第 28 卷第 6 期　　物 探 与 化 探　　Vol. 28, No. 6
2004 年 12 月　　GEOPHYSICAL & GEOCHEMICAL EXPLORATION　　Dec., 2004

机载电磁测量系统及应用效果
——以云南金平地区寻找铜镍矿为例

张学书[1,2], 秦德先[2], 念红[3]
(1. 昆明理工大学, 云南 昆明　650093; 2. 云南省有色地质勘查院, 云南 昆明　650051; 3. 云南省有色地质调查院, 云南 昆明　650216)

摘 要: 金平地块位于扬子克拉通西南缘, 该地区岩浆熔离型铜镍硫化物型矿床产于与二叠系峨眉山玄武岩有成因联系的基性—超基性侵入岩体中, 赋矿围岩及矿石的物性特征与其它非含矿岩石具有明显的差异, 对航测所获得的特定频率(900 Hz)电磁异常及磁异常进行分析, 结合地面地质检查和物化探测量工作, 对有望成矿潜力区进行快速远景评价。

关键词: 铜镍矿床; 机载电磁测量系统; 快速评价; 金平地块
中图分类号: P631.3　　文献标识码: A　　文章编号: 1000-8918(2004)06-0485-04

直升机机载电磁测量(HEM)技术是一种新型的找矿探测手段, 能快速确立找矿靶区。应用机载电磁测量系统对找矿靶区进行超低空高精度电磁测量, 配合地面物化探及地质工作, 可快速而准确地对找矿靶区进行定位, 达到对目标区成矿远景进行快速评价的目的。

金平地块铜镍成矿带主要发育古生代浅变质岩系及主要为华力西期的基性岩浆岩, 出露的华力西晚期超基性侵入岩中普遍发育有铜镍矿化, 已探明有白马寨大型铜镍矿、牛栏冲小型铜镍矿, 区内与超基性侵入岩有关的岩浆熔离型铜镍硫化物矿床具十分良好的找矿潜力。

金平地区的中外合作找矿过程中, 在前期区域性地球化学测量(相当于 1: 10 万分散流)基础上, 以超低空电磁测量系统(HEM)对区内成矿有利区域进行快速找矿评价, 确定工程验证靶区, 并在航空电、磁异常区进行了地面物探(TEM)及化探详查工作(相当于 1: 2.5 万 ~ 1: 1 万次生晕测量)及地质检查工作, 快速确立了重点靶区。

1　地质概况及岩、矿石物性参数

金平白马寨—营盘街铜镍成矿区地处扬子克拉通西缘, 通常称为青藏滇板块前缘—金平板块结合带(金平地块), 其东部为哀牢山变质地体; 西部以腾条河断裂为界与墨江—绿春褶皱带相接。区内出露地层见图 1。区内与岩浆熔离贯入型铜镍硫化物矿床有关的基性—超基性侵入岩是海西晚期基性—超基性侵入岩及晚期煌斑岩脉和其它基性岩脉。

区内主要岩矿石的物性参数见表1、表2❶, 可

表 1　金平地区主要岩矿石物性参数

资料来源	岩矿石	U / mV	σ / S/m	ρ / Ω·m	M_r / A/m	κ / 10^{-5}SI
十五地质队	块状矿	400 ~ 800		近于 0	5200	3360
	陨铁状矿	300 ~ 600		0 ~ 10	300	3100
	浸染状矿	60 ~ 320		15 ~ 200	250	650
	橄榄岩	近于 0		2000	0 ~ 300	0 ~ 1900
	辉石岩	近于 0		800	0	0
	辉长岩	近于 0		500 ~ 2000	50	200
	煌斑岩	近于 0		210 ~ 1000	100 ~ 150	1500 ~ 4500
	砂岩			500 ~ 900	0	0
	板岩			300 左右	0	0
本次工作成果	黄铁矿化黑(灰)色页岩		0.1 ~ 1.5	445 ~ 1108		26 ~ 43
	浸染状矿化蛇纹石化橄榄岩		极低	2		15834 ~ 17861
	蛇纹石化橄榄岩					13504 ~ 16099
	辉长岩					182
	浸染状矿化辉长岩		4.5			446
	含 20% 磁黄铁矿的辉长岩		115			991

注: σ—感应电导率; U—电极电位; ρ—电阻率; M_r—剩余磁化强度; κ—磁化率

❶ 云南金平白马寨铜镍矿储量报告. 云南省地质局第十五地质队. 1965.

收稿日期: 2004-03-10
基金项目: 云南省国际合作项目资助(2002GH11)

万方数据

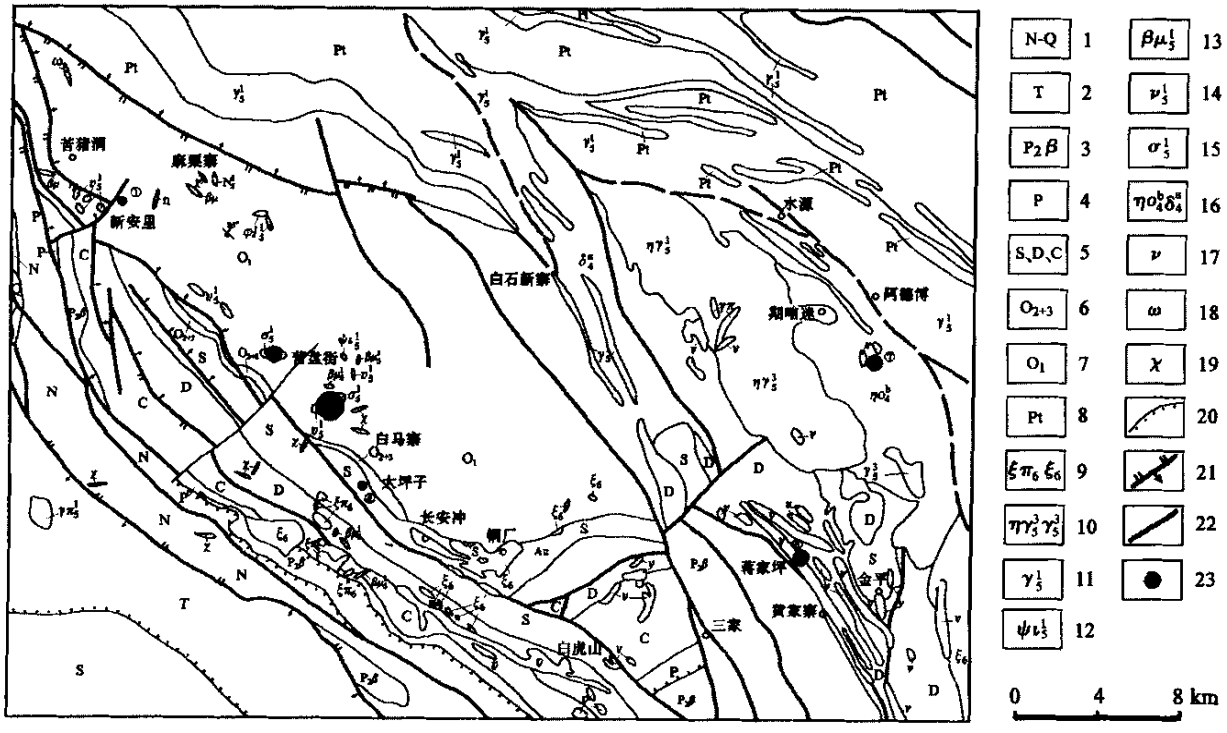

图 1　工区地质概况

1—新近系-第四系；2—三叠系砂页岩、板岩、流纹斑岩；3—二叠系玄武岩；4—二叠系未分：灰岩、页岩；5—志留、泥盆、石炭系砂、页岩；6—中上奥陶统粉砂岩、灰岩；7—下奥陶统砂岩、板岩；8—哀牢山群变质岩；9—正长斑岩及正长岩；10—黑云二长花岗岩、黑云花岗岩；11—花岗岩类；12—辉石岩；13—辉绿岩；14—辉长岩；15—橄榄岩；16—黑云石英二长岩、闪长岩；17—基性-超基性侵入岩（未分）；18—苦橄岩脉；19—煌斑岩脉；20—不整合地层界线；21—逆断层；22—断层及推测断层；23—铜、镍矿点

表 2　白马寨矿区各类岩（矿）石的极化率测量结果

岩（矿）石名称	样品数	极化率/%
矿石	7	40 ~ 50
矿化岩石	12	4 ~ 20
基性—超基性岩	10	0.6 ~ 3
砂岩板岩	13	0.5 ~ 3

见橄榄岩、辉石岩、辉长岩、煌斑岩及矿化辉长岩、橄榄岩等基性—超基性岩体及铜镍硫化物矿石具有较强磁性。当明显矿化时，基—超基性岩的感应电导性明显增强，感应电导率可达 115，极化率可达 4% ~20%；而沉积岩石，即使是具较强黄铁矿化的黑色碳质页岩，仍然表现出高阻、低电导性的特点，铜镍硫化物矿石均表现为低阻、高电导性、高极化和强磁性的特点。

尽管上述岩矿石的物性测量数值的测定年代跨度大（1965 ~2002 年），但所反映的岩矿石的物性特征完全一致，为在本区利用物探电磁测量技术进行找矿评价提供了重要的理论依据。

2　机载电磁测量系统简介❶

万方数据

本次航空电磁测量采用直升机拖带磁力及电磁测量仪器（DIGHEM^{V}）以平均 60 m 高度平行地面飞行，用机载磁力仪和电磁感应仪进行数据记录，数据进行地形校正及日变较正后，经计算处理获得了地面及其以下 150 m 内的磁性体和电导体的异常图。主测量系统为 DIGHEM^{V} 电磁系统，辅助仪器由磁力仪、雷达及气压高程计、模拟及数字记录仪及 GPS 电子导航系统组成。仪器测量系统由 SA315 涡轮直升机拖带，测量飞行时电磁传感仪离地高度平均为 30 m（图 2）。测线方向为 45°，局部为 90°，线距 200 m，总共进行了约 2 745 km 的测线飞行。

DIGHEM^{V} 电磁测量系统由 5 对双极对称线圈组成，测量时对地相对高度为 30 m，其中 900 Hz（2 对）、5 500 Hz 和 7 200 Hz 线圈相距 8 m，56 000 Hz 线圈相距 6.3 m。测量系统中的 3 对同面线圈（900 Hz，7 200 Hz，56 kHz）分别对应不同频率区间的电阻率。低频同面线圈主要对埋深较大的导体敏感，高频同面线圈对近地表的较薄和较微弱导体敏感。

❶ Fugro 航空电磁测量公司. 金平地区航空电磁测量报告. 云南省有色地质局. 2001.

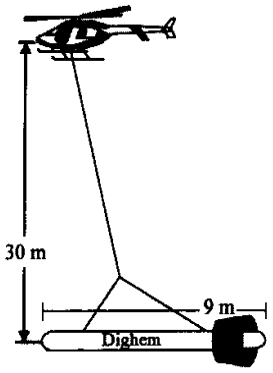

图 2　航空电磁测量示意

2 对同轴线圈(900 Hz 、5 500 Hz)主要针对陡倾斜导体而设,频率设置对弱导体或埋深大的强导体敏感。记录通道 :设有 5 个同相分量通道,5 个正交分量通道,3 个监视通道。记录精度(0.06 ~0.6) × 10^{-6}。采样(记录)频率 :每秒 10 个样,相当于以 110 km/h 飞行时每 3 m 采样 1 次。

磁测量系统包括机载磁力仪及磁测地面基站。磁力仪为光泵铯蒸气型带 G823 传感器的 MEP-710 磁处理仪,测量精度为0.01nT,采样频率为10次/s。磁测地面基站为 HC85 氦气磁力仪,精度大于 0.5 nT,采样频率为 1 次/3s。在基站进行磁力仪测量时,同时记录地球磁场的日变数据,并且基站时钟与机载测量系统应一致,以便进行日变改正。

3　航空电磁测量、磁测量成果

3.1　电磁测量成果

航空电磁测量成果❶以视电阻率异常图及各频率段的电导性异常图表示。下面仅就电磁测量 900 Hz 导电性异常特征作一详细阐述。

航空电磁测量获得的导电性异常(见本期彩图插页彩图 2)有 3 个明显的电导性异常带,即 1 号白马寨—新安里北西向异常带 ;2 号铜厂毛贝湾—白虎山北西向异常带 ;3 号蒋家坪异常带(向南东延伸未封闭)。异常带与区域构造线方向、区内岩体延伸、展布方向一致。经地面检查,1 号异常地带白马寨—营盘街—新安里地区在已发现的白马寨中型铜镍矿床的北西延伸方向,分布有营盘街、芭蕉湾、棉花山、蚂蝗沟及新安里等数个基性—超基性岩体群。岩体内辉石岩及橄榄岩相中均普遍具有程度不等的块状和浸染状矿化,矿化矿物主要为磁黄铁矿、镍黄铁矿、磁铁矿及少量黄铜矿。航电异常应为浅部矿化引起,另外,尽管含黄铁矿的黑色碳质页岩的感应电导率测量值较低,但由于其厚度巨大(大于 200 m),因此亦可引起较强干扰电异常。

2 号电异常带出露有矿化辉石岩、辉石橄榄岩,且围岩中发育有黄铁矿化含碳页岩,而且异常分布区矿化基性—超基性岩与黄铁矿化碳质页岩相伴产出,推测航电异常应为两者共同引起。3 号异常带地质特征与 2 号异常带相似,3 号电异常带坪子上—蒋家坪地区为牛栏冲—蒋家坪基性岩带的北端,出露主要基性岩为辉长岩、橄榄辉石岩等,岩体含矿较弱,在底部橄榄辉石岩中,局部可见星点状稀疏硫化物,并见有极少量细脉状黄铁矿。

3.2　航磁测量成果

航磁测量成果见本期彩图插页彩图 3。在白马寨—营盘街—新安里地区有 1 个明显的北西向带状异常与环形异常相重叠的磁异常特征,实际上该异常反映了本地区控制岩体侵位的北西向及北东向两组构造的复合特征,这一特点在白马寨矿区及其外围比较明显,白马寨矿区含矿 I、III 号岩体地表出露延伸方向为北东向,而岩体深部延伸方向为北西向,明显受区内北西向主构造线及次级北东向断裂构造的复合控制。与航空电磁异常相比较,除 1 号电异常与航磁异常重叠较好外,2 号及 3 号电异常地区均无明显强磁异常与之相吻合,电异常很可能与沉积围岩中的碳质页岩及其黄铁矿化有关。

综上所述,1 号电异常带对应的白马寨—营盘街—新安里基性—超基性岩带电异常及磁异常吻合程度较好,且地表出露的辉长岩、橄榄岩具有较明显的矿化,岩体分异程度较高 ;而 2、3 号电异常地带并无强磁异常与之对应,经检查虽然存在辉石岩等并有弱矿化出现,但岩石分异较差,且与超基性岩相伴有较厚大的黑色黄铁矿化碳质页岩产出,较强电异常很可能与厚大的碳质页岩有关。因此 1 号电异常带所对应的地区即白马寨—营盘街—新安里基性—超基性岩带具有较好的成矿远景。

4　铜镍找矿靶区定位

根据航磁及航电测量成果,1 号电异常带与磁异常吻合程度较高,而且出露的基性—超基性岩体中,局部可见镍含量高达 7.3%、铜含量达 2.4% 的块状矿化,因而在进行地面检查的过程中,对磁异常及电异常逐个进行了详细的地质调查及土壤地球化学测量和地面 TEM 测量,以验证异常源。

❶ Fugro 航空电磁测量公司金平地区航空电磁测量报告. 云南省有色地质局. 2001.

万方数据

检查发现,多数磁异常由基性—超基性以及中酸性侵入岩体如辉长岩、辉石岩、橄榄岩、煌斑岩及正长岩(铜厂及长安冲)等引起,少数磁异常反映了接触带、断层等特征。电异常,即低电阻异常的影响因素较复杂,主要有金属矿化、黄铁矿化碳质页岩、中—高压输电线、地下热水活动带以及其它传导性盖层岩石和人文景观等。土壤地球化学测量主要对航电及航磁、电异常带进行进一步验证,并对地质检查中发现的基性岩体的含矿性特征与航电、磁异常进行对比,相互印证。重点地段营盘街—新安里地区的 TEM 测量成果表明,在营盘街地段存在较好的二次电位异常❶❷❸❹。由此,在航空电、磁测量的基础上,根据区内地质、化探次生晕及 TEM 异常特征,可以确定区内寻找与基性—超基性岩有关的岩浆熔离贯入型铜镍硫化物矿床的最有利的靶区为营盘街地段,该地段航电、航磁及地面化探次生晕、物探 TEM 测量二次电位异常和岩相分异及其矿化特征吻合均较好(见文后彩图插页彩图 4)。

5 靶区成矿远景评价

区内磁异常,特别是本次低空高精度磁测异常结果,基本能圈定出基性—超基性岩体(辉石岩、橄榄岩及煌斑岩等)的边界,并可大致确定岩体浅部倾伏方向。部分磁异常反映了构造特征,如白马寨一带磁异常即反映出线性(北东向及北西向)构造及环形构造的特征(见文后彩图插页彩图 3),同时亦反映了白马寨岩体的分布特征及控岩构造特征。矿区岩矿石物性参数表明区内典型铜镍矿石具有低阻、高极化的电性特征,浅部矿化具有较明显的 TEM 二次电位异常;但含水裂隙带及厚大含碳黄铁矿化页岩亦能引起较强干扰电异常。根据区内土壤地球化学测量结果与地质调查结果,区内基性—超基性岩出露(或隐伏)地段均能引起明显的铜镍组合异常,一般铜镍的综合异常往往由含矿岩体引起,而单独镍异常往往是无矿岩体或小岩脉引起。

航空电磁测量及地面物化探工作成果表明,营盘街地段具有较好的铜镍成矿远景。该地段主要有利成矿条件有以下几点。

(1)构成该区东、西边界的哀牢山深大断裂及藤条河断裂为本区二叠纪晚期基性喷发岩(玄武岩系列)及基—超基性岩的导岩通道。

(2)营盘街地区出露的基性—超基性侵入岩体分异良好,构成自超基性的橄榄岩、辉石岩至偏基性的辉长岩以至偏酸性的闪长岩的演化系列。

(3)营盘街岩体的镁铁比为 3.4 ~ 3.8(云南 15 地质队,1975;本次工作,2001),为对铜镍成矿有利的岩石系列。

(4)地表出露辉石岩相带中见块状硫化物矿化,镍含量最高可达 7.3%(营盘街北蚂蝗沟)。

(5)航空电磁测量异常带及地面物化探异常与含矿基性—超基性岩带完全吻合。

该地区应具有形成大型乃至超大型铜镍矿床的远景,结合岩体向北西延伸并倾伏及向南倾斜的特点,应选择岩体倾伏的北西部,即营盘街至蚂蝗沟一带的南西侧,作为重点工程验证靶区。

6 结论

机载电磁测量系统(HEM)是一种先进的物探方法,广泛应用于西方主要矿业大国如澳大利亚和加拿大等的金属矿床的勘查找矿中。该系统搭载于大功率直升机上,具有飞行速度和高度低、异常分辨率高、对弱导体及磁性体反应灵敏等特点。与时间域电磁测量方法(TEM)的宽频带相比,其较窄的频带范围可以提供更高的信噪比,有利于获得更为精确的电、磁异常。HEM 对于在较大区域内进行靶区优选及成矿潜力的快速评价具有十分明显的优势。利用航测电、磁异常结合地面地质检查及物化探测量,可以对靶区进行快速定位预测。

向参与此项工作的 Adrian McArthur、Jens Balkau、Brad George、Rechard Carver 等表示衷心地感谢。

参考文献:

[1] Ali R J. Emeishan Basalts(SW China) and the 'end-Guadalupian' crisis: magnetobiostratigraphic constraints[J]. Journal of Geological Society, 2002, 159: 21 – 29.

❶ McArthur A. Geological Context of Jinping HEM anomalies. 云南省有色地质局. 2001.

❷ Balkau J, Golden H. Jinping Project-Results to Date. 云南省有色地质局. 2001.

❸ George B. Jinping TEM Survey-Interim Status report. 云南省有色地质局. 2001.

❹ George B. Jinping TEM Survey-Update. 云南省有色地质局. 2001.

万方数据

下转 499 页

magnetic System and Its Experiments[J]. Journal of Geoscientific Research in Northeast Asia,2000,3(1),99 – 106.

[11] 嵇艳鞠,林君,程德福,等. ATEM-II 瞬变电磁仪数据处理软件的研制与应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2003,33(2):242 – 245.

[12] 嵇艳鞠,林君,程德福,等. 瞬变电磁法中数据取样处理方法的研究[J]. 物探与化探,2003,27(2):142 – 145.

[13] 王忠,林君. TEM 接收机低噪声抗饱和前放电路设计[J]. 吉林大学学报(信息科学版),2002,20(4):1 – 4.

[14] 张秉仁,林君,嵇艳鞠. TEM-2 型瞬变电磁法发射机中的过流保护技术[J]. 仪器仪表与传感技术,2002,(12).

[15] 程德福,林君. 瞬变电磁法微弱信号检测技术研究[J]. 吉林大学学报(信息科学版),2002,20(2):1 – 5.

[16] 王淑玲,林君,段清明. 基于 GPS 的瞬变电磁系统同步测量控制器研究[J]. 石油仪器,2001,15(1):13 – 15.

[17] 于生宝,林君. 瞬变电磁法中发射机关断时间的影响研究[J]. 石油仪器,1999,13(6):15 – 17.

THE ATEM-Ⅱ TRANSIENT ELECTROMAGNETIC SYSTEM AND ITS APPLICATION

LIN Jun, JI Yan-ju, YU Sheng-bao, WANG Zhong, WANG Jing, WANG Yan, ZHOU Guo-hua, WU Guo-qiang

(*Open Lab of Advanced Geophysical Instrumentation, Jilin University, Changchun* 130026, *China*)

Abstract: Transient electromagnetic methods have been widely used in geophysical exploration since 1980s, and have been developed for decades in China. Based on an analysis of transient electromagnetic systems developed by experts of various countries, the authors designed a new transient electromagnetic system called ATEM-II synchronized with GPS by using the timing signal of GPS and modern electronic devices. The system can be applied to such fields as mineral exploration, engineering investigation and underground water detection. Case studies and characteristics of the system are given in this paper.

Key words: transient electromagnetism; electromagnetic exploration; GPS synchronization; case studies

作者简介：林君(1954 –),男,吉林通化人。1982 年毕业于长春地质学院应用地球物理系。教授,博士生导师,吉林大学智能仪器与测控技术研究所所长、电子科学与工程学院常务副院长、地球信息探测仪器教育部重点实验室(筹)主任,主要从事地下信息探测技术及仪器、信号处理、智能测控技术及仪器的研究工作。

上接 488 页

HELICOPTER-TOWED ELECTROMAGNETIC SURVEY SYSTEM (HEM): ITS PRINCIPLES, METHODS AND APPLICATION RESULTS ——A CASE STUDY OF COPPER-NICKEL SULFIDE ORE EXPLORATION IN JINPING AREA, YUNNAN PROVINCE

ZHANG Xue-shu[1,2], QIN De-xian[2], NIAN Hong[3]

(1. *Kunming University of Science and Technology, Kunming* 650093, *China*; 2. *Yunnan Non-ferrous Metals Minerals Institute, Kunming* 650051, *China*; 3. *Yunnan Non-ferrous Metals Geological Survey, Kunming* 650216, *China*)

Abstract: The Jinping block is located on the western margin of Yangtze craton. In this area, the magmatic liquation and pulsatory injection type copper and nickel ore deposits lie in ultramafic and mafic intrusions, which are genetically related to the Permian basalts of southwest China. These deposits share good geophysical features suitable for EM survey. The Helicopter-towed Electromagnetic Survey, as a very useful advanced exploration method for targeting mineralization, is employed in the prospecting for copper and nickel sulfide deposits and, combined with ground geological, geochemical and geophysical survey, can be expected to locate the target area quickly and accurately for follow-up work.

Key words: copper and nickel, mineralization; HEM Survey; quick targeting and evaluating of potential mineralization; Jinping block

作者简介：张学书(1965 –),男,1990 年毕业于中南大学地质系,获硕士学位,现为昆明理工大学在读博士。地质高级工程师。主要从事有色金属矿产的勘查找矿及研究工作。

万方数据