



煤矿安全生产最新技术与国家强制性标准推广系列丛书

低热损冷源介质 输送技术及高效热交换技术 实用手册

◎ 主编 王朝阳

中国科技文化出版社

目 录

第一篇 矿井热害勘探预测与治理总论

第一章 概述	(3)
第一节 矿井热害	(3)
第二节 矿井高温环境的表示方法	(4)
第三节 世界各国矿井井下气象参数标准	(9)
第四节 矿井热源和湿源分析	(17)
第五节 矿井高温、高湿环境对人体健康和劳动效率的影响	(24)
第二章 我国矿井热害现状及类型	(29)
第一节 我国矿井热害现状	(29)
第二节 我国矿井热害类型	(34)
第三章 矿床普查勘探时对矿井热害的预测评价	(91)
第一节 矿床普查勘探时对矿井热害预测评价的目的和任务	(91)
第二节 各个普查勘探阶段对地温调研工作的布置原则和要求	(92)
第三节 矿床普查勘探时矿床地温调查研究应注意的一些技术方法 问题	(101)
第四节 岩石热物理性质测定的取样	(118)
第五节 热水型矿床地下热水动态的观测研究	(119)
第六节 勘探报告的编写	(120)
第四章 我国矿井热害治理措施	(122)
第一节 概述	(122)
第二节 我国各种类型矿井热害治理的经验和教训	(150)

第五章 矿井地热的综合利用	(193)
第一节 矿井地下热水的综合利用	(193)
第二节 矿井地热的利用	(202)

第二篇 矿山低热损冷源介质输送技术降温概论

第一章 矿山地热研究的现状、趋势和存在问题	(211)
第一节 矿山热害	(213)
第二节 矿井空气增温的热源	(214)
第三节 热矿山的劳动环境	(222)
第四节 地热工作的重要性	(227)
第二章 矿井降温技术研究的现状、趋势和存在问题	(228)
第一节 概述	(228)
第二节 矿井降温技术	(231)

第三篇 矿山地热循环与监测治理原理

第一章 热传递的基本概念	(253)
第一节 温度、温度场和热	(254)
第二节 热传导	(255)
第三节 热对流	(259)
第四节 热辐射	(262)
第二章 大地热流及地球的内热	(265)
第一节 大地热流的基本概念及测试方法	(265)
第二节 地表热流分布	(268)
第三节 地球内部热状态	(277)
第三章 影响区域地温场的状况及主要因素	(290)
第一节 地壳的热性质	(290)

第二节 地壳最上层的温度	(298)
第三节 影响区域地温场的主要因素	(305)
第四章 钻孔测温仪器	(322)
第一节 钻孔测温仪器的类型	(322)
第二节 几种常用的钻孔测温仪器	(326)
第三节 频率测温仪与连续测温仪	(338)
第五章 钻孔温度测量	(348)
第一节 钻探作业的温度场效应	(348)
第二节 利用井底温度测量推求平衡温度的方法	(356)
第三节 钻孔的近似稳态温度曲线	(366)
第四节 地下水垂直运动的温度场效应	(369)
第六章 岩石热物理性质测定	(374)
第一节 岩石热导率测试方法概述	(374)
第二节 几种常用的岩石热导率测量仪器	(377)
第三节 岩石比热容、密度测定及岩石放射性生热率的确定方法	(388)
第四节 岩石热物理性质测试样品的选取与制备	(391)
第七章 水化学方法在矿区热水研究中的应用	(394)
第一节 各种成因类型地下水化学成分特征	(394)
第二节 氢、氧同位素在地下水研究中的应用	(402)
第三节 水化学用于矿区热水研究实例	(408)
第八章 煤田地质勘探中的地热工作	(418)
第一节 煤田勘探中地热工作的任务	(418)
第二节 测温钻孔的布置	(420)
第三节 钻孔测温中应注意的问题	(423)
第四节 测温资料的整理	(428)
第九章 基建和生产矿井的地热工作	(437)
第一节 矿井地热工作的特点和任务	(437)

第二节 基建和生产矿井的测温工作	(439)
第三节 国内典型热矿井地热地质工作举例	(449)
第十章 矿山地温类型及实例剖析	(456)
第一节 概述	(456)
第二节 矿山地温类型	(457)
第三节 矿区地温研究实例	(460)
第十一章 矿区深部地温预测方法及实例	(497)
第一节 深部地温预测的一般原理	(497)
第二节 矿区深部地温预测实例	(513)
第十二章 矿井地热的利用	(522)
第一节 利用地热预热矿井进风	(522)
第二节 矿井热水的利用	(529)

第四篇 矿井热害与冷源介质输送及高效热交换技术推广应用

第一章 矿内湿空气	(545)
第一节 湿空气的成分	(545)
第二节 气体状态方程式	(546)
第三节 湿空气的状态参数	(547)
第四节 湿球温度与露点温度	(556)
第五节 湿空气 $i-d$ 图的绘制与应用	(559)
第二章 矿内传热学基础	(573)
第一节 稳定导热	(573)
第二节 辐射换热	(575)
第三节 对流放热	(577)
第四节 总传热系数	(582)
第五节 湿表面的传热	(584)
第三章 人与热环境	(587)

第一节 人体的热平衡	(587)
第二节 人体的热调节与热适应	(597)
第四章 热环境的评估	(609)
第一节 热害防治规程	(609)
第二节 热应力指标	(613)
第三节 人体热调节模型	(626)
第四节 热病及其防治	(628)
第五节 体温与环境热应力	(633)
第六节 劳动生产率与热应力的关系	(641)
第五章 矿内热源	(646)
第一节 地表大气状态的变化	(646)
第二节 空气的自压缩温升	(649)
第三节 围岩传热	(652)
第四节 机电设备放热	(673)
第五节 其它热源	(676)
第六章 井下风流的热交换及热状态预测	(680)
第一节 井下空气的特征	(680)
第二节 风流通过巷道的热交换	(682)
第三节 风流通过采掘工作面的热交换	(686)
第四节 风流通过井筒的热交换	(690)
第五节 矿内风流热状态预测	(691)
第六节 井底车场风流热状态预测	(703)
第七节 矿内巷道风流热状态预测	(706)
第八节 采掘工作面风流热状态预测	(710)
第九节 矿床无人工制冷的极限开采深度预测	(713)
第十节 有热水巷道的风流热状态预测	(715)
第十一节 热系数的计算	(716)
第七章 改善矿内气候条件的方法	(721)

目 录

第一节 概述	(721)
第二节 改善矿内气候条件的一般措施	(722)
第三节 个体防护	(728)
第四节 人工冷却风流	(730)
第五节 矿井热水的防治	(733)
第八章 制冷原理与低热损冷源介质输送技术及其应用	(736)
第一节 制冷机原理	(736)
第二节 矿用制冷设备的技术要求	(743)
第三节 矿用制冷设备的选择计算	(744)
第四节 制冷剂	(753)
第五节 载冷剂	(756)
第六节 润滑油	(757)
第九章 高效热交换技术与矿用换热器	(764)
第一节 表面式空气冷却器	(765)
第二节 喷雾式空气冷却器	(784)
第三节 高压水的减压装置	(787)
第四节 矿用制冷机的排热方法	(793)
第五节 管道隔热与计算	(802)
第十章 矿井空调设计	(807)
第一节 矿井空调系统	(807)
第二节 制冷站负荷的确定	(811)
第三节 制冷站及制冷设备的选择	(818)
第四节 矿内风流冷却地点和空冷器参数的确定	(821)
第五节 矿井空调系统供水设计	(824)
第六节 矿井空调的费用分析	(830)

三、测温中常见的故障及其排除

这里就使用半导体热敏电阻井温仪进行钻井测温时,常遇到的问题作一介绍。

1. 测温中途探头受阻

钻孔测温中,有时探头下不去,中途受阻。这可能有两种原因,一种是孔壁有掉块或粘土质岩膨胀使孔径收缩,发生这种情况,探头受阻来得突然;另一种是泥浆稠度大,探头及电缆的重量已不能克服泥浆的阻力,因此停滞不前,这时探头下行逐渐缓慢直至停止。对于前一种故障,可以小幅度快速升降电缆的方式进行冲击,如若障碍物不多可一冲而过。若经反复冲击仍难以通过,则应停止冲击,从孔中提出电缆改用下钻具捅孔的方法进行处理。一般情况下,用钻具捅孔障碍即可以排除。对于后一种情况,同样需下钻具捅孔,此种处理措施肯定有效。采取只下钻具捅孔,而不冲孔的处理措施,对钻孔温度场的扰乱很小,一般在 $0.2 \sim 0.5^{\circ}\text{C}$ 范围内。

遇到探头受阻时,不要輕易用井液冲孔,因为井液与深部围岩温差大,对钻孔温度扰动很大。进行冲孔后,往往需重新使钻孔静置相当长的时间才能消除这种干扰。

2. 电线漏电

测温中,经常发生电线漏电故障。电线漏电多发生于电缆与探头导线的接头部位和其他电线破损处。在深井中,由于水压太大,漏电的机会增加,水从导线接头缝隙和表皮破损裂口进入,若两根或三根导线破口都裸露泡在水中,就形成工作电流的短路串通,此即漏电。当有漏电现象发生时,电桥检流计指针漂移不稳,电阻突然降低,转换为温度值,则为温度突然升高。严重漏电时,指针忽左忽右,剧烈摆动。极轻微的漏电,指针漂移不太明显,要细心观察并结合电阻值的变化幅度作出判断。

确定电线漏电后,记住发生故障的电线部位,立即提升,取出检查,找出破口和进水位置,将导线擦干,重新包扎密封。为了减少漏电事故发生,保证测

温的质量和工作效率,测温电缆绝缘程度要定期检查,绝缘层老化的线要更换。

因导线漏电致使温度畸变与钻孔温度场自然变化而引起的温度异常是容易区别的,后者在测温时是一种稳定的状态,指针不会出现漂移不定的现象。

3. 探头热敏电阻破损

探头热敏电阻损伤,可能有两种情况,一种是热敏电阻感温端点(玻璃珠状或针头状)破损;另一种是热敏电阻两端引线折断。感温端点破损,引线不断,虽然还能感温,但其电阻值和温度的相关关系已经不符合原标定的数值。发现这种可疑情况,即应从新标定检查,证实确已损坏,探头不能再用。若感温端点引线折断,则表现为电阻值极大,于电桥测量臂上加大电阻值,也不能补偿,而使电桥失去平衡。探头受损,必须更换。为此,在野外测温时,应携带经过标定的备用探头。为了减少和避免探头的损伤,在搬运、装卸和使用过程中,要格外精心保护。

第四节 测温资料的整理

在勘探中取得的原始测温资料,一方面由于钻孔测温类型的不同,使其质量各异。对于简易测温资料以及部分近似稳态测温资料,经校正后才能用于地温场评定。另一方面原始的测温资料,彼此是孤立分散的,须经集中、分析、归纳,使之系统化,才能全面反映地温场面貌。因此,资料整理是地温研究的重要步骤,这里就资料整理中带有普遍性的问题作必要的讨论。

一、非稳态测温资料的校正

关于钻孔非稳态测温结果的校正方法,总的原则是利用恒温带温度、中性点和井底温度作为基本依据,对非稳态测温曲线作合理的修正,这在前面第五章中已经阐述过。这里就某些近似稳态测温和简易测温的井底温度校正问题

作补充性的阐述。

1. 关于近似稳态井底温度的校正

现行的煤田勘探测温规程中规定,对于近似稳态测温类型,钻孔终孔后停留三天的,进行三次间断测温,最后一次测温稳定时间为三天。一般情况下,静止三天后井底温度已达原始岩温,除非测温点位置未达井底。在特殊情况下,由于岩石热扩散率低(如煤层、炭质页岩、油页岩等)或由于钻孔直径大,稳定三天,井底温度尚不足以恢复平衡时,有必要进行校正。

因近似稳态测温孔至少进行过三次测温,井底部位至少有三个时间点的温度数据,无论采用耶格-库珀的方法还是用洛斯阿拉莫斯科学实验室的方法进行校正,都是易行的。若采用前者,可先求出每个测温时间点的 C 值及相应的 $F(0, \alpha, \tau)$ 值,然后作 $F(0, \alpha, \tau)$ 与温度 T 的相关直线。当以 $F(0, \alpha, \tau)$ 为纵坐标、温度 (T) 为横坐标时,该直线在温度坐标的截距即为原始岩温。方法原理及具体做法详见第五章图 5-7。

2. 关于简易测温的井底温度的校正

简易测温是钻孔终止大约 12 小时内进行的两次测温,这类资料在勘探中是大量的,对此类井底温度的校正作法各异。实践表明,采用井底温度对数回归推算 72 小时温度的方法简便易行且有良好的精度。

该方法基于统计确认,井底温度恢复过程中,温度变化与时间的对数有线性关系,即

$$\Delta\theta = \theta - \theta_0 = B \ln t \quad (8-1)$$

式中 θ ——停钻后某一时间 t 的井底温度;

θ_0 ——钻孔终止瞬间的井底温度;

t ——从停钻时起算的时间;

B ——温度恢复系数,为常数。

基于上式,对于简易测温的不同时间的两次井底温度,可以写出两个方程式并联立,从而可求得常数 B 值为:

$$B = (\theta_2 - \theta_1) / \ln \frac{t_2}{t_1} \quad (8-2)$$

式中 t_1, t_2 ——分别为第一次及第二次测温时间;

θ_1, θ_2 ——分别为第一次及第二次测得的井底温度。

当 B 值已知时,就可利用简易测温的井底温度推算出预期达到稳定时间的温度。已经论证过,停钻三天(72 小时)的井底温度,在一般条件下已达稳定,其时的温度即为原始岩温。于是有:

$$\theta_r = \theta_i + B \ln \frac{72}{t_i} \quad (8-3)$$

式中 θ_r ——井底岩温(72h 的井底温度);

θ_i ——简易测温中某一次的井底温度;

t_i ——简易测温中某一次的测温时间(h)。

这一方法所得结果,经过与大量稳态,准稳态测温孔资料的验算和对比,误差不超过 $\pm 0.3 \sim 0.5^\circ\text{C}$ 。

二、钻孔温度曲线图

钻孔温度-深度图是测温钻孔的基本资料图件,每个测温孔都要作。图的左侧放钻孔柱状图,右侧为井温曲线图,其深度互相对应。从图上看,温度随深度的变化及其与柱状地质剖面的对应关系,可一目了然。作为基本资料图件,应标明测温曲线的顺序、测温时间及稳定时间等数据,图的纵横比例要安排适当。图 8-2 是一钻孔温度-深度曲线实例。

钻孔温度曲线的形态及其变化反映了地温场控制条件的特点。测温曲线可分为两种基本类型,即传导型和对流型。传导型温度梯度受控于背景热流值和岩石热导率,温度曲线是具有一定斜率的直线;对流型温度梯度是在流体的热对流作用控制下形成的,温度梯度值极小或为零,温度曲线近乎竖直,与传导型温度梯度形成明显对照(图 8-3a、b)。兼有传导和对流两种作用的控制,温度曲线呈现出弯曲状。当水流向下运动时,呈现向下的弯曲,即下凹形;而水流向上运动时,呈向上的弯曲,即上凸形。此时,温度梯度不再是恒定不变的,而是随深度而改变。图 8-3c 为兼有垂直上升水流作用的传导与对流

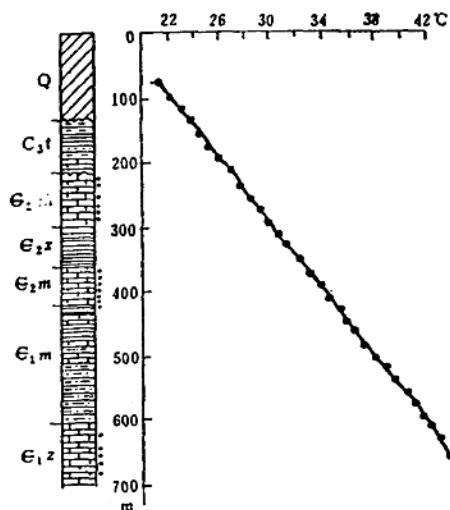


图 8-2 平顶山 18-8 钻孔温度 - 深度图

(测温日期: 1975.10.15; 钻孔静止时间: 19 天)

Q—第四系; C_3t —石炭系太原组; E_{2sh} —寒武系张夏组; E_{2x} —寒武系徐庄组;

E_{2m} —寒武系毛庄组; E_{1m} —寒武系馒头组; E_{1z} —寒武系硃砂洞组;

·—热导率岩样采取位置

混合型的温度曲线实例。

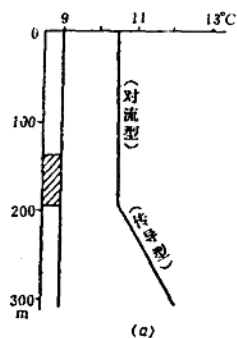


图 8-3a 涿鹿矾山 103 孔自流水井, 140~190m 为强含水层, 含水层以上厚度不变(对流型), 含水层以下温度随深度正常增温(传导型)

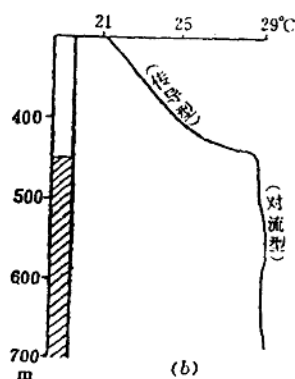


图 8-3b 唐山岳 42 孔, 460m

以下巨厚的碳酸盐岩系岩溶发育, 地下水流强劲, 整个井段温度几乎无变化(对流型), 含水层以上温度梯度转为正常(传导型)

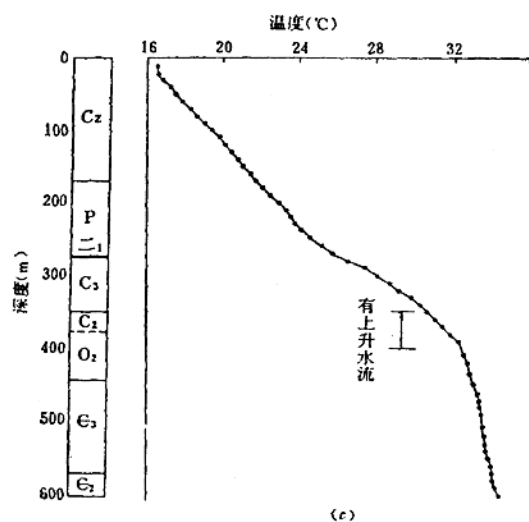


图 8-3c 新郑 911 孔, 350~390m 段有垂直上升水流, 温度曲线呈上凸型

此外, 还有一种温度曲线上出现畸形变化的类型, 温度在某个深度不连续, 发生突变, 这是由于特殊原因造成的, 需视具体条件作出判断。图 8-4 为

一温度曲线畸形变化的实例。该孔于深度 217.9m 时进行首次测温,在 150m 处因遇断层漏水,井液漏失严重,温度曲线发生突变,变幅达 4°C ,经多次重复测量,温度曲线形态如(1)。其后,经注水泥浆堵漏,井液漏失现象消失,钻孔温度畸变现象也不复出现。曲线(2)是该孔深度达 683.1m,堵漏后的测温结果。

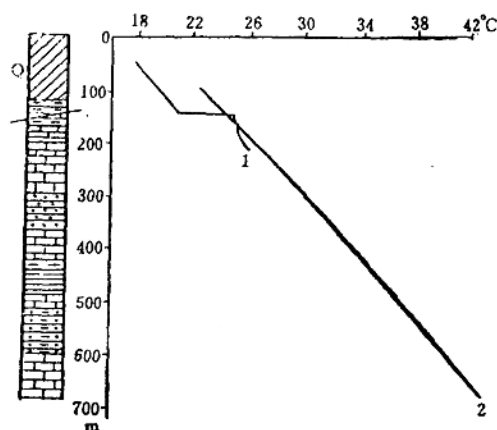


图 8-4 钻孔温度曲线畸形变化示例

1—于 1975.4.26,孔深 217.9m 时测温,曲线呈畸形;2—于 1975.10.15,孔深 683.1m,钻孔堵漏以后的测温曲线

将一个钻孔的多次测温曲线放在一起对照,可以看清钻孔温度恢复过程和由不稳定过渡到稳定的变化规律。图 8-5 是黄县煤田一个钻孔的多次测温曲线。

将研究区域内众多钻孔温度曲线绘于同一图面上,易于对比它们的变化,发现其分布规律。图 8-6 是平顶山煤盆南翼,由地下水补给区到顶托排泄区的一组钻孔测温曲线。图中清楚地表明,从地下水的补给区向排泄区,地温梯度有逐渐增高之趋势。

三、地温剖面图及平面图

地温剖面图及平面图是反映地温场空间分布的常用形式。平面图通常有

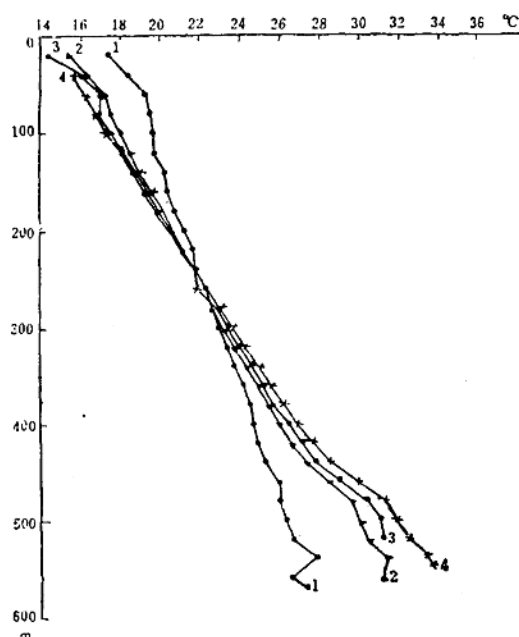


图 8-5 黄县煤田 6-2 孔温度曲线

1—停钻即测,测温深度 570m;2—停钻 15h 测温;3—停钻 27h 测温;4—停钻 57h 测温

某一深度(或某一高程)温度图、某一层位温度图、某一温度的深度图、某一界面以上平均地温梯度图等。这里就编图中一般性技术问题提出几点要求:

(1)反映地温场空间变化的剖面图和平面图,必须以稳态和近似稳态测温资料为基础,简易测温资料须经适当校正处理后投入使用。

(2)在有强承压含水层分布的矿区,要对承压含水层揭穿前、后的测温资料加以区分。揭穿强含水层后有水上涌的钻孔,其温度与含水层揭穿前的温度状况迥然不同,前者由于有水上涌,井孔的温度是水的流温,不代表原始岩温。

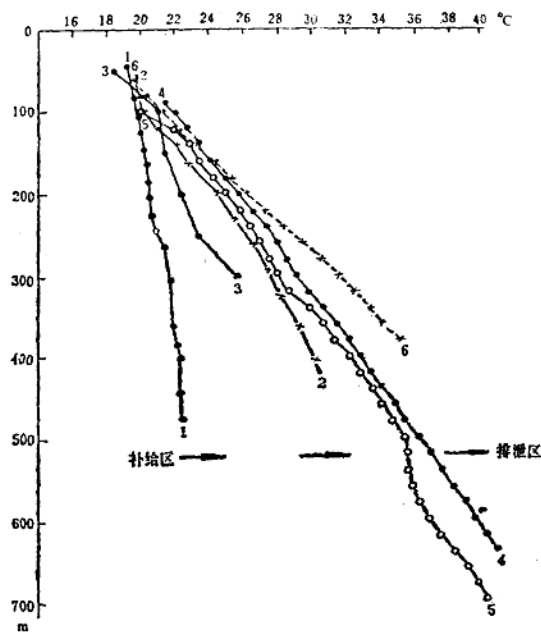
(3)在编图时,常遇到某些钻孔测温深度不够的情况,以致某些地段得不到资料控制,这时应对测温资料作一些必要的外推,以获得编图所需的数据,其方法如下:

①由浅推深。即利用实测温度资料向深处外推,如果外推段的岩层性质

和上段相同或基本相似,可据实测稳态温度曲线或经校正的近稳曲线,按自然梯度,直延至目的层深度,求得温度值;

②对比法。如果外推的深度段岩性与测温段有明显差异,可根据该地区相同构造部位、相同岩性段的已知地温梯度值计算下段的温度;

③估算法。若所研究的钻孔,其温度场符合或基本符合一维热传导条件下,由深部而来的垂向热流在各层段都是相同的特点,即可根据浅部段实测地温梯度值与岩石热导率资料,以及深部预测段岩石热性质的变化,按照热流值相等原理,求出待测段的地温梯度和温度;



序号	1	2	3	4	5	6
钻孔	52-11	13-6	39-8	18-8	13-17	10-5
温度梯度(°C/100m)	1.2	3.48	3.11	3.80	3.40	4.9

图 8-6 平顶山煤盆南翼沿地下径流方向的地温变化

④编图过程中,应注意可能引起温度场变化的地质构造特点。如盖层厚薄的变化,基底起伏及构造形态,断裂带位置、性质及断距等,同时也要注意水文地质条件的变化,以便使编制的图件更好地反映客观实际。