

大冶铁矿田铁山矿区三维地质体建模及深部成矿预测*

祝嵩^{1,2}, 肖克炎¹

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760)

摘要 利用三维地质体建模软件 Minexplorer 建立了湖北大冶铁矿田铁山矿区矽卡岩矿体的三维地质模型, 并对其进行了深部成矿预测。通过收集钻孔数据, 建立地质数据库, 生成三维钻孔; 通过剖面定义、单工程矿体圈定、剖面编辑、曲面连接、封装成体建立矿体三维模型, 获得铁山矿区三维地形-地质模型。该模型显示, 铁山矿体呈 NWW 向展布, 应沿该方向部署找矿; 黑云母辉石闪长岩呈 S 形接触的转折部位是成矿的有利位置。矿体与航磁异常复合关系表明, 5 号矿体下方存在巨大找矿潜力, 狮子山-尖山是下一步找矿勘探的重点方向。2 号矿体与地层复合关系表明, 铁矿体主要赋存于闪长岩上方和大理岩下方, 因此, 沿闪长岩和大理岩往下延伸可以寻找铁矿体。2 号矿体主成矿元素 Fe 含量具有随深度增加而逐渐降低的变化趋势, 显示矿化强度由浅部到深部逐渐减弱的变化特点, 暗示 2 号矿体在 -700 m 深部以下的找矿潜力较小。三维控矿构造界面的凹兜部位和平缓部位是找矿的有利位置。

关键词 地质学; 深部成矿预测; Minexplorer 探矿者软件; 三维地质建模; 大冶铁矿田

中图分类号: P618.31; P624

文献标志码: A

Three-dimensional geologic modeling and deep ore body prospecting of Tieshan iron deposit of Daye iron ore district

ZHU Song^{1,2} and XIAO KeYan¹

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 Guangzhou Marine Geological Survey Bureau, Guangzhou 510760, Guangdong, China)

Abstract

This paper builds the three dimensional model of skarn ore body of the Tieshan iron deposit and forecasts the deep ore body of the deposit by Minexplorer software which is a three dimensional model building software. It builds the geological database using many drill data and demonstrates those drill holes in three dimensional view. After the process of profile definition, delineation of ore body in a single drill hole, edition of profiles, connection of surfaces, encapsulation of surfaces, it builds the model of those ore bodies in three dimensions. Three dimensional terrain-geological model of the Tieshan iron deposit shows that the NWW trending of the Tieshan iron ore body prospecting along NWW direction. The turning points of S shaped contact of biotite pyroxene diorite are favourable metallogenic position. The composite relationship between the ore body and aeromagnetic anomaly shows that ore prospecting potential is huge under No. 5 ore body, the Shizishan-Jianshan is the next step prospecting direction. The complex relationship between No. 2 ore body and stratum shows that iron ore bodies mainly occur above diorite and occur below marble, therefore the diorite and marble extending

* 本文得到中国地质调查局地质调查项目“整装勘查区深部找矿三维预测方法及示范研究(编号:12120113091400)”的资助
第一作者简介 祝嵩,男,1973年生,博士后,从事地质矿产和地貌研究。Email: zhuson@gmail.com
收稿日期 2014-03-19; 改回日期 2015-06-28。秦思婷编辑。

downwards can look for iron ore bodies. The iron elements of No. 2 ore body decrease with depth increase, shows mineralization intensity from shallow to deep weakened gradually, suggesting that - 700 m depth below No. 2 ore body is a smaller potential prospects. The concavity and gentle part of three dimensional ore controlling structure interface is prospecting advantageous position.

Key words: geology, deep ore prospecting, minexplorer software, three dimensional geologic model, tieshan iron ore deposit

矿田构造研究的基本任务是探讨矿田和矿床形成的地质构造条件,查明矿床和矿体为什么产于此处,并且会有这样的形状、产状和体积,如何在类似的地质构造条件下找到同类的矿床,也就是说基本任务是解决矿产预测问题(翟裕生等,1993),因此,研究大冶铁矿田就要探讨矿产的规模、位置和形状等三维空间问题。而三维地质建模技术可以将地表、地下钻孔等勘探资料转换成三维可视化模型,这有助于地质人员开展详细的勘探设计和隐伏矿预测等工作,提高找矿工作效率和精度。

随着计算机硬件性能的提高以及计算机图形学、三维 GIS 技术和数据库的快速发展,建立在平面图基础上的地学信息模拟和表达,已经难以满足地

学研究的要求,因此三维地质建模和可视化研究受到广泛重视。目前,三维地质建模及可视化软件有 GOCAD、SUPAC、GeoView、GeoMine3D、Minexplorer 等。湖北省大冶市铁山矿区地理位置为鄂东南黄石市市西北 25 km 处(图 1),区域构造位于淮阳山字型构造弧顶西侧与新华夏系构造体系第二隆起带次级构造的复合部位(刘玉成等,2008),是经过多年勘查的大型矽卡岩型铁矿床,积累了丰富的地质勘探资料,应用这些信息,使用 Minexplorer 探矿者软件建立三维地质模型,并根据该模型从 NWW 向矿体展布、岩体 S 形接触面转折部位、航磁异常、2 号矿体与地层复合、2 号矿体垂向变化和控矿构造界面进行了深部成矿预测。

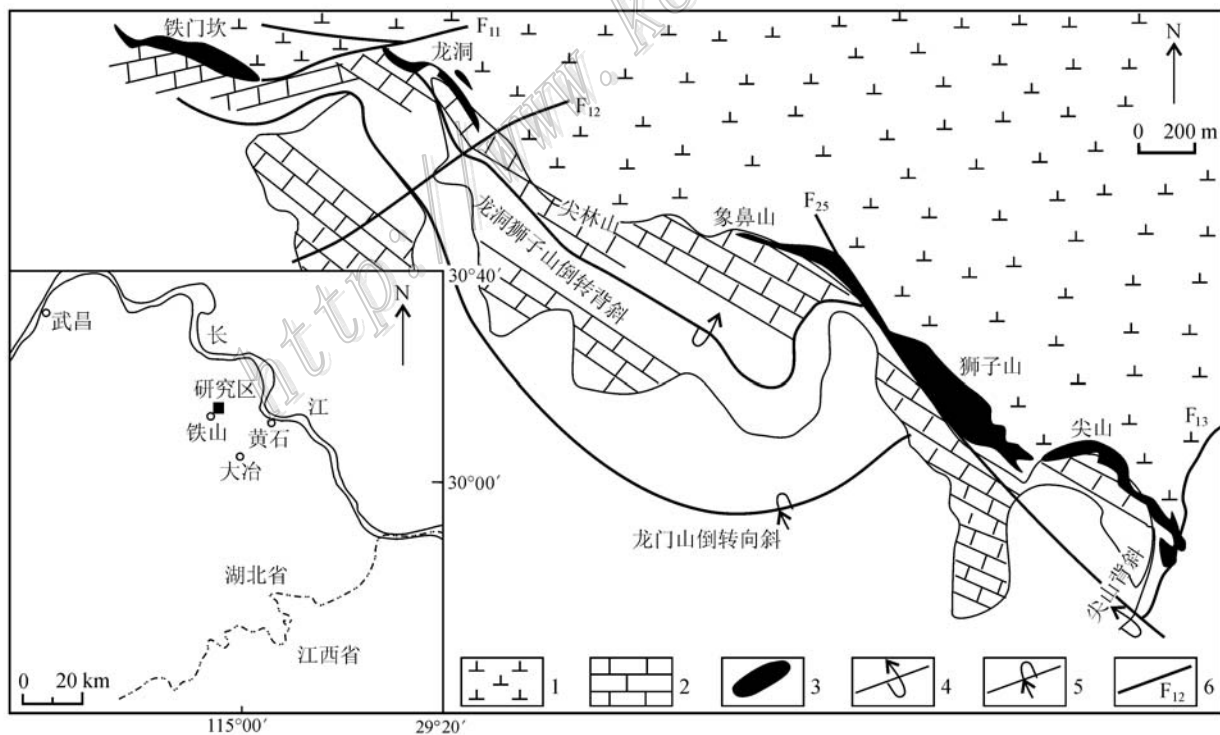


图 1 铁山铁矿床地质简图(据刘玉成等,2006)

1—燕山期闪长岩; 2—下三叠统大冶群大理岩; 3—铁矿体; 4—倒转背斜; 5—倒转向斜; 6—断层及编号

Fig. 1 Geological map of the Tieshan iron ore deposit (after Liu et al., 2006)

1—Diorite in Yanshan period; 2—Marble in lower Triassic Daye Group; 3—Iron ore body; 4—Inverted anticline; 5—Inverted syncline; 6—Fault and its number

1 矿区地质及三维地质概念模型

1.1 矿区地质

矿区出露地层主要为下三叠统大冶群,零星出露于上二叠统龙潭组、大隆组,第四系残坡积及堆积物零星分布在低洼地段。大冶群分为7个岩性段,以灰岩为主,下部多泥岩,上部夹白云质岩石。矿区内,由于闪长岩侵入而引起大理岩化和角岩化,靠近岩体含泥质岩石变为石榴子石大理岩和石榴子石-透辉石大理岩。与成矿关系最密切的近矿围岩是大冶群第五段的厚层大理岩和白云质大理岩,其次为大冶群第四段的中厚层-厚层大理岩。

矿区的基本构造格架是:在印支期形成 NWW 向构造,后经历燕山期 NNE 向构造、喜马拉雅期构造变动叠加与改造而定型。矿区的主要构造形迹表现为 NWW 向、NNE 向和 NW 向。NWW 向褶皱从南到北依次为铁山背斜、龙门山倒转向斜、龙洞-狮子山倒转背斜及象鼻山倒转向斜,与成矿关系密切(图1)。NWW 向断裂有棺材山-尖山断裂;NNE 向构造有麻雀脑背斜、尖山背斜、 F_{13} 断裂带;NW 向构造有 F_{25} 断裂带(图1)。

矿区出露的岩浆岩位于铁山侵入体南缘中段部分。铁山岩体为燕山期多次侵入而形成的闪长岩-花岗闪长岩杂岩体,岩体总体呈 NWW 向-SEE 向的纺锤形,东西长 24 km,南北宽 5~8 km,出露面积约 120 km²(刘玉成等,2008),主要岩性为中细粒石英闪长岩、黑云母辉石闪长岩、正长闪长岩、斑状石英闪长岩及少量闪长玢岩、煌斑岩、辉绿岩等脉岩。铁山矿区主要有中细粒石英闪长岩和黑云母透辉石闪长岩,且其与成矿关系最为密切。由于受铁山侵入体热力作用的影响,矿区内变质作用明显,主要表现

为热变质作用、接触交代变质作用和热液蚀变作用。铁山岩体南缘的围岩主要为三叠系大冶群灰岩,含白云质灰岩,因受热作用,距接触带约 1 km 范围内大多已经接触热变质,成为大理岩或白云质大理岩,局部含角岩条带。

1.2 矿体地质及矿体空间展布概念模型

矿区自西向东由铁门坎、龙洞、尖林山、象鼻山、狮子山、尖山 6 个矿体组成(图1),赋存于铁山杂岩体南缘中段燕山期闪长岩与下三叠统大理岩的断裂复合接触带上。除尖林山矿体为隐伏矿体外,其余均出露地表。由于断层错动,铁门坎矿体和龙洞矿体不相连,象鼻山矿体和狮子山矿体也基本不相连。除龙洞矿体倾向 SW 外,其他矿体一般上部倾向 NE,深部转向 SW,转折范围在 -200~72 m 之间,矿体倾角变化较大,有的地段近于水平,如尖林山东段矿体;有的地段近于直立,如狮子山西段。矿体倾角在 30~80° 之间。矿体主要呈不规则脉状、似层状、透镜状、囊状等,大小不一,单个矿体走向长度在 430~870 m 之间,厚度 30~80 m,总长 4900 m,宽 500 m,矿体产状与接触面产状相吻合,走向 NWW 向-SEE 向(290~310°)。2005~2007 年,中南冶金地质局勘探结果表明矿体延深最大已经达 1000 m。当闪长岩超覆在大冶灰岩之上,矿体规模大、延伸长。本次三维地质体建模对象是 2005~2007 年中南冶金地质局勘探发现的新增铁矿含量的矿体,如 2 号、401 号、5 号、6 号矿体,其空间位置见表 1。

2 Minexplorer 探矿者软件简介

Minexplorer 探矿者软件(以下简称 Minexplorer 软件)是中国地质科学院矿产资源研究所开发的三维勘探和地质建模软件,其能够对原始勘探资料和

表 1 矿体空间位置
Table 1 Spatial characteristics of ore bodies

矿体编号	地理位置	分布位置	赋存标高/m	产状/°				规模/m		
				倾向	倾角	侧伏向	侧伏角	长度	宽度	厚度
2	龙洞-尖林山矿段	38~15 线	-200~-862	南西	40~60	南东	45	1180	250~360	1.14~58.56, 平均 15.99
401	象鼻山-狮子山矿段	18~23 线	-350~-550	南西	40~60	-	-	740	-	0.15~20.25, 平均 6.05
5	狮子山矿段	26~30-1 线	-300~-655	南西	60~90	北西	-	480	-	2.02~60.69, 平均 18.08
6	尖山矿段	33 线	-200~-260	-	-	-	-	-	-	7.42

注:资料据刘玉成等,2008;“-”表示无资料。



图 2 Minexplorer 软件功能框架图(肖克炎等,2010)

Fig.2 Software framework map of the prospector Minexplorer (from Xiao et al., 2010)

地质编录成果数字化,有效管理、分析、三维可视化表达地质勘探多元数据,构建理想的三维勘探辅助决策模型,科学计算矿床资源储量,实现储量动态管理和计算机辅助制图(孙莉等,2011),软件总体功能模块框架见图 2。

Minexplorer 软件是基于矢量数据结构的 MapGIS 平台上二次开发,其处理的主要对象是点文件、线文件、面文件及其所对应的数据库,这 3 类文件基本包括了地质、矿产、物探、化探、遥感等要表达的信息。该软件已经在西藏甲玛铜矿床、新疆宏源矿床、彩霞山铅锌矿床勘查等矿山应用,并取得了一定效果,主要特点为:① 将地质勘查获取的三维空间的地质测量数据、钻孔编录数据、物化探数据、遥感图像等图形、图像、数据表集成管理分析并三维可视化表达;② 高效快捷地完成单工程矿体圈定、勘探剖面图交互制图、三维矿体圈定、多方法储量计算及动态管理分析;③ 制作高质量的矿山地质图件,包括勘探钻孔柱状图、剖面图、平面地质图、工程部署图、物化探异常等值线图,能够将二维制图与三维建模可视化、一体化;④ 软件使用方便易学,和多个 GIS、数据库系统有交换格式。

3 三维地质体建模

三维地质体建模主要是建立三维实体模型,利用二维数据(如勘探线剖面数据)之间的相关性来构建三维数据。地质勘探线之间一般是平行的,地质体在勘探线剖面上的投影就是二维截面。利用截面之间的相关性,以不规则三角网连接相邻截面,就形成了三维地质体。Minexplorer 软件三维地质建模功能包括工作区地表三维模型生成以及矿体三维模型生成,主要流程为:使用矿山地表 DEM 数据形成地表三维立体模型;使用钻孔工程数据表形成三维钻孔柱状图→根据工业指标进行单工程矿体圈定→在勘探线剖面上圈定矿体→在勘探线之间曲面连接→

封装成体(孙莉等,2011)。

3.1 基础数据库的建立和三维钻孔生成

建立数据库是三维地质体模拟的基础工作。建立钻孔三维立体模型,需要钻孔位置信息,如钻孔的地面坐标、开孔标高、钻孔深度;钻孔形态信息,如钻孔的测量数据;钻孔取样信息,如采样位置、样品的化学分析数据、样品代号、地质编录内容等。

笔者收集了 2005~2007 年铁山矿区中南冶金勘查总局中南地质勘查院的勘探工程资料,在进行分析、汇总和必要的规范后,应用 Microsoft Access 构建了铁山矿区地质数据库,数据库包括 3 个数据表文件,分别为铁山矿区采样信息表、钻孔位置表和钻孔形态表,并记录了矿区范围内 29 条勘探线剖面上 76 个钻孔以及一些探槽的采样信息、位置和形态,由于样品数量较多,本文不一一列出。将数据依次录入数据库中 3 个表内,然后将数据库导入 Minexplorer 软件,在三维空间生成钻孔(图 3)。根据样品化学分析的数据范围进行分段,用不同颜色进行分区,可以更好地研究主要成矿元素在 z 轴方向上的变化规律。对于建立的钻孔模型可任意放大、缩小,直观显示钻孔空间的位置及变化状态,为三维地质体的模拟做准备。

3.2 矿体圈定

3.2.1 剖面定义

钻孔生成之后,圈定矿体之前要生成勘探线剖面。将钻孔投影在 XY 平面上,按照一定的勘探线间距和勘探线方向来确定勘探线。铁山矿区采用的勘探线间距为 100 m,这样就在 XY 平面定义了若干条勘探线剖面,从而将三维空间中带有属性数据的钻孔转化到二维勘探线平面上。

3.2.2 矿体圈定

在 Minexplorer 软件中,可以根据单一指标或多个指标来确定矿体。在铁山矿体三维模型圈定中,利用矿区铁品位单指标确定矿体(图 4)。根据铁的边界品位、最小开采厚度、夹石剔除厚度,可在单个钻孔上厘定矿体范围,并在此基础上,厘定勘探线剖面圈定矿体。

使用单工程矿体圈定功能,输入边界品位、最低可采厚度和夹石剔除厚度,应用单工程原理进行矿体边界的重划分。单工程矿体厚度的圈定主要依据的工业指标有:① 铁按边界品位 $w(\text{TFe}) \geq 20\%$ 、最小可采厚度为 2 m,确定单工程的矿体圈定;② 按夹石剔除厚度 2 m 的指标剔除夹石,或并入矿体中;

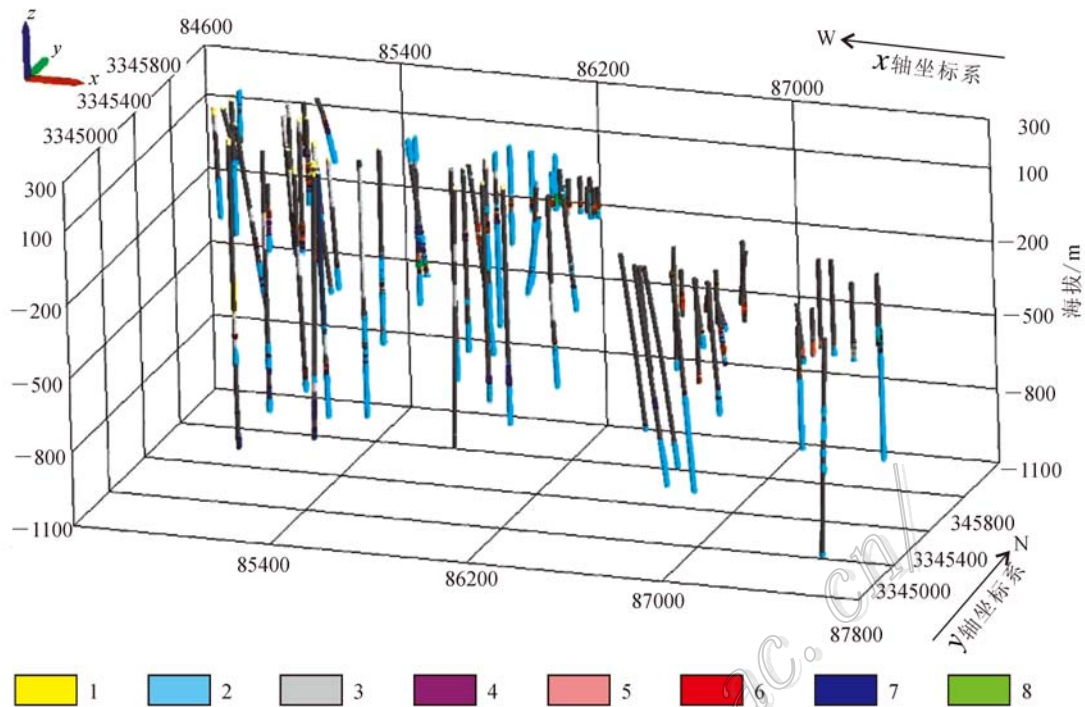


图3 铁山铁矿床钻孔三维模型图

1—第四系堆积物；2—燕山期闪长岩；3—下三叠统大冶群大理岩；4—角砾岩；5—贫磁铁矿；6—铁矿；7—砂卡岩；8—铜矿

Fig. 3 Three dimensional model of the drills in the Tieshan iron deposit

1—Quaternary sediment; 2—Diorite in Yanshan period; 3—Marble in lower Triassic Daye group; 4—Breccia; 5—Poor magnetite ore; 6—Iron ore; 7—Skarn; 8—Copper ore



图4 铁元素单工程圈定

Fig.4 Single project of iron fence

③一个矿体中间剔除夹石后，等于或大于夹石厚度的一侧可并入主矿体；④考虑到矿体经常出现分枝复合现象，圈定矿体时，较厚大的矿体沿走向或倾向，可以分枝成数个较薄的矿体，但这几个较薄的矿体累计厚度不得大于矿体分枝处的厚度，否则就将在边部被围岩隔开的分枝矿体单独圈定为一个独立

的小矿体。

3.2.3 剖面编辑

在 Minexplorer 软件中，剖面编辑需要完成编辑实体轮廓线(即在剖面中圈定矿体)。系统根据剖面文件中的剖面边框数据，将剖面中的空间数据映射到屏幕上特定的位置。用鼠标点击屏幕上一系列点生成屏幕上的曲线，屏幕曲线通过逆映射转换成剖面上的曲线，最后通过保存操作存入剖面数据文件中。根据矿体地质特征及圈定矿体的一般原则，可在剖面中将矿体圈定出来。

3.3 三维地形-地质模型的建立

三维地形模拟是针对地形地貌的一种数字建模过程，建模的结果是一个数字高程模型(DEM)。Minexplorer 软件可将 DEM 模型与矿区地质图叠加融合，得到铁山矿区的三维地形-地质模型(图 5)，并可以从各个角度进行旋转展示，帮助没有去过矿区的人更加直观地了解矿区的地质特征。图 5 清晰地展示了北部灰色是闪长岩，南部蓝色为大理岩，中间红色为 NWW 向铁矿体。

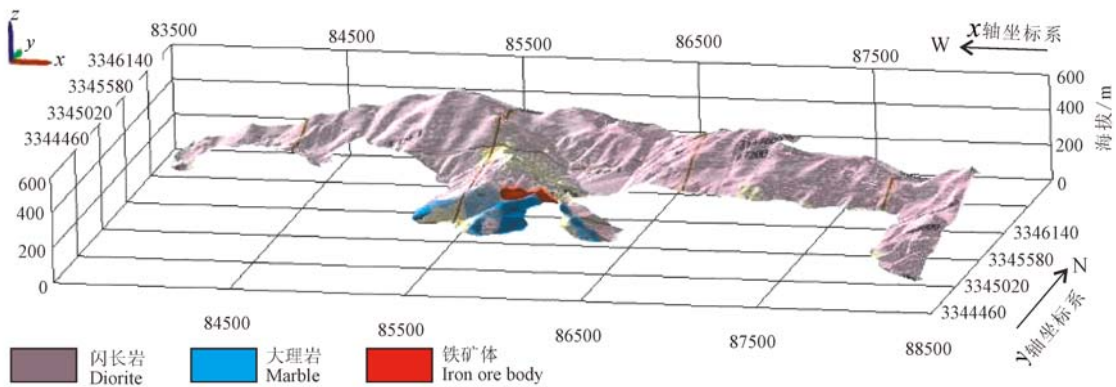


图 5 铁山矿区地形-地质模型

Fig. 5 Geomorphology and geology model of the Tieshan iron deposit

3.4 三维矿体模型的建立

经过前面的空间数据库建立和矿体圈定工作，再进行曲面连接和体的生成，就可以建立三维矿体模型。单个剖面编辑是在二维的 XZ 或 YZ 平面进行编辑的，得到的单个剖面图形与普通勘探线剖面图无太大差别。将矿体圈定后的剖面图件在三维空间连接，使用三维建模技术建立地质体、断裂曲面、复杂矿体等三维空间分布形态，即可形成三维地质体模型。当每条剖面上的矿体圈定完成后，进行矿体的空间连接，即将每个剖面上的矿体形态连接成一个整体的三维空间模型。当矿体形态特别复杂而无法自动拟合完整的空间三维模型时，需要人为

进行交互操作，即给系统一个连接三维模型的趋势，来引导系统完成模型的建立。

首先，选中相邻剖面中同一矿体的两对应边界线，生成曲面。然后，依次完成各相邻剖面中同一曲面的生成，并封闭曲面，最终生成体文件。铁山矿体三维图(图 6)显示，该矿体形态与刘玉成等(2006)提出的实际勘探结果吻合，如尖林山矿段 14、15 线深部 -600 ~ -1000 m 标高厚大矿体、龙洞矿段 12 线 ZK12-13 钻孔孔深 1263.51 m 见薄层矿，这是目前铁山矿区最深的钻孔，这些都与铁山三维矿体模型展示的 2 号矿体一致。三维矿体模型与地形-地质图叠加，可以更加直观地显示矿体在地下的产状，有

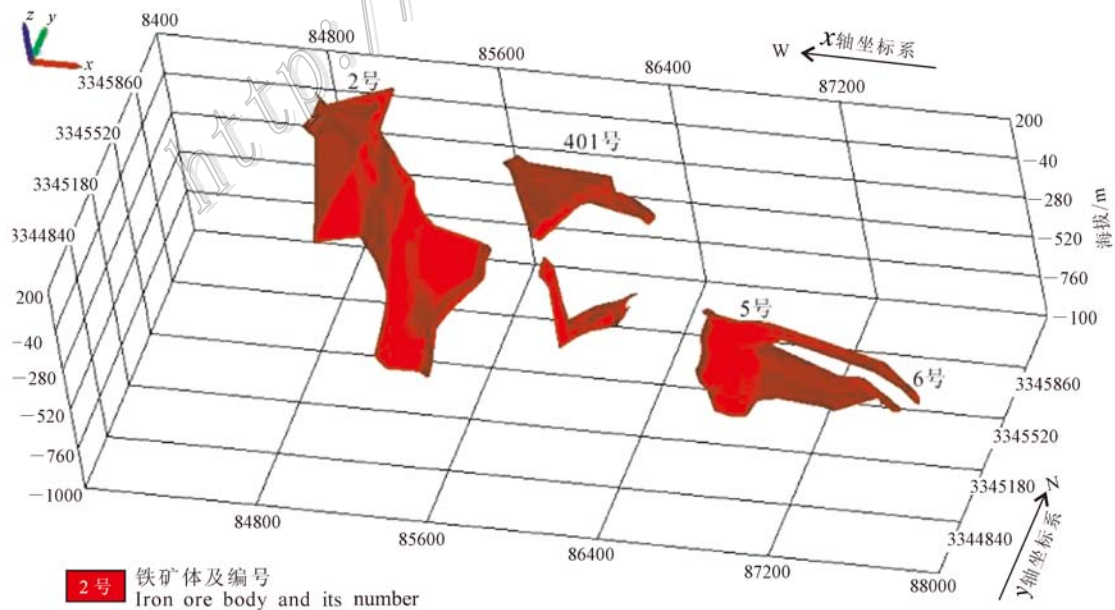


图 6 铁山矿区三维主矿体

Fig. 6 Main ore body of the Tieshan iron deposits in three-dimensional vision

表 2 铁山矿区深部成矿预测内容表

Table 2 Deep ore body prospecting of the Tieshan iron deposit

预测角度	有利成矿信息描述
矿体展布	NWW 向构造
岩体接触面形状	岩体 S 形接触面转折部位
航磁异常	航磁异常与矿体很好复合部位是成矿有利位置
地层	地层与 2 号矿体很好复合部位是成矿有利位置
垂向空间元素含量变化	2 号矿体垂向空间铁元素含量随深度增加而减少
控矿构造界面	控矿构造界面的凹兜或平缓部位

效地指导采矿工程布置。矿体模型建立后,还可以对矿体沿任意方向、在任何部位进行切割,从而更好地研究形态特征。

4 深部成矿预测

铁山铁矿床三维地质模型建立后,就可以利用其进行深部找矿预测,指导生产实践。铁山矿区深部成矿预测内容见表 2。

4.1 NWW 向矿体展布

铁山矿区构造分为 3 期,即印支期 NWW 向构造、燕山早期岩体侵入接触断裂带及热接触动力变形带构造、燕山晚期岩体侵入动力变形构造。NWW 向构造发生于古生代、定型于印支期末,是矿区基础的构造架构,控制了岩体接触带以及矿体的空间展布,使其总体上也呈 NWW 向产出,具有区域性控岩、控矿作用(杨振等,2009)。NWW 向构造控矿的主要原因是:铁山岩体南部接触带附近燕山早期岩体侵入过程中,接触带、围岩中印支期构造形迹被岩体破坏,接触带空间被铁矿体填充。铁山岩体南部接触带不是简单的构造带,而是岩体侵入接触动力变形构造带和区域 NWW 向断裂方向重合,主体构造方向还是 NWW 向。

于长春等(2010)和本文航磁异常三维地质模型都发现,铁山矿区铁门坎、龙洞、象鼻山和狮子山 4 个主要磁异常轴线方向基本为 NWW 向,这与铁山矿区的 NWW 向构造一致,而铁山矿区三维地形-地质模型(图 5)和三维矿体显示铁山矿体呈 NWW 向展布,因此,铁山铁矿床找矿方向应该主要沿 NWW 向部署。

4.2 岩体 S 形接触面转折部位

袁见齐等(1987)指出,接触带构造不只是一个简单的接触面,而是包括侵入体边缘相、接触面和围岩热变质带等在内的一个复杂的构造系统,这个系统在空间上表现为构造-岩相分带,在时间上存在着几个构造发育阶段。翟裕生等(1993)指出,与接触带构造有关的矿床,矿化常集中在接触带的偏斜和转折部位,因此在研究接触带构造时,先要注意观测接触面的产状及其变化。

岩体 S 形接触转折部位是铁山矿区的找矿标志,燕山早期侵入的中酸性岩浆岩-中细粒石英闪长岩(或黑云母辉石闪长岩)与下三叠统大冶群灰岩经变质形成的大理岩及白云质大理岩呈 S 形接触的转折部位,特别是当大理岩呈“舌状”伸入铁山闪长岩岩体的接触带前缘及下缘对成矿最为有利(刘玉成等,2008)。笔者通过三维地质建模得出,黑云母辉石闪长岩三维模型及其 S 形接触转折部位与矿体有良好的复合(图 7),表明该处是成矿的有利位置,根据这个规律,可以预测图 7 中 A、B、C 多个黑云母辉石闪长岩 S 形接触面转折部位是铁矿体可能的赋存部位。因此,构建岩体接触面、矿体空间展布的大致形态,根据拓扑原理建立可任意旋转、缩放以及根据研究需要提取地质信息图层的三维可视模型,直观地显示了两者的相互关系,为未知隐伏矿体推断提供了线索。

4.3 航磁异常与矿体复合

铁山铁矿床有 5 次航磁测量:① 1957 年 1:10 万航磁测量,飞行高度为 100~150 m;② 1974 年 1:5 万航磁测量,矿区仪器超量程,无资料;③ 1976 年 1:2.5 万航磁测量,飞行高度为 600~1000 m;④ 1993 年 1:2.5 万磁电放综合站测量,飞行高度为 150 m;⑤ 2005 年 1:1 万高分辨率航磁测量,飞行高度为 144 m。2005 年的测量资料信息最丰富,异常反映完整(于长春等,2007)。学者们对物探找矿方法在铁山矿区的显著性有不同看法。黄同兴等(2011)认为,2005 年中南冶金地质总局中南地质勘查院的钻孔工程主要根据磁异常进行,这对于深部找矿前景评价的可靠性较低。钻探验证结果表明,物探对浅部找矿有较好指导,而对深部探矿的指导效果不好,原因是随着找矿深度加大,仪器探测精度受限制或地表开采与浅部矿体干扰。但是于长春等(2010)采用大冶矿区现存矿体厚度图与航磁异常对比分析及正、反演计算结果相互印证,确定了航磁异

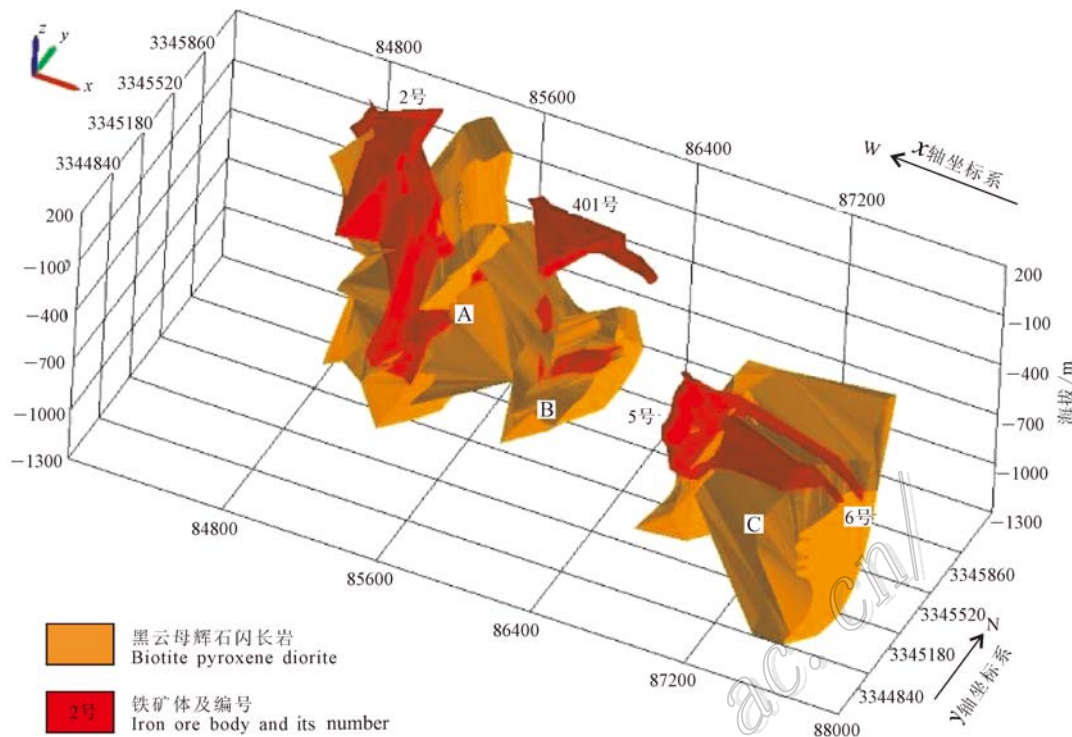


图 7 铁山铁矿床黑云母辉石闪长岩以及与矿体接触关系三维图(图中 A、B、C 表示矿体可能赋存的部位)

Fig.7 Three-dimensional vision of contact relationship between ore bodies and biotite pyroxene diorite in Tieshan deposit (A、B、C in Fig. mean ore bodies maybe exist sites)

常,并且由航磁异常反演确定钻孔位置,实际布设的 3 个钻孔均在深部见矿,暗示航磁异常深部找矿在铁山矿区中的有效性。翟裕生等(2004)认为深部矿床的各种异常,如果在矿床形成后未经重大变化,则原生异常保存较好,但由于位置较深,其反映在浅部的异常信号一般较弱,需要利用已有的钻孔、坑道中揭露的每一个矿化信息做精细研究。因此,不能完全依靠物探方法进行深部找矿,要结合钻孔数据进行深部找矿。

笔者通过钻孔数据建立铁山矿区三维地质模型,并由此发现矿体与该区航磁异常有着良好的复合关系(图 8),对找矿有很好的指示作用,这与刘玉成等(2008)通过航磁测量在铁山矿区圈定 6 个具有找矿意义的航磁异常一致。其中, C-1974-40、C-2005-52、C-2005-53、C-1993-23 四个航磁异常分别与铁门坎、龙洞-尖林山、象鼻山、狮子山-尖山矿体对应。并且,上述 4 个航磁异常由 1200 nT 等值线连成一体,构成总体上呈 NW 向-SE 向展布的异常带。该异常带东西长约 5 km,南北宽约 700 m,形态规则,南侧等值线分布均匀舒展,北侧等值线密集。该航磁异常带展布在三叠系大冶群灰岩(已变质为大

理岩)与燕山早期石英闪长岩、透辉石闪长岩、黑云母透辉石闪长岩的接触带上,成矿地质条件十分有利。C-1974-40 航磁异常与铁门坎矿体对应,由于本次没有收集到铁门坎矿体的钻孔数据,因此,图 8 中该航磁异常下方没有对应的矿体显示。根据铁山矿区实际开采和勘探资料分析(刘玉成等,2008),在铁门坎、龙洞-尖林山、象鼻山和狮子山-尖山 4 个矿体中,龙洞-尖林山矿体(即 2 号矿体)最大。因此,在铁山矿区矿体与航磁异常三维复合图应显示 2 号矿体对应的 C-2005-52 航磁异常值最大(图 8),而实际情况是狮子山-尖山矿体对应的 C-1993-23 航磁异常值最大(图 8),这暗示 2 种可能:一种情况是 C-2005-52 航磁异常对应的 2 号矿体已经大部分被开采了,导致在本次勘探时,该矿体对应的航磁异常值变小,但是本次勘探钻孔没有穿过被开采的矿体,因此,本次勘探钻孔依然显示 2 号矿体为铁山矿区最大矿体;另一种情况是 C-1993-23 航磁异常对应的 5 号矿体下方还有隐伏矿体未被发现,C-1993-23 航磁异常远比其他 3 个航磁异常值大,暗示 5 号矿体下方还有巨大找矿潜力,因此,狮子山-尖山是下一步找矿勘探的重点方向。在铁山矿区矿体与航磁异常三维

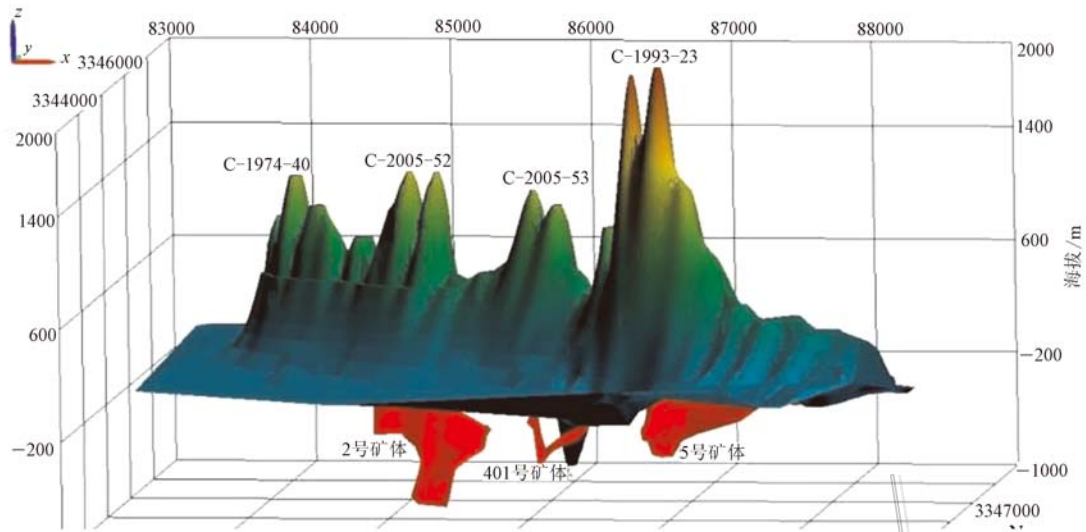


图8 铁山铁矿床矿体与航磁异常三维复合图

Fig. 8 Three-dimensional composite map between ore bodies and aeromagnetic anomaly in the Tieshan iron deposit

复合图(图8)中,C-2005-53航磁异常值比C-2005-52航磁异常值小,暗示C-2005-53航磁异常对应的下方401号矿体比C-2005-52航磁异常对应的下方2号矿体规模小,该结论与图8下方展示的401号矿体比2号矿体小一致,同时,刘玉成等(2008)的勘探资料也印证了401号矿体含矿储量比2号小。

4.4 三维空间中2号矿体与地层复合

2号矿体为铁山铁矿床6大主矿体之一,铁山矿区2号矿体与地层的三维复合图(图9)显示2号矿体与该区地层具有良好的复合关系,这对找矿有很好的指示作用。可见2号矿体与地层总体走向为NWW向,向NE倾斜,近地表产状陡,往深部倾角变缓。图9表明矿区矽卡岩型矿体主要赋存于闪长岩上方、大理岩下方,因此,沿闪长岩和大理岩向下延伸可以寻找铁矿体。

4.5 三维空间中2号矿体垂向空间变化

铁山矿区2号矿体的矿石铁含量浅部比深部高(刘玉成等,2008),暗示铁含量随着深度增加呈缓慢下降的趋势。董珍等(2013)根据钻孔资料(没有用三维图形展示元素垂向变化特征)总结出,2号矿体的矿石中 $w(\text{Fe})$ 从 $-80\text{ m} \sim -718\text{ m}$ 随着深度增加呈缓慢下降的趋势。矿体上部 $-80\text{ m} \sim -90\text{ m}$ 标高的矿石,其Fe品位分别为55.67%和61.99%;而在 -718 m 矿体深部的矿石Fe品位降低至

28.34%。2号矿体三维图(图10)清晰地展示了铁矿体上部空间大、下部空间小的特点,暗示了 $w(\text{Fe})$ 垂向上由上到下总体变低的变化趋势。2号矿体处于尖林山,而尖林山矿体是目前钻孔见矿最深的矿体(刘玉成等,2008;董珍等,2013),对于研究铁山矿体化学元素垂向变化特征具有代表性,暗示了该矿体在 -700 m 深部找矿潜力比较小。

4.6 控矿构造界面

4.6.1 控矿构造界面模拟

矿床构造是控矿的基本因素,其空间展布、形态变化等对矿体分布有控制作用,研究其三维空间展布趋势对预测深部矿体有着重要作用。世界上没有完全相同的两个矿床,但却有许多相似的矿床,表现在成矿背景、成矿地质条件、控矿因素和成矿过程等方面的相似性。魏俊浩等(2009)认为,成矿边界条件是指控制矿床形成、分布和改造的各类地质体,如褶皱、断裂、岩性地层、大脉岩、岩体接触带等,一些具有明显线状特征的地质体。尽管每个矿床的成矿地质条件差异明显,但它们也都有自己独特的成矿控制边界,因此,研究控矿边界条件的分布和三维空间产状对深部成矿预测是非常有意义。

本文提取了铁山矿区勘探资料中76个钻孔的大理岩与闪长岩层间临界点数据,对控矿构造界面进行三维模拟。根据临界点 (x, y, z) 空间坐标值,

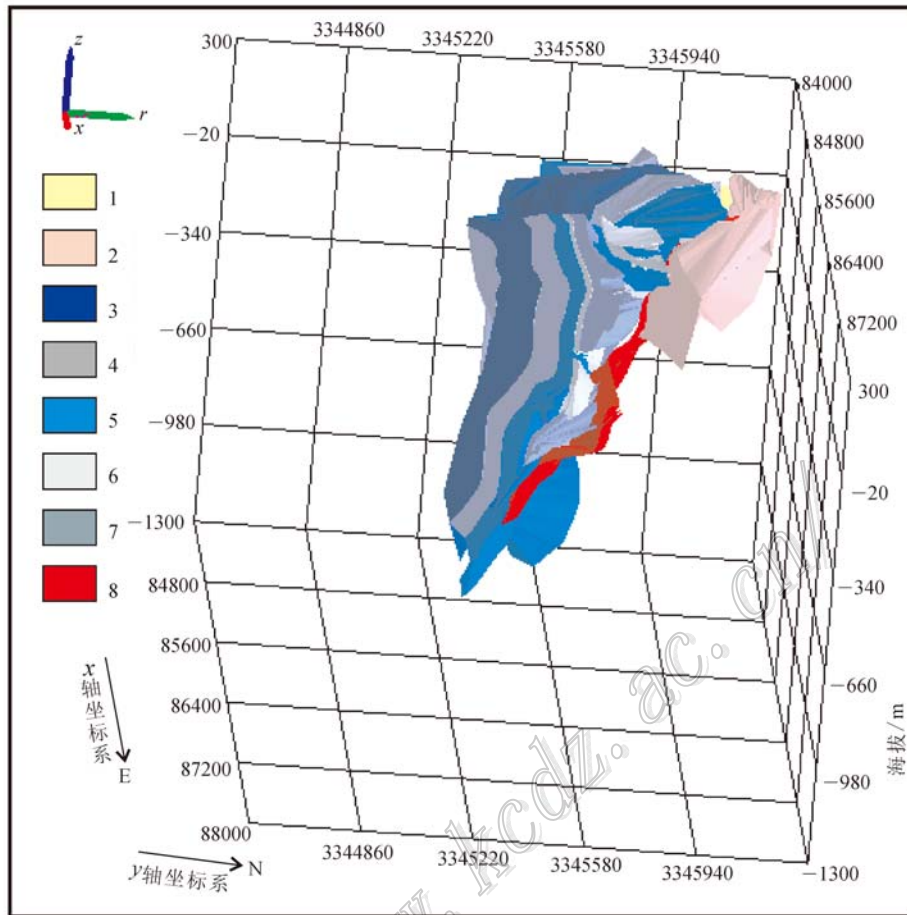


图 9 铁山铁矿床 2 号矿体与地层的三维复合图

1—第四系堆积物；2—燕山期闪长岩；3—下三叠统大冶群第五段第六亚段大理岩；4—下三叠统大冶群第五段第五亚段大理岩；5—下三叠统大冶群第五段第四亚段大理岩；6—下三叠统大冶群第五段第三亚段大理岩；7—下三叠统大冶群第五段第二亚段大理岩；8—铁矿体

Fig. 9 Three-dimensional composite map between No.2 ore body and stratum in the Tieshan iron deposit

1—Quaternary sediment; 2—Diorite of Yanshan period; 3—The sixth marble of the fifth member in lower Triassic Daye Group; 4—The fifth marble of the fifth member in lower Triassic Daye Group; 5—The fourth marble of the fifth member in lower Triassic Daye Group; 6—The third marble of the fifth member in lower Triassic Daye Group; 7—The second marble of the fifth member in lower Triassic Daye Group; 8—Iron deposit

网格化后,将高程 z 值作为待插值,运用距离平方反比插值方法得出空间中的若干个 (x, y, \bar{z}) 离散点数据,构建函数 $f(x, y, z) = z - \bar{z}$,提取 $f(x, y, z) = 0$ 的等值曲面,模拟结果见图 11,由图可见控矿构造界面总体走向为 NWW 向,向 NE 倾斜,近地表产状陡,往深部倾角变缓。由铁山矿区控矿构造界面与矿体复合图(图 12)可知,矿区矽卡岩型矿体主要赋存于构造界面上方,大理岩与闪长岩的层间构造界面为形成连续矽卡岩型矿体提供了容矿场所。

4.6.2 控矿构造界面凹兜或平缓部位是找矿的有利位置

矽卡岩矿床绝大部分受接触带构造控制,岩体的凹部往往对成矿有利,这是由于凹部一般断裂发

育,围岩易破碎,矿液常易集中于此,并能与有利围岩进行充分的交代作用而成矿,实践证明,未经构造破坏的接触带构造一般不易形成大矿(袁见齐等, 1987)。控矿构造界面凹兜部位一般也是岩体的凹部,因此,铁山矿区控矿构造界面凹兜部位是成矿有利部位。

在三维图(图 11)中,铁山矿区控矿构造界面凹兜部位表现为阴影, x 轴方向的坐标为 85 600 ~ 86 400 之间标有 A、B、C、D、E、F 六个凹兜部位。图 12 中可见 A、D、E 三个凹兜部位有 401 号矿体存在, B、C、F 三个凹兜部位没有显示矿体,而前面已经阐明铁山岩体接触面的凹兜部位是矿体产出的重要位置,控矿构造界面凹兜部位一般都是岩体接触面的

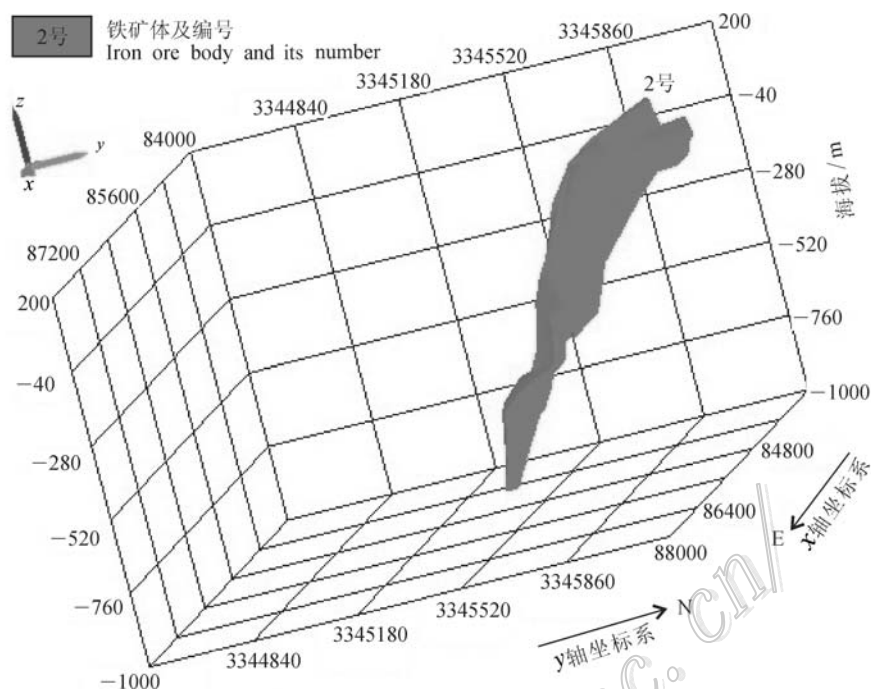


图 10 铁山矿区 2 号矿体的三维图

Fig. 10 Three-dimensional map of No. 2 ore body in the Tieshan iron deposit

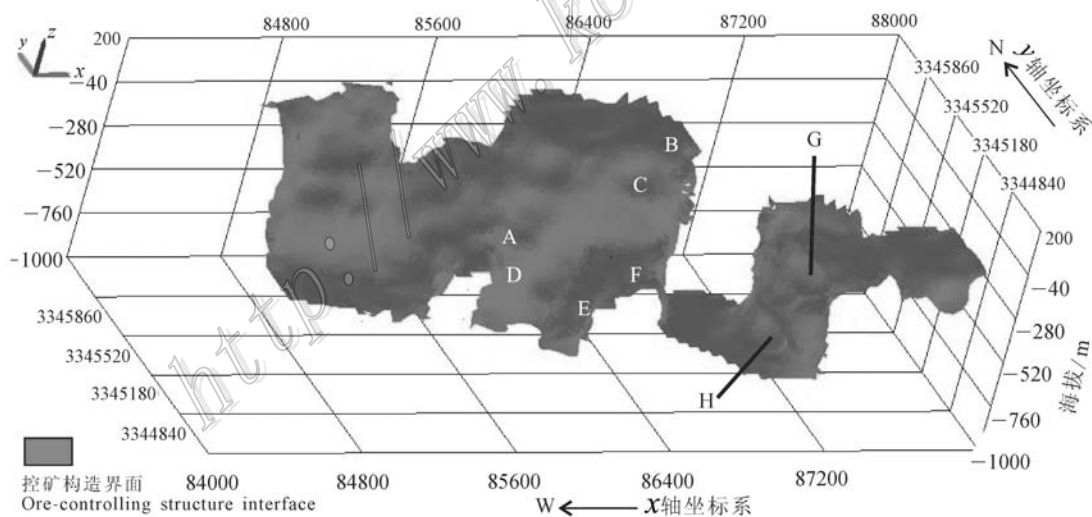


图 11 铁山矿区控矿构造界面三维模拟图(图中 A、B、C、D、E、F、G、H 字符表示凹兜部位)

Fig. 11 Three-dimensional simulation diagram of ore-controlling structure interface in the Tieshan iron deposit (A、B、C、D、E、F、G、H letter means concave site)

凹兜部位,因此,B、C、F三个控矿构造界面的凹兜部位是以后找矿的重要预测部位。以C凹兜部位为例,其中心点的坐标在三维图中为: $x=86\ 420$ 、 $y=3\ 345\ 459$ 、 $z=-145$,因此,可以在该点附近寻找含矿标志。此外,图11中的G、H是向东凹陷部位,图12显示5号矿体一部分伸进G凹兜处,可以

预测5号矿体下方的H凹兜处有一个类似的同样规模的矿体存在。

此外,在铁山矿区控矿构造界面与矿体复合图(图12)中,401号和5号矿体的最上部都处于控矿构造界面平缓部位,这2处矿体的面积和体积较大,暗示了控矿构造界面平缓部位是找矿的有利位置。

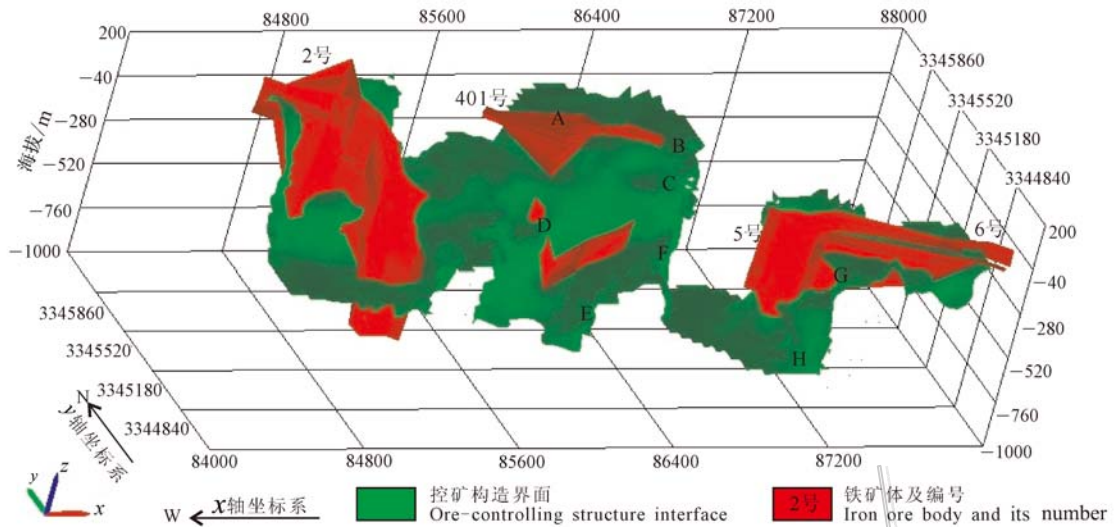


图 12 铁山矿区控矿构造界面与矿体三维复合图(图中 A、B、C、D、E、F、G、H 字符表示凹兜部位)

Fig. 12 Three-dimensional composite map between ore bodies and ore-controlling structure interface in the Tieshan iron deposit(A、B、C、D、E、F、G、H letter means concave site)

4.6.3 控矿构造界面控矿机理

翟裕生等(1993)指出,在查明接触面产状的基础上,可以区分陡斜接触与平缓接触、超覆接触与掩盖接触、整合接触与不整合接触、单层接触与多层接触等不同情况,这些接触状态对成矿的有利或不利影响要具体分析。大冶铁矿程潮矿区在铁山矿区北部,大冶铁矿灵乡矿区在铁山矿区南部,虽然铁山矿区受铁山岩体控制、程潮矿区受鄂城岩体控制、灵乡矿区受灵乡岩体控制,但是这 3 个矿区的成矿地质背景基本相同。骆地伟等(2008)利用 GeoMine3D 三维地质建模软件建立了程潮矿区岩体接触面形态模型和矿体空间可视化模型,得出岩体接触面的陡缓变化规律,矿体多赋存在接触面由陡变缓的平台或凹陷段,由此清晰地预测了程潮矿区的深部铁矿体。夏金龙等(2010)由 GeoMine3D 软件建立灵乡铁矿接触带和矿体的三维可视化模型,得出接触带由陡变缓的凹兜部位是成矿的有利部位,在凹陷最深部位的矿体规模大。由此可见,程潮矿区和灵乡矿区的矿体赋存于接触面由陡变缓的平台或凹陷段规律,与铁山矿区矿体赋存规律是一致的,因此,对大冶铁矿的矿区控矿构造体系特别是接触带构造形态的研究,不仅能够查清矿体的分布及产出特征,同时能够通过接触带产状向深部的变化规律对矿体进行深部预测。正如翟裕生等(1993)认为,在多数内生矿床中,侵入接触构造是地温梯度异常高的地段,有利于含矿流体的运动和矿质的转移,直到形成矿

石堆积。

5 结 论

(1) 铁山矿区航磁异常三维地质模型表明,主要的磁异常轴线方向基本上为 NWW 向;铁山矿区三维地形-地质模型表明铁山矿体呈 NWW 向展布,因此,铁山铁矿床找矿应沿 NWW 向部署。

(2) 铁山矿体与黑云母辉石闪长岩接触关系三维图形展示了黑云母辉石闪长岩呈 S 形接触的转折部位是成矿有利位置。

(3) 铁山矿区三维地质模型形象地展示了铁山矿体与该区航磁异常有良好的复合关系,对找矿有很好的指示作用。5 号矿体下方还有巨大找矿潜力,狮子山-尖山是下一步找矿勘探重点方向。

(4) 铁山矿区 2 号矿体与地层复合三维模型表明,铁山铁矿体主要赋存于闪长岩上方,大理岩的下方,因此,沿闪长岩和大理岩往下延伸可以寻找铁矿体。

(5) 铁山矿区三维地质模型展示了 2 号矿体 Fe 元素随深度增加而逐渐降低的变化趋势,显示矿化强度由浅部到深部逐渐减弱的变化特点,暗示 2 号矿体 - 700 m 深部以下的铁矿找矿潜力较小。

(6) 铁山矿区三维控矿构造界面的凹兜部位和平缓部位是找矿有利的部位。

综上所述,NWW 向展布矿体、岩体 S 形接触面

转折部位、航磁异常与矿体很好复合部位、地层与矿体很好复合部位、矿体垂向空间随深度变化而变化以及控矿构造界面凹兜和平缓部位是铁山矿区有利成矿条件组合。据此推测,2号矿体所在的龙洞-尖林山矿段和5号矿体所在的狮子山矿段,存在成矿的有利空间。

志 谢 感谢中国地质调查局资源评价部薛迎喜、龙宝林两位教授级高工和中国地质科学院矿产资源研究所毛景文研究员、江思宏研究员对本文提出的有益意见。感谢中南冶金地质总局中南地质勘查院为此次研究提供了丰富、详细的资料。

References

- Dong Z and Wang K X. 2013. Study of ore elements and the distribution of temporal and spatial in Daye iron deposit[J]. Association for Science and Technology Forum, 4: 121-123.
- Huang T X, Min H L and Yang Z. 2011. Application of geological analogy to evaluation of the prospect of deep ore exploration[J]. Mining Research and Development, 31(3): 30-34(in Chinese with English abstract).
- Liu Y C, Yang Y H and Wang Y J. 2006. Ore-controlling structures and orientation prognosis of deep concealed ores in the Daye iron mine[J]. Geology and Prospecting, 42(6): 10-16(in Chinese with English abstract).
- Liu Y C and Luo G Y. 2008. The deep geological report of the census about the Daye iron mine in Huangshi City, Hubei Province[R]. 1-103(in Chinese).
- Luo D W and Zhou Z G. 2008. Study on visualization of spatial distribution models of orebodies in Chengchao iron mine[J]. Nonferrous Metals, 60(1): 25-29(in Chinese with English abstract).
- Sun L, Xiao K Y, Tang J X, Zou W, Li N and Sun Y. 2011. 3-D geologic modeling of the Jiama Cu deposit based on Minexplorer System[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 38(3): 291-297(in Chinese with English abstract).
- Wei J H, Tan J, Li Y J and Fu L B. 2009. Some problems of middle-large scale mineralization prediction and exploration[J]. Journal of Minerals(Supp.), 489-491(in Chinese).
- Xia J L, Hu M A, Zhang W S, Xu B J, Yang Z and Wang L. 2010. Contact zone structure and metallogenesis of Lingxiang iron deposit in Daye, Hubei Province[J]. Geological Science and Technology Information, 29(6): 41-44(in Chinese with English abstract).
- Xiao K Y, Chen X G, Li N, Zou W and Sun L. 2010. 3D visualization of geological exploration and mineral resources evaluation and the development of the Prospector software[J]. Mineral Deposits, 29: 758-760(in Chinese with English abstract).
- Yang Z, Min H L, Ji X, Hu M A and Zhang W S. 2009. Study of ore-controlling structure and ore-body location in Daye Fe deposit based on trend surface analysis[J]. Metal Mine, 401(11): 81-85(in Chinese with English abstract).
- Yu C C, Fan Z G, Wang N D, Xiong S Q, Wan J H and Zhang H R. 2007. High-resolution aeromagnetic exploration methods and their application in Daye iron mines[J]. Progress in Geophysics, 22(3): 979-983(in Chinese with English abstract).
- Yu C C, Xiong S Q, Liu S Y, Fan Z G and Sui S W. 2010. An ore discovery example of deep prospecting by helicopter aeromagnetic survey in the Daye iron mine[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 34(4): 435-439(in Chinese with English abstract).
- Yuan J Q, Zhu S Q and Zhai Y S. 1987. Mineral deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-345(in Chinese).
- Zhai Y S, Lin X D, Chi S C, Yao S Z, Wang S Y and Wu G G. 1993. Study of ore field structures[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-214(in Chinese).
- Zhai Y S, Deng J, Wang J P, Peng R M, Liu J J and Yang L Q. 2004. Researches on deep ore prospecting[J]. Mineral Deposits, 23(2): 142-149(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 董珍,王可祥. 2013. 大冶铁矿成矿元素及时空分布规律研究[J]. 科协论坛,4:121-123.
- 黄同兴,闵厚禄,杨振. 2011. 地质类比法在大冶铁矿深部找矿前景评价中的应用[J]. 矿业研究与开发,31(3):30-34.
- 刘玉成,杨艺华,王永基. 2006. 大冶铁矿控矿构造研究及深部隐伏矿体定位预测[J]. 地质与勘探,42(6):10-16.
- 刘玉成,罗高英. 2008. 湖北省黄石市大冶铁矿深部普查地质报告[R]. 1-103.
- 骆地伟,周宗桂. 2008. 程潮铁矿矿体空间展布模型可视化研究[J]. 有色金属(矿山部分),60(1):25-29.
- 孙莉,肖克炎,唐菊兴,邹伟,李楠,孙艳. 2011. 基于Minexplorer探矿软件的甲玛铜矿三维地质体建模[J]. 成都理工大学学报,

- 38(3):291-297.
- 魏俊浩, 谭俊, 李艳军, 付乐兵. 2009. 中大比例尺成矿预测与勘查的若干问题[J]. 矿物学报(增刊), 489-491.
- 夏金龙, 胡明安, 张旺生, 徐伯骏, 杨振, 王磊. 2010. 湖北大冶灵乡铁矿接触带构造与成矿[J]. 地质科技情报, 29(6): 41-44.
- 肖克炎, 陈学工, 李楠, 邹伟, 孙莉. 2010. 地质矿产勘探评价三维可视化技术及探矿者软件开发[J]. 矿床地质, 29: 758-760.
- 杨振, 闵厚禄, 季翔, 胡明安, 张旺生. 2009. 基于趋势面分析的大冶铁矿控矿构造及深部矿体定位研究[J]. 金属矿山, 401(11): 81-85.
- 于长春, 范正国, 王乃东, 熊盛青, 万建华, 张洪瑞. 2007. 高分辨率航磁方法及在大冶铁矿区的应用[J]. 地球物理学进展, 22(3): 979-983.
- 于长春, 熊盛青, 刘士毅, 范正国, 睦素文. 2010. 直升机航磁方法在大冶铁矿区深部找矿中的见矿实例[J]. 物探与化探, 34(4): 435-440.
- 袁见齐, 朱上庆, 翟裕生. 1987. 矿床学[M]. 北京: 地质出版社. 1-345.
- 翟裕生, 林新多, 池三川, 姚书振, 王思源, 吴淦国. 1993. 矿田构造学[M]. 北京: 地质出版社. 1-214.
- 翟裕生, 邓军, 王建平, 彭润民, 刘家军, 杨立强. 2004. 深部找矿研究问题[J]. 矿床地质, 23(2): 142-149.

<http://www.kcdz.ac.cn/>