

特大跨悬索桥的缆索体系优化

王晓明¹, 郝宪武², 石雪飞¹, 阮欣¹

(1 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092; 2 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 以提高特大跨悬索桥的动力稳定性为目的, 基于优化缆索体系的思路, 对三种优化方案进行比较. 综合考虑抗风性能、施工、经济等因素, 通过力学分析, 指出一种行之有效的空间索形体系. 以某座主跨 1 090 m 的跨海悬索桥为算例, 就实桥使用的平面索形与本文推荐的空间索形, 利用自行编制的程序 ECFS, 分别计算出初始平衡状态下主缆与吊杆的无应力长度、坐标和张力. 利用这些力学、几何参数在 ANSYS 中分别建立平面、空间索形模型, 进行动力分析. 经过对两种索形自振特性的对比, 分析其振动性能的差异与原因, 证实了该空间索形可以有效提高悬索桥的横向刚度、抗扭刚度, 从而提升结构的动力稳定性. 有可能成为大跨悬索桥的发展方向.

关键词: 空间索形悬索桥; 振型; 三变量体系; 动力稳定性; 缆索体系优化

中图分类号: U 441. 3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007- 855X(2008) 06- 0055- 06

Optimization of Cable System in Extra Long- Span Suspension Bridge

WANG Xiao-ming¹, HAO Xian-wu², SHI Xue-fei¹, RUAN Xin¹

(1. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(2. Department of Highway Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract The effort is made in this paper to improve dynamic stability of extra long- span suspension bridge. Aiming at optimizing cable system, three optimization schemes are proposed and compared. One spatial cable system is put forward through mechanical analysis combined with a comprehensive analysis of their wind resistance performance, construction and economy. A sea-crossing bridge with an 1 090 m main span is taken as an example. The program ECFS is written to calculate non-stress length, coordinates and tension of main cables as well as hangers in the initial equilibrium state of spatial cable or plane cable suspension bridge. Using these mechanical and geometrical parameters, both plane cable model and spatial cable model are established to analyze self-vibration characteristics by ANSYS program. The comparison of dynamic characteristics is employed to analyze the difference between the vibration performance of the two kinds of cable systems and its corresponding causes. The results verify that the spatial cable system can effectively enhance bridge transverse stiffness and torsional stiffness, and further increase structural dynamic characteristics. It may become a developing direction of long-span suspension bridge.

Key words suspension bridge with spatial cable; vibration mode; trivariate system; dynamic stability; cable system optimization

0 引言

桥梁必需的使用宽度是有限的. 随着跨径的增大, 宽跨比减小, 横向刚度也逐渐减小, 影响到桥梁的动力稳定性. 对于平面索形悬索桥, 随着跨度的增大, 挠振频率与扭振频率都下降. 逐渐趋向于接近, 结果在低风速下将发生颤振. 因此, 如何在提高悬索桥跨越能力的同时, 保证足够的横向刚度和稳定性, 是今后悬索桥面临的两大难题^[1]之一.

收稿日期: 2008- 03- 25

第一作者简介: 王晓明(1983-), 男, 博士研究生. 主要研究方向: 大跨桥梁施工控制与信息技术.

E-mail: wxm512061228@gmail.com

总结国内外目前的研究,主要有四种方法:1)设置能够自动控制桥梁气动稳定的装置;2)将加劲梁体一分为二以增大全桥的宽跨比^[2];3)悬索——斜拉协作体系^[3];4)改变缆索体系来抵抗桥梁的气动失稳.

方法1)~3)的思路基本一致,都是对当前结构额外增加装置、构件(横隔梁或缆索).与此不同,方法4)仅依靠优化缆索体系,获得很好的抗风稳定性.它只需增加少量施工工序,就可提供满意的抗风效果,从而避免其它方法因添加构件引起的造价陡增.本文首先对传统双平面缆索进行优化,给出三个优化方案.通过综合因素的比选,得出一种行之有效的空间索形体系.然后通过有限元分析,验证该类空间索形悬索桥具有良好的动力稳定性.

1 缆索体系的优化

1.1 缆索系统刚度作用随跨径的变化规律

对于800m以下的悬索桥,由于宽跨比大,抗风作用主要依靠梁体的挠曲刚度与扭曲刚度.对于1000m以上的悬索桥,宽跨比往往小于1:30,梁体的横向刚度作用将明显小于缆索体系的横向刚度.在风洞模型试验中可以发现,前者缆随梁移,后者梁随缆飘.

因此,对于特大跨悬索桥,优化缆索系统,通过提高缆索体系的动力稳定性来改善全桥的抗风稳定性,是切实可行的.

1.2 缆索体系的优化方案

方案I:如图1(a),将两根主缆的间距从跨中到桥塔逐渐拉开(加大),以增大抗扭效果.该体系的优点是在横向有较大的刚度.其缺点:1)横截面是一个梯形,稳定性差.2)桥塔宽度明显大于主梁,不经济.而且需要采用H型、门型塔,桥塔自身的稳定性差.3)出于梁体的宽度并不同时增大,在两根主缆之间必须用横向水平索来连结.该横向水平索只承受主缆重量的横向水平分力,只是作为抗风缆,对竖向承载没有贡献.

方案II:如图1(b),采用传统的平面悬索体系,但增加交叉吊索^[4].因为扭曲运动必须与梁体的侧向位移同时发生(转动中心向上移动),这种体系的整个横截面(包括梁体与缆索)变得较为刚强.该体系的缺点:1)侵犯交通净空,尤其在跨中区段.2)交叉吊索只是作为抗风缆,对竖向承载没有贡献.它的拉力很小,只需能保持索的直线形状以及在振动时不丧失拉力.因此造成材料的浪费.

方案III:如图1(c),两根主缆从跨中向桥塔逐渐靠近并在塔顶合拢.这种体系在对竖向承载能力影响不大的情况下,缆索系统的横向承载能力得到显著提高,从而大大提高了整个桥梁的横向刚度和抗扭刚度.其优点:1)由于主缆和吊索形成一个三维的索系,两根主缆横向间距的减小削弱了扭曲运动.2)横桥向倾斜的吊杆与加劲梁构成一个稳定的三角形,每对斜吊杆中的横桥向水平分力将加劲梁夹住,使得主梁有类似钟摆的回复力,从而提高整体扭转刚度.3)由于在塔顶处两主缆间距变小,所以只能采用塔顶处两塔柱合并的桥塔,如A型或者钻石型桥塔.该类桥塔自身具有良好的动力稳定性.4)没有增加专门为抗风而设计的附属缆索,材料利用充分.其缺点施工时,需要额外控制吊杆索夹的安装角度.



图1 双主缆体系优化方案

Fig.1 Optimization schemes for two cables-system

经过上述比较, 方案 II 的空间索形, 受力清晰明确, 没有专门用于抗风的赘余构件, 经济合理. 目前国内内外几座此类空间索小跨径自锚式悬索桥的建成, 说明其施工上的缺点可以克服. 其对特大跨悬索桥动力稳定性良好的改善效果, 本文通过以下分析来验证.

2 有限元模型的建立

2.1 空间索形缆索系统初始平衡状态的求解

目前国内内外求解空间索形初始平衡状态的方法有两种: 节线法^[5]和弹性悬链线法^[6]. 前者假定主缆与吊杆的连接节点之间的索呈直线, 精度有限. 后者将主缆索段与横桥向倾斜的吊杆都以弹性悬链线计入, 建立具有三变量的三维体系, 形成精确的空间缆索悬索桥数值解析法. 但由于系统具有三变量, 以前的平面索形迭代方法无法使用.

本文提出了基于 Steffens-Newton 法^[7]的迭代法, 使得针对空间的弹性悬链线法的应用成为现实. 并应用 Matlab 编制程序 ECFS. 该程序适用于双塔三跨、单跨以及独塔单、双跨的平面、空间索形的自锚式、地锚式悬索桥设计. 程序流程图见图 2.

2.2 缆索体系的初始刚度

自编程序 ECFS 计算求得初始平衡状态下主缆与吊杆的坐标和张力, 以及无应力长度. 将主缆与吊杆的坐标与无应力长度输入到 ANSYS 中建立模型, 然后将张力输入作为初始荷载^[8]. 这样程序会在振型分析中自动考虑其几何刚度.

2.3 模型选择

实际中, 千米级跨海大桥的主缆水平拉力非常大, 由于加劲梁难以承担如此强大的压力而无法采用自锚式. 本着模型算例来源实际, 研究结果服务工程的原则, 以已建成的某座地锚式悬索桥为算例. 跨径布置: 210 m + 1 090 m + 210 m, 加劲梁为扁平钢箱梁. 主跨失跨比 1: 12, 加劲梁高跨比 1: 363.33, 宽跨比 1: 32.25. 主缆的面积 $A = 0.415 \text{ m}^2$, 弹性模量 $E = 1.99 \times 10^5 \text{ MPa}$. 吊杆面积 $A = 0.141 \text{ m}^2$, 弹性模量 $E = 1.37 \times 10^5 \text{ MPa}$. 主梁面积 $A = 3.496 \text{ m}^2$, 弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$.

针对算例, 按照桥型布置、材料、截面、约束等都一致的原则, 分别建立平面索形悬索桥 (实桥采用), 空间索形悬索桥 (本文推荐). 有限元模型见图 3.

桥塔形式的选择, 是由缆索索形决定的.

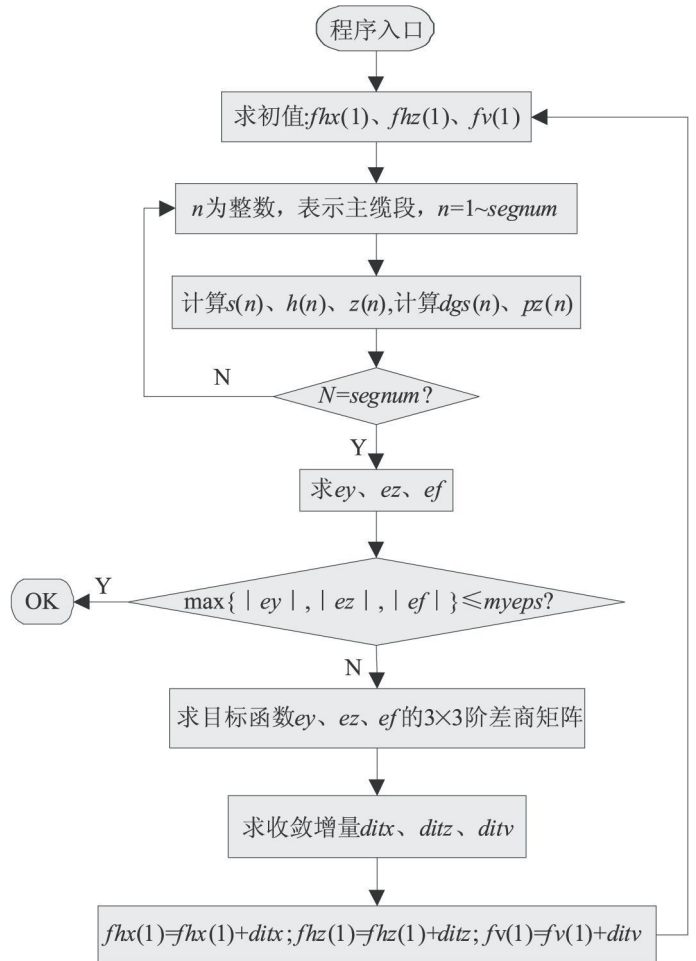


图2 ECFS程序流程图
Fig.2 Flow chart of ECFS

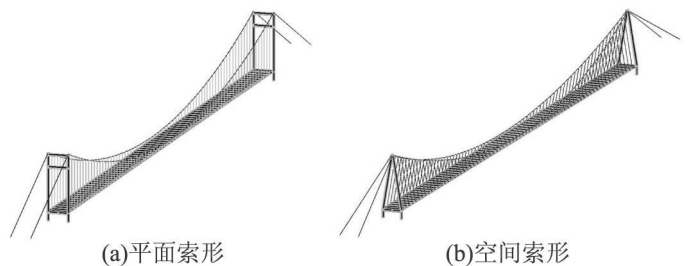


图3 有限元模型

Fig.3 Finite element models

平面索形悬索桥, 由于两索面分别在各自平面内, 采用塔顶处两塔柱分离的桥塔, 如门型, H 型桥塔. 空间索形悬索桥, 如前所述, 采用 A 型桥塔. 为了消去桥塔横向连接不同对振型的影响, 在平面索形模型采用的 H 型桥塔中, 于塔顶附近, 额外增加两道横梁^[9].

3 有限元分析

结构的自振频率是结构弹性分析的重要参数, 也是一个与结构内部阻尼和外力无关的参数^[10]. 因此, 求解结构自振频率的方程可以表示为:

$$M\ddot{u} + Ku = 0 \quad (1)$$

式中 M 为结构的质量矩阵; K 为结构的刚度矩阵; u 为结构上节点处的位移. 这个齐次方程的解可表示为正弦振动, 如下式所示:

$$u = u_0 e^{-i\omega t} \quad (2)$$

将上式代入 (1) 中, 有

$$\{-\omega^2 M + K\} \cdot u_0 = 0 \quad (3)$$

上式当 $u_0 = 0$ 时毫无意义, 因此要求 $|\{-\omega^2 M + K\}|$ 为零. 此时, 矩阵 $\{-\omega^2 M + K\}$ 为奇异矩阵. 在数学上, 就是求 ω 为何值时矩阵才奇异的问题, 称为特征值问题^[11]. 特征值的求解有很多方法, 本文采用目前求解大型结构常用的子空间迭代法.

4 计算结果

4.1 横向刚度

表 1 列出了反映横向刚度的前几阶振型, 在平面索形与空间索形间进行对比分析. 对于同样的振型, 平面索形出现的阶次早于空间索形, 且频率低于空间索形. 这充分说明: 在条件一致时, 空间索形悬索桥的横向刚度高于平面索形悬索桥.

表 1 结构横向振动频率及对应振型

Tab 1 Transverse self-vibration frequency and mode

振型特征	平面索形		空间索形		$(B-A)/A$ 100%
	振型阶次	A 频率 /Hz	振型阶次	B 频率 /Hz	
缆、梁对称侧摆	2	0.140 489	3	0.142 576	1.486
缆、梁反对称侧摆	6	0.351 134	7	0.371 344	5.756
缆对称侧摆, 梁不动	7	0.369 927	11	0.455 458	23.121
缆索对称外摆	10	0.443 911	10	0.444 773	0.194

研究发现, 在振型缆、梁反对称侧摆中, 平面索形的加劲梁滞后于缆索的振动. 而在空间索形中, 加劲梁与缆索的振动相一致. 这说明, 空间索形中, 缆梁连接更紧密, 振动更一致, 缆索对加劲梁有着更好的约束.

从表 1 中可知, 对于图 4 所示振型, 平面索形与空间索形频率的差值异常大, 分别是 0.369 927 Hz、0.455 458 Hz 相差 23.12%. 也就是说, 要让缆索独立于加劲梁单独振动, 平面索形更容易, 空间索形更难实现. 这表明: 空间索形中, 缆梁连接更紧密, 振动更一致, 缆索对加劲梁有着更牢靠的约束.

同时, 从图 4 中可见, 在该振型中, 平面索形的桥塔随着缆索发生着较大的侧移, 而空间索形的桥塔保持不动. 由桥塔造型决定的这一行为, 会进一步导致平面索形全桥横向的动力不稳定. 可见: 由于空间索形悬索桥采用的桥塔在塔顶处两塔柱需要合并, 这进一步提高了全桥的横向动力稳

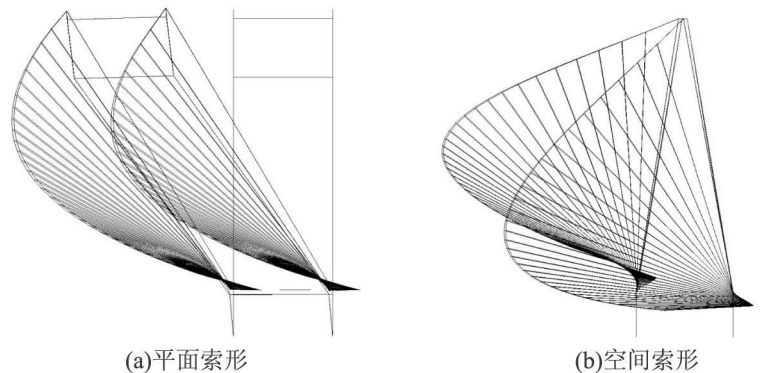


图 4 第七阶振型图: 缆对称侧摆, 梁不动

Fig.4 Seventh order mode shape

定性.

4.2 抗扭刚度

同样, 表 2 列出了反应抗扭刚度的两阶典型振型, 将平面索形与空间索形进行对比. 相同的振型下, 平面索形出现的阶次早于空间索形, 而且频率低于空间索形. 这充分说明: 在相同条件下, 空间索形比平面索形更能够提高结构的抗扭刚度.

图 5(a) 中所示振型, 是平面索形悬索桥十分典型的一种扭转振动. 两索面相互独立, 分别保持平面, 一上一下摆动, 同时带动加劲梁扭转. 对于空间索形 (图 5(b)), 由于索面不独立, 所以索面上下运动时, 伴随着强烈的索面空间扭转. 这种索面的多振型参与, 大大消耗了外来能量, 提高了结构稳定性.

表 2 结构扭转振动频率及对应振型

Tab 2 Torsional self- vibration frequency and mode

振型特征	平面索形		空间索形		$(B-A)/A \times 100\%$
	振型阶次	A 频率 /Hz	振型阶次	B 频率 /Hz	
主缆一上一下摆动 主梁扭转	18	0.734363	18	0.751242	2.298
缆梁反向弯扭耦合	19	0.763184	21	0.793931	4.029

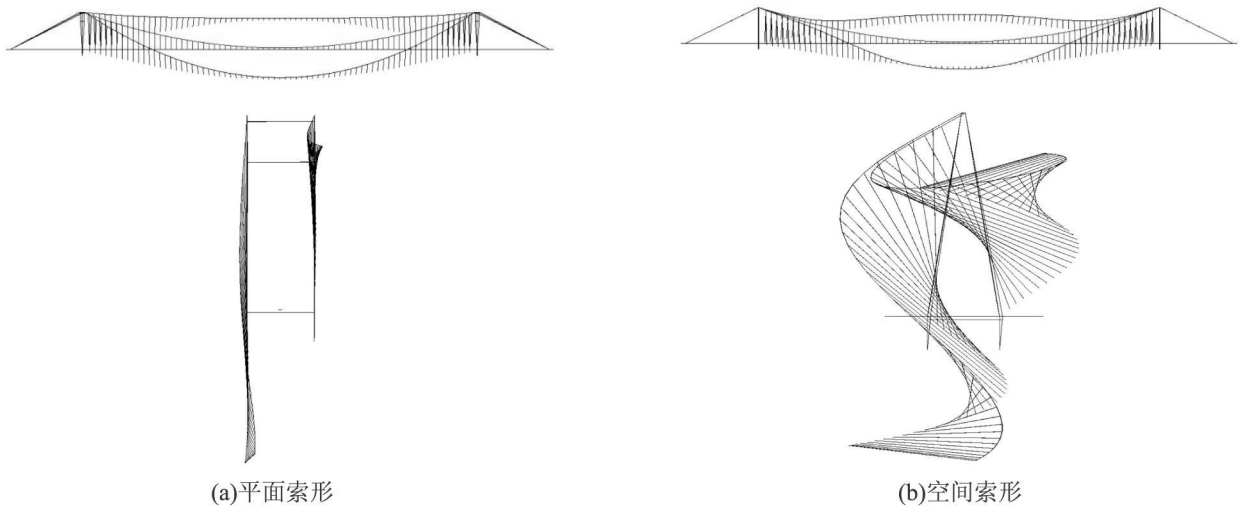


图5 第十八阶振型图: 主缆一上一下摆动, 主梁扭转

Fig.5 Eighteenth order mode shape

在振型缆、梁反向弯扭耦合中, 主缆、加劲梁都横桥向进行对称 3 阶挠曲, 但方向相反, 导致缆、梁同时受扭. 与平面索形相比, 空间索形缆梁振幅差值明显偏小. 这也说明: 空间索形中, 缆梁具有良好的协调一致性, 缆索对加劲梁约束更牢靠.

5 结 论

本文通过改变缆索体系, 给出一种优化布置形式, 为桥梁动力稳定性的改善提供较满意的结果. 本文推荐的空间索形在满足改善动力稳定性的同时, 避免了因使用宽加劲梁而造成的梁体加重, 降低了造价. 有可能成为跨江海大跨悬索桥的发展方向.

通过对平面索形与空间索形悬索桥自振频率及振型的对比分析, 得到以下结论:

- 1) 空间索形能够明显提高悬索桥的横向刚度与抗扭刚度, 从而提高结构的动力稳定性.
- 2) 空间索形桥型中, 缆梁连接更紧密, 振动更一致, 缆索对加劲梁有着更牢靠的约束.
- 3) 空间索形桥型采用塔顶处两塔柱合并的桥塔 (如 A 型、钻石型). 由于此类桥塔自身更好的横向稳定性, 以及其与索面结合对扭转显著的抗力, 可以进一步提高全桥横向动力稳定性.
- 4) 空间索形桥型可以将加劲梁的扭转振动同侧向水平振动在一定程度上耦合起来, 达到提高结构抗扭刚度和扭转频率的目的.

参考文献:

- [1] 周念先,周世忠. 特大跨径桥梁走势[J]. 中国公路, 2002, (7): 59-62
- [2] BROWN W C. Development of The Deck for The 3300m Span Messina Crossing[C] // Congress Report ABSE 12 th Congress Copenhagen, 1996
- [3] 梁鹏,肖汝诚,夏旻,等. 超大跨度缆索承重桥梁结构体系[J]. 公路交通科技, 2004, 21(5): 53-56, 69
- [4] ASTIZ M A. Flutter Stability of Very Long Suspension Bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 1998, 3(3): 132-139
- [5] KIM HO-KYUNG, LEE MYEONG-JAE, CHANG SUNG-PI. Non-linear shape-finding analysis of a self-anchored suspension bridge[J]. Engineer Structures, 2002, 24: 1547-1559.
- [6] 罗喜恒. 悬索桥缆索系统的数值分析法[J]. 同济大学学报, 自然科学版, 2004, 32(4): 441-446
- [7] 现代应用数学手册计算与数值分析卷[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [8] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 311-314
- [9] 王晓明. 空间索形自锚式悬索桥初始平衡状态分析[D]. 西安: 长安大学, 2007: 61-69
- [10] 赵卓,张哲,刘东旭. 自锚式悬索桥主桥动力特性分析[J]. 世界地震工程, 2006, 22(3): 84-88
- [11] 周芬,尚守平,杜运兴. 有限元建模对结构自振频率计算的影响[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2006, 33(5): 10-15

(上接第 54 页)

(3)根据正交试验结果确定出最优方案: $A_1B_3C_1D_2E_2$, 水灰比为 0.35, 粉煤灰掺量为 0, 矿渣掺量为 20%, 煤矸石掺量为 5%, 减水剂与膨胀剂共掺, 最佳试验方案为 $A_1B_2C_2D_2E_2$, 混凝土的强度值最大, 渗水高度值较小.

(4)煤矸石对混凝土的强度和抗渗性都影响显著, 当水灰比为 0.35~0.45, 在混凝土中掺入煤矸石能显著提高混凝土的抗渗性, 最佳掺量为 5%, 混凝土 28 d 抗压强度最大, 渗水高度最小.

(5)在混凝土中掺加外加剂能提高混凝土的抗渗性. 膨胀剂与引气剂或减水剂与膨胀剂同掺时相比, 对提高混凝土抗渗性的贡献较大, 当外加剂为引气剂或减水剂与膨胀剂共掺, 水灰比为 0.35~0.40 时, 混凝土的渗水高度远小于基准混凝土的渗水高度.

参考文献:

- [1] 施慧生,方泽铎. 粉煤灰对水泥早期水化和孔结构的影响[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(1): 95-98
- [2] 蒲心诚,王勇成. 高效活性矿物掺合料与混凝土的高性能化[J]. 混凝土, 2002, (2): 3-9
- [3] 李敏,徐玉艳. 自燃煤矸石轻集料的利用[J]. 新型建筑材料, 2001, (3): 9-10
- [4] H. TOUTANJI, N. DELATTE. Effect of Supplementary Cementitious Materials on the Compressive Strength and Durability of Short-term Cured Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004, (34): 311-319
- [5] SABIR, BR, WILD, S, BAI, J. Metakaolin and Calcined Clay as Pozzolans for Concrete—a Review[J]. Cem Concr Compos, 2001, 23: 441-445.
- [6] 宋从美,等. 多种矿物掺合料复合使用配制高强高性能混凝土[J]. 山东建材, 2002, 23(5): 15-17
- [7] 蒲心诚,甘昌成. 碱矿渣混凝土耐久性研究[J]. 混凝土, 1991, (5): 13-20
- [8] 王宗昌. 保证抗渗防水混凝土施工质量措施[J]. 混凝土, 1998, (9): 26-31.
- [9] 徐彬,张天石,等. 大掺量煤矸石混凝土耐久性研究[J]. 混凝土与水泥制品, 1997, (6): 16-19.
- [10] 杨健辉. 内掺粉煤灰自燃煤矸石混凝土抗渗机理及应用研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2000, 14(4): 10-12