

# 固废基硫铝酸盐水泥固化低液限粉土的试验研究

吕昭元<sup>1</sup>, 杨强<sup>2</sup>, 余利军<sup>2</sup>, 刘澎<sup>3</sup>, 胡天一<sup>1</sup>, 管延华<sup>1\*</sup>

(1. 山东大学 齐鲁交通学院, 山东 济南 250002; 2. 济南金衢公路勘察设计研究有限公司;  
3. 济南金诺公路工程监理有限公司)

**摘要:**为探究固废基硫铝酸盐水泥对低液限粉土的固化规律和效果,开展无侧限抗压强度、劈裂强度、CBR、XRD、TGA和SEM等试验,研究复掺不同比例硫铝酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的固化剂对固化土力学性能的影响及其微观机理。研究表明:相对于普通硅酸盐水泥,固废基硫铝酸盐水泥水化产物中钙矾石含量较高,水化硅酸钙含量较少。单掺掺量为6%的固废基硫铝酸盐水泥固化土,其无侧限抗压强度前期增长较快,后期增长相对缓慢,28 d强度可以达到0.83 MPa;确定胶凝材料掺量为6%,将固废基硫铝酸盐水泥和普通硅酸盐水泥进行复掺时,随普通硅酸盐水泥占胶凝材料比例的增加,固化土抗压强度和劈裂强度逐渐提高,膨胀量逐渐降低。当普通硅酸盐水泥比例由60%上升到70%时,固化土强度提高最为显著,两种水泥的互补性发挥得最好,CBR可达235%,28 d强度可达2.25 MPa。

**关键词:** 硫铝酸盐水泥; 固废基; 力学性能; 微观机理

低液限粉土由于其粉粒含量高,颗粒较均匀且持水能力弱,将其作为路基填料时,不易压实,路基的水稳定性和动稳定性较差。运营期间易产生承载力低、路基强度衰减速度快和路面前期损坏严重等问题,对行车舒适性及安全性造成了极大的影响,需要对其进行加固处理。无机结合料稳定材料可有效提高粉土路基强度及耐久性,具有强度高、稳定性好、抗冻能力强、结构自身自成板体等特点。目前常用的无机结合料主要有普通硅酸盐水泥、石灰和粉煤灰等。近年来,不少学者对硫铝酸盐水泥在固化土中的应用展开了研究:将硫铝酸盐水泥和石膏作为膨胀性组分,普通硅酸盐水泥作为胶结性组分,3种材料复掺固化软土,其固化土强度与单掺水泥的固化土强度相比可大幅度提高。但石膏存在最佳掺量,若石膏掺量过多,硫铝酸盐水泥和石膏反应生成钙矾石后,剩余的石膏还将与土中的铝发生反应继续生成钙矾石,后期形成的钙矾石会破坏早期固化土结构,从而使固化土抗压强度降低;将硫铝酸盐水泥作为主固化材料,选取水泥基渗透结晶型防水材料(CCCW)作为固化土外掺剂,复掺后可更好地填充固化土孔隙,提高固化土密实度。4%的CCCW复合到12%的硫铝酸盐水泥中,固化土强度要高于20%的硫铝酸盐水泥固化土强度,大大提高了固

化土的力学性能。

由现有研究结果可以看出:将硫铝酸盐水泥作为路基土的固化剂能取得较好的固化效果。但是,生产传统的硫铝酸盐水泥需消耗大量的石灰石、铝矾土和石膏等,不仅造价较高,而且需要大量开采山体,对自然环境造成不可恢复的破坏;另一方面,中国工业固废产量大,利用率较低,不仅占用大量土地,而且带来了严重的环境污染。有研究者将工业固体废物赤泥、脱硫石膏、电石渣和铝灰做为原料,烧制固废基硫铝酸盐水泥。水泥砂浆试件3 d强度可达到56 MPa,力学及耐久性能优越。目前,还没有关于利用固废基硫铝酸盐水泥固化低液限粉土的相关研究报道。

该文利用固废基硫铝酸盐水泥与普通硅酸盐水泥复掺作为固化土胶凝材料,通过无侧限抗压强度、劈裂强度、CBR、XRD、TGA和SEM等试验,探究固化土的力学性能及微观机理,并确定二者的最佳比例。

## 1 试验材料及试验方案

### 1.1 试验材料

#### (1) 粉土

试验所用粉土取自山东聊城。该粉土的液限为

收稿日期:2019-07-04

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(编号:ZR2016EEM03)

作者简介:吕昭元,男,硕士研究生。E-mail:1365866766@qq.com

\* 通信作者:管延华,男,博士,副教授。E-mail:1694127958@qq.com

31.2%，塑限为 21.6%，塑性指数为 9.6。其最佳含水率为 15.3%，最大干密度为 1.84 g/cm<sup>3</sup>。土颗粒级配曲线如图 1 所示，颗粒粒径为 0.001~0.09 mm，且黏粒较少，属于低液限粉土。

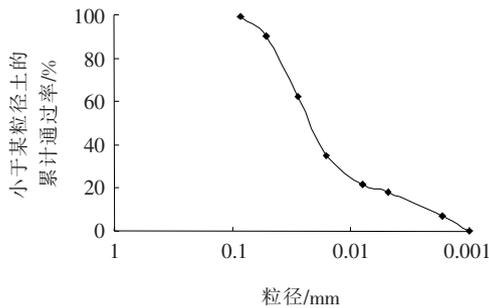


图 1 粉土颗粒级配曲线

表 1 水泥的化学成分

水泥	CaO/%	SiO <sub>2</sub> /%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%	MgO/%	SO <sub>3</sub> /%
普通硅酸盐水泥	64.63	21.96	4.73	3.68	2.59	0.30
固废基硫铝酸盐水泥	40.82	8.71	25.86	8.64	2.31	14.40

材料的比例(0%、30%、60%、70%、80%、100%)，通过无侧限抗压强度、劈裂强度和 CBR 试验探究其比例变化对固化土强度的影响，确定最佳比例。并利用 TGA、XRD 和 SEM 等试验分析水泥及改良土的成分及微观形态，探究微观机理。各固化剂配比及对应固化土的最佳含水率和最大干密度见表 2。

表 2 固化剂配比及对应固化土的最佳含水率和最大干密度

编号	(硫铝酸盐水泥/胶凝材料)/%	(普通硅酸盐水泥/胶凝材料)/%	最佳含水率/%	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
S100-0	100	0	16.4	1.80
S70-30	70	30	16.4	1.81
S40-60	40	60	16.2	1.82
S30-70	30	70	16.0	1.82
S20-80	20	80	16.1	1.83
S0-100	0	100	15.8	1.82

### 1.3 试验方法

根据相关试验规程进行无侧限抗压强度、劈裂强度及 CBR 试验；采用型号为 Miniflex 600 的 X 射线衍射仪分析固化土成分，扫速为 10°/min，范围为 10°~90°；采用型号 S-4800 场发射扫描电镜观测水化产物的微观结构和微观形貌；采用型号为 NETZSCH STA 449C 的热分析仪对两种水泥净浆试样进行热重分析，

### (2) 普通硅酸盐水泥及固废基硫铝酸盐水泥

此次试验所用的普通硅酸盐水泥采用山东产 P. O. 42.5 级水泥。固废基硫铝酸盐水泥由脱硫石膏、赤泥、铝灰、电石渣烧制而成，原料均为山东某工业园排放的工业固废。二者的化学成分见表 1。

### 1.2 试验设计

相关研究结果表明：在固化土形成最佳结构时，需要固化剂中的胶结性组分与膨胀性组分共同发挥作用。胶结性组分包裹黏结土颗粒，膨胀性组分和胶结性组分共同填充土颗粒间空隙，从而增加固化土的密实性，改善各项性能。此次试验采用 P. O. 42.5 级水泥作为胶结性组分，硫铝酸盐水泥作为膨胀性组分，设定胶凝材料总掺量为 6%，改变硫铝酸盐水泥占胶凝

氮气氛，扫描温度区间为 25~950 °C，升温速率为 10 °C/min。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 无侧限抗压强度

不同配比的固化剂对低液限粉土无侧限抗压强度的影响规律如图 2 所示。

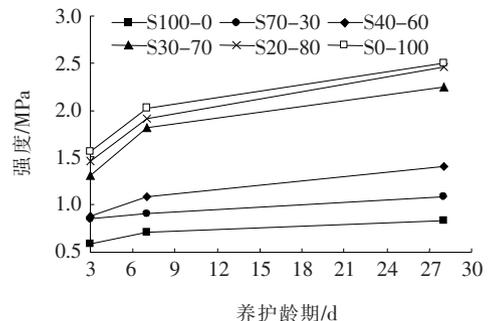


图 2 不同配比固化土抗压强度随龄期的变化规律

由图 2 可知：固化土强度随龄期的增长而不断增加，且强度增长速度逐渐变缓。以硫铝酸盐水泥和普通硅酸盐水泥复掺作为复合固化剂，随着普通硅酸盐水泥占胶凝材料比例的增加，固化土的无侧限抗压强度整体呈增长趋势。其原因在于，固化土的强度主要由固化剂的胶结作用和填充作用共同决定。普通硅酸盐水泥水化生成的水化硅酸钙在固化土中主要作为胶

结性组分,用于加强土粒之间的连接强度。硫铝酸盐水泥水化生成的钙矾石主要作为膨胀性组分,用于填充土粒间的缝隙,增加密实度。随着普通硅酸盐水泥比例的增加,水化生成的胶结物质越多,对土颗粒的胶结作用就越强,固化土的强度不断提高。当掺量由60%上升到70%时,固化土强度提高最为显著,两种水泥的互补性发挥最好,故取70%为普通硅酸盐水泥的最佳掺入比例。

## 2.2 劈裂强度

选取胶凝材料掺量为6%,硫铝酸盐水泥与普通硅酸盐水泥复掺比例为3:7的固化土(S30-70)作为研究对象。对比其与纯硫铝酸盐水泥(S100-0)及纯普通硅酸盐水泥固化土(S0-100)的劈裂强度,强度随龄期的变化规律如图3所示。

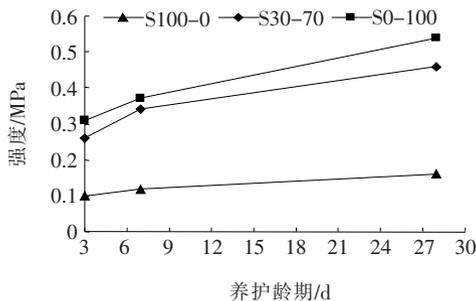


图3 不同配比固化土劈裂强度随龄期的变化规律

由图3可知:纯硫铝酸盐水泥劈裂强度呈现前期增长迅速,后期缓慢增长的趋势,28 d劈裂强度可以达到0.16 MPa。随着普通硅酸盐水泥掺量的增加,固化土劈裂强度逐渐增长。相比于纯普通硅酸盐水泥固化土,复掺硫铝酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的固化土前期强度增长较快,说明硫铝酸盐水泥起到了一定的早强效果,使固化土在早期就可以达到较高的劈裂强度。

## 2.3 承载比及膨胀量

图4为3种配比固化土的CBR值及膨胀量。

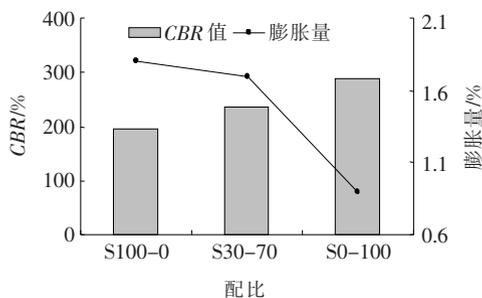


图4 不同配比固化土的CBR值及膨胀量

由图4可知:随着P. O. 42.5级水泥占胶凝材料

比例的增加,固化土CBR值不断增加,膨胀量逐渐降低。3种配比固化土CBR值均较高,远远大于规范对路基填料强度的最高要求( $>8\%$ )。CBR试件的膨胀量均小于2%。由此可知其水稳定性及力学性能均较好。

## 2.4 微观机理

### 2.4.1 TGA(热重)分析

图5为硫铝酸盐水泥和普通硅酸盐水泥净浆试件养护28 d龄期后的TGA曲线和DTG曲线。

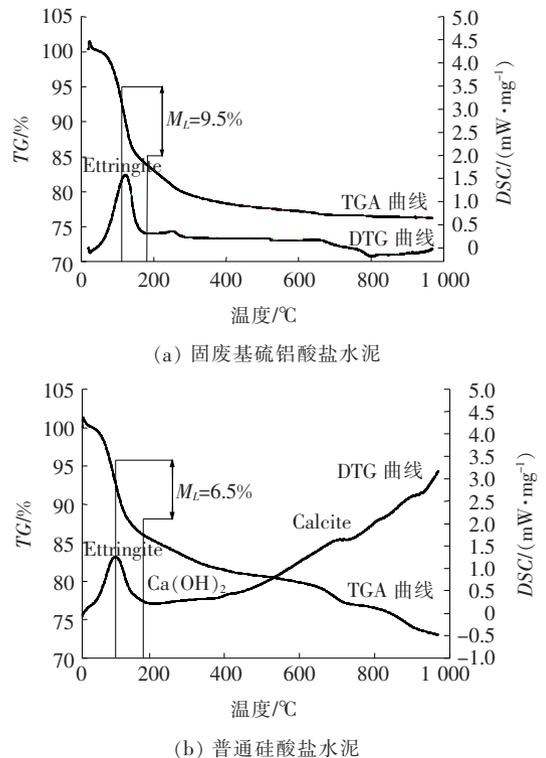


图5 水泥净浆试样TGA分析

由图5(a)可知:硫铝酸盐水泥的热失重主要发生于50~200°C,DTG曲线在125°C左右达到了峰值,超过200°C后,质量随温度的升高平稳下降,后期失重不明显。相关研究表明:钙矾石一般在110~180°C时失重,产生明显的吸热效应。故该研究选取110~180°C为对比温度,28 d时固废基硫铝酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的质量损失 $M_L$ 分别为9.5%和6.5%。说明硫铝酸盐水泥水化生成的钙矾石相对较多。由图5(b)可知:普通硅酸盐水泥与硫铝酸盐水泥的TGA曲线有所不同,呈不断下降趋势。且DTG曲线在400~450°C和650~720°C之间出现了明显的峰值,其分别由于氢氧化钙和碳酸钙的分解所致。而水化硅酸钙的热分解持续进行,随温度的升高,普通硅酸盐水泥的热

重分析曲线下降程度明显大于固废基硫铝酸盐水泥,说明其水化产生的水化硅酸钙要远高于固废基硫铝酸盐水泥。

#### 2.4.2 XRD

图 6 为素土及不同配比(S100-0、S30-70、S0-100)固化土进行 7 d 养护后的 X 射线衍射分析结果。

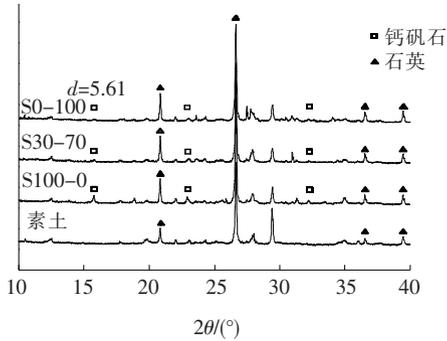


图 6 不同配合比固化土 X 射线衍射分析图

钙矾石对应的特征峰值通常为 5.61、3.87 和 2.56,而且 5.61 处出现的钙矾石峰值不受其他矿物的影响,容易辨别。由图 6 可知:素土的 XRD 衍射结果中主要物质为矿物石英,未检测出钙矾石。试样

(S100-0)的衍射结果中,3 个特征峰均出现了钙矾石,相比于其他两种配比,其固化土中的钙矾石含量最高,这也就可能导致了纯硫铝酸盐水泥固化土胶结性较差,膨胀性较强,抗压强度及劈裂强度较低的现象。

#### 2.4.3 SEM

图 7 为 S100-0、S30-70、S0-100 共 3 种固化剂固化低液限粉土在标准养护 7 d 时放大 5 000 倍的 SEM 照片。图 7(a)为单掺硫铝酸盐水泥固化土试样的微观照片,由图 7(a)可以看出:钙矾石填充于土颗粒的缝隙中,形成了固化土的早期强度。由于龄期较短,其形态大多成短棒状。图 7(c)为单掺 P. O. 42.5 级水泥固化土的微观图片,其钙矾石形态多为细针状,相比于单掺硫铝酸盐水泥固化土,其生成的钙矾石少而细,对土粒空隙的填充作用较差,但土粒表面生成的水化硅酸钙较多。图 7(b)为复掺硫铝酸盐水泥和 P. O. 42.5 级水泥的固化土微观图片,可以看到两种水泥复掺形成的水化产物与一种水泥单掺形成的产物有所不同,水化初期,其钙矾石相互交织在一起,未形成单独的棒状或针状结构,右下角还可以看出少量水化硅酸钙的絮状形态。

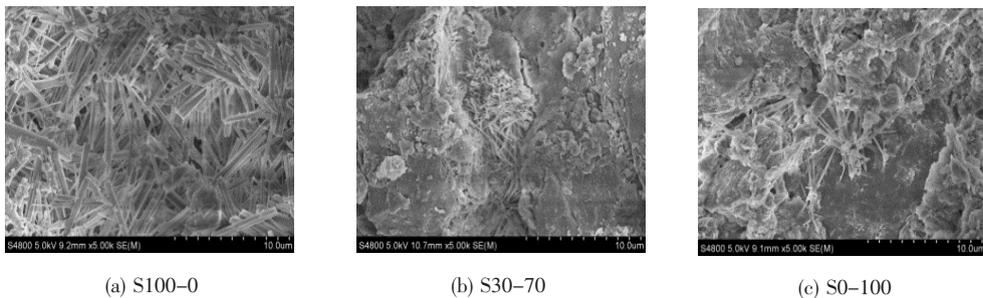


图 7 3 种固化土标准养护 7 d 的 SEM 照片

图 8 为 S100-0、S30-70、S0-100 共 3 种固化剂固化有机质土在标准养护 28 d 时放大 10 000 倍的照片,图 8(a)与图 7(a)相比,其生成的钙矾石由短棒状变成了长棒状,其数量更多且分布更加致密,其钙矾石

尺寸在 3 种配比中为最大。图 8(b)中可以看出硫铝酸盐水泥和 P. O. 42.5 水泥复掺生成的钙矾石的形态既有细针状的,又有长棒状的。相对于其早期形态有了很大的变化。其钙矾石尺寸大小介于纯硫铝酸盐水

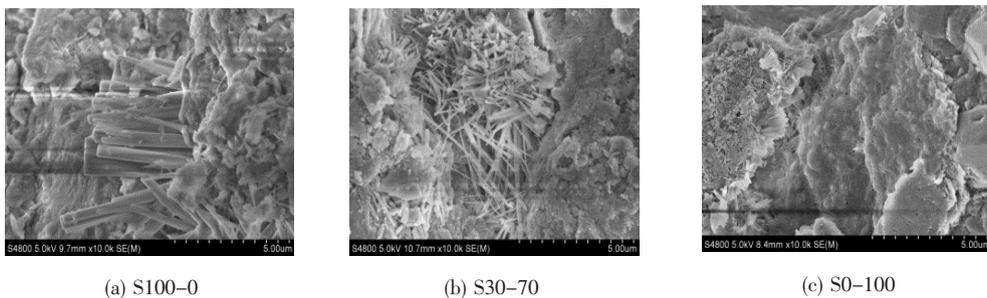


图 8 3 种固化土标准养护 28 d 的 SEM 照片

泥和纯普通硅酸盐水泥水化产生的钙矾石尺寸之间。图8(c)水化产物出现了较多的絮状水化硅酸钙,起到胶结土颗粒的作用,少量短棒状钙矾石填充于土粒之间,二者共同发挥作用,为固化土提供强度。

### 3 结论

通过室内试验,研究了普通硅酸盐水泥和固废基硫铝酸盐水泥不同复掺比例对改良低液限粉土的无侧限抗压强度及劈裂强度的影响,确定了最优比例,并对最优比例进行了CBR值、膨胀量的测定及微观机理研究。主要结论如下:

(1) 固废基硫铝酸盐水泥的水化产物钙矾石含量较多,水化硅酸钙含量较低。

(2) 复掺硫铝酸盐水泥和普通硅酸盐水泥,随普通硅酸盐水泥掺入比例的提高,固化土抗压强度不断提高。当掺量由60%上升到70%时,固化土强度提高最为显著,两种水泥的互补性发挥最好,故选取3:7为复掺硫铝酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的最佳比例。

(3) 固废基硫铝酸盐水泥和普通硅酸盐水泥水化后生成的钙矾石形态差异明显,硫铝酸盐水泥水化生成的钙矾石主要为长棒状,其尺寸较大且数量较多;普通硅酸盐水泥水化生成的钙矾石主要为短棒状,尺寸较小。

(4) 随龄期的增长,固化土中钙矾石数量逐渐增多,尺寸逐渐增大,对土粒间的缝隙有更好的填充作用。加之水化硅酸钙对土粒间的胶结作用,从而使固化土强度不断增长。

### 参考文献:

[1] 封喜波. 不同无机结合料改良低液限粉土工程特性试验研究[J]. 交通世界, 2018(31).

[2] 于一凡, 徐婷婷, 李晓龙, 等. 黄泛区粉质土路基填料压实特性研究[J]. 建材发展导向(下), 2017(10).

[3] 王兢, 倪文. 几种工业固体废弃物对土壤的固化作用[J].

金属矿山, 2010(6).

[4] 庞文台. 掺合粉煤灰的复合水泥土力学性能及耐久性试验研究[D]. 内蒙古农业大学博士学位论文, 2013.

[5] 莫奕新, 庞建勇, 黄金坤, 等. 粉煤灰-脱硫石膏复合水泥土渗透性试验研究[J]. 新型建筑材料, 2018(1).

[6] 邓永锋, 吴子龙, 刘松玉, 等. 地聚合物对水泥固化土强度的影响及其机理分析[J]. 岩土工程学报, 2016(3).

[7] 杨林, 刘雨彤, 宋玉鑫. 外加剂改性水泥石灰土力学及收缩特性试验研究[J]. 中外公路, 2018(1).

[8] 夏永杰, 王丽艳, 刘瀚森. 掺废弃钢渣的水泥土强度特性试验研究[J]. 中外公路, 2016(5).

[9] 魏建国, 刘庭, 张军辉, 等. 石灰改良含砂低液限土在高速公路拓宽路基中的应用研究[J]. 中外公路, 2016(1).

[10] 李战国, 宁建国, 黄新, 等. 复合型软土固化剂中膨胀性组分的优化方法[J]. 中国港湾建设, 2011(2).

[11] 金亮. 硫铝酸盐基土壤固化剂研究[D]. 沈阳建筑大学硕士学位论文, 2011.

[12] 杨康辉, 欧忠文, 肖寒冰, 等. CCCW对硫铝酸盐水泥固化土强度的影响[J]. 后勤工程学院学报, 2016(1).

[13] 潘嘉周. 固体废物处理处置技术研究[J]. 环境与发展, 2018(8).

[14] 王兢, 倪文. 几种工业固体废弃物加固氯盐渍土的试验研究[J]. 中外公路, 2011(4).

[15] 王文龙, 田伟, 段广彬, 等. 完全以工业固废为原料制备硫铝酸盐水泥的研究与应用[J]. 水泥工程, 2015(6).

[16] 黄新, 宁建国, 许晟, 等. 固化土结构的形成模型[J]. 工业建筑, 2006(7).

[17] JTG E40-2007 公路土工试验规程[S].

[18] JTG E51-2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].

[19] JTG F10-2006 公路路基施工技术规范[S].

[20] 杨代六, 徐迅. 磷渣对硅酸盐水泥水化硬化的影响研究[J]. 混凝土, 2006(12).

[21] 周永进, 李有光. 硅酸盐水化产物的热分析曲线及其特征[J]. 土木建筑与环境工程, 1999(1).

[22] 黄新, 许晟, 宁建国. 含铝固化剂固化软土的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(1).