

# 蒙大拿梅丽斯维尔 (MARYSVILLE) 的 地 热 资 源

DAVID D. BLACKWELL

1974年8月26日~30日在加利福尼亚州的圣弗兰西斯科举行的能量转化技术会议第九次联会上由作者提出

## 提 要

利用地下聚集的能量发电是一项较新的发展。最大量的潜在能量包含在“热、干”岩石里，那里或者是没有充分容量的流体，或者是这些流体缺乏能以对流方式传递热的活动性。梅丽斯维尔地热区就出现了这样的系统。该地高热流资源（高于世界平均数13倍）可能是埋深仅1~2公里（2~6,000次）的近期熔化岩石形成的。地热区的发现和勘探已作了描述，并估计了电力生产潜力。

根据最近知道的热流异常的范围和强

度，基于某些假设的基础上，25年内可能潜在力约为200~1000兆瓦（电力）。美国西部地热资源的估计，根据梅丽斯维尔地热的模式，在一个世纪内，可以超过100,000兆瓦（电力）。如果地热动力对美国是一种很重要的动力选择来源，而且资源是成功的话，在今天发展的情况下，工艺学和科学的研究已使在技术上有可能利用这种资源。

## 绪 言

在地热区，作为集聚的地球内热的利用已有很长历史了。首先在地热区利用地

热发电是始于1904年意大利的拉德瑞罗 (Lardereillo), 但是它赶不上新近发展的盖依塞尔 (Geysers) 地热田。盖依塞尔地热田位于加利福尼亚索诺马 (Sonoma) 郡的圣弗兰西斯科以北大约100公里, 作为美国对地热能的应用, 于1962年开始的。现在, 发展了的盖依塞尔地热田的发电总量已稍稍超过400,000瓩, 虽然这个热田最终的潜力被估算为这个数字的几倍。

北美生产电力的其他地热区包括巴贾·加利福尼亚的瑟洛·普丽图 (Cerro Prieto)、中墨西哥的佩瑟 (pathe) 和埃尔·萨尔瓦多 (El Salvador) 的阿华奇帕 (Ahuchapan)。

地球上任何地方, 温度都随着深度的增加而增加, 但有的地方增加得比其他地方快, 尤其是在造山运动或火山作用地区, 来自内部的地热流比地表稳定部分的高得多。大部分地热资源是在这些活动带内找出的, 虽然超深井的出现能够改变这个图景, 因为有大量的热能和机械能贮存在一些像海湾沿岸这样的深沉积盆地里。

目前能够勘探的地热区包括两个主要量的特点: (1) 在地表几公里或更少一些深度内有大量的热; (2) 要有能使地下水在岩石内流动的循环系统, 通过这个循环系统, 被钻孔提取地热流的地热库和热岩石之间能以对流方式传递热能。生产钻孔由几百米到像盖依塞尔热田那样的3公里 (9000呎) 深。

地热区可以划分为两类: 第一类, 地下水是以过热蒸汽状态贮存的。这种地热库的压力没有高到能够阻止地下水沸腾, 钻孔进入地热库后就产生在适当压力下能够直接供给汽轮发电机的过热蒸汽。盖依塞尔地热田就是这类地热系统的一个例子。这个类型的地热系统在经济上是有利

的。第二类, 地热区的地下流体像水一样长流不断。这一系统的重要参数是地热岩石的孔隙度, 渗透性和热流温度。对于一定量的岩石孔隙空间和渗透性, 热流温度越高, 地热系统单位面积的潜力越大。

如果地热流体很热, 大部分可以在有控制的条件下在地表瞬间闪跃产生蒸汽, 这些能够瞬间产生蒸汽的部分就直接供给汽轮机。地热流体中剩下的不能瞬间产生蒸汽的部分允许流走或者可以回灌。这个类型的地热区有瑟洛·普利图 (Cerro Prieto), 人们熟知的新西兰北方岛的一个地热区维拉克 (Wairakei)。

如果温度低 (低于 $100^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ ), 那么也许除了空间加热 (取暖) 之外这种水就很少有用。在其他方面, 如果温度高但是孔隙度低, 就不再有使地热流体在地下有效地运动并以对流和传导的方式运移热的足够空间和渗透性, 这样的地热区就属于“热、干岩”地热系统。如果人工刺激技术系统能被发展的话, “热、干”地热系统在将来可能是最重要的。

现在经济利益集中在这样的地区: 流体是过热蒸汽, 或者流体是温度在 $250^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$ 的水, 以便使流体的重要部分可以产生蒸汽。地热区的勘探包含有地质学和地球物理的多方面研究。似乎没有相同的两个地热区, 一个地热区的勘探技术不可能和下一个一样。因此, 勘探计划的设计要有高度灵活性。

现在勘探的大多数地热系统都是因为地表显示而被发现的; 美国西部大约1200个热泉, 其中每个都可能来自一个深部的大地热储。除了有渗漏现象显示的地热区以外, 无疑另外许多地热系统是没有地表证据的, 因为它们不渗漏。

这篇文章里讨论了这样一个“盲”地热区, 包括它被发现的方法、已提出的勘

探类型和该系统可能的动力潜力的简短叙述。本文第二部分简短地讨论了梅丽斯维尔地热区周围地区的显示和就美国西部地热潜力的估计对整个美国西部的乐观信息。

## 梅丽斯维尔地热区

位置:

梅丽斯维尔地热区位于洛矶山北部蒙大拿州的希利纳 (Helena) 东北约 30 公里。大陆分水岭横跨这个蒙大拿州梅丽斯维尔的旧金矿镇以西大约 4 公里的地区。该地区的位置用 M 表示在图 2 里。该区的基岩由大约有十亿年年龄的沉积岩组成。这里围岩有三个火成岩活动幕, 引起小岩体贯入沉积岩中而后冷却。这些事件的时代大约 79、49 和 40 百万年。计算表明, 被这些较早期事件带入的任何热量在现在以前就会被消散掉。在地热异常附近没有近代火山和热泉。最近的热泉离希利纳镇约 30 公里, 最近的年轻火山离黄石国家公园超过 300 公里。该区内在 1800 年代和 1900 年代早期曾有广泛的采金历史。

在 1960 年代, 本区的两个地点用钻孔勘探了浸染钼矿。这个地热区是在调查从南达科他州到太平洋海岸的区域热流过程中发现的。这些测量表明, 本区的热流可达 20 微卡/平方厘米·秒, 高热流异常有几平方公里面积。在这次研究工作期间测定了蒙大拿西部的热流平均背景值大约是 2.0 微卡/平方厘米·秒, 而世界平均热流大约是 1.5 微卡/平方厘米·秒。这样, 本区热流就比已观测到的蒙大拿西部高背景值高出 10 倍。随着这个高热流的发现, 由 Mazzella 在本区作了地球重力场的详细研究。

这一研究资料的分析指示了一个剩余负重力异常和这样一个与高热流值有联系

的质量亏空区域。一个高热流区与一个低密度区联系在一起的明显解释是两种异常都是同一原因产生的, 它们可能是代近熔融岩浆的一个冷却岩浆房引起的。这样, 为了对该区作详细研究, 更进一步的勘探在 1973 年开始了。

## 勘 探

勘探研究开展了区内地质和地球物理特征的详细调查, 包括地重力场、热流分布区的进一步研究、电阻结构空间变化、磁场、地震背景噪声级和光谱频率的测量。此外还包括地质填图、地球化学采样、红外线摄影和微地震测量。所有这些研究提供了有价值的资料, 但最重要和最有意义的结果来自重力、热流和地质研究。

研究结果见图 1 这个地热异常来源的拟议模式。这个模式表示了柱体一侧 ( 图面透视 ) 影响范围达 1/2 公里的一个岩浆房, 其深度延伸根据热流数据确定为 5 公里。组成这个岩体的每一组柱体实际上的顶表示在图 1 里。用于每个柱体的热影响的基本方程式是 Carslaw 和 Taeger 提出的 2、2、10 ( 无限介质的瞬间柱体源 )。图象 ( j images ) 法用来获得一个表面温度边界条件常数, 方程式被微分和计算当  $Z = 0$  时的值, 所以表面地热梯度能被计算出来而与观察数据对比。

假定岩浆房是在瞬间恒定温度  $T_0$  ( 1000 °C ) 时浸位, 仅由于热传导而冷却。假定岩中内外各半个空间到处的热性质是一致的, 在岩浆房中固结以前没有热对流是允许的, 固结潜热的影响没有详细包括在内。对于一个  $L/C$  量的适宜组分的岩石, 假定  $T_0$  高于熔化温度 (  $T_m$  ), 固结潜热的影响是近似的。这里  $L$  是固结潜热,  $C$  是比热。这个模式明显地是简单的, 更详细的模式在以后考虑。

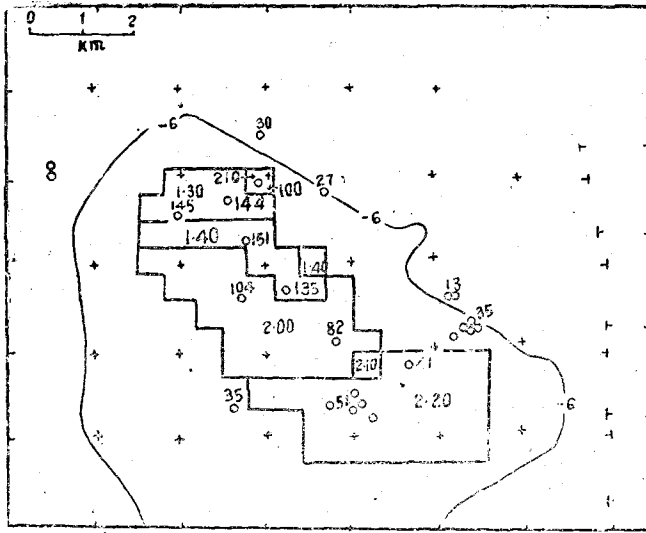


图1: 热流管的热流和重力模式。圆圈表示热流测量点位置, 适当的框表示地热梯度异常。该图也是热流管模式图。每个柱井顶的深度(1.00, 1.30等)以公里为单位。-6毫伽(mgal)是一条重力等值线。假定模式的初始温度为 $1000^{\circ}\text{C}$ 。

对模式进一步分级的讨论可以在 Backwell 和 Bagg 的文章里找到。岩体浸位以来的时期(岩浆最初来自50~100公里的地下)根据瞬间模式是  $10,000 \pm 1,000$  年。如果像实际情况那样, 高热流的来源是岩浆房, 而没有地下水和岩体的相互作用, 因为即使岩体只有1~2公里(3,000~6,000呎)深是没有热泉或温泉, 那么该区将被划为“干、热”地热系统。勿疑, 有一些流体是存在的, 但其量只估百分之几, 而且岩石的渗透性一定是很小的。依当前的一个假说, 如果传导热运移是一种合适的模式的话, 那么 $500^{\circ}\text{C}$ 的温度可能存在于2~3公里(6,000~9,000呎)深度内。

最直接影响解释的两组资料(热流和重力)包括在图1里。有效热流测定值的钻孔位置用空心圈表示, 和每组或每个钻

孔在一起的是那个位置的温度梯度异常。这个梯度异常是观测到的地热梯度减去 $30^{\circ}\text{C}/\text{公里}$ , 后者近似于热流的区域背景值 $2.0$ 微卡/平方厘米·秒和岩石平均导热性 $6.8 \times 10^{-3}$ 卡/厘米·秒·度( $\text{Cal}/\text{cm Sec}^{\circ}\text{C}$ )。模式外边的曲线是剩余重力异常图中的一条等值线。

最低的重力异常值发生在热流异常的上边。大约在相对于区域背景值的-12毫伽(mgal)范围内( $1\text{mgal} = 10^{-3}\text{cm Sec}^2$ ), 热流数据在达到岩体顶部的深度时最敏感, 而重力、数据在异常集中的部位即岩体本体上时最敏感。因此, 两方面的资料是互相映证的, 模式就

利用热流数据来控制岩体顶部的深度, 利用重力数据来控制整个岩体(深度到底)而确立的。岩体的质量亏空被假定由于冷却火成岩和围岩之间有一 $3\text{gm}/\text{cm}^3$ 的密度对比差值引起的。

该模式用其他非重要方面的数据解释进一步作了控制。地质填图提供了和地热异常有关的岩石构造以及围岩方面的资料。磁测数据的解释提供了热流异常位置及控制其北部、东部边缘的证据。电阻率资料和区内很低的岩石孔隙度相一致, 测定的电阻率是相当高的,  $300\sim 500$ 欧姆——米, 与此相反的是, 以流体出现的地热系统的典型值为 $1\sim 5$ 欧姆——米。

地震背景噪声的研究没有显示出与地热区有联系的异常, 这与像维拉克和索尔顿海地热区那样有丰富水的区域大不一样。红外线摄影未发觉地热异常。这个结

果是预想到了的，因为为了使红外线摄影有效似乎需要100微卡/平方厘米·秒的热流值。微地震研究使用了高放大系统的6点排列测震表去探测可能没有感觉的地震或者在100公里远的地方能被常规地震装备记录的地震（里氏地震强度上三级或者少一些的地震）。在地热异常五公里范围内探测区域活动的同时，微震研究在高热流区域内未测出地震事件。

地热异常是由于在不深的地方很近期固结的岩体引起的这种意见是一种有待证实的设想，但是这种年青的火山岩（几千年）出现在美国西部许多地方，如像月亮国家纪念碑（moon National monument）的火山口等。为了进一步研究勘探工作的推断，一个深孔将会在1974年夏天开钻以便确定地热异常的原因、地下温度和流体特点。进一步的地表物探和地质勘探也作了设计。

## 地热资源的推断

如果上段的模式能成立的话，那么地热区将会有很低的孔隙度和渗透性，要证明目前发展这个地热库在经济上是合算的，那流体含量也太小了。但是，由于在较浅部位就有较高的温度，该区对作由热干岩石系统中提取热能的概念试验，可能是理想的。如果这种类型能被经济地利用，那么美国西部的地热发电潜力是很大的（看下面）。假如高热流的确是由冷却中的岩浆房引起的和传导热交换占优势的话，那么近地表的地热梯度可以下推几公里，温度可能达到500℃。相反，在由对流方式搬运热占支配地位的地热区，一旦地热储达到基本温度（通常在200~300℃之间），温度基本上并不随深度的增加而增高。

在梅丽斯维尔，根据传导模式，地热

梯度能用来估计地热区包含的热量，也许还能用来估计这类地区的发电潜力。为了估计这种潜力，假定100℃左右为最小工作温度；所以用地热梯度数据（根据图1，正30℃/公里）计算了100℃等温线的深度和3公里（10,000呎，当前地热钻孔极限）之间的平均温度。用具有一定平均温度的地热区表面面积乘以厚度和平均温度，再乘以密度（2.5 g/cm<sup>3</sup>）和岩石的热容量（0.2 Cal/g·m<sup>3</sup>）得到以卡为单位的总热容量。于是通过单位换算和求出总和，发电潜力就可以计算出来了。

为了获得可靠的数字，假定由地热到电输出率的转换效率为1%。举例来说，如果地热库热容量回收率可能达到10%数量级的话，热到电能的转换率可能也约为10%。用这些假设和来自该地热区的数据来估计梅丽斯维尔地热区的发电潜力，据目前所知面积和开发深度3公里（10,000呎），该区发电能力大约为 $4.2 \times 10^{10}$ 度（ $1.4 \times 10^{11}$  BTU），按200,000瓩的生产功率，可供电力25年。

如果区内开发深度达到5公里（15,000呎），那么，在假定条件的基础上，发电能力将会增加2~4倍（25年内600~1,000兆瓦）。包含在岩石中的任何流体的热效应都不包括在这个计算理。虽然孔隙度可能只是百分之几，水的更高得多的热容量会产生比完全自由流体系统更大量的热贮存。

## 美国西部的地热潜力

导致梅丽斯维尔地热区的发现的多种类型测量在过去十年间在美国西部也都作过了，最新结果由Roy等人 and Sass等人作了概括。这些研究结果和其他附带的可用资料被总结在图2里。图上每个黑点同时代表温度梯度的测量（通常在钻孔150

米或再深一些部位)和导热性。

热流值是从梯度和导热性的乘积算出的,并作了地貌等影响因素的校正。这些研究的重点,过去放在热流区域变化上而不在可能作为电力开发的局部异常类型上。根据热流研究,美国本部的地热流可以分为两个地理区(图2略)洛矶山以东地区有正常热流,而洛矶山以西地区虽然也有正常的甚至低热流区但以高热流区占优势。目前,在夏威夷和阿拉斯加还没有进行这种分析所需要的资料。

高热流区域平均热损耗大约是1吨/公里<sup>2</sup>,对发电来说是一个很小的数量。因此,与其利用天然损耗的地热能倒不如利用地下贮存的热。

由于地热梯度一般低于30℃/公里,除非深度超过2.5~3公里,否则在现在和可予见的将来利用地热能所需要的100℃的温度就达不到,所以正常的和低热流的地区在目前几乎没有或没有潜力。但是钻探技术的进步能够改变这种状况。对于有中温流体出现的深沉积盆地这种少数特殊情况对一般来说是一种例外,尤其是当流体是承压的话,那里也可能有少数孤立的地热异常,像西部的弗吉尼亚、乔治亚和阿堪萨州的温泉群。

相反,有高的区域性热流的美国西部地区对所有地热类型的地热利用都有着重要的潜力。目前,要区分从经济意义上是“干”的地区和可能有商业开发假值的地区是不可能的。试图估计美国西部的干蒸汽和高温水系统的地热潜力等于根据直至1900年提供的资料试图估计美国的石油潜力一样。

可作的最好的事情是辨别出现的有足够强度的有效异常数以为工业勘探提供根据。当有足够数量的钻孔资料时,统计数字才能配属到干蒸汽、高温流体、“热,

干”和低温流体系统的各类异常所占的百分比上。换句话说,这里被识别的地热潜力,目前就能很好地为工业利用。

除了出现的流体数量以外,在“干”系统和商业上可开发的系统之间最终几乎没有差别。在一个几百米级范围内没有“干”岩这样的东西,全部的深钻孔和矿井在各种深度与地下流体还是相遇了。问题是,水到达这样深度的通道是如此曲折,且只占据岩石的一小部分,以致大量的流体是不能经常产生的。多数商业上可利用的系统当其流体相被抽干时,可以变成“干、热”系统,因为只有热储总量的百分之几的热能被移去而为当地液体所吸取。因此,为开发“干”地热系统和技术发展也将给商业地热田作为二次回收技术应用。

图3是高热流区地热梯度的柱状图解。假设有足够的有效测量点,以致地热梯度值代表一个统计上有效的包括各类岩石和热流的样品。尽管这样,一个更精确的分析还是包括了这些可变因素。以标准偏差14.7℃/公里算,平均地热梯度为30.7℃/公里(大约20F/100呎)。高热流区域的面积大约是 $2.1 \times 10^6$ 平方公里(820,000平方哩)。可以用特殊地热梯度出现的频率去乘这个总数就得到了具特殊梯度的总面积的估计。在 $2.1 \times 10^6$ 平方公里内有258个测点,每个测点代表约 $8.8 \times 10^3$ 平方公里的面积。

由地热梯度变为热含量的程序类似上述梅丽斯维尔地热区所用过的程序。计算了100℃等温线深度和3公里(10,000呎)深度之间的平均温度(—100℃)。梯度低于27℃/公里(图3中的点线)的区域就没有提供这种分析的地热潜力。有用深度间隔与平均温度、密度和岩石热容量的乘积就得出热量的卡/平方厘米数。这个单位面积的热量乘以一个特定梯度的点数和

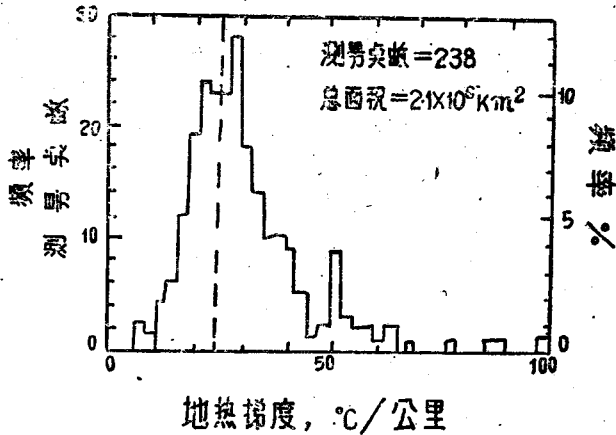


图3：美国西部高热流区的地热梯度柱状图群

单位面积 ( $8.8 \times 10^8$  平方公里)。

发电潜力可以通过单位换算以及相加而计算出来。

图4曲线上的数字像前面讲过的那样是假定地热转换为发电输出率的转换率为1%而计算的。用这些常用的假定计算基本资源为200,000兆瓦世纪(电力)。如果基本资源被扩大到5公里深(15,000呎),那么基本资源也就增加了一个数量级。如前所述,有限孔隙度的影响未作考虑,这将会导致保守的热储量估计。

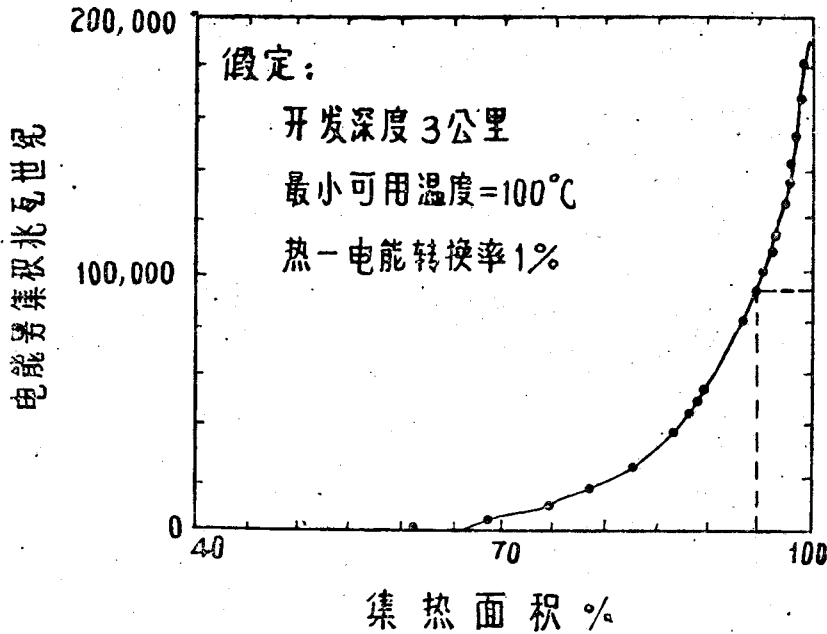


图4: 电能潜力聚集面积函数图群, 根据来自图3的资料以及图上的假定数据。

数据的采用没有包括来自个别区域的特高部分, 其实大多数的测量数值是采用几平方公里范围内几个测量数据的平均数, 而且只有一两个测量数值是在已知热泉附近。大部分表面热流代表了来自地下

深部的热损耗。然而, 由于岩石平均的导热性, 热流梯度相当于 $50^\circ\text{C}/\text{公里}$ 左右一般就表示可能有地热系统存在。图3所示的大多数数值都超过此数, 但都不在已知地热区附近, 有不少和梅丽斯维尔相似的

地热区存在的推断是显而易见的。

## 讨 论

现在，梅丽斯维尔地热区的出现是独一无二的，因为缺乏地表显示的组合，尽管有很高的热流值，可能很高温度（500℃左右）存在于2~3公里的深度内，那里显然缺乏地下水和热岩的相互作用。但是，由于美国西部的勘探继续进行，毫无疑问，另外相似的地热区将会被发现。

美国西部的地热潜力明显地是大的，虽然在目前的分析里有许多假定因素，但这种潜力估计还是保守的。假定最低工作温度为100℃，开发深度只到3公里和流体含量为零，这样估计基本资源的结果一定是保守的。美国西部地热资源所用的差异很大的估计起到了它最低限度的作用。根据这个分析导出的潜力估计在这些估计中是上限的，尤其是根据地表显示（这里省略了）的估计被考虑的话更是如此。

这个分析是基于所要求的直接观察数量基础上的，地热潜力估计是基于最低假设基础上的，因此，一些研究者估计为大有地热潜力似乎不是没有根据的。这样的地热动力对工业和政府利益是清楚的。根据现有的资料估计的发电潜力，要确定干地热系统占多大比例，有意义的流体部分又占多少比例，还是不可能的。但是在这个分析里，我们没有包括已知地热储系统的地区。这样，这个估计就初步提供了没

有地表显示的干热系统或流体系统，所以计算的一些地热潜力在今天的技术条件下可能是经济的。

图4表示了干系统中的有效能量是高度集中的（与湿系统的情形一样），50%的基本资源包括在只占5%地表面积的区域内。这样，对干系统像对流体系统一样，初期着重于最热的地热流区的勘探，那里的能量是最集中的。

在所描述的地热潜力能够实现以前，应该发展有效地由地下抽取热能的技术，增加比较低温低压的流体在汽轮机中的利用率，或者利用较低沸点换热器的新技术。改良的探测和勘探地热系统方法是非常有用的。一个给人印象深刻的基本资源在当前的可占深度情况下是有用的，但是更深的钻进和生产技术可能打开许多倍的开发面积。进一步的讨论研究和发展需要由Denton和Dunlop提出。

如果1974年内在梅丽斯维尔计划进行的深钻遇到所期望的高温、低孔隙度和低渗透性的话，那么将会在钻孔中实行热抽取的实验。用水力破裂岩层的方法使地热库发电似乎是首先努力的最有希望的技术，其他人工刺激的类型也被提出来了，有些技术（如果可用的话）也可以在梅丽斯维尔试一试。

段锦荪译自 *Geothermal*

*World directory* 1974

李希勳校