

矿用高强无机锚固材料性能优化试验

董广乐, 蒋帅旗*

(永煤集团股份有限公司 城郊煤矿, 河南 永城 476600)

摘要: 巷道底板高预应力锚索支护是解决巷道底板底鼓的有效方法之一, 但由于底板和锚固孔孔底通常含有积水, 导致树脂锚固剂及水泥砂浆锚固剂在底板锚固时锚固效果较差, 锚固力低, 锚固力衰减较快。因此, 以自主研发的锚固原材料为基础, 通过正交试验研究硅灰、矿粉、偏高岭土、聚丙烯纤维素对锚固材料性能的影响, 并通过 SPSS 数据分析软件对试验结果进行方差、极差以及 Duncan 多重比较分析, 得到当水灰比为 0.4, 添加的硅灰、矿粉、偏高岭土、聚丙烯纤维素质量分别占锚固原材料总质量的 1.50%, 0.10%, 12.00%, 0.05% 时, 锚固材料固化体的抗压强度较强。

关键词: 锚固材料; 方差; 极差; Duncan 多重比较; 抗压强度

中图分类号: X936; TD322 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2024)01-0021-05

Experimental on Performance Optimization of High-Strength Inorganic Anchoring Materials for Mining

DONG Guangle, JIANG Shuaiqi

(Chengjiao Mine, Yong Coal Group Co., Ltd., Yongcheng 476600, China)

Abstract: The high prestressed anchor cable support of the roadway floor is one of the effective methods to solve the floor heave of the roadway. However, since the bottom plate and the bottom of the anchoring hole usually contain water, the anchoring effect of resin anchoring agent and cement mortar anchoring agent is poor during the bottom plate the anchoring force is low, and the fixed force decay is fast. Therefore, based on the self-developed anchoring raw materials, the influences of silica fume, mineral powder, metakaolin and polypropylene cellulose on the properties of anchoring materials are studied by orthogonal test, and through SPSS data analysis software, the test results are analyzed for variance, range, and Duncan multiple comparisons. Results show that when the water-cement ratio is 0.4, and the additive amount of silica fume, mineral powder, metakaolin and polypropylene cellulose accounts for 1.50%, 0.10%, 12.00% and 0.05% of the total amount of anchoring raw materials, respectively. The compressive strength of anchoring material solidified body is stronger.

Keywords: anchoring material; variance; range; Duncan multiple comparison; compressive strength

煤矿开采深度不断增加, 地应力强度逐渐增大, 容易导致巷道底板出现明显的底鼓变形^[1-2]。巷道底鼓问题成为巷道围岩控制技术发展的瓶颈^[3-4]。

底板高强预应力锚索加固是治理深井巷道底鼓的有效办法之一^[5-6], 其中锚固材料主要包括树脂锚固剂和水泥砂浆锚固剂^[7]。煤矿常用的锚固剂树脂有 3 大类^[8]: 不饱和聚酯树脂、环氧树脂和聚氨酯, 树脂锚固剂一般由聚合物树脂、高强填料、固化剂、促进剂及各种助剂组成, 其黏结强度大、固化快、安全可靠性强^[9], 已广泛应用于煤巷锚杆支护。水泥砂浆锚固剂是由无机材料水泥加改性剂混合而成, 具有速凝、快硬、微膨胀、环保、成本低等特点^[10]。在无机锚固材料方面, 李海龙等^[11]通过试验发现硅灰可以有效提高混

凝土的抗压强度,促进水泥的水化反应;陈超等^[12]通过试验发现掺加适量硅灰可以缩短掺有无碱速凝剂水泥浆体的凝结时间,提高喷射混凝土的抗压强度,降低喷射混凝土的回弹率,同时可以促进水泥水化;高明等^[13]通过在水泥中掺加微硅粉和石英砂制备磷酸镁水泥砂浆,研究发现这种材料固化体早期强度随着硅灰的掺入呈现先增大后减小的现象.已有研究表明矿物掺合料可以优化水泥混凝土的某些特性,促进水泥的水化反应,能有效提高水泥混凝土的力学性能和密实度.

现有的树脂锚固剂在搅拌推进过程中,若遇钻孔积水,由于固化剂易溶于水,遇水稀释,导致树脂锚固剂固化后的锚固强度降低,后期锚固力衰减速度较快.而现有的水泥砂浆锚固剂固化强度低、脆性大,在受动压影响时锚固力衰减较快.鉴于此,本文通过正交优化试验研究硅灰、矿粉、偏高岭土和聚丙烯纤维素掺量对锚固材料性能的影响,得出不同因素对锚固材料性能影响的大小,对无机锚固材料的研制具有指导意义.

1 试验

1.1 试验材料与试样制备

自主研发的锚固原材料主要成分为铝酸盐水泥、速凝剂、0.45 mm细骨料和减水剂,其中速凝剂、0.45 mm细骨料、减水剂各占锚固原材料质量百分比为0.3%,15.0%,0.2%;锚固原材料固化体28 d抗压、抗折强度分别为56.52 MPa和8.91 MPa,其固化体初、终凝固时间分别为5.32 min和10.61 min.

试验用外加剂为硅灰、偏高岭土、矿粉以及聚丙烯纤维素.其中硅灰购买于四川朗天资源有限公司,偏高岭土购买于山西蒲百高岭土有限公司,矿粉购买于灵寿县振英矿产品加工厂,聚丙烯纤维素购买于河南天盛化学工业有限公司.

按试验方案比例配制的锚固材料用40 mm×40 mm×40 mm的模具制作成标准试件,待试样凝固后拆模编号,放入SHBY-40B恒温恒湿养护箱进行养护,将养护后的试件采用RLW-2000型岩石三轴流变仪测试其抗压强度,并采用位移加载方法进行轴向加载,设定试验机加载速率为0.05 mm/s,初始荷载为5 kN.

1.2 试验方案

试验以锚固原材料为基础材料,研究硅灰、矿粉、偏高岭土以及聚丙烯纤维素等添加剂对锚固材料性能的影响.设计4个因素(A:硅灰,B:矿粉,C:偏高岭土,D:聚丙烯纤维素)及一组空白组(空白列),每个因素4个水平,如表1所示.水灰比为0.4时,以锚固材料3 d龄期的抗压强度为指标设计 $L_{16}(4^5)$ 正交试验,其结果通过SPSS数据分析软件进行处理,正交试验结果如表2所示.

表1 正交因素及其水平

水平	因素				
	A(硅灰)/%	B(矿粉)/%	C(偏高岭土)/%	D(聚丙烯纤维素)/%	E(空白列)
1	0.20	0.10	0.50	0.05	0
2	0.50	0.50	3.00	0.10	0
3	1.50	1.00	7.00	0.15	0
4	3.00	2.00	12.00	0.30	0

表2 正交试验结果

编号	因素					检测标准
	A(硅灰)	B(矿粉)	C(偏高岭土)	D(聚丙烯纤维素)	E(空白列)	3 d抗压强度/MPa
F ₁	1(0.20)	1(0.10)	1(0.50)	1(0.05)	1(0)	45.12
F ₂	1(0.20)	2(0.50)	2(3.00)	2(0.10)	2(0)	48.54
F ₃	1(0.20)	3(1.00)	3(7.00)	3(0.15)	3(0)	51.14
F ₄	1(0.20)	4(2.00)	4(12.00)	4(0.30)	4(0)	54.34
F ₅	2(0.50)	1(0.10)	2(3.00)	3(0.15)	4(0)	56.46
F ₆	2(0.50)	2(0.50)	1(0.50)	4(0.30)	3(0)	51.45
F ₇	2(0.50)	3(1.00)	4(12.00)	1(0.05)	2(0)	60.21

续表 2

编号	因素					检测标准
	A(硅灰)	B(矿粉)	C(偏高岭土)	D(聚丙烯纤维素)	E(空白列)	3 d 抗压强度/MPa
F ₈	2(0.50)	4(2.00)	3(7.00)	2(0.10)	1(0)	56.12
F ₉	3(1.50)	1(0.10)	3(7.00)	4(0.30)	2(0)	58.25
F ₁₀	3(1.50)	2(0.50)	4(12.00)	3(0.15)	1(0)	60.24
F ₁₁	3(1.50)	3(1.00)	1(0.50)	2(0.10)	4(0)	52.12
F ₁₂	3(1.50)	4(2.00)	2(3.00)	1(0.05)	3(0)	56.87
F ₁₃	4(3.00)	1(0.10)	4(12.00)	2(0.10)	3(0)	61.54
F ₁₄	4(3.00)	2(0.50)	3(7.00)	1(0.05)	4(0)	58.12
F ₁₅	4(3.00)	3(1.00)	2(3.00)	4(0.30)	1(0)	54.41
F ₁₆	4(3.00)	4(2.00)	1(0.50)	3(0.15)	2(0)	49.52

注:括号外的数字为各因素水平;括号内的数据为各因素质量百分比, %.

2 试验结果分析

2.1 各因素对 3 d 单轴抗压强度显著性分析

根据正交试验结果(表 2),计算各因素的极差和均值,3 d 抗压强度极差分析如表 3 所示,3 d 抗压强度均值与各因素关系如图 1 所示.由表 3 可知,硅灰、矿粉、偏高岭土、聚丙烯纤维素对锚固材料 3 d 抗压强度的影响大小顺序为偏高岭土>硅灰>矿粉>聚丙烯纤维素.由图 1 可以看出,锚固材料的 3 d 抗压强度随着硅灰掺量的增加先增加后减小(图 1a),随矿粉掺量的增加呈逐渐减小的趋势(图 1b),随偏高岭土掺量的增加而增加(图 1c).

表 3 各因素 3 d 抗压强度极差分析

MPa

项目	A(硅灰)	B(矿粉)	C(偏高岭土)	D(聚丙烯纤维素)
K ₁	199.14	221.37	198.21	220.32
K ₂	224.24	218.35	216.28	218.32
K ₃	227.48	217.88	223.63	217.36
K ₄	223.59	216.85	236.33	218.45
R	28.34	4.52	38.12	2.96

注:K₁, K₂, K₃, K₄ 分别为各因素在 1, 2, 3, 4 水平的平均值; R 为极差.

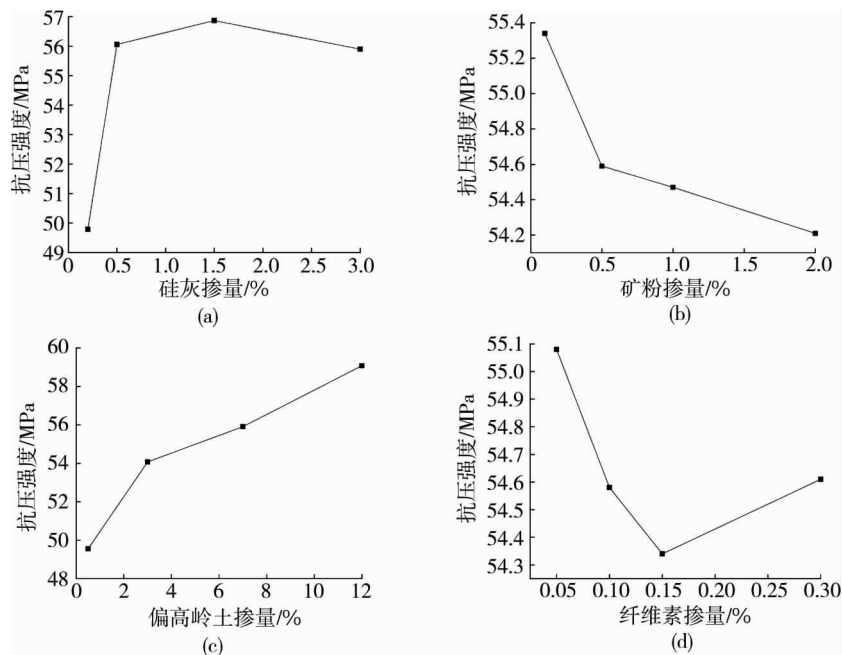


图 1 试样 3 d 抗压强度均值与各因素掺量变化关系

为了分析试验误差对试验结果的影响,对正交试验结果进行方差分析,并设置空白组作为误差分析项,如表4所示.由表4可知,C(偏高岭土)的 p 值为0.009,A(硅灰)的 p 值为0.015,均小于0.05,因此,偏高岭土和硅灰对锚固材料3d抗压强度具有显著性;B(矿粉)的 p 值为0.717,D(聚丙烯纤维素)的 p 值为0.893,均大于0.05,因此,矿粉和聚丙烯纤维素对锚固材料3d抗压强度无显著性.由此可知,这4种因素对锚固材料3d抗压强度的影响程度从大到小依次为偏高岭土、硅灰、矿粉、聚丙烯纤维素.

表4 各因素3d抗压强度方差分析

差异源	偏差平方和	自由度	均方	F 比	p 值	显著性
A(硅灰)	128.560	3	42.85	21.99	0.015	显著
B(矿粉)	2.830	3	0.94	0.48	0.717	
C(偏高岭土)	190.200	3	63.40	32.54	0.009	显著
D(聚丙烯纤维素)	1.150	3	0.38	0.20	0.893	
E(空白组)	5.846	3	1.95			
随机误差	5.846	12				
总和	328.586	15				

2.2 各因素对3d单轴抗压强度的Duncan多重比较

Duncan多重比较结果如表5所示.由表5可知,A因素的4个水平中,第1水平(硅灰掺量为0.20%)对锚固材料3d抗压强度影响较小,第2,3,4水平对锚固材料3d抗压强度的影响显著性差别不大,其中第3水平对锚固材料3d抗压强度的影响显著性最大,因此,A因素选择第3水平,即硅灰掺量为1.50%时对锚固材料的3d抗压强度影响效果最好;同理分析可得,矿粉掺量为0.10%时对锚固材料的3d抗压强度影响效果最好,偏高岭土掺量为12.00%时对锚固材料的3d抗压强度影响效果最好,聚丙烯纤维素掺量为0.05%时对锚固材料的3d抗压强度影响效果最好.因此,对锚固材料3d抗压强度影响效果最佳的正交组合为A3B1C4D1,即硅灰掺量为材料总质量的1.50%,矿粉掺量为材料总质量的0.10%,偏高岭土掺量为材料总质量的12.00%,聚丙烯纤维素掺量为材料总质量的0.05%时,对锚固材料3d抗压强度的影响效果最好.

表5 各因素对锚固材料3d抗压强度的Duncan多重比较

水平	个案数	A子集		B子集		C子集		D子集
		1	2	1	1	2	3	1
1	4	49.785 0		55.342	49.553			55.080
2	4		56.060 0	54.588		54.070		54.580
3	4		56.870 0	54.470		55.908		54.340
4	4		55.897 5	54.213			59.083	54.613
显著性		1.000	0.395	0.325	1.000	0.160	1.000	0.496

3 结论

1) 硅灰、矿粉、偏高岭土、聚丙烯纤维素对锚固材料抗压强度的影响大小依次为偏高岭土、硅灰、矿粉、聚丙烯纤维素.

2) 硅灰、矿粉、偏高岭土、聚丙烯纤维素掺量分别占锚固原材料总质量的1.50%,0.10%,12.00%,0.05%时,锚固材料固化体的3d抗压强度最高,试验结果对高强无机锚固材料的研究具有指导意义.

参考文献:

- [1] 刘成,宋选民,刘叶,等.大断面回采巷道层状底板底臃机理及其防治对策[J].煤炭学报,2014,39(6):1049-1055.
- [2] 郑朋强,陈卫忠,谭贤君,等.软岩大变形巷道底臃破坏机制与支护技术研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(增刊1):3143-3150.
- [3] 文志杰,卢建宇,肖庆华,等.软岩回采巷道底臃破坏机制与支护技术[J].煤炭学报,2019,44(7):1991-1999.
- [4] 高明中.巷道压曲性底臃的机理与控制[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2008,28(1):20-24.
- [5] GUO G Y, KANG H P, QIAN D Y, et al. Mechanism for controlling floor heave of mining roadways using reinforcing roof and sidewalls in underground coal mine[J]. Sustainability, 2018, 10(5): 1413.
- [6] 杨仁树,朱晔,李永亮,等.弱胶结软岩巷道层状底板底鼓机理及控制对策[J].采矿与安全工程学报,2020,37(3):443-450.
- [7] 王忠荣,马利洋,何旭东.环氧树脂锚固剂[J].上海建材,2003(4):16-19.
- [8] 郑重远,黄乃炯.树脂锚杆及锚固剂[M].北京:煤炭工业出版社,1983.
- [9] 陈梅.浅谈树脂锚固剂生产工艺及技术改造[J].科技创新导报,2019,16(12):111-112.
- [10] 王晓翠,王晓利.快硬水泥锚固剂的试验研究[J].混凝土,2010(9):62-64.
- [11] 李海龙,徐颖,汪海波,等.硅灰对橡胶混凝土抗压强度与吸能性能影响试验研究[J].硅酸盐通报,2019,38(7):2222-2227.
- [12] 陈超,孙振平.硅灰对掺有无碱速凝剂水泥浆体性能的影响[J].材料导报,2019,33(14):2348-2353.
- [13] 高明,刘宁,陈兵.微硅粉改性磷酸镁水泥砂浆试验研究[J].建筑材料学报,2020,23(1):29-34.