

梧桐庄矿热泵系统可用热源分析及利用

魏京胜^{1,2}, 张党育³, 岳丰田¹, 刘存玉³, 高 涛¹

(1. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001;
3. 冀中能源峰峰集团有限公司 梧桐庄矿, 河北 邯郸 056201)

摘 要: 通过现场调研及理论计算, 分析了梧桐庄矿工业广场可利用的热源及特点, 并对可用热源的稳定性进行了评价。研究表明: 梧桐庄矿可用热源主要有矿井排水、奥灰水、矿井排风、洗浴排水、空气压缩机冷却水, 其中矿井排风可利用热量最大、最稳定; 其次为奥灰水、矿井排水, 但两者供热量均不稳定; 洗浴排水和空气压缩机冷却水供热量较稳定, 但热量较小。根据该矿热负荷较大的特点, 提出了多种热源联合为热泵系统提供低品位热量的方案, 以满足了工业广场供热需求。

关键词: 热源; 热泵系统; 低品位热能; 热能利用; 矿井排风

中图分类号: TD989; X752 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2012)05-0120-05

Analysis and Utilization on Available Heat Sources of Heat Pump System in Wutongzhuang Mine

WEI Jing-sheng^{1,2}, ZHANG Dang-yu³, YUE Feng-tian¹, LIU Cun-yu³, GAO Tao¹

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;
3. Wutongzhuang Mine, Jizhong Energy Fengfeng Group Corporation Ltd., Handan 056201, China)

Abstract: With the site investigation and theoretical calculation, the available heat sources and features of the industrial square in Wutongzhuang Mine were analyzed and the evaluation on the stability of the available heat sources was conducted. The study showed that available heat sources of Wutongzhuang Mine mainly include the mine drainage water, Ordovician limestone water, mine ventilation, water drainage from bathroom and cooling water of air compressor. Among those, the available heat of the mine ventilation would be the largest and the most stable. The Ordovician limestone water and mine drainage water would be the second, but the heat supply quantity both would not be stable. The heat supply from water drainage from bathroom and cooling water of air compressor would be quite stable, but the heat value was small. According to the features of the high heat loading in the mine, a multi heat sources combination plan was proposed to provide a low rank heat value to the heat pump system in order to meet the heat supply requirements of the industrial square.

Key words: heat sources; heat pump system; low rank heat energy; heat energy utilization; mine ventilation

梧桐庄矿位于河北省邯郸市磁县西部, 该矿具有涌水量大、水温高等特点^[1], 在冬季生产过程中矿井排风、井下排水、空气压缩机房冷却水等介质的温度较高, 含有丰富的余热资源^[2]。与此相反, 地面工业广场浴室洗热水加热、烘干房衣物烘干, 以及冬季建筑物、厂房的采暖和井口防冻加热等均需要消耗大量的热量。但由于矿井排风、排水温度达不到供热要求而不能直接利

用。因此利用热泵系统从低品位热源中提取余热^[3], 提升其温度后替代锅炉房实现广场的供热具有重要意义, 而广场热负荷大小、余热热源品质及特点对热源利用方案的设计和实施具有决定性作用。因此, 需要对广场用热负荷和热源情况进行调研分析, 根据调研结论提出余热资源的利用方案, 以达到替代锅炉房供热, 实现节能减排的目的。

收稿日期: 2011-11-26; 责任编辑: 代艳玲

作者简介: 魏京胜(1976—), 男, 山东沂南人, 讲师, 博士研究生。Tel: 0516-83590661, E-mail: wjvictor@163.com

网络出版时间: 2012-05-15 14:31; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20120515.1431.033.html>

引用格式: 魏京胜, 张党育, 岳丰田, 等. 梧桐庄矿热泵系统可用热源分析及利用[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(5): 120-124.

1 煤矿工业广场供热热负荷分析

煤矿工业广场供热热负荷是热泵系统方案制定与设计的重要依据，由于不同的煤矿生产能力、配风量、人员数量等均有差异，因此供热参数要求、热负荷需求量也不同。参照文献 [4-6]，梧桐庄矿主要用热场所热负荷计算结果见表 1。

表 1 梧桐庄矿各用热场所供热所需热负荷

用热场所	热负荷 /kW
建筑物	4 598
1 号、2 号主井（井口冬季防冻）	3 680
副井（井口冬季防冻）	6 438
冬季洗浴热水	808
夏季洗浴热水	1 388
浴池保温	157

2 矿区可利用热能分析

梧桐庄矿可利用余热资源比较丰富，主要包括井下和井上 2 大类余热，其中矿井排风、排水以及井下防水地表疏干抽取的奥灰水等热源属于井下安全生产排放余热；井上热源主要为洗浴排水和空气压缩机压缩散热的循环冷却水 2 种。各热源调研情况及分析如下所述。

2.1 矿井排水可提取热量计算

梧桐庄矿早期勘探预测表明：井水正常涌水量 730 m³/h，最大涌水量 1 362 m³/h，涌水量较大、水温高。自 2003 年来，涌水量具有逐年下降趋势，其中 83.3% 来自野青灰岩和奥陶系灰岩。2011 年冬季不同监测日期矿井排水流量、水温监测结果见表 2。不同监测日期的排水量变化较大，但排水口的最终温度基本相同，平均温度约 25 ℃。假设冬季通过换热系统吸收热量后排水温度降至 10 ℃，则单位时间内从矿井排水中可提取的热量为

$$Q_{ps} = 4.2L_{ps}(t_{ps} - t_{ps\rho})/3.6 \quad (1)$$

其中： Q_{ps} 为矿井排水温度降低至 10 ℃时可提取的热量^[7]，kW； L_{ps} 为矿井排水流量，m³/h； t_{ps} 为矿井排水温度，℃； $t_{ps\rho}$ 为矿井排水取热后温度，取 10 ℃。通过式（1）计算得到不同日期单位时间可提取热量，见表 2。从表 2 可知，因不同日期的排水量不同，每天矿井排水提供的热量也不稳定，但平均可提取热量较大，具有较高的利用价值。

表 2 2011 年矿井排水实测数据及可提取热量

日期	室外气温/℃	室外相对湿度/%	流量或排量/(m ³ ·h ⁻¹)	温度/℃	Q_{ps} /kW
1 月 10 日	-0.2	26.4	303.0	25.0	5 302.5
1 月 13 日	1.4	32.5	194.0	25.2	3 440.3
1 月 15 日	-6.6	24.9	189.3	25.0	3 312.8
1 月 16 日	-7.0	33.7	157.4	24.8	2 717.8
1 月 19 日	-2.8	28.1	196.3	23.9	3 183.3
1 月 25 日	-0.4	26.5	293.4	26.0	5 476.8
2 月 27 日	0.5	35.0	268.0	26.5	5 159.0
平均	—	—	228.8	25.2	4 084.6

2.2 奥灰水可提取热量计算

梧桐庄煤矿开采的大煤（2 号煤）赋存于下二叠系山西组底部，该煤层距下伏奥陶系灰岩强含水层约 140 m。煤层底板 35~53 m 的下方发育着野青灰岩，虽然该岩层较薄，储水量较小，但由于野青灰岩含水层直接通过导水断层、导水裂缝带等导水构造接受下伏奥陶系灰岩含水层补给，致使底板出水现象严重^[7]。为安全采煤，该矿采用地表抽取奥灰水输水降压采煤措施，将奥灰水热量提取后利用矿井水回灌技术回灌至奥陶系灰岩层^[8]，以保护地下水资源平衡。

为进一步确定实际运行中的水流量，对奥灰水流量和温度进行了监测，见表 3。

表 3 2011 年奥灰水监测数据及可提取热量

日期	室外气温/℃	室外相对湿度/%	流量或排量/(m ³ ·h ⁻¹)	温度/℃	Q_{ah} /kW
1 月 10 日	-0.2	26.4	270	43.0	10 395.0
1 月 13 日	1.4	32.5	282	44.2	11 251.8
1 月 15 日	-6.6	24.9	261	43.0	10 048.5
1 月 16 日	-7.0	33.7	256	43.0	9 856.0
1 月 19 日	-2.8	28.1	265	43.0	10 202.5
1 月 25 日	-0.4	26.5	204	43.0	7 854.0
平均	—	—	256	43.2	9 934.6

由表 3 可知，奥灰水流量变化较大，但水温基本稳定，平均水温为 43 ℃，通过换热系统吸收热量，假设奥灰水温度降至 10 ℃排放，则单位时间内从奥灰水中可提取的热量为

$$Q_{ah} = 4.2L_{ah}(t_{ah} - t_{ah\rho})/3.6 \quad (2)$$

其中： Q_{ah} 为奥灰水排水温度降低至 10 ℃时可提取热量，kW； L_{ah} 为奥灰水流量，m³/h； t_{ah} 为奥

灰水温度/℃; $t_{\text{ab},\rho}$ 为奥灰水取热后温度,取 10℃。采用式(2)计算出不同监测日期单位时间内从奥灰水中提取的热量(表 3)。由表 3 可知,奥灰水提供的热量较大,且相对比较稳定。但目前该矿无备用的奥灰水提水泵,提水系统可靠性相对较低。

2.3 矿井排风可提取热量计算

因该矿为热水型高温矿^[9],井下排水、巷道和围岩均向空气散热,加之大量的机电设备散热,矿井排风中含有大量热量(冬季回风温度可达 20

℃)^[10],可以用作热泵机组的低温热源。为获得实际运行中排风的温度及可提取热量,须在冬季最冷月进行排风监测,监测数据见表 4。假定排风取热后温度为 7℃、相对湿度接近 98%,即可获得排风中可提取的热量^[4]。由表 4 可知,在较冷月份,排风量基本稳定在 231 m³/s,温度在 20.5℃左右,可提取的热量为 10 MW 左右,可见矿井排风含热量较大且稳定,由于生产矿井排风不能间断,因此可实现连续为热泵系统提供热量。

表 4 矿井排风中可提取的热量

日期	室外气温/℃	室外相对湿度/%	大气压/hPa	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	温度/℃	焓值/(kJ·kg ⁻¹)	降至 7℃可提取热量/kW
2011-01-10	-0.2	26.4	1 010.4	232.5	22.00	63.90	11 447.45
2011-01-13	1.4	32.5	1 008.3	230.5	22.00	64.00	11 340.68
2011-01-15	-6.6	24.9	1 027.1	231.0	20.80	58.99	10 298.87
2011-01-16	-7.0	33.7	1 021.5	229.5	20.00	56.47	9 482.53
2011-01-19	-2.8	28.1	1 017.4	230.0	20.50	58.32	9 942.74
2011-01-25	-0.4	26.5	1 013.9	233.0	20.00	56.75	9 600.45
2011-02-27	0.5	35.0	1 011.2	233.5	19.40	54.85	9 069.90
2011-03-02	10.2	23.0	1 008.4	230.0	20.60	59.01	10 001.93
2011-03-03	6.4	27.7	1 015.4	232.0	20.80	59.43	10 300.24
2011-03-04	7.0	30.0	1 010.9	233.5	20.40	58.23	9 977.76
平均	—	—	—	231.6	20.65	59.00	10 146.26

2.4 洗浴排水可提取热量计算

目前梧桐庄矿工业广场洗浴热水用量 240 t/d,分 3 班使用,每班 3 h。水温由 10℃加热到 45℃。洗浴后的水排放至场区排水系统,水中含有一定热量。为了解该热量情况对排水进行了监测(表 5)。

表 5 2011 年 1 月洗浴排水主要参数实测结果与供热量

日期	室外气温/℃	室外相对湿度/%	温度/℃	降至 10℃可提取热量/(kJ·d ⁻¹)	连续供热能力/kW
10 日	-0.2	26.4	35.50	25 704 000	297.5
13 日	1.4	32.5	35.10	25 300 800	292.8
15 日	-6.6	24.9	35.60	25 804 800	298.7
16 日	-7.0	33.7	34.60	24 796 800	287.0
19 日	-2.8	28.1	34.00	24 192 000	280.0
平均	—	—	34.96	25 159 680	291.2

注:洗浴排水量 240 m³/d。

因洗浴后排水间断地排出,为了便于提取热量,需要设置洗浴排水蓄水池,所以热量计算有 2 种方法:一是计算一天洗浴排水的绝对含热量,经计算,其平均可提取热量为 25 159 680 kJ;二是利用蓄水池缓存后按 24 h 连续供出热量计算,则供

热量为 291.2 kW。在热能提取过程中为了减小机组运行时间,可以分时段运行,同样按照三班开启机组,三班共运行 6 h,则单位时间内从洗浴排水可提取的平均供热量约为 1 164.8 kW。

2.5 空气压缩机房可提取排热量计算

梧桐庄矿空气压缩机房总装机容量达到 1 600 kW,最大运行容量 1 280 kW,总冷却散热量按照压缩机输入能量的 80% 估算^[11],并考虑电动机效率 80%^[12],每小时总排热能力为 819.2 kW。该机房低负荷时运行 3 台,容量约 960 kW,则日常运行中最小供热能力约为 614.4 kW。为了解空气压缩机房实际运行中可利用的热量情况,在 2011 年 1 月份进行了初步调研,监测数据见表 6,采用式(3)计算空气压缩机房的排热量 Q_{yf} 为

$$Q_{\text{yf}} = 4.2G(t_{\text{in}} - t_{\text{out}}) \tag{3}$$

其中: G 为冷却水流量,kg/s; t_{in} 、 t_{out} 分别为压缩机组冷却水进、出水温度,℃。空气压缩机房排热量计算结果见表 6。由表 6 可知,压缩机房平均供热能力为 599.5 kW (提供热量 51 796 800 kJ/d),24 h 连续运行,若利用蓄热水箱蓄热,基

本上能满足 240 t/d (每天 3 班, 每班 3 h) 洗浴热水的用热量。

表 6 空气压缩机冷却水散热量计算结果

日期	室外气温/℃	室外相对湿度/%	压缩机排气温度/℃			排气压力/MPa	流量/(m ³ · h ⁻¹)	温度/℃		Q _{yt} /kW
			第 1 台	第 2 台	第 3 台			进水	出水	
2011-01-13	1.4	32.5	92	94	65	0.6	28.6	46.0	28.0	598.7
2011-01-15	-6.6	24.9	90	93	67	0.6	28.5	45.5	27.4	599.9
2011-01-16	-7.0	33.7	91	93	90	0.6	26.5	45.0	25.6	597.9
2011-01-19	-2.8	28.1	90	92	85	0.6	27.0	44.8	26.0	590.3
2011-01-21	-4.7	42.9	92	93	67	0.6	26.0	44.2	24.0	610.8
平均	—	—	—	—	—	—	27.3	45.1	26.2	599.5

此外, 由于空气压缩机房冷却水流量较小, 进水温度一般在 45 ℃ 以上, 而出水温度约为 25 ℃, 故可以在空气压缩机组冷却水系统中设计余热回收装置直接为洗浴供应热水。

3 各热源输出热量能力比较及特性分析

梧桐庄矿生产工业广场中可用于热泵的主要热源有 5 种, 各热源不同参数平均值见表 7, 则热泵的供热能力 $Q_{HP} = Q_0 C / (C - 1)$, 其中: Q_{HP} 为热泵提供热量 Q_0 情况下热泵的供热能力, kW; C 为热泵机组性能系数, 取 4^[7], 计算结果见表 7。

表 7 梧桐庄矿热泵系统可用热源参数对比

热源	流量或排量/(m ³ · h ⁻¹)	温度/℃	热源供热量/kW	热泵供热能力/kW
矿井排水	228.8	25.20	4 084.6	5 446.1
奥灰水	256.3	43.20	9 934.6	13 246.1
矿井排风	833 580.0	20.65	10 146.5	13 528.7
洗浴排水	10.0	34.96	291.2	388.3
空气压缩机冷却水	27.3	45.10	599.5	799.3
合计	—	—	25 056.4	33 408.5

1) 矿井排水热源特点。现场实测结果表明, 来自井下排水仓的排水量在 157 ~ 303 m³/h, 平均 228.8 m³/h。因此矿井排水流量和供热量波动较大, 平均 5 446.1 kW, 且小于供热量 16 260.16 kW 要求。用矿井排水作为热源需要改变原来间歇排水方式为连续排水, 并且受到井下排水情况、水泵稳定性、供电等方面影响, 排水流量不稳定, 供热量也无法满足设计要求; 尽管矿井排水经初步净化后达到冷却水标准, 但仍存在结垢和腐蚀性, 不能直接进热泵机组, 需要设置换热装置。

2) 奥灰水供热能力及特性。奥灰水温度约 43

℃, 水质较好, 但监测流量在 204 ~ 282 m³/h, 不稳定, 平均流量 256.3 m³/h, 可提供热量 13 246.1 kW, 供热量小于设计要求。奥灰水经净化处理, 同样能达到循环冷却水水质标准, 但为避免结垢和腐蚀对机组的影响, 也需要设置换热装置。另外, 为获取奥灰水还需打深井, 设置潜水泵等装置, 其稳定性和可靠性较差, 投资和运行费用较高。

3) 矿井排风热源供热特点。矿井排风量约为 231 m³/s, 排风温度 20.5 ℃ 左右, 提供的热量约为 10 146.5 kW, 经热泵加热后供热热量 13 528.7 kW。为了井下生产安全, 矿井排风不间断排出, 因此矿井排风提供的热量比较稳定和可靠。

4) 洗浴排水废热资源特征。洗浴使用总水量基本稳定, 排水温度约 35 ℃, 其连续 24 h 提供热量 291 kW, 供热能力较小。由于洗浴水排水过程不连续, 为便于利用, 需设置收集洗浴排水的蓄水装置, 且供热量较小、水质较差, 使用时需进行水质净化处理, 从而增加了余热回收系统的复杂性。

5) 空气压缩机冷却废热特点。分析实测数据显示, 空气压缩机运行工况稳定, 冬季较冷月份冷却水出水温度稳定在 44 ℃ 以上, 供热能力约为 799.3 kW。由于冷却水水质较好, 可直接进洗浴水加热设备, 以减小传热损失。空气压缩机全年全天运行, 排热品质较高、供热量稳定, 但该热源供热量相对较少, 单独运行不能满足矿区供热需要。

通过比较可见, 不同热源的热量品质及大小、稳定性和可靠性均不相同, 应用热泵系统供热时应综合考虑其优缺点, 以提高余热资源利用效率。

4 矿井热能利用方案

由于上述各种热源供热能力均小于该矿最大热负荷 16 MW, 单一热源满足不了供热需要, 因此

在综合考虑各种热源的特性前提下,提出了多热源联合提供热量的方案,系统原理如图 1 所示。系统主要包括热量提取、余热量分配与调节、冷热水制取与分配等部分。该方案分为 2 个阶段实施:第一期工程设计中采用矿井排水、奥灰水向热泵系统提

供热量,已替代锅炉房满足广场的供热需要,但考虑到矿井排水流量的稳定性和奥灰水取水系统的可靠性问题,在第二期工程中增加了矿井回风源换热系统为热泵机组提供热量,以提高水源热泵系统的供热能力、运行稳定性和可靠性。

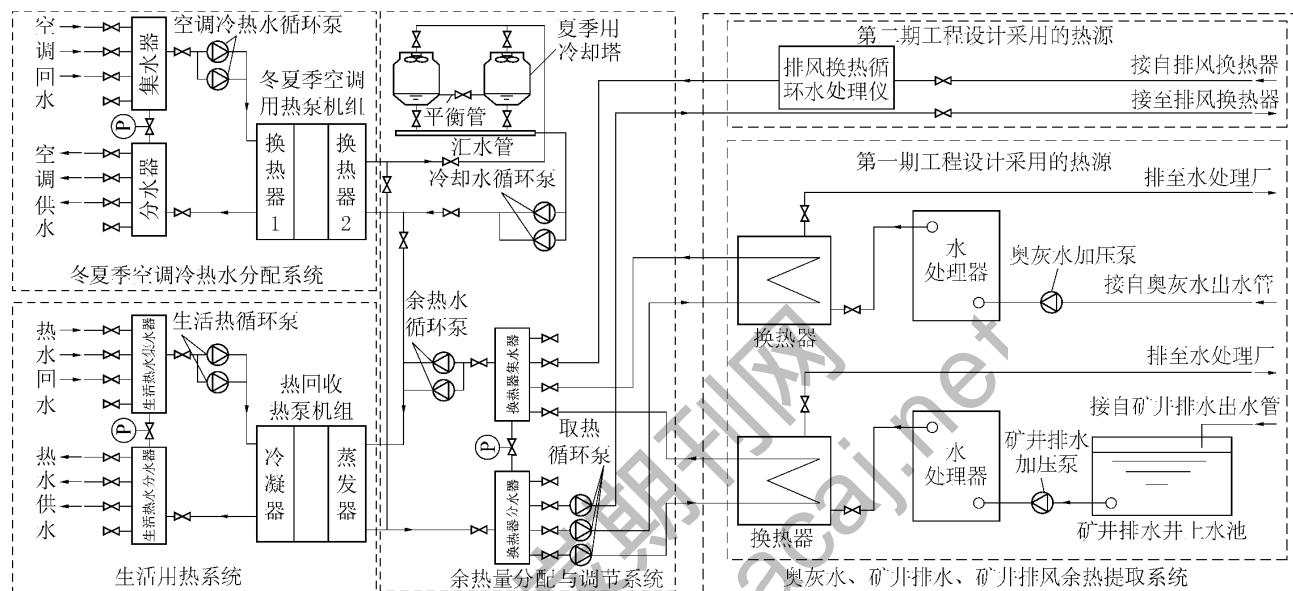


图 1 多热源联合提供热量系统原理

5 结 语

通过对梧桐庄矿可利用热源的监测、热量计算及分析可知,该矿有多种低温热源,具有丰富的余热可供热泵使用,但各个热源的热量大小、品质、稳定性和可靠性均有所不同。针对该矿用热负荷较大、单一热源热量不足的特点,采用了多种热源联合提供热量的方案,保证了热泵系统供热的可靠性和稳定性。

研究分析表明:不同煤矿应根据具体调研分析结论确定水源热泵供热方案,如果煤矿供热负荷较小,应选择稳定性好、供热能力大的单种热源为主要热源,并辅以其他可用余热资源为备用热源,以提高系统可靠性;对于供热负荷较大、单一热源供热量不足的煤矿,应考虑采用多种热源联合提供热量的方式,以保证热泵系统供热的安全与可靠。根据对梧桐庄矿实际情况的调研与分析,提出了合理的余热利用方案,替代了锅炉房实现场区的供热,有效降低了煤矿的生产能耗和污染物排放量,为矿山绿色开采与生态建设提供了保障。

参考文献:

- [1] 刘存玉. 综合防治水技术在梧桐庄矿的应用 [J]. 煤矿安全, 2010, 41 (2): 42-45.
- [2] 徐广才, 陈 炬, 朱 杰, 等. 浅谈煤矿余热资源的利用 [J]. 煤炭工程, 2010 (9): 98-99.
- [3] 展海风, 李 云. 水源热泵在煤矿行业的应用 [J]. 区域供热, 2010 (5): 22-25.
- [4] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册 [M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 303-361, 1581-1582.
- [5] 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局. 煤矿安全规程 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2011: 18-19.
- [6] 于卫平, 王青平, 张荣贵, 等. 水源热泵技术在山东协庄煤矿中的应用 [J]. 暖通空调, 2008, 38 (11): 130-132, 20.
- [7] GB/T 19409—2003, 水源热泵机组 [S].
- [8] 武 强, 王志强, 郭周克, 等. 矿井水控制、处理、利用、回灌与生态环保五位一体优化结合研究 [J]. 中国煤炭, 2010, 36 (2): 109-112.
- [9] 刘天新, 董轩龙, 杨永华. 梧桐庄矿的热害分析与处理 [J]. 煤矿安全, 2003, 34 (10): 35-37.
- [10] 莫 技. 孙村煤矿矿井废弃物处理及综合利用 [J]. 煤炭科学技术, 2010, 38 (1): 121-124.
- [11] 李井民. 煤矿企业空压机热能回收设计分析 [J]. 煤矿现代化, 2010 (3): 87-88.
- [12] 彦启森, 石文星, 田长青. 空气调节用制冷技术 [M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 57-58.