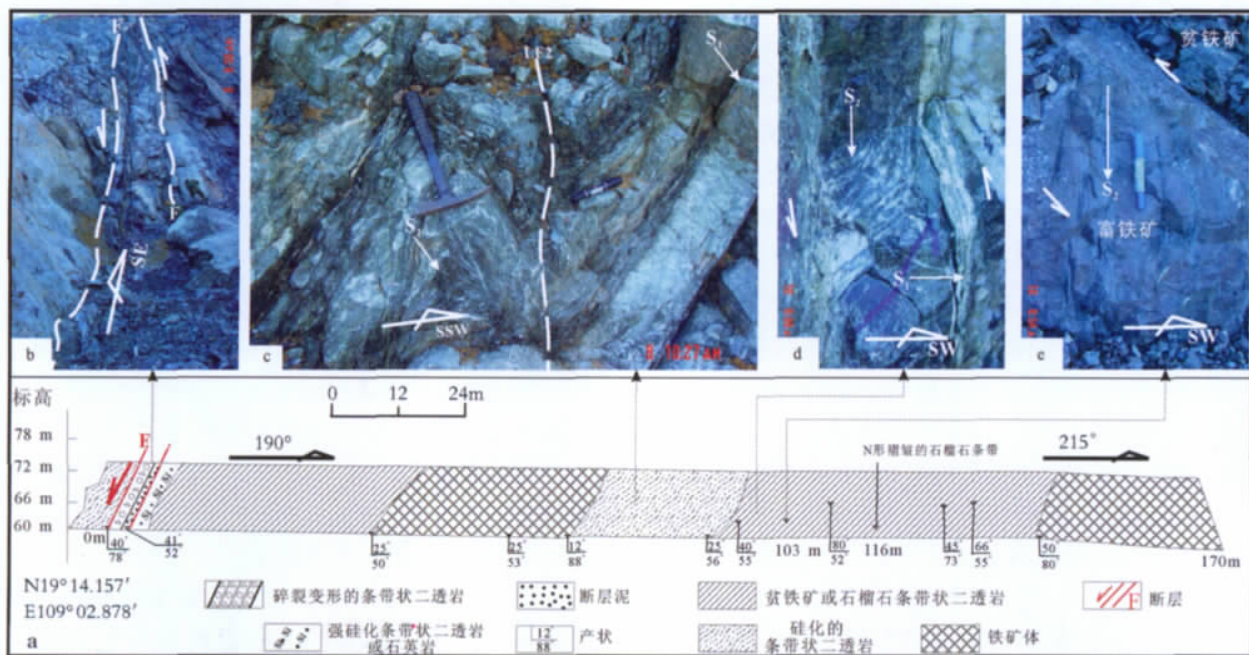


图6 石碌铁矿区北一矿段石碌群第六层第二变形期第二阶段(D_{2b})构造变形

Fig. 6 Across-section and field photographs showing D_{2b} structural deformation of the sixth sequence rocks of the Shilu Group in the Shilu iron-ore mine

a—北一铁矿露天采坑+60m 标高采面东段构造-岩性剖面(部分); b—大型滑脱剪切断裂带(F); c—尖棱褶皱(LF2)基础上发展的

层间褶皱; d—贫铁矿内的断层或褶皱; e—富铁矿内的断层; S₁和S₂分别代表早期和晚期构造片理, 箭头示糜棱方向

所改变的深部氧化还原条件将会导致流体产生、铁离子的活动和条带状铁建造强烈的塑性变形,引起赤铁矿含量的增加和结晶优选方位(CPO)发育。Rosière 等^[15]、Siemes 等^[17-18]还进一步开展了三轴变形实验,并认为剪切变形过程中铁矿层矿石矿物(赤铁矿、磁铁矿、镜铁矿)和脉石矿物(石英、方解石、白云石)流变行为的差异是导致富铁矿体形成的主要原因。Hippertt 等^[19]则详细研究了 QF 地区包含 BIF 铁建造的花岗-绿岩地体中的大型向斜褶皱和花岗岩穹隆的形成机制,认为由于花岗岩-片麻岩物质与富铁的表壳岩(即 BIFs)存在显著的密度差异,因而易于促使包含 BIF 铁建造的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,结果在剪切动力的作用下岩石流变差异导致了密度较大的 BIF 铁建造形成富铁矿。这些研究揭示了高品位富铁矿的形成与剪切动力引起的岩(矿)石差异流变有着密切的关系。

国内学者也将显微构造分析与宏观构造变形相结合,认为褶皱变形及伴随的韧性剪切、塑性流动是石碌铁多金属富集成矿的重要因素。杨开庆等^[5]曾运用构造动力成岩成矿理论和地质力学分析方法对石碌铁矿开展了较系统的构造动力成岩成矿作用研究,认为褶皱过程所伴随的流动构造(如鞘褶皱、肠状褶皱、无根钩状褶皱、尖棱褶皱、S-L 或 S-B 构造岩等)和与之有关的构造动力分异作用与铁、钴、铜等富集成矿、富化加厚有内在的联系。侯威等^[20]则厘定了石碌韧性剪切带及其宏观、显微构造特征,讨论了“北一”式富铁矿体的成因,认为该韧性剪切带呈近东西向展布,长 8km、宽 2.8km,西端向西翘起且呈弧形转向北东向,与戈枕韧性剪切带交接,而东端向东倾伏,被石炭系—二叠系覆盖,并认为石碌“北一”式厚大富铁矿体是原始沉积的贫铁矿经过塑性流动富集、压溶去硅等构造成岩成矿作用的结果。冷盛强等^[21]的高温、单轴外压实验结果也显示,在高温(达 450℃以上)、高压(超过 1200kg/cm²)条件下,原先的铁矿物将发生塑性变形,并转变为鳞片状赤铁矿。

实际上,石碌矿区的构造变形大致反映了从压缩到伸展的全过程,即从早期,也就是板内造山阶段的近 SN 向压缩形成石碌复式向斜(D₁期变形),到晚期即陆内造山和伸展阶段的挤压-伸展和剪切变形过程(D₂期变形)。D₂期则体现了同一变形期从挤压到伸展的不同阶段。由于 D₁变形期只有区域性压

缩作用,未有强烈的剪切变形,且该阶段早期(即晋宁至加里东期)花岗岩不发育,既不能提供成矿物质,更不能提供促使成矿物质活化、迁移和富化所需要的足够的热动力条件,因此推测该变形期可能不会引起成矿物质的大规模富集。但因自加里东期以来(或更早于晋宁期)矿区曾发生多期而广泛的区域变质作用,因而这一时期形成了火山-沉积变质型矿床,主要证据是,早期石榴子石条带主要沿贫铁矿和富赤铁矿的一组主要构造片理面产出,并受后期强烈剪切构造的改造形成无根钩状褶皱、石香肠等构造(图版 II-d、图版 I-b)。

第二变形期(D₂)褶皱叠加及所伴随的脆-韧性剪切、高温塑性流动对先前矿体或矿源层中矿物质的重富集和定位有重要的影响,是石碌矿区富铁矿体形成的一个重要时期。杨开庆等^[5]的研究表明,石碌矿区包括叠加褶皱在内的各种 NE—NNE 向构造大致发生在海西中期至印支期。许德如等^[2]还认为,D₂期变形与华南古特提斯洋封闭、印支—燕山早期挤压-伸展型花岗岩上隆、侵位产生的侧向扭压力导致的水平挤压、剪切、高温塑性流动有关。这一时期矿区南、北两侧大面积印支—燕山早期花岗岩的侵位和上隆能产生侧向挤压剪切应力^[19],再加之穹状花岗岩与石碌群赋矿围岩的密度、流变参数存在差别,因而易于发生弯滑或弯流作用而导致顶薄褶皱和层间剪切滑脱,形成一种富铁、钴、铜等矿物质的高温塑性流体,并使之趋于从向斜褶皱两翼向槽部迁移,即向低应变部位或向斜转折端虚脱部位迁移。尤其是当早、晚 2 期向斜构造叠加时(图 5),因其核部和转折端处于张性环境,遂有利于含矿物质高温塑性流体的聚集而形成厚大的富矿体。

5 结 论

根据对构造变形与成矿关系的分析,石碌矿区构造变形序列大致划分为复式向斜形成时期(D₁)和褶皱叠加及伴随的剪切构造形成时期(D₂)。D₂变形期又可分为韧-脆性变形(D_{2a})、脆-韧性变形(D_{2b})和脆性变形(D_{2c})3 个阶段。构造变形结果不仅导致石碌铁矿床受复式向斜及叠加于之上的次级褶皱的严格控制,而且也引起富铁矿的形成。石碌铁矿床铁多金属的富集与褶皱过程伴随的剪切变形、高温塑性流动息息相关,富铁矿体实质上是在定向剪切应

力和高温控制下,初始贫富分布的基础矿床(火山—沉积变质矿床)或矿源层经进一步分异、富集的结果。石碌铁矿床构造变形与成矿关系的研究结果为指导矿区深、边部找矿勘查提供了重要依据^[2]。

致谢:研究过程得到翟裕生院士、吕古贤研究员的具体指导,矿山和区域地质调查得到海南省地质勘查局黄后锐工程师、符启基工程师和海南矿业联合有限公司郭凤芳总工程师、梁将工程师等的支持,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1]许德如,王力,肖勇,等. “石碌式”铁氧化物—铜(金)—钴矿床成矿模式初探[J]. 矿床地质, 2008,27(6): 681—694.
- [2]许德如,肖勇,夏斌,等.海南石碌铁矿床成矿模式与找矿预测[M]. 北京:地质出版社, 2009:1—331.
- [3]汪啸风,马大铨,蒋大海.海南岛地质: (三)构造地质[M]. 北京:地质出版社, 1991:1—139.
- [4]吕古贤.海南岛石碌铁矿含矿岩系中火山岩类的新发现与研究[J]. 中国区域地质, 1988,24(1):52—56.
- [5]杨开庆,董法先,王建平,等.海南石碌矿区铁、金、铜、钴矿构造动力成矿作用的研究[J]. 中国地质科学院地质力学研究所所刊, 1988, 第 11 号:83—152.
- [6]Ramsay J G. Folding and fracturing of rocks[M]. New York: McGraw—Hill, 1967:568.
- [7]吕古贤.构造物理化学的初步探讨[J]. 中国区域地质, 1991,9(3): 256—261.
- [8]曾佐勋,付永涛.利用两种天然构造变形估算岩石古流变参数[J]. 地球科学, 1997,22(4): 391—394.
- [9]吕古贤,邓军,李晓波,等.构造物理化学的思路、研究和问题[J]. 地质学报, 2006, 80(10): 1616—1626.
- [10]吕古贤,林文蔚,李晓波,等.构造物理化学与金矿成矿预测[M].

北京:地质出版社, 1999:1—300.

- [11]Ghosh G, Mukhopadhyay J. Reappraisal of the structure of the Western Iron Ore Group, Singhbhum craton, eastern India: Implications for the exploration of BIF-hosted iron ore deposits[J]. Gondwana Research, 2007, 12: 525—532.
- [12]许德如,马驰,李鹏春,等.海南岛变碎屑沉积岩锆石 SHRIMP U—Pb 年龄及地质意义[J]. 地质学报, 2007,81(3):383—39.
- [13]Li Z X, Li X H, Li W X, et al. Was Cathaysia part of Proterozoic Laurentia?—new data from Hainan Island, south China[J]. Terra Nova, 2008, 20(2): 154—164.
- [14]陈国达,关尹文,邓景,等.海南岛石碌式铁矿的大地构造成矿条件初探[J]. 中南矿冶学院学报, 1977, (3): 1—12.
- [15]Rosière C A, Siemes H, Quade H, et al. Microstructures, textures and deformation mechanisms in hematite[J]. Journal of Structural Geology, 2001,23: 1429—1440.
- [16]Lagoeiro L E. Transformation of magnetite to hematite and its influence on the dissolution of iron oxide minerals[J]. Journal of Metamorphic Geology, 1998,16: 415—423.
- [17]Siemes H, Klingenberg B, Rybacki E, et al. Glide systems of hematite single crystals in deformation experiments[J]. Ore Geology Reviews, 2008,33: 255—279.
- [18]Siemes H, Klingenberg B, Rybacki E, et al. 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[J]. Journal of Structural Geology, 2003,25: 1371—1391.
- [19]Hippert J, Davis B. Dome emplacement and formation of kilometre-scale synclines in a granite—greenstone terrain (Quadrilátero Ferrífero, southeastern Brazil) [J]. Precambrian Research, 2000,102: 99—121.
- [20]侯威,肖勇,陈翻身.海南岛石碌韧性剪切带的主要特征与“北一”式铁矿的成因[J]. 地质科学, 2007,42(3): 483—495.
- [21]冷盛强,李佩兰.海南岛石碌矿区富铁矿形成的物理化学条件实验研究[J]. 中南大学学报, 1979,3: 116—128.