

文章编号: 1000-7598 (2014) 增 1-353-06

深基坑承压水的风险控制及处理实例

徐长节^{1,2}, 徐礼阁^{1,2}, 孙凤明^{1,2}, 於 锦³, 杨 迪³

(1. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 杭州 310058;

2. 浙江大学 岩土与环境工程教育部重点实验室, 杭州 310058; 3. 上海中益建筑工程有限公司, 上海 210000)

摘 要: 存在地下承压水的深基坑, 当基坑底部承压水层顶部的残留土层不能与承压含水层水头平衡时, 处理不当极易造成管涌及坑壁失稳等问题。对相关承压水处理风险源进行分析, 针对勘察、设计、施工各阶段都提出具体要求。实例中的基坑临近江面, 基坑下承压水与江水存在贯通通道, 河道水位变化时会引起承压水头增减, 由于设计水头埋深参考值是针对一年观察期而得到的, 未考虑到历年水头变化, 成为事故埋下隐患, 最终因为施工期间河道涨水导致承压水压力超过预期引起了基坑涌水。事故发生后, 现场紧急采取堵漏措施, 采用灌浆法加固基坑土体, 改善土体性质, 增加不透水土层的厚度, 最终已解决基坑开挖时出现的涌水等现象, 保证了工程的顺利安全完成。灌浆法加固是承压水较大情况下基坑安全开挖的有效方式, 研究结论对于承压水的风险控制特别是临近江海的工程的设计施工具有较强的指导意义。

关 键 词: 基坑开挖; 承压水; 风险源; 管涌; 灌浆法加固

中图分类号: TU 46.3

文献标识码: A

Risk control and dealing example of confined water of deep foundation pit

XU Chang-jie^{1,2}, XU Li-ge^{1,2}, SUN Feng-ming^{1,2}, YU Jin³, YANG Di³

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of Education Ministry, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

3. Shanghai Zhongyi Construction Co., Ltd., Shanghai 210000, China)

Abstract: Because of the existence of confined water at the bottom of the deep foundation pit soil, when the weight of impervious soil above cannot balance with hydraulic head, improper construction method can easily lead to piping, the instability of foundation pit enclosures and many other problems. In this paper, many risk sources related confined water are analyzed and many specific requirements are put forward for survey, design and construction. Because the foundation pit is near the river and there are penetration channels between confined water and river water, so the change of river water level will cause the rise or fall of confined water head. In view of the design head was reference the change of groundwater level in nearly one year, not considering the head changes throughout the years, which become the hidden danger caused accident. In the end, the river water level rising during construction, confined water pressure exceeded expectations and caused the piping. After the accident, water channel was soon clogged. And then concrete was poured into soil at the bottom of foundation pit. The soil property improved and thickness of impervious soil increased significantly. Piping problem was resolved and the project was completed safety. Grouting method is an effective way to ensure foundation pit excavation safety when confined water head is larger. Research in this paper has a strong guiding role in controlling risk of the pressure water during design and construction, especially engineering near river or ocean.

Key words: excavation of foundation pit; confined water; risk source; piping; reinforcement with grouting method

1 引 言

在深基坑工程中, 当基坑底部到承压含水层顶部的残留土层不能与承压含水层水头顶托力平衡时, 基坑底部就会产生突涌。《建筑地基基础设计规

范》^[1]对于承压水的验算有相关的条文, 但梁勇然^[2]、马石城等^[3]认为规范的承压水验算方法偏于保守, 在考虑了土体剪切强度和基坑底板受拉破坏的有利因素下建立了更为精确地表达式。实际工程中必要的安全储备是必须的, 因而工程界仍广泛采用规范

收稿日期: 2012-12-26

第一作者简介: 徐长节, 男, 1972 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 从事桩基工程及基坑工程的研究。E-mail: xucj@zju.edu.cn

公式。承压水的突涌如爆发都在瞬间完成,一旦发生易造成破坏性事故,并给周边建筑物和管线隧道等带来影响和危害。对于影响基坑工程的承压水问题处理通常有设置止水帷幕隔断承压水通道、降水减低水头压力以及进行坑底注浆加固以增加上覆土层的厚度(俗称“封底”)3种技术手段或者多管齐下的方法^[4-9],但止水帷幕很难做到完全密封以及最常规降水手段具有一系列负面影响^[10],本文结合工程实例介绍了坑底灌浆加固的办法的成功运用。虽然工程界对于承压水的危害有充分认识,但由于在勘察、设计、施工环节上存在一些疏忽或着措施不当,常常出现承压水的突涌事故,对常见危险源进行了分析,以便于风险管理。

2 承压水处理风险源分析

承压水处理风险环节存在于勘察、设计、施工各个阶段,具体有以下几方面。

2.1 勘察阶段

(1) 地质及水文条件复杂,勘察失察(漏勘、误勘),地质报告中没有反映承压水的存在,尤其是某些工程中存在局部承压水的情况更易漏勘。

(2) 对承压水的认识不够深刻。勘察技术人员限于技术水平,对于承压水位置的确定错误或对水头变动资料缺少收集和调查,导致对承压水头的低估。

2.2 设计阶段

(1) 水文参数选用不当,如对承压水头采用平均水头或未考虑到历年的水头变化,这个问题对于临近江海的基坑这方面的风险更大。临近江海的基坑下承压水往往和江水、海水存在贯通的通道,受潮位、水位变化影响巨大,只顾使用期安全,而忽略施工期安全。

(2) 过于将施工状态理想化。设计时对于施工开挖深度的计算只按底板计算,甚至未考虑局部承台或集水坑的挖深。另外,对于施工的超挖估计不

足,导致实际的开挖深度超过设计计算的深度。

(3) 采取处理措施未考虑到对周边环境的影响。如采取降水的措施时,必须考虑其对周边建筑物或管线产生附加的沉降。

(4) 过于信赖施工质量,如采用止水帷幕隔断承压水通道的处理方法时认为承压水通道完全被截断,在工程中是很难实现的。采取封底的方法时,认为加固区完全不透水,而实际工程中施工质量往往没有这么理想。

2.3 施工阶段

(1) 施工质量的控制不到位,如止水帷幕质量不好导致渗漏,降水井滤层填料不好导致降水效果达不到设计要求。

(2) 对于施工时间节点把握存在不足。采取封底方法时在封底加固土未达到设计强度时提前进行了开挖,降水未达到设计水头压力而进行了开挖。

(3) 未能进行信息化施工。采取降水方案时,未能对周边的建筑物的沉降情况引起充分重视,导致周边建筑物或管线由于长期降水而出现损坏。

(4) 缺乏应急预案和相应设备材料的准备,一旦出现坑底突涌没有相应的措施进行处理,导致事态扩大,危险加剧。

3 工程概况

某项目地处杭州市钱江新城核心区,南临富春江路,北靠市民路,东侧为解放东路,西边为香樟路。工程地下室地下3层。工程桩均为钻孔灌注桩,工程±0.00 m相当于黄海高程7.50 m,自然地坪取6.80 m,即相对标高-0.70 m。按承台垫层底考虑:一般承台垫层底标高为-17.15 m,85 黄海高程为-9.65 m。基坑最深处为筏板区域 消防集水坑位置,坑底标高-22.25 m。

(1) 地质条件

根据地质勘察报告,土层自上而下分布见表1。

表1 基坑突涌处的土层分布表
Table 1 Soil distribution in the place of pit inrush

土层号	土层名称	含水率 /%	土的相 对密度	湿重度 /(kN/m ³)	孔隙比	层厚 /m	层顶标高 /m	地下水类型	压缩系数 a_{1-2} /MPa ⁻¹
① ₁	杂填土					4.12	6.80	潜水	
③ ₅	砂粉夹粉砂	28.8	2.69	19.2	0.802	7.10	2.68	潜水	0.115
③ ₆	砂质粉土	25.3	2.68	19.6	0.718	2.20	-4.42	潜水	0.115
③ ₇	砂质粉土	29.1	2.69	19.2	0.809	6.80	-6.62	潜水	0.167
⑥	淤泥粉黏土	39.1	2.72	17.9	1.118	3.13	-13.42	不透水	0.626
⑦	粉质黏土	24.0	2.71	20.1	0.678	3.87	-16.55	不透水	0.225
⑨ ₁	粉质黏土	23.9	2.71	20.1	0.673	0.66	-20.42	不透水	0.229
⑪ ₁	粉砂	23.6	2.68	20.0	0.657	7.50	-21.08	承压水	0.153
⑫ ₂	圆砾					6.64	-28.58	承压水	
⑭ ₁	含砾粉细沙					4.12	-35.22	承压水	

(2) 水文地质条件

根据钻探揭露: 勘探范围内地下水主要分为松散岩类孔隙潜水和松散岩类孔隙承压水。

松散岩类孔隙潜水, 主要赋存于上部①填土层及③粉土、砂土层中。本次工程勘探期间测得地下潜水水位埋深为 1.00~3.50 m, 相当于 85 国家高程 5.80~3.30 m (潜水水位差异较大, 主要受填土层性质变化大影响, 在填土密实区域及黏粒含量高区域中水位埋深较深, 在已建筑垃圾、碎石土性填土层中水位埋深较浅), 年水位变幅约为 1~3 m。

松散岩类孔隙承压水, 主要分布于深部的⑪₁层粉砂、⑫₂层圆砾、⑭₁含砾粉细砂中。根据杭州市勘测设计研究院一年多来对承压水水头观测结果, G06 孔附近水头埋深为 8.37~12.68 m, 相当于 85 国家高程 -5.88~-1.57 m; G70 孔附近水头埋深为 8.45~12.86 m, 相当于 85 国家高程 -6.06~-1.65 m。

(3) 基坑底抗突涌 (渗流) 验算

承压水赋存于底部连续分布的砂砾层中, 基坑开挖时须进行基坑底抗突涌 (渗流) 验算, 依据杭州市勘测设计研究院一年多来对承压水水头观测结果, 原设计中对承压水水头取黄海高程 -1.57 m 进行计算。本基坑大部分坑底标高为 -17.15 m, 即 85 黄海高程为 -9.65 m。不透水土层底面高程约为 -28.58 m, 黄海高程为 -21.08 m。承压水上覆土层厚 11.51 m, 突涌处工程地质剖面见图 1。

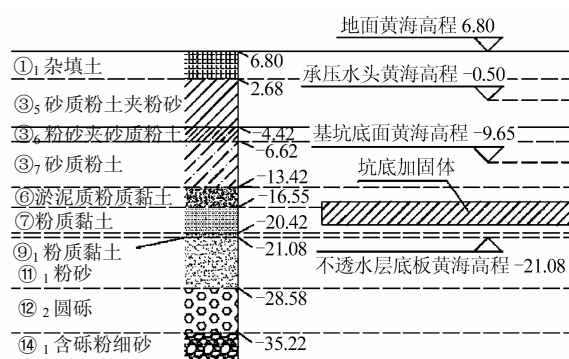


图 1 突涌处工程地质剖面图 (单位: m)

Fig.1 Engineering geologic profile in the place of pit inrush (unit: m)

根据《建筑地基基础设计规范》附录 W 规定, 验算公式^[1]为

$$(\gamma_m t + \Delta t) / P_w \geq 1.1 \quad (1)$$

式中: γ_m 为水层以上土的饱和重度, 计算式取

19.0 kN/m³; $t + \Delta t$ 为透水层顶面距基坑底面的深度, 计算时取值 11.51 m; P_w 为含水层水压力。

计算结果: $(\gamma_m t + \Delta t) / P_w = 19 \times [(-9.65) - (-21.08)] / 10 \times [(-1.57) - (-21.08)] = 1.11 > 1.1$ 。

理论上勉强满足基底抗承压水突涌 (渗流) 要求, 不需要进行承压水封底。但在施工过程中却发生了突涌事故。经分析研究查明, 原因是原设计水头埋深参考是针对一年观察期而得, 未考虑到历年水头变化, 而施工场地临近钱塘江, 其承压水与江水贯通, 受潮位影响变化大, 据事发时对地下水位监测, 承压水最高水头埋深为 7.3 m, 即黄海高程 -0.5 m, 此时有 $(\gamma_m t + \Delta t) / P_m = 19 \times [(-9.65) - (-21.08)] / 10 \times [(-0.5) - (-21.08)] = 1.05 < 1.1$ 。显然不满足规范要求, 为事故埋下隐患, 突涌时现场情况见图 2。



图 2 坑底突涌现场

Fig.2 The site of pit inrush

4 处理方法

(1) 临时抢险方案

事故发生后, 现场施工人员按照应急预案要求, 立即采用编制袋及海带塞进孔内封堵, 孔口不再涌水, 但在距孔口附近处出现涌水, 现场立即用准备好的土方袋堆筑围堰, 并采用 30 m³ 混凝土反压住上涌泥沙。

(2) 降水方案

为了尽快解决承压水消除基坑险情, 项目相关方通过比较研究, 认为通过降水处理相对方便并费用低廉, 但提出需对周边沉降严格监控。

为了保证基底安全, 按照要求安全系数定为 1.2, 预使 $(\gamma_m t + \Delta t) / P_w \geq 1.2$, 计算可知需要降水 2.5 m, 即完全依靠降水最低需要降水 2.5 m。根据骆冠勇^[11]、金小荣等^[12]、龚晓南等^[13]关于降水引起的沉降提供了相关计算方法, 本文只采用分层总和法对沉降量进行了简单估算。依据勘察资料, 计算深度取 -21.08 m。

降水引起的沉降量 ΔS 为

$$\begin{aligned}\Delta S &= \sum \int a_i \Delta \delta_i dz = \sum a \int \Delta \delta_i dz = 0.115 \times (1.42 \times \\ &2.45 + 2.5 \times 24.5 \div 2) \times 10^{-3} + 24.5 \times (0.115 \times \\ &2.2 + 0.167 \times 6.8 + 0.626 \times 3.13 + 0.225 \times 3.87 + \\ &0.229 \times 0.66 + 0.153 \times 7.5) \times 10^{-3} = 143 \text{ mm}\end{aligned}\quad (2)$$

式中: a_i 为第 i 层土的压缩系数; $\Delta \delta_i$ 为第 i 层土因为降水而产生的有效应力增加量; $\int \Delta \delta_i dz$ 为相应有效应力增加面积。

如果仅通过降水的办法, 预计总沉降为 143 mm。场地周围均为重要的道路及地下管线, 对沉降敏感。实施过程中监测表明周边道路沉降过大, 后决定停止降水。

(3) 灌浆法加固方案

降水方案失败后决定采用灌浆法加固坑底。对准注浆孔用钻机 A150 钻孔, 孔底处黄海高程 -26 m。钻孔完成后立即压入钢套管, 钢套管上端设置弯头, 弯头设置阀门和聚氨酯注浆管。套管压入完成后用棉纱和快干水泥浆将缝隙密封, 密封达到强度后关闭弯头出水阀, 从聚氨酯注浆管内开始注入聚氨酯。

5 施工工艺

5.1 施工流程

土体回填→20 台备用水泵抽水→30 m³C40 混凝土反压→围堰施工→黏土回填夯实→XY-150 型钻机钻孔→灌浆封堵。

5.2 施工方法

5.2.1 围堰施工

因混凝土反压后仍有大量承压水涌出, 现场在管涌点上方制作圆形围堰, 围堰底部留设排水孔。围堰采用袋装水泥及土工袋堆垒, 围堰内采用 5 车优质黏土进行回填夯实。围堰顶标高为 -15.6 m, 围堰上口直径约为 6 m。

5.2.2 灌浆封堵

主要流程: 布孔→钻孔→埋灌浆管→孔口封闭→高压灌浆。

(1) 布孔

采用在管涌口处 1 m 范围内布孔, 共计 21 个灌浆孔, 灌浆孔施工顺序为先施工最外圈 8 个孔, 再施工圆心位置 5 个孔, 最后根据封堵情况施工剩余 8 个孔, 如图 3 所示。因钻孔施工受支撑梁及工程桩影响, 局部孔位无法施工, 应根据实际情况相应调整。

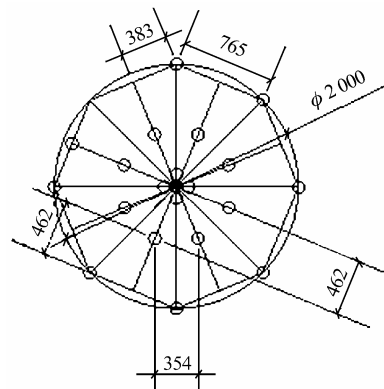


图 3 灌浆孔布孔示意图 (单位: mm)
Fig.3 Sketch of grouting hole (unit: mm)

(2) 钻孔

采用 XY-150 小型钻机引孔, 孔径为 100 mm, 孔底标高为 -26 m。

(3) 埋设灌浆管路, 并用棉纱和力顿水泥进行封堵。

(4) 高压灌浆: 连接好管路, 接好阀门, 用水溶性聚氨酯和油溶性聚氨酯混合的化学灌浆进行灌浆。

(5) 灌浆数量需根据现场实际情况进行计量。

(6) 待发现围堰四周未有明水排出后停止灌浆, 灌浆结束再观察 1 d, 若仍未见明水排出, 方可进行坑中土方开挖, 土方开挖期间做好各项应急准备工作。

6 注意事项

(1) 注浆时管尖埋放合理, 灌浆管路上口必须可靠封闭, 密切注视压力以防爆管。

(2) 操作人员应配戴眼镜、口罩、手套等劳保用品, 以防止浆液溅到眼内。

(3) 钻孔钻至设计深度后, 必须通过钻杆灌入封闭泥浆, 直到孔口溢出泥浆方可提杆, 当提杆至中间深度时应再次灌入封闭泥浆, 最后完全提杆。

(4) 灌浆完成后要及时拔管, 否则浆液会将管子凝住而增加拔管困难。

(5) 冒浆处理: 土层上部压力小, 下部压力大, 浆液就有向上抬高的趋势。灌浆深度大, 浆液上抬不明显, 灌浆深度浅, 间隔就会上抬很多, 甚至溢到地面。此时应该进行间歇灌注法, 即让一定数量浆液注入上层孔隙大的土中暂停工作, 待浆液凝固, 几次反复就可将上抬通道堵死^[14]。

(6) 化学灌浆材料应密封储存在冷暗的库内, 保管人员应熟悉材料的性质, 严禁烟火。

7 实施效果

按照施工要求, 灌浆法加固地基其底部标高为 -26 m (黄海高程), 简易计算: $(\gamma_m t + \Delta t) / P_m = 19 \times [(-9.65) - (-26)] / 10 \times [(-0.5) - (-26)] = 1.22 > 1.1$ 。

验算合格, 处理后能达到预期结果。本工程坑中坑采取灌浆法加固后, 开挖非常顺利, 坑壁未出现坍塌, 坑底也未出现涌水, 确保了后续施工的顺利实施, 前后对比图片见图 4、5。



图 4 注浆前突涌情况

Fig.4 The piping condition before grouting



图 5 注浆处理后现场情况

Fig.5 The site condition after grouting dealing

8 结 语

(1) 基坑施工前, 应全面勘查, 搞清场区及附近各含水层的特征及含水层间与地表水体间的水力联系, 水位观测时间要适当加长 (本次观测时间不够长导致的工程事故), 提高数据可靠性。

(2) 实行信息化施工, 做好监测工作, 随时注意监测数据的变化, 发现异常情况立即采取抢险措施。

(3) 基坑发生渗漏时, 应“先堵漏, 再注浆”。因为基坑漏水时, 过大的承压水头会引起基坑涌水、围护结构倾斜、附近地表沉降、房屋沉降等。先对基坑进行堵漏, 在一定时间内再对周边进行注浆是一种合理并行之有效的办法。

本工程针对事故采用灌浆法加固坑底的办法, 改善了土体性质, 增加了不透水土层的厚度, 有效解决了基坑开挖过程中承压水的突涌, 保证了施工进度。灌浆法进行基坑防渗、堵漏和加固, 能与土体结合形成强度高、渗透性小的结合体; 取材容易, 配置简单, 操作易于掌握, 无环境污染, 价格便宜, 是目前应用比较广泛和有效的方法。

参 考 文 献

- [1] 中国建筑科学研究院. GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [2] 梁勇然. 条形基坑的突涌分析[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 75—80.
LIANG Yong-ran. The intrush analysis in strip foundation pit[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 18(1): 75—80.
- [3] 马石城, 尹长俊, 邹银生. 抗承压水基坑底板的厚度分析与计算[J]. 工程力学, 2004, 21(2): 204—208.
MA Shi-cheng, YIN Chang-jun, ZOU Yin-sheng. Analysis and calculation of the pit base plate thickness of bearing resistance water foundation[J]. *Engineering Mechanics*, 2004, 21(2): 204—208.
- [4] 戴斌, 王卫东. 受承压水影响深基坑工程的若干技术措施探讨[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊 1): 1659—1663.
DAI Bin, WANG Wei-dong. Discussions on technologies of deep foundation pit projects affected by confined water[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(Supp. 1): 1659—1663.
- [5] 叶可炯, 陈立生, 王洪新. 软土地层深基坑工程深层承压水防治[J]. 城市道桥与防洪, 2008, 25(9): 80—84.
YE Ke-jiong, CHEN Li-sheng, WANG Hong-xin. Prevention of deep confined water during construction of deep foundation pit in soft soil stratum[J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2008, 25(9): 80—84.
- [6] 宋榜慈, 李受祉. 武汉地区工程中的地下水问题及其处理对策[J]. 工程勘察, 2004, 32(5): 6—9.
SONG Bang-ci, LI Shou-zhi. On the groundwater for engineering practices in Wuhan area and the counter-measures[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2004, 32(5): 6—9.
- [7] 朱雁飞. 深基坑工程中承压水危害的综合治理方法(上)[J]. 上海建设科技, 2008, 29(4): 16—19.
ZHU Yan-fei. Comprehensive treatment for confined water harm in deep foundation pit construction(I)[J].

- Shanghai Construction Science & Technology, 2008, 29(4): 16—19.
- [8] 朱雁飞. 深基坑工程中承压水危害的综合治理方法(下)[J]. 上海建设科技, 2008, 29(5): 16—17.
ZHU Yan-fei. Comprehensive treatment for confined water harm in deep foundation pit construction(II)[J]. Shanghai Construction Science & Technology, 2008, 29(5): 16—17.
- [9] 张惠忠, 刘建明. 上海软土中的“微承压水”与基坑工程[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 944—947.
ZHANG Hui-zhong, LIU Ming-jian. “Feeble confined water” in Shanghai area and related geotechnical engineering problems in foundation excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 944—947.
- [10] 王生力, 刘九功. 井点降水在基坑开挖过程中的作用及影响[J]. 北京地质, 2001, 13(1): 26—30.
WANG Sheng-li, LIU Jiu-gong. Action and influence of the wellpoints dewatering in excavation of foundation pit[J]. Beijing Geology, 2001, 13(1): 26—30.
- [11] 骆冠勇, 潘泓, 曹洪, 等. 承压水减压引起的沉降分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 2): 196—200.
LUO Guan-yong, PAN Hong, CHAO Hong, et al. Analysis of settlements caused by decompression of confined water[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Supp.2): 196—200.
- [12] 金小荣, 俞建霖, 祝哨晨, 等. 基坑降水引起周围土体沉降性状分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1575—1581.
JIN Xiao-rong, YU Jian-lin, ZHU Shao-chen, et al. Analysis of behaviors of settlement of pit's surrounding soils by dewatering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(10): 1575—1581.
- [13] 龚晓南, 张杰. 承压水降压引起的上覆土层沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 145—149.
GONG Xiao-nan, ZHANG Jie. Settlement of overlaying soil caused by decompression of confined water[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 145—149.
- [14] 郑俊杰. 地基处理技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009.