

# 新型流固耦合相似模拟材料的抗水性实验研究

连会青<sup>1,2</sup>, 夏向学<sup>1</sup>, 冉伟<sup>1</sup>, 赵启峰<sup>1</sup>

(1. 华北科技学院, 河北 三河 065201; 2. 中国矿业大学(北京), 北京 100083)

**[摘要]** 相似模拟实验是研究矿井突水机理的一种重要手段, 流固耦合相似模拟材料的高抗水性能至关重要。以石圪台煤矿存在顶板突水溃砂风险的工作面为对象, 开展了流固耦合相似材料配比实验工作。针对实际岩层(中砂岩、砂质泥岩、粉砂岩、煤层、细砂岩), 利用中粗砂、石膏、碳酸钙、石蜡和凡士林按一定配比均匀搅拌压制成试件, 各组试件经自然养护后测定其渗透率, 并计算渗透系数, 同时结合现场隔水层渗透性参数和岩土渗透性分级标准, 将渗透系数小于  $10^{-5}$  cm/s 作为抗水性良好的判依据, 共完成 48 组实验。研究结果表明: 随着石蜡掺量增大, 试件的强度变大、柔性减弱, 当石蜡的掺量大于 8% 时抗水性能良好; 在掺入 8% 石蜡的基础上, 掺入 8% 凡士林可以减少试件弹性模量, 增强变形能力; 凡士林和石蜡的合理搭配, 优势互补, 可制作出抗水性能较好的流固耦合相似材料。

**[关键词]** 流固耦合; 相似模拟材料; 抗水性; 配比实验

**[中图分类号]** TD745 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-6225 (2015) 01-0012-05

## Experimental Research on Water-resistance Property of New-style Fluid-solid Coupling Material for Analogue Simulation

LIAN Hui-qing<sup>1,2</sup>, XIA Xiang-xue<sup>1</sup>, RAN Wei<sup>1</sup>, ZHAO Qi-feng<sup>1</sup>

(1. North-China Science & Technology Institute, Sanhe 065201, China; 2. China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** Analogue simulation is an important method for researching water burst mechanism of mine and high water-resistance property of fluid-solid coupling simulation material is the key. For mining face with roof water burst danger in Shigetai Colliery, matching experiment of fluid-solid coupling analogue simulation material was made. Applying medium-coarse sand, plaster, calcium carbonate, paraffin and vaseline to stirring evenly with some proportion and simulating actual rock strata (medium sandstone, sandy mudstone, siltstone, coal-seam, fine sandstone), permeability ratio of every group specimen was tested and permeability coefficient was calculated. According to classification criterion of permeability parameters, using the permeability coefficient which was smaller than  $10^{-5}$  cm/s as indication value of high water-resistance property, 48 groups experiment was finished. Results showed that with paraffin content increasing, specimen's strength rose and flexibility reduced, when paraffin content was larger than 8%, water-resistance property was excellent, on the basis of this, 8% of vaseline mixture could reduce specimen's elastic module and improve deformation ability. Rational mixture of vaseline and paraffin could make fluid-solid coupling material with high water-resistance property.

**Keywords:** fluid-solid coupling; analogue simulation material; water-resistance property; matching experiment

相似模拟是研究具体工程规律的重要方法, 众多学者在渗流、突水相似模拟实验方面积累了大量成果<sup>[1-6]</sup>。其中, 流固耦合问题的相似模拟一直是研究的难点, 主要是充当隔水层的材料抗水性研究, 因此开展不同配比方案材料的抗水性研究是流固耦合模拟实验的基础。黄庆享<sup>[5]</sup>借助正交实验确定了黏土隔水层的相似材料配比为: 离石黄土和骨(砂子和黏土)胶(硅油和凡士林)比为 7.0 : 1.0, 砂土比为 1.0 : 6.0, 硅凡比为 1.0 : 2.5,

水土比为 0.15; 贺显群<sup>[6]</sup>选择重晶石粉、河沙、固体石蜡、液体石蜡作为隔水层的相似材料, 当骨料配比为 60% 时, 渗透系数为  $1.5 \times 10^{-3}$  m/d; 李树忱<sup>[7]</sup>选用砂和滑石粉作为骨料, 石蜡作为胶结剂, 对流固耦合相似材料进行研制, 其中, 细砂岩的比例为石蜡: 砂: 滑石粉: 液压油 = 1.0 : 16.0 : 4.0 : 1.0; 张杰和侯忠杰<sup>[8]</sup>对基岩层的“固-液”耦合相似材料及配比也开展了相关研究。

在已有研究成果中为增强实验材料抗水性, 主

[收稿日期] 2014-06-06

[DOI] 10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2015.01.004

[基金资助] “十二五”国家科技支撑计划实施方案(2012BAK04B04); 河北省自然科学基金(E2013508123); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0838); 973计划(2013CB227903); 中央高校基本科研业务费资助(3142013117, 3142013035)

[作者简介] 连会青(1975-), 女, 山西忻州人, 博士, 副教授, 研究方向为矿井水文地质。

[引用格式] 连会青, 夏向学, 冉伟, 等. 新型流固耦合相似模拟材料的抗水性实验研究[J]. 煤矿开采, 2015, 20(1): 12-16.

要选择的添加剂有硅油、凡士林、石蜡,但文献中可供参考的材料配方较少,而且没有考虑同时选用石蜡和凡士林来改善材料抗水性的成果。

本文以中粗砂、石膏、碳酸钙、石蜡和凡士林为实验材料,开展了流固耦合相似模拟材料抗水性的研究。

## 1 流固耦合相似材料配比实验

### 1.1 相似材料的选择

(1) 骨料 骨料的选择直接影响相似材料的弹性模量、密度及强度等,骨料性质的变化将对相似材料的性能产生一定的影响,因此,本实验选用性能较为稳定的石英砂为骨料,进行前期探索实验以及研究各种原材料的掺入与掺量对整体材料的影响。同时,由于模型实验体型较大,使用石英砂制作将导致模型实验成本较高,因此完成探索实验后,选用河砂进行中后期实验研究。最终确定由细度模数 2.7、泥量 2% 的河砂作为骨料。

(2) 胶结材料 相似材料是用胶质物和填料组合而成,而胶结材料的力学性质在很大程度上决定了相似材料的力学性质<sup>[11]</sup>。胶结材料分类详见表 1。

表 1 胶结材料分类

类别	名称	力学特点
无机胶质料	石膏、水泥、石灰、碳酸钙、水玻璃	脆性破坏
碳氢类石油产品	石蜡、凡士林、地腊、油类	弹塑性、塑性变形
合成树脂	环氧树脂、尿素树脂	变化范围宽、由塑性直至脆性
天然胶质产品	松香、沥青	脆性

石膏一般采用熟石膏,其初凝时间为 4min,终凝时间 10min,密度  $1.2\text{g}/\text{cm}^3$ ,能够用作胶结材料。碳酸钙是一种胶结材料脆性剂,单轴抗压强度比较低,但在干燥过程中强度会增加。根据实验台规格,确定相似比例为 1:100,根据相似原理,要求抗压强度 0.1~1.0MPa,且同时具有较高的抗水性,因此本实验优先选用抗水性较好的胶结材料。最终选用碳酸钙和石膏等为辅助胶结材料;石蜡和凡士林作为抗水性改性材料。

### 1.2 试件制作

试件采用圆柱形模具统一制作,几何尺寸直径 50mm、高 100mm。根据配比计算实验中河砂、碳酸钙、石膏、凡士林、石蜡的用量,来配置相似材料。首先将胶凝材料置于搅拌锅中并放到加热装置上加热融化,然后将配好的骨料倒入搅拌锅中使材

料搅拌均匀,在搅拌过程中温度必须保持  $50^\circ\text{C}$  以上,一方面保证材料受热均匀,另一方面使熔化后的胶凝材料与骨料混合均匀。

为保证试件的质量应注意:在制作试件之前,先在模具的内表面涂润滑油以便拆模;向模具内注入混合材料时,边注入边搅拌,装料时使混合物高出试模上口并迅速用捣具压实捣紧;实验材料冷却成型之后拆模,在自然条件下养护至完全干燥硬化;对试件进行编号以备测试。

### 1.3 实验方案设计

依据石圪台矿井综合地质柱状图,确定石圪台矿的典型岩层为中砂岩、砂质泥岩、粉砂岩、煤层、细砂岩。首先完成针对地层的固相模拟材料的配比实验,在此基础上,选择几种添加剂开展抗水性实验。

固相模拟材料配比共设计 5 组实验,最终确定各岩层固相相似材料配比见表 2。

表 2 各岩层固相实验的配比

岩层名称	砂子: 碳酸钙: 石膏	密度 / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
中砂岩	7: 3: 7	2.27
砂质泥岩	7: 6: 4	2.38
粉砂岩	7: 5: 5	2.35
煤层	9: 7: 3	1.31
细砂岩	7: 4: 6	2.31

### 1.4 试件参数测试

根据石圪台地质条件、实验台规格及相似理论,确定要制作的试件抗压强度在 0.1~1.0 MPa 左右。调节石蜡和凡士林的配比,制作出不同配比下的多组试件,每组测试试件 3 个,然后对测试结果值平均处理,作为试件在该配比下的抗压强度。选择部分试件进行浸水实验,观察并测试浸水后的试件状态、力学参数和吸水率最终选择符合实验要求的试件配比。渗透率测试实验使用东台市燕山仪器总表厂生产的 HLB 系列恒流泵,测试试件渗透率并计算渗透系数。

图 1 为力学实验完成后的试件,图 2 为试件抗水性实验。共完成 35 组单轴抗压强度实验;20 组浸水实验;35 组渗透率测试。

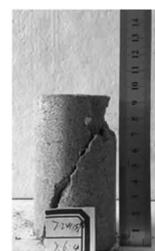


图 1 力学实验测试的试件

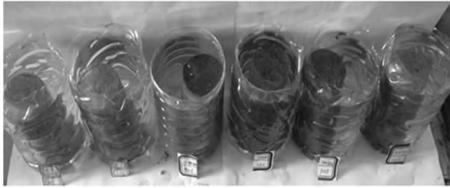


图 2 材料抗水性测试

2 抗水性实验与结果分析

本次实验既定的目标是：要求材料既要有一定的强度，同时在进行流固耦合实验时，材料具有极弱的渗透性能与吸水性能，在含水层水体入渗、水浸的条件下材料仍能保持一定的强度而不松散。因此，开展了抗压强度测试实验、浸水性实验、渗透

性实验和吸水性实验，部分实验方案及参数测试结果见表 3。

2.1 抗压强度实验

2.1.1 “砂子：碳酸钙：石膏” + 石蜡的实验结果分析

针对表 2 既定的 5 种地层材料配比，分别加入 0%，5%，8%，10% 的石蜡做胶结剂，制作不同配比的试件后，样品在自然养护下 7d 后进行抗压强度测试，测试结果见表 3，当凡士林的掺入量为 0 时，需掺入 13% 的水作为调节剂。根据实验结果绘制石蜡掺量对试件抗压强度的影响曲线，如图 3 所示。

从图 3 中可以看出，不同的固相材料配比，随

表 3 实验方案及参数测试结果

添加剂 石蜡 /%	凡士林 /%	砂子：碳酸钙：石膏														
		7: 3: 7 (中砂岩)			7: 6: 4 (砂质泥岩)			7: 5: 5 (粉砂岩)			9: 7: 3 (煤层)			7: 4: 6 (细砂岩)		
		7d 抗压 /MPa	浸水抗 压/MPa	渗透率 /mD	7d 抗压 /MPa	浸水抗 压/MPa	渗透率 /mD	7d 抗压 /MPa	浸水抗 压/MPa	渗透率 /mD	7d 抗压 /MPa	浸水抗 压/MPa	渗透率 /mD	7d 抗压 /MPa	浸水抗 压/MPa	渗透率 /mD
0		0.120	-	2.270	0.170	-	2.090	0.370	-	1.120	0.090	-	1.350	0.212	-	1.010
5		0.265	0.21	0.728	0.206	0.250	0.544	0.420	0.3852	0.980	0.142	0.124	0.846	0.219	0.139	0.594
8	0	0.420	0.39	0.563	0.355	0.312	0.204	0.480	0.4590	0.463	0.380	0.319	0.698	0.460	0.416	0.336
10		0.460	0.41	0.466	0.526	0.419	0.127	0.486	0.4800	0.330	0.415	0.383	0.459	0.570	0.510	0.295
3	3	0.165	-	1.127	0.250	-	1.093	0.209	-	0.110	0.218	-	1.135	0.265	-	0.901
5	5	0.260	-	0.901	0.290	-	0.485	0.530	-	0.084	0.219	-	0.796	0.450	-	0.672
8	8	0.280	-	0.739	0.300	-	0.201	0.445	-	0.029	0.230	-	0.436	0.460	-	0.476

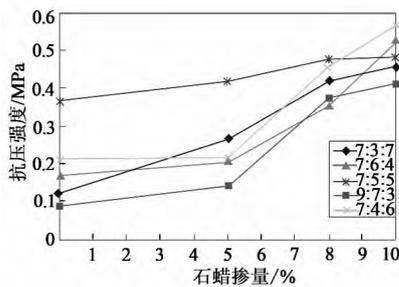


图 3 石蜡掺量对材料抗压强度的影响曲线

着石蜡掺量的增加，抗压强度也在增加。砂子：碳酸钙：石膏为 7: 5: 5，石蜡掺量为 8% 时试件的抗压强度为 0.48MPa，但当石蜡掺量达到 8% 以上，对试件抗压强度的改善不明显。

2.1.2 “砂子：碳酸钙：石膏” + 石蜡 + 凡士林实验结果分析

“砂子：碳酸钙：石膏” + 石蜡的实验结果表明，石蜡含量为 8% 时强度已经满足要求、但柔性减弱，需增强试件的变形能力。凡士林极具防水性，不易和水混合有助于改善试件的隔水效果，增强试件变形能力。加入凡士林和石蜡比例分别是 3%，5%，8%，自然养护 7d 测试参数，试验结果

见表 3，根据实验结果绘制石蜡和凡士林掺量对试件抗压强度的影响曲线，见图 4。

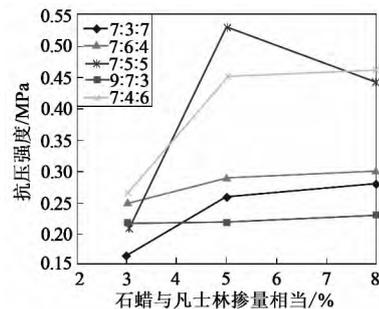


图 4 石蜡和凡士林掺量对材料抗压强度的影响曲线

从图 4 中可以看出，相同配比的试件的强度随着凡士林和石蜡的增加抗压强度增加，由图 3 ~ 图 4 可知，掺入凡士林可以减少试件强度，砂子：碳酸钙：石膏 = 7: 6: 4 时，掺入石蜡 8% 时抗压强度是 0.355 MPa，掺入石蜡和凡士林各 8% 时，抗压强度是 0.3 MPa，强度减少 14%。

为了分析调节剂凡士林的性质，选择砂子：碳酸钙：石膏 = 7: 4: 6，测试试件的峰前弹性模量，一共测试 7 组数据，每组测试 3 个试件，然后对测试结果值平均处理，测试结果见表 4。

表 4 材料弹性模量数据

石蜡掺量/%	凡士林掺量/%	弹性模量/MPa
0	0	11
5	0	35
8	0	45
10	0	48
5	5	33
8	8	28
10	10	26

从表 4 中可以看出，模型试件的弹性模量与凡士林的掺量有关。当石蜡的掺入量为 8%，凡士林掺入量为 8% 时，试件的弹性模量是 28MPa。而只掺入 8% 的石蜡试件的弹性模量 45MPa。凡士林掺入量增加，试件弹性模量减少、变形能力增强。

### 2.2 浸水性实验

实验中，试件中石蜡的掺量为 0 时，放入水中，立刻开始溶解，没有研究必要，所以选择石蜡掺量为 5%，8%，10% 的配比，试件放入水中 24h 后，进行单轴抗压强度的测试。根据实验结果绘制石蜡掺量对试件抗压强度的影响曲线，见图 5。

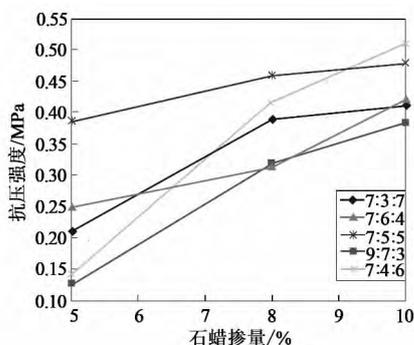


图 5 浸水后材料的单轴抗压强度的变化曲线

从图 5 可以看出，当配比方案为砂子：碳酸钙：石膏 = 7：5：5 时石蜡掺量从 5% 到 10%，7d 抗压强度从 0.42MPa 增加到 0.486MPa，浸水后的试件抗压强度从 0.3852MPa 增加到 0.48MPa。浸水后的模型试件比未浸水的强度略有减少，但总体上变化不大。

### 2.3 渗透性实验

不同配比的材料试件，统一测试渗透率。为与现场地层渗透性能结合，将渗透率转化为渗透系数，渗透率与渗透系数的关系：

$$K = k \frac{\gamma}{\mu}$$

式中， $K$  为渗透系数，m/d； $k$  为渗透率，mD； $\gamma$  为液体的密度， $kg/m^3$ ； $\mu$  为粘滞动力系数， $Pa \cdot s$ 。

结合现场隔水层渗透参数和岩土渗透性分级标准（《水利水电工程地质勘察规范》（GB50287 -

99）规定，岩土渗透性分级），选择渗透系数小于  $10^{-5} cm/s$  为抗水性良好的判别准则。

根据计算公式，将表 3 渗透率转化为渗透系数，得到的石蜡对相似材料渗透系数的影响关系见图 6。

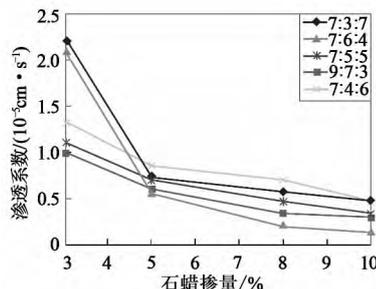


图 6 石蜡掺量对材料抗压强度渗透系数的影响曲线

由图 6 可知，随石蜡掺量增加试件渗透系数在减少，对于砂子：碳酸钙：石膏的配比为 7：6：4 和 7：3：7 时，石蜡掺量小于 5% 时，试件渗透系数线性减少速度较快；当石蜡掺量大于 5% 时，砂子：碳酸钙：石膏的不同配比情况下，各组试件渗透系数取值和变化规律趋于一致，呈现速度相近的线性减少规律。可见，石蜡的不同掺量对材料渗透性能起到关键的控制作用，5% 的掺入量对不同配比试件的渗透性能来说是一个重要节点。考查不同试件渗透系数值的变化，各试件的材料配比方案均能满足现场对隔水层的要求。例如，砂子：碳酸钙：石膏的配比为 7：6：4，石蜡掺量从 3% 增至 10% 时，渗透系数从  $2.09 \times 10^{-5} cm/s$  减小至  $0.127 \times 10^{-5} cm/s$ ，也完全满足要求。可见，材料固相配比一定时，抗水性主要由石蜡掺量来体现。

### 2.4 吸水性实验

以石圪台矿地质条件为研究对象，并结合前人研究成果，确定了固相材料配比，抗水性材料石蜡的掺量为 5% ~ 8%，为了进一步模拟试件的亲水性能，进行了吸水量实验。首先对自然养护 7d 后的试件进行称重，并测量其上下部位的直径及高度，然后浸水 24h，试件浸泡水中时，每隔 2h 测试试件质量的变化，以测量其吸水量，共制样 4 组，测试 48 个有效数据，得到试件的吸水量随时间的变化关系（见图 7）。

图 7 的数据可以表明，材料配比相同的试件，随着试件在水中浸泡时间的增加吸水量也增加，10h 以后吸水量增加量减少并趋于稳定，达到其最大吸水量。石蜡掺量为 8% 时，试件的吸水量最大仅为 4.5g，吸水率为 1.3%，表明试件亲水性很弱，材料配比方案达到抗水性的实验目标。

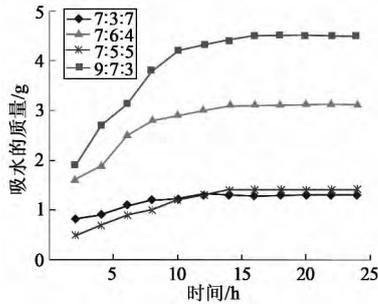


图 7 石蜡掺量为 8% 时的吸水量变化曲线

#### 4 结论

本文设计材料配比实验方案,开展了单轴抗压强度测试、浸水性、渗透性和吸水性实验,测试了不同配比方案材料的强度、渗透率、浸水能力和吸水量,对比分析评价后得出如下主要结论:

(1) 抗水性实验相似材料的主要材料为石英砂、碳酸钙、石膏、石蜡、凡士林。按照石蜡和凡士林掺量从 0% ~ 10% 的配比方案,模型材料可以实现对原型地层的低强度、大变形和抗水性的相似模拟。

(2) 调节石蜡的掺量可以改变试件的抗压强度,石蜡的掺量越高,试件的强度就越高,当石蜡的掺量达到 8% 以后,塑性变形能力较小,抗压强度增大,但抗压强度增幅变慢。

(3) 凡士林作为良好的变形添加剂,有助于实现相似模拟材料的低强度和大变形特性。而石蜡具有良好的非亲水性,可以控制相似材料的渗透性,模拟岩层的水理性。凡士林和石蜡的合理搭

(上接 50 页)

#### 4 结论

(1) 建立了刮板输送机预张紧力模型,确定了机头部松边链条的悬垂量在不同链条状态下具有独立区别的特征,特征位置处即为理想的链条状态监测点。

(2) 研究了机头部松边悬垂量和次小张力的关联机理,为电感式接近位移传感器的安装提供了理论依据。

(3) 所述链条张力状态监测方法已经成功在某煤矿机械有限公司生产的重型刮板输送机上使用,表明该方法具有可实施性和高可靠性。

#### 【参考文献】

[1] 许少毅,李威,胡爱国. 基于 AVR 单片机的刮板输送机减速器监测系统设计 [J]. 矿山机械, 2011, 39 (6): 27-31.

配,优势互补,制作的模拟实验材料能满足固液耦合相似模拟实验对材料抗水性的要求实验。

(4) 不同配比方案的实验结果,获得了相似材料不同配比时的力学和抗水性变化规律,为确定不同类型隔水层的相似材料配比方案提供了依据。

#### 【参考文献】

[1] 杨林. 非线性流固耦合问题的数值模拟方法研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.  
 [2] 李涛. 陕北煤炭大规模开采隔水层结构变异及水资源动态研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.  
 [3] 张杰,侯忠杰. 水体下煤炭开采渗流实验研究 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2009 (1): 67-70.  
 [4] 黄庆享,张文忠,侯志成. 固液耦合试验隔水层相似材料的研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010 (S1): 2813-2818.  
 [5] 黄庆享,侯志成,张文忠,等. 黏土隔水层相似材料胶结剂的正交实验分析 [J]. 采矿与安全工程学报, 2007 (1): 42-46.  
 [6] 贺显群,刘志祥,李夕兵,等. 流-固耦合相似材料的研究 [J]. 矿冶工程, 2010 (4): 22-26.  
 [7] 李树忱,冯现大,李术才,等. 新型固液耦合相似材料的研制及其应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010 (2): 281-288.  
 [8] 张杰,侯忠杰. 固-液耦合试验材料的研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004 (18): 3157-3161.  
 [9] 侯忠杰,张杰. 陕北矿区开采潜水保护固液两相耦合实验及分析 [J]. 湖南科技大学学报 (自然科学版), 2004 (4): 1-5.  
 [10] 胡耀青,赵阳升,杨栋. 三维固液耦合相似模拟理论与方法 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007 (2): 204-206.  
 [11] 谷岩. 新型胶结材料研发与充填体强度优化设计 [D]. 唐山: 河北联合大学, 2013. [责任编辑: 施红霞]

[2] 邢方方,许少毅. 刮板输送机软启动控制策略 [J]. 河南科技大学学报 (自然科学版), 2012, 33 (4): 14-18.  
 [3] 毛君,张东升,师建国. 刮板输送机张力自动控制系统的仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20 (16).  
 [4] 毛君,师建国,张东升,等. 重型刮板输送机动力建模与仿真 [J]. 煤炭学报, 2008, 33 (1): 103-106.  
 [5] 毛君,吴平稳,张东升. 刮板输送机机尾伸缩装置的理论研究 [J]. 起重运输机械, 2004 (11): 39-42.  
 [6] 龙小波. 电磁类开关型传感器原理及其应用 [J]. 大众科技, 2009 (7): 126-127.  
 [7] 邓重一. 基于电感式接近开关的安全检测系统 [J]. 中国仪器仪表, 2004 (1): 17-20.  
 [8] 龙小波. 电磁类开关型传感器原理及其应用 [J]. 大众科技, 2009 (7): 126-127.  
 [9] 邓重一. 接近开关原理及其应用 [J]. 自动化博览, 2003 (5): 31-34.  
 [10] 杜立红. 汽车挡车控制系统的研制 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2007. [责任编辑: 徐亚军]