

安徽铜陵冬瓜山矿床中磁黄铁矿矿石结构特征及其成因意义*

郭维民, 陆建军**, 章荣清, 徐兆文

(南京大学成矿作用国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093)

摘要 安徽铜陵冬瓜山矿床是长江中下游地区具有代表性的大型层状硫化物矿床,磁黄铁矿为矿床中的主要硫化物矿物。该矿床主要由层状硫化物矿体组成,伴有矽卡岩型和斑岩型矿体。在层状矿体上部,磁黄铁矿主要为块状构造,而层状矿体下部,磁黄铁矿多为层纹状、条带状构造,具有显著的沉积结构构造特征。野外地质观察及室内矿相学研究表明,层状矿体中磁黄铁矿矿石遭受了强烈的变质作用及热液交代作用。进变质过程中形成的结构主要为胶黄铁矿转变为黄铁矿以及进一步变质转变为磁黄铁矿、磁铁矿时形成的交代残留结构。退变质过程则以磁黄铁矿的退火、黄铁矿变斑晶的生长和单纯六方磁黄铁矿的形成为特征。岩浆热液对单纯六方磁黄铁矿的交代作用形成了单斜和六方磁黄铁矿的交生结构。这些结构特征表明层状矿体中的磁黄铁矿并不是岩浆热液成因,而主要为石炭纪同生沉积胶黄铁矿、黄铁矿在燕山期岩浆侵入所引起的热变质作用下脱硫所形成,并在热变质作用之后又受到岩浆热液的叠加交代。磁黄铁矿的结构特征显示冬瓜山矿床的形成经历了同生沉积、热变质、热液交代等多个阶段,支持其为同生沉积-叠加改造型矿床。

关键词 地质学, 磁黄铁矿, 矿石结构, 喷流沉积, 叠加改造, 冬瓜山矿床, 铜陵
中图分类号 P618.41 **文献标志码** A

Ore textures and genetic significance of pyrrhotite from Dongguashan ore deposit in Tongling area, Anhui Province

GUO WeiMin, LU JianJun, ZHANG RongQing and XU ZhaoWen

(School of Earth Sciences and Engineering and State Key Laboratory of Mineral Deposit Research, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China)

Abstract

Pyrrhotite is the main sulfide mineral in the Dongguashan ore deposit, one of the most representative stratiform sulfide deposits in the Middle-Lower Yangtze River metallogenic belt. The Dongguashan ore deposit is mainly composed of a large stratiform sulfide ore body associated with skarn and porphyry ore bodies. Pyrrhotite in the upper part of the stratiform ore body is mostly of massive structure, whereas that in the lower part is mainly of banded or layered structure. Field and microscopic investigation shows that pyrrhotite ores underwent intense metamorphism and hydrothermal replacement. Phase conversion from colloform pyrite through pyrite to pyrrhotite and magnetite occurred in the course of prograde metamorphism. Retrograde metamorphism is characterized by the presence of annealing texture in pyrrhotite, the growth of porphyroblastic pyrite and the formation of hexagonal pyrrhotite. The replacement of pure hexagonal pyrrhotite by magmatic hydrothermal fluids led to

* 本文得到高等学校博士科学点专项科研基金(1999028435)的资助

第一作者简介 郭维民,男,1983年生,博士研究生,矿床学专业。Email: mwguo@163.com

**通讯作者 陆建军,男,1962年生,教授,博士生导师,主要从事矿床学研究。Email: lujj@nju.edu.cn

收稿日期 2009-11-16; 改回日期 2010-02-23。李德先编辑。

the formation of the intergrowth of hexagonal and monoclinic pyrrhotite. The textures of pyrrhotite in the stratiform ore body indicate that, instead of being magmatic hydrothermal origin, pyrrhotite is the product of desulfurization of the synsedimentary colloform pyrite and pyrite through thermal metamorphism caused by Yanshanian magmatic intrusion. After thermal metamorphism, pyrrhotite was replaced by magmatic hydrothermal fluids. The textures of pyrrhotite also suggest that the ore deposit has experienced three ore-forming stages, namely, synsedimentation, thermal metamorphism and hydrothermal replacement, which supports the submarine exhalative sedimentation-magmatic hydrothermal reformation model for the Dongguashan ore deposit.

Keywords: geology, pyrrhotite, ore texture, sedimentary exhalative, superimposition reformation, Dongguashan ore deposit, Tongling

长江中、下游地区分布着一系列受石炭系控制的大型层状硫化物矿床。鉴于其重要的经济价值和特殊的产状特征,该类矿床引起了众多研究者的关注,但对于其成因问题长期以来仍存在争议。目前,主要有两种代表性观点:①同生沉积-叠加改造成因。这种观点认为矿床属于晚石炭世同生沉积所形成的块状硫化物矿床,受到了燕山期花岗质岩浆及其热液的叠加和改造(徐克勤等,1978;顾连兴等,1986;翟裕生等,1992;李文达等,1997;Gu et al.,2000,2007a;Zhou et al.,2000;陆建军等,2003b;2008;曾普胜等,2004,2005);②层控砂卡岩型。这种观点认为矿床属于与燕山期花岗质岩浆活动有关的层控砂卡岩型矿床,而石炭纪沉积作用仅仅形成硫化物矿床参与到岩浆热液成矿系统(常印佛等,1983;1991;唐永成等,1998;Pan et al.,1999;毛景文等,2004;Mao et al.,2006)。这两种观点的分歧主要在于对石炭纪同生沉积成矿作用和燕山期岩浆热液成矿作用在矿床形成过程中的贡献有着不同的理解。

安徽铜陵冬瓜山矿床是这类矿床的典型代表之一,以往对于该矿床的研究在矿床地球化学、成矿流体、同位素等方面已经积累了大量的数据(刘裕庆等,1984;Lu et al.,2003a;陆建军等,2008;徐兆文等,2005,2007;徐晓春等,2008a),但对矿床中硫化物的结构构造特征涉及较少。磁黄铁矿为冬瓜山矿床中最主要的硫化物矿物,由于对矿床成因的认识不同,前人对矿床中的磁黄铁矿究竟是岩浆热液成因(常印佛等,1991;唐永成等,1998),还是同生沉积胶黄铁矿、黄铁矿的热变质成因(曾普胜等,2005),也存在不同的看法。因此,对于磁黄铁矿成因的认识是理解矿床形成的关键问题之一。本文在野外考察以及矿石标本镜下研究基础上,从矿石结构的角度探讨磁黄铁矿的成因,以期对矿床的形成

有进一步的认识。

1 矿床地质特征

冬瓜山矿床位于铜陵矿集区狮子山矿田内,其铜储量达94万吨,平均品位1.01%;金储量22吨,平均品位0.24 g/t,硫(磁黄铁矿、黄铁矿)也为大型规模,平均品位19.43%(黄崇柯等,2001;曾普胜等,2005)。矿区内主要出露三叠系中、下统,上统零星分布,深部经钻孔工程揭露可见二叠系、石炭系和泥盆系上统。区内构造主要为北东向青山背斜和近东西向、南北向、北北东向及北北西向断裂。这些不同方向和性质的断裂相互交织形成复杂的网格状格架,控制着狮子山矿田浅部岩墙-岩枝-岩床相互贯通的岩浆侵入体系(唐永成等,1998)。矿区内岩浆岩出露面积约3.0 km²,多为浅成-超浅成的小型侵入体,呈岩墙或岩枝状,侵入于上泥盆统至中三叠统之中,造成区内地层岩石广泛的大理岩化和角岩化。与冬瓜山铜金矿床关系最密切的岩体为青山脚岩体,该岩体分布于矿体的东南部,主要受北东向构造控制,呈上窄下宽的岩墙状产出,岩性主要为石英闪长(斑)岩,属于碱质偏高的钙碱性岩石(徐兆文等,2000)。岩体的黑云母 Ar-Ar 坪年龄为(135.8 ± 1.1) Ma(吴才来等,1996),锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为(135.5 ± 2.1) Ma(徐晓春等,2008b)。

矿床主要由层状硫化物矿体组成,伴有砂卡岩型和斑岩型矿体(图1)。层状矿体赋存于晚泥盆世砂岩、粉砂岩与晚石炭世船山组灰岩之间,在走向上虽有厚薄的起伏变化,但与上、下层位均为整合接触关系,整体沿青山背斜展布而呈宽缓的背斜状,层控特征明显。层状矿体中矿石的结构构造以及矿物组成在垂向上呈明显分层(图1):上部含铜磁黄铁矿矿体中(图2a),矿石多为块状构造,磁黄铁矿为主要金

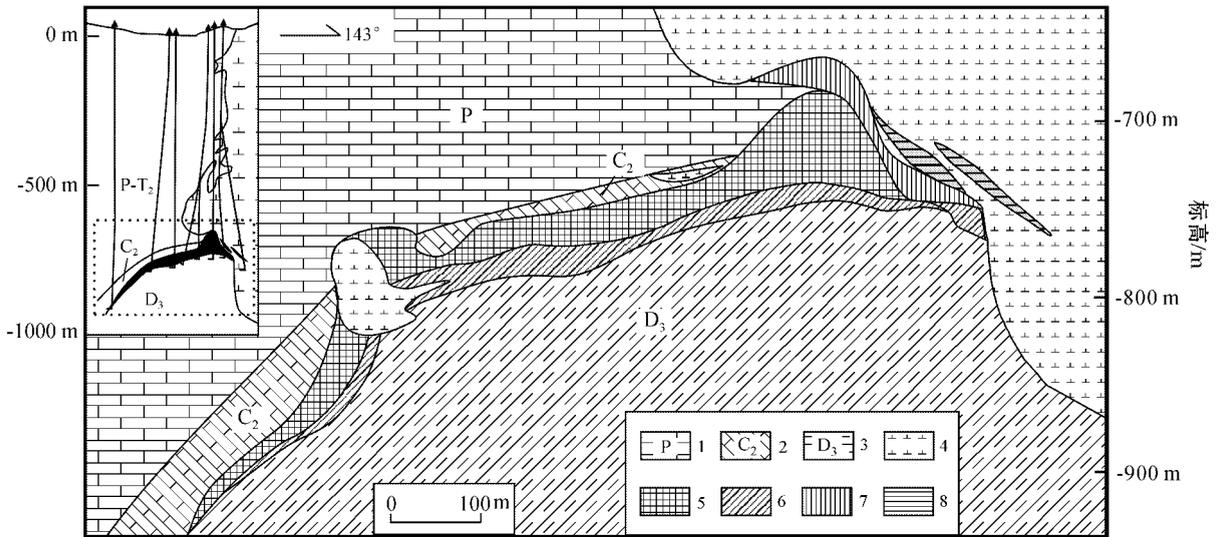


图 1 冬瓜山矿床 50 线地质剖面图(据安徽省地矿局 321 地质队^①修改)

1—下二叠统栖霞组;2—上石炭统船山-黄龙组;3—上泥盆统五通组;4—石英闪长岩;5—含铜磁黄铁矿矿体;6—含铜蛇纹石岩矿体;7—矽卡岩矿体;8—矿化石英闪长岩

Fig. 1 Geological section along No. 50 exploration line of the Dongguashan ore deposit (modified after No. 321) Geological Party, Anhui Bureau of Geology and Mineral Resources

1—Lower Permian Qixia Formation; 2—Upper Carboniferous Chuanshan-Huanglong Formation; 3—Upper-Devonian Wutong Formation; 4—Quartz diorite; 5—Copper-bearing pyrrhotite ore body; 6—Copper-bearing serpentine ore body; 7—Skarn ore body; 8—Mineralized quartz diorite

属矿物,次为黄铁矿,黄铜矿,磁铁矿。脉石矿物主要有石榴子石、透辉石、透闪石等钙质矽卡岩矿物;下部含铜蛇纹石岩矿体中,矿石具标志沉积特征的条带状、层纹状构造(图 2b),主要由硫化物层(磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿)与脉石矿物层(蛇纹石、滑石、斜硅镁石等)相互交替分布构成。矿床中的矽卡岩型矿体主要围绕岩体分布,远离岩体的少见。斑岩型矿体则主要出现在岩体深部(唐永成等,1998)。这些岩浆热液成因的含铜矽卡岩型矿石以及矿化石英闪长岩中,硫化物多呈浸染状、脉状、网脉状分布。

2 实验方法

用于观察磁黄铁矿结构构造的矿石光片在反射镜下进行观察后,再用磁性胶体浸润,继续观察单斜和六方磁黄铁矿的交生特征。磁性胶体(其配制方法见 Criag et al., 1981;顾连兴,1989)为一种含有黑色磁铁矿微粒的胶体。由于单斜磁黄铁矿磁性较强,因此在磁性胶体浸润后能吸附更多的磁铁矿微

粒而使其反射率比六方磁黄铁矿显著降低。该法具有快速、反差大、易控制等优点。同时,该法与传统的铬酸浸蚀法所得的结果一致(顾连兴等,1988)。X射线粉晶衍射的对比研究也证明了该法结果的可靠性(顾连兴等,1995)。

3 层状矿体中磁黄铁矿的结构特征

3.1 进变质结构

胶黄铁矿为矿床中最早形成的金属矿物,仅仅分布于层状矿体边部远离岩体的部位。胶黄铁矿往往沿裂隙或脱胶裂纹发生重结晶转变为黄铁矿,形成从胶黄铁矿到微晶黄铁矿、细晶黄铁矿的递变(图 2c)。黄铁矿进一步变质则可以形成磁黄铁矿。在光片中,可以观察到黄铁矿被磁黄铁矿交代所形成的港湾状、孤岛状等交代残留结构(图 2d)。磁铁矿在层状矿体中主要围绕岩体分布,普遍以交代磁黄铁矿、黄铁矿的形式出现(图 2e、2f),局部磁黄铁矿、黄铁矿可全部被磁铁矿替代而形成磁铁矿矿石。这些交代结构显示出,在冬瓜山层状矿体中,Fe-S-O系

① 安徽地矿局 321 地质队, 1985. 冬瓜山铜矿床详查地质报告.

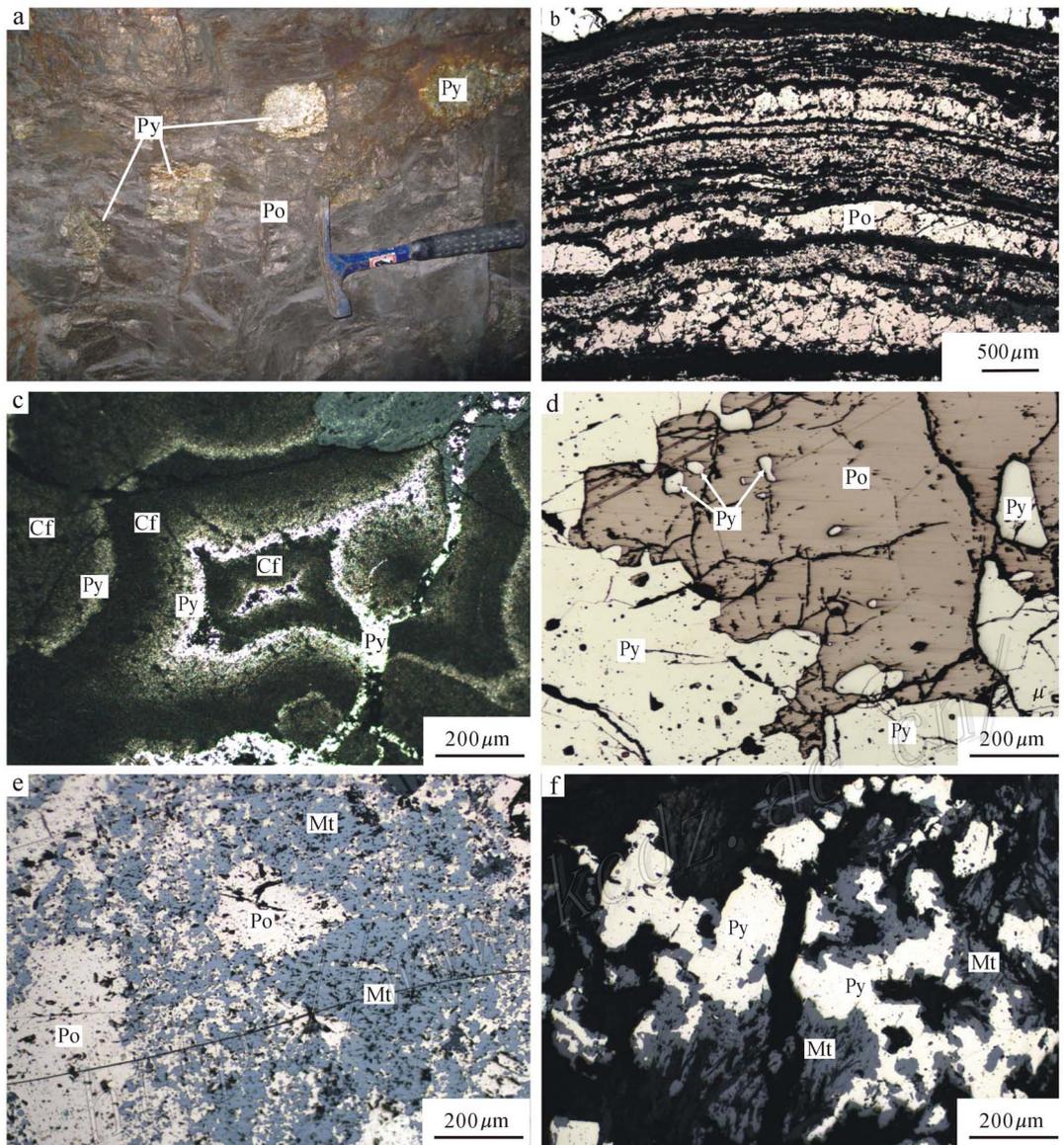


图2 冬瓜山层状矿体硫化物矿石结构构造

a. 块状硫化物矿石中, 分布在磁黄铁矿(Po)基质中的黄铁矿(Py)自形变斑晶; b. 层纹状磁黄铁矿(平面反射光); c. 胶黄铁矿(Cf)沿裂隙或脱胶裂纹重结晶形成细晶黄铁矿(平面反射光); d. 黄铁矿被磁黄铁矿交代呈港湾状、孤岛状(平面反射光); e. 磁黄铁矿被磁铁矿(Mt)交代呈不规则状残留(平面反射光); f. 黄铁矿被磁铁矿交代呈不规则状残留(平面反射光)

Fig. 2 Structures and textures of sulfide ores in stratiform sulfide ore body of the Dongguashan ore deposit

a. Euhedral pyrite (Py) porphyroblasts in pyrrhotite (Po) matrix from massive sulfide ores; b. Microbedding pyrrhotite (plane reflection); c. Recrystallization of colloform pyrite (Cf), forming fine grained pyrite (plane reflection); d. Pyrite replaced by pyrrhotite, assuming gulf and isolated island forms (plane reflection); e. Pyrrhotite replaced by magnetite, assuming irregular residues (Mt) (plane reflection); f. Pyrite replaced by magnetite, assuming irregular shape (plane reflection)

矿物的共生顺序是从胶黄铁矿→黄铁矿→磁黄铁矿→磁铁矿, 从低温到高温的变质反应顺序。这种变质反应顺序, 在长江中、下游地区的同类型层状硫化物矿床中普遍存在(顾连兴等, 1986)。

3.2 退变质结构

在层状矿体上部的含铜磁黄铁矿矿体中, 磁黄

铁矿多为块状构造, 主要呈细粒、粗粒集合体出现, 粒径大小在 0.05~0.5 mm 之间, 部分可达到 1 mm。磁黄铁矿颗粒之间拥有平直的界限, 局部呈现代表退火平衡的三晶嵌接结构(图 3a), 显示其经历过显著的退火和重结晶作用(Craig et al., 1993)。在块状矿石的磁黄铁矿基质中, 还常见有黄铁矿斑

晶(图2a、3b)不均匀分布。这些黄铁矿斑晶大多自形呈等轴形态,有时聚集而呈团块状,大小从1 mm到5 cm不等,部分可达到15 cm。矿相显微镜下,黄铁矿斑晶与磁黄铁矿的接触边界大都平直,两者之间缺乏明显的交代结构,呈共生平衡状态。但在黄铁矿斑晶内却可见有零散的、具有平直或弧形边界的磁黄铁矿包裹体(图3b),显示出其形成要稍晚于磁黄铁矿。这些特征表明黄铁矿斑晶并不是进变质过程中的残留斑晶,也不是黄铁矿重结晶的产物,而是退变质过程中所形成的变斑晶。类似的黄铁矿自形变斑晶在国内外许多变质块状硫化物矿床中十分常见,退变质阶段的变晶生长被认为是形成这种黄铁矿变斑晶的一种重要机制,而变晶生长过程中所需的硫可能来自于磁黄铁矿退变质降温过程中的脱硫作用(Brooker et al., 1987; Craig et al., 1993; 顾连兴等, 2006)。

用磁性胶体法对光片进行镜下观察,显示层状矿体中磁黄铁矿主要为单纯的六方磁黄铁矿(Hpo)(图3c),而在近岩体部位可以出现以单斜与六方紧密交生为主的磁黄铁矿(图3d、3e)。层状矿体中单纯六方磁黄铁矿的出现可能主要是由于磁黄铁矿经历过显著退火变质作用的缘故。通常认为磁黄铁矿只有在450℃以上退火才会显著,而黄铁矿的退火温度要在550℃以上(Marshall et al., 1987; Gu et al., 2007b),这一温度远高于单斜磁黄铁矿的稳定上限254℃(Kissin et al., 1982)。六方磁黄铁矿在高温条件下(>254℃)缓慢冷却会使磁黄铁矿有足够的时间出溶黄铁矿,形成黄铁矿变斑晶,在过剩的硫完全以黄铁矿出溶后,温度下降将不能再出溶单斜磁黄铁矿,从而形成单纯的六方磁黄铁矿,但如果为高温时的快速降温,六方磁黄铁矿中多余的硫未能以黄铁矿的形式完全出溶,那么当温度下降到254℃以下,将会有单斜磁黄铁矿的出溶,形成单斜与六方磁黄铁矿交生体(Arnold, 1962; Yund et al., 1970; Gu et al., 1996)。所以,对于变质块状硫化物矿床中经历过强烈变质和重结晶作用的磁黄铁矿,往往都为单纯的六方磁黄铁矿,缺乏单斜磁黄铁矿出溶体(Scott et al., 1977; Gu et al., 1992; 1996; 2007b)。相反,冬瓜山矿床中岩浆热液成因的矽卡岩型矿石(图3f)以及同一矿田内的大团山层控夕卡岩型铜矿床(黄民智等, 1983)中,未经退火的磁黄铁矿通常为单斜与六方磁黄铁矿的交生体,缺少单纯六方磁黄铁矿。

3.3 磁黄铁矿的交生结构

层状矿体中单斜与六方磁黄铁矿的交生体主要分布在近岩体部位,大都为单斜磁黄铁矿交代单纯六方磁黄铁矿所形成。在交代较弱的样品中,单斜磁黄铁矿主要呈斑点、团块或树枝状分布在六方磁黄铁矿颗粒边缘或裂隙旁侧,形成不规则交生(图3c);交代强烈时,六方磁黄铁矿则往往被单斜磁黄铁矿交代呈不规则残留状(图2d),部分样品中,六方磁黄铁矿可完全转变为单斜与六方磁黄铁矿的交生体(图3e)。目前,对于硫化物矿床中单斜与六方磁黄铁矿的交生体主要有2种成因:六方磁黄铁矿的出溶以及富硫和/或高氧逸度热液流体与六方磁黄铁矿的反应(顾连兴等, 2006)。在出溶成因的交生体中,单斜磁黄铁矿主要受六方磁黄铁矿结晶方位控制,呈大致平行的叶片状产在六方磁黄铁矿基质中,而在流体与六方磁黄铁矿反应形成的交生体中,单斜磁黄铁矿则主要受裂隙或六方磁黄铁矿颗粒边界控制(顾连兴等, 2006)。冬瓜山层状矿体中单斜磁黄铁矿与六方磁黄铁矿交生体的结构特点与流体交代所形成的交生体特征相同,并且主要分布在近岩体的部位,因此,其形成可能主要与岩浆热液的叠加交代有关。类似交代成因的交生体在铜陵天马山矿床(顾连兴等, 1988)、福建大田前锋和梅仙矿床(周兵等, 1998)、辽宁红透山矿床(Gu et al., 2007b)以及挪威加里东期块状硫化物矿床(Gu et al., 1996)等许多硫化物矿床中都有发现。在冬瓜山层状矿体部分交代强烈的样品中,单斜与六方磁黄铁矿的交生体形态类似于出溶成因的交生体(图3e),单斜磁黄铁矿与六方磁黄铁矿大致呈平行的叶片状。但两者在单斜磁黄铁矿与六方磁黄铁矿的比例上却有着明显的差别:在出溶成因的交生体中(顾连兴, 1988; Gu et al., 1996; 何金祥等, 1996; 周兵等, 1998),单斜磁黄铁矿:六方磁黄铁矿在1:1~1:15之间,以六方磁黄铁矿为主,单斜磁黄铁矿分布在六方磁黄铁矿基质之中;相反,在冬瓜山层状矿体中交代成因的交生体中,单斜磁黄铁矿:六方磁黄铁矿多在1:1~4:1之间,以单斜磁黄铁矿为主。

4 磁黄铁矿的成因及意义

由于冬瓜山矿床层状矿体中发育大量矽卡岩矿物,且与燕山期石英闪长岩体密切共生,显示出岩浆热液成矿的特点。因此,许多研究者认为矿床属于

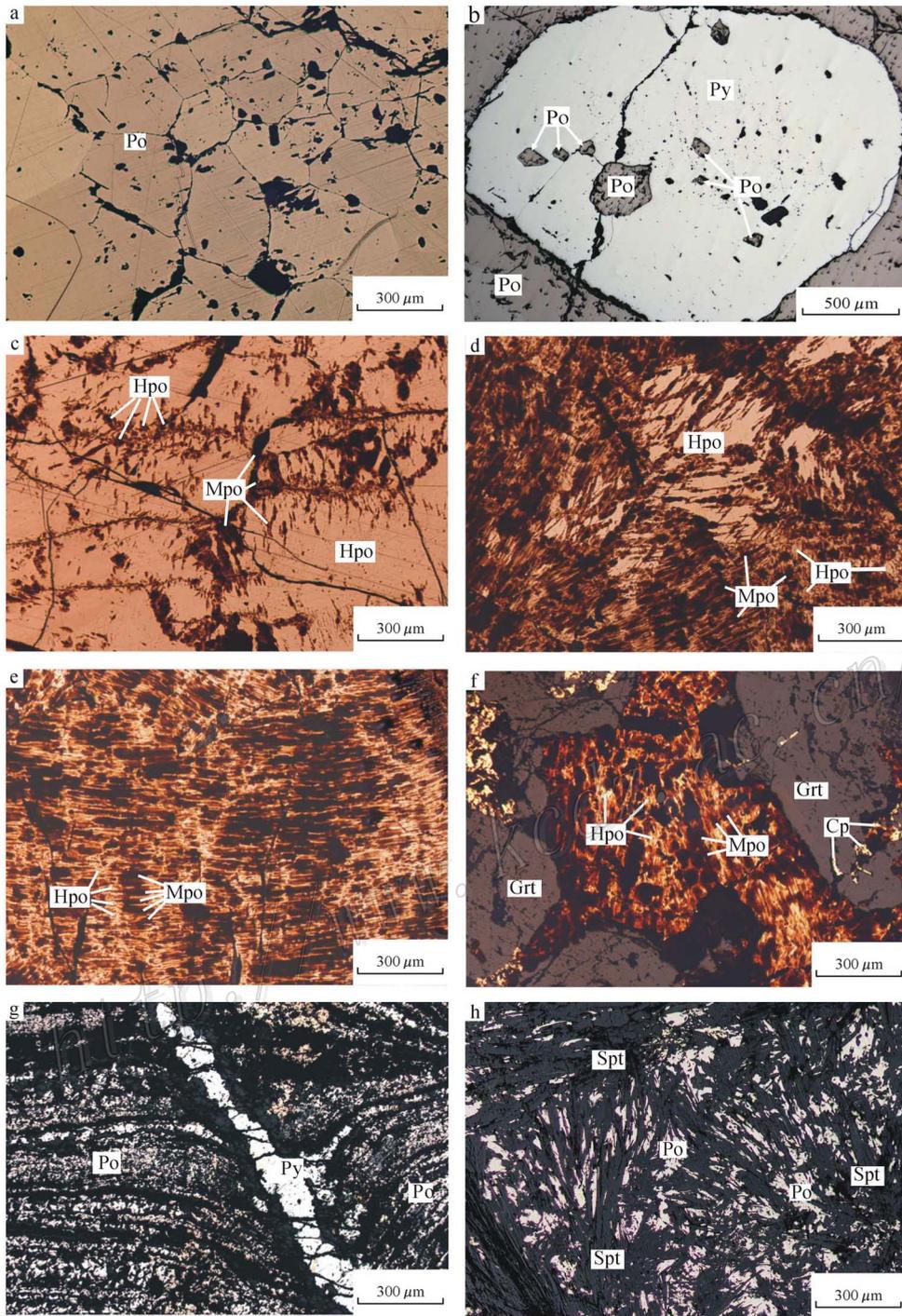


图3 冬瓜山层状矿体磁黄铁矿矿石结构显微照片

a. 磁黄铁矿的退火平衡结构(平面反射光); b. 自形黄铁矿变斑晶中的磁黄铁矿包裹体(平面反射光); c. 单斜磁黄铁矿(Mpo)呈裂隙状、树枝状、团块状交代六方磁黄铁矿(Hpo)(磁性胶体浸润,平面反射光); d. 六方磁黄铁矿被单斜磁黄铁矿交代呈不规则状残留(磁性胶体浸润,平面反射光); e. 叶片状单斜磁黄铁矿与六方磁黄铁矿交生体(磁性胶体浸润,平面反射光); f. 石榴子石(Grt)矽卡岩中单斜与六方磁黄铁矿交生体(磁性胶体浸润,平面反射光); g. 黄铁矿脉穿插层纹状磁黄铁矿(平面反射光); h. 磁黄铁矿被叶片状蛇纹石(Spt)交代(平面反射光)

Fig. 3 Microphotographs for ore textures of pyrrhotites in stratiform sulfide ore body in the Dongguashan ore deposit

a. Annealing equilibrium texture of pyrrhotite (plane reflection); b. Pyrrhotite inclusions in pyrite porphyroblast (plane reflection); c. Monoclinic pyrrhotite (Mpo) replacing along cracks or grain boundaries of hexagonal pyrrhotite (Hpo) (coated with magnetic colloid, plane reflection); d. Hexagonal pyrrhotite replaced by monoclinic pyrrhotite, assuming irregular residues (coated with magnetic colloid, plane reflection); e. Lamellar intergrowths of monoclinic and hexagonal pyrrhotite; f. Intergrowths of monoclinic and hexagonal pyrrhotite in garnet (Grt) skarn (coated with magnetic colloid, reflected light); g. Pyrite vein cutting microbedding pyrrhotite (plane reflection); h. Pyrrhotites replaced by serpentine (Spt) (plane reflection)

与燕山期岩浆活动有关的层控砂卡岩型矿床,而成矿物质主要来自于岩浆(常印佛等,1991;Pan et al.,1999;毛景文等,2004;Mao et al.,2006)。然而,层状矿体中磁黄铁矿的结构构造特征却并不支持矿床的这一成因模式。首先,层状矿体中磁黄铁矿以单纯六方磁黄铁矿为主,只是在近岩体部位才由于岩浆热液的交代作用形成单斜与六方磁黄铁矿交生体。然而,岩浆热液成因砂卡岩型矿石中的磁黄铁矿则都为单斜与六方磁黄铁矿的交生体。因此,单纯六方磁黄铁矿的形成可能与岩浆热液并无联系。其次,岩浆热液成因观点认为磁黄铁矿主要形成于石英-硫化物阶段,其成矿温度在 300~400℃ 之间(凌其聪等,2002;徐兆文等,2005)。但与之矛盾的是,层状矿体中磁黄铁矿退火平衡结构及黄铁矿自形变斑晶的发育表明,磁黄铁矿及黄铁矿的退火温度在 550℃ 以上(Marshall et al.,1987;Gu et al.,2007b),远高于石英-硫化物阶段的成矿温度。第三,层状矿体中 Fe-S-O 系矿物生成顺序是从低温到高温的变质反应顺序,不同于一般砂卡岩型矿床中从高温到低温的热液沉淀顺序。第四,层状矿体中磁黄铁矿具块状及层纹状、条带状结构构造特征,并在垂向上呈明显的分层,这种显著的沉积特征很难用岩浆热液成因模式解释。因此,层状矿体中的磁黄铁矿并不是单纯的岩浆热液成因,说明冬瓜山矿床不仅仅是与岩浆热液有关的层控砂卡岩型矿床。

冬瓜山矿床层状矿体具有典型的同生沉积成矿特点,包括层状的矿体形态、矿体与围岩界限截然、赋矿层位为碎屑岩与碳酸盐岩层的过渡部位、块状及层纹状矿石结构构造、简单的金属矿物组合、区域上可对比的热水沉积岩等(陆建军等,2007;李红阳等,2004;曾普胜等,2005),与 SEDEX 型矿床(Moore et al.,1986;Lydon,2000)特征极其相似。对于这一类型的层状硫化物矿床,徐克勤等(1978)、顾连兴等(1986)提出其属于石炭纪海底喷流沉积形成的块状硫化物矿床,受到燕山期岩浆及其热液作用的叠加改造而加厚变富。Zhou 等(2000)、曾普胜等(2005)通过系统的稳定同位素研究和详细的野外地质调查则认为,冬瓜山矿床是石炭纪同生沉积成矿作用与燕山期岩浆成矿作用复合的产物,并提出这两种成矿作用的叠加是铜陵地区形成大型-超大型铜(金)矿床的前提条件之一。

对于冬瓜山层状矿体中磁黄铁矿的成因,陆建军等(2003b)、曾普胜等(2005)等认为块状硫化物矿

床中的胶黄铁矿、黄铁矿,在燕山期岩浆侵入所引起的热变质作用下脱硫也会形成磁黄铁矿。本文研究中,层状矿体中胶黄铁矿重结晶形成黄铁矿、黄铁矿被磁黄铁矿交代以及磁黄铁矿被磁铁矿交代等现象为磁黄铁矿的这一热变质成因提供了最为直接的证据。这一成因模式也可以很好地解释磁黄铁矿的沉积和退变质结构特征:磁黄铁矿的沉积结构特征可能是继承于石炭纪同生沉积成因的胶黄铁矿、黄铁矿,而磁黄铁矿退火平衡结构的发育,黄铁矿变斑晶的生长以及单纯六方磁黄铁矿的形成,则可能是由于矿区岩浆侵入所引起的持续温度场作用(曾普胜等,2005)使磁黄铁矿在形成后又经历了缓慢的冷却过程。层状矿体近岩体部位单斜与六方磁黄铁矿交生体的形成则表明,在经历强烈变质作用之后,磁黄铁矿又受到了岩浆热液的叠加交代作用。另外,在光片中还可以观察到磁黄铁矿被后期的黄铁矿脉穿插(图 3g)以及被蛇纹石所交代(图 3h)等具典型热液成因特征的结构构造。陆建军等(2008)的研究也发现,由于岩浆热液的叠加,冬瓜山矿床层状矿体中的磁黄铁矿普遍被黄铜矿交代。这些结构特征都显示出层状矿体中的磁黄铁矿受到了后期岩浆热液的叠加交代。

因此,层状矿体中磁黄铁矿兼有沉积、变质、热液交代的结构特征,表明其并不是单纯的岩浆热液成因,而主要为同生沉积块状硫化物矿床中的胶黄铁矿、黄铁矿,在燕山期岩浆侵入所引起的热变质作用下脱硫所形成,并在变质作用之后又被岩浆热液所交代。同时,磁黄铁矿的结构特征也为我们提供了另一种途径来理解这类矿床的成矿机理,显示出矿床的形成经历了同生沉积、热变质、热液交代等多个阶段,为矿床的同生沉积-叠加改造成因模式提供了一个新的证据。

志 谢 冬瓜山铜矿陈邦国副总工程师、刘经华工程师和安徽地矿局 321 地质队刘良根副队长、王训诚教授级高级工程师在野外工作中给予了诸多帮助;顾连兴教授热情地指导了本文的研究,论文评审阶段,审稿人提出了宝贵的修改意见。在此诚致谢意。

References

Arnold R G. 1962. Equilibrium relations between pyrrhotite and pyrite

- from 325 °C to 743 °C [J]. *Econ. Geol.* , 57 : 72-90.
- Brooker D D , Craig J R and Rimstidt J D. 1987. Ore metamorphism and pyrite porphyroblast development at the Cherokee Mine , Ducktown , Tennessee [J]. *Econ. Geol.* , 82 : 72-86.
- Chang Y F and Liu X G. 1983. On strata-bound skarn deposits [J]. *Mineral Deposits* , 1 (1) : 11-20 (in Chinese with English abstract).
- Chang Y F , Liu X P and Wu Y C. 1991. The copper-iron belt of the lower and middle reaches of the Changjiang River [M]. Beijing : Geol. Pub. House. 1-379 (in Chinese with English Abstract).
- Craig J R and Vaughan D J. 1981. Ore microscopy and ore petrography [M]. New York : John Wiley and Sons Press. 406p.
- Craig J R and Vokes F M. 1993. Post-recrystallisation mobilisation phenomena in metamorphosed stratabound sulphide ores [J]. *Mineralogical Magazine* , 57 : 19-28.
- Gu L X and Xu K Q. 1986. On the South China-type massive sulphide deposits formed on marine fault depression troughs on the continental crust [J]. *Mineral Deposits* , 2 (2) : 1-13 (in Chinese with English abstract).
- Gu L X , Zhen S J and Lu J J. 1988. The intergrowth and origin of pyrrhotite polymorphs in the south China-type massive sulphide deposit at Mashan , Anhui Province [J]. *Collections in Mineralogy and Petrology* , 5 : 21-28 (in Chinese with English abstract).
- Gu L X. 1989. Magnetic colloid , a method for quick identification of pyrrhotite polymorphs [J]. *Geology and Prospecting* , 25 (2) : 28-29 (in Chinese).
- Gu L X and McClay K R. 1992. Pyrite deformation in stratiform lead-zinc deposits of the Canadian Cordillera [J]. *Mineralium Deposita* , 27 , 169-181.
- Gu L X ; Yin L and Vokes F M. 1995. Intergrowths of hexagonal and monoclinic pyrrhotites and their genesis from massive sulfide deposits of Norway [J]. *Geological Journal of Universities* , 1 (1) : 80-92 (in Chinese with English Abstract).
- Gu L X and Vokes F M. 1996. Intergrowth of hexagonal and monoclinic pyrrhotites in some sulphide ores from Norway [J]. *Mineralogical Magazine* , 60 : 304-316.
- Gu L X , Hu W X , He J X , Ni P and Xu K Q. 2000. Regional variations in ore composition and fluid features of massive sulphide deposits in south China : Implications for genetic modeling [J]. *Episodes* , 23 : 110-118.
- Gu L X , Zheng Y C , Tang X Q and Wu C Z. 2006. Advances in research of sulphide re textures and their implications for ore genesis [J]. *Progress in Natural Science* , 16 (2) : 1007-1021.
- Gu L X , Khin Zaw , Hu W X , Zhang K J , Ni P , He J X , Xu Y T , Lu J J and Lin C M. 2007a. Distinctive features of Late Palaeozoic massive sulphide deposits in South China [J]. *Ore Geology Reviews* , 31 : 107-138.
- Gu L X , Zheng Y C , Tang X Q , Khin Zaw , Fernando D P , Wu C Z , Tian Z M , Lu J J , Ni P , Li X , Yang F T and Wang X W. 2007b. Copper , gold and silver enrichment in ore mylonites within massive sulphide orebodies at Hongtoushan VHMS deposit , N. E. China [J]. *Ore Geology Reviews* , 30 : 1-29.
- He J X , Xu K Q and Gu L X. Recognition of different compositional textures of metamorphism-origin pyrrhotites from Mashan and Dabaoshan deposits [J]. *Earth Science* , 21 : 305-310 (in Chinese with English Abstract).
- Huang C K , Bai Y , Zhu Y S , Wang , H Z and Shang X Z. 2001. Copper deposits of China [M]. Beijing : Geol. Pub. House. 1-371 (in Chinese).
- Huang M Z , Tang S H , Huang X C and Zhang S Z. 1983. The genesis and evolution of pyrrhotite in some copper deposits in Tongling region [M]. *Bulletin Chinese Academy of Geological Sciences* , 5. Beijing : Geol. Pub. House. 49-69 (in Chinese with English Abstract).
- Kissin S A and Scott S D. 1982. Phase relations involving pyrrhotite below 350°C [J]. *Econ. Geol.* , 77 : 1739 -1754.
- Li H Y , Yang Z S , Meng Y F , Zeng P S and Xu W Y. 2004. Geological characteristics of massive sulfide deposits in Tongling ore concentration area , Anhui Province [J]. *Mineral Deposits* , 23 (3) : 327-333 (in Chinese with English abstract).
- Li W D , Wang W B and Fan H Y , Dong P , Zhou T F and Xie H G. 1997. The conditions to form copper (gold) ore deposit concentrated areas and the possibilities to discover super gigantic copper (gold) ore deposit in middle-lower Yangtze area [J]. *Vocanology and Mineral Resources* , (Supp.) : 1-131 (in Chinese with English abstract).
- Ling Q C and Liu C Q. 2002. The characteristics of ore-forming fluid of Dongguashan Strata-bound skarn Cu deposit and its significance for deposit genesis [J]. *Journal of Jilin University* , 32 (3) : 219-224 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y Q , Liu Z L and Yang C X. 1984. Stable isotope studies of the Dongguashan copper deposit in Tongling prefecture , Anhui Province [M]. Beijing : Geol. Pub. House. 70-101 (in Chinese with English Abstract).
- Lu J J , Hua R M and Jiang S Y. 2003a. Copper isotope study of copper and gold deposit of Dongguashan , China [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 67 (18S) : A260.
- Lu J J , Hua R M , Xu Z W , Gao J F and Li J. 2003b . A two-stage model for formation of the Dongguashan Cu-Au deposit [J]. *Geological Journal of China Universities* , 9 (4) : 678-690 (in Chinese with English Abstract).
- Lu J J , Guo W M and Xu Z W. 2007. The genesis of Dongguashan deposit in Tongling , Anhui Province [J]. *Acta Mineralogica Sinica* , 27 (Supp.) : 30-31 (in Chinese).
- Lu J J , Guo W M , Chen W F , Jiang S Y , Li J , Yan X R and Xu Z W. 2008. A metallogenic model for the Dongguashan Cu-Au deposit of Tongling , Anhui Province [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 24 (8) : 1857-1864 (in Chinese with English Abstract).
- Lydon J W. 2000. A synopsis of the current understanding of the geological environment of the Sullivan deposit [A]. In : Lydon J W , Höy T H and Slack J F , et al. eds. The geological environment of the sullivan deposit , British Columbia [M]. Geological Association of Canada , Mineral Deposits Division , Special Publication. 12-31.

- Mao J W, Stein H, Du A D, Zhou T F, Mei Y X, Li Y F, Zang W S and Li J W. 2004. Re-Os precise dating for molybdenite from Cu-Au-Mo deposits in the middle-lower reaches of Yangtze River belt and its implications for mineralization [J]. *Acta Geological Sinica*, 78(1): 121-131 (in Chinese with English Abstract).
- Mao J W, Wang Y T, Lehmann B, Yu J J, Du A D, Mei Y X, Li Y F, Zang W S, Holly J S and Zhou T F. 2006. Molybdenite Re-Os and albite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River valley and metallogenic implications [J]. *Ore Geology Reviews*, 29: 307-324.
- Marshall B and Gilligan L B. 1987. An introduction to remobilization: Information from ore-body geometry and experimental considerations [J]. *Ore Geology Reviews*, 2: 87-131.
- Moore D W, Young L E, Modene J S and Plahuta J T. 1986. Geologic setting and genesis of the Red Dog zinc-lead-silver deposit, western Brooks range, Alaska [J]. *Econ. Geol.*, 81: 1696-1727.
- Pan Y and Dong P. 1999. The lower Changjiang (Yangzi/Yangtze River) metallogenic belt, east central China: Intrusion and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits [J]. *Ore Geology Reviews*, 15: 177-142.
- Scott S D, Both R A and Kissin S A. 1977. Sulfide petrology of the Broken Hill region, New South Wales [J]. *Econ. Geol.*, 72: 1410-1425.
- Tang Y C, Wu Y C, Chu G Z, Xing F M, Wang Y M and Cao F Y. 1998. Geology of copper-gold polymetallic deposits in the along-Changjiang area of Anhui Province [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-351 (in Chinese).
- Wu C L, Zhou X R, Huang X C, Zhang C H and Huang W M. 1996. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronology of intrusive rocks from Tongling [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 15: 299-306.
- Xu K Q and Zhu J C. 1978. Origin of the sedimentary (or volcano sedimentary-) iron-copper deposits in some fault depression belts in southeast China [J]. *Fujian Geology*, 4: 1-68 (in Chinese).
- Xu X C, Lu S M, Xie Q Q, Lou J W and Chu P L. 2008a. Trace element geochemical characteristics of fluid inclusions of Dongguashan ore deposit in Tongling, Anhui Province, and their geological implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1865-1874.
- Xu X C, Lu S M, Xie Q Q, Bai L and Chu G Z. 2008b. SHRIMP zircon U-Pb dating for the magmatic rocks in Shizishan ore-field of Tongling, Anhui Province, and its geological implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 500-510 (in Chinese with English Abstract).
- Xu Z W, Lu J J, Lu X C, Gao J F, Liu S M, Luo Q C and Jiang Z P. 2000. The geological features and genesis of Dongguashan Cu-Au deposit in Tongling, Anhui Province [J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 19: 233-234 (in Chinese).
- Xu Z W, Huang S S, Ni P, Lu X C, Lu J J, Fang C Q, Hua M and Jiang S Y. 2005. Characteristics and evolution of ore fluids in Dongguashan copper deposit, Anhui Province, China [J]. *Geological Review*, 51(1): 36-41 (in Chinese with English Abstract).
- Xu Z W, Lu X C, Gao G, Fang C Q, Wang Y J, Yang X N, Jiang S Y and Chen B G. 2007. Isotope geochemistry and mineralization in the Dongguashan stratified copper deposit, Tongling area [J]. *Geological Review*, 53(1): 44-51 (in Chinese with English Abstract).
- Yund R A and Hall H T. 1970. Kinetics and mechanism of pyrite exsolution from pyrrhotite [J]. *Journal of Petrology*, 11: 381-404.
- Zeng P S, Yang Z S and Meng Y F, Pei R F, Wang Y B, Wang X C, Xu W Y, Tian S H and Yao X D. 2004. Temporal-spatial configuration and mineralization of Yanshanian magmatic fluid systems in Tongling ore concentration area, Anhui Province [J]. *Mineral Deposits*, 23(3): 298-309 (in Chinese with English Abstract).
- Zeng P S, Pei R F, Hou Z Q, Meng Y F, Yang Z S, Tian S H, Xu W Y and Wang X C. 2005. The Dongguashan deposit in the Tongling mineralization cluster area, Anhui: A large-sized super imposition-type copper deposit [J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 106-113 (in Chinese with English Abstract).
- Zhai Y S, Yao S Z and Lin X D, Zhou X R, Wan T F, Jin F Q and Zhou Z G. 1992. Fe-Cu (Au) metallogeny of the middle-lower Changjiang region [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-235 (in Chinese).
- Zhou B, Gu L X and Li Y H. 1998. Comparative study of pyrrhotite textures in two massive sulfide deposits, Fujian Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 17: 68-73 (in Chinese with English Abstract).
- Zhou T F, Yue S C, Yuan F, Liu X D and Zhao Y. 2000. Two series of copper-gold deposits in the middle and lower reaches of the Yangtze River area (MLYRA) and the hydrogen, oxygen, sulfur and lead isotopes of their ore-forming hydrothermal systems [J]. *Science in China (Series D)*, 43(Supp.): 208-218 (in Chinese).

附中文参考文献

- 常印佛, 刘学圭. 1983. 关于层控式夕卡岩型矿床——以安徽省内下扬子拗陷中一些矿床为例 [J]. *矿床地质*, 2(1): 11-20.
- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带 [M]. 北京: 地质出版社. 1-379.
- 顾连兴, 徐克勤. 1986. 论长江中、下游中石炭世海底块状硫化物矿床 [J]. *地质学报*, 66(2): 176-188.
- 顾连兴, 郑素娟, 陆建军. 1988. 安徽马山华南型块状硫化物矿床中磁黄铁矿同质多象变体的交生特征及成因 [J]. *矿物岩石学论丛*, 5: 21-28.
- 顾连兴. 1989. 磁性胶体法-磁黄铁矿同质多象变体的一种快速鉴定方法 [J]. *地质与勘探*, 25(2): 28-29.
- 顾连兴, 尹琳, Vokes F M. 1995. 挪威块状硫化物矿床中单斜与六方磁黄铁矿的交生及其成因 [J]. *高校地质学报*, 1(1): 80-92.
- 顾连兴, 郑远川, 汤晓茜, 吴昌志. 2006. 硫化物矿石若干结构及其相关成矿理论研究进展 [J]. *自然科学进展*, 16(2): 146-159.
- 何金祥, 徐克勤, 顾连兴. 1996. 对马山、大宝山变质成因磁黄铁矿不同组成结构的认识 [J]. *地球科学*, 21(3): 305-310.
- 黄崇轲, 白冶, 朱裕生, 王惠章, 尚修志. 2001. 中国铜矿床 [M]. 北京: 地质出版社. 1-371.
- 黄民智, 唐绍华, 黄许成, 张慎昭. 1983. 铜陵地区几个铜矿床中的

- 磁黄铁矿的成因和演化[M].北京:地质出版社.49-69.
- 李红阳,杨竹森,蒙义峰,曾普胜,徐文艺.2004.铜陵矿集区块状硫化物矿床地质特征[J].矿床地质,23(3):327-333.
- 李文达,王文斌,范洪源,董平,周涛发,谢华光.1997.长江中下游(金)矿床密集区形成条件和超大型矿床存在的可能性[J].火山地质与矿产,(增刊):20:1-131.
- 凌其聪,刘丛强.2002.冬瓜山层控夕卡岩型铜矿成矿流体特征及其成因意义[J].吉林大学学报,33(3):219-224.
- 刘裕庆,刘兆廉,杨成兴.1984.铜陵地区冬瓜山铜矿的稳定同位素研究[M].北京:地质出版社.70-101.
- 陆建军,华仁民,徐兆文,高剑锋,李娟.2003.安徽铜陵冬瓜山铜、金矿床两阶段成矿模式[J].高校地质学报,9(4):678-690.
- 陆建军,郭维民,徐兆文.2007.安徽铜陵冬瓜山矿床成因研究[J].矿物学报,27(增刊):30-31.
- 陆建军,郭维民,陈卫峰,蒋少涌,李娟,颜晓蓉,徐兆文.2008.安徽冬瓜山铜(金)矿床成矿模式[J].岩石学报,24(8):1857-1864.
- 毛景文, Holly Stein, 杜安道, 周涛发, 梅燕熊, 李永峰, 臧文栓, 李进文. 2004. 长江中下游地区铜金(钼)矿 $Re-Os$ 年龄测定及其对成矿作用的指示[J]. 地质学报, 78(1):121-131.
- 唐永成, 吴言昌, 储国正, 邢凤鸣, 王永敏, 曹奋扬, 常印佛. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质[M]. 北京:地质出版社. 1-351.
- 吴才来, 周珣若, 黄许陈, 张成火, 黄文明. 1996. 铜陵地区中酸性侵入岩年代学研究[J]. 岩石矿物学杂志, 15(4):299-306.
- 徐克勤, 朱金初. 1978. 我国东南部几个断裂拗陷带中沉积(或火山沉积)热液叠加类铁铜矿床成因探讨[J]. 福建地质科技情报, (4):1-68.
- 徐晓春, 陆三明, 谢巧勤, 楼金伟, 褚平利. 2008a. 安徽铜陵冬瓜山铜金矿床流体包裹体微量元素地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 24(8):1865-1874.
- 徐晓春, 陆三明, 谢巧勤, 柏林, 储国正. 2008b. 安徽铜陵狮子山矿田岩浆岩锆石 SHRIMP 定年及其成因意义[J]. 地质学报, 82(4):500-510.
- 徐兆文, 陆建军, 陆现彩, 高剑峰, 刘苏明, 罗庆春, 姜章平. 2000. 安徽省铜陵冬瓜山铜金矿床地质特征及成因[J]. 矿物岩石地球化学通报 19(4):233-234.
- 徐兆文, 黄顺生, 倪培, 陆现彩, 陆建军, 方长泉, 华明, 蒋少涌. 2005. 铜陵冬瓜山铜矿成矿流体特征和演化[J]. 地质论评, 51(1):36-41.
- 徐兆文, 陆现彩, 高庚, 方长泉, 王云健, 杨小男, 蒋少涌, 陈邦国. 2007. 铜陵冬瓜山层状铜矿同位素地球化学及成矿机制研究[J]. 地质论评, 53(1):44-51.
- 曾普胜, 杨竹森, 蒙义峰, 裴荣富, 王彦斌, 王训诚, 徐文艺, 田世洪, 姚孝德. 2004. 安徽铜陵矿集区燕山期岩浆流体系统时空结构及成矿[J]. 矿床地质, 23(3):298-309.
- 曾普胜, 裴荣富, 侯增谦, 蒙义峰, 杨竹森, 田世洪, 徐文艺, 王训成. 2005. 安徽铜陵矿集区冬瓜山矿床:一个叠加改造型铜矿[J]. 地质学报, 79(1):106-113.
- 翟裕生, 姚书振, 林新多, 周珣若, 万天丰, 金福全, 周宗桂. 1992. 长江中下游地区铁(金)成矿规律[M]. 北京:地质出版社. 1-235.
- 周兵, 顾连兴, 李玉荷. 1998. 福建两个块状硫化物矿床中磁黄铁矿结构的研究[J]. 岩石矿物学杂志, 17(1):68-73.
- 周涛发, 岳书仓, 袁峰, 刘晓东, 赵勇. 2000. 长江中下游两个系列铜、金矿床及其成矿流体系统的氢、氧、硫、铅同位素研究[J]. 中国科学(D辑), 30(增刊):122-128.