

# 楠竹加筋复合锚杆内粘结剂力学性能试验

张虎元<sup>1</sup>, 张艳军<sup>1</sup>, 王旭东<sup>2</sup>, 王晓东<sup>1</sup>, 吕擎峰<sup>1</sup>

(1. 兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 敦煌研究院古代壁画保护国家文物局重点科研基地, 甘肃 敦煌 736200)

**摘要** 楠竹加筋复合锚杆是一种用于土遗址加固的新型锚定杆件, 其内粘结剂由粉煤灰、石棉、环氧树脂制成。内粘结剂是一种新型纤维复合材料, 通过弹性纵波速测试、无侧限压缩试验、巴西劈裂试验得出了内粘结剂的最短养护时间、抗压强度、弹性模量、抗拉强度等物理力学指标。结果表明, 按照新疆交河故城粉土崖体加固工程配比设计的内粘结剂具有良好的力学强度和较低的密度, 有利于楠竹加筋复合锚杆内部应力的有效传递。

**关键词** 楠竹加筋复合锚杆; 内粘结剂; 复合材料; 比强度; 比模量

中图分类号: TU58+1.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-702X(2009)01-0035-05

## Mechanical test of inner binding agent for BSC composite anchor

ZHANG Huyuan<sup>1</sup>, ZHANG Yanjun<sup>1</sup>, WANG Xudong<sup>2</sup>, WANG Xiaodong<sup>1</sup>, LV Qingfeng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Mechanics on Western Disaster and Environment, Ministry of Education of P.R. China, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. Key Scientific Research Base for Ancient Wall Paintings Conservation, State Administration of Cultural Heritage of China, Dunhuang 736200, Gansu, China)

**Abstract** Bamboo-steel cable (BSC) composite anchor is a new type of anchoring rod used to stabilize soil cliff in an ancient site. Its inner binding agent consists of fly ash and asbestos and epoxy. The inner binding agent is a new type of fiber reinforced composite material, its physical and mechanical indicators such as shortest curing time, compressive strength, modulus of elasticity and tensile strength are obtained by elastic wave velocity test, unconfined compression test and Brazilian test. The results show that the inner binding agent has a higher strength and a lower density and is in favor of effective transfer of internal stress for BSC composite anchor according to proportioning design of ancient city silty soil cliff consolidation work in Xinjiang Jiaohe.

**Key words** BSC composite anchor; inner binding agent; composite material; specific strength; specific modulus

## 0 引言

楠竹加筋复合锚杆是一种用于土体加固的粘结型锚定结构, 由敦煌研究院根据古代土遗址保护加固工程特殊需要发明的专利产品<sup>[1]</sup>。新疆交河故城粉土崖体加固的典型锚杆横断面如图 1 所示<sup>[2]</sup>。楠竹加筋复合锚杆从结构上分为 3 个部分: 杆材(钢绞线)、内粘结剂(粉煤灰/石棉/环氧树脂复合材

料)、管材(楠竹)。杆材起着承受载荷的主要作用, 内粘结剂起着粘结、支持、保护钢绞线和传递界面应力的作用, 管材在整个锚固体系中起到了加筋作用, 玻璃纤维起到增大复合锚杆与水泥砂浆摩阻系数的作用。

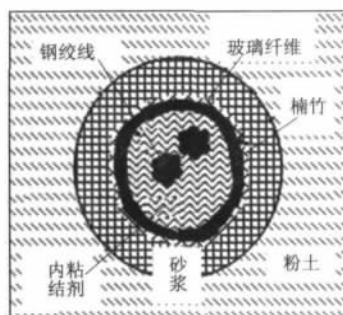


图 1 楠竹加筋复合锚杆典型横断面

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2006BAK30B02)

收稿日期: 2008-09-05

作者简介: 张虎元, 男, 1963 年生, 甘肃庆阳人, 博士, 教授, 主要从事环境岩土工程领域的研究工作, 包括文物保护、废弃物处置、污染场地评价等。

内粘结剂是一种粉煤灰/石棉/环氧树脂复合材料,其中石棉起到增强环氧树脂刚度和强度的作用;粉煤灰作为内粘结剂充填料,可以避免固化过程中的体积收缩。近年来,各种纤维/环氧树脂复合材料以其优异的力学性能,如高比强度、高比模量,以及抗疲劳性、抗腐蚀性等<sup>[3]</sup>,在许多工程领域得到了广泛应用。从理论上讲,影响纤维/环氧树脂复合材料性能的主要因素是纤维和基体的物理性能以及两者间的粘结强度。关于纤维加筋复合材料中纤维的增强机理,文献[4-6]提出了“混合定律”用来推测复合材料的等效模量;文献[7]分析了复合材料中纤维的长度、排列方式的影响;文献[8]对排列成行的长短纤维的全应力-应变曲线、裂缝间距及裂缝宽度进行了简化计算;文献[9]从理论上预测了纤维混凝土单向拉伸抗裂应力的方法。

本文通过弹性纵波波速测试、无侧限压缩试验、巴西劈裂试验等测试了内粘结剂的最短养护时间、抗压强度、弹性模量、抗拉强度等力学指标,分析了内粘结剂的抗压、抗拉破坏特征及其主要影响因素,为楠竹加筋复合锚杆力学模型的建立奠定基础。

## 1 试验

### 1.1 试样制备

内粘结剂的主要组成成分有粉煤灰、环氧树脂、石棉,其主要组成成分的基本物理指标见表1。

表1 内粘结剂的主要组成及其基本物理指标

原材料	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	弹性模量 (GPa)	抗拉强度 (MPa)	抗压强度 (MPa)	伸长率 (%)	体积分数
粉煤灰	2.2~2.5	—	—	—	—	14
石棉纤维	2.6	164	500~1800	—	2.5	10
环氧树脂	1.1~1.3	3~4	60~95	90~110	2.0~3.0	50

(1)粉煤灰的主要化学组成为 SiO<sub>2</sub> 52.23% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 12.38%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 25.27% CaO 4.45% MgO 3.58% SO<sub>3</sub> 0.22%。粉煤灰的颗粒组成为 0.1~0.3 mm 13% 0.05~0.1 mm 31% 0.005~0.05 mm 56%。粉煤灰的界限含水量为 液限 W<sub>L</sub> 为 37.02% 塑限 W<sub>p</sub> 为 33.03% 塑性指数 I<sub>p</sub> 为 3.99。

(2)环氧树脂:从具有良好的材性角度出发,同时兼顾满足购料与施工方便等需要。楠竹复合锚杆内粘结剂中选用无锡石油化工总厂生产的 WSR 6101 型环氧树脂,无机氯值不大于 1×10<sup>-3</sup> eq/100 g,有机氯值不大于 2×10<sup>-2</sup> eq/100 g,挥发物含量不大于 1% 软化点 12~20℃ 环氧值为 0.41~0.47。

(3)石棉:选用青海茫崖石棉矿生产的石棉粉,化学成分主要为 Mg<sub>3</sub>[Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>][OH]<sub>2</sub>,含有氧化镁、铝、钾、铁、硅等成分,白色粉末集合体,粒径不大于 1 μm,粉粒中夹杂 30% 的絮状

纤维(直径 0.02~1.00 μm,纤维长度不大于 40 mm),硬度 2.5~3.0。

试样在新疆吐鲁番交河故城施工现场制作,内粘结剂配比为:m(粉煤灰):m(石棉):m(环氧树脂)=2:2:1。制作过程为:(1)将粉煤灰和石棉粉搅拌均匀;(2)称取环氧树脂,加入环氧树脂质量 14% 的固化剂(乙二胺 T-31)搅拌 30 min,然后用 1.20~1.35 倍环氧树脂质量的酒精进行稀释,直到环氧树脂完全溶解;(3)把搅拌均匀的粉煤灰和石棉粉复合料缓缓加入到稀释好的环氧树脂中,同时进行搅拌直至均匀;(4)将浆体状混合物注入 7 cm×7 cm×7 cm 的立方体钢模中,充分振动成型。试件成型 24 h 后脱模编号,在实验室内自然养护至预定龄期。养护环境 温度 20~28℃,湿度 14%~16%。

### 1.2 试验方法

试验的主要内容是测试内粘结剂的抗压强度、弹性模量和抗拉强度,并通过试验数据来分析内粘结剂力学性能的影响因素。测出试样自然状态尺寸、质量,然后将试件在 40℃ 下烘干至恒重后测其质量、尺寸。采用智能声波检测仪,测试其弹性纵波波速值。采用液压万能试验机,参照 GBJ 81—85《普通混凝土力学性能试验方法》,测试其无侧限抗压强度。采用液压万能试验机,参照混凝土劈裂试验方法,测试其抗拉强度。压缩试验过程中,利用试样两侧对称粘贴的 2 个应变片,外接静态电阻应变仪,采用全桥电路测试内粘结剂的弹性模量。参照 SL 237—1999《土工试验规程》,压缩试验与劈裂试验中试验机以 1 mm/min 的速率连续均匀加载,直至试件破坏。

## 2 试验结果分析

### 2.1 波速特征

图2为不同龄期试样纵波波速-龄期关系图。纵波波速可以反映出试样的固化程度和强度特征,例如,文献[10]研究表明,岩土体的波速和强度表现为正相关关系。文献[11]中 PS-F 复合材料的强度随着龄期的增加表现出先增加后稳定的趋势。文献[12]中环氧树脂-粉煤灰屈服强度随着养护时间的延长表现出先增大后稳定的趋势。

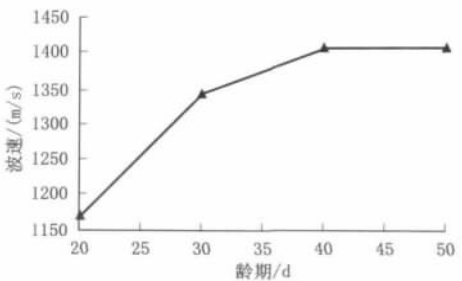


图2 内粘结剂波速-龄期变化曲线

从图2可以看出,在龄期从20~40 d 试样波速逐渐增大;40 d 后试样波速基本无变化,说明内粘结剂已基本完全固化,弹性状态和强度特性也趋于稳定。说明内粘结剂的最短养护期为40 d。

参考文献[12] 环氧树脂-粉煤灰的最佳养护时间为6~10 d。通过比较可以看出,内粘结剂中添加了石棉纤维使得内粘结剂的养护时间增加。

## 2.2 无侧限压缩试验应力-应变曲线

取养护40 d 后的试样进行无侧限压缩试验,典型应力-应变曲线如图3所示。

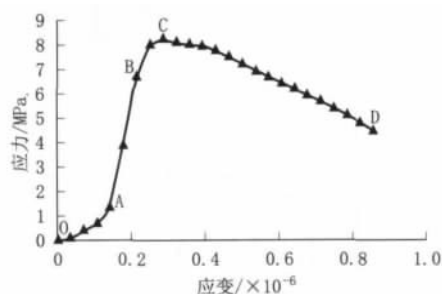


图3 内粘结剂无侧限压缩典型应力-应变曲线

从图3可以看出,内粘结剂压缩破坏过程分为OA、AB、

BC、CD 4个阶段:

(1)OA 段为压实阶段,在外荷载作用下,内粘结剂中原有张开微结构界面或微裂隙逐渐闭合,内粘结剂试样被压实,形成早期的非线性变形。

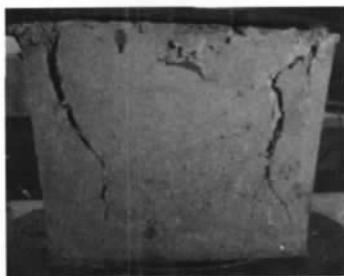
(2)AB 段为弹性变形至微破裂稳定发展阶段,弹性变形阶段应力-应变表现为线性关系,微破坏稳定发展阶段主要表现为塑性变形,试样内部开始出现微破裂。

(3)BC 段为非稳定发展阶段,微破裂的发展出现了质的变化,在内粘结剂中,粉煤灰、石棉纤维、环氧树脂三者界面的力学强度不同,同一组分的抗压强度在空间上的分布不均匀所造成的局部应力集中效应显著,破坏首先从试样内部的薄弱部位开始,应力重新分配后,其结果又引起次薄弱部位的破坏,依次进行下去直到试样破坏,这个阶段内粘结剂宏观表现为试样表面出现裂缝,破坏形态如图4(a)所示。

(4)内粘结剂承载力达到峰值后,其内部结构完全破坏,但试样依然基本保持整体状,破坏特征如图4(b)所示。CD 段为峰值后阶段,裂隙快速发展,交叉且相互联合,形成宏观断裂面,试样承载力随变形增大迅速下降,但并不降到0,说明破裂的试样仍有一定的承载力,试样破坏形态如图4(c)所示。



(a) 非稳定发展阶段



(b) 达到峰值时



(c) 最终破坏形态

图4 内粘结剂无侧限压缩破坏形态

曲线在超过峰值强度后呈下降趋势,表现出明显的应变软化现象。从固体力学理论分析,主要与内粘结剂的非均匀性和变形局部化相关。内粘结剂在受载变形过程中,经历一定量的均匀变形后,突然产生高度局部化剪切带,剪切带内变形较剪切带以外材料变形大得多,导致变形不连续性。这一现象与混凝土相似<sup>[13]</sup>。

## 2.3 巴西劈裂试验荷载-横向位移曲线

内粘结剂易脆断,传统的拉伸试验较难实现。参考文献[14] 取养护40 d 后的立方体试样进行劈裂试验,荷载-横向位移曲线如图5所示。内粘结剂的最终劈裂破坏形态如图6所示。

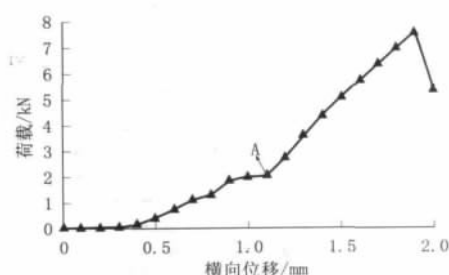


图5 内粘结剂典型劈裂荷载-横向位移曲线

从图5可以看出,A 点前阶段荷载由内粘结剂中的基体材料(环氧树脂)和石棉纤维共同承担,荷载通过石棉纤维与



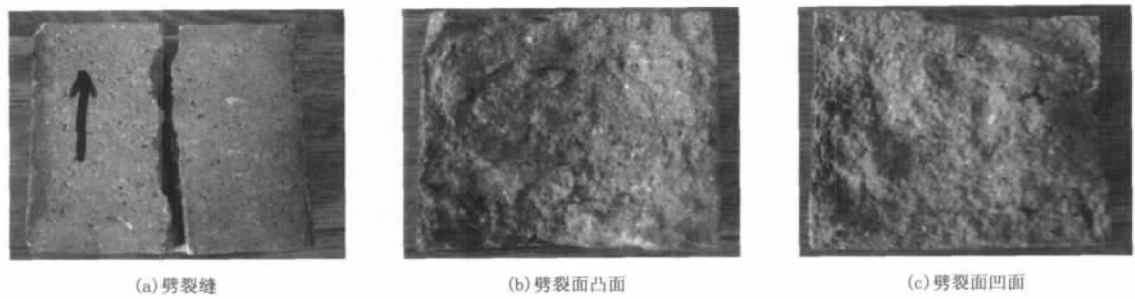


图6 内粘结剂劈裂破坏形态

基体间的界面应力传递给石棉纤维。A 点后阶段,荷载由石棉纤维单独承担。在基体开裂后,内粘结剂承受的载荷比开裂前要大。通过文献[15]可知,这种曲线形态说明石棉纤维的抗拉性能赋予内粘结剂更大的表现延展性,增强了内粘结剂与楠竹、钢绞线 2 个界面的协调性。从表 1 中数据可以看出,石棉纤维的抗拉强度为环氧树脂的 5~30 倍,可见石棉纤维的掺量及其抗拉强度是影响内粘结剂抗拉强度的主要因素。

2.4 内粘结剂的强度特征

2.4.1 无侧限压缩试验及劈裂试验

无侧限压缩试验及劈裂试验得出内粘结剂的主要力学指标见表 2 和表 3。

表 2 内粘结剂无侧限压缩试验结果

试样编号	相对密度	抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	抗压比强度/MPa <sup>①</sup>	抗压比模量/GPa <sup>②</sup>
A1	1.42	8.0	2.4	5.6	1.7
A2	1.34	8.2	1.4	6.1	1.0
A3	1.29	8.2	1.3	6.4	1.0
B1	1.31	8.1	1.2	6.2	0.9
B2	1.36	7.8	2.2	5.7	1.6
B3	1.41	11.0	2.1	7.8	1.5

注 ①抗压比强度为抗压强度与相对密度的比值;②抗压比模量为弹性模量与相对密度的比值。A 试样与 B 试样的配比、制取条件相同,A 试样的养护龄期为 40 d,B 试样的养护龄期为 50 d。

表 4 内粘结剂与混凝土力学性能的比较

材 料	相对密度	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	抗压比强度/MPa	抗拉比强度/MPa	比模量/GPa	参考文献
内粘结剂	1.35	1.90	8.55	1.3~2.4	6.3	1.41	0.9~1.7	—
混凝土(C20)	2.50	1.54	13.4	25.5	5.4	0.62	10.2	[15]

了复合材料轻质高强的力学性能。混凝土(C20)的弹性模量大于楠竹弹性模量(1.42~2.75 GPa),说明二者之间的协调性较差,不利于层间剪切应力传递。

2.5 粉煤灰掺量对内粘结剂力学性能的影响

在环氧树脂与石棉纤维掺量不变的情况下,粉煤灰掺量对内粘结剂轴心抗压强度和弹性模量的影响见图 7、图 8。

表 3 内粘结剂劈裂试验结果

试样编号	相对密度	荷载 /kN	抗拉强度 /MPa	抗拉比强度/MPa	断裂 伸长率/%
F1	1.41	11.94	2.35	1.67	2.9
F2	1.21	6.98	1.37	1.13	2.1
F3	1.32	9.96	1.98	1.50	2.8

注 F 试样与 B 试样的配比、养护条件及固化时间相同。

由表 2、表 3 可以计算出,内粘结剂的平均相对密度为 1.35,平均抗压强度为 8.55 MPa,压缩弹性模量为 1.3~2.4 GPa,平均抗拉强度为 1.90 MPa,断裂伸长率为 2.1%~2.9%。参照表 1 中的数据,内粘结剂断裂时伸长率与石棉纤维伸长率(2.5%)较为接近,说明石棉纤维的掺入,可显著地提高内粘结剂的变形能力和韧性,从而提高了内粘结剂基体材料的抗裂性和抗冲击能力。由文献[16]可知,复合材料的抗压强度与基体材料抗压强度相近,由于内粘结剂中充填了粉煤灰和石棉纤维,其抗压强度低于环氧树脂(参见表 1)。内粘结剂的弹性模量与楠竹的弹性模量(1.42~2.75 GPa)接近,说明内粘结剂与楠竹的变形协调性好,有利于楠竹加筋复合锚杆层间应力传递。

2.4.2 与混凝土力学性能的比较(见表 4)

由表 4 可以看出,内粘结剂的抗拉比强度为混凝土(C20)的 2.4 倍,抗压比强度为混凝土(C20)的 1.2 倍,表现出

由图 7 和图 8 可以看出,粉煤灰掺量为 40%时,内粘结剂的抗压强度最大,内粘结剂的弹性模量与楠竹的弹性模量最接近,二者能够表现出较好的变形协调性,但是与钢绞线的弹性模量表现出较大的差异。这也导致楠竹复合锚杆在拉拔过程中,钢绞线与内粘结剂界面最先破坏。还需要大量的试验来得出粉煤灰的最优化掺量。由文献[7]可得石棉纤维在内粘

结剂中的含量存在一个临界纤维体积。

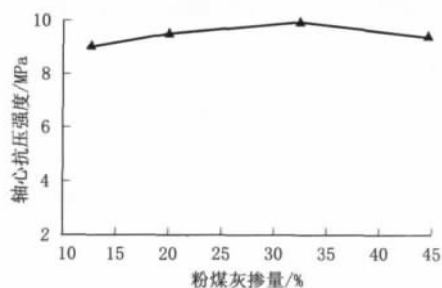


图7 粉煤灰掺量对内粘结剂轴心抗压强度的影响

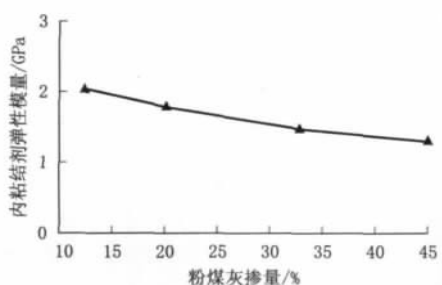


图8 粉煤灰掺量对内粘结剂弹性模量的影响

### 3 结 语

(1)无侧限压缩应力-应变曲线表明,内粘结剂破坏分为4个主要阶段:压实阶段、线弹性变形至微破裂稳定发展阶段、非稳定发展阶段、峰值后的阶段。劈裂试验荷载-横向位移曲线表明,内粘结剂拉伸破坏分3个阶段:基体和石棉纤维共同承担荷载、基体开裂临界状态、石棉纤维单独承担荷载阶段。

(2)内粘结剂具有较高的比强度、比模量,表现出轻质、高强度的力学性能。

(3)内粘结剂采用酒精为溶剂稀释环氧树脂可以有效地保护钢绞线不被锈蚀;内粘结剂的弹性模量与楠竹相近,2种材料的变协调性好,有利于应力传递。内粘结剂与钢绞线、楠竹的粘结力学性能分析将在今后的试验中进一步研究。

(4)粉煤灰、石棉纤维的含量对内粘结剂的力学性能有很大的影响,还需通过大量的试验对材料的配比进行优化设计。

### 参考文献:

- [1] 李最雄,王旭东.南竹加筋复合锚杆:中国 ZL200520107950.0[P]. 2006-07-05.
- [2] 张艳军,张虎元,吕肇峰,等.楠竹加筋复合锚杆应力传递理论模型[J].水文地质与工程地质,2008(5):37-40.
- [3] 沈观林.复合材料力学[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [4] Kelly A. Strong solids[M].Oxford:Clarendon Press,1973.
- [5] Holiday L.Composite materials[M].Amsterdam:Elsevier,1966.
- [6] Holister G S,Thomas C.Fibre-reinforced materials[M].Amsterdam:Elsevier,1966.
- [7] Laws V.The efficiency of fibrous reinforcement of brittle matrices [J].Journal Physics D:Applied Physics,1971,2:1737-1746.
- [8] Aveston J,Cooper G A,Kelly A.The properties of fibre composites[J].Conference Proceedings of N. P. L. Conference,IPC Science and Technology Press Ltd.,1971:15-24.
- [9] Romualdi J P,Batson G B.Mechanics of crack arrest in concrete[J].Proceedings ASCE,1963,89(3):147-168.
- [10] 李静坡.岩土体弹性波速测试及岩土体波速与物理的相关性研究[D].北京:中国地质大学,2005.
- [11] 李最雄,张虎元,王旭东.PS-F灌浆材料的进一步研究[J].敦煌研究,1996(1):125-139.
- [12] 殷惠光,赵启林,金广谦,等.环氧树脂粉煤灰的物理力学性能试验研究[J].徐州工程学院学报,2005,20(1):38-42.
- [13] 程文灏,康谷贻.混凝土结构[M].北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [14] 张楚汉.论岩石、混凝土离散-接触-断裂分析[J].岩石力学与工程学报,2008,27(2):217-235.
- [15] 刘勇军,朱岳明,曹为民,等.长方体劈裂试验的可行性研究[J].河海大学学报,2001,29(5):100-102.
- [16] Hannant D J.Additional data on fibre corrosion in cracked beams and theoretical treatment of effect of fibre corrosion on beam load capacity[J].Fibre-reinforced Cement and Concrete RILEM Symposium,1975,2:177-178.



### 镇江利用太阳能热水喷雾养护混凝土砌块

不久前,2007年江苏省经贸委下达的“利用太阳能热水喷雾养护改造蒸汽养护混凝土砌块”科研项目通过了江苏省墙改办和镇江市墙改办组织的课题验收。该新工艺利用太阳能将自来水加热变成热水,再以耐热泵加压经特殊喷嘴将热水在窑中雾化,提供合适的温度和湿度,同时充分利用水泥水化热对混凝土砌块进行养护,整个养护过程节约能源、无污染。试验数据表明,喷雾养护的混凝土砌块28d强度比蒸汽养护高5%~10%,与燃煤蒸汽锅炉养护相比成本可降低2/3。

(杨转)