

# 钢管拱桥拱肋脱空负压灌浆修复技术研究与应用

彭富强<sup>1</sup> 袁航<sup>1</sup> 彭文轩<sup>2</sup> 龙跃<sup>3</sup> 李东平<sup>3</sup>

(1 湖南交通职业技术学院岩土工程材料研究所 长沙 410004)

(2 中南大学土木建筑学院 长沙 410083 3 柳州欧维姆机械有限公司 柳州 545005)

**摘要:**钢管拱桥是一种常见的公路桥梁型式,但拱肋混凝土脱空是此类桥梁常见的病害。本文针对此问题,以高强度、低粘度、高渗透、耐低温、高柔性灌浆材料在模拟试验研究中所表现出的优异性能为例证,说明本材料在钢管拱桥拱肋脱空病害处治中所具有的优势。本试验的研究成果对拱肋混凝土脱空病害的处理有实际的应用意义。

**关键词:**钢管混凝土拱桥 拱肋脱空 低粘度、高渗透、耐低温弹性环氧 试验研究

## 前言

随着公路建设的发展,公路桥梁不再局限于传统的简支梁桥、连续梁桥,很多新型结构桥梁陆续出现。钢管混凝土拱桥作为我国近年来桥梁建筑发展的新技术,具有自重轻、强度大、抗变形能力强、承载能力大的优点,并且节省材料、安装自量轻、施工简便、工期短、养护工作量小,是大跨度拱桥的一种比较理想的结构形式。但钢管混凝土拱桥在施工中往往因技术管理不善和施工疏忽,加之变形较大,从而使混凝土材料内部存在空洞、疏松、变形裂缝,以及混凝土与钢管胶结不良等缺陷,对拱桥的整体性和力学性能产生不同程度的影响。因此,探索拱肋混凝土脱空的处治材料及方法,延长钢管混凝土拱桥的使用寿命,保证桥梁运行安全是非常必要、紧迫的。

## 1 试验材料

(1) 高塑性混凝土:为了模拟钢管内混凝土与管壁的剥离,高收缩性能的混凝土配合比如表1。

表1 每m<sup>3</sup>塑性混凝土配合比表

水胶比	砂率	用水量 (kg)	胶材用量	
			水泥 (kg)	膨润土 (kg)
1.20	80%	300	180	70

注:每组试块实际用料为:W=127kg, C=76kg, 膨润土=30kg。

(2) 钢管套:  $L \times D \times t = 150\text{cm} \times 60\text{cm} \times 3\text{cm}$ , 对于拱肋只能采取分段进行灌浆加固,拟定灌浆段长为150cm,按照1:1进行模拟设计试验方案。

(3) 灌浆材料:环保型低粘度、高渗透、

耐低温弹性环氧灌浆材料。

目前,国内常有的环氧灌浆材料大多为高强灌浆材料,此体系的浆材主要用作裂缝和基岩补强加固。而钢管混凝土拱肋变形大,混凝土与管容易产生收缩剥离,受外力的影响,内部混凝土易产生细微(小于0.5mm)的变形缝或活动缝,因此需要引进一种高强度、高柔性、低模量的灌浆材料。为了解决这一难题,我们以糠醛-丙酮稀释体系为基础,引入液体聚硫橡胶体系。丙酮、糠醛本身黏度很低且能很好地溶解环氧树脂,形成均匀的溶液体系,在环氧树脂碱性固化剂的作用下,丙酮、糠醛能发生反应生成呋喃树脂,呈互穿网络结构,能与岩石和混凝土粘接牢固,且渗透性强,能灌注0.01mm以上的裂缝,并具有低温下固化,气味小,毒性低,耐水、耐酸碱、耐盐腐蚀和耐老化等性能,但浆液不能在潮湿与水下环境中固化。为了使糠醛-丙酮混合体系环氧浆液既能保持原有特性,又能应用于潮湿与水下环境,采用一种亲水性固化剂及亲水性表面活性剂后,满足了潮湿与水下环境的裂缝修补加固。

糠醛-丙酮混合稀释剂的环氧灌浆材料组成配合比如表2。

固化机理:环氧树脂浆液的固化过程属于缩合、交联反应<sup>[1]-[2]</sup>。在糠醛-丙酮混合稀释体系的环氧树脂浆液加入亲水性促进剂可提高早期强度,以聚酰胺650作固化剂不仅增加了固化物的韧性,同时还改变了浆液的亲水性,显著地提高

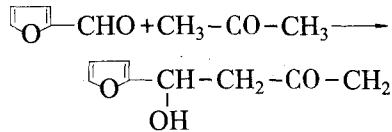
表2 糠醛-丙酮混合稀释体系的环氧灌浆材料组成

组成	环氧树脂	糠醛	丙酮	促进剂	固化剂	表面活性剂(带氨基)
配合比	100	30~60	30~60	2~15	25~45	0.5~1

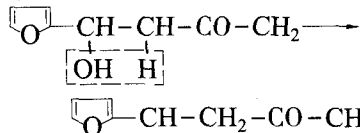
了在有水和潮湿条件下的粘接强度。

糠醛与丙酮在碱性介质中发生缩合反应。

第一步为加成反应:



第二步为脱水反应:



引入液体聚硫橡胶体系后,在不影响上述环氧交联结构所具有性能的基础上更引入了柔性较好的链段,降低环氧树脂本体模量,增大韧性,冲击强度由0.45J/cm<sup>2</sup>提高到0.9J/cm<sup>2</sup>。液体聚硫橡胶(HS-R-SH)末端的硫醇基(-SH)可与环氧基发生反应,但室温下固化反应进行很慢,需加入促进剂,与叔胺配合作为室温固化剂。固化物具有优异的耐水性、耐油性、抗低温性(-90℃不脆裂)和良好的耐冲击性和密实性。

高强度、低粘度、高渗透、耐低温、高柔性灌浆材料配比见表3。

表3 高强度、低粘度、高渗透、耐低温、高柔性灌浆材料组成

组成	环氧树脂	糠醛	丙酮	促进剂	液体聚硫橡胶	亲水固化剂	有机硅偶联剂
配合比	100	30~60	30~60	2~15	12~22	12~22	0.5~1

表4 高强度低粘度高渗透耐低温高柔性灌浆材料性能指标

项目	指标	
密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.05 ± 0.05	
粘度(25℃, mPa·s)	≤10	
凝胶时间(hr)	3~24	
抗压强度(MPa)	30~70	
抗折强度(MPa)	7~12	
抗剪强度(MPa)	≥15	
灌注0.15mm劈拉强度MPa(龄期3个月)	干燥	5
	潮湿	4.5
	有水	3.5
耐低温性	-60℃不脆化	
抗冲击强度(KJ/m)	0.152	
弹性率E(25℃)/10 <sup>3</sup> MPa	2.79	
润湿性(θ)	39°	
表面张力(mN/m)	32	
延长率(%)	≥8	
收缩率(%)	≤1	
抗腐蚀性(盐雾化)	90天无锈蚀	

为确保钢管与混凝土结构体形成整体,灌注胶须有良好的可灌性,能够均匀密实地填充于钢管与混凝土构件之间,因而灌注胶的粘度应小于10MPa·s,且无论产品本身或施工时都不得掺加任何溶剂,故采用此优质无溶剂型、低粘度高强度高渗透、耐低温、高柔性环氧树脂类灌注胶,

为确保钢管与混凝土以及其中的胶体三者能够共同工作和一起受力,胶体本身不会被拉断,钢板与混凝土之间的胶层也不致被拉脱,灌注胶的抗弯强度必须大于65MPa,钢-钢粘结抗拉强度必须大于15MPa,钢-钢拉伸剪切强度标准值必须大于16MPa。

为了保证注浆体能够渗入钢管内混凝土内部裂缝,灌注胶的粘度应小于10MPa·s,在0.2MPa的压力下能注入宽度为0.015mm的裂缝。

为了确保加固结构的使用寿命在30年以上,灌注胶必须进行90d耐湿热老化试验检测,经过90天湿热老化后其钢-钢拉伸抗剪强度降底的百分率不应大于1%。

高强度低粘度高渗透耐低温高柔性灌浆材料性能指标如表4。

## 2 负压灌浆的主要设备

灌浆设备包括搅拌机、储浆罐、灌浆泵、灌浆嘴、压力表及配件、控制阀、输浆管、真空泵、真空泵控制阀、真空表、抽真空管道。灌浆泵、压力表和灌浆回路的容许工作压力应大于最大灌浆压力的1.5倍，输浆管应选用高强橡胶管，抗压能力大于2MPa。图1~3为部分设备。



图1 注浆机

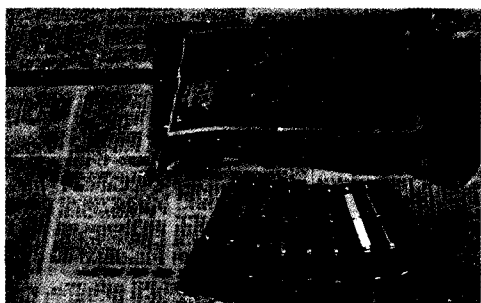


图2 灌浆嘴配件



图3 灌浆泵

## 3 试验方案

### 3.1 方案可靠性分析

在压浆之前，首先采用真空泵抽吸预应力孔道中的空气，使孔道内的真空度达到80%以上，使之产生-0.1至-0.8MPa的负压，然后用灌浆泵将优化后的浆液从孔道的另一端灌入，并加以0.5MPa~1.5MPa的正压力。由于孔道内只有极少的空气，很难形成气泡；同时，由于孔道与压浆

机之间的正负压力差，大大提高了孔道压浆的饱满度和密实度，从而保证了浆体充盈孔道的密实性和提高硬化浆体的强度。

### 3.2 方案实施步骤

(1) 制作如图4的混凝土试块3组，养护28天，灌浆前做压水试验，检查其最透水率情况，灌浆后再做压水试验与灌浆前做分析比较，并剖开检查其缝面胶结紧密情况。



图4 灌浆试件

(2) 钢管壁开孔，距钢管两端25cm处各开4个孔径 $\phi = 10\text{mm}$ 的圆孔作为灌浆孔与出浆孔，交错布置，以便于浆材能充分充填混凝土内部的微小裂隙（如图5），两端附以螺纹拧盖以防止灌浆时浆材外漏影响灌浆质量。

(3) 清理空洞区域。将高压气吹洗裂隙空洞，将其中可能存在的小粉尘杂物从另一端出浆孔冲出，使空洞裂隙畅通、干净；

(4) 制作灌浆浆材。按配合比搅拌均匀，低粘度耐低温环氧灌浆材料能修复缝宽0.015m以上的裂缝。

(5) 真空机抽真空（如图6）。

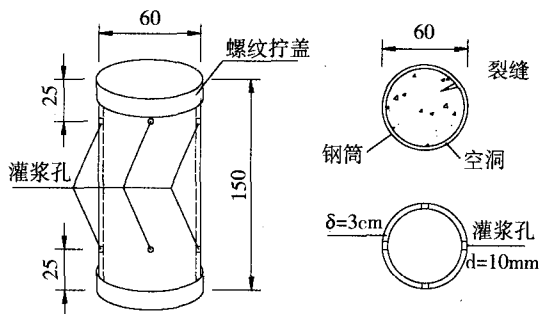


图5 钢管装置大样图（单位：cm）

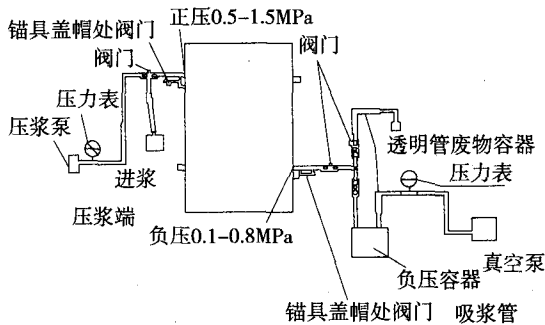


图6 拱肋混凝土病害补强模拟方案装置

进行负压灌浆。其具体步骤如下：

1) 在压浆口及出浆口处接上密封阀门，将真空泵连接在出浆端上，压浆泵连接在压浆端上，以串联的方式将负压容器、三相阀门和锚具盖连接起来，其中锚具盖帽和阀门之间用透明喉管连接。

2) 在压浆前启动真空泵10min，以产生真空负压，压力指标应达到负压力0.1MPa~0.3MPa，如果没有满足此数据则表示装置未能完全密封，需在继续压浆前检查及更正。

3) 在保持真空泵运转的同时，开始往压浆端的压浆口压浆，对储浆桶内的浆材要低速搅拌，以保持灰浆均匀，浆材调制至压入管道相隔时间不得大于10min，压浆泵压力宜保持0.8MPa~1.2MPa，并适当稳压一段时间（一般30s），以保证浆材能充分充填空洞区域与细小裂隙。

4) 压浆时压浆泵内不能出现空缺现象，在压浆泵工作暂停时，输浆嘴不能与压浆口脱开，以免空气进入孔内影响压浆质量。出浆孔流出浓浆后关闭阀门，压浆泵持压30s后，再关闭进浆口阀门。

5) 操作阀门以隔离真空泵及灌浆浆材，将浆材导向废浆桶的方向，继续压浆直至所溢出的浆材形成流畅及一致性，没有不规则的摆动。

6) 关闭真空泵，关闭设在压浆泵出浆处的阀门，关闭压浆泵。

7) 设备清洗。在每一次灌浆结束后，应及时清洗搅拌机、灌浆泵、浆桶等。

## 4 试验检验

### 4.1 简易压水试验

简易压水试验压力为灌浆压力的80%，约0.4MPa~0.8MPa，最大可达到1.2MPa，试验20min，每5min测读一次流量，取最后的流量值作为计算值，结果以透水率 $q$ 表示。

$$q = \frac{Q}{PL}$$

式中： $q$ 为试段透水率，Lu； $L$ 为试段长度，m； $Q$ 为试验最后的流量值，L/min； $P$ 为试验压力，MPa。

求得3组试块灌浆前后的透水率分别为 $q_{前}^i$ 、 $q_{后}^i$ （ $i=1,2,3$ ），并求得其平均值作为试验对比分析结果以评定灌浆效果的优良。简易压水试验数据见表5。

### 4.2 灌浆后剖开制作试件

检查剖面的灌浆效果，检查浆液能否充填密实90%以上缝面，并检查其缝面胶结紧密情况，如图7、图8。

## 5 结论

(1) 根据试验结果分析，采用新型的低粘度、高强度、高渗透、耐低温、高柔性环氧树脂类灌注胶能有效的充填钢管中由于混凝土收缩、徐变、温度变化等因素导致钢管内混凝土出现的裂缝，以及混凝土与钢管的粘接剥离而形成的空洞区域，通过简易压水试验可以看出，通过处理后的钢管中的混凝土更加密实（如图7），处理效果显著。

(2) 通过试件的剖面可以看出，低粘度、

表5 简易压水试验数据记录表

试件	灌浆前			灌浆后		
	流量 $Q$ (L/min)	压力 (MPa)	透水率 $q$ (L)	流量 $Q$ (L/min)	压力 (MPa)	透水率 $q$ (L)
A组	18	0.8	15	0.2	0.8	0.16
B组	26	1.2	14.4	0.3	1.2	0.16
C组	17	0.6	18.8	0.15	0.6	0.16
平均值	20.33	0.87	16.07	0.22	0.87	0.16

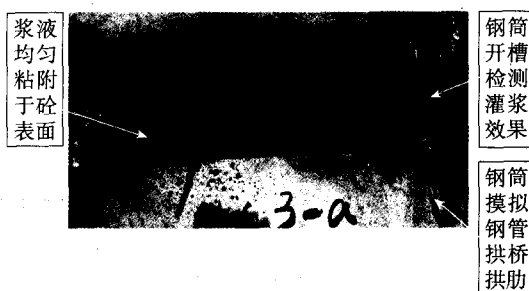


图7 浆液充填密实效果图

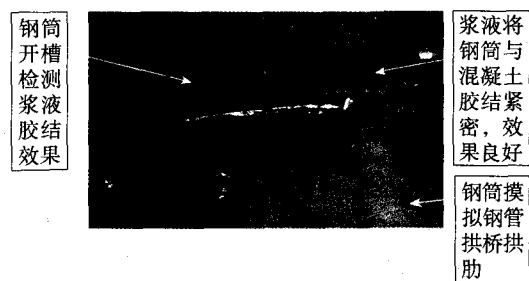


图8 浆液胶结效果图

高强度、高渗透、耐低温、高柔性环氧树脂类灌注胶能很好的使钢管与混凝土粘结在一起(如图8),使钢管与混凝土共同作用,极大地改善了拱肋受力特性,延长桥梁的使用寿命。

(上接第11页)

### 5.3 体外索的引用

梁桥悬臂施工合拢后,继续施工桥面系 $g_2$ (二期恒载),在进入运营阶段后承受均布活载 $g_p$ 。这两项统称为连续结构图式的后期均布恒载 $\Sigma g$ 。后期均布恒载也会产生不小的跨中挠度 $f_p$ ,这一挠度是大跨梁桥长期下挠的一个重要组成部分。而传统的“预抬高”和“悬臂施工零弯矩法”都只适用于合拢前的跨中标高问题,但这两种手段都不能阻止梁后期挠度的发生。近年来不少桥梁为了控制后期挠度 $f_p$ 的增长,在箱梁内都设置了体外索。体外索的配设原则是使其所产生的弯矩 $M_R$ 应与后期均布荷载 $\Sigma p$ 所产生的 $M_p$ 相平衡,而不仅仅是前期预应力的一种补充。通过合理配设体外索,解决后期均布荷载产生长期下挠,避免梁桥下挠的产生。

由于目前对大跨度预应力混凝土梁桥长期挠度的原因仍然存在大量不明确的地方,特别是缺乏强健的长期挠度预测计算方法的支持,防治的效果往往不佳,控制量度的准确性也难以把握。

(3) 本文通过相似模型试验分析,针对钢管混凝土拱桥拱肋核心混凝土的脱空状况,采用新型的低粘度、高强度、高渗透、耐低温、高柔性环氧树脂类灌注胶能有效地解决拱肋混凝土脱空的桥梁病害问题,为今后的钢管混凝土拱桥加固提供一定的参考价值。

### 参考文献

- [1] 秦荣, 谢肖礼等. 钢管混凝土拱桥钢管开裂事故分析[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3):74-77
- [2] 蒋燕兮. 低粘度高强度改性环氧树脂化学灌浆材料的研究[J]. 粘合剂, 1990,2:20-22
- [3] 蒋燕兮, 邓天宁. 低粘度高强度有弹性环氧树脂化学灌浆材料的应用[J]. 中国胶粘剂, 1992, 1(3):50-53
- [4] 裴洋, 张大琦. 钢管混凝土拱桥中钢管与混凝土相互作用问题[J]. 山西建筑, 2009, 35(3):318-319
- [5] 赵伟, 朱红. 复配型环氧树脂地层灌浆材料的研制[J]. 2003, 32(4):433-439
- [6] 刘福生, 张彬. 浅谈钢管混凝土拱桥及质量检测的研究现状[J]. 黑龙江交通科技,2008,(12):105-107
- [7] 王亚超, 张晋, 隋晓. 中承式钢管混凝土系杆拱桥拱肋灌浆方案研究[J]. 山西建筑,2008, 34(32):13-14
- [8] 杨敏. 钢管混凝土系杆拱桥的常见病害及处治方法[J]. 城市道桥与防洪. 2008, (7):137-138
- [9] 杨世聪, 王福敏等. 核心混凝土脱空对钢管混凝土构件力学性能的影响[J]. 重庆交通大学学报, 2008, 27(3):360-486

### 6 结束语

通过大量理论和技术研究,混凝土主梁容易开裂、下挠的技术难点将被攻克,更多的科技创新和技术措施将引导大跨径梁桥又好又快地发展。可以预见预应力混凝土梁桥的跨径有进一步增大趋势,上部结构将不断轻型化、高强度。成熟的工艺、工法以及造价优势将使预应力混凝土梁桥在桥梁家族中继续占领优势,大跨径预应力混凝土梁桥将是我国未来桥梁建设的主力军之一。

### 参考文献

- [1] 大跨径预应力混凝土梁桥设计施工技术指南.
- [2] 徐栋. 桥梁体外预应力设计技术[M]. 人民交通出版社, 2008
- [3] 刘桂生, 刘慧敏. 大跨径箱梁桥裂缝成因分析及控制措施[J]. 公路, 2006
- [4] 朱汉华等. 预应力混凝土连续箱梁桥裂缝分布与防治[M]. 人民交通出版社, 2006
- [5] 谢峻等. 大跨径预应力混凝土箱梁桥长期下挠问题的研究现状[J]. 公路交通科技, 2006
- [6] 王国亮等. 在用大跨度预应力混凝土箱梁桥裂缝调查研究[J]. 公路交通科技, 2008. 8
- [7] 柳磊. 大跨径预应力混凝土箱梁桥开裂与下挠成因分析[D]. 同济大学硕士论文, 2009