

doi: 10.11720/wtyht.2019.0165

高远.等值反磁通瞬变电磁法对石膏矿采空区的探测分析[J].物探与化探,2019,43(6):1404-1408.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0165>

Gao Y.The application effect on detecting goaf of gypsum mine by opposing coils transient electromagnetics method[J].Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(6): 1404-1408.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0165>

等值反磁通瞬变电磁法对石膏矿采空区的探测分析

高 远

(湖南省煤炭地质勘查院,湖南长沙 410014)

摘 要: 为了研究等值反磁通瞬变电磁法对临澧某石膏矿采空区的探测效果,在矿区布置了两条测线进行等值反磁通瞬变电磁法实验。通过两条测线的结果对比可知,在等值反磁通瞬变电磁法的反演电阻率剖面中,不存在采空区的区域电阻率等值线较平缓、呈层状,基本反映了地层的层状特性;存在采空区的区域电阻率等值线呈明显的下凹特性,且电阻率值较低,为低阻异常带。可见,等值反磁通瞬变电磁法对临澧某石膏矿的采空区探测效果较好,能够确定采空区的基本位置,可以在该矿区或类似矿山开展采空区探测工作。

关键词: 等值反磁通;瞬变电磁法;采空区;石膏矿

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2019)06-1404-05



0 引言

受采空区的影响,临澧某无主石膏矿区内地面出现了大量塌陷坑,部分房屋也发生了沉降或开裂,严重危及人们的生活。为了治理该区域的塌陷地质灾害,需要查明石膏矿采空区范围,但是,由于上世纪的滥采滥挖,该石膏矿矿区井下地质资料不全,无法直接从井下地质资料来确定采空区范围;且大部分井巷已垮塌,采空区的位置也无法下井核实。因此考虑采用地面物探方法来查明采空区的范围。根据矿区资料及井下核实,该矿区开采的石膏矿一般埋深在 50 m 左右,多数采空区都已经垮塌被水淹没,根据采空区埋深及其被水淹没的特点,选择对低阻体反映灵敏的等值反磁通瞬变电磁法(OCTEM)来进行采空区探测。

我国瞬变电磁法是从 20 世纪 70 年代开始慢慢发展起来的,其理论与应用都非常成熟,广泛应用于矿产资源勘查、地质灾害调查、煤矿采空区探测等领域^[1-4]。随着时代的推移,瞬变电磁法的技术不断更新,近几年涌现了时变点电荷载流微元的瞬变电磁场理论、矿井瞬变电磁法全空间理论、电性源瞬变

电磁短偏移装置^[5]、等值反磁通瞬变电磁法^[6]等新方法或理论。尤其是等值反磁通瞬变电磁法,它打破了传统瞬变电磁法具有勘探盲区的束缚,在很多领域取得了较好的应用效果。

等值反磁通瞬变电磁法是近几年我国学者提出来的,2011 年席振铎等研究了水平磁偶源的电磁场分布规律^[6],2012 年胡子君等进行了瞬变电磁低噪声前置放大器研制^[7],最终由席振铎等于 2016 年详细阐述了等值反磁通瞬变电磁法的工作原理,并展示了仪器样机及实验效果^[8]。目前,等值反磁通瞬变电磁法理论已经非常成熟,并已研发出稳定可靠的仪器,勘探深度一般在 0~200 m,该方法已广泛应用于地质灾害调查、铁路勘察、公路勘察等领域^[8-16],主要用于查明浅层岩溶、空洞、富水岩体、采空区等,应用效果较好。王银等^[10]利用等值反磁通瞬变电磁法来探测机场跑道下的岩溶,证实了等值反磁通瞬变电磁法有效地解决了瞬变电磁法浅部探测存在“盲区”的技术瓶颈,具有不受场地限制、抗干扰能力强的特点;彭星亮等^[15]、杨建明等^[16]都利用等值反磁通瞬变电磁法和高密度电阻率法进行了对比研究,结果表明,等值反磁通瞬变电磁法具有不受地形影响、分辨率高的特点。

收稿日期: 2019-03-25; 修回日期: 2019-07-28

作者简介: 高远(1985-),男,湖南宜章人,硕士,工程师,主要从事物探电法、测井的理论与应用研究工作。Email:gyuan998@163.com

虽然等值反磁通瞬变电磁法的实际应用效果较好,但是主要还是用于岩溶或富水岩体的探测^[9-16],对采空区的探测应用较少,主要是受探测深度影响(等值反磁通瞬变电磁法是一种浅层探测手段^[8],有效深度一般小于 200 m,而采空区的埋深范围变化大,一般埋深几十米至上千米)。因此,在临澧某无主石膏矿进行大范围工作前,本文先在矿区内开展可行性实验研究。

1 基本原理

瞬变电磁法是利用阶跃波形电磁脉冲激发,利用不接地回线向地下激发发射一次场,在一次场断电后采用感应线圈测量地下介质产生的纯二次场随时间的变化,来达到寻找各种地质体的地球物理勘探方法^[2]。但是当发射电流关断时,接收线圈本身会产生感应电动势,使得接收线圈内一次场磁通量不会马上为零,并于地下介质产生的二次场叠加,造成瞬变电磁法实测早期信号失真(不是纯二次场),影响浅部勘探精度,形成探测盲区^[8]。

为了解决瞬变电磁法早期信号失真的问题,席振铎等提出了等值反磁通瞬变电磁法(OCTEM),并于 2016 年对该方法的原理进行了详细介绍^[8]。该方法的发射线圈为双线圈源,即采用上下平行共轴的两个相同线圈通以反向电流发射一次场,接收线圈位于双线圈源的中间平面位置(图 1)。由于接收面为上下两个线圈的等值反磁通平面,其一次场磁通量始终为零,而地下空间却仍然存在一次场,因此一次场关断时,接收线圈测量的是地下介质产生的纯二次场响应,有效解决了瞬变电磁法早期信号失真的难题。

2 地质概况

2.1 地层岩性

经过收集资料及地面调查,勘查区及附近出露地层有:第四系(Q_4)、古近系始新统新沟咀组(E_2x)及古近系古新统沙市组(E_1sh)。地层总体倾向南东,倾角 $8\sim 15^\circ$,呈一单斜构造产出。

第四系以粘性土为主,厚度一般小于 10 m。
古近系始新统新沟咀组(E_2x)上段岩性为紫红色粉砂质泥岩、含砾泥岩为主,夹薄层粉砂岩,厚 64~75 m;下段岩性为紫红色粉砂质泥岩与浅灰、灰绿色细砂岩、粉砂岩、泥质白云岩互层,底部含粒状石膏,厚 35~41 m。

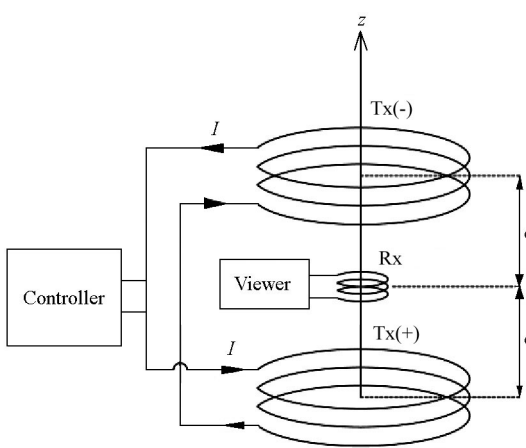


图 1 OCTEM 装置示意图(引自文献[8])
Fig.1 Geometry of OCTEM(cited from reference [8])

古近系古新统沙市组(E_1sh)上段岩性为紫红色粉砂质泥岩、紫红色石膏质泥岩、石膏岩、硬石膏岩等,共含 7 层石膏层($I\sim VII$, I 矿层在深部, VII 矿层在浅部),厚度为 118.09~150.84 m;下段岩性为砂质泥岩、泥质粉砂岩、细砂岩等。

塌陷区主要发生在无主石膏矿区内,该矿区出露地层为古近系古新统沙市组(E_1sh),开采的石膏矿矿层为 VI 矿产,开采深度一般在标高 30 m 左右。

2.2 地球物理特征

通过收集工作区及邻近矿区的测井数据,统计了勘查区主要岩性的电阻率变化范围(表 1)。

表 1 勘查区主要岩石电阻率参数统计
Table 1 Resistivity parameters of major rock specimens in exploration area

岩性	电阻率/($\Omega\cdot m$)	
	范围	平均值
第四系(粘性土为主)	30~220	145
粉砂质泥岩、含砾泥岩	110~350	260
泥质粉砂岩、粉砂岩	140~650	410
细砂岩	300~2500	1650
石膏岩、硬石膏	1100~5500	3200
泥质白云岩	400~2500	1100

根据表 1 可以看出,勘查区的各岩层电阻率差异明显,特别是石膏岩、硬石膏,电阻率较高,而石膏矿层中的采空区多被水淹没,为低阻特性,两者电性特征区别明显,具备开展地球物理勘察的条件。

3 实验方法

3.1 测线布置

在临澧某无主石膏矿区内选择了一个地层较相近的区域布置了两条实验线。其中一条测线 S2

布置在已知有采空区的上方,采空区位置明确,测线长 140 m,测点距为 10 m;另一条测线穿过一个已知地面塌陷坑,推测有采空区,采空区位置不明确,测线长 180 m,测点距也为 10 m。

3.2 仪器设备

本次物探工作采用的仪器是 HPTEM-18 型高精度瞬变电磁系统,勘探深度可达 200 m,满足勘探要求。HPTEM-18 型高精度瞬变电磁系统由天线盒、仪器主机和操作电脑组成(图 2)。天线盒集发射线圈和接受线圈于一体,测量时无需单独布设发射线圈,天线盒整体直径小于 1 m,野外作业轻便、高效。

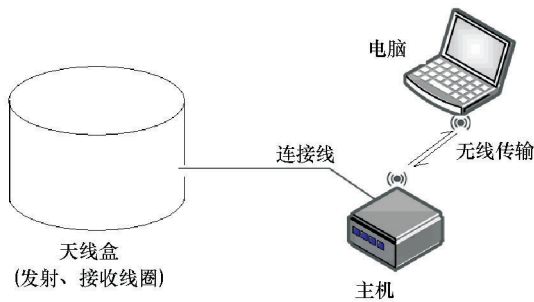


图 2 HPTEM-18 型高精度瞬变电磁系统
Fig.2 The system of HPTEM-18

3.3 数据采集

采用 HPOCTEM-18 高精度瞬变电磁仪数据采集时,关键是注意发射频率和叠加次数的选择。

HPOCTEM-18 高精度瞬变电磁仪的发送频率通常可选择 25 Hz、6.25 Hz 和 2.5 Hz 这 3 个频率,同一条测线应设置同一个发射频率。其勘探深度和发送频率有关,勘探深度越深所要求的发送频率越低,反之则发送频率越高。通过实地测量,本次工作频率选择为 6.25 Hz 时,勘探深度已达 150 m,能够满足勘探深度要求,因此工作频率选择 6.25 Hz。

叠加次数的选择则主要与当地的噪声水平有关,理论上叠加次数越大,采集到的衰减曲线信号信噪比越高,叠加次数一般设置 100~300 次。本次试验工作中,经过实地测量,叠加次数为 200 次时,数据信噪比已经较高,所以选择 200 次叠加次数。

数据采集时,逐个测点进行测量,仪器天线盒放置于测点上,测量时,主机、电脑和工作人员应远离天线盒,减少人为干扰。

3.4 数据处理

数据处理采用仪器自带软件进行。首先根据测量到的各测点的电位差,计算出各测点的频率—视电阻率曲线;其次,剔除畸变点或飞点,加载各测点的高程;然后对整条测线的频率—视电阻数据进行

带地形的拟二维约束反演,得到测线的深度-电阻率剖面;最后用作图软件作出测线的深度-电阻率剖面图,并结合地质资料进行异常解释。

4 结果分析

4.1 S1 线

S1 测线布置在已知采空区上方,此处地层也较平缓,地表覆盖层平均厚约 10 m。从矿山井巷资料中可知,在测线 93.5~97.5 m 处为一主井巷道垂直经过测线,巷道底部标高 20 m,穿过测线几米之后,巷道消失。S1 线其他位置有无采空区无法确定。

图 3 为 S1 测线的等值反磁通瞬变电磁法的反演电阻率剖面,从图中可以看出,S1 线的浅部小于 $100\ \Omega\cdot\text{m}$ 的低阻层厚约 10 m,正好对应覆盖层厚度。在测线 40~96 m、标高 40 m~10 m 范围内,电阻率等值线突然下凹,存在两处明显低阻异常区(异常区编号分别为 1-1、1-2),电阻率一般小于 $300\ \Omega\cdot\text{m}$ 。已知主井巷道(图 3 中的实线矩形框)正好位于 1-2 号异常区范围内,且石膏矿体也正正好在这个埋深范围内,基本可以推断此低阻处异常区域即为采空区。可见,等值反磁通瞬变电磁法对石膏矿采空区的反映较好。在测线上还有另外一处低阻异常区——1-1号低阻异常区,与已知采空区的电性特征相似,推断也为采空区。可见,该矿区采空区较多,采空区多为相邻的一小段一小段的采空区,中间多被一段高阻岩体相隔,这与石膏矿“蜂窝式”开采极为相似,中间岩体应该是开采时留下的安全矿柱。

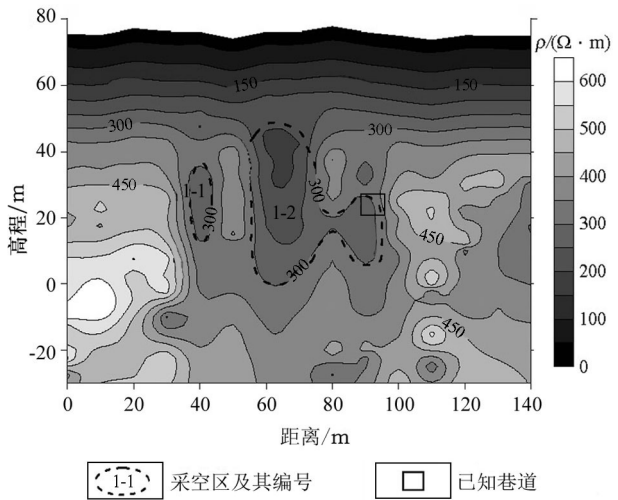


图 3 S1 线 OCTEM 反演电阻率剖面
Fig.3 The iversion resistivity profile of OCTEM on line S1

图 3 中其他区域的电阻率等值线较平缓,反映出地层基本为水平层状;电阻率基本是从浅部至深部逐渐增大,这与浅部岩石风化严重、越往深部岩石越完整相吻合。

4.2 S2 线

S2 测线与 S1 线平行,线距约 80 m,地层几乎一致。S2 线布置在一个已知地面塌陷坑上,塌陷坑近似圆形,测线从塌陷坑中间穿过,塌陷坑在 S2 测线 45~100 m 范围内。地质人员分析塌陷坑的形成主要是受地下采空区影响,推测地下存在采空区,但是采空区的位置目前无法判断。

图 4 为 S2 测线的等值反磁通瞬变电磁法的反演电阻率剖面,从图中可以看出,S2 线剖面中存在三处低阻异常区(异常区编号分别为 2-1、2-2、2-3),对比 S1 线,这三处异常区的电性特征与 S1 线的采空区电性特征极其相似,电阻率值较低,一般小于 300 Ω·m,电阻率曲线下凹,或呈封闭圈状,或呈漏斗状,因此推测这三处异常为采空区。

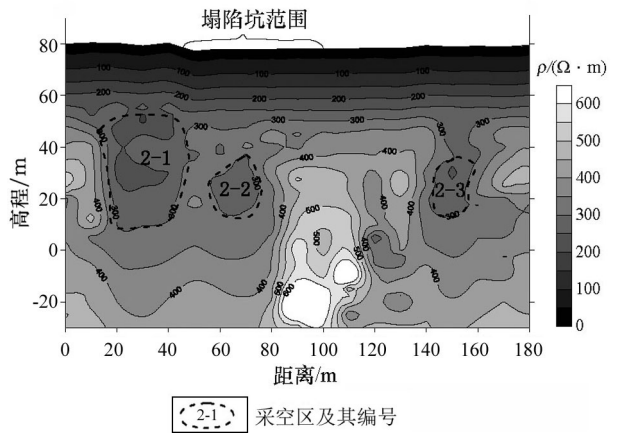


图 4 S2 线 OCTEM 反演电阻率剖面

Fig.4 The iversion resistivity profile of OCTEM on line S2

其中 2-1 和 2-2 两处采空区位于塌陷坑的下方,采空区 2-2 位于塌陷坑正下方,采空区 2-1 位于塌陷坑斜下方,这与地质推断一致,地下确实存在采空区,正是受采空区的影响,地面才产生了塌陷坑。从 S2 线的电阻率剖面分析,这两处采空区的上部电阻率较低,推测石膏矿顶板岩层应该开裂、破碎或垮塌,导致地表水夹带浅部泥沙从岩石裂缝或垮塌位置涌入采空区,从而产生地面塌陷。但是塌陷坑不一定出现在采空区正上方,因此,采空区正上方及其附近影响范围内的区域都应该是本次地质灾害治理需要重点关注的区域。

本次试验工作通过在已知存在采空区的测线

S1 线和已知存在塌陷坑的测线 S2 线上开展等值反磁通瞬变电磁法,很好地验证了等值反磁通瞬变电磁法对石膏矿采矿去的探测效果。后续通过在该矿区及附近开展等值反磁通瞬变电磁法全面勘查工作,查明了勘查区的采区分布范围,为地面塌陷灾害治理提供了详细资料。

5 结论

1) 本文通过在两条实验测线上开展等值反磁通瞬变电磁法实验,发现等值反磁通瞬变电磁法对石膏矿采空区的探测效果显著。在等值反磁通瞬变电磁法的反演电阻率剖面中,石膏矿采空区为明显的下凹低阻异常带,与未开采区域存在明显的区别,很容易判断出采空区的范围。验证了在临澧某无主石膏矿开展等值反磁通瞬变电磁法是可行的,后续通过在该矿区全面开展等值反磁通瞬变电磁法勘查工作,查明了勘查区采空区分布范围,为地面塌陷灾害治理划分了重点防治区域。

2) 对于类似临澧某无主石膏矿的矿区,采空区多被水或泥充填,为低阻电性,利用等值反磁通瞬变电磁法来探测这类浅部采空区也是可行的。但是,本文并未对上下围岩未被破坏、内部干燥的石膏矿采空区做研究,理论上这种石膏矿采空区为高阻电性,等值反磁通瞬变电磁法是否有效还有待研究。

参考文献 (References):

[1] 牛之琰.时间域电磁法原理[M].长沙:中南大学出版社,2007.
Niu Z L. Principle of time domain electromagnetic method[M]. Chang-sha: Central South University Press,2007.

[2] 李貅.瞬变电磁测深的理论与应用[M].西安:陕西科学技术出版社,2002.
Li X. Theory and application of TEM sounding[M].Xian: Shaanxi Science and Technology Press,2002.

[3] 薛国强,潘冬明,于景邨.煤矿采空区地球物理探测应用综述[J].地球物理学进展,2018,33(5):2187-2192.
Xue G Q,Pan D M,Yu J C. Review the applications of geophysical methods for mapping coal-mine voids[J]. Progress in Geophysics, 2018,33(5):2187-2192.

[4] 刘恋,姜志海,藏公瑾.积水采空区瞬变电磁响应微分解释方法[J].地球物理学进展,2017,32(4):1621-1627.
Liu L,Jiang Z H,Zang G J. Integrated interpretation method of TEM by differential attenuation of response in mined-out area with water[J]. Progress in Geophysics,2017,32(4):1621-1627.

[5] 薛国强,于景邨.瞬变电磁法在煤炭领域的研究与应用新进展[J].地球物理学进展,2017,32(1):319-326.
Xue G Q,Yu J Q. New development of TEM research and application in coal mine exploration[J]. Progress in Geophysics,2018,33

- (5):2187-2192.
- [6] 席振铎,徐培渊,龙霞,等.正交水平磁偶源的电磁场分布规律[J].地球物理学报,2011,54(6):1642-1648.
Xi Z Z,Xu P Y,Long X,et al. The electromagnetic field distribution generated from the orthogonal horizontal magnetic dipole source[J].Chinese Journal of Geophysics,2011,54(6):1624-1648.
- [7] 胡子君,宋刚,陈兴朋,等.瞬变电磁低噪声前置放大器研制[J].地球物理学进展,2012,27(6):2704-2709.
Hu Z J,Song G,Chen X P,et al. Research on low noise preamplifier of transient electromagnetic instrument[J]. Progress in Geophysics,2012,27(6):2704-2709.
- [8] 席振铎,龙霞,周胜,等.基于等值反磁通原理的浅层瞬变电磁法[J].地球物理学报,2016,59(9):3428-3435.
Xi Z Z,Long X,Zhou S,et al. Opposing coils transient electromagnetic method for shallow subsurface detection[J]. Chinese Journal of Geophysics,2016,59(9):3428-3435.
- [9] 高远.等值反磁通瞬变电磁法在城镇地质灾害调查中的应用[J].煤田地质与勘探,2018,46(3):152-156.
Gao Y. The application of opposing coils transient electromagnetics method in geological hazard investigation of town[J]. Coal Geology & Exploration,2018,46(3):152-153.
- [10] 王银,席振铎,蒋欢,等.等值反磁通瞬变电磁法在探测岩溶病害中的应用[J].物探与化探,2017,41(2):360-363.
Wang Y,Xi Z Z,Jiang H,et al. The application research on the detection of karst disease of airport runway based on OCTEM[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2017,41(2):360-363.
- [11] 赖刘保,陈昌彦,张辉,等.浅层瞬变电磁法在城市道路地下病害检测中的应用[J].地球物理学进展,2016,31(6):2743-2746.
- Lai L B,Chen C Y,Zhang H,et al. Application of shallow transient electromagnetic of city road disease[J]. Progress in Geophysics,2016,31(6):2743-2746.
- [12] 周超,赵思为.等值反磁通瞬变电磁法在轨道交通勘探中的应用[J].工程地球物理学报,2018,15(1):60-64.
Zhou C,Zhao S W. The application of opposing coils transient electromagnetics method to exploration of rail transit[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2018,15(1):60-64.
- [13] 李有能.等值反磁通瞬变电磁法在溶洞堆积体探测中的应用[J].铁道勘察,2017,43(5):96-98.
Li Y N. Application of OCTEM in detecting accumulation body in karst cave[J]. Railway Investigation and Surveying,2017,43(5):96-98.
- [14] 李建平.等值反磁通瞬变电磁法在高山隧道施工选线中的应用[J].兰州理工大学学报,2018,44(1):143-147.
Li J P. Application of opposing coils electromagnetometry in route selection for alpine tunnel construction[J]. Journal of Lanzhou University of Technology,2018,44(1):143-147.
- [15] 彭星亮,席振铎,王鹤,等.等值反磁通瞬变电磁法在地质灾害探测中的应用对比[J].西部探矿工程,2018,30(8):147-150.
Peng X L,Xi Z Z,Wang H,et al. Application of opposing coils transient electromagnetic method in geological disasters detection[J]. West-china Exploration Engineering,2018,30(8):147-150.
- [16] 杨建明,王洪昌,沙椿.基于等值反磁通瞬变电磁法的岩溶探测分析[J].物探与化探,2018,42(4):846-850.
Yang J M,Wang H C,Sha C. An analysis of karst exploration based on opposing coils transient electromagnetic method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2018,42(4):846-850.

The application effect on detecting goaf of gypsum mine by opposing coils transient electromagnetics method

GAO Yuan

(Coal Geological Exploration Institute of Hunan Province, Changsha 410014, China)

Abstract: In order to study the detection effect of opposing coils transient electromagnetics method on the goaf of a gypsum mine in Linli, the author arranged two lines in the mining area for the experiment of opposing coils transient electromagnetics method. A line was arranged in the area without goaf., and the other line was located above the known goaf. By comparing the results of the two lines, it can be seen that, in the inversion resistivity profile of the opposing coils transient electromagnetics method, the resistivity isoline without goaf is gentle and layered, which basically reflects the layered characteristics of the strata. The resistivity isoline with goaf is obviously concave, and the resistivity value is low, which is a low resistivity abnormal zone. It can be seen that the opposing coils transient electromagnetics method is effective in detecting the goaf of a gypsum mine in Linli, and can determine the basic location of the goaf. It can be used to detect goaf of gypsum ore in this gypsum mining area or similar gypsum mining areas.

Key words: equal and reverse magnetic flux; transient electromagnetics method; goaf; gypsum

(本文编辑:沈效群)