

UDC

中华人民共和国行业标准



P

JGJ/T 438-2018
备案号 J 2471-2018

桩基地热能利用技术标准

Technical standard for utilization of geothermal energy
through piles

2018-01-09 发布

2018-07-01 实施

中华人民共和国住房和城乡建设部 发布

中华人民共和国行业标准

桩基地热能利用技术标准

Technical standard for utilization of geothermal energy
through piles

JGJ/T 438 – 2018

批准部门：中华人民共和国住房和城乡建设部

施行日期：2 0 1 8 年 7 月 1 日

2018 北 京

中华人民共和国住房和城乡建设部 公 告

第 1797 号

住房城乡建设部关于发布行业标准 《桩基地热能利用技术标准》的公告

现批准《桩基地热能利用技术标准》为行业标准，编号为 JGJ/T 438-2018，自 2018 年 7 月 1 日起实施。

中华人民共和国住房和城乡建设部

2018 年 1 月 9 日

前 言

根据住房和城乡建设部《关于印发〈2015年工程建设标准规范制订、修订计划〉的通知》（建标〔2014〕189号文件）的要求，标准编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国际标准和国外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，编制了本标准。

本标准的主要技术内容是：1. 总则；2. 术语和符号；3. 基本规定；4. 专项勘察；5. 能源桩传热性能测试；6. 能源桩构造和材料；7. 桩基地热能利用系统设计计算；8. 能源桩结构设计计算；9. 能源桩施工与检测；10. 施工质量验收；11. 运行与维护。

本标准由住房和城乡建设部负责管理，由北京中岩大地科技股份有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见和建议，请寄送北京中岩大地科技股份有限公司（地址：北京市石景山区苹果园路2号通景大厦12层，邮编：100041）

本标准主编单位：北京中岩大地科技股份有限公司
清华大学

本标准参编单位：同济大学
河海大学
北京科技大学
中国建筑科学研究院有限公司
北京市建筑设计研究院有限公司
山东建筑大学
南京大学
浙江农林大学
长江勘测规划设计研究院

河北省建筑科学研究院
上海亚新建设工程有限公司
中建科技集团有限公司
浙江天海管桩有限公司
中冶建筑研究总院有限公司

本标准主要起草人员：程晓辉 柳建国 宋二祥 孔纲强
郭红仙 武思宇 李先庭 崔 萍
由 爽 夏才初 桂树强 王小清
张国柱 贺克瑾 张志超 刘光磊
齐 贺 张正威 姚智全 朱清宇
张 丹 张振栓 梁耀哲 杨灵艳
周兆弟 刘金龙 张智浩
本标准主要审查人员：赖远明 沈小克 刘汉龙 伍小亭
郑 刚 刘建华 刘松玉 康景文
由世俊 党 政

目 次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	3
3	基本规定	5
4	专项勘察	7
4.1	一般规定	7
4.2	专项室内试验	7
4.3	原位热响应测试	7
5	能源桩传热性能测试	9
5.1	一般规定	9
5.2	单桩热响应测试	9
5.3	单桩换热功率测试	10
5.4	热负荷-结构荷载耦合试验	11
6	能源桩构造和材料	12
6.1	一般规定	12
6.2	能源桩换热器构造	12
6.3	能源桩管材与循环工质	15
7	桩基地热能利用系统设计计算	17
7.1	一般规定	17
7.2	系统设计计算	17
8	能源桩结构设计计算	20
8.1	一般规定	20
8.2	温度作用效应	20
8.3	单桩竖向承载力	21

9	能源桩施工与检测	23
9.1	一般规定	23
9.2	换热管路的安装与保护	23
9.3	换热管路的压力测试及冲洗	25
10	施工质量验收	27
10.1	一般规定	27
10.2	施工前检验	27
10.3	施工中检验	27
10.4	施工后检验	28
10.5	工程验收	28
11	运行与维护	30
11.1	一般规定	30
11.2	运行监测	30
11.3	系统维护	31
附录 A	岩土体热物性参数参考值	32
附录 B	能源桩热响应测试要求	35
附录 C	能源桩热负荷-结构荷载耦合试验要求	36
	本标准用词说明	38
	引用标准名录	39
附：	条文说明	41

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms and Symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	3
3	Basic Requirements	5
4	Specific Investigation	7
4.1	General Requirements	7
4.2	Specific Laboratory Tests	7
4.3	In-situ Thermal Response Test	7
5	Thermal Transfer Capacity Test of Geothermal Piles	9
5.1	General Requirements	9
5.2	Thermal Response Test of A Single Pile	9
5.3	Thermal Performance Test of A Single Pile	10
5.4	Thermo-mechanical Coupled Test	11
6	Geothermal Pile Structures and Materials	12
6.1	General Requirements	12
6.2	Geothermal Pile Exchanger Structures	12
6.3	Geothermal Pile Loop Materials and Circulated Medium	15
7	Geothermal Pile System Design and Calculation	17
7.1	General Requirements	17
7.2	System Design and Calculation	17
8	Geothermal Pile Structural Design and Calculation	20
8.1	General Requirements	20
8.2	Thermal Loads and Effects	20
8.3	Vertical Bearing Capacity of A Single Pile	21

9	Geothermal Pile Installation and Inspection	23
9.1	General Requirements	23
9.2	Thermal Loop Installation and Protection	23
9.3	Thermal Loop Pressure Test and Flush	25
10	Construction Quality Checks and Acceptance	27
10.1	General Requirements	27
10.2	Prior Construction Check	27
10.3	Construction Check	27
10.4	Post Construction Check	28
10.5	Engineering Acceptance	28
11	Operation and Maintenance	30
11.1	General Requirements	30
11.2	Operational Monitoring	30
11.3	System Maintenance	31
Appendix A	Recommended Thermo-physical Properties of Soils and Rocks	32
Appendix B	Geothermal Pile Thermal Response Test Guidilines	35
Appendix C	Geothermal Pile Thermo-mechanical Coupled Test Guidelines	36
	Explanation of Wording in this Standard	38
	List of Quoted Standards	39
	Addition: Explanation of Provisions	41

1 总 则

1.0.1 为在桩基地热能利用工程中贯彻执行国家的技术经济政策，做到安全适用、保护环境、技术先进、经济合理、确保质量，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于桩基地热能利用工程的勘察、设计、施工、验收和运行与维护。

1.0.3 桩基地热能利用工程的勘察、设计、施工、验收和运行与维护除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 桩基地热能利用 utilization of geothermal energy through piles

以能源桩作为地下换热器的浅层地温能利用方式。

2.1.2 能源桩 geothermal pile

在建筑物的桩基中埋设闭合换热管路，与岩土体进行热交换，同时具有承载结构和换热双重功能的桩。

2.1.3 热响应测试 thermal response test

通过测试仪器，对项目所在场区的测试钻孔或能源桩进行一定时间内功率恒定的连续加热或取热，以获得岩土综合热物性参数及岩土初始平均温度的试验。

2.1.4 换热功率测试 thermal performance test

通过测试仪器，始终保持换热管路对地进口处水温恒定，对项目所在场区的测试钻孔或能源桩进行一定时间的连续加热或取热，以获得钻孔或能源桩换热功率的试验。

2.1.5 热固结 thermal consolidation

由于温度变化引起的岩土体塑性体积变化。

2.1.6 桩身附加温度应力 thermal stress of pile shaft

能源桩在温度变化时因热胀冷缩受到周围岩土体或桩体其他部分限制，而在桩身内产生的附加应力。

2.1.7 岩土综合导热系数 comprehensive thermal conductivity coefficient of ground

通过热响应测试得到的钻孔埋管或能源桩穿越岩土层的平均导热系数，在测试时间足够长的条件下，可由进出口水温的平均值与测试时间的对数值关系曲线的直线段斜率计算得到。

2.2 符 号

- C ——比热容，指单位质量物质升高或下降单位温度所吸收或放出的热量；
- C_V ——容积热容量，也称容积热容，指单位体积物质升高或下降单位温度所吸收或放出的热量；
- C_{Vc} ——饱和土体等效容积热容量，等于孔隙水和土颗粒的容积热容量按两者各自体积所占比例的加权平均；
- c_w ——循环工质热容；
- C_w ——水的比热容，指单位质量的水升高或下降单位温度所吸收或放出的热量；
- C_s ——土颗粒的比热容，指单位质量的土颗粒升高或下降单位温度所吸收或放出的热量；
- d ——管材外径；
- E_c ——桩身混凝土弹性模量；
- i ——水力梯度，又称水力坡降或者水力坡度，指沿渗透途径水头变化量与渗透途径长度的比值；
- K ——安全系数；
- K_e ——Kersten 系数，是由试验确定的岩土导热系数与其含水量之间关系的经验系数；
- k_D ——水力渗透系数；
- m_w ——循环工质质量流量；
- n ——孔隙率，土体中孔隙体积占土体总体积的比率；
- n_{eff} ——有效孔隙度，指扣除结合水所占孔隙体积后的孔隙率；
- q ——岩土颗粒中石英矿物的比例；
- Q ——能源桩换热功率；
- Q_{uk} ——计入温度作用效应的单桩竖向承载力标准值；
- r_0 ——桩的半径；
- R_a ——单桩竖向承载力特征值；
- S_r ——岩土体含水饱和度；

- t_1 ——桩身传热达到准稳态的时间；
- V_r ——实际渗流速度，指流体在理想多孔介质孔隙中的实际流速， $V_r = V_D / n_{\text{eff}}$ ；
- V_D ——达西渗流速度，指假设的水流通过包括骨架与孔隙在内的断面时所具有的一种虚拟流速， $V_D = k_D \cdot i$ ；
- α ——土的热扩散率，指导热系数与容积热容之间的比值， $\alpha = \lambda / C_V$ ；
- α_T ——桩身混凝土热膨胀系数；
- ΔN ——温度变化引起的桩身轴力；
- ΔT ——桩身温度变化；
- $\Delta \sigma$ ——桩身附加温度应力；
- η_N ——桩身温度应力系数，反映桩身温度胀缩受约束程度对温度应力的影响；
- λ ——天然状态下岩土的热导系数；
- λ_0 ——岩土颗粒中非石英矿物热导系数；
- λ_{dry} ——干燥状态下岩土的热导系数；
- λ_q ——岩土颗粒中石英的热导系数；
- λ_s ——岩土颗粒的热导系数；
- λ_{sat} ——饱和状态下岩土的热导系数；
- λ_w ——岩土孔隙水的热导系数；
- ρ ——土颗粒的质量密度；
- ρ_w ——水的质量密度。

3 基本规定

3.0.1 桩基地热能利用工程应根据当地气候条件、水文地质工程地质条件、场地浅层地温资源情况、建筑地基基础与地下结构设计、建筑环境与能源应用要求等因素，对桩基地热能利用系统实施的可行性和经济性进行评估。

3.0.2 桩基地热能利用工程设计前，应进行工程场地与环境调查、岩土工程勘察及岩土热物性勘察。

3.0.3 桩基地热能利用工程设计前，应具备下列文件：

1 建筑结构与基础工程的相关资料及参数文件：

- 1) 工程总平面布置图；
- 2) 工程安全等级、结构类型和使用条件；
- 3) 地下结构设计平面图和剖面图；
- 4) 地基基础或建筑桩基结构设计等级；
- 5) 地基基础或桩基方案设计平面图和剖面图；
- 6) 传至基础的上部结构荷载、地基承载力要求；
- 7) 地基基础变形控制值。

2 建筑物理技术参数：

- 1) 建筑空调供暖负荷需求条件，包括全年动态负荷及空调供暖设计负荷；
- 2) 建筑物理与技术参数；
- 3) 气候条件和节能标准。

3 岩土工程勘察报告。

4 岩土热物性勘察报告。

3.0.4 桩基地热能利用工程应根据换热需求、桩基承载要求和地层条件，对能源桩换热管路与桩身结构进行协同设计，并应对其长期运营性能及环境影响进行分析。

3.0.5 桩基地热能利用系统除应满足地源热泵系统地下换热性能要求外，还不得影响桩基结构安全和正常使用，且不得对场地生态环境造成不利影响。

3.0.6 桩基地热能利用系统设计使用年限应满足地源热泵系统的设计使用年限，并应满足期间的稳定性要求。能源桩结构性能应满足上部结构设计使用年限要求。

3.0.7 桩基地热能利用工程设计等级应按表 3.0.7 确定。

表 3.0.7 桩基地热能利用工程设计等级

设计等级	应用建筑面积 (m ²)	供热/制冷要求 (kW)
大型	>5000	>500
中型	1000~5000	100~500
小型	<1000	<100

3.0.8 桩基地热能利用工程应在施工各阶段及施工完成后对能源桩桩身换热管路进行压力检查和验收，并应在交付使用前进行整体试运转、调试与验收。

3.0.9 能源桩施工质量控制及验收除应符合能源桩施工及验收要求外，尚应满足建筑桩基工程的相关要求，并应符合现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 的相关规定。

3.0.10 桩基地热能利用系统投入使用后，应对能源桩结构安全、换热系统工作性能以及岩土环境影响进行不少于 2 年的监测。

4 专项勘察

4.1 一般规定

4.1.1 桩基地热能利用工程专项勘察应包括下列内容：

1 工程水文地质条件：地下水类型、地下水水位及季节性变化、水质、地下水渗流速度与方向等；

2 地基土受温度影响的工程性质：变温条件下的固结特性及强度等；

3 岩土热物性试验和热响应测试。

4.1.2 桩基地热能利用工程专项勘察尚应符合桩基工程结构设计的勘察要求。

4.2 专项室内试验

4.2.1 复杂及大型桩基地热能利用工程宜进行温控岩土力学特性室内土工测试，测试应包括固结试验、直剪试验和三轴固结不排水剪切试验。温度控制范围宜为 $3^{\circ}\text{C} \sim 45^{\circ}\text{C}$ 。温度循环次数不宜小于 3 次，其他试验操作步骤应符合现行行业标准《土工试验规程》SL 237 的相关规定。

4.2.2 地基土样的热物性参数实验室测试可采用热探针法、热平板法、热线法、热带法或平面热源法。当进行初步设计或小型工程设计时，岩土体导热系数和容积热容量等热物性参数可按本标准附录 A 的规定取值。

4.3 原位热响应测试

4.3.1 中型和大型桩基地热能利用工程应通过原位热响应测试获得岩土体的平均初始温度以及综合热物性参数。

4.3.2 岩土热响应测试宜通过原位钻孔埋管热响应测试方法进

行，测试孔数量不应少于 2 个。测试方法应符合现行国家标准《地源热泵系统工程技术规范》GB 50366 的相关规定。

4.3.3 原位热响应测试钻孔直径不宜大于 300mm；钻孔深度应与能源桩的设计深度一致。应对钻孔周围地表及以上测试管路与部件采取保温隔热措施。当测试孔孔口标高高于设计桩顶时，高于桩顶标高的钻孔测试部分应采取绝热措施。钻孔内回填材料应符合现行国家标准《地源热泵系统工程技术规范》GB 50366 的相关规定。

5 能源桩传热性能测试

5.1 一般规定

5.1.1 能源桩换热计算采用的热物性参数及综合热响应性能应通过传热性能测试确定。

5.1.2 当桩径不大于 300mm 时，能源桩热响应测试可采用土中钻孔埋管热响应测试；当桩径大于 300mm 且为大型项目时，宜在能源桩上进行热响应测试。

5.1.3 测试桩（孔）的位置及数量应根据场地土的变异性确定。对大型桩基地热能利用工程，原位热响应试验数量不应少于 3 根（个）。

5.1.4 大型桩基地热能利用的热响应测试，宜与桩基载荷试验相结合。当进行桩基载荷试验时，应通过热响应测试仪对桩身施加温度荷载，记录桩身温度应力与应变的响应，及其传热性能指标。

5.1.5 大型桩基地热能利用工程应进行取热和放热两种热响应测试。

5.2 单桩热响应测试

5.2.1 当进行单根能源桩热响应测试时，测试桩应达到传热准稳态要求，准稳态之前时间段内的测试数据在数据处理时应舍弃。桩身传热达到准稳态的时间（ t_1 ）可按下式估算：

$$t_1 = \frac{5r_0^2}{\alpha} \quad (5.2.1)$$

式中： t_1 ——桩身传热达到准稳态时间（s）；

r_0 ——桩的半径（m）；

α ——土的热扩散率（ m^2/s ）。

5.2.2 单桩热响应测试应按本标准附录 B 执行。

5.2.3 桩身混凝土的热物性参数取值可参照现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的相关规定。当桩径大于 1000mm, 且热交换管设在桩的中心时, 桩身混凝土导热系数测试可利用钻孔埋管热响应测试方法。测得的混凝土导热系数可用于计算桩的热阻或桩传热分析。

5.2.4 单桩热响应测试宜在满足下列要求之一时进行:

- 1 桩身混凝土浇筑完成 21d 后;
- 2 浇筑混凝土前, 桩顶 5m 以下钢筋笼体上安装了温度传感器, 浇筑完混凝土后温度传感器连续 3d 的温度读数差别不超过 0.5℃。

5.2.5 当测试桩施工时, 应以桩身轴线为中心, 在其埋深中部, 沿径向在桩截面中心、桩土界面和周边岩土地基中安装温度传感器。当进行热响应测试时, 应读取各测点温度随时间的变化值, 测试时间宜按本标准式 (5.2.1) 计算。桩和地基的热阻可通过多极组合圆柱分析方法计算。

5.2.6 当桩长与桩径之比大于或等于 40 时, 桩身热阻和岩土综合导热系数可由能源桩的热响应测试数据采用线热源或柱热源分析方法计算获得; 当桩长与桩径之比小于 40 时, 不宜采用线热源或柱热源模型, 桩身热阻和岩土综合导热系数可采用有限元或有限体积等数值计算方法进行反分析获得。

5.2.7 地下连续墙热响应测试应按本标准附录 B 执行。当测试连续墙施工时, 应在墙体内和周边岩土体地基中安装温度传感器, 并应读取测试过程中各测点的温度随时间的变化值。应采用有限元或有限体积等数值计算方法, 对连续墙热阻和岩土综合导热系数进行反分析。

5.3 单桩换热功率测试

5.3.1 给定进口温度和流量条件下的换热功率可在能源桩上测试获得。测试中进口水温 and 流量应恒定, 并应记录出口水温随时

间的变化。

5.3.2 能源桩的换热功率应按下式计算：

$$Q = m_w c_w (t_{out} - t_{in}) \quad (5.3.2)$$

式中：Q——能源桩换热功率 (W)；

c_w ——循环工质的热容 [J/(kg·K)]；

m_w ——循环工质质量流量 (kg/s)；

t_{in} ——进口循环工质温度 (K)；

t_{out} ——出口循环工质温度 (K)。

5.4 热负荷-结构荷载耦合试验

5.4.1 对建筑桩基设计等级为甲级的大型能源桩项目，应按本标准附录 C 的规定进行桩的热负荷-结构荷载耦合试验。

5.4.2 能源桩的热响应和换热功率测试应与桩的附加温度应力和变形的量测结合进行。

6 能源桩构造和材料

6.1 一般规定

6.1.1 能源桩除应满足结构上承受上部载荷的功能，其构造尚应满足与地基土进行热交换的功能。

6.1.2 当在地下连续墙、基础筏板及其他地下结构中配备闭合回路的换热管时，应同时满足结构承载和热交换双重功能。

6.2 能源桩换热器构造

6.2.1 由灌注桩或预制桩形成的能源桩，U型换热管回路宜固定绑扎在钢筋笼内侧；当U型换热管回路固定绑扎在钢筋笼外侧时，钢筋笼混凝土保护层厚度宜增加20mm~30mm。

6.2.2 灌注桩或预制桩桩身闭合换热管回路形式可分为单U型、双U型并联、双U型串联（W型）、三U型并联或螺旋型等多种形式（图6.2.2-1、图6.2.2-2）；闭合换热管的形式及个数应根据桩径及桩间距的大小确定。对桩径为0.6m~2.0m、桩长为10m~60m的钻孔灌注桩，可配备1个~6个闭合U型换热管。U型换热管脚间距不宜小于200mm，并应均匀布置

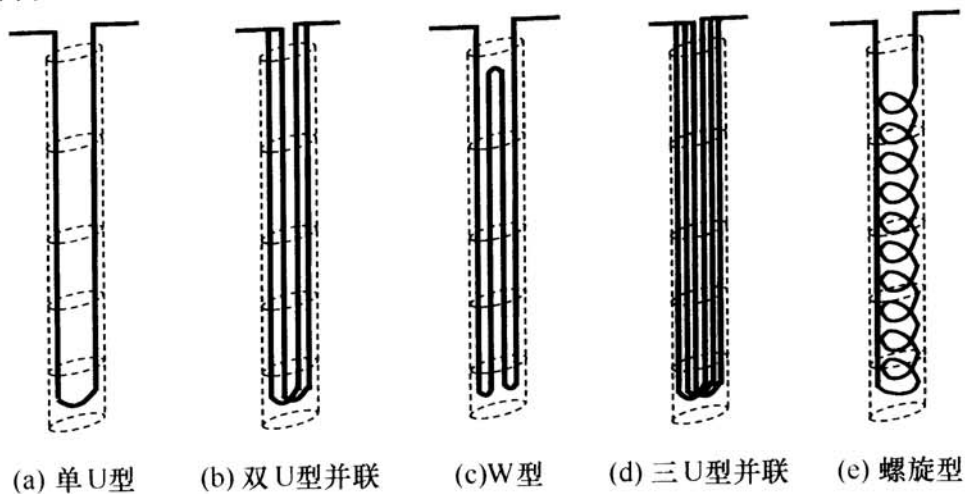


图 6.2.2-1 灌注桩闭合换热管回路形式

在钢筋笼体的周边。

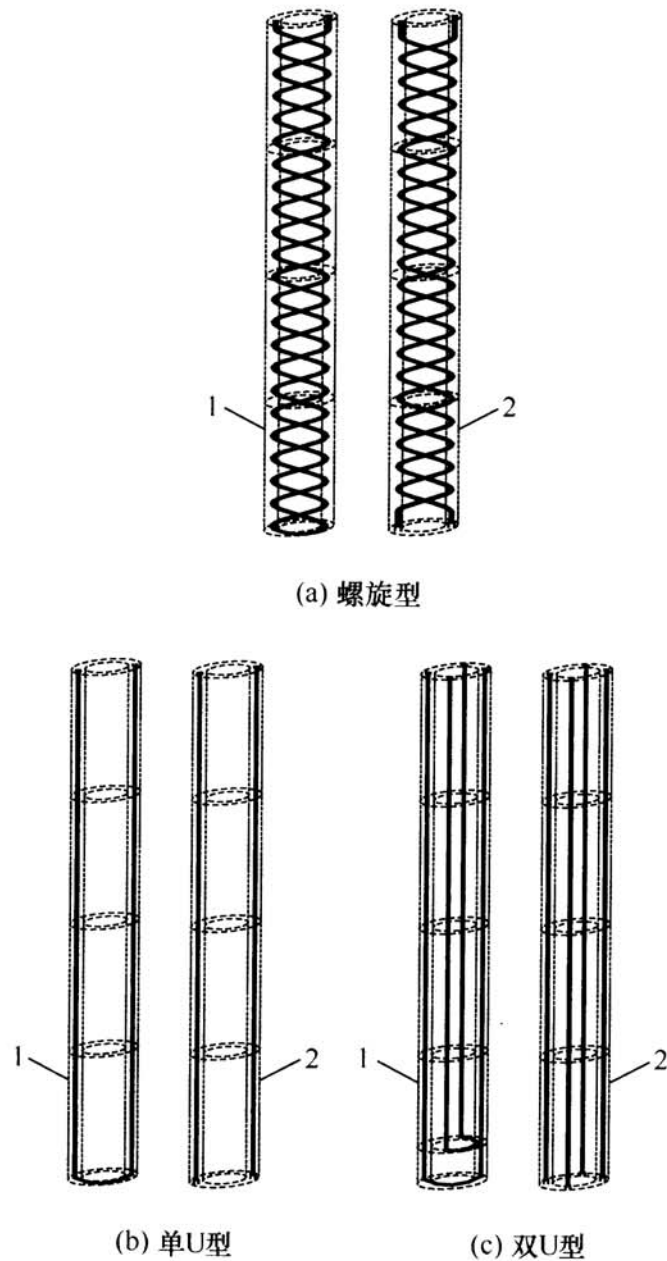


图 6.2.2-2 预制桩桩身闭合换热管回路形式
1—最下节桩；2—中或上节桩

6.2.3 当预应力管桩空腔内配置闭合回路换热器时，管桩桩芯中宜埋设 1 个~3 个 U 型闭合换热管回路。管桩桩芯中埋设 U 型闭合换热管回路后，宜采用膨润土和细砂或水泥的混合浆，或专用灌浆材料对桩芯进行回填。

6.2.4 当闭合换热管回路置于摩擦型桩中时，换热管底部距桩

体底部的距离不应小于 3m。

6.2.5 当闭合换热管回路配置在地下连续墙中时宜采用 W 型、改进 W 型或单 U 型换热管路形式（图 6.2.5），并应符合下列规定：

1 当采用 W 型时，应在地下连续墙靠近迎土面和开挖面的主筋上各布置一个 U 型管，两 U 型管应串联形成 W 型换热管路，两 U 型管的支管间距不应小于 150mm；

2 当采用改进 W 型时，应在地下连续墙靠近迎土面和开挖面的主筋上各布置一个 U 型管，两 U 型管应串联形成 W 型换热管路，靠近迎土面的 U 型管其支管间距不应小于 750mm，靠近开挖面的支管间距不应小于 150mm；

3 当采用单 U 型时，应在靠近迎土面布置单 U 型换热管路，其支管间距不应小于 750mm。

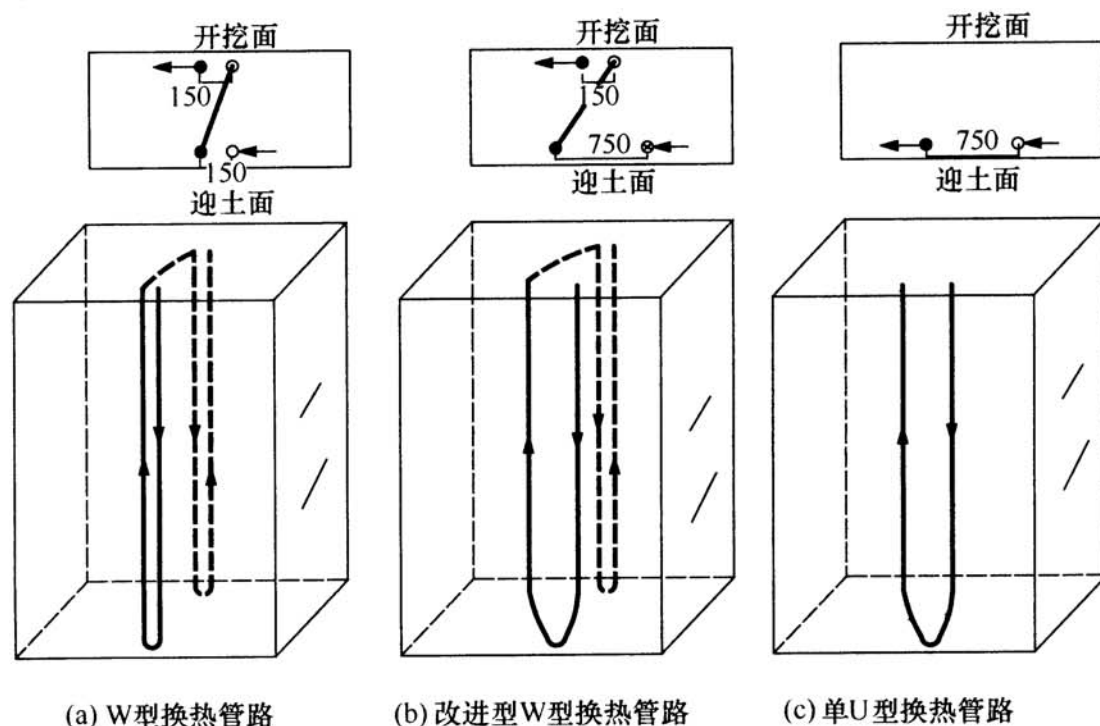


图 6.2.5 地下连续墙 W 型、改进 W 型或单 U 型换热管路形式

6.2.6 能源桩换热管紧贴钢筋笼内侧主筋绑扎，绑扎在钢筋笼上的 U 型管下部离最底部水平钢筋不应小于 200mm，上部高出最上面水平钢筋不应小于 500mm。

6.2.7 能源桩与水平总管连接时，宜全部并联，较短能源桩可两根或多根串联后再并联到水平总管上。

6.2.8 能源桩换热管出桩时宜设置钢套管，并应在穿越地下室底板时利用止水环和对管路及套管之间的空隙做注浆处理等止水措施（图 6.2.8）。

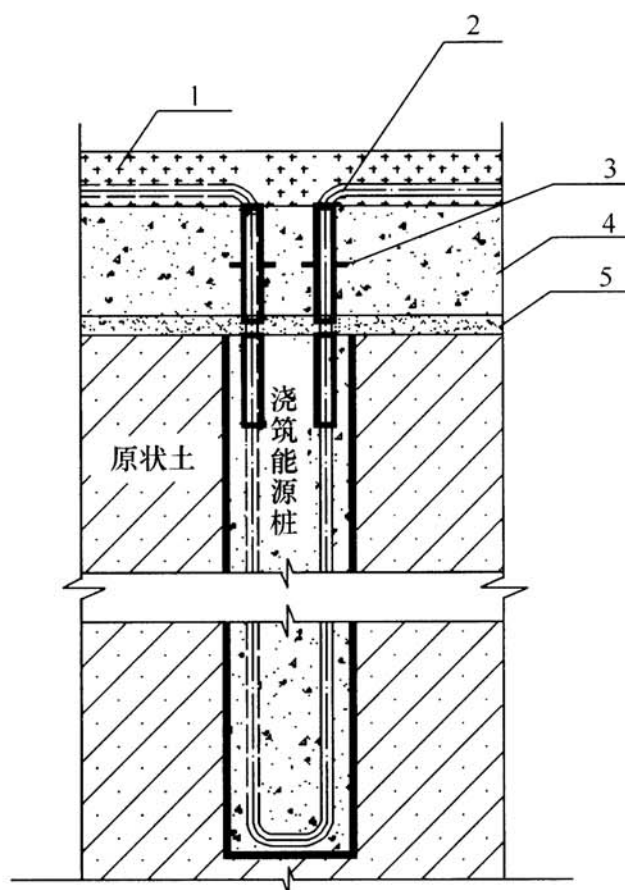


图 6.2.8 能源桩换热管路出桩节点构造

1—装饰层；2—保护钢套管；3—止水钢板；
4—防水混凝土底板；5—垫层

6.3 能源桩管材与循环工质

6.3.1 换热管材及管件质量应符合下列规定：

1 管材应采用化学稳定性好、耐腐蚀、导热系数大、流动阻力小的塑料管材及管件，并应具有较良好的拉伸压缩性能，应符合现行行业标准《地源热泵系统用聚乙烯管材及管件》CJ/T

317 的相关规定。管材宜采用 PE80 或 PE100 的聚乙烯管或 PB 聚丁烯管，不宜采用聚氯乙烯（PVC）管。管件与管材应为相同材料。

2 管材外径、壁厚及各自的公差应符合现行国家标准《地源热泵系统工程技术规范》GB 50366 的规定。

3 管材及管件应具有出厂合格证及第三方出具的质量检验报告，并应根据设计要求进行现场抽样检验。

6.3.2 管内循环工质及防冻液的选取应符合现行国家标准《地源热泵系统工程技术规范》GB 50366 的规定。

6.3.3 管路的额定压力及工作温度应满足设计要求，且管路的额定压力不应小于 1.0MPa。

6.3.4 能源桩管材及管路系统应符合密闭容器设计安装要求，设计使用寿命应满足地源热泵系统的设计使用年限，且不应少于 50 年。

6.3.5 换热管材及管件均应明确标明其所用材料、公称外径、壁厚或管材系列及生产日期。

6.3.6 换热管路最小弯曲半径应符合表 6.3.6 的规定。

表 6.3.6 换热管路最小弯曲半径

安装温度（℃）	PE100/PE100RV 管最小弯曲半径	PE-Xa 管最小弯曲半径
20	20 <i>d</i>	10 <i>d</i>
10	35 <i>d</i>	15 <i>d</i>
0	50 <i>d</i>	25 <i>d</i>

注：*d* 为管材外径。

6.3.7 能源桩混凝土配合比设计中宜使用高导热系数的材料与配合比。混凝土骨料除应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定外，其导热系数应大于 1.5W/(m·K)。

7 桩基地热能利用系统设计计算

7.1 一般规定

7.1.1 大、中型桩基地热能利用系统应根据能源桩热响应试验的结果进行设计。小型系统可按经验方法进行。

7.1.2 桩基地热能利用系统的初步设计所需资料应包括下列内容：

- 1 桩与地基土的热物性参数；
- 2 建筑全年冷热负荷需求；
- 3 桩基结构布置形式及可利用的桩数。

7.1.3 对热源或冷源不少于两种的桩基地热能利用系统，在长期运行工况下的换热性能应在详细设计阶段采用数值模型进行分析。

7.1.4 采用桩基地热能利用系统的建筑，室内供暖、空调负荷的计算应符合现行国家标准《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB 50736 的相关规定。供暖制冷动态负荷计算的最小计算周期宜为 1 年。桩基地热能利用系统在 1 年计算周期内对地基总释热量和从地基总吸热量应维持平衡。

7.2 系统设计计算

7.2.1 能源桩的换热管路形式及布置应根据工程勘察结果、桩的结构构造和几何形状、可利用桩数量等因素确定。

7.2.2 大型桩基地热能利用系统应进行动态设计计算，且应包括下列内容：

- 1 能源桩全年逐时负荷；
- 2 能源桩流体温度和桩周土体温度响应；
- 3 10 年以上长期冷热平衡分析；

4 相邻能源桩的换热影响。

7.2.3 能源桩动态设计计算宜根据建筑冷热负荷、岩土体热物性、桩体热物性、桩内换热管路布置方式等参数，采用含有传热分析的数值分析软件，或满足相关简化条件的变热流密度线热源、柱热源等模型进行分析。

7.2.4 应根据地下水渗流的影响对能源桩进行长期换热性能分析，并应符合下列规定：

1 当无地下水渗流时，可采用岩土综合导热系数进行动态分析，也可采用不同土层试样测得的土体热物性参数应用数值方法进行分析；

2 当地下水流速小于 $0.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 时，可采用岩土综合导热系数，并宜根据流速对传热影响程度选择纯导热或渗流与导热耦合的计算方法进行分析；

3 当地下水流速不小于 $0.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 时，可不进行动态设计计算。

7.2.5 当进行能源桩长期换热性能分析时，桩基地热能利用系统动态仿真模型应根据建筑负荷和热泵机组性能建立。

7.2.6 桩基地热能利用系统的总体设计应包括下列内容：

1 桩基和周边土体允许的温度变化范围、满足负荷需求的能源桩规格与数量、换热管路中循环工质温度范围；

2 能源桩换热管路的布置形式、水平总管的布置、循环水泵及热泵机组的选型。

7.2.7 能源桩的规格与数量应根据建筑桩基规格、换热器承担的建筑冷热负荷、场地水文地质工程地质条件、岩土体热物性及热泵机组性能等参数确定。

7.2.8 能源桩换热管路的总长度应根据换热器系统供冷工况和供热工况分别确定。当系统最大释热量和最大吸热量相差小于10%时，宜取较大值；当系统最大释热量和最大吸热量相差不小于10%时，宜取较小值，并应采用增设辅助冷热源，或应采用与其他冷热源系统联合运行的方式。

- 7.2.9** 当选配能源桩侧循环水泵时，应计算输配系统耗电输冷热比，耗电输冷热比宜符合国家现行相关标准的规定。
- 7.2.10** 当计算系统换热功率时，能源桩换热管路长度不应包括水平总管。
- 7.2.11** 水平总管坡度不宜小于 0.2%。
- 7.2.12** 能源桩各个并联环路宜为同程，并应进行管路的水力计算，计算方法应符合现行国家标准《地源热泵系统工程技术规范》GB 50366 的相关规定。
- 7.2.13** 夏季运行期间，能源桩出口最高温度宜低于 33℃；冬季运行期间，能源桩进口最低温度宜高于 4℃。
- 7.2.14** 当能源桩为群桩布置时，应根据能源桩传热相互影响，通过数值分析方法确定群桩换热功率。

8 能源桩结构设计计算

8.1 一般规定

8.1.1 能源桩结构设计除应满足常规结构桩基设计计算要求外，还应计入温度变化影响，并应根据桩基设计条件及上部荷载要求，进行桩基承载能力计算、稳定性验算、桩基变形计算和耐久性设计。

8.1.2 进行能源桩结构设计时，采用的作用效应组合与相应的抗力应符合下列规定：

1 确定桩数和布桩时，应采用传至承台底面的荷载效应标准组合；相应的抗力应采用计入温度变化影响的桩基或复合桩基承载力特征值；

2 计算荷载作用下的桩基沉降和水平位移时，应采用荷载效应和桩身温度作用效应准永久组合；

3 计算桩基结构承载力，确定构件尺寸和配筋时，应采用传至承台顶面的荷载效应和桩身温度作用效应基本组合；当进行承台裂缝控制验算时，应采用荷载效应标准组合；当进行桩身裂缝控制验算时，应采用荷载效应和桩身温度作用效应准永久组合；

4 桩基稳定性及抗震验算应符合现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 的相关规定。

8.1.3 承台以下桩基中仅部分桩作能源桩使用时，宜根据能源桩与其他常规桩的不同工作性状，进行“能源桩-常规桩基-承台-上部结构”相互作用分析。桩周地基中地下水渗流速度大于 $0.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 时，可不进行相互作用分析。

8.2 温度作用效应

8.2.1 计入温度变化的能源桩结构计算分析宜包括下列内容：

1 桩周为细粒土时，桩身温度变化和温度循环对桩周土体力学性质和桩-土界面特性的影响；

2 桩体温度变化时，桩体径向和纵向胀缩变形受周围岩土约束所引起的桩身附加温度应力及其对桩侧摩阻力分布的影响；

3 当桩周土为正常固结或轻微超固结软弱土时，桩周土热固结或热蠕变效应引起的桩侧负摩阻力、桩身变形和桩基的沉降。

8.2.2 桩身最大附加温度应力标准值可按下式计算：

$$\Delta\sigma = \eta_N \alpha_T \cdot \Delta T \cdot E_c \quad (8.2.2)$$

式中： $\Delta\sigma$ ——桩身附加温度应力（升温受压为正，降温受拉为负）（MPa）；

ΔT ——桩身温度变化（℃）；

α_T ——桩身混凝土热膨胀系数，取温度为 20℃ 时的值（/℃）；

E_c ——桩身混凝土弹性模量（MPa）；

η_N ——桩身温度应力系数，取 0.5～1.0，端承型桩以及超固结土中的摩擦型桩取高值，正常固结土中的摩擦型桩取低值。

8.2.3 能源桩结构在复杂条件下的循环温度效应分析，可结合现场原位测试和温度-应力耦合室内实验室测试进行。

8.3 单桩竖向承载力

8.3.1 以单桩竖向静载试验确定的单桩竖向承载力特征值（ R_a ）应按下式计算：

$$R_a = \frac{Q_{uk}}{K} \quad (8.3.1)$$

式中： Q_{uk} ——计入温度作用效应的单桩竖向承载力标准值（kN）；

R_a ——单桩竖向承载力特征值（kN）；

K ——安全系数，取 2.0。

8.3.2 计入温度作用效应的单桩极限承载力，宜通过桩基热负荷-结构荷载耦合原位试验确定，试验桩数量不宜少于 2 根，试验应符合下列规定：

1 对测试桩进行不少于 1 次温度作用循环后，应将能源桩身进口温度保持在设计温度最低值或相对于地基初始温度降低 10℃，维持不小于 12h 后，应进行单桩载荷试验；

2 正常固结软土地区应进行最大升温条件下的单桩载荷试验；

3 桩基热负荷-结构荷载耦合试验除应符合本标准附录 C 的规定外，尚应符合现行行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106 的相关规定。

8.3.3 当进行桩基热负荷-结构荷载耦合单桩载荷试验时，应在桩身设置应变和温度传感器，并应记录不同荷载下的桩身应力分布、桩的极限侧阻力标准值和极限端阻力标准值。

8.3.4 当无条件进行热负荷-结构荷载耦合试验时，可按常规桩基载荷试验确定单桩极限承载力，并应根据桩周地基土在温度循环条件下的抗剪强度试验成果进行计算。

9 能源桩施工与检测

9.1 一般规定

9.1.1 能源桩施工前应具备相应的工程勘察资料、设计文件和施工图纸，并应完成施工组织设计或施工方案。

9.1.2 能源桩施工应对既有地下管线及构筑物采取保护措施。

9.2 换热管路的安装与保护

9.2.1 管路在运输前应包装并应加上保护帽。保护帽应在管路和系统连接时去除。

9.2.2 管路在运送、搬运及储存过程中应采用装卸设备，管路不得被挤压、重摔、拖拽等。

9.2.3 管路应储存在现场的干燥地段。管路存储摆放应有序。管路存放应有隔离措施，且不应与地面直接接触和被污染。直管应根据其直径给予支撑，支撑数量应根据管路直径确定。对现场存放的管材及管件应采用遮阳网进行遮挡，其堆放高度不宜超过1.5m，且应放于通风处。

9.2.4 桩孔内换热管路安装前应对循环管外观、标签和证书进行检查。

9.2.5 桩孔内换热管路安装施工应符合下列规定：

1 应避免机械损坏和焊接损伤。钢筋笼连接时，应对换热管采取有效的保护措施，宜采用橡塑保温材料对连接段的换热管进行包裹。

2 当采用混凝土灌注桩作为能源桩时，换热管应贴紧钢筋笼绑扎，螺旋型布管方式宜绑扎在钢筋笼外侧。绑扎材料宜采用塑料绑带，且绑扎间距不宜大于500mm。当采用预制管桩作为能源桩时，换热管应按钻孔埋管的方式布置在桩孔内，并应采取

定位措施，换热管在空间上应具备分散性和稳定性。

3 钢筋笼较长时应分段安装，螺栓连接；换热管路应小心插放，U 型管脚以及换热管路之间的距离应满足设计要求。

4 桩身混凝土应采用泵送自密实混凝土；浇筑混凝土和钢管拔出时应避免钢筋笼隆起变形；完成泵送混凝土工作后应检查换热管路的最终位置。

5 在施工过程中，应对换热管路按测试控制点进行压力检查，有损坏时应及时修补替换。

9.2.6 换热管路安装时应采取避免管路损坏或污染的措施。位于基桩顶部的管路宜加装钢套管，且在安装过程中应采取循环管路不被损坏的措施。保护套管长度不宜小于 2.0m，桩顶标高以下不宜小于 0.5m，标高以上不宜小于 1.5m；套管外径不宜小于换热管外径的 2 倍。换热管穿过钢套管段时宜外包橡塑保温材料，换热管应居中，并应采取措施阻止水泥砂浆进入钢套管内。

9.2.7 钢筋笼上的换热管安装完成后，在桩身混凝土浇筑之前，应对换热管进行试压和保压处理。对回路一端应进行封堵，另一端应设置 PE 阀门，待试压满足设计要求后，应关闭 PE 阀门，确保换热管在带压状态下下管和完成桩身混凝土浇筑。

9.2.8 灌注桩桩头处理和截桩前桩头内循环管路应完好。宜采取限位措施进行钢套管的切除作业，且不对换热管造成损伤。断裂或破坏的循环管路应通过二次保护修整，且碎片残渣不应进入管内。钢套管切除后，应对换热管进行冲洗，并应进行试压检验至检验合格。

9.2.9 水平总管安装应符合下列规定：

- 1 当单桩换热能力退化失效时，应关闭其阀门；
- 2 当水平总管置于水平管沟中且需有一定弯曲时，其最小弯曲半径应按管材制造商在材料使用说明书中给定的要求确定；
- 3 回填前，水平管沟底部及回填材料不应存在尖锐异物或石块；
- 4 当换热管穿越地下室底板时，应采用钢套管对其进行保

护。钢套管埋入钢筋混凝土结构部分应沿钢套管纵向设置止水钢板，并应对换热管和钢套管间的空隙进行灌浆处理。

9.2.10 全地下换热管路应采用热熔方式连接，且热熔接头与管材应形成连续均匀的管组件。

9.2.11 当现场热熔焊接无法实现规定的桩脚管材的弯曲半径时，宜采用 U 型或 L 型弯管成品件。

9.3 换热管路的压力测试及冲洗

9.3.1 当系统管道施工时，应分阶段对管道进行水压试验；管道系统施工完成后，应对系统进行水压试验，并应检查管道通畅性和气密性。水压试验宜采用手动泵缓慢升压，升压过程中应随时观察与检查，不得有渗漏；不得以气压试验代替水压试验。水压试验应符合下列规定：

1 当工作压力不大于 1.0MPa 时，应为工作压力的 1.5 倍，且不应小于 0.6MPa；当工作压力大于 1.0MPa 时，应为工作压力加 0.5MPa。

2 水压试验步骤应符合下列规定：

- 1) 换热管分段连接完成后，整体钢筋笼下入桩孔前，应进行第一次水压试验。在试验压力下，稳压时间不应少于 15min，稳压后压力降不大于 3%，且无泄漏现象，即认为合格。密封保护后，应在带压状态下完成下管和桩身混凝土浇筑。
- 2) 能源桩破除桩头且桩顶标高以上钢套管切除后，应进行冲洗和水压试验。应采用一定压力的水冲洗管路至无泥沙等杂物后再进行第二次水压试验。在试验压力下，稳压时间不应少于 15min。稳压后压力降不大于 3%，且无泄漏现象，即认为合格。
- 3) 竖直换热管与水平总管装配完成后，在地下室底板装饰层浇筑前应进行第三次水压试验。在试验压力下，稳压时间不应少于 30min，稳压后压力降不大于 3%，

且无泄漏现象，即认为合格。

- 4) 水平总管与机房集分水器连接完成后，在地下室底板装饰层浇筑前应进行第四次水压试验。在试验压力下，稳压时间不应少于 2h，且无泄漏现象，即认为合格。
- 5) 换热系统安装完毕，且冲洗、排气及浇筑或回填完成后，应进行第五次水压试验。在试验压力下，稳压时间不应少于 12h，稳压后压力降不大于 3 %，且无泄漏现象，即认为合格。

9.3.2 最后阶段测试尚应符合下列规定：

- 1 应对管道进行修正测试；
- 2 应进行最终测试，并应符合下列规定：
 - 1) 根据能源桩换热器的规格大小，对地源热泵系统进行整体或者部分的流量测试。
 - 2) 测试得到的系统压降应和设计计算值比较。当流速超过系统设计流速时，应测量最小流速及水头损失。测得数据应和相同流速下的设计计算值进行比较，以排查堵塞或弯折的管路。
 - 3) 水头损失测量应通过压力测量设备测得。

9.3.3 当能源桩安装完成，或在大型地源热交换器安装完成后，应对系统进行冲洗。

10 施工质量验收

10.1 一般规定

10.1.1 能源桩的检查 and 验收按时间顺序应分为施工前检验、施工中检验和施工后检验三个阶段。能源桩工程竣工后应进行工程验收。

10.1.2 能源桩的管路质量的检测项目和方法应符合国家现行标准《地源热泵系统工程技术规范》GB 50366 和《埋地聚乙烯给水管道工程技术规程》CJJ 101 的相关规定。

10.1.3 桩基地热能利用工程质量检查和验收应符合现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 中常规桩基检查和验收的相关规定。

10.2 施工前检验

10.2.1 进入施工现场的换热器管路、管件等原材料检验应包括下列内容：

- 1 质量合格证书；
- 2 管材、管件压力检测报告；
- 3 管材、管件的尺寸和外观。

10.2.2 混凝土材料、配合比应满足能源桩设计要求，大型桩基地热能利用工程宜进行混凝土导热系数测试。

10.2.3 热熔设备应进行参数和性能检验，并宜进行现场热熔连接试验。

10.3 施工中检验

10.3.1 桩内及连续墙内换热器管路安装过程中应有检验报告，检验应符合下列规定：

1 管路的材质、管径、壁厚符合设计要求，表面无损伤与划痕；

2 管路的连接方式和安装位置、换热管间距、换热管长度及与桩顶桩底间距、换热管与钢筋笼绑扎符合设计要求；

3 换热管焊接质量符合设计要求；

4 换热管现场压力测试符合本标准第 9.3 节的规定。

10.3.2 水平管路安装过程应符合下列规定：

1 水平管沟的宽度、深度满足设计要求；

2 水平管安装位置、水平管间距满足设计要求，水平管最小弯曲半径符合本标准第 9.2.9 条的规定；

3 水平沟槽回填材料满足设计要求，管槽底部细砂的厚度应大于管直径，管路上部和左右水平向砂土厚度或宽度不应小于管直径。

10.4 施工后检验

10.4.1 能源桩安装施工完成后应进行通水流量检测。

10.4.2 宜对能源桩支路换热功率进行检测，同类型能源桩支路检测数量不应少于 3 组。

10.4.3 当出现下列情况之一时，桩基地热能利用系统应进行热负荷-结构载荷耦合测试：

1 设计等级为甲级的大型能源桩地源热泵工程，且前期未进行热负荷-结构载荷耦合测试；

2 能源桩换热管路类型对比前期进行热负荷-结构载荷耦合测试的类型发生了较大的变化；

3 设计提出热负荷-结构载荷耦合测试专项要求。

10.4.4 换热系统安装完毕，且冲洗、排气及浇筑或回填完成后，应进行水压试验，且应符合本标准第 9 章的相关规定。

10.5 工程验收

10.5.1 桩基地热能利用工程验收应由建设单位会同施工、设计

和监理等单位共同进行。

10.5.2 验收时应包含下列资料：

- 1 图纸会审记录、设计变更通知单和竣工图；
- 2 主要材料、设备、成品、半成品和仪表的出厂合格证明及抽检试验报告；
- 3 换热管路安装记录；
- 4 换热管路压力试验记录、冲洗试验记录；
- 5 混凝土灌注或管桩桩芯回填施工记录；
- 6 水平管路沟槽开挖及回填施工记录；
- 7 隐蔽工程验收记录；
- 8 工程检验批质量验收记录；
- 9 桩基结构验收资料及其他相关文件。

11 运行与维护

11.1 一般规定

11.1.1 桩基地热能利用工程运行期间应进行监测，监测内容应包括换热系统运行参数、换热区地质环境和桩基基础变形。

11.1.2 应定期分析地质环境监测数据，并宜对地质环境进行长期监测。

11.1.3 监测系统应作为桩基地热能利用工程项目的组成部分列入建设计划，应同步设计、施工和验收。

11.2 运行监测

11.2.1 运行过程中应监测换热系统的运行状态参数，运行状态参数应包括下列内容：

- 1 地源侧供/回水温度、流量及压力；
- 2 用户侧供/回水温度、流量及压力；
- 3 热泵机组和水泵功率。

11.2.2 换热区地质环境监测应符合下列规定：

- 1 监测孔应满足布置监测点要求，传感器和数据采集器的耐久性，应能满足地质环境长期监测的要求；
- 2 地温监测深度不宜小于桩基地热能利用系统深度；
- 3 宜在桩基地热能换热区内部和外部分别设置监测孔，监测孔数量宜根据桩基地热能利用系统的规模、布置方式确定，单项工程监测孔数量不宜少于 3 个；监测点的分布密度应反映不同深度地层的温度分布特征及变化情况，单个监测孔内测点布置不宜少于 3 个；
- 4 采集的数据宜包括岩土体温度、地下水位、水质及岩土体变形情况。

11.2.3 换热区桩基基础变形监测应符合现行行业标准《建筑变形测量规范》JGJ 8 的相关要求。

11.2.4 换热系统运行状态参数和换热区地质环境的监测宜采用自动监测系统，监测数据应备份。

11.3 系 统 维 护

11.3.1 运行管理部门应制定换热系统运行管理制度，换热系统运行管理制度应规范日常操作和维护。

11.3.2 桩基地热能利用换热系统应根据运行监测数据计算实际制冷（热）量、设备损耗功率、地下岩土体换热量和地温场数据，并应对全年运行方案进行优化。对含有桩基地热能利用系统的复合空调系统，应根据各子系统不同的季节性应用特点制定系统的全年运行策略。

11.3.3 当系统按部分负荷运行时，桩基地热能利用系统应分组交替运行。

11.3.4 桩基地热能利用系统宜设置集中监控系统，并应具备与楼宇自动化管理系统的通信接口，且应开放通信协议。桩基地热能利用系统集中监控系统宜具有下列功能：

- 1 监测并记录本标准第 11.2.1 条、第 11.2.2 条规定的运行数据；
- 2 热泵机组的安全保护及故障报警；
- 3 地源侧供回水系统温度超限及循环液泄漏报警；
- 4 节能运行控制。

11.3.5 运行维护中应对机组、水泵、末端装置等的能耗及其他基础数据定期进行统计与分析，并应对运行策略进行优化。

11.3.6 桩基地热能利用系统长期运行导致的岩土体温度改变不应影响当地的生态环境。应对桩周恒温层年平均地温值的变化趋势进行评定。当年平均地温值达到或超过限定值时，应发出预警。

附录 A 岩土体热物性参数参考值

A.0.1 地基土体的导热系数可取为 $1.0\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \sim 3.0\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，宜根据工程勘察结果和原位热响应测试结果进行确定。小型工程或初步设计时，土体导热系数应按下列公式计算：

$$\lambda = (\lambda_{\text{sat}} - \lambda_{\text{dry}})K_c + \lambda_{\text{dry}} \quad (\text{A.0.1-1})$$

$$\lambda_{\text{dry}} = -0.56n + 0.51 \quad (\text{A.0.1-2})$$

$$\lambda_{\text{sat}} = \lambda_s^{1-n} \lambda_w^n \quad (\text{A.0.1-3})$$

$$\lambda_s = \lambda_q^q \lambda_0^{1-q} \quad (\text{A.0.1-4})$$

$$\begin{cases} K_c = 0.7 \log S_r + 1.0 & (0.05 < S_r < 0.1) \\ K_c = \log S_r + 1.0 & (S_r > 0.1) \end{cases} \quad (\text{A.0.1-5})$$

式中： λ ——天然状态下岩土体的导热系数 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ ；

λ_{sat} ——饱和状态下岩土体的导热系数 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ ；

λ_{dry} ——干燥状态下岩土体的导热系数 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ ；

K_c ——系数，由试验确定的岩土体导热系数与其饱和度的经验系数；

n ——孔隙率（%）；

λ_s ——岩土颗粒的导热系数 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ ；

λ_w ——岩土孔隙水的导热系数 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ ，宜取 $0.57\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；

λ_q ——岩土颗粒中石英的导热系数 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ ；

λ_0 ——岩土颗粒中非石英矿物导热系数 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ ；

q ——岩土颗粒中石英矿物的比例；

S_r ——岩土体含水饱和度（%）。

A.0.2 地基土体容积热容量参数可取为 $0.3\text{MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K}) \sim 2.5\text{MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ，宜根据工程勘察结果和原位热响应测试结果

进行确定。当初步设计时，饱和土体等效容积热容量 (C_{ve}) 可按下列式计算：

$$C_{ve} = n\rho_w C_w + (1-n)\rho_s C_s \quad (\text{A. 0. 2})$$

式中： C_{ve} ——饱和土体等效容积热容量 $[\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})]$ ；

ρ_w ——水的质量密度 (kg/m^3) ；

ρ_s ——土颗粒的质量密度 (kg/m^3) ；

C_w ——水的比热容 $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ ，宜取 4180 $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ ；

C_s ——土颗粒的比热容 $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ 。

A. 0. 3 地基土体中空气的导热系数及容积热容量取值，能源桩身混凝土的导热系数、线膨胀系数、热扩散率及比热取值，可按表 A. 0. 3 取值。

表 A. 0. 3 地基土体中空气和桩体热物性参数

名 称	地基土体中空气	能源桩身混凝土
导热系数 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	0. 03	2. 95
容积热容量 $[\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})]$	1000	—
线膨胀系数 $(/^\circ\text{C})$	—	1×10^{-5}
热扩散率 (m^2/s)	—	1×10^{-6}
比热容 $[\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})]$	—	960

A. 0. 4 地基土恒温层的埋深取值宜为 10m~15m；地基土恒温层的温度取值宜为当地年平均气温 $\pm(1\sim2)^\circ\text{C}$ 。

A. 0. 5 地基土体的热前渗流速度参数取值应符合下列规定：

1 当地基土层达西渗流速度小于 $0. 05 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 时，应取 0。

2 当地基土层达西渗流速度大于 $0. 05 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 时，初步设计阶段热前渗流速度 (V_{th}) 可按下列公式计算：

$$V_{th} = (\rho_w C_w / \rho C_c) V_D \quad (\text{A. 0. 5-1})$$

$$V_D = k_D \cdot i \quad (\text{A. 0. 5-2})$$

式中： V_{th} ——热前渗流速度 (m/s) ；

C_w ——水的比热容 $[J/(kg \cdot K)]$ ，宜取 $4.18MJ/(m^3 \cdot K)$ ；

ρ ——土的天然质量密度 (kg/m^3) ；

i ——水力梯度 $(\%)$ ；

C_e ——土体的比热容 $[J/(kg \cdot K)]$ ；

k_D ——达西渗透系数 (m/s) ；

V_D ——达西渗流速度。

3 当地基土层达西渗流速度大于 $0.5m/d$ 时，可不进行地基土温度动态平衡的设计计算。

附录 B 能源桩热响应测试要求

- B. 0. 1** 测试桩的深度应与实际工程桩的深度相一致。
- B. 0. 2** 现场灌注的能源桩热响应试验应在测试桩施工完成，且混凝土水化热散尽后进行。
- B. 0. 3** 岩土初始平均温度的测试应采用布置温度传感器的方法。测点的布置宜在能源桩埋设深度范围内，且间隔不宜大于 5m；应以各测点实测温度的算术平均值作为岩土初始平均温度。
- B. 0. 4** 桩身平均温度的测试应采用布置温度传感器的方法。测点宜在桩中心、桩-土交界面处，且应沿能源桩深度范围布置；应采用各测点实测温度的算术平均值作为桩身的平均温度。
- B. 0. 5** 能源桩热响应试验应连续不间断，持续时间不宜小于本标准式 (5. 2. 1) 中到达准稳态的时间。
- B. 0. 6** 试验期间，加热功率应保持恒定。
- B. 0. 7** 能源桩的出口温度稳定后，其温度宜高于岩土初始平均温度 5℃ 以上，且维持时间不应少于 24h。
- B. 0. 8** 能源桩内单管流速不应小于 0. 2m/s。
- B. 0. 9** 试验数据读取和记录的时间间隔不应大于 10min。

附录 C 能源桩热负荷-结构荷载耦合试验要求

C.0.1 能源桩热负荷-结构荷载耦合试验应同时测定能源桩极限承载力、换热参数以及结构响应特性。

C.0.2 试验宜结合建筑桩基单桩静载试验同步进行。对选定进行能源桩换热-结构响应试验的基桩应在施工试桩时按设计要求安装换热管及温度、应变等传感器。宜在距试桩中心约 4m 或桩与桩间距内布设测温探孔 3 个，应在竖向上按一定间距布设温度传感器，并应研究温度场沿桩周的分布特征。

C.0.3 换热管穿出桩时应采取保护措施，可采用倒 L 型钢套管对换热管进行保护，换热管应从桩身侧面穿出，且钢套管穿出桩身的短边顶面距离承压面不宜小于 1.0m。

C.0.4 沿桩身布置的传感器，应采取有效措施固定在测试桩钢筋笼上。温度传感器布置的竖向间距不宜大于 5.0m，且每一个测温断面不宜少于 2 个。应变传感器布置的竖向间距不宜大于 5.0m，且每一个监测断面不宜少于 3 个，其中 2 个应为沿桩身竖向布置，1 个应为水平向布置。

C.0.5 试验步骤应符合下列规定：

1 试桩分级加载应符合现行行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106 的相关规定，应测量桩顶的沉降，并应在每一级加载后量测桩身的应变值。

2 待桩顶沉降稳定且符合现行行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106 的相关规定后，应利用热响应测试仪对桩身进行换热性能测试，并应同步监测桩身应力变化。热响应测试开始前和试验过程中应持续采集桩身各测点的温度值和应变值，同时应量测桩顶的沉降。能源桩周边有测温探孔时应同步进行测温作业。热响应宜分别按测试桩放热和取热两种工况进行，每一种工

况试验持续时间不宜小于 48h，且两种工况间隔亦不宜小于 48h。

3 热响应测试结束后应对试桩进行卸载，并应同步测试桩身温度、应变及桩顶沉降数据。

C.0.6 试验成果应包括下列内容：

- 1 测试桩在放热和取热两种工况下的换热效率；
- 2 测试桩在结构和温度双重荷载作用下的桩身应力-应变特征和桩身沉降，能源桩的极限承载力标准值及承载力特征值。

本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 《混凝土结构设计规范》 GB 50010
- 2 《地源热泵系统工程技术规范》 GB 50366
- 3 《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》 GB 50736
- 4 《埋地聚乙烯给水管道工程技术规程》 CJJ 101
- 5 《建筑变形测量规范》 JGJ 8
- 6 《建筑桩基技术规范》 JGJ 94
- 7 《建筑基桩检测技术规范》 JGJ 106
- 8 《土工试验规程》 SL 237
- 9 《地源热泵系统用聚乙烯管材及管件》 CJ/T 317

中华人民共和国行业标准

桩基地热能利用技术标准

JGJ/T 438 - 2018

条文说明

编制说明

《桩基地热能利用技术标准》JGJ/T 438-2018，经住房和城乡建设部 2018 年 1 月 9 日以第 1797 号文公告批准、发布。

本标准在编制过程中，编制组进行了能源桩设计、施工及应用情况的调查研究，总结了我国能源桩设计、施工、检测的实践经验，同时参考了国外先进技术标准，通过试验，取得了大量重要技术参数。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定，《桩基地热能利用技术标准》编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

1	总则	45
3	基本规定	47
4	专项勘察	50
4.1	一般规定	50
4.2	专项室内试验	51
4.3	原位热响应测试	53
5	能源桩传热性能测试	54
5.1	一般规定	54
5.2	单桩热响应测试	54
5.3	单桩换热功率测试	56
5.4	热负荷-结构荷载耦合试验	56
6	能源桩构造和材料	57
6.1	一般规定	57
6.2	能源桩换热器构造	58
6.3	能源桩管材与循环工质	59
7	桩基地热能利用系统设计计算	61
7.1	一般规定	61
7.2	系统设计计算	62
8	能源桩结构设计计算	65
8.1	一般规定	65
8.2	温度作用效应	66
8.3	单桩竖向承载力	67
9	能源桩施工与检测	72
9.1	一般规定	72
9.2	换热管路的安装与保护	72

9.3 换热管路的压力测试及冲洗	73
10 施工质量验收	75
10.1 一般规定	75
10.2 施工前检验	75
10.3 施工中检验	75
10.4 施工后检验	76
10.5 工程验收	76
11 运行与维护	77
11.1 一般规定	77
11.2 运行监测	77
11.3 系统维护	79
附录 A 岩土体热物性参数参考值	81

1 总 则

1.0.1~1.0.3 常规地源热泵系统作为可再生浅层地温能利用的一种重要形式，可为建筑物和其他基础设施供热（制冷），具有明显的经济、环境以及社会效益，是实现绿色建筑的一项重要技术保障。我国 20 世纪 80 年代开始这方面的研究，2005 年以后，地源热泵系统的应用以每年 10%~15% 的速度快速增长，为此 2005 年发布了国家标准《地源热泵系统工程技术规范》GB 50366-2005。20 世纪 80 年代，在奥地利和瑞士等国家，岩土工程师率先利用建筑物的基础进行热（冷）交换，将换热管路安装到传统的建筑基础结构单元（如：基桩、板桩、地下连续墙、基础底板或边墙以及隧道衬砌等）中，这些构件承担着结构和暖通地下换热器的双重功能，统称为能源桩技术。与传统钻孔埋管相比，能源桩技术充分利用了混凝土更好的热物性质，热交换效率更高，可节省大量的钻孔费用和地下空间资源，其技术经济性优势十分明显，碳排放量更少。欧美等发达国家已大力发展和推广这一新型技术。

目前，在能源桩的应用研究方面已取得了长足进展，如针对能源桩的换热效率问题开展了大量的传热性能热响应测试与相应的传热理论研究工作，积累了多种岩土条件下能源桩的换热性能数据；针对其在换热过程中的岩土和结构响应方面的研究工作，尤其是原位测试研究和模型试验工作也已日趋成熟。能源桩设计要求对桩的换热和结构功能进行统筹设计，对桩身在应力-温度效应耦合作用下出现的复杂的受力与变形行为也应有较深的认识。这些进展都为该技术在我国的应用推广打下了坚实的基础。我国 2004 年有了第一个能源桩项目，目前已有 20 余栋大型建筑物使用了能源桩技术，有超过 1 万根能源桩正在使用中。比如上

海世博轴项目安装了 6400 根能源桩，上海大厦也采用了能源桩技术等。我国每年有大量的建筑工程灌注桩施工，如在灌注混凝土之前，在钢筋笼上绑上换热管路，成为能源桩，可以省掉较高的成孔费用，换热效果还会明显优于钻孔埋管，为绿色建筑实施提供技术保障。技术经济性能良好的能源桩技术，会受到更多业主单位和工程界的青睐。

合理的设计需要进行详细的工程地质勘察与包括热物性质在内的岩土、混凝土材料的定量测试，需要准确地进行桩在变温条件下承载力与变形的分析计算，以及桩换热能力的分析计算，等等。奥地利、瑞士（德、法语区）、德国和英国都相继制定并颁布了各自的能源桩技术标准，这些技术标准为规范和合理使用能源桩技术，起到了不可或缺的作用。本标准的编制将在一定程度上借鉴上述国外同类标准的相关规定。能源桩技术标准在我国尚属空白，我国的土建工程师对能源桩的工作性能认识缺乏，严重制约了能源桩这种新型节能技术在各类岩土地基条件下的推广使用。因此，通过能源桩技术标准的编制，及时总结国内外的技术成果，填补我国技术标准空白，对提升我国能源桩技术水平，实现节能减排，推动我国能源桩技术和地源热泵技术的健康发展，具有重要意义。为了在今后工程中更好地推广应用能源桩，为设计、施工、监理、检验及工程验收提供依据，使设计做得更加合理，质量更加可靠，对多年的应用和实践研究进行总结，编制了本标准。本标准未作规定的按相关标准执行。

3 基本规定

3.0.1 桩基地热能利用工程的正确与合理使用，尤其对房屋建筑而言，需要多学科和多工种的配合。岩土工程师、建筑师、给水排水工程师、暖通工程师和专业管道工程师应该在设计的最初阶段进行配合。桩基地热能利用系统是构筑整个节约型、环保型房屋暖通和能源设施的一个部分，它的设计和安装，应该纳入整个房屋暖通和能源设施优化设计的整体目标中。在新建房屋中，桩基地热能利用系统的设计和施工，直接将换热管路安装在混凝土桩构件中，是最经济的做法。同样，许多老旧房屋的加层改造翻新，涉及对现有房屋基础的加固，此时利用能源桩或其他地热基础形式仍旧具有较好的技术经济价值。

在高渗透性和地下水流速较高的地基土中，设计施工冷热两用的桩基地热能利用系统最为合适。如果是有蓄热或蓄冷要求的系统，则在低渗透性和低流速地下水的地基土是最适合的。

3.0.2 桩基地热能利用系统的传热性能与岩土热性质关系密切，所以详细的岩土工程勘察，对系统传热设计及优化具有重要作用。

3.0.4 能源桩换热系统设计应对在地基土、桩身混凝土中的热传递以及埋置于桩身中换热管路中循环工质的强制热对流，进行一体化设计。如果地基土和桩身的条件复杂，或是中型以上能源桩项目，应对其进行三维数值分析。虽然此类数值分析计算相对复杂，具有一定的难度，但出于当前对环境保护的要求，各地政府和监察部门都需要提供这种计算结果，以了解地基土和地下水中温度的分布随时间的长期变化。

1 能源桩换热初步设计可按如下参考值进行：

1) 直径 0.3m~0.5m 的桩基每沿米可获得 40W~60W 的

热量；

- 2) 直径大于 0.6m 的桩，每沿米与地基土接触面积可获得 35W 的热量；
- 3) 地下连续墙或板桩墙，每沿米可获得 30W 的热量；
- 4) 基础地板每沿米可获得 10W~30W 的热量。

2 换热管路中强制热对流的优化设计，也应考虑如下因素的影响：

- 1) 管路的直径和长度；
- 2) 管壁的性质，如粗糙度；
- 3) 管中循环工质的热工参数；
- 4) 管中流速和流动状态等。

3 能源桩的间距是影响整个系统换热效率及工程桩结构响应与安全的重要因素之一。但此值的确定受到结构基础方案、桩土热工性质以及工程水文地质条件等因素的影响，无法给出一般的规律。通过先进的传热与结构耦合的数值方法，对设计工程基础桩位情况进行必要的模拟计算，是目前比较可行的做法。对于大型桩基地热能利用工程，建议进行群桩传热和结构性能的试验或监测工作，以确保设计方案的有效性。

4 当能源桩处于正常使用极限状态时，即一方面承受结构正常使用荷载，另一方面还要承受因与周围岩土体换热而导致的自身温度的变化（一般温度变化范围为 $10^{\circ}\text{C} \sim 15^{\circ}\text{C}$ ），桩身在热负荷-结构荷载耦合作用下出现复杂的受力与变形行为。这种桩基在热负荷-结构荷载耦合作用下的力学性质是能源桩结构设计的主要依据。

3.0.5 桩基地热能利用系统正常与合理运营时，桩与地基土温度变化对桩承载力的影响是可以忽略的。但黏土和粉土比砂土中的桩基受到的这种温度影响更大；有机软土的热敏感性也比较高。一般来说，通过工程桩，从地基土中适量汲取热能，为房屋供热，可能导致桩周围土的温度从 $13^{\circ}\text{C} \sim 18^{\circ}\text{C}$ 降低至 $7^{\circ}\text{C} \sim 13^{\circ}\text{C}$ 。但过度的汲取，可能导致土的冻结，从而会严重影响桩土

地基的承载能力，因此需避免。相反的过程，即房屋制冷和桩地基土的升温，则对建筑房屋桩基基础稳定性影响较小。如果是供热和制冷交替进行，温度变化导致的地基土的变形则需要叠加考虑。数值分析表明，温度变化导致的建筑物的沉降变形可以达到静态荷载下变形的 10%，然而实际观测值要更小一些。

加强环境影响评价与监测，消除能源桩对地基和地下水温度的较大改变，尤其是对地下水温度的影响。桩地基土的年平均温度最好保持恒定。且地基和地下水温度的年内变化幅度应在 5℃ 以下。这是因为过大的地下水温度变化会导致地下水诸多物理化学性质，如 pH 值，钙、氧气和二氧化碳的溶解度等的变化，同时也会显著影响微生物的活性和生态平衡。

3.0.6 地源热泵系统的设计使用年限一般为 25 年，而能源桩结构性能需满足完整的建筑使用周期，一般不少于 50 年。能源桩换热系统的运营及报废均不得影响上部结构的正常使用。

3.0.7 应用建筑面积是指在同一工程中，应用桩基地热能利用系统的各个单体建筑面积的总和。由于目前桩基地热能利用工程应用案例不多，因此参考国内外地源热泵规程相关规定，将应用建筑面积为 5000m² 以上或负荷 500kW 以上的系统定义为大型桩基地热能利用地源热泵系统。

3.0.10 工程实践表明，能源桩的温度响应通常在第一个、第二个变温循环过程中较为显著，因此在能源桩投入使用的前 2 年，应加强观测，注意能源桩的稳定性。

4 专项勘察

4.1 一般规定

4.1.1、4.1.2 能源桩所处的地基条件一般相对较差，即地基主要为淤泥质黏性土、有机质黏性土、透水性强的粉细松砂和强风化软弱岩石层等软弱土层。这些地基土体的传热性能是影响能源桩换热性能的关键因素。与其他导热材料不同，岩土是水—气—固多相的多孔介质材料，其热物性参数主要受土体的矿物组成、孔隙率、含水率和饱和度等因素影响。因此，应通过理论、实验室或现场实验测试等方法对岩土热物性进行细致研究与勘察。能源桩所处地层具有较高的含水率时，对提高地基土体的导热系数有一定的积极作用。含水率高的黏性土一般是低渗透性（渗透系数在 10^{-5} cm/s \sim 10^{-9} cm/s 之间），热交换以热传导为主，热对流为辅。原位热响应测试可反映地基传热中多种传热机制的综合影响。

桩基地热能利用工程的岩土工程勘察，应满足现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 的相关规定，并注重对地下水的勘察。当能源桩地基中有高渗透性的粉砂层时，能源桩与地基土体间热交换主要是热对流而非热传导。地下水渗流（比如达西渗流速度达到 5.8×10^{-6} m/s \sim 1.2×10^{-5} m/s 时）会对能源桩换热性能影响显著，可以显著降低能源桩与地基土体之间的温差。这不仅有利于能源桩换热，而且有利于能源桩的结构响应。地下水渗流对能源桩的换热效率、季节性地温恢复和长期稳定性都有显著影响。经验表明，详细的地下水渗流大小和方向的勘察，可为评估地下水渗流影响和优化能源桩设计方案提供依据。

4.2 专项室内试验

4.2.1 温控岩土力学特性室内土工测试，温度控制范围应考虑浅层地热能年内变化幅值，尤其是地表以下 10m~15m 范围内，岩土体温度随季节和地表环境温度变化显著的土层。同时应考虑能源桩在制冷或供暖工况下对桩周土体温度的影响。考虑低温温度控制难度，建议温度控制范围宜为 3℃~45℃。

为了研究温度效应对岩土体力学性质的影响，1995 年西班牙 Catalunya 工业大学研制了温控非饱和土固结仪，将土样盒置于硅油槽内，硅油由浸在其中的电热器加热，土样温度和硅油温度分别用热电偶量测，基质吸力用轴平移技术施加，试验温度控制范围为 22℃~80℃；1996 年比利时 Bruyn & Thimus 研制了温控三轴仪，加热元件是浸没在压力室水（或硅油）中的铜螺旋管，试验温度控制范围为常温至 80℃（压力室液体为水）或 120℃（压力室液体为硅油）；2002 年法国路桥大学的 Sultan 等改进了常规 GDS 三轴仪，用缠绕在压力室外围的线圈加热，控制温度范围为常温至 100℃；2005 年解放军后勤工程学院与江苏省溧阳工程实验设备厂合作研制了温控三轴仪，控制温度范围为常温至 300℃。目前国内外不少厂家均可在常规土工测试仪器的基础上制作温控土工测试仪器，如温控一维固结压缩仪、温控直剪试验仪、温控三轴固结不排水剪切试验仪等。

相关研究表明，循环温度对岩土体力学特性的影响，在前期相对比较明显，尤其是 1 次~3 次循环次数范围内；在循环次数后期，影响相对不明显。因此，温控土工测试的时候，建议温度循环次数不宜小于 3 次。

4.2.2 地基土样热物性测量方法主要有稳态法和瞬态法：稳态法一般需要较长测量时间，并且在対地基土样进行长时间加热过程中，地基土样中的水分在温度梯度的作用下可能会发生迁移，从而给测量带来误差；而瞬态法由于测量时间较短，温升不大，地基土样中不会发生较明显的水分迁移现象，故能更加真实地反

映土壤的实际情况，因此瞬态法在土壤热物性测量方面更具优势。

1 热探针方法作为瞬态法测量导热系数中的一种，因制作简单、使用方便等优点，在湿土壤和干土壤导热系数测量等领域得到广泛的应用（见图 1）。该法由两根不锈钢探针组成，其中一根为加热针，一根为温度传感器；双针插入试样后，加热针发出热脉冲，传感器记录温度随时间的变化，从而计算获得试样的热物性。

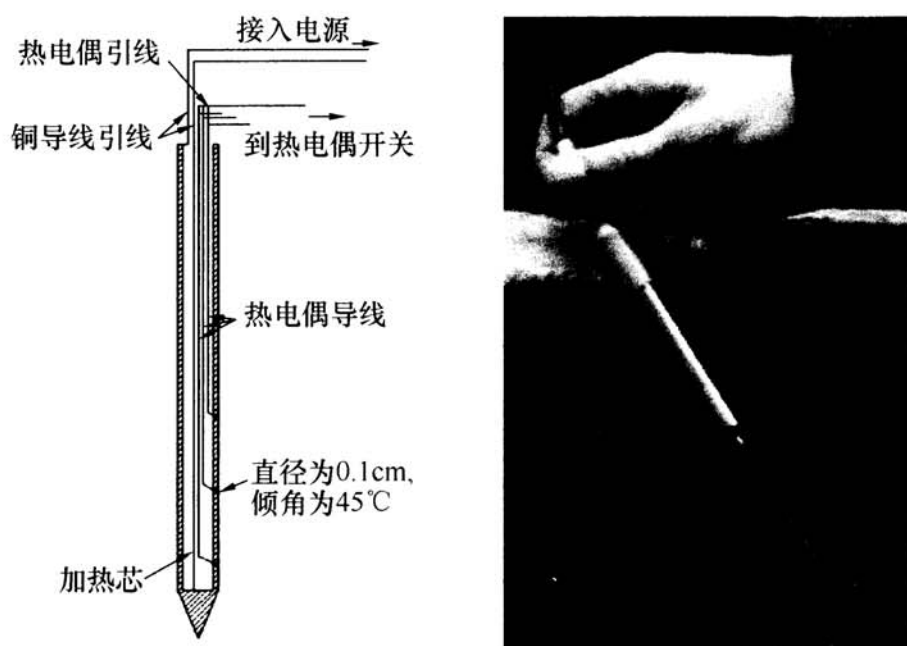


图 1 热探针

2 热平板法，热源位于同一材料的两块样品中间。调整输入到辅助加热器上的能量，对通过热源与辅助板之间的测量温度和温度梯度进行调整；测量加到热板上的能量、温度梯度及两片样品的厚度，应用 Fourier 方程便能够算出材料的导热系数。

3 热线法、热带法和平面热源法，将热源位于同一材料的两块样品中间，加热后测量热源温度随时间变化，而后基于线热源、带热源或平面热源在无限大介质中的传热模型，计算得出导热系数。

对于勘探孔不同深度的岩土体样品进行测定，并以其深度加

权平均，计算该勘探孔的岩土体热物性参数；对于勘探槽不同水平长度的岩土体样品进行测定，并以其长度加权平均，计算该勘探槽的岩土体热物性参数。但加权平均计算得到的结果通常与实际值相差较大，主要原因为非原位测试，试样含水率与原状岩土体相差较大，而且试样压力发生变化导致其致密程度与孔隙率也发生一定变化。因此，对于大型桩基地热能利用系统工程设计，岩土热物性参数应采用原位热响应测试结果。

4.3 原位热响应测试

4.3.1、4.3.2 目前还没有专门用于快速和直接获取地基土的导热系数和容积比热容的原位测试仪器，可通过原位热响应测试得到土层综合热物性参数。

地表以下 10m~15m 范围内，岩土体温度主要随季节和地表环境温度变化；日热波可穿透地基 50cm 深左右，而季热波可达十多米深。10m~15m 埋深以下，为地基土恒温层，具体深度与所在地域有关。恒温层温度宜取当地年平均气温的上下浮动 1℃~2℃。如果有必要，在项目开工前，可以利用原位热响应测试获得测试深度范围内的地温平均值。

通过钻孔热响应测试可以直接或间接获得的岩土主要参数包括：初始（未受扰动的）平均地基温度、测试深度范围内岩土综合导热系数。结合工程地质学的知识，或者从其他试验或已有的资料中获得岩土的比热容，从勘察报告中得到岩土的天然重度，再结合本项测试中得到的岩土综合导热系数，可以计算出岩土的热扩散系数。

4.3.3 能源桩一般都比钻孔埋管短很多，因此在用短的钻孔埋管比拟能源桩进行热响应测试时，注入的热流会在钻孔周边形成漏斗效应，而土层表面与浅层范围内的这种效应非常明显。这种效应会导致利用相对较短的钻孔埋管热响应测试得到的岩土综合导热系数误差增加。

5 能源桩传热性能测试

5.1 一般规定

5.1.1 中、小型桩基地热能利用系统可取经验值或参考值进行设计；当建筑面积较大或现场岩土热物性质不确定时，需要进行现场传热性能测试。单桩的现场热响应测试，一般较钻孔埋管换热器现场热响应测试复杂且耗时，但却为后续能源桩换热设计，甚至结构设计提供了重要实验依据。

5.1.2 能源桩与钻孔埋管换热器尺寸规格存在较大差异，比如能源桩比钻孔埋管换热器直径大，桩型丰富，而且布设的 U 型管的形式多样，导致其换热到达准稳恒态换热的时间长，一般会远超过钻孔埋管换热器的 48h 测试时长，因而较大直径能源桩需要进行长时间的热响应测试。如果此类测试受到桩基施工时间和条件的限制，建议可在桩基施工之前的工程勘察阶段，专门施工测试桩，进行热响应测试。

5.1.5 研究表明，对于一些特殊地基土而言，如果温度改变导致的地基土中水分迁移现象显著，则其加热状态下的热响应测试与制冷状态下的热响应测试所获得的岩土综合导热系数和换热性能有较大差别。而且由于现场热响应试验会受到多种因素的干扰，尤其对能源桩这种相对埋深浅的地下换热器而言，会有 5%~10% 高估岩土的综合导热率的可能，建议采用测试结果的保守值进行设计。

5.2 单桩热响应测试

5.2.1 在桩上进行热响应测试，首先要提供足够的测试时长，一般远大于钻孔埋管测试所要求的 48h，使热流能够克服桩身热阻，穿透到周围岩土地基中。一般的热响应测试数据分析的理论

模型是线热源模型。当桩长与桩径之比小于 40，或在测试时长小于 t_1 的时间内，能源桩的热响应传热过程与线热源或柱热源假定相差较大，因而不能用于进行数据分析。其他的理论模型的适用性还需要进一步研究与讨论。对于一根直径为 400mm 的能源桩， t_1 大约需要 40h~50h。

5.2.3 对桩径大于 1000mm 桩进行热响应测试，虽然可以用来测定桩身混凝土的导热系数，但不可以直接用来确定桩的热阻。主要原因是在这个较短测试时间内能源桩还没有达到准稳态，无法得到桩热阻正确结果。

5.2.4 一般来说，在混凝土浇筑 21d 后，混凝土水化热消散基本完成，桩身内温度与周围岩土温度达到传热平衡，此后热响应测试才能得到合理的换热管内平均温度随时间变化曲线。浇筑完混凝土后，当温度传感器连续 3d 的温度读数的差别不超过 0.5℃ 时，可以认为混凝土水化热消散完毕，桩土温度达到平衡。这样可以缩短热响应测试等待时间。

5.2.5 本条给出了通过安装桩和地基埋深内部的温度传感器，直接量测温度场并通过理论方法获得能源桩热阻和岩土地基热阻的方法。该方法最早由瑞典 Lund 大学提出，被称为多极组合圆柱（multipole method in a composite cylinder）模型。是一种给出不同材料组合而成的内外圆柱模型，当内圆柱内设有多个换热管时的准稳态条件下温度分布的计算方法。通过该方法，在参考已有导热系数的基础上，利用实测的场内准稳态的温差，计算桩和地基的热阻，从而用于大型桩基地热能利用工程的初步设计计算。

5.2.6 能源桩构造多样而且复杂，这会使适用于传统钻孔埋管现场热响应测试的理论分析方法，诸如线热源或柱热源理论的假定与简化有可能不再有效。在这方面，有限元瞬态传热分析程序，具有比计算流体力学程序更高的计算效率，同时可以达到足够的工程计算精度，是岩土和暖通工程师进行构造复杂单桩或群能源桩传热分析（动态、长期）的有力工具。

5.2.7 与桩基不同，地下连续墙由开挖面以上和开挖面以下两部分组成，在开挖面以下部分，应以连续墙轴线为中心，沿径向在连续墙截面中心、左右两侧墙土界面和周边岩土地基中安装温度传感器；在开挖面以上部分，沿径向在连续墙截面中心、临空侧墙体外表面、迎土侧墙土界面和周边岩土地基中安装温度传感器。

5.3 单桩换热功率测试

5.3.1、5.3.2 换热功率测试与热响应测试不同。换热功率测试是在能源桩进口水温恒定的条件下进行的。例如冬季工况可采用进口水温为 5°C ，夏季工况可采用进口水温为 30°C 的测试工况。换热功率测试的主要目的是了解换热器的瞬时换热功率，而且是在地基处于初始温度场条件下获得的。如果测试时间足够长，出口水温随时间变化很小（24h 不超过 0.5°C ），本项测试可以获得准稳态的换热器换热功率。能源桩换热功率测试的准稳态换热功率，一般与进口水温成线性比例关系，受到循环工质质量流量的显著影响。换热功率测试时长较短，一般比桩身传热达到准稳态的时间 t_1 短很多。

5.4 热负荷-结构荷载耦合试验

5.4.1 本项测试属于换热性能测试的延伸。通过在桩不同深度位置上安装应变和温度传感器，在热响应测试过程中施加，桩顶垂直荷载（模拟上部建筑传来的荷载），量测桩在热负荷-结构荷载耦合作用下的桩顶沉降或隆起，以及混凝土桩身的应力改变等信息，从而为评价桩的岩土或结构工作性能提供必要依据。需要注意的是，该耦合测试相比单一的热响应测试，或岩土工程中的桩的静力荷载测试更为复杂，需要时间和经费投入，因此仅适用于大型工程建设项目。

6 能源桩构造和材料

6.1 一般规定

6.1.1、6.1.2 通常情况下，只要具有与地基接触的结构构件，就可在其中配备闭合换热管而使其兼具换热功能。最常见的地下结构构件是桩基础和地下连续墙；除此之外，基础筏板等也可设计成既具有结构功能，又兼备换热功能的筏板换热器。在传统桩基础或地下连续墙中埋设 1 个或多个不影响其结构功能的 U 型闭合换热管路，就成为了能源桩或能源地下连续墙。通过水平总管将该能源桩连接到热泵机组（参见图 2）构成基于桩基地热能利用系统。

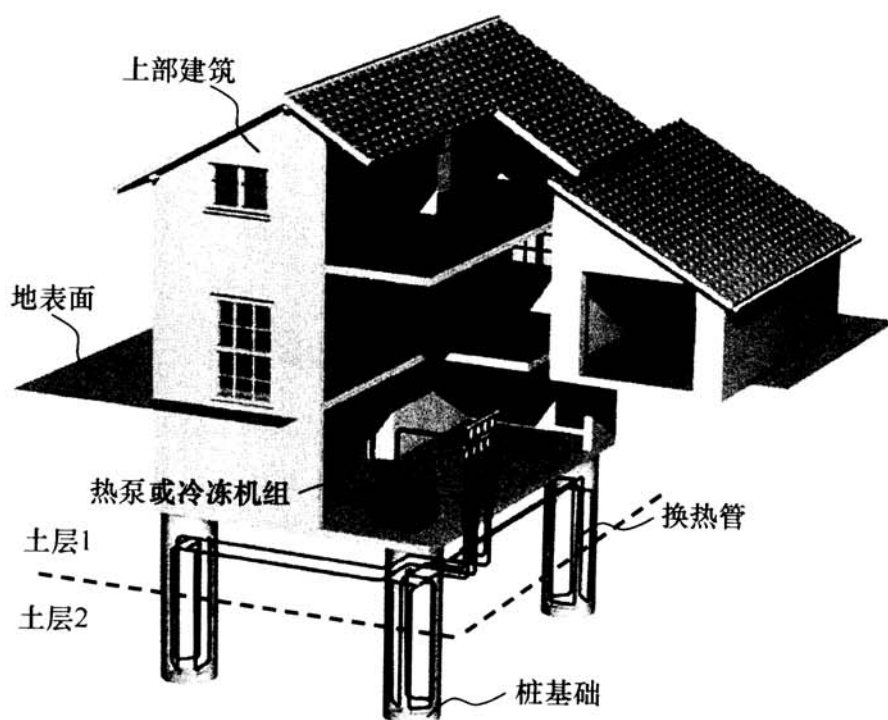


图 2 桩基地热能利用系统示意

6.2 能源桩换热器构造

6.2.1 按施工方式分类，桩基础可分为现场灌注桩（钢筋混凝土桩身）和预制桩（包括钢筋混凝土、钢材和木材等）两大类。现场灌注桩以钻孔灌注桩为主，在现场通过泥浆护壁或钢套筒护壁钻孔、下放钢筋笼、浇筑混凝土而成型；预制桩以预应力管桩为主，在工厂批量预制，运输至工程场地，通过锤击、振冲或静压的方式进行沉桩施工完成。在工程实践中，除木桩外，各种类型的工程桩基础都可通过埋设换热管路而转换成能源桩。

6.2.2 图 3 所示为配备有闭合 U 型换热管路的现场灌注能源桩。

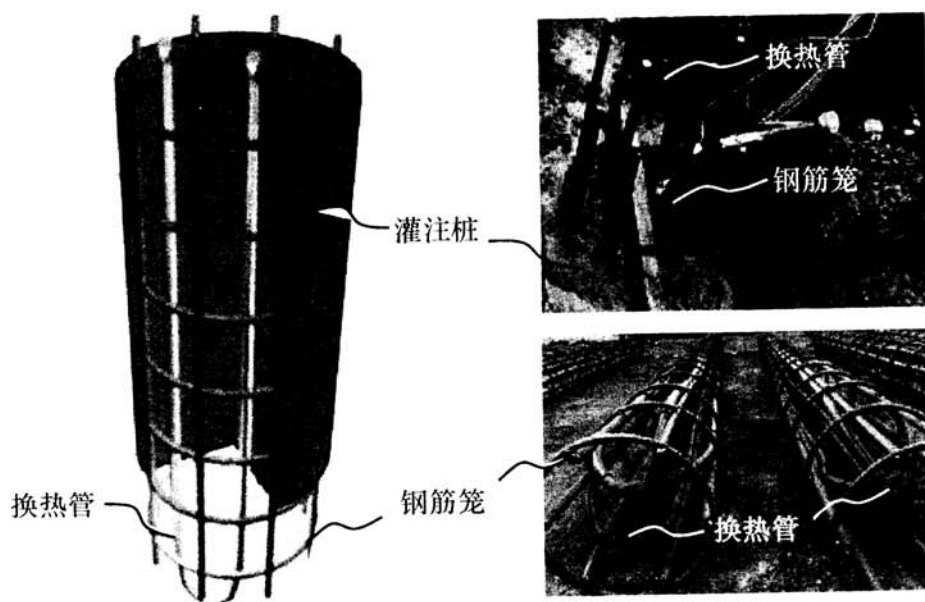


图 3 含闭合 U 型换热管的现场灌注能源桩

6.2.3 预应力管桩桩芯回填材料的选取，仍应按照现行国家标准《地源热泵系统工程技术规范》GB 50366 相关条文进行。图 4 为桩芯设置 U 型换热管路的预应力管桩施工情况。

6.2.4 按受力与传力机制来分，桩基础可分为端承型桩和摩擦型桩两大类。端承型桩将上部结构荷载主要传递给桩端处地基持力层，摩擦型桩将上部结构荷载主要传递给桩侧土体。而换热管循环工质的温度变化，会在摩擦型桩端部产生附加温度拉应力，

应当避免。

6.2.5 除了桩基础之外，也可以在地下连续墙或基础筏板里安装 U 型换热管，以形成墙板式地下换热器。将钢筋笼整体插入地下连续墙的水泥浆之前，需要将 U 型换热管固定绑扎在地下连续墙的钢筋笼侧壁。当地下连续墙是由一系列混凝土支挡排桩组成时，考虑到过小的桩间距会影响换热效率，可间隔地将一部分的排桩安装上换热管路，将其变成兼备换热功能的能源排桩换热器。图 5 所示为配备有闭合 U 型换热管的能源地下连续墙示意图。

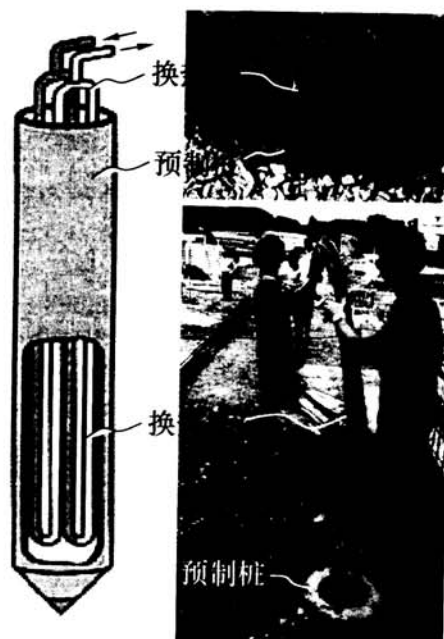


图 4 桩芯设置闭合 U 型换热管的预应力管桩

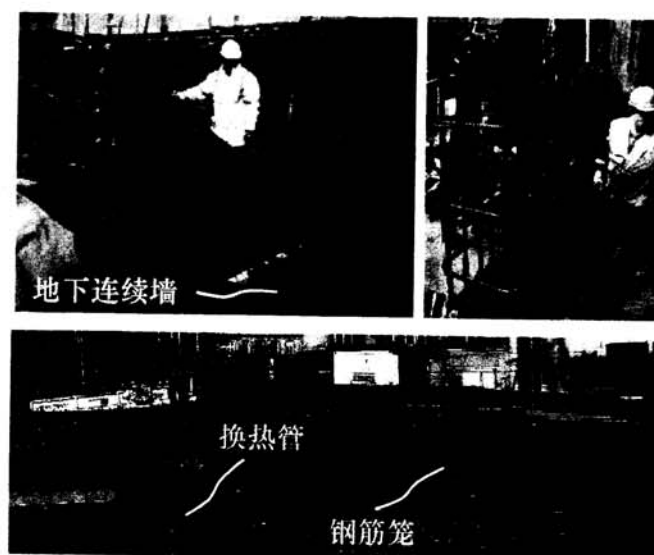


图 5 含闭合 U 型换热管的能源地下连续墙

6.3 能源桩管材与循环工质

6.3.1 由于能源桩属于隐蔽工程，施工完毕后无法进行二次维

修，因此应采用使用寿命长的高质量管材作为能源桩。应符合国家现行标准《给水用聚乙烯（PE）管材》GB/T 13663 和《地源热泵系统用聚乙烯管材及管件》CJ/T 317 的相关规定，聚乙烯管材的期望使用寿命为 50 年。

6.3.7 桩身混凝土配合比需要综合考虑整体结构、施工能力以及桩的换热需求。为提高导热性能，可选用导热系数比较高的骨料，如石英砂代替普通砂等措施。

7 桩基地热能利用系统设计计算

7.1 一般规定

7.1.1 由于目前桩基地热能利用工程应用案例不多，因此参考国内外地源热泵规程相关规定，将应用建筑面积为 5000m^2 以上或负荷 500kW 以上的系统定义为大型桩基地热能利用系统。

7.1.2 桩基地热能利用系统涉及岩土、暖通、控制等多个学科。地下部分是工程最先实施的，因此桩基地热能利用系统的可行性应在项目早期提出并进行论证。尤其要注意结合工程地质水文条件、建筑物冷热负荷和地下结构的几何和传热特性，并随项目进展不断更新方案设计。在方案的初步阶段和技术选型阶段，可根据简化的经验计算方法或数值模拟给出初步的方案，最终的设计方案宜采用动态模拟工具进行计算和优化。

在桩基地热能利用系统设计过程中需注意以下几点：

1 能源桩的布置通常是由结构/岩土工程师根据建筑结构本体来确定的。这意味着，桩基地热能利用系统设计的目的是对给定的建筑桩基进行换热管路的优化设计，而非需要满足建筑物全部的冷热需求。

2 根据经验，通常可利用的能源桩数量仅能满足建筑本体的部分冷热负荷或基础负荷，因此在进行详细设计之前，应明确能源桩可承担的建筑冷热负荷比例，确定是否需要增设钻孔埋管或其他辅助冷热源与能源桩共同承担建筑负荷。

3 相比钻孔埋管换热器，能源桩长度短、直径大。在能源桩短期性能和长期性能的分析中需考虑这种几何上的特点。

4 能源桩的热阻比钻孔埋管换热器要大，具体数值还与放置的换热管路数量和连接方式有关。

7.1.3 在详细设计阶段，应采用简化的设计模拟软件或专业的

能源桩设计软件，对系统进行至少为期一年的取热和放热工况模拟，并确定系统主要部件的相关参数、优化系统方案和控制策略，给出运营管理策略。

7.1.4 对于复杂的系统，要给出能源桩的基本负荷和附加负荷，包括每月冷热负荷 ($\text{kW} \cdot \text{h}_{\text{th}}$)（每月的高峰负荷及其持续的最长时间）的建筑最小年负荷，以确定能源桩每年传递的热量。桩基地热能利用系统计算周期内累计释热量与吸热量失衡，将导致能源桩周边区域岩土温度持续升高或降低，影响换热器换热性能，降低热泵机组的运行效率。因此，桩基地热能利用系统设计计算应考虑全年动态负荷的影响，并保证总释热量和吸热量平衡。对于地下水渗流流速较小的埋管区域，总释热量与总吸热量两者比值在 0.8~1.25 之间可认为地下冷热负荷基本平衡。地下水渗流流速较大（不小于 $0.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ）的区域，系统的释热量和吸热量可以通过地下水流动取得平衡，从而避免季节性的地温的较大变化，因此可不考虑冷热平衡的问题。

7.2 系统设计计算

7.2.1 根据不同桩基结构，可以选择不同的换热管路形式，例如单 U 型埋管，双 U 型或多 U 型换热管路并、串联布置，以及螺旋埋管的布管形式。

7.2.2 能源桩全年逐时负荷是指换热管路与桩周土体之间的全年逐时吸热量与释热量。扣除热泵机组压缩机功耗之后，吸热量应等于换热管路承担的建筑热负荷加上输送过程的热损失再减去水泵释放的热量；换热管路的释热量等于换热管路承担的建筑冷负荷加上热泵机组压缩机功耗之后再加上输送过程的热损失与水泵释放的热量。具体分析应符合现行国家标准《地源热泵系统工程技术规范》GB 50366 的相关规定。

7.2.4 能源桩的长期换热性能，受岩土体热物性尤其是地下水流动情况的影响非常大，设计前需对现场地下水渗流速度及岩土综合导热系数（包含了地下水的影响）等参数进行测试。不同的

地下水流动情况，能源桩动态分析可采用不同的参数取值和分析方法：

1 无地下水渗流时，能源桩与岩土体之间的传热为单一的热传导问题，岩土体可作为单一土体，可采用热响应测试所得综合导热系数作为土体的导热系数，利用专业的设计计算软件进行设计；也可对不同土层采样测试得到分层土体热物性参数，应用数值分析软件进行动态分析；

2 地下水流速不大（小于 $0.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ）时，地下水流对能源桩换热有利，可采用考虑地下水影响的综合导热系数为岩土体导热系数，也可应用考虑渗流与传热耦合的计算模型及软件进行动态分析；

3 地下水流速较大（不小于 $0.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ）时，不存在冷热平衡的问题，可不进行动态设计计算。

7.2.5 能源桩的长期换热性能与建筑冷热负荷变化、热泵运行性能有很大关系。数值模拟软件分析能源桩传热精度高，但计算时间长，且数值模拟软件很难对包括地下换热器、热泵机组以及建筑负荷在内的整个系统进行性能模拟。因此有必要采用专业系统模拟软件对系统进行精细的动态模拟。

7.2.6 明确桩和地基土温度变化范围、给定换热管路中循环工质的温度范围，不只是满足建筑负荷需求，同时也是为了桩基工程的设计，要让这些温度变化处于桩基工程师认可的范围内，为桩基设计人员考虑温度变化对桩基力学与变形性能的影响提供依据。

7.2.7 能源桩的规格与数量的确定，需综合考虑与供热/制冷系统相关的多个影响因素。其中最为重要的因素包括：

- 1) 工程地质水文条件；
- 2) 能源桩的分布、数量与几何特征；
- 3) 由位于建筑基础底板内的水平总管产生的热损耗（需考虑基础底板是否有必要设隔热层）；
- 4) 建筑的冷热负荷；

5) 同时满足能源需求和桩基结构功能。

7.2.8 在无地下水流动的土层中，桩基地热能利用系统全年总释热量与总吸热量的平衡，是确保土壤全年热平衡的关键，应分别计算系统夏季设计冷负荷与冬季设计热负荷对于能源桩总长度的要求。当总释热量与总吸热量无法平衡时，为了保证土壤的热平衡，也为了系统运行经济合理，可增加辅助冷热源，也可以与其他冷热源联合运行。

7.2.9 能源桩输配系统的耗电输冷热比反映了地下换热器输配系统中循环水泵的耗电与能源侧冷热负荷的关系，对此值进行限制是为了保证水泵的选择在合理的范围，降低水泵能耗。该数值可参考国家现行标准关于闭式循环水系统的耗电输冷热比的相关规定。

7.2.10 为保证能源桩的换热能力，一般建议将能源桩换热管路出口与机房热泵入口之间的水平总管作为换热富余量考虑。

7.2.13 从传热角度来看，换热管中循环工质与周围地基的温差越大，换热功率越大。但是，过大的温差会影响桩基础结构及其周围土体的力学性能，因此要限制循环工质的工作温度范围。能源桩的使用不允许导致桩、土温度降到 2°C 以下，以避免由此而引发的地基土的冻融循环，严重影响桩作为结构构件的承载能力。当能源桩换热管路中的循环工质仅仅是水，并没有添加其他防冻剂时，地基土不会发生冻结。对于添加防冻剂的循环工质应注意地基土最低温度限制。

7.2.14 群桩的换热功率可通过非线性数值分析方法进行定量分析，由单桩换热功率折减得到。

8 能源桩结构设计计算

8.1 一般规定

8.1.1、8.1.2 与常规桩基相比，能源桩除了承受上部建筑荷载外，还受到较为显著的温度变化作用。因此，在其结构设计计算和确定桩的埋深与尺寸时，需要考虑如下结构-温度耦合效应：

1 温度变化对桩周土体，尤其是软弱土体力学性质和桩-土界面特性的影响。这表现为土体抗剪强度、刚度和界面力学特性的变化，进而影响桩的附加温度变形以及桩承载力变化。

2 温度变化引起的桩体径向和纵向胀缩受到周围岩土约束所引起的桩身附加温度应力。附加温度应力对能源桩身结构一致性的影响需要考虑。

3 一般情况下，并非所有桩基都安装换热管变成能源桩。这种条件下，变温胀缩的能源桩-常规桩基-基础与上部结构相互作用问题，应进行妥善考虑。

4 在软弱灵敏性土中设计施工能源桩，应对循环温度作用下能源桩的稳定性进行评估。

5 如果能源桩是冬夏两用的，应着重评估冬季工况下桩身断面可能出现的附加温度拉伸应力、桩-土界面的弱化等引起的桩身稳定性问题，通过合理的设计、构造和限温措施，保证能源桩的稳定性。

能源桩结构设计的目标是在给定的结构和变温荷载共同作用下，仍然满足建筑桩基规程规定的承载力极限状态设计和正常使用极限状态设计。能源桩结构设计目标和主要内容应包括：

1 承载力极限状态设计。应考虑变温对地基土力学性质影响；

2 正常使用极限状态设计。应考虑变温引起的桩体附加约

束应力，还应妥善考虑季节性循环温度效应对桩体内力和沉降的影响。

8.2 温度作用效应

8.2.1 对于饱和软黏土或渗透系数较低的土体，应考虑由于孔隙水胀缩受到土体骨架限制，因孔隙水与土骨架的热膨胀系数显著差异所引起的温变超静孔压累积，以及其他微观结构变化导致的土体抗剪强度的改变。

1 温度升高时黏性土中超静孔压上升，会引起土体不排水抗剪强度和刚度的降低，在设计中应予以考虑。

2 而当温度恢复或固结发生时，土体的不排水强度又会部分恢复。恢复的程度取决于土体的类型、超固结比和温度变化幅度等。

3 变温对能源桩承载力的影响是一个动态过程，同时受到变温幅值和变温循环次数的影响，所以需要同时考虑最大变温和循环变温条件下的桩基承载力变化。能源桩承载极限状态设计的安全系数则取为与常规桩基相同（见现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 的相关规定）。

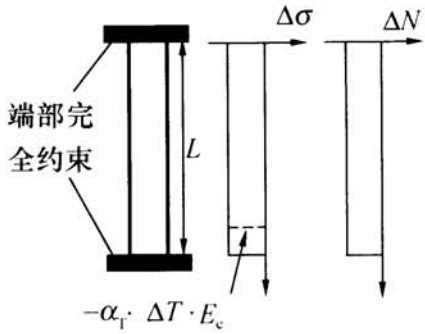


图6 温度荷载作用下桩身附加轴向应力和附加轴力计算简图（ $\Delta\sigma$ 和 ΔN 分别为温度变化 ΔT 引起的附加轴向应力和附加轴力）

8.2.2 为简化起见，对于端承和桩顶受约束的桩，假定温度引起的变形在桩端部受到完全约束（如图6），而忽略桩侧摩阻力的约束作用，则桩身温度附加轴力沿桩长均匀分布，其大小可通过式（8.2.2）确定。对于摩擦桩，根据国内外原位能源桩温度应力实测结果，当桩顶约束不大时，温度变化引起的桩身变形一般无法由侧摩阻力完全约束，其引起的桩身附加轴向应力最大值应小于端承受约束桩的附加轴向应

力值，其折减程度受桩周地基软弱程度的影响。对于正常固结或轻微超固结地基，因其约束桩温度变形能力弱，折减近一半；而对于超固结地基而言，其约束能力增加，可不进行折减。本条提出的附加温度应力系数大小与桩土界面性能和桩端约束强弱息息相关。

8.2.3 能源桩结构设计重点，在于结构荷载和温度效应耦合作用下的桩基受力和变形计算。对于地基土力学性质良好的工程，可按相似条件下的已有能源桩结构热响应的实测规律给予近似考虑；而温度对软弱土体力学性质存在较大、较为复杂的影响，因而需要结合现场原位测试和实验室测试进行更为精确的设计计算。

8.3 单桩竖向承载力

8.3.1 随着温度恢复、超静孔压的消散以及温度蠕变机制等的发生，桩周土体的热固结（主固结和次固结）会导致不可恢复的土体变形，在桩的变形设计计算中应予以考虑。如果桩周土体为正常固结或者轻微超固结黏性土，在升温荷载作用下往往表观先期固结压力降低，并将可能产生进一步的热固结沉降，从而在桩表面产生负摩阻力，导致桩的少量下沉；而对于严重超固结黏性土，升温荷载作用下其先期固结压力的变化很小，桩倾向于产生体积膨胀，因而桩体将可能产生较小的上抬运动。桩土界面性质会受到循环温度荷载的显著影响。在变温作用下，桩身将发生径向膨胀或收缩趋势，而桩周土体也会相应体缩、体胀。桩土界面上正向应力和摩擦力的大小和方向会发生改变，从而影响桩的强度和长期变形。

8.3.2 黏性土的变形性质对温度影响较为敏感，这主要体现在其所含孔隙流体的动力黏度、液塑限、表观先期固结压力、不排水强度指标和附加热固结压缩等的温度相关性：

典型重塑黏土（高岭土和伊犁土）的热固结实验结果表明，正常固结黏性土在正常荷载作用下，受到最多 3 次温度循环作

用，其固结压缩量便趋于稳定。因此，建议在设计分析时至少采用 2 个~3 个温度循环进行计算。另外，在瑞士、德国和奥地利等国的能源桩长期使用经验也表明，能源桩使用的最初几年，应加强其结构响应监测。

2 黏土的孔隙水在温度升高时动力黏滞度降低，导致黏性土的塑限和液限的降低。当土体温度从 20℃ 升高到 100℃ 时，塑限和液限可下降 10%~15%；

3 土体的先期固结压力是指其在历史上曾经承受过的最大竖向有效应力值，它与温度荷载历史无关。但是，由轴向应变（或孔隙率）-竖向有效应力对数曲线确定的表观先期固结压力（或称为屈服应力）则与温度息息相关，如图 7 所示。

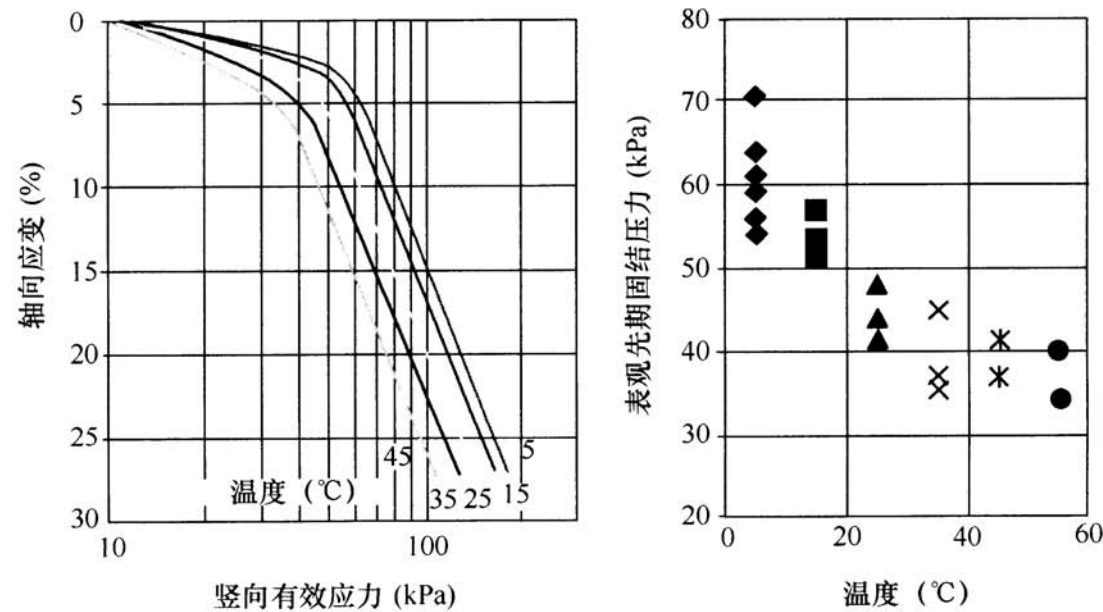


图 7 温度对固结曲线及表观先期固结压力的影响（含硫粉质黏土）

4 温度对软土蠕变行为的影响主要表现为：升温引起饱和黏性土的温度蠕变 [如图 8 (a)]，在实际工程中可表现为地基的附加沉降，这主要可能发生在正常固结或轻微超固结黏性土中；

5 温度变化对土体剪切强度的影响，这种影响在不排水条件下最为不利，对于正常固结或轻微超固结黏性土通常引起不排

水剪切强度的降低，如图 8 (b) 所示。

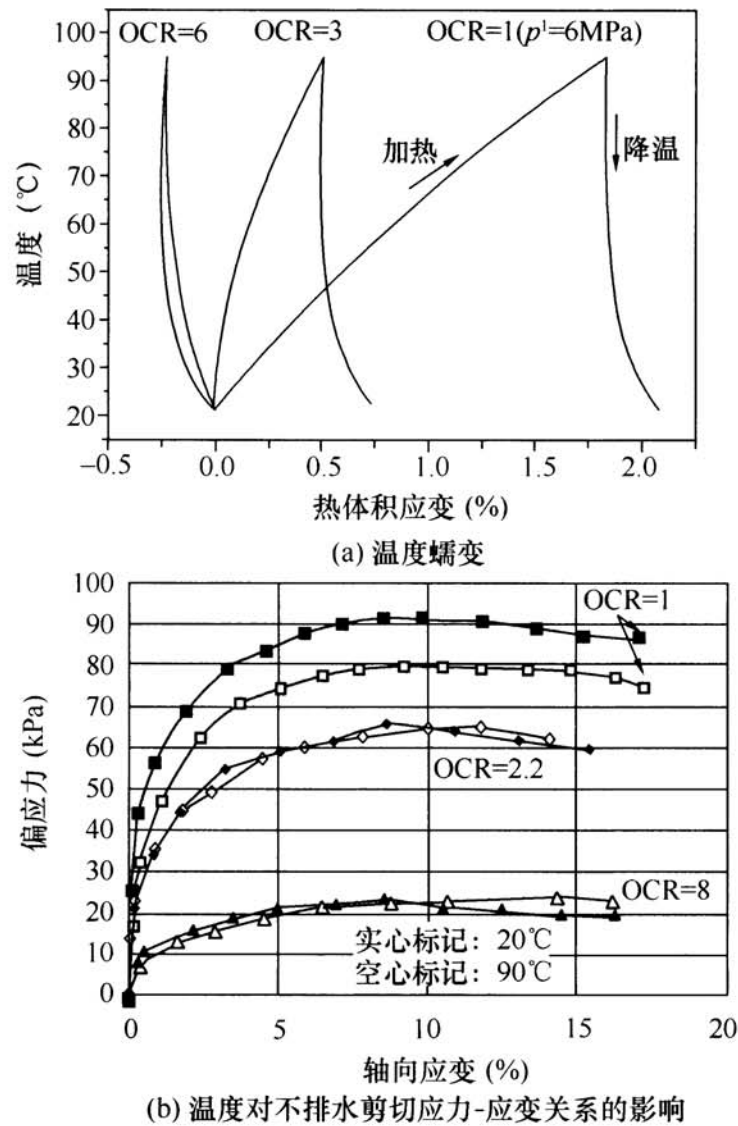


图 8 不同超固结比 (OCR) 黏性土温度-荷载耦合影响曲线

8.3.3 在温度荷载作用下，能源桩桩-土相对变形和附加温度应力很大程度上依赖于桩端的固定程度：

1 对于桩底和桩顶位移均不受约束的桩，在温度荷载作用下桩顶和桩端将分别产生向上和向下的运动。若假定桩的位移只在桩端处被完全约束，而在其他方向桩的热变形充分发展，则温度荷载引起的桩顶位移等于温度应变乘以桩长。上部结构荷载较小或者

一个承台下所有桩均为能源桩时，桩顶可近似视为无约束状态；对于软土或者软岩中的能源桩，其桩端也近似处于无约束状态。

2 上述无约束自由变形状态下，能源桩的温度变形最大，而附加温度应力最小。当承台下连接有非能源桩或桩底土体约束较强时，桩身会产生较大的附加温度应力，而温度变形则较小。总体而言，在温度荷载作用下，端部约束可导致桩身应力绝对值的增大（降温时为拉应力，升温时为压应力）和侧摩阻力的减小。

能源桩在温度荷载和结构荷载联合作用下的桩身应力（或内力），可根据线性叠加原理近似获得（如图 9），即先分析仅结构

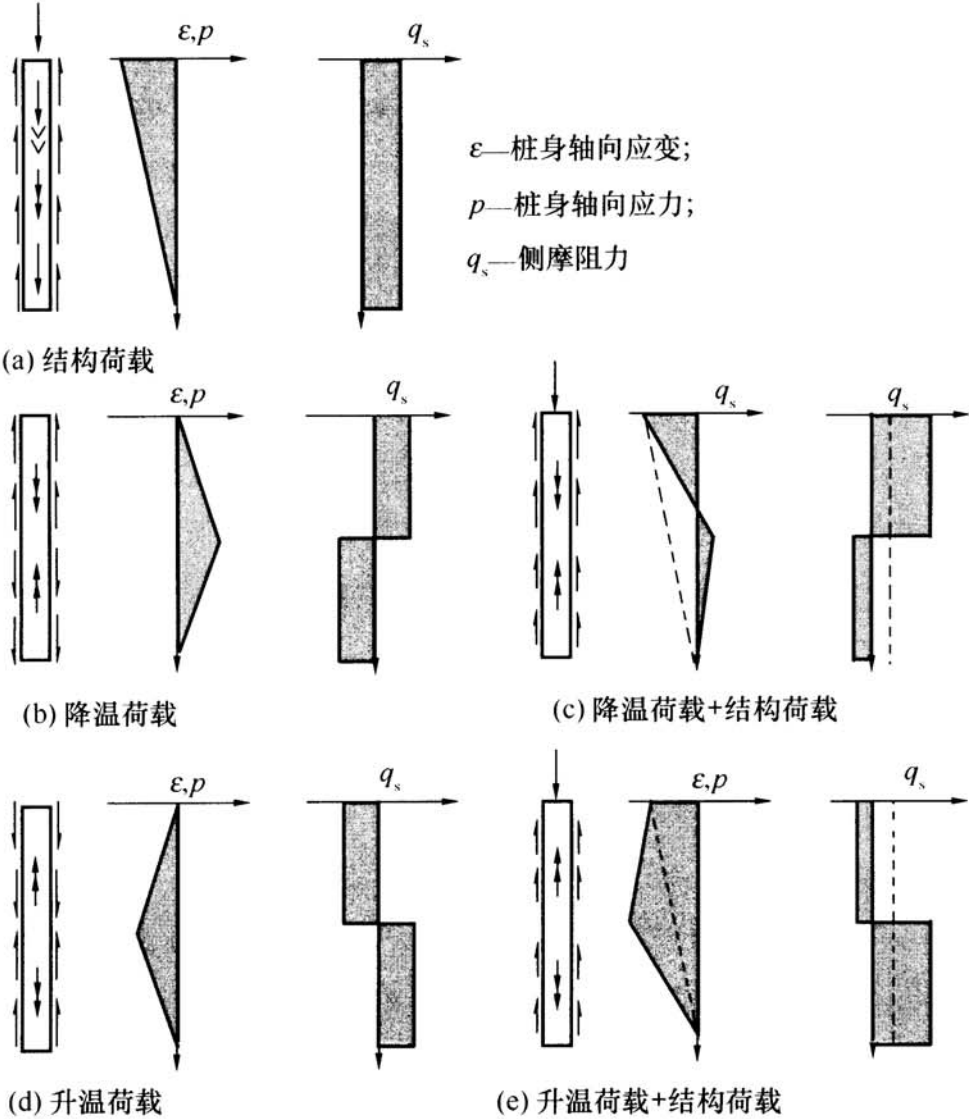


图 9 能源桩的传力机制示意

荷载和仅温度荷载作用下的内力分布，再进行叠加求和。分析时需要注意以下几点：

1 在结构荷载和降温荷载共同作用下，桩上部轴向压应力减小，而下部可能出现轴向拉应力。相较于仅结构荷载作用的情况，上部侧摩阻力增大，而下部侧摩阻力减小。由于桩侧的摩擦约束，降温条件下桩内可能产生轴向拉应力。

2 在结构荷载和升温荷载作用下，桩轴向压应力增大，这可能导致桩身发生压缩破坏。相较于仅结构荷载作用的情况，上部侧摩阻力减小，而下部侧摩阻力增大。在桩侧摩阻力的作用下，桩将产生上抬（加热工况）或者沉降（制冷工况），而桩顶位移量的大小取决于桩-土相对位移及其对应的桩侧约束作用的大小。

3 在加热和降温作用下，桩身将分别产生径向膨胀和收缩。对于大直径桩，其径向位移将更显著，使桩身受到的径向土压力发生改变，继而改变桩侧摩阻力的分布和大小。

9 能源桩施工与检测

9.1 一般规定

9.1.1 能源桩施工前的准备工作很重要。通常情况下，工程桩施工前应编制施工组织设计。针对能源桩的施工还应在施工前编制能源桩专项施工组织设计。

9.1.2 与一般的工程桩施工相比，能源桩施工过程中涉及更多的交叉作业，尤其是穿越地下室底板和水平总管施工时，应采取相应措施对地下管线及构筑物进行保护。

9.2 换热管路的安装与保护

9.2.5 当工程桩较长时，钢筋笼通常需分段连接。相应地，桩孔内换热管也需分段连接。钢筋笼连接和换热管连接交叉施工时极易造成换热管损伤。工程上经常采用的办法是对连接段的换热管采用橡塑保温材料进行包裹，避免换热管受到直接机械损坏和焊接损伤。

换热管在空间上的定位是否牢固，会极大地影响到其换热性能的发挥。换热管通常是绑扎在钢筋笼上。当采用 U 型或 W 型布置时，换热管与钢筋笼主筋方向平行，只要贴紧绑扎即可；但当采用螺旋型布置时，浇筑混凝土的导管在下放时易触碰到换热管。因此本条建议螺旋型布管方式宜绑扎在钢筋笼外侧，避免导管下放过程中造成对换热管的损伤。当在预制管桩中布设换热管路时，建议按钻孔埋管的方式对管路进行空间定位，例如按照不大于 2.0m 间距布置定位支架。

9.2.6 工程桩在成桩施工完成且达到混凝土龄期后一般均会进行剔除桩头浮渣和截断多余桩段的作业，这个过程中极易造成换热管的破坏。工程上常用的对换热管路保护方法是在拟破除桩段

的范围内布置钢套管避免换热管受到直接的破坏。外包橡塑保温材料的主要目的是一是阻止水泥砂浆进入钢套管内；二是使换热管居中，使得在切除桩顶上部的钢套管时易于控制切割位置，而不至于使换热管受到损伤。

9.2.7 在带压状态下下管，可以抵消流态混凝土围压避免产生挤压破坏。同时考虑到大部分建筑桩基桩顶均在自然地面下一定深度（主要取决于地下室的层数和层高），对回路一端进行封堵，管道打压后在另一端通过设置阀门来做保压处理。本条建议可设置 PE 阀门主要是基于成本的考虑。由于管端受控于桩顶埋深而埋在自然地面下一定深度，阀门后续会被切除，因此是一种临时性构件。

9.2.8 基桩桩头处理和截桩作业极易造成换热管的损伤，本条规定要采取切实有效的措施保障在作业过程中减少对管路的破坏。冲洗并试压是对每一个管路进行检查确认的重要环节。

9.2.9 本条中单桩换热能力退化可能是由于换热管堵塞、弯折或断裂引起的。

水平管沟底回填材料通常建议采用细砂。

工程实践中发现，有些能源桩项目实施后，会引起地下室底板渗漏问题。主要原因是换热管穿越地下室底板时，工程措施不当引起的。本条的建议措施是在工程实践中得到认可的有效方法。对换热管和钢套管间的空隙进行灌浆处理尤为重要。

9.2.10 管材熔接过程应该严格按照制造商的要求及程序进行，并由经过适当培训的人员实施熔接工作。管材熔接方式包括电熔、热熔和承插焊接。换热管路连接件所用材料应与管材一致。桩基地热能利用承包商应对恶劣天气下的管材熔接工作采取适当措施。

9.3 换热管路的压力测试及冲洗

9.3.1 本条参考了现行国家标准《地源热泵系统工程技术规范》GB 50366 中关于换热管试验压力的有关规定，主要是考虑了压

力值的安全储备。

能源桩的冲洗和压力测试要比一般的钻孔埋管工程复杂。根据其工艺流程分为五次水压试验，且随着换热系统总装程度提高，其稳压时间逐步加长。本条规定主要是强调，在换热系统逐步形成的每一个环节中，通过水压试验加强过程控制。

9.3.2 包括能源桩和钻孔埋管在内的整个换热系统的水力平衡对于降低系统运行能耗非常重要。本条规定，在系统调试阶段，应对水力平衡系统进行综合评估，并与设计工况进行比对，查找原因和进行设计修正。

9.3.3 包括能源桩和钻孔埋管在内的整个换热系统的冲洗是保障系统安全和高效运行的重要措施。本条参考了现行国家标准《地源热泵系统工程技术规范》GB 50366 中对于系统冲洗的相关规定。

10 施工质量验收

10.1 一般规定

10.1.1 本条强调了加强能源桩过程控制和检验的重要性。

10.1.2 能源桩是工程基桩和地下换热器两种功能叠加的工程构件。因此能源桩作为地下换热器构件，应满足国家标准《地源热泵系统工程技术规范》GB 50366 - 2009 和行业标准《埋地聚乙烯给水管道工程技术规程》CJJ 101 - 2016 的相关规定。

10.1.3 能源桩是工程基桩和地下换热器两种功能叠加的工程构件。因此还应按《建筑桩基技术规范》JGJ 94 - 2008 进行检查和验收。

10.2 施工前检验

10.2.1 工程材料检验是工程施工中不可或缺的环节，本条对于换热管的检验规定作了更明确的要求。

10.2.2 本条强调，大型能源桩工程除应进行岩土热物性测试外，尚宜对混凝土导热系数进行测试，以提高设计精度和系统的可靠性。

10.2.3 热熔连接是换热管连接的重要方式，也是工程质量控制的重要环节。进行现场热熔连接试验，确定工艺参数，对保障焊接质量至关重要。

10.3 施工中检验

10.3.1 换热管路的材料质量、连接和焊接施工质量以及压力测试成果的可靠度是能源桩的重要质量控制环节。本条进一步强调在工程检验报告中应将这些检验内容包含在其中。

10.3.2 本条强调了水平管路安装的控制要点，尤其是对回填材

料提出了更明确的要求。

10.4 施工后检验

10.4.1 本条明确了管路水力平衡检验的重要性。

10.4.2 能源桩支路换热功率检测对于评估换热系统的整体换热能力非常有帮助，当条件允许时宜开展这方面的测试工作，尤其是对于大型能源桩工程。

10.4.3 能源桩热负荷-结构荷载耦合试验，能同时测定项目所在地水文地质工程地质条件下，对应的能源桩承载能力极限状态和换热工况下的换热参数和结构响应特性指标，是能源桩工程一项重要的基础试验。由于其测试成本高、时间长，因此本条仅对三种情况进行了要求。

10.4.4 本条强调了水压试验的重要性。

10.5 工程验收

10.5.1 本条明确了能源桩工程作为一个重要的分部分项工程，其验收主体至少包括了四方重要的责任主体。

10.5.2 本条强调了能源桩工程验收材料既包含桩基结构验收资料，也应包括水平管路在内的换热管路验收材料。

11 运行与维护

11.1 一般规定

11.1.1 研究表明，桩基地热能利用系统的能效，不仅与设计、施工有关，而且与后期运行、维护有密切关系；进行系统运行状态参数优化设计，对掌握系统运行状态、及时调整运行策略，以及提高系统运行效率都具有重要的指导意义；桩基地热能利用系统通过与桩周岩土体进行热量交换，达到为上部建筑物提供制冷和供暖需求的目的，这种热交换一定程度上改变了周围岩土体原始地温场；地温场持续升高或降低会导致换热效率降低，使桩基基础发生变形，也会带来地质环境问题。依据地温监测结果，通过调整系统运行方式，将地温场变化控制在可接受范围内，实现桩基地热能利用换热系统长期稳定、高效运行，达到控制桩基基础变形、减轻或消除对地质环境影响的目的。

11.1.2 监测数据是评判系统运行合理性和对地质环境影响程度的重要依据。为指导桩基地热能利用系统合理运行，应定期对监测数据进行分析。监测数据分析的周期，宜根据工程的实际情况和运行管理需要确定。

11.2 运行监测

11.2.1 本条规定，运行过程应监测换热系统的主要参数，以反映换热系统运行状况和能效情况。循环工质的温度可通过在管路内安装温度传感器进行监测；流量可采用回直管安装流量计进行监测，热泵机组和水泵功率可采用安装电流互感器或电表进行监测。热泵机组电耗与循环水泵应分开监测。

11.2.2 地温监测一般采用两种方式：一种是将温度传感器直接埋入地下；另一种是以成井方式设置监测孔，在孔内测温。工程

实践表明，将温度传感器埋入地下测温的方法存在两个主要问题：

1 成活率低。一些工程在埋设后不久就发现部分传感器无法使用，一些工程在监测运行一段时间后不断有传感器失效，直至所剩无几。造成这种现象的原因主要是施工方法不当或传感器密封性不能满足要求。

2 随着时间的延长，传感器有数据漂移现象，不能准确反映测点温度，主要与传感器的物理性质有关。

比较两种监测方式可以发现，成井方式设置监测孔具有以下优点：

1 监测方式灵活，可以是人工方式，也可在监测孔中布置温度传感器进行自动监测；

2 采用监测孔内布置传感器方式时，传感器（或系统）损坏可以更换，也可以定期取出进行标定，能够保证监测工作的长期进行。

因此，地温监测宜采用成井方式设置监测孔，监测孔内布置监测点。监测孔宜布置在能源桩密集区，区外部的地温监测主要用于环境影响分析。

地质环境监测孔和监测点布置应具有代表性。在桩基地热能利用系统深度范围内，当土质类别不同，特别是当含水层的厚度、渗流速度存在显著差异时，或者桩基地热能利用系统的桩长、桩间距以及换热管路数量不同时，应分别设置监测孔。桩基地热能利用系统外围的地质环境监测孔应位于地下水径流的下游方向，用于地热影响范围和程度的分析，以及地质环境变化的长期监测。已有研究表明，桩基地热能利用系统连续多年运行的显著影响半径一般不超过 10m，因而外围监测孔可在 10m 范围内设置。

11.2.3 在换热系统运行过程中，温度变化会造成桩基基础的热胀冷缩，由热固结所导致的土体变形也会使桩基基础产生沉降。因此，有必要对桩基基础变形进行监测，以保证建筑物的运营安

全，当出现异常情况时，应及时发出预警。可根据建筑类型和委托方要求，确定桩基基础变形监测方法、精度等级和测量仪器设备。

11.2.4 自动监测系统具有准确、高效的特点，尤其适用于多要素同时监测的情况，故本标准建议采用自动监测系统。自动监测系统的数据采集频率可根据需要设置，通常热泵运行参数监测的数据采集频率不宜大于 3min，换热区地温的数据采集频率不宜大于 30min。

11.3 系 统 维 护

11.3.1 管理制度建设的目的是为了保证系统安全、高效运行。日常管理工作应包括：定期清洗除污器、过滤器、换热器及相关管路，设备保养，仪表及传感器校准，运行数据记录。只有明确了人员职责，明确日常操作与定期维护内容，才能确保系统持续、正常运行。

11.3.2 岩土体热平衡是桩基地热能利用系统的一个重要问题。除了在系统配置时要求提供岩土体热平衡调节手段外，更重要的是在运行过程中进行地层温度监测与控制调节。根据年运行测试结果（也可进行全年岩土体热平衡模拟计算得出结果），制定桩基地热能利用系统全年运行预案，通过地温监测孔监测、记录岩土温度，定期分析岩土体温度变化，对桩基地热能利用系统的运行策略进行调整，切实解决热平衡问题，提高系统运行效率。

11.3.4 一般情况下，规模较大的桩基地热能利用系统宜设置集中监控系统。设置该系统的目的是能提供恰当、合理地运行策略，取得有效的节能效果。较大规模的能源系统往往是多能源复合系统，有了集中监控系统可以把各种能源系统集合起来有效地进行控制，充分发挥各种能源系统的节能优势。

11.3.5 节能不仅体现在系统设计中，也体现在运行与维护中。气候、使用情况、设备性能的变化会影响系统运行能耗，因此记录系统能耗与其他有关运行数据是分析与制定运行策略的基础，

从而使设备、系统运行工况始终与负荷需求相匹配，使机组与系统获得最佳能效比。

11.3.6 桩基地热能利用系统运行期间，如果长期提取和注入的热量不平衡，将会导致桩基地热能利用系统所在区域地温的持续升高（降低），一方面会影响桩基地热能利用系统的运行效率，另一方面也会改变原生态土壤的温度分布，从而影响当地地表生态系统。过度的地下水冷却会提高水的 pH 值，降低钙的溶解度，提高气相二氧化碳的溶解度；而过度的地下水加热将导致相对较大的氧气溶解度，会加速含氮有机化合物的矿化和有机残体的分解，也会使地下水不适合饮用。温度是土中微生物最重要的环境因素之一，许多微生物的存活受到了温度的严格影响，尤其是在 -10°C 时，细菌微生物的活性将显著降低。当土壤温度高于 30°C 时，植物的根系生长会受到抑制，引起植物早衰。

附录 A 岩土体热物性参数参考值

A.0.1、A.0.2 以下关于岩土热物性参数取值的研究成果可以参考使用：

1 Harland & Nixon (1978) 给出了两种类型地基土（砂和砾、粉土和黏土）的导热系数与含水率、干密度的关系图（图 10）。

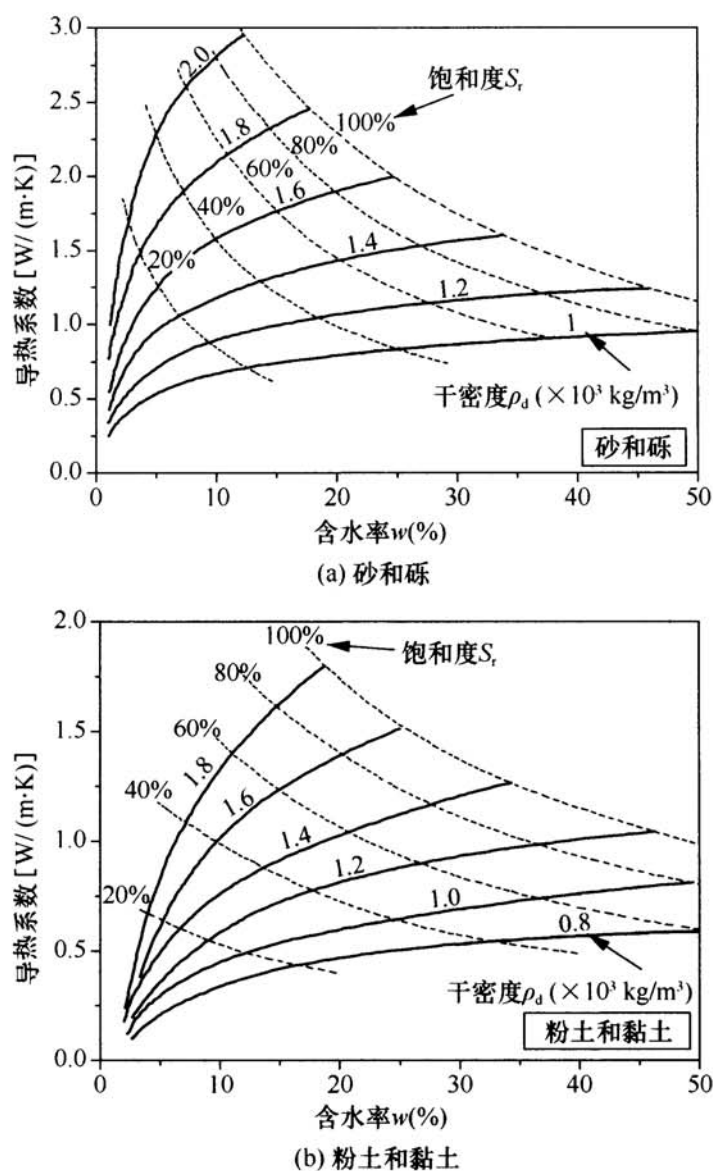


图 10 地基土导热系数与含水率、干密度关系

2 Solomone et al. (1984) 给出了 AMRL 粉质黏土导热系数与含水率、干密度关系图 (图 11)。

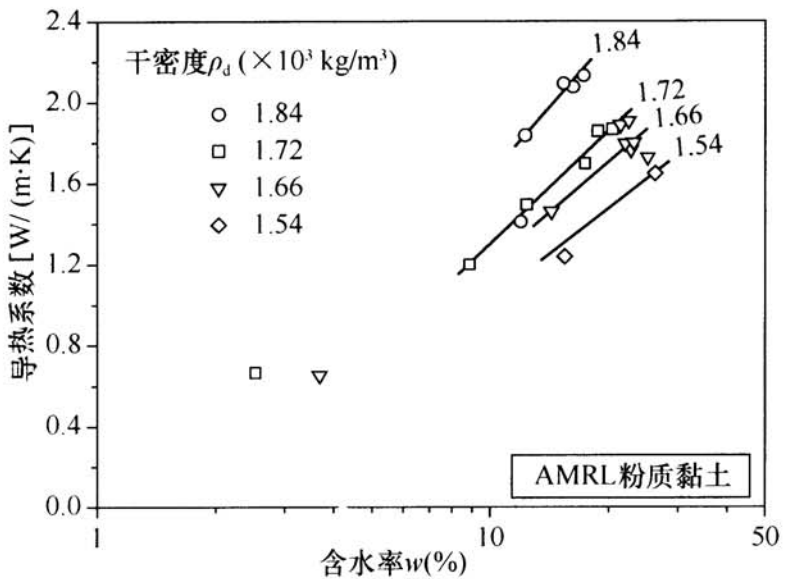


图 11 AMRL 粉质黏土导热系数与含水率、干密度关系

3 瑞士能源桩技术标准 (2005) 给出了三种类型地基土 (黏土和淤泥、砂土、碎石) 的导热系数与含水率、干密度关系图 (图 12)。

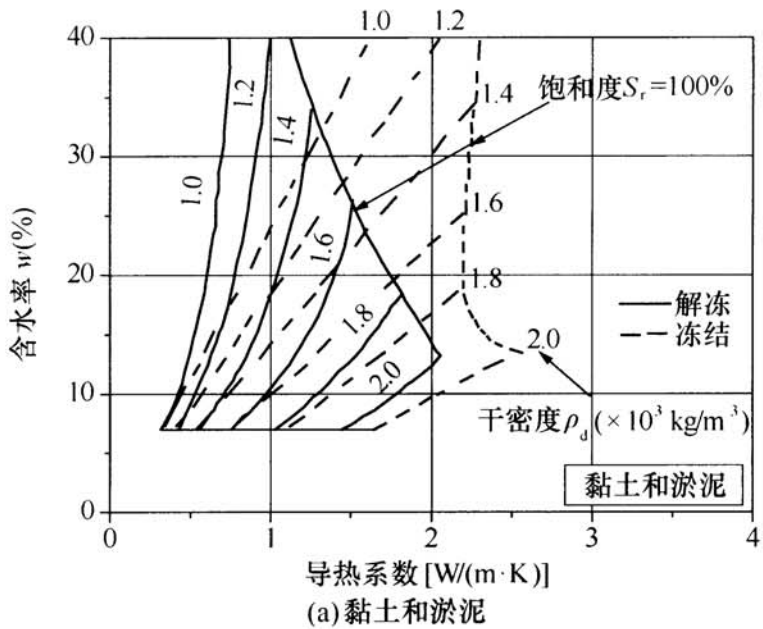


图 12 地基土导热系数与含水率、干密度关系 (一)

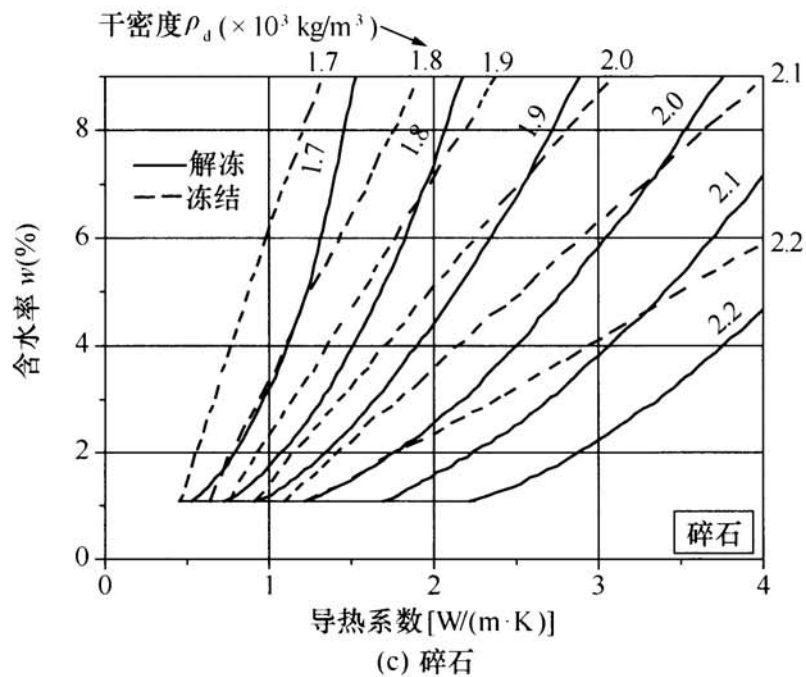
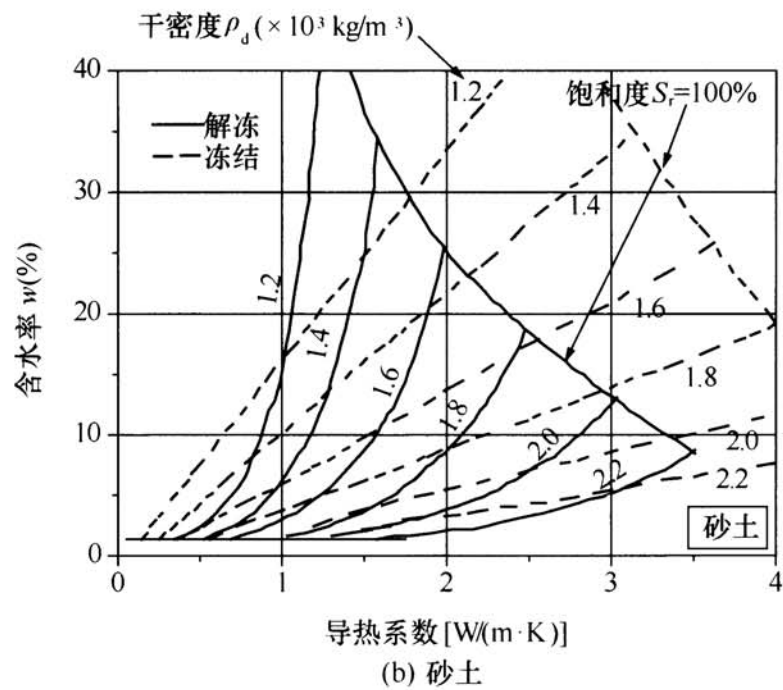


图 12 地基土导热系数与含水率、干密度关系 (二)

4 中国杭州地区土体的导热系数与含水率关系见图 13。

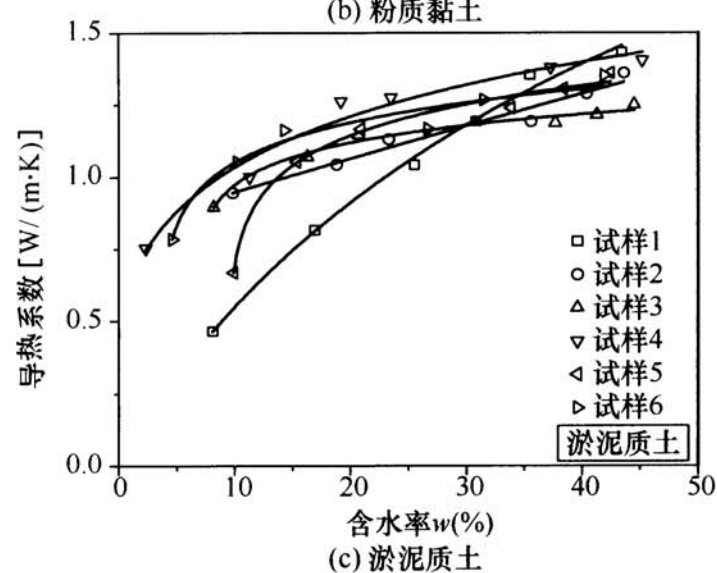
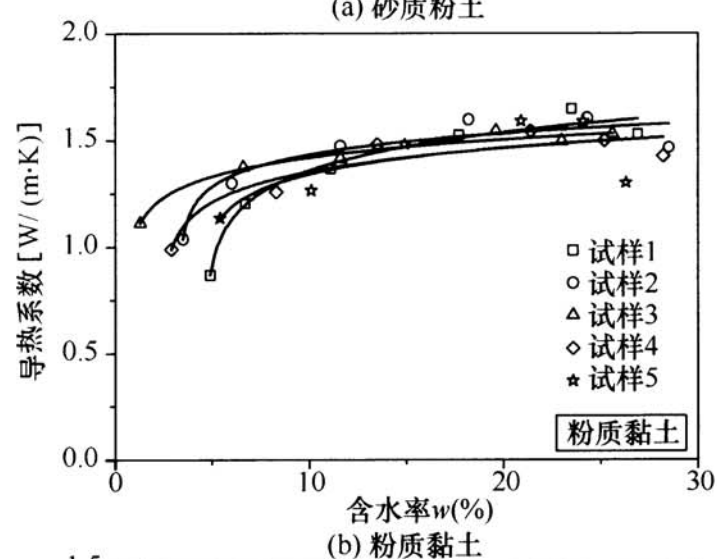
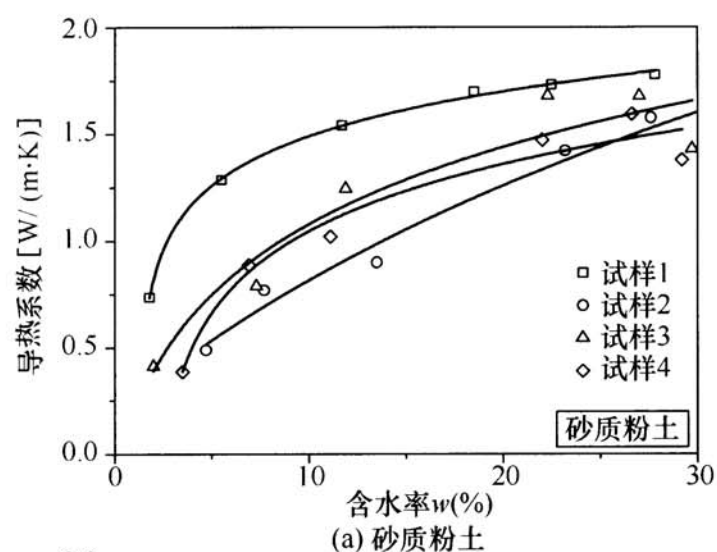


图 13 中国杭州地区土体的导热系数与含水率关系
(浙江省地质调查院)

5 瑞士能源桩技术标准（2005）给出了地基土在冻结和非冻结状态下容积热容量与饱和含水率、干密度关系图（图 14）。

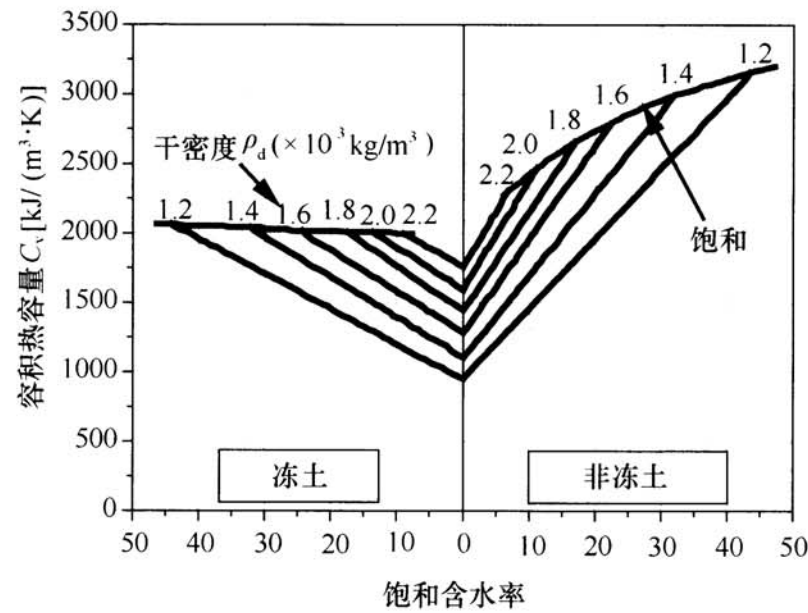


图 14 地基土容积热容量与饱和含水率、干密度关系

6 英国能源桩标准（2012）给出了部分典型英国岩石导热系数（表 1）。

表 1 部分典型岩石导热系数

土体名称	测试次数	导热系数 $[W/(m \cdot K)]$
砂质泥岩 1	5	2.45 ± 0.07
砂质泥岩 2	4	2.33 ± 0.04
泥岩 1	10	1.63 ± 0.11
白垩土	41	1.79 ± 0.54
海绿砂-砂岩	18	2.66 ± 0.19
砂质泥岩 3	32	2.32 ± 0.04
泥岩 2	4	1.67 ± 0.11
黏土 1	58	1.51 ± 0.09
黏土 2	27	1.56 ± 0.09
泥岩 3	225	1.88 ± 0.03
砂岩	64	3.41 ± 0.09

续表 1

土体名称	测试次数	导热系数值 $[W/(m \cdot K)]$
煤系砂岩	37	3.31 ± 0.62
煤系粉岩	12	2.22 ± 0.29
煤系泥岩	25	1.49 ± 0.41
煤	8	0.31 ± 0.08
磨石砂砾	7	3.75 ± 0.16
石炭系灰岩	14	3.14 ± 0.13
老红砂岩	27	3.26 ± 0.11
海西期花岗岩	895	3.30 ± 0.18
玄武岩	17	1.80 ± 0.11

7 瑞士能源桩标准 (2005) 给出了常见土层渗透性、导热系数与容积热容量取值范围 (表 2)。

表 2 常见土层渗透性、导热系数与容积热容量取值范围

土的类型	水力渗透系数 $k_D (m/s)$	导热系数 $\lambda [W/(m \cdot K)]$		容积热容量 $C_v [MJ/(m^3 \cdot K)]$	
		干	饱和	干	饱和
黏土	$10^{-8} \sim 10^{-10}$	0.2 ~ 0.3	1.1 ~ 1.6	0.3 ~ 0.6	2.1 ~ 3.2
粉土	$10^{-5} \sim 10^{-8}$	0.2 ~ 0.3	1.2 ~ 2.5	0.6 ~ 1.0	2.1 ~ 2.4
砂土	$10^{-3} \sim 10^{-1}$	0.3 ~ 0.4	1.7 ~ 3.2	1.0 ~ 1.3	2.2 ~ 2.4
砾石	$10^{-1} \sim 10^{-3}$	0.3 ~ 0.4	1.8 ~ 3.3	1.2 ~ 1.6	2.2 ~ 2.4