

马道静载试验与有限元分析

The static load test and the finite element analysis of the walkway

马凯文¹ 吴珊珊² 方顺中³

(1甘肃省民航建设集团有限公司, 甘肃 兰州 730070;

2甘肃第六建设集团股份有限公司, 甘肃 兰州 730030;

3 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 本文以某大剧院多功能厅钢桁架结构马道为背景, 对该马道进行了静载试验研究。由于是新建结构, 对其正常使用存在不确定性, 所以用单调加载静力试验来研究其承载力和稳定性。通过静载试验得到马道最大跨主要受力杆件的应变大小以及最大跨挠度大小等重要数据, 然后使用有限元软件 ABAQUS 进行了建模分析, 由此也进一步的验证出检测数据的可靠性。有了这一分析过程也将为现实工程结构静载试验检测鉴定提供参考。

关键词: 静载试验; 钢桁架; 马道; 检测鉴定

Abstract: In this paper, the background is the steel truss structural brideway of multi-function hall in a grand theatre, which has been carried out the static load test. Because of the new structure, there is uncertainty about its normal usage, so the load-bearing capacity and stability are studied by monotone loading static test. The strain of the main force-bearing bars and the biggest span deflection and other important data are obtained across the static load test of the brideway, then analyzes modeling using finite element software-ABAQUS, which could further verify the reliability of the testing data. This analysis will also provide a reference for the test evaluation of the static load test.

Key words: static load test; steel truss; brideway; inspecting and appraising

中图分类号: U448.22 文献标识码: B 文章编号: 1003-8965 (2017) 05-0076-06

静载试验是考虑结构或构件在静力荷载作用下, 测的结构或构件的各种变形、内力变化从而评定其工作性能及承载能力。本试验是对某大剧院钢桁架结构中的马道进行静力荷载试验研究, 主要研究的是钢桁架在节点满布荷载时, 钢桁架跨中最大挠度和桁架弦杆的应变。

结构主屋面高度为 31.85m^[1]。整个建筑的抗震设防烈度为 7 度, 基本地震加速度为 0.10g, 设计地震分组为第二组, 建筑场地类别为 II 类。建筑抗震设防分类为乙类^[2,3]。剪力墙、框架柱和框架梁抗震等级均为一级, 对于关键构件的抗震措施提高一级, 为特一级。舞台口大梁 (跨度 24m)、舞台屋盖 (跨度 23.6m)、观众厅屋盖 (跨度 34m) 等为大跨结构; 观众厅楼座为大悬挑结构^[4]。马道采用 Q235B 钢材。本次所进行静载试验的结构为多功能厅的马道, 如图 1 红色区域位置, 马道实图见图 2。

1 建筑结构概况

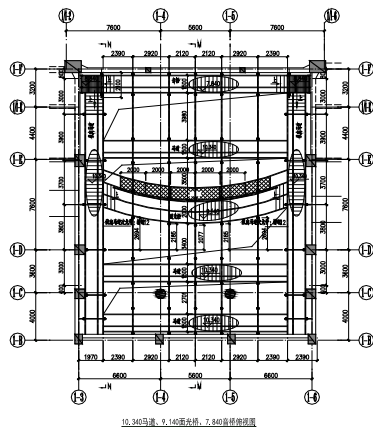


图 1 10.340 马道平面图



图 2 马道实图

大剧院主要由剧院、多功能厅、展厅三部分组成, 三部分在圆弧的三分点上, 这三部分连接部位为商业区, 整个建筑外轮廓与圆弧吻合。本工程总建筑面积约为 3.2 万 m²。大剧院地下 4 层, 地上 6 层, 建筑总高度 41.1m,

2 现场荷载试验

2.1 试验目的和内容

对新建的大剧院钢桁架结构进行现场静力荷载试验。

根据委托单位要求和试验条件, 试验双方协商确定, 采用重力加载法模拟设计荷载, 采用跨中控制截面相同效应的等效荷载进行加载, 确定试验荷载值按照规范要求, 在正常使用极限状态荷载值的 0.85~1.05 之间^[5]。研究钢桁架在节点满布荷载时, 钢桁架跨中最大挠度和桁架弦杆的应变, 验证结构的可靠性。

2.2 试验加载

1) 加载图示

根据现场条件, 本次试验采用重力加载, 根据现场提供的沙袋为加载重物, 小包沙袋重 25kg, 大包沙袋重 50kg, 以线荷载形式加载。马道具体加载图式见图 3, 实际最终加载量见图 4 所示。

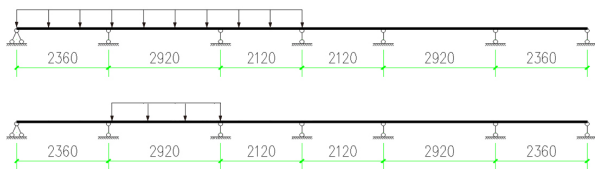


图 3 马道加载图式



图 4 马道现场加载图

2) 控制荷载

依据规范标准结构构件使用状态短期试验荷载值应根据结构构件控制截面上的荷载短期效应组合的设计值和试验加载图式经换算确定。

由于马道是对称结构, 为了简化计算并反映其实际受力情况, 实行半马道试验荷载布置。按照在《建筑结构荷载规范》GB5009-2012^[6] 荷载作用计算, 上人马道其活荷载设计值取 2KN/m^2 。根据规范建议的静力试验荷载的效率系数在 0.85 ~ 1.05 的范围内, 所以试验荷载的效率系数取为设计荷载的 0.85, 故此马道最大试验荷载取为 1.70KN/m^2 。因此需要用 36 袋沙袋的重量来模拟试验荷载进行试验, 即换算成集中力后一个节点所加载的最大试验荷载值取 $P=18\text{kN}$ 。

3) 正式加载

加载方式采用分级加载, 便于控制加(卸)载速度和

观测分析各种变化。此次试验根据实际条件分两阶段加载: 其一, 加载阶段, 在保证加载装置、仪器仪表正常工作前提下, 测点与荷载关系变化曲线符合要求之后, 按照分级加载要求进行正式加载, 此次加载分 3 次达到试验荷载值, 其二, 卸载阶段, 直接卸载。

此次加载程序主要依据以下原则进行, 分 3 级进行加载, 每级加载荷载持续时间为 15min; 残余变形测量在全部卸载后变形恢复后进行。马道加载按照工况 1~ 工况 4 进行, 如图 5~ 图 8 所示, 图中所示数字为该处所加的沙袋的重量(单位: kg), 每一工况所加的沙袋总重分别为: $P=4.5\text{kN}$ 、 $P=9\text{kN}$ 、 $P=18\text{kN}$ 。

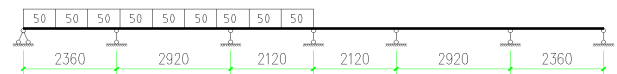


图 5 工况 1 荷载布置图

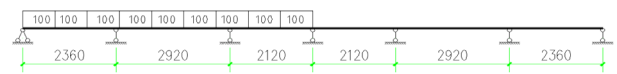


图 6 工况 2 荷载布置图

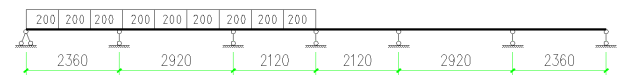


图 7 工况 3 荷载布置图

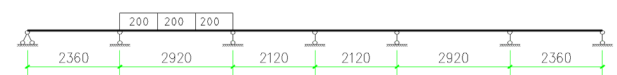


图 8 工况 4 荷载布置图

表 1 每级荷载沙袋总重

工况名称		荷载 P 大小 (kN)
加载	工况 1	4.5
	工况 2	9
	工况 3	18
	工况 4	6
卸载	工况 5	0.00

2.3 量测方案

在进行静载试验时, 为了对马道在荷载作用下的实际工作有全面的了解, 就要求利用各种仪器设备测量结构反应的某些参数, 从而为分析结构的工作状态提供科学依据。利用充分的力学和结构理论对结构进行初步估算, 然后合理地布置测点, 力求减少静载试验工作量而尽可能获得必要的的数据。数据采集方案设计考虑如下内容:

1) 应变测点布置和数量

马道的弯矩和最大挠度都发生在跨中的钢梁截面处, 即跨中截面为此次试验的控制截面。为获得更多的试件的性态信息, 确定应变(应力)测试断面为左 2 跨的跨中截面、支座截面和节点处, 并在马道和转换层布置应变测点, 沿竖向布置 6 个测点; 共计 16 个应变测点, 具体如图 9 所示, 图中数字 1~16(括号内为对面的应变片)为应变测点。

应变测试采用金属应变片，采集设备为 DH3821 静态应变测试系统，分辨率为 $\pm 1\mu\epsilon$ 。



图 9 马道应变测点布置图

2) 位移测点布置

在静载试验中，利用位移计测量马道的变形，应合理选择测点的位置，使得测点有代表性且便于分析和计算。此次静载试验马道和面光桥是对称结构，具有对称性。利用结构本身和荷载作用的对称性，在控制测点对称的位置上布置一定数量的校核测点。马道位移测点布置在左 2 跨节点和跨中处，为消除支座沉降对测试结果的影响，在两端支座处布置 4 个位移测点以测量支点沉降，共计 8 位位移测点，具体见图 10。图中字母编号 a~h 为挠度测点。挠度测试采用应变式位移传感器，分辨率为 ± 0.01 。

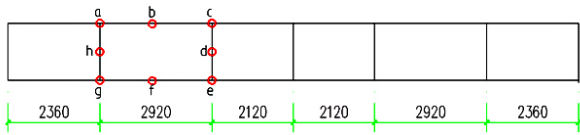


图 10 马道位移测点布置

3 试验结果与有限元分析

表 2 马道实验荷载以及有限元模型荷载

荷载工况	试验荷载 (kN)	模型荷载 (kN)	面荷载 (kN/m ²)
工况 1	4.5	9	0.41
工况 2	9	18	0.81
工况 3	18	36	1.62
工况 4	6	12	1.37
设计荷载	/	/	2.00

3.1 有限元模型计算

为了能够准确的分析马道的整体受力规律及其使用性能，本次计算采用“ABAQUS 分析程序”进行空间受力分析。有限元模型建立按照马道实际计算长度进行，搁置在现场的马道两个端部中心的距离为 14800mm，3 条槽钢上铺设钢板，下与横梁连接，简化为连续梁模型。为了得到马道的极限承载力，在设计荷载 2.0kN/m² 的基础上

进行逐级加载，每级递增 0.5kN/m²，加载至破坏。加载方案如表 2。模型建立和计算图如图 11~ 图 16 所示。

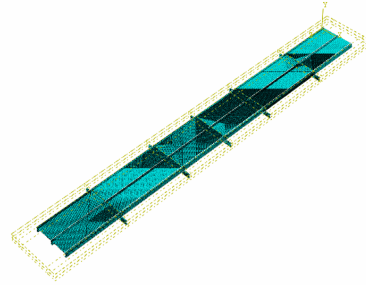


图 11 马道网格划分图

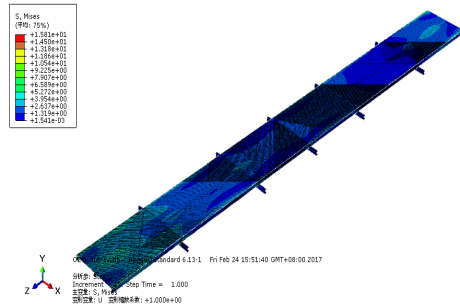


图 12 工况一荷载作用下应力云图

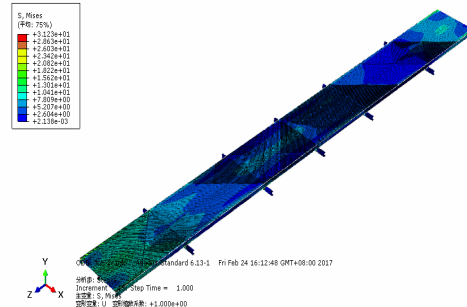


图 13 工况二荷载作用下应力云图

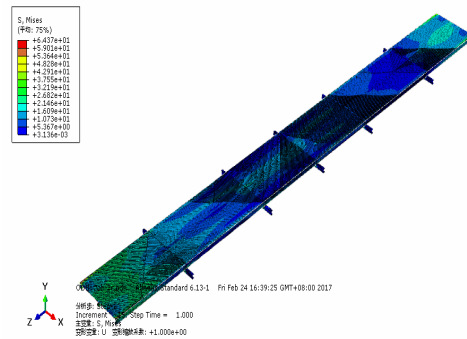


图 14 工况三荷载作用下应力云图

3.2 挠度测试数据分析

1) 静载试验后，对采集的数据进行整理换算、统计分析。应变式位移计传感器测得的应变值换算成位移值，由测得的位移计算挠度。通过对左二跨跨中两个位移传感器所测到的数值进行分析处理，在处理分析时，跨中竖向位移值已经将支座产生的沉降进行了消除。具体各级荷载

作用下跨中竖向位移值汇总表见表 3。

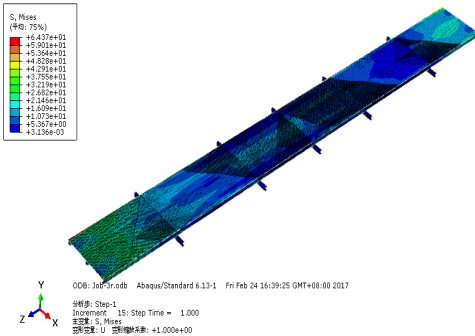


图 15 工况四荷载作用下应力云图

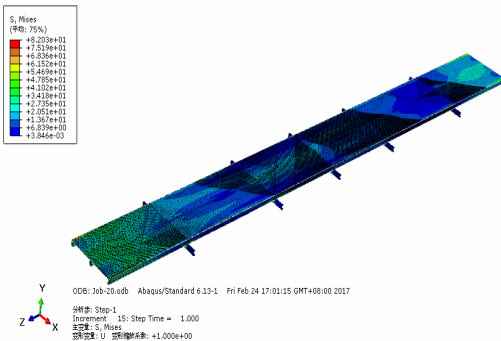


图 16 设计荷载作用下应力云图

从表中可以看出随着荷载的增加,各个测点的竖向位移值成线性比例增长,卸载亦按照线性比例减小,残余竖向位移值最大只有 0.1mm,不足最大值的 10%。挠度测点竖向位移值随加卸载为线性增减,结果表明该马道在线性范围内工作。最大工况下的挠度也比设计荷载下的挠度小,说明结构安全。根据实测的挠度值与理论挠度值,计算出了挠度校验系数,其分布范围为 0.38 ~ 0.95,多数集中在 0.75 左右,可见马道具有较大的刚度。且实测挠度最大为 1.24mm 小于允许挠度值 7.3mm。

规范 [6] 允许挠度计算公式:

$$\frac{f'}{l} \leq \left[\frac{f}{l} \right] = \frac{1}{400}, \quad (l = 2920\text{mm})$$

结构校验系数: $\gamma = \frac{\text{测点实测值}}{\text{测点的理论计算值}} \leq 1$

(2) 实测与理论挠度值比较

b# 测点和 f# 测点实测挠度值与理论挠度值比较见图 17、图 18。从图中可以看出各级荷载作用下理论值均大于实测值。且实测值接近理论值,说明试验对有限元的分析检测是可靠的。

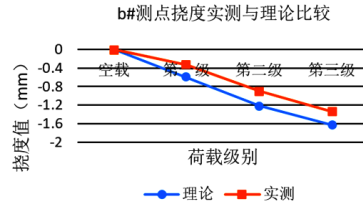


图 17 b# 测点挠度实测与理论值比较

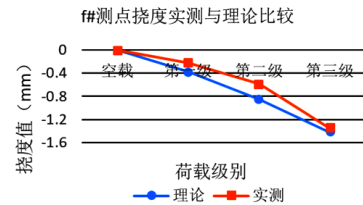


图 18 f# 测点挠度实测与理论值比较

表 4 不同工况下 (各级加载) 各测点应力值

工况测点空载		加载			
		第一级	第二级	第三级	
8#	理论值	0	4.12	6.75	9.32
	实测值	0	2.23	5.97	8.03
	校验系数	-	0.54	0.88	0.86
12#	理论值	0	22.88	52.62	80.51
	实测值	0	15.74	30.54	62.07
	校验系数	-	0.69	0.58	0.77
13#	理论值	0	-6.56	-12.21	-20.45
	实测值	0	-5.06	-9.46	-13.63
	校验系数	-	0.92	0.69	0.67
14#	理论值	0	-5.9	-10.42	-18.45
	实测值	0	-4.13	-7.97	-13.46
	校验系数	-	0.70	0.67	0.73
16#	理论值	0	23.74	58.45	85.71
	实测值	0	10.82	34.14	68.69
	校验系数	-	0.46	0.58	0.80

3.3 应力测试数据分析

1) 由应变片测得的应变数值进行结构的内力分析,

表 3 不同工况 (各级荷载加卸载) 下各截面挠度值

截面工况理论		b# 测点			f# 测点				
		测试	校验系数	最大跨布置	理论	测试	校验系数	最大跨布置	
加载	1	-0.6	-0.23	0.38	-0.18	-0.38	-0.22	0.58	-0.18
	2	-1.21	-0.90	0.74	-0.31	-0.86	-0.59	0.69	-0.37
	3	-1.63	-1.24	0.76	-0.70	-1.42	-1.35	0.95	-0.70
	4	-0.60	-0.49	0.82	/	-0.73	-0.58	0.79	/
	5	1.56	/	/	/	1.67	/	/	/
卸载	6	-0.005	/	/	/	-0.10	/	/	/

先将测得的应变转化成应力，然后由结构的变形和荷载关系可得到结构的屈服点、延性和恢复力模型等。

通过实测数据，选取具有代表性的测点绘制应力与荷载变化曲线。选取测点为 8#、12#、13#、14# 和 16# 测点，曲线见图 19 ~ 图 23。并且选择其中的 12#、13#、14#、16# 测点进行理论与实测的应力值比较，见表 4。

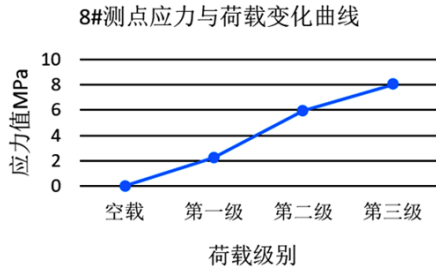


图 19 测点 8# 应力与荷载变化曲线

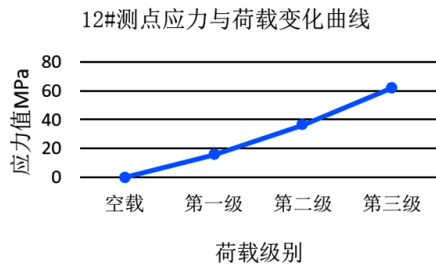


图 20 测点 12# 应力与荷载变化曲线

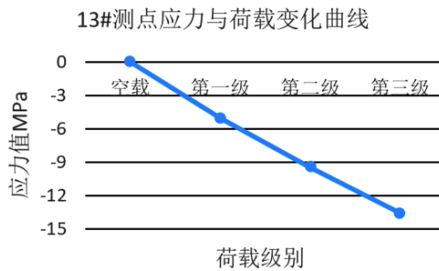


图 21 测点 13# 应力与荷载变化曲线

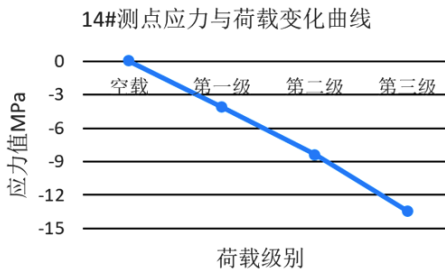


图 22 测点 14# 应力与荷载变化曲线

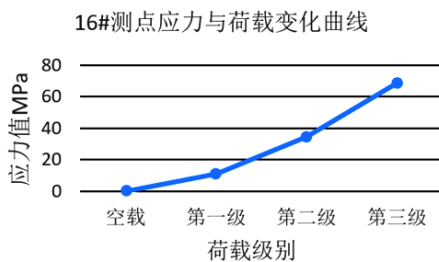


图 23 测点 16# 应力与荷载变化曲线

从表 4 中，根据实测的应力值与理论应力值，计算出了应力校验系数，其分布范围为 0.46 ~ 0.96，均小于 1.0，说明马道具有较好的强度。从图中曲线可以得到应力随荷载成线性变化，马道处于线弹性范围内。实测应力均远远小于钢材设计强度 210 MPa，满足规范要求。

2) 实测与理论测点应力对比

图 24 ~ 图 27 给出了各级荷载作用下，12#、13#、14# 和 16# 测点的实测应力和理论应力曲线对比。从图中可以看出各点的理论计算值均大于实测应力。且应力值都很小，实测应力均小于钢材设计强度 215MPa。说明此时构件还完全处于线弹性阶段。

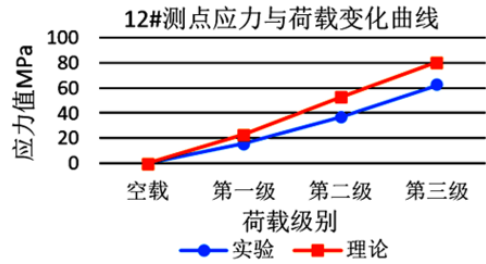


图 24 测点 12# 实测与理论应力对比

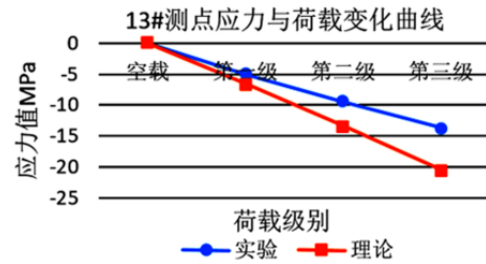


图 25 测点 13# 实测与理论应力对比

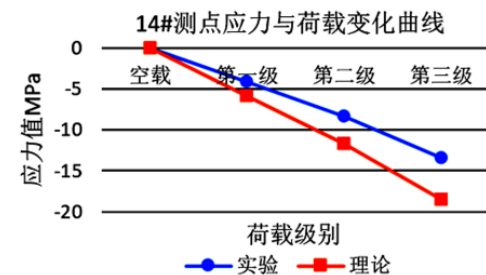


图 26 测点 14# 实测与理论应力对比

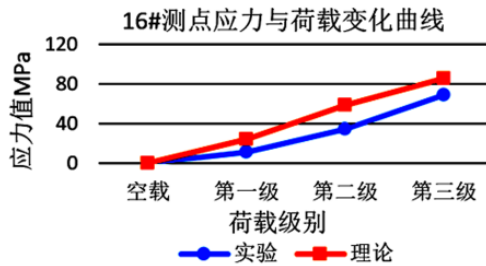


图 27 测点 16# 实测与理论应力对比

4 结语

该试验马道经过荷载效率系数为 0.85 的荷载作用以及分析测试结果可得如下结论:

1) 根据试验结果分析, 马道在试验荷载作用下的应力很小且最大工况下的挠度也比设计荷载下的挠度小, 强度、刚度和稳定性均满足规范要求。

2) 经过有限元软件的理论分析, 马道在静力荷载作用下, 挠度测点竖向位移值随加卸载为线性增减, 应力随荷载成线性变化, 结果表明马道在线弹性范围内工作。说明结构安全, 满足规范要求。

3) 经过试验和有限元模拟的结果比较, 理论计算值均大于实测应力, 而且在加载过程中马道的应力和变形与荷载基本成线性关系。实测应力均小于钢材设计强度 215MPa。说明此时构件还完全处于线弹性阶段。试验过后马道无过大的挠度和变形, 最大挠度也满足规范中允许的挠度。

综合分析说明, 本次试验的马道具有足够的刚度和强度, 满足《建筑结构荷载规范》(GB 50009 - 2011) 要求的承载力极限状态和正常使用极限状态。

参考文献

- [1] 张掖大剧院结构超限设计可行性报告[R]. 深圳: 深圳市建筑设计研究总院有限公司, 2014.
- [2] GB 50223-2008 建筑工程抗震设防分类标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [3] GB 50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [4] 周斌, 王启文, 杨旺华, 刘国银, 卢郁, 李淑娟. 甘肃张掖大剧院抗震性能设计[J]. 建筑结构, 2015,(15):36-40+16.
- [5] 交通部颁. 公路桥涵养护规范(JTGH11- 2004)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [6] GB5009-2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [7] GB 50010-2003 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

(上接第 75 页)

3110 cm^{-1} ~3660 cm^{-1} 。-COONa 中 -C=O- 的伸缩特征峰为 1640 cm^{-1} 。1732 cm^{-1} 为酯基中 -C=O- 的伸缩振动吸收峰, 这表明聚合物中酯基的存在。2871 cm^{-1} , 1455 cm^{-1} , 1352 cm^{-1} 为 -CH-、-CH₂- 的特征吸收峰, 1109 cm^{-1} 是聚合物中醚键 -C-O-C- 的特征吸收峰, 这也表明了聚合物中聚醚单元的存在。

3 结语

1) 本文使用异戊烯基聚氧乙烯基醚(TPEG)、丙烯酸(AA)、丙烯酸羟乙酯(HEA)及白糖等为原材料, 在较低温度(40~45 $^{\circ}\text{C}$)合成抗泥型聚羧酸保坍剂。此抗泥保坍剂具有良好的抗泥性及保坍性。

2) 实验过程中, 使用白糖取代 10% 的聚醚参与反应时, 所得聚合物在混凝土中的分散性能较差。取代率为 8% 时, 所得聚合物抗泥性及保坍性均较好, 按目前聚醚(TPEG)11500 元/吨, 白糖 5000 元/吨的单价算, 单吨聚醚消耗减少 520 元, 极大地降低了合成成本; 更为重要的是, 白糖的多羟基结构在混凝土中, 也可被比表面积较大的泥土颗粒吸附, 白糖分子占据了泥土颗粒表面一定的

吸附位点后, 减少了泥土颗粒对聚羧酸的吸附而起到抗泥作用。

3) 从 GPC 可看出其分子量大, 反应转化率高。红外光谱测定, 可得出合成样品具有聚氧乙烯基、羟基、羧基及酯基等官能团。

参考文献

- [1] 桓勇, 马保国. 不同含泥量对两类减水剂性能影响规律研究. 商情, 2012(44).
- [2] 王林, 王栋民, 包文忠. 粘土对聚羧酸减水剂性能的影响及机理研究. 武汉理工大学学报, 2013(8).
- [3] 潘子骥, 卞荣兵, 金兔红, 刘丙柱, 富扬. 具有抗泥功能混凝土外加剂的制备与评价. “科隆杯”外加剂论文集, 322-326.
- [4] 马永贵, 韩青峰. 抗泥型聚羧酸系减水剂的合成及在混凝土中的应用. 水电水利技术, 2016(47):59-62.
- [作者简介] 邓磊, 男, 硕士, 工程师, 贵州科之杰新材料有限公司研发工程师兼技术主办, 主要从事混凝土外加剂的研发与应用。