

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.04.020

水性 UV 喷墨墨水的研究

王 萌, 刘 昕

(西安理工大学 印刷包装与数字媒体学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 采用均匀设计试验法, 得到作为齐聚物使用的光固化水性聚氨酯和聚乙烯醇混合乳液, 降低墨水黏度, 提高固含量。利用单因素法研究了光引发剂种类、含量以及染料、丙三醇的用量等因素对墨水性能的影响, 确定各因素最优用量区间。最后采用正交试验法, 确定齐聚物、光引发剂、染料及助剂用量的最优用量, 结果表明, 当齐聚物 75%, 染料 10%, 光引发剂 5.5%, 助剂 1.9% (其中丙三醇 1.5%, 消泡剂 0.4%), 稀释剂为去离子水和乙醇 7.6%, 配制所得的水性 UV 喷墨墨水综合性能优异。

关键词: 喷墨印刷; 水性 UV 油墨; 齐聚物; 光引发剂

中图分类号: TS8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2016)04-0494-06

Study of water-borne UV ink-jet ink

WANG Meng, LIU Xin

(School of Printing, Packaging Engineering and Digital Media Technology,
Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on the uniform design method, an aqueous emulsion of waterborne polyurethane and polyvinyl alcohol as an oligomer to decrease ink viscosity is obtained and solid content is improved. The research is conducted on different kinds of photo-initiator, the amount of the photo-initiator, dyes and glycerol about its properties by using the single factor method to determine the optimal amount interval of various factors, with the optimal amount of oligomer, photoinitiator, species and additives being determined finally. The results show that when the formulation is 75% oligomer, 10% dyes, 5.5% photoinitiator, 1.9% additives (1.5% glycerol and defoamer 0.4%) and 7.6% diluent made of deionized water and ethanol, the comprehensive properties of the water-borne UV-curable printing ink are of excellence.

Key words: inkjet printing; water-based UV ink; oligomer; photoinitiator

水性 UV 喷墨墨水^[1]和传统喷墨墨水相比, 在综合性能方面有很大的改进, 可应用于多种印刷领域, 成为行业专家和学者的研究热点。水性 UV 喷墨墨水是由齐聚物、光引发剂、染料及助剂配制而成的一种新型环保油墨。目前, 水性 UV 喷墨墨水仍处在研究阶段, 国内外的公司和学者已取得用于研发阶段的研究成果, 但还没有投入生产^[2]。

水性 UV 墨水制备过程中所使用的齐聚物多为一种树脂或多种树脂的共聚物^[3]。所用齐聚物大多是改性水性聚氨酯、改性丙烯酸树脂、改性环氧树脂或改性聚乙烯醇树脂。齐聚物制备过程中, 针对不同的树脂, 需要使用不同的活性单体^[4-5]改变齐聚

物的性能。由于活性单体具有一定的挥发性, 对环境和人体健康有害, 所以在选用时应谨慎选取。光引发剂是水性 UV 墨水的重要组成部分, 许多文献研究已提及多种复配方式的光引发剂与单一引发剂固化效果的比较, 可是忽略了引发剂的选择和齐聚物的类型之间的关系。使用共混树脂为齐聚物, 对不同种类的水性 UV 固化树脂进行比较, 采用均匀设计试验法和单因素试验法选择了将光固化水性聚氨酯和聚乙烯醇混合乳液作为墨水配方的齐聚物, 将 PVA 与 UV-WPU 共混, 由于 UV-WPU 链段中的氨基酯(-NH-COO)能与 PVA 中的羟基(-OH)形成分子间氢键, 可改善 UV-WPU 的热稳定性等性

收稿日期: 2015-09-28

作者简介: 王萌, 女, 硕士生, 研究方向为印刷复制技术。E-mail: 392808564@qq.com

通讯作者: 刘昕, 男, 教授, 研究方向为印刷复制技术。E-mail: liuxin@xaut.edu.cn

能,且大大降低了 UV-WPU 的使用成本(示意图见图 1)。选择合适的光引发剂^[6],利用正交试验法对墨水各组分用量进行优化。

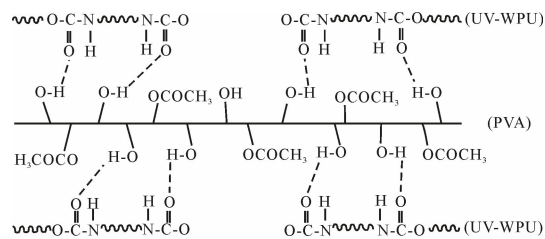


图 1 UV-WPU/PVA 共混体系中形成的氢键示意图
Fig. 1 Hydrogen bond formed in UV-WPU/PVA blend system

1 理论分析

1.1 水性 UV 喷墨墨水的配方设计

喷墨印刷水性 UV 油墨的基本组成成分、固化机理和配方原则是配制喷墨印刷水性 UV 油墨的理论依据。

喷墨印刷水性 UV 油墨主要由齐聚物(水基光固化树脂)、光引发剂、色料和助剂等组成。其中,预聚物是水性 UV 油墨的重要组成部分,起连接料的作用,决定固化后墨膜的性能;光引发剂是水性 UV 油墨的主要成分之一,影响油墨干燥速度;色料是油墨中的显色物质,分染料和颜料两种类型,决定油墨的颜色;助剂是油墨的辅助成分,主要用来调节油墨的印刷适性。

1.2 水性 UV 喷墨墨水的配方原则

1) 齐聚物的选择原则。①黏度:选择低黏度树脂,有利于减少活性稀释剂的用量;②光固化速度:选择固化速度较快的,不仅可以减少光引发剂用量,而且可以满足快速固化的要求;③物理力学性能:墨膜的物理力学性能主要由预聚物固化膜的性能来决定,而不同种类承印物的墨膜,其物理力学性能要求不同,所选用的预聚物也不同;④毒性和刺激性:预聚物由于分子量较大,大多为粘稠状树脂,不挥发,不是易燃易爆物品,毒性较低,对皮肤的刺激性也较低。

2) 光引发剂的选择原则。①光引发剂的吸收光谱与光源的发射光谱相匹配,光固化的光源主要为高压汞灯,有用发射谱线是 365nm、313nm、302nm 和 254nm,许多光引发剂在上述波长处均有较大吸收;②光引发效率高;③针对不同色料,选择对色料紫外吸收影响最小的光引发剂;④溶解性好;⑤低气味,无毒;⑥稳定性好;⑦光固化后黄变现象不明显;⑧热稳定性和贮存稳定性好;⑨合成容易,成本低,价格便宜。

3) 染料的选择原则。①选择水溶性良好地染料,能够在连接料中很好地溶解;②染料纯度要高,纯度越高,着色效果越好,色彩越艳丽;③选择光谱吸收率低的染料,以免影响固化速率。

1.3 正交试验设计原理

本文研究的水性 UV 喷墨墨水以齐聚物 A、光引发剂 B、染料 C、丙三醇 D 四个主要因素为研究对象,设计三水平四因素的正交试验表。实验设计步骤:①明确试验目的,确定评价指标;②挑选因素,确定水平;③选正交表,进行表头设计;④明确试验方案,进行试验,得到结果;⑤对试验结果进行统计分析,完成实验,得到最优配方。

2 实验

2.1 实验原料及仪器

原料:聚乙烯醇(分析纯);光固化水性聚氨酯树脂 LD-3200S(工业级);2,4,6-三甲基苯甲酰基-二苯基氧化膦(TPO)、2-甲基-1-(4-甲硫基苯基)-2-吗啉基-1-丙酮(907)、1-羟基环己基苯基甲酮(184)(工业级);活性黑 5(工业级);水性通用型消泡剂 OS-5201(工业级);十二烷基苯磺酸钠(工业级);丙三醇(分析纯);2-羟基-4-甲氧基二苯甲酮(分析纯);去离子水和乙醇等。

实验仪器:电子天平 LT202E;数显恒温水浴锅 HH-1;BROOKFIELD LVDV-11+P 数字旋转黏度计;电动搅拌器 JJ-1;JJK99B/C 全自动张力仪;UV 固化机;202-1A 型电热恒温干燥箱;墨水打样机。

2.2 性能测量

1) 黏度测定。使用 BROOKFIELD LVDV-11+P 数字旋转黏度计对墨水进行测量,记录数据。

2) 固含量测定。按照 GB/T8 290 规定的方法取样。将平底皿称量,精确到 0.1 mg,加入 $2.0 \text{ g} \pm 0.5 \text{ g}$ 墨水,将平底皿放入干燥箱,在 $105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 下加热 2~2.5 h,在干燥箱内冷却至室温称量,然后放在 $105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 下加热 15 min 后取出,冷却至室温后再称量,反复干燥、冷却和称量,直至前后两次称量之差小于 0.5 mg。固含量表示方法如式(1)所示。

$$W = (m_2 - m_0) / (m_1 - m_0) \times 100\% \quad (1)$$

式中, m_0 为表面皿质量, m_1 为烘干前表面皿与试样质量和, m_2 是烘干后表面皿与试样质量和。

3) 耐水性测定。将制备好的三块涂膜试样放入水中,并使每块试样长度的 2/3 浸泡在水中。常温为 $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$,沸水应保持沸腾状态。观察样板是否有失光、变色、起泡、起皱、脱落等现象。

4) 稀释稳定性测定。将乳液稀释至 3%,盖严,

恒温静置 48 h,看分层及凝胶情况。

5) 光固化速率测定。采用指触法,用 UV 固化机对样张上的油墨进行固化,用指触法测试油墨的固化过程,样张不粘则完全固化,从而寻求油墨的最大固化速率。

6) 表面张力测定。使用 JJK99B/C 全自动张力仪进行测量,记录数据。

7) 恒温恒湿条件下,取一定量的制备墨水放入烧杯中,称初始质量(记为 m_a),在室温条件下静置,自然蒸发至质量不再变化(记为 m_b);然后于 60℃ 烘箱中放置 1 周(记为 m_c),按式(2)计算。

$$\text{保湿率} = \frac{m_b - m_c}{m_a} \times 100\% \quad (2)$$

3 结果与讨论

3.1 齐聚物对墨水性能的影响

通过对不同种类的树脂进行分析比较,发现水性聚氨酯和聚乙烯醇树脂在柔韧性、成膜性、附着力和环保性等^[8]方面表现较好,选择将聚乙烯醇改性水性聚氨酯乳液作为水性 UV 喷墨墨水的齐聚物。

3.1.1 配制光固化水性聚氨酯和聚乙烯醇混合乳液

采用均匀设计试验法,配制不同比例的光固化水性聚氨酯和聚乙烯醇混合乳液,分别对其黏度、固含量、耐水性和稀释稳定性进行测试,其测试结果见表 1。

表 1 光固化水性聚氨酯和聚乙烯醇混合乳液混合比例对齐聚物性能的影响

Tab.1 Influence of mixing ratio of waterborne polyurethane and polyvinyl alcohol on prepolymer

PVA : UV-WPU	黏度/mPa·s (25℃)	固含量/ %	耐水性/ 级	稀释稳定性/ 级
1:2	77.7	22.8	4	5
3:1	92.6	29.4	5	5
4:3	116.3	27.6	5	5
1:1	113.8	25.8	5	5

采用直观分析法,对表 1 的性能测量结果进行分析。当 PVA:水性 PU=3:1 时,综合性能优异,得到了水性 UV 喷墨墨水齐聚物的最优配制比例。

3.1.2 齐聚物含量对水性 UV 墨水性能的影响

在保证墨水其他组分不变的情况下,改变齐聚物的含量,配制墨水。作为水性 UV 喷墨墨水,其黏度要求在 1.5~30 mPa·s,固含量则是越高越好。测得水性 UV 墨水的基本性能见表 2。由表 2 可以看出,随着齐聚物的含量的提高,水性 UV 墨水的黏度及固含量均有所提高。当齐聚物含量在

70%时,黏度在要求范围内,且固含量较高。

表 2 齐聚物含量对水性 UV 墨水性能的影响
Tab.2 Effect of the content of prepolymer on properties of water-based UV ink

齐聚物的质量分数/%	50	60	70	80
黏度/mPa·s(25℃)	10.3	19.8	25.2	36.4
固含量/%	15.6	20.8	23.4	28.5

3.2 光引发剂对固化速率的影响

保证墨水其他组分不变,分别结合光引发剂 184、光引发剂 TPO、光引发剂 907 及其复合光引发剂,制备 UV 墨水并测量其光固化速率。结果如表 3 所示。

表 3 光引发剂种类对水性 UV 墨水固化速率的影响
Tab.3 Effect of the photoinitiator species on the curing rate of water-based UV ink

184:TPO: 907	固化速率/ (m/min)	184:TPO: 907	固化速率/ (m/min)
1:0:0	25.3	1:0:1	32.4
0:1:0	28.5	0:1:2	29.8
0:0:1	26.8	0:3:1	30.7
1:2:0	33.2	0:4:3	31.9
3:1:0	32.6	0:1:1	30.8
4:3:0	35.2	1:2:4	34.2
1:1:0	34.6	2:4:3	33.7
1:0:2	32.6	3:1:2	33.2
3:0:1	30.4	4:3:1	34.0
4:0:3	31.8	1:1:1	32.7

由表 3 可以看出,光引发剂种类对水性 UV 墨水的固化速度有较大影响。当 184:TPO:907=4:3:0 时,光固化速率最大。相比较于单一光引发剂,复合光引发剂能充分吸收光源发出的紫外光,因而效果好。

在其他组分不变的条件下,改变最佳复合光引发剂(即 184:TPO:907=4:3:0)的用量,制备水性 UV 墨水,并测量墨水的固化速率,结果如表 4 所示。

表 4 光引发剂含量对水性 UV 墨水固化速率的影响
Tab.4 Effect of photoinitiator content on curing rate of water-based UV ink

光引发剂质量分数/%	2	3	4	5	6	7
固化速率/ (m/min)	20.3	30.7	31.8	35.6	30.2	28.6

分析表 4 可知,随着光引发剂含量的增加,墨水的固化速率也逐步增加;但是,当光引发剂含量增加到 5%时,再增加光引发剂含量,固化速率呈现下降趋势。即当光引发剂含量为 5%时,固化速率最高。

3.3 染料对固化速率的影响

染料用量对墨水色强度有较大影响,随着染料

用量的增多色强度也随之升高,但是油墨固化速率随染料用量的增加而降低,因此在墨水制备过程中,应该考虑到各方面影响,选择理想染料用量。实验选取 C.I 活性黑 5,在 20℃ 时水中溶解度为 200 g/L;80℃ 时水中溶解度大于 200 g/L。保证墨水其他组分含量不变,改变染料的含量,制备墨水并测量其固化速率结果见表 5。

表 5 染料浓度对水性 UV 墨水固化速率的影响
Tab. 5 Effect of content of dyes on curing rate of ink

染料的质量分数/%	6	8	10	12	14	16
固化速率/(m/min)	32.8	33.2	34.7	31.5	30.1	28.3

由表 5 可知,随着染料浓度的增多,墨水固化速率逐渐增大。当染料浓度高过 10% 时,随着染料浓度增多,墨水固化速率降低。浓度较低时染料会吸收并转变一定波长范围内可利用的光,增加紫外线的利用率,提高光墨水固化速率。而当染料浓度高

于 10% 时,染料以高浓度分子状溶解在溶剂中,阻碍紫外线的透光率,降低固化速率。

3.4 丙三醇对墨水保湿性的影响

丙三醇的分子结构中含有多个羟基,与水分子可以形成氢键,起到保湿作用^[9]。不仅可以防止墨水在长期储存过程中因水分的蒸发而干燥,而且在打印结束后不会固化喷头,减轻清洗喷头时的麻烦。保证墨水的其他各组分不变,改变丙三醇的含量,测得保湿率见表 6。

表 6 丙三醇含量对墨水保湿性的影响
Tab. 6 Effect of glycerol content on the ink moisture

丙三醇含量/%	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
保湿率/%	3	7	9	11	13	15	17	20

由表 6 可以看出,随着丙三醇用量的增大,水性 UV 喷墨墨水的保湿性有所增加。但是保湿剂含量过多,容易造成干燥速度缓慢、抗水性差。

表 7 正交实验数据处理结果
Tab. 7 Result of orthogonal data processing

试验号	因素				黏度/mPa·s (25℃)	固化速率/ (m/min)	固含量/%	耐水性/级	表面张力/ (mN/m)
	A/%	B/%	C/%	D/%					
1	1(65)	1(4.5)	1(9.5)	1(1)	13.4	39.5	20.2	5	44.6
2	1(65)	2(5)	2(10)	2(1.5)	12.8	41.3	20	3	46.19
3	1(65)	3(5.5)	3(10.5)	3(2)	15.0	40.6	21.7	4	49.5
4	2(70)	1(4.5)	2(10)	3(2)	16.4	39.7	22.8	3	43.63
5	2(70)	2(5)	3(10.5)	1(1)	14.8	34.6	23.5	5	55.83
6	2(70)	3(5.5)	1(9.5)	2(1.5)	22.3	43.6	21.6	4	50.73
7	3(75)	1(4.5)	3(10.5)	2(1.5)	19.5	38.7	23.8	4	52.57
8	3(75)	2(5)	1(9.5)	3(2)	23.4	36.2	24.5	5	55.83
9	3(75)	3(5.5)	2(10)	1(1)	31.5	44.1	24.7	5	50.37
黏度	K ₁	13.73	16.43	19.7	19.9	总 和			
	K ₂	17.83	17	20.23	18.2				
	K ₃	24.8	22.93	16.43	18.27				
	R	9.57	6.5	3.8	1.7				
光固化速率	K ₁	40.47	39.3	39.77	39.77	总 和			
	K ₂	39.3	37.37	41.7	41.2				
	K ₃	39.67	42.77	37.97	38.83				
	R	1.17	5.4	3.73	2.37				
固含量	K ₁	20.63	22.27	22.1	22.8	总 和			
	K ₂	22.63	22.43	22.5	21.8				
	K ₃	24.33	22.67	23	23				
	R	3.7	0.4	0.9	1.2				
耐溶剂性	K ₁	4	4	4.67	5	总 和			
	K ₂	4	4.33	3.67	3.67				
	K ₃	4.67	4.33	4.33	4				
	R	1	0.33	1	1.23				
表面张力	K ₁	46.76	46.93	50.39	50.27	总 和			
	K ₂	50.06	52.61	46.73	49.83				
	K ₃	52.92	50.2	52.63	49.65				
	R	6.16	5.23	5.66	0.62				

根据表7可知,综合考察4个指标。因素A:对于固含量、耐水性和表面张力而言都是取A3好;对于黏度、固化速率则是取A1好,水性墨水黏度可以通过稀释剂进行调节,可暂不考虑,分析固化速率 \bar{K}_i 值可知A取A1、A3时固化速率相差不大,且从极差可以看出,A为次要因素,所以根据多数倾向和A因素对不同指标的重要程度,选取A3。因素B:对于黏度取B1,同理,黏度可通过稀释剂进行调节,暂不考虑;对于耐水性,取B2或B3基本相同;对于固化速率和固含量取B3好,对于表面张力取B2,由 \bar{K}_i 值可以看出B取B2、B3时表面张力相差不大,而且从极差可以看出,B为次要因素,所以根据多数倾向和B因素对不同指标的重要程度,选取B3。因素C:对于光固化速率取C2好;黏度、固含量和表面张力取C3好,耐水性取C1好,根据极差分析可知,C是光固化速率的主要因素,是固含量、耐水性和表面张力的次要因素,而且,通过 \bar{K}_i 值分析可知C1、C2、C3时,固含量、耐水性和表面张力相差不大;同理,黏度可通过稀释剂进行调节,暂不考虑;所以根据多数倾向和C因素对不同指标的重要程度,选取C2。因素D:对于表面张力取D1好,固化速率、耐水性D2好,黏度和固含量D3好,分析表7可知,对于黏度、光固化速率、固含量、表面张力而言,取D1、D2、D3时黏度相差不大,而且从极差可以看出,D为次要因素,所以根据多数倾向和D因素对不同指标的重要程度,选取D2。综上所述,优配方为A3B3C2D2,即齐聚物75%,光引发剂5.5%,染料10%,丙三醇1.5%。

依据上述分析,采用优化配方制备水性UV喷墨墨水,具体优化配方见表8。根据表8配制墨水,分别对配制所得墨水的性能进行测试,测试结果见表9。

表8 水性UV喷墨墨水的最优配方

Tab.8 Optimized formulation of water-Based UV ink for inkjet printing

原料	用量/%	原料	用量/%
齐聚物	75	丙三醇	1.5
染料(活性黑5)	10	消泡剂	0.5
光引发剂	5.5	乙醇	3.2
去离子水	4.8		

表9 水性UV喷墨墨水优化配方性能测试结果

Tab.9 Performance test result of the optimized formulation of water-Based UV ink for inkjet printing

检测项目	检测结果	检验标准
黏度/mPa·s(25℃)	26.8	GB/T1723-93
固化速率/(m/min)	39.6	—
固含量/级	23.5	GB/T1725-2007
耐水性/级	5	GB/T1733-1993
表面张力/(mN/m)	53.6	GB/T22237-2008

如表9所示,通过比较检测结果和检测标准,表明制备所得的水性UV喷墨墨水,其在固化速度、耐水性、表面张力等各方面得到改善。其黏度和固含量符合水性UV墨水的行业要求。

4 结论

1) 配制不同比例的光固化水性聚氨酯和聚乙烯醇混合乳液,当PVA:UV-WPU=3:1时,其黏度、固含量、耐水性和稀释稳定性表现最好。

2) 相比较于单一光引发剂,复合光引发剂能充分吸收光源发出的紫外光,因而效果好。随着光引发剂含量的增加,墨水的固化速率也逐步增加;但是,当光引发剂含量增加到一定值时,再增加光引发剂含量,固化速率呈现下降趋势。

3) 随着染料浓度的增多,墨水固化速率逐渐增大。当染料浓度高过10%时,随着染料浓度的增多,墨水固化速率降低。

本文以活性黑5染料配制得到水性UV喷墨墨水,使用均匀设计试验法和单因素试验法确定配方中各组分的质量分数为:齐聚物75%,染料10%,光引发剂5.5%,助剂1.9%(其中丙三醇1.5%,消泡剂0.4%),稀释剂为去离子水和乙醇(质量比为3:2)7.6%。配制所得水性UV墨水在固化速度、耐水性、表面张力等各方面得到改善且表现优异,黏度和固含量符合水性UV墨水的行业要求,适用于喷墨印刷。本文只是对色料作为染料的讨论,对于颜料方面还有待研究。

参考文献:

- [1] 王萌,刘昕. 水性UV喷墨墨水面面观[J]. 印刷技术, 2015,(15):56-58.
- [2] 张黎明,辛秀兰. 水性喷墨油墨的研究现状及发展[J]. 包装工程,2010,31(11):128-131.
ZHANG Liming, XIN Xiulan. Research status and development of water-based inkjet ink[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(11):128-131.
- [3] 崔锦峰,杨保平,周应萍,等. 不饱和聚酯聚氨酯嵌段共聚物水性UV墨水的制备方法:中国,CN201110096328.4 [P]. 2011-08-17.
- [4] 刘昕,翟玉月. 一种水性UV油墨及其制备方法:中国,CN201110139166.8 [P]. 2011-11-16.
- [5] 王晓芳. 水性UV光油的研制[D]. 山东:曲阜师范大学,2010.
WANG Xiaofang. Development of waterborne UV coating[D]. Shandong:Qufu Normal University, 2010.
- [6] 任焯,刘昕. 柔印水性UV墨水的研究[J]. 西安理工大学学报. 2013,29(4):491-494.

- REN Ye, LIU Xin. A study of water-based UV ink for flexographic printing[J]. Journal of Xi'an University of Technology. 2013, 29(4): 491-494.
- [7] 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社,2008.
- [8] 朱国全,王发刚,高巧春,等. 聚乙稀醇/聚氨酯共混薄膜制备及性能研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版),2012,26(5):21-25.
ZHU Guoquan, WANG Fagang, GAO Qiaochun, et al. Preparation and properties of PVA/PU blend films[J]. Journal of Shandong University of Technology(Natural Science Edition), 2012, 26(5): 21-25.
- [9] 费颖颖. 染料型中性墨水的配方设计[D]. 辽宁:大连理工大学,2013.
FEI Yingying. Formulation of black dye-based gel ink [D]. Liaoning: Dalian University of Technology, 2013.
(责任编辑 王绪迪,王卫勋)
-
- (上接第 454 页)
- [15] 曹先锋,徐千军. 边坡稳定分析的温控参数折减有限元法[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11):2039-2042.
CAO Xianfeng, XU Qianjun. Temperature driving strength reduction method for slope stability analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11):2039-2042.
- [16] 李宁,许建聪. 基于场变量的边坡稳定分析有限元强度折减法[J]. 岩土力学, 2012, 33(1):314-318.
LI Ning, XU Jiancong. Strength reduction FEM for slope stability analysis based on field variable [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1):314-318.
- [17] 孙冠华,郑宏,李春光. 基于等效塑性应变的边坡滑面搜索[J]. 岩土力学, 2008, 29(5):1159-1163.
SUN Guanhua, ZHENG Hong, LI Chunguang. Searching critical slip surface of slopes based on equivalent plastic strain [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5):1159-1163.
- [18] 李剑,陈善雄,余飞. 基于最大剪应变增量的边坡潜在滑动面搜索 [J]. 岩土力学, 2013, 34 (supp. 1): 371-378.
LI Jian, CHEN Shanxiong, YU Fei. A method for searching potential failure surface of slope based on maximum shear strain increment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(supp. 1):371-378.
- [19] 张媛,李荣建,李锦,等. 超载作用下土质边坡失稳与破坏模式分析[J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(3): 347-352.
ZHANG Yuan, LI Rongjian, LI Jin, et al. An analysis of instability and failure mode of soil slope under overloading action [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31(3): 347-352.
- [20] MORGENSTERN N R, PRICE V E. The analysis of the stability of general slip surfaces [J]. Geotechnique, 1965, 15(1):79-93.
- [21] 邵龙潭,李红军. 土工结构稳定分析—有限元极限平衡法及其应用[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [22] 陈祖煜. 土质边坡稳定性分析—原理. 方法. 程序[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [23] 杨有成. 强度折减法在斜坡稳定性分析中的适用性分析[D]. 武汉:中国地质大学,2008.
YANG Youcheng. Research on applicability of shear strength reduction method in slope stability analysis [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2008.
(责任编辑 杨小丽)