

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.06.031

# 某地下水源热泵诱发地下水水质变异成因分析

徐红霞<sup>1,2</sup>, 黄 驰<sup>3</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230000; 2. 安徽新富地能源科技有限公司, 安徽 合肥 230000;  
3. 中建三局第二建设工程有限责任公司, 湖北 武汉 430000)

**摘要:** 为了研究地下水源热泵的“抽一回”系统运行过程中对地下水水质的变化, 选择池州某地下水源热泵工程为研究对象, 在收集各项目所在地段的水文气象、地质、水文地质和水质资料的基础上, 进行水质水化学类型分析以及相关分析。并根据区域水文地质条件受热泵系统影响机制, 进行水质变异成因分析。研究表明: 水源热泵系统的运行改变了工程所在地段的地下水化学类型; 水质变异成因中常规的动力场、温度场和化学场因素影响可恢复, 地质结构因素影响不可恢复。

**关键词:** 地下水源热泵; 水质分析; 水化学类型

中图分类号: X824

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)06-0157-05

## Groundwater Quality Variation Reasons Induced by Groundwater Heat Pumps

XU Hongxia<sup>1,2</sup>, HUANG Chi<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230000, China;

2. Anhui Xinfudi Energy Technology Co. Ltd., Hefei, Anhui 230000, China;

3. The Second Construction Co. Ltd. of China Construction Third Engineering Bureau, Wuhan, Hubei 430000, China)

**Abstract:** In order to analyze the impacts of groundwater heat pumps to groundwater quality, this paper choose a groundwater heat pump located in Chizhou city as an example. After collecting data from hydrology, weather, geology, hydrogeology and water quality, Correlation analysis and hydrochemical type analysis were conducted based on the hydrology, weather, geology, hydrogeology and water quality data. In addition, analysis on the reasons of water quality variance was carried out according to the impact mechanism of the regional hydrogeological conditions. We conclude that groundwater heat pumps could change the surrounding hydrochemical type, power field, temperature field and chemical field factors can be recoverable, while geological structure changes cannot be restored.

**Keywords:** ground water heat pumps; water quality evaluation; hydrochemical type

能源与环境问题已成为全球各国发展中的两大重要突出问题<sup>[1]</sup>。中国既是世界上的能源消耗大国, 又是世界上的污染排放大国, 面临着巨大的能源压力。在中国的能源消耗中, 建筑耗能占很大比重。随着科技的发展, 水源热泵系统在暖通领域应用的优势日益凸显。浅层地温能资源是作为一种新型的、可再生的、清洁环保的能源, 具有广阔的开发利用前景。

地下水源热泵系统的热源和热汇是地下水, 地下水具有流速慢、水温变幅小的特点。热泵系统根据含水层的这些特点利用管井回灌的方法进行能量交换, 是效率较高、成本较低的一种地温能利用形式<sup>[2]</sup>。在此过程中, “抽一回”系统可能从以下三个方面对含水层中地下水水质产生影响:

(1) 地下水温度的变化, 将导致地下水天然状态下的物理化学平衡状态的变化;

(2) “抽一回”过程中,地下水与空气有一定程度的接触,水中含氧量等将发生改变;

(3) 如果涉及水质存在一定差异的不同含水层组,“抽一回”将不同含水层组中地下水进行混合、回灌。

上述影响,将对地下水源热泵的建设与运行构成约束;其影响的发展过程、程度及范围,与地下水源热泵运行条件下地下水动力场、化学场、温度场分布特征密切相关。

本文选择某大厦地下水源热泵工程,开展热泵系统运行对水资源影响程度的调查和监测;对调查结果进行归纳分析,总结水质变异规律;并结合工程所在地段的水文地质条件,针对水质变异成因进行分析。从而为“抽一回”系统合理确定奠定基础,也为区域地下水热能开发利用规划提供技术支撑。因此,开展本项目研究具有重要的理论意义。

## 1 工程概况

本工程水源热泵系统的抽水井、回灌井在大厦建设场地范围内,空调系统所覆盖的建筑物面积约 37 121 m<sup>2</sup>(见图 1),热、冷负荷总量分别为 2 152 kW、1 974 kW,设计有 2 台机组。夏季由水源热泵系统提供 7℃ ~ 12℃ 的空调冷冻水,冬季提供 45℃ ~ 50℃ 的空调热水。在经济合理条件下,并考虑当地的水源条件,夏季制冷时,若利用一台单冷机承担部分负荷,系统设计最大需水量为 181 m<sup>3</sup>/h。

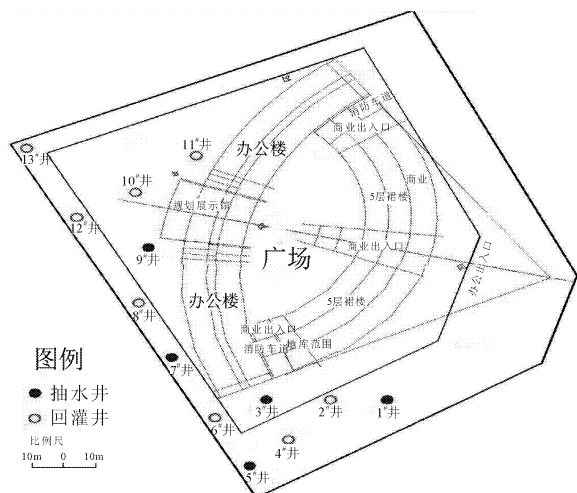


图 1 工程井群平面布置图

开采井和回灌井都位于大厦建筑场地规划范围内,碳酸盐岩裂隙岩溶含水岩组为抽水目的层,含水岩组埋深 90 m ~ 150 m;实行同层回灌。总体设计抽水井 5 口(4 用 1 备)、回灌井 8 口,总井数 13 口。系

统已于 2013 年 3 月建成。

工程所在区域地层区划属扬子地层区下扬子层分区和江南地层分区,出露有古生代志留纪—新生代第四纪地层<sup>[3-4]</sup>。自新至老分述:

(1) 第四系松散岩类孔隙含水岩组。以冲击为主,其次为湖相堆积物,厚 20 m ~ 50 m,最大厚度 35 m 左右。

(2) 第三系大通群 Ed 碎屑岩类隔水岩组。该隔水层组结构致密,厚度高达 1000 m,虽裂隙较发育,但多被黏土充填。

(3) 三迭系裂隙岩溶含水岩组。该层由中统东马鞍山组(Td)裂隙岩溶含水层、下统南陵湖组(Tn)裂隙岩溶含水层、下统和龙山组(Th)裂隙岩溶含水层和下统殷坑组(T1y)裂隙岩溶含水层组成。

其中中统东马鞍山组(Td)裂隙岩溶含水层组主要由浅灰、红褐色微晶藻屑含灰质白云岩、藻纹层微晶含膏假晶灰质白云岩构成。含石膏层。厚度 > 317 m。

## 2 水质分析结果

自 2014 年 11 月开始,每个运行工况对工程所在地段进行连续水质取样工作,本节引用数据中,部分已在另一文章中引用,具体参见文献[4],本文在此基础上延续了水质检测数据并增加了水质分析方法,使数据更完整、研究更深入。

### 2.1 水质数据分析

水源热泵系统运行工况及取样时间见表 1,水质数据见表 2。

表 1 池州工程所在地段水源热泵工程运行工况表

工况	水源热泵工程时间	取样时间
间歇期	2014-09-09—2014-12-04	2014-11-27
供暖期	2014-12-05—2015-03-10	2015-01-24
间歇期	2015-03-11—2015-06	2015-03-20
制冷期	2015-06—2015-09	2015-07-20
间歇期	2014-09-09— 2014-12-04	2015-09-17 (关机一周)
间歇期	2014-09-09—2014-12-04	2015-10-25

由表 2 可知:水源热泵系统的运行使 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、硝酸盐、溶解性总固体含量增加,而使 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Ca<sup>2+</sup>、F<sup>-</sup>含量减少,且有一定的规律性,其他检测因子变化程度较小,本文重点就变化程度较大的因子进行分析<sup>[5-6]</sup>。

表 2 池州工程所在地段水质数据统计表

取样日期 (月-日)	pH	Na <sup>+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	K <sup>+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	Ca <sup>2+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	Mg <sup>2+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	Cl <sup>-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	F <sup>-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )
11-14	6.9	10.3	2.02	209.0	44.2	0.0800	381.29	—	< 10.0	< 10.0	0.130
01-15	7.7	13.9	2.00	171.1	31.8	0.0200	167.81	—	14.2	417.8	< 0.040
03-15	7.4	10.4	2.05	208.7	44.9	0.0900	232.26	—	2.8	488.5	0.300
07-15	7.5	13.6	1.15	59.0	1.5	0.0960	112.85	—	3.0	740.0	0.033
09-15	7.6	12.3	2.39	74.8	12.5	0.0874	137.50	—	4.0	49.7	0.229
10-15	7.6	12.1	2.10	79.0	11.4	0.0775	164.09	—	4.6	45.1	0.217

取样日期 (月-日)	Fe /(mg·L <sup>-1</sup> )	Zn /(mg·L <sup>-1</sup> )	硝酸盐 /(mg·L <sup>-1</sup> )	溶解性 总固体 /(mg·L <sup>-1</sup> )	总硬度 /(mg·L <sup>-1</sup> )	总碱度 /(mg·L <sup>-1</sup> )	高锰酸 盐指数 /(mg·L <sup>-1</sup> )	臭和味	色度 /度	浑浊度 /NTU
11-14	0.290	< 0.005	0.30	599.0	606.1	381.3	1.70	无	< 5	2
01-15	0.170	0.020	2.10	820.8	558.2	137.6	1.80	无	< 5	4
03-15	0.150	0.070	0.60	889.0	706.2	193.0	1.18	无	< 5	3
07-15	0.103	—	0.60	1289.0	654.0	90.3	1.09	无	< 5	3
09-15	0.241	0.497	0.29	1168.0	665.0	3.4	1.15	无	< 5	3
10-15	0.180	0.374	0.22	1027.0	652.1	3.2	1.34	无	< 5	3

2.2 水化学类型分析

利用 Piper 三线图解法<sup>[7-8]</sup>对该工程所在地段水化学类型进行分析,用 RockWare AqQA 软件绘制 Piper 三线图,结果见图 2。

由图 2 可知,2014 年 11 月的样品分析表明,该项目所在地段水化学类型为 HCO<sub>3</sub>-Ca 类型,与区域水文地质条件相符;2015 年 1 月、3 月和 7 月的样品分析表明,随着水源热泵系统的运行,该区地下水化学类型变化为 SO<sub>4</sub>-Ca 类型,这可能是由于中统东马鞍山组(Td)裂隙岩溶含水层中含有石膏层所致。2015 年 10 月的样品分析表明,该区地下水化学类型变化为 HCO<sub>3</sub>-Ca 类型,恢复到系统运行之初。

2.3 水质相关性分析

为了更好的分析水质变异成因,根据离子间相互反应的物理化学关系,选取部分离子利用皮尔逊

相关系数法<sup>[9-10]</sup>进行相关性分析,分析结果见表 3。

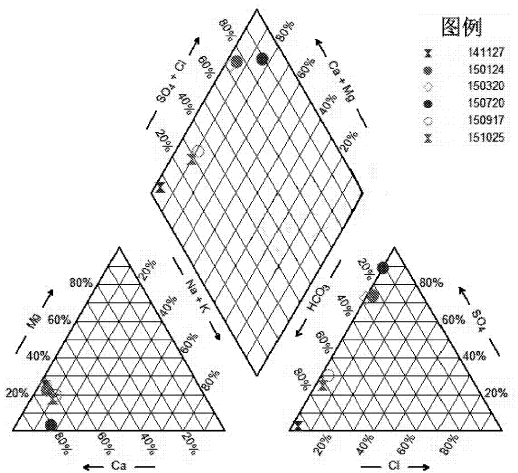


图 2 池州区域水化学类型变化图

表 3 各因子相关性分析结果表

因子	pH	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	硝酸盐	溶解性总固体
pH	1								
Ca <sup>2+</sup>	-0.53	1							
Mg <sup>2+</sup>	-0.53	0.99	1						
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-0.42	-0.31	-0.26	1					
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.87	0.79	0.80	0.03	1				
Cl <sup>-</sup>	-0.02	0.48	0.43	-0.88	0.35	1			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.21	-0.07	-0.17	0.01	-0.43	-0.18	1		
硝酸盐	0.47	0.28	0.20	-0.90	-0.21	0.94	0.32	1	
溶解性总固体	0.56	-0.89	-0.89	0.42	-0.88	-0.62	0.12	-0.21	1

由相关性分析结果可知,  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  离子和溶解性总固体的相关性较高;  $\text{NH}_4^+$  和硝酸盐的相关性较高。

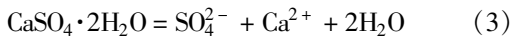
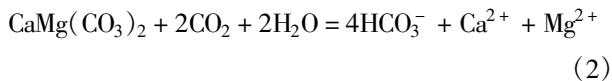
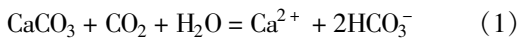
### 3 水质变异成因分析结果

现选取变化程度较大且有一定规律的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、溶解性总固体和  $\text{SO}_4^{2-}$  进行分析, 探究这些离子浓度的变化成因。

(1)  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、溶解性总固体。由相关性分析可知,  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{Mg}^{2+}$  离子高度相关, 与  $\text{HCO}_3^-$  离子中度相关。  $\text{HCO}_3^-$  离子与溶解性总固体、pH 和  $\text{Mg}^{2+}$  离子高度相关, 与  $\text{Ca}^{2+}$  离子中度相关, 说明这些离子的变化, 与它们之间的相互作用有很大的关系。

工程所在地段地下水水化学类型为  $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$  类型, 系统运行后地下水化学类型变化为  $\text{SO}_4 - \text{Ca}$  类型。水化学类型的变化主要与地层中岩石的岩份及地下水运动有关, 地层中岩石的岩份及地下水通过一系列物理、化学变化进行着化学成分的交换, 从而影响地下水水化学类型。

工程所在地段水质呈弱碱性, 由地层结构可知, 第五层目标含水层组为碳酸盐岩裂隙岩溶含水岩组, 并含有石膏层。地层中可能发生溶滤作用, 具体的化学反应主要包括以下几种:

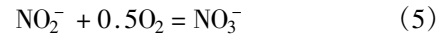
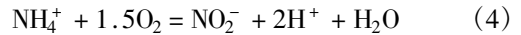


在天然条件下, 地下水主要发生式(1)、式(2)反应, 使水化学类型呈现为  $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$  类型。随着地下水热源系统的运行, 改变了地下水水动力场, 石膏发生溶滤, 即发生式(3)反应, 大量出现  $\text{SO}_4^{2-}$  离子, 同时, 发生同离子效应, 影响着式(1)、式(2)的反应, 使得  $\text{HCO}_3^-$  离子浓度降低, 在此过程中, 地下水中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等离子含量受阳离子的交替吸附作用而发生变化<sup>[11]</sup>。

(2)  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 。在供暖期, 地下水中“三氮”含量变化呈现出较强的规律性,  $\text{NO}_3 - \text{N}$  含量随着系统的运行不断升高, 而  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的含量随着系统不断降低。这些离子变化是温度场和化学场的变化导致的。

与制冷期相比, 制暖期  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  离子浓度变化幅度较大, 可以得出温度对这两种离子浓度的

影响较大。热泵系统的运行破坏了地下水中的还原环境, 发生的化学反应有:



$\text{NO}_2^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  在硝化菌的参与下被氧气硝化为  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ , 且硝化细菌的最适宜温度为  $30^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ , 研究区制暖期水文在  $32^\circ\text{C}$  左右, 较适宜硝化细菌的生长繁殖<sup>[12]</sup>, 故导致“三氮”质量浓度的上述变化规律。

(3)  $\text{SO}_4^{2-}$ 。  $\text{SO}_4^{2-}$  离子与其他离子的相关性均不高, 说明  $\text{SO}_4^{2-}$  离子的变化主要与地层中的岩性有关。石膏的主要化学成分为  $\text{CaSO}_4$  水合物。由于水源热泵系统的运行, 导致地下含水层中水压及层间渗流路径的变化, 使地下水中  $\text{SO}_4^{2-}$  的大量出现。石膏为弱电解质, 影响弱电解质溶解度的因素主要有盐效应、同离子效应、配位效应和酸效应。在研究区, 影响  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度的因素主要有盐效应。

因为石膏的溶解不是全部溶解, 故它在水中存在着一个溶解平衡<sup>[13]</sup>, 如下式:



式中“ $\rightleftharpoons$ ”为平衡移动符号。溶解处于平衡后, 离子的浓度制约着平衡的移动。在水质分析中发现, 研究区地下水中有大量的钙离子和硫酸根离子, 此外还有钠离子、镁离子、重碳酸根离子、氯离子等离子。这些离子增大了溶液中的离子强度, 加强了离子间的牵制效应, 导致石膏解离的钙离子和硫酸根离子结合的概率降低, 继而产生石膏分子的概率降低, 最终使其溶解度增大。且溶解达到平衡后,  $\text{HCO}_3^-$  与  $\text{Ca}^{2+}$  结合, 同样促使该溶解平衡朝着正向进行,  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度增大。

### 4 结 论

(1) 水源热泵系统的运行导致研究区地下水水化学类型由  $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$  类型转变为  $\text{SO}_4 - \text{Ca}$  类型, 机组停止运行后水化学类型又恢复到  $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$  类型, 表明水源热泵系统长期运行之后趋于稳定, 停机后不改变项目所在地段水化学类型。

(2)  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  离子和溶解性总固体的相关性较高;  $\text{NH}_4^+$  和硝酸盐的相关性较高。说明以上离子浓度的变化具有较大的相关性。

(3) 本工程所在地段水质变异是由于热泵运行改变了地下水物理、化学环境导致的; 温度通过影响物理化学反应的条件间接影响地下水水质; 上述影

响在一定条件下是可恢复的,一般随着系统的停止,影响也会逐渐消除。除了上述影响,地下水源热泵系统运行诱发地下水水质变异还与工程所在地的地层岩性有关,就池州而言,地层中石膏的存在导致地下水中  $\text{SO}_4^{2-}$  离子大幅度增加,这种影响具有地域性,系统停止后,水质会略有恢复,但恢复不到系统运行前的水平,故,在地下水源热泵系统设计之初要根据区域水文地质条件进行水质评价,降低热泵系统的建设对地下水水质造成污染的几率。

### 参考文献:

- [1] 刘慧媛,杨忠直.资源消耗与经济增长[J].投资研究,2012,8(31):69-70.
- [2] 刘瀚,陈安国,周吉光,等.浅层地温能开发利用的环境效应[J].中国国土资源经济,2013,26(8):36-39.
- [3] 韦婷.地下水源热泵水质性约束研究[D].合肥:合肥工业大学,2015:27-29.
- [4] 徐红霞,杨帆.某地下水源热泵系统运行对水质影响分析[J].地下水,2016,38(3):51-53.
- [5] 郭华,陈勇,李高民,等.冯家山水库水质变化及其

成因分析[J].水利与建筑工程学报,2011,9(5):31-35.

- [6] 孙宝权,董少杰,邵作玖,等.探讨模糊评价法在水质评价中的应用[J].水利与建筑工程学报,2009,7(3):127-141.
- [7] 许延春,高玉兵,李卫民,等.基于水化学特征的模糊评判法分析突水水源[J].煤炭技术,2014,33(5):17-20.
- [8] 田冲,张戈,赵世涌.模糊数学在地下水水质评价中的应用——以盘锦曙光地区为例[J].地下水,2013,35(6):20-23.
- [9] 刘经伦.东河水质生物指标与理化指标相关性分析[J].农业灾害研究,2015,5(5):57-58.
- [10] 王平,王云峰.综合权重的灰色关联分析法在河流水质评价中的应用[J].水资源保护,2013,29(5):52-55.
- [11] 侯燕军.合水县承压水溶解性总固体及水化学类型水平分带规律浅析[J].地下水,2014,36(2):27-28.
- [12] 董悦安.温度变化对地下水中微生物影响的研究[J].勘察科学技术,2008(2):15-18.
- [13] 胡彬锋,何鹏,徐娇,等.青居水电站地层中石膏质溶蚀的化学效应[J].人民珠江,2013(2):58-59.

(上接第91页)

- [2] 崔进波,苏明周,杨俊芬,等.加劲肋宽厚比对钢管-板节点承载力的影响[J].水利与建筑工程学报,2012,10(5):82-84.
- [3] 陈绍蕃.钢结构设计原理[M].3版.北京:科学出版社,2005:344-351.
- [4] 重庆钢铁设计院主编.工业厂房钢结构设计手册[M].北京:冶金工业出版社,1980.
- [5] 徐佳,邢丽,姚谏,等.柱翼缘板外粘钢板加强的梁柱端板连接节点[J].工程力学,2011,28(12):78-86.
- [6] 贾良,聂红宾.CFRP布加固混凝土矩形短柱轴压性能分析[J].水利与建筑工程学报,2015,13(5):151-155.
- [7] 冯传清.CFRP加固修复钢构件界面性能试验研究和理论分析[D].合肥:合肥工业大学,2007:9-15.
- [8] 王华锋,王宏雁,陈君毅.胶接、胶焊与点焊接头剪切拉伸疲劳行为[J].同济大学学报(自然科学版),2011,39(3):421-426.
- [9] 徐佳.建筑钢结构粘结连接节点的试验研究与有限元分析[D].杭州:浙江大学,2011:9-40.

- [10] 徐桂根,侯建群,聂建国.粘结连接钢构件的实验研究与理论分析[J].工业建筑,2005,35(9):86-89.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部.中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.建筑结构荷载规范:GB50009-2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.钢结构设计规范:GB50017-2003[S].北京:中国计划出版社,2003.
- [13] 赵宁,欧阳海彬,戴建京,等.内聚力模型在结构胶接强度分析中的应用[J].现代制造工程,2009(11):128-131.
- [14] Benzeggagh M L, Kenane M. Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus[J]. Composites Science and Technology, 1996,56(4):439-449.
- [15] 甄圣威.局部压力作用下工字梁腹板的极限承载力研究[D].广州:华南理工大学,2010:17-19.