

# 专业硕士学位论文

机制砂泥粉含量推定及其对减水剂掺量的影响研究

2023年06月08日

## 摘 要

机制砂粉体含量在一定程度上决定了机制砂质量的好坏。而机制砂粉体的 MB 值试验只能定性反映小于 0.075mm 的粉体主要是母岩矿石粉（本文中为石灰石粉，简称石粉）还是矿石夹带的泥粉（简称泥粉），并且在试验操作时，主观因素影响较大。机制砂中含泥粉较多，会降低聚羧酸减水剂的减水分散性能，从而影响混凝土的工作性能，而混凝土的工作性能在实际生产中尤为重要，因此，降低 MB 值测试过程中的主观影响，定量分析机制砂中泥粉的含量占比，并且研究不同粉体含量对聚羧酸减水剂掺量的影响，从而对机制砂中不同泥粉含量下的减水剂增掺量做出预判，可为混凝土生产提供有价值的参考。

本文以不同粘土组分、泥粉和石粉为主要研究对象，基于 MATLAB 编程平台，利用 HSV 图像空间，结合计算机视觉设计了机制砂亚甲蓝值智能检测系统，该系统不仅具有测试过程智能化的优点，而且基于计算机视觉的亚甲蓝检测系统的判断准确性较高，能够较为精准的识别。

针对不同粘土组分以及石粉开展了 MB 值试验、膨胀容试验以及水化放热试验，结果表明 MB 值吸附性大小排序依次是蒙脱土>矿山泥粉>伊利土>高岭土>石灰石粉，而水化放热试验结果表明在未掺聚羧酸减水剂的条件下，含不同粉体的水泥，其水化放热速率（以所含粉体种类排序）大小为蒙脱土>高岭土>伊利土>石灰石粉>矿山泥粉，但在掺入减水剂后，在测试周期内其组分的水化放热速率基本同步降低，放热量也比未掺减水剂的试验组同比降低。对含不同粉体的水泥净浆开展聚羧酸减水剂增掺试验，结果表明泥粉对于聚羧酸减水剂的吸附非常明显，合适掺量范围内，石粉的掺入对于净浆强度起一定增强作用；而泥粉的掺入会降低净浆的强度，泥粉含量较多时，增掺减水剂对净浆流动度和强度的改善作用有限。

根据机制砂 MB 值试验结果，分别构建泥粉和石粉含量推定的 SSA-Elman 神经网络模型，通过模型评价指标结果表明泥粉含量的推定精度明显大于石粉的，因此选择泥粉含量推定模型。并设计了基于 MATLAB 的泥粉含量推定模型的 APP。通过不同粉体占比下的增掺减水剂净浆试验，建立了关于不同粉体占比下的增掺减水剂模型，在砂浆和混凝土试验中验证了增掺减水剂模型的适用程度，结果表明该模型对于砂浆的适用程度好于混凝土。

**关键词：** 机制砂， MB 值， 图像识别， 聚羧酸减水剂， 神经网络

## ABSTRACT

The powder content of the mechanism sand determines the quality of the mechanism sand to a certain extent. And the MB value test of mechanism sand powder can only qualitatively reflect whether the powder smaller than 0.075mm is mainly parent rock ore powder (limestone powder in this thesis, referred to as stone powder) or ore entrained mud powder (referred to as mud powder), and the subjective factors are more influential during the test operation. Therefore, it is important to reduce the subjective influence during the MB value test, to quantitatively analyze the percentage of mud powder in mechanism sand, and to study the influence of different powder contents on the amount of polycarboxylic acid water reducing agent admixture, so that the water reducing agent increase in mechanism sand with different mud powder contents can be studied. This thesis takes the different clay fractions, clay powder and water reducing agent as the basis for the study.

In this thesis, the intelligent detection system of methylene blue value of mechanism sand is designed based on MATLAB programming platform, HSV image space and computer vision, which not only has the advantage of intelligent testing process, but also has high accuracy of judgment based on computer vision of methylene blue detection system and can identify more accurately.

The MB value test, expansion capacity test and hydration exotherm test were carried out for different clay components and stone powder, and the results showed that the order of MB value adsorption was montmorillonite > mine clay powder > ilmenite > kaolinite > limestone powder, while the hydration exotherm test results showed that the hydration exotherm rate (in order of powder type) of cement containing different powders without polycarboxylic acid water reducing agent was Montmorillonite > kaolinite > ilmenite > limestone powder > mine clay powder, but after the water reducing agent was added, the hydration exothermic rate of its components basically decreased simultaneously during the test period, and the exothermic rate was also lower than that of the test group without water reducing agent. The results show that the adsorption of mud powder to polycarboxylic acid water reducing agent is very obvious, and within the suitable dosing range, the admixture of stone powder plays a certain enhancement role in the strength of net slurry; while the admixture of mud powder will reduce the strength of net slurry, and when the content of mud powder is more, the improvement effect of additional water reducing agent on the flowability and strength of net slurry is limited.

According to the results of MB value test of mechanism sand, SSA-Elman neural network models for presumption of mud powder and stone powder content were constructed respectively, and the results showed that the presumption accuracy of mud powder content was significantly greater than that of stone powder, so the presumption model of mud powder content was chosen. The APP based on MATLAB was designed, and the model of water-reducing agent was established through the net slurry test of water-reducing agent with different percentages of powder, and the applicability of the model of water-reducing agent was verified in mortar and concrete tests, and the results showed that the applicability of the model was better for mortar than concrete.

**KEY WORDS:** Mechanized sand, MB value, Image Recognition , polycarboxylates water reducing admixture , neural network

# 目 录

|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| 摘 要 .....                         | I         |
| ABSTRACT.....                     | II        |
| 目 录 .....                         | IV        |
| <b>第一章 绪论</b> .....               | <b>1</b>  |
| 1.1 研究背景 .....                    | 1         |
| 1.1.1 集料中的泥 .....                 | 1         |
| 1.1.2 集料中泥的主要粘土组分.....            | 1         |
| 1.2 机制砂 MB 值及测试方法研究现状 .....       | 2         |
| 1.3 泥对聚羧酸减水剂的影响及改善措施研究现状 .....    | 4         |
| 1.4 研究内容及技术路线 .....               | 6         |
| 1.4.1 研究内容.....                   | 6         |
| 1.4.2 技术路线.....                   | 7         |
| <b>第二章 试验原材料及方法</b> .....         | <b>9</b>  |
| 2.1 试验原材料.....                    | 9         |
| 2.1.1 水泥.....                     | 9         |
| 2.1.2 聚羧酸减水剂 .....                | 9         |
| 2.1.3 粉体及粘土矿物 .....               | 10        |
| 2.1.4 砂 .....                     | 11        |
| 2.1.5 亚甲基蓝.....                   | 12        |
| 2.1.6 试验用水.....                   | 12        |
| 2.2 试验方法 .....                    | 12        |
| 2.2.1 机制砂 MB 值试验 .....            | 12        |
| 2.2.2 水泥净浆流动度和强度.....             | 12        |
| 2.2.3 减水剂与水泥的相容性.....             | 13        |
| 2.2.4 水化放热试验 .....                | 13        |
| 2.2.5 膨胀容试验 .....                 | 13        |
| 2.2.6 水泥砂浆流动度和强度试验 .....          | 13        |
| 2.2.7 混凝土流动性和强度.....              | 13        |
| 2.3 试验仪器 .....                    | 14        |
| <b>第三章 机制砂 MB 值智能测试系统设计</b> ..... | <b>15</b> |

|                                         |           |
|-----------------------------------------|-----------|
| 3.1 测试装置设计.....                         | 15        |
| 3.1.1 测试装置的总体设计.....                    | 15        |
| 3.1.2 图像采集装置的设计.....                    | 15        |
| 3.2 测试软件设计.....                         | 16        |
| 3.2.1 机制砂亚甲蓝图像处理.....                   | 16        |
| 3.2.2 机制砂亚甲蓝图像识别优化 .....                | 18        |
| 3.2.3 机制砂亚甲蓝图像识别结果 .....                | 19        |
| 3.2.4 APP 界面设计.....                     | 20        |
| 3.3 智能测试系统流程 .....                      | 22        |
| 3.4 MB 值智能测试系统准确率验证.....                | 23        |
| 3.5 本章小结 .....                          | 24        |
| <b>第四章 不同粉体占比及粘土种类对机制砂吸附影响 .....</b>    | <b>25</b> |
| 4.1 不同粉体占比对机制砂 MB 值影响试验 .....           | 25        |
| 4.1.1 石粉对机制砂 MB 值影响.....                | 25        |
| 4.1.2 泥粉对机制砂 MB 值影响.....                | 27        |
| 4.1.3 混合粉对机制砂 MB 值影响 .....              | 28        |
| 4.2 不同矿物粉体的吸附性研究.....                   | 31        |
| 4.2.1 不同粉体的膨胀容试验.....                   | 31        |
| 4.2.2 不同粘土矿物粉体的 MB 值试验 .....            | 32        |
| 4.3 不同粉体对水泥水化放热的影响 .....                | 34        |
| 4.4 本章小结 .....                          | 37        |
| <b>第五章 增掺减水剂对不同石粉和泥粉含量的净浆性能影响 .....</b> | <b>39</b> |
| 5.1 增掺减水剂对不同粉体含量的净浆流动性的影响 .....         | 39        |
| 5.1.1 聚羧酸减水剂的最佳掺量.....                  | 39        |
| 5.1.2 不同粉体含量对水泥净浆流动度的影响.....            | 40        |
| 5.1.3 增掺减水剂对不同粉体占比的水泥净浆流动度的影响.....      | 42        |
| 5.2 增掺减水剂对不同粉体含量的水泥净浆力学性能影响 .....       | 45        |
| 5.2.1 不同粉体含量对水泥净浆力学性能的影响 .....          | 45        |
| 5.2.2 增掺减水剂对不同粉体占比的水泥净浆力学性能影响.....      | 46        |
| 5.3 本章小结 .....                          | 50        |
| <b>第六章 基于神经网络模型的机制砂泥粉含量推定方法 .....</b>   | <b>51</b> |
| 6.1 麻雀搜索算法优化的 ELMAN 神经网络模型.....         | 51        |
| 6.1.1 ELMAN 神经网络模型 .....                | 51        |
| 6.1.2 麻雀搜索优化算法 .....                    | 52        |

|                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| 6.1.3 SSA-ELMAN 模型构建 .....            | 53        |
| 6.1.4 模型评价指标 .....                    | 54        |
| 6.2 基于 SSA-ELMAN 的泥粉和石粉含量推定模型构建 ..... | 55        |
| 6.2.1 泥粉含量推定模型构建.....                 | 55        |
| 6.2.2 石粉含量推定模型构建.....                 | 59        |
| 6.3 泥粉含量推定模型的 APP 设计.....             | 62        |
| 6.4 基于 SSA-ELMAN 的减水剂增掺量预测模型构建 .....  | 64        |
| 6.5 预测结果的验证与分析 .....                  | 66        |
| 6.6 本章小结 .....                        | 68        |
| <b>第七章 结论与展望.....</b>                 | <b>69</b> |
| 7.1 主要结论 .....                        | 69        |
| 7.2 本文创新点.....                        | 70        |
| 7.3 不足与展望.....                        | 70        |
| <b>致 谢 .....</b>                      | <b>71</b> |
| <b>参考文献 .....</b>                     | <b>73</b> |
| <b>在学期间发表的论文和取得的学术成果.....</b>         | <b>77</b> |

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景

#### 1.1.1 集料中的泥

现代建筑原材料中的砂不仅是水泥混凝土中极为重要的一部分，也是非常重要的战略资源。砂石是我国基础设施建设用量最大、不可或缺、不可替代的原材料，据不完全统计，全世界每年消耗最高能达到 500 亿吨天然砂，初步预计到了本世纪中叶，天然砂的供给将跟不上使用量了。由于天然砂的资源日益匮乏，机制砂代替天然砂的趋势越来越显著，一方面由于山体岩石在未破碎前一直沉积在其中无法完全除去；另一方面河床中的淤泥层也不能通过破碎和筛分清除掉<sup>[1]</sup>。同时存在部分人为因素包括机制砂的来源差异较大和工艺不稳定，致使机制砂生产过程中难以避免的携带泥粉和破碎后的石粉，适量的石粉可以改善机制砂的级配，在整个体系中充当填充剂和润滑剂，从而能够增加混凝土的工作性，提高强度，增加耐久性<sup>[2-4]</sup>。而泥粉的作用却与其恰恰相反，混凝土中的泥粉一直被认为是有害物质，它不但影响其和易性、需水量、也会导致浆体和集料中的粘结性变差，最终影响混凝土的强度、干缩变形，耐磨和抗渗等耐久性能<sup>[5-7]</sup>。

国家标准中关于《建筑用砂》、《建筑用卵石、碎石》等将集料中的泥含量定义为天然集料中粒径小于 75 $\mu\text{m}$  的细颗粒的含量。但王应及其他学者<sup>[8,9]</sup>的研究表明：集料中含有的泥粉包括其粒径等对混凝土的影响不尽相同，同时他的研究还表明泥粉中的矿物组成也对混凝土的性能产生不同程度的影响，因此，单一从粒径这个定义上对泥粉的解释不够全面。集料的各个过程比如采集、运输、加工、使用等都有可能使其带入泥粉，而这些不同的自然因素和人为因素是如今集料表面泥粉含量偏高的主要原因<sup>[10]</sup>。

到目前为止我国机制砂用量越来越大，但是破碎后使用的机制砂集料的质量参差不齐，集料质量相对稳定性差。在实际的生产过程中，当集料中含泥量超标时，会对施工现场造成非常多不利的的影响，而部分的石粉含量不仅不会造成过多的负面影响，还会对混凝土的工作性能和力学性能起到正面作用，因此在生产使用过程中，清楚机制砂的石粉含量和泥粉含量，正确认识不同石粉和泥粉含量对净浆及混凝土的影响，对于解决实际工程中机制砂质量参差不齐的情况有重要意义。

#### 1.1.2 集料中泥的主要粘土组分

混凝土集料中泥的结构非常复杂，不同来源的泥，成分不尽相同，但大量的研究表明，集料中泥的粘土矿物种类很多，但最多的矿物组分最主要有蒙脱土、伊利



土、高岭土三种，这三种粘土矿物是由不同比例的硅氧四面体和硅氧八面体组成的，不但具有类似交替稳定的性质，还对水分子有良好的亲和性<sup>[11]</sup>，这三种粘土矿物的理论化学组成如下表所示<sup>[12]</sup>。

表 1.1 粘土矿物的化学组成<sup>[12]</sup>

| 名称  | 化学式                                                        | 铝硅比  |
|-----|------------------------------------------------------------|------|
| 蒙脱土 | $(AlMg)_2(Si_4O_{10})(OH)_2nHzO$                           | 1: 4 |
| 伊利土 | $(K,Na,Ca)_m(Al,Fe,Mg)_4(Si,Al)_8O_{20}(OH)_4 \cdot nH_2O$ | 1: 4 |
| 高岭土 | $2Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 4H_2O$                        | 1: 2 |

不同的粘土矿物有着不同的硅氧比，并且他们之间的氧化物含量也不相同，存在着差异，意味着它们的性质不尽相同。粘土矿物的不同结构和化学组成决定了他们有理化性质有所差异。下面详细介绍三种粘土矿物的各项性质。

### (1) 蒙脱土

蒙脱土是一种 2:1 型的层状硅酸盐，属于单斜晶系。其单元晶层为两片硅氧四面体中间夹一个铝氧八面体晶片构成，蒙脱土的单元晶层之间靠氧原子联接，连接力较弱，因此其层间距较大，一般大多维持在 0.9~2.1nm 之间。同时，蒙脱土的晶层间还具有较强的吸水特性，吸水之后体积发生膨胀，且其吸水膨胀性随着层间可交换阳离子数和水分子层数的不同而不同，一般变化在 1.2~2.0nm 之间。

### (2) 伊利土

伊利土和蒙脱土的结构基本相似，同属于 2:1 型的铝硅酸盐矿物，是单斜晶系矿物，其晶层单元也是由一个铝氧八面体晶片夹在两片硅氧四面体中构成。伊利土的晶层之间靠氧的分子力和  $K^+$  联接，由于层间钾离子半径的大小与晶层面上氧原子形成的六边网格半径相当，因而伊利土的晶层间结合牢固，不易发生吸水膨胀。

### (3) 高岭土

高岭土是 1:1 的层状硅酸盐类，属于三斜晶系。高岭土的单元晶层是由一个硅氧四面体和一个铝氧八面体相间构成的。高岭土的单元晶层一面是硅氧四面体的 O 群，另一面是铝氧八面体的 OH 群，11 晶层通过 O 和 OH 形成的氢键以及范德华力紧密连接，作用力较强，所以通常情况下高岭土的层间距较小，一般小于 0.3nm，同时也由于氢键的联接力较强，所以高岭土的层间完全没有吸水特性，遇水不会发生吸水膨胀。

不同地域的泥有着大致相同的粘土种类，但是由于其粘土种类各个占比不同，导致不同产地的泥也呈现不同的理化性质<sup>[13]</sup>。

## 1.2 机制砂 MB 值及测试方法研究现状

机制砂粉体含量在一定程度上决定了机制砂质量的好坏。机制砂检测中，亚甲

蓝值 (MB 值) 主要是反映小于 0.075mm 的细颗粒主要是母岩矿石粉 (比如石灰石机制砂的石灰石粉) 还是泥粉, 以确定机制砂中是否存在膨胀性粘土矿物(泥粉) 并定性判断其含量大小的指标, 在国家标准中对石粉含量的检测做了明确规定, 用亚甲蓝 MB 值来衡量机制砂粉体的性质。随着对机制砂研究的深入, 通过对石粉矿物分析, 发现这些石粉中含有高岭土、蒙脱土等膨胀性粘土, 此类粘土物质同样对亚甲蓝具有吸附作用<sup>[14]</sup>。膨胀性粘土具有较大的比表面积, 对亚甲蓝染料具有吸附作用, 根据这一特性, 亚甲蓝试验本质是亚甲蓝染料单分子层覆盖其试样粘土部分的总表面积所需的染料量。根据研究发现, 粘土粒子本身带有负电荷<sup>[15]</sup>。由图 1-1 亚甲蓝分子结构图可知, 单分子层结构的亚甲蓝分子带有一定的正电荷, 相比于石粉, 粘土物质对亚甲蓝更具吸附作用。

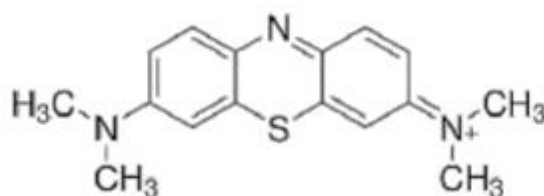


图 1-1 亚甲蓝分子图

秦丹<sup>[16]</sup>等人研究了不同矿物组分的泥粉对亚甲蓝值的影响, 研究中发现石粉中含有不同的矿物组分的 MB 值不同, 其中含蒙脱土的对 MB 值影响最大, 高岭土和伊利土次之; 沈卫国<sup>[17]</sup>等人根据机制砂自身特性对机制砂 MB 值的影响因素进行了系统研究, 研究发现, 粒径降低会导致 MB 值增大, 干筛的 MB 值增长更加明显, 以及母岩本身性质对 MB 值在一定范围内有影响, 影响 MB 值最大不超过 0.35。经大量学者<sup>[18]</sup>的研究表明, 泥粉不仅没有增强粘结的作用, 还会阻碍集料与水泥浆体的粘结, 降低混凝土的强度。周莎莉指出<sup>[19]</sup>, 泥粉与粉煤灰微骨料填充类似, 随着龄期增加, 使得内部孔隙细化, 因此对混凝土早期强度影响较为明显, 而对其后期强度影响较小。袁杰<sup>[20]</sup>研究了固定 MB 值对不同等级混凝土强度的影响, 结果表明 MB 值对低强度等级混凝土抗压强度影响不明显, 而对高强度混凝土强度影响较大, 其结果在于 MB 值与泥粉挂钩, 泥粉的存在降低了水泥的胶结强度, 而低等级混凝土本身缺陷较多, 影响较小。李北星<sup>[21]</sup>研究发现, 随着 MB 值的增加, 混凝土的工作性会降低, 而其 7d 抗压抗折强度有明显降低, 但 28d 强度影响不大。徐志华<sup>[22]</sup>等人在研究 MB 值时发现, MB 值的增大不仅会降低混凝土强度, 也会降低混凝土的抗冻性, 对其干缩和耐久性能都有比较严重的影响。夏京亮<sup>[23]</sup>研究了泥粉含量对混凝土氯离子扩散系数的影响, 研究发现: 对于 C30 与 C40 混凝土, 电通量、氯离子扩散系数和孔结构参数均表现出先提高后减小的趋势, MB 值不高于 1.4 时, 混凝土的密实性和抗渗性均得到了一定改善。

MB 值检测的试验原理是向集料与水搅拌制成的悬浊液中不断加入亚甲蓝溶液，每加入一定量的亚甲蓝溶液后，亚甲蓝被机制砂中的粉料所吸附，用玻璃棒沾取少许悬浊液滴到滤纸上观察是否有游离的亚甲蓝放射出的浅蓝色色晕，判断集料对染料溶液的吸附情况<sup>[24]</sup>。检测机制砂 MB 值大小的测试方法，不仅操作繁琐，方法复杂，对新手特别是刚接触实验室的操作人员来说特别不友好，并且人为判断误差大，主观影响大，导致不同操作人员做出来的亚甲蓝值大不相同，从而产生误差，并且，对于机制砂泥粉含量的检测，目前常用的亚甲蓝试验测 MB 值的方法，只能定性反映泥粉含量的相对大小，无法给出机制砂样品中泥粉含量的量化指标。也有部分学者对此方法进行了思考，罗源兵<sup>[25]</sup>等发明了一种通过蠕动泵向已配置好的悬浮液中滴加亚甲蓝溶液，同时通过连接计算机的紫外可见分光光度计测定悬浮液的吸光度，当吸光度达到出现浅蓝色光晕时的吸光度时判定其合格的方式来检测机制砂的含泥量；南雪丽<sup>[26]</sup>等利用比色计测试被黏土吸附后亚甲基蓝溶液的吸光度，然后，建立吸光度与被黏土吸附后亚甲基蓝溶液浓度的联系，最后将亚甲基蓝溶液浓度的改变转化为 MBV，此方法判定后，可以根据细集料 MBV 的大小判定是否可以安全用于混凝土生产，进而合理利用被黏土污染的机制砂；当然，也有研究者比如范倩<sup>[27]</sup>从特征峰的方式入手，建立亚甲蓝溶液与吸光度的标准曲线，然后待测样品的混合溶液上层稀释清液，通过标准曲线计算待测溶液的亚甲蓝浓度，最终计算细集料吸附的亚甲蓝质量，并确定细集料亚甲蓝值，这些方法都能一定程度上给判别机制砂含泥量的大小提供依据，但对于目前十四五规划，智能制造盛行的节点来说，如何依据规范，并且消除操作人员人眼判别的主观误差，以及简单智能易行的识别方式和如何定量而不是定性分析泥粉含量成了有待考虑的问题。

### 1.3 泥对聚羧酸减水剂的影响及改善措施研究现状

减水剂发展至今，一直被广泛的应用，特别是聚羧酸类的减水剂，优点十分明显，减水效果十分明显，能够在较低掺量下，达到很高的减水率，并且在同时与水泥有较好的相容性的情况下，能够使混凝土的强度，耐久性得到巨大提升<sup>[28]</sup>。尽管聚羧酸减水剂的效果十分优异，但随着天然砂的短缺，劣质砂石的开采，砂石中携带的泥粉会对聚羧酸减水剂产生巨大的负效应，有学者研究表明<sup>[29]</sup>，在混凝土体系中，泥粉的存在，将吸附大量的减水剂，导致浆体中减水剂浓度大幅度降低，浆体稠度增大，使得混凝土工作性急剧下降，严重影响工程进展。

泥粉对聚羧酸减水剂的吸附作用一直是大家讨论的热点之一，黄剑<sup>[30]</sup>通过探究砂石含泥量对混凝土坍落度的影响，得出砂石含泥量与高温环境一样，对坍落度的影响十分明显，会导致坍落度损失过快，而在实际生产过程中，调整聚羧酸减水剂的用量，对混凝土的工作性起到至关重要的作用；刘桂兰<sup>[31]</sup>对不同含泥量的新

拌混凝土的和易性和强度进行试验，并对比聚羧酸减水剂的减水性能，结果发现含泥量在 3% 以下，对混凝土和易性和强度影响并不明显，而当含泥量大于 3% 且逐渐增加的时候，混凝土流动性和强度的变化十分显著；宋光晖<sup>[32]</sup>具体的研究了含泥量对减水剂的性能影响并进行了减水剂的减水敏感性研究，通过控制胶砂达到同一流动度和混凝土达到同一坍落度来测定减水剂的减水率，结果表明，砂含泥量对大掺量的减水剂的减水效果没有明显的影响，并且通过分析砂含泥量与减水剂减水率的敏感性，用敏感性系数  $S$  来衡量敏感性的强弱，对含泥量与减水剂的减水效果做出了进一步的阐述关系；封孝信<sup>[33]</sup>指出泥是一种结构复杂的物质，不同含量、粒径和矿物组成的泥均会对混凝土的性能产生影响，对石粉的研究不能局限于整体的泥粉，可以通过占泥成分最高的几种矿物来进行分析，如蒙脱土、高岭土、伊利土；L.Coppola 等人认为，当集料表面含有一定量的可溶胀性粘土时，粘土对于聚羧酸类高效减水剂的影响非常明显，但对萘系减水剂几乎没有影响<sup>[35]</sup>；李苑等认为酯类聚羧酸减水剂和醚类聚羧酸减水剂的减水分散能力对蒙脱土的敏感性大于萘系减水剂，对高岭土敏感性与萘系减水剂相当<sup>[36]</sup>；吴昊等研究认为蒙脱土对 PCE 的影响最为严重，当蒙脱石在砂石中的含量达到 2% 时就会对含 PCE 的水泥拌合物的和易性产生极大的负面影响<sup>[37]</sup>；考友哲<sup>[38]</sup>也从三种单矿物组成作为基本的研究对象，对粘土对减水剂的分散性影响进行了研究，并且通过矿物组分的吸附特性，尝试通过补偿水或者减水剂的方式消除粘土带来的消极影响，结果表明工程应用中不可以采用补偿水的方法消除粘土矿物的负效应，采用补偿减水剂消除粘土矿物负效应前应该结合工程的成本目标；王林<sup>[39]</sup>不仅研究了不同种类对净浆及砂浆的流动性影响，还通过有机碳吸附试验证实了蒙脱土的吸附量是最大的，是其他单矿物的数倍，最主要的是他探讨了不同种类粘土对聚羧酸减水剂的吸附机理，并且设计一种直线型聚羧酸减水剂，去提前吸附其中的泥粉，使得聚羧酸减水剂更能发挥其本身的作用。

国外研究学家 Sakai<sup>[40]</sup>研究发现，掺少量蒙脱土、高岭土的掺聚羧酸减水剂水泥浆体粘度大幅增加，流动度大幅降低，且掺蒙脱土降低幅度大于高岭土，İ.B.Topcu 等<sup>[41]</sup>研究认为，泥粉的存在阻碍了集料与水泥间的粘结，减缓水泥水化，界面过渡区粘结较为薄弱，从而混凝土强度较低，当受到冻融影响时，混凝土整体耐久性、体积稳定性较差，Daiki Atarsshi 等<sup>[42]</sup>通过研究蒙脱石对聚羧酸减水剂和萘系减水剂的吸附方式对比发现，在蒙脱石层间发现出现聚羧酸减水剂分子，而没有出现萘系减水剂。针对吸附机理的实施方式研究，S.Ng 和 J.Plank<sup>[43]</sup>研究发现，钠基蒙脱石对聚羧酸减水剂的吸附既有因静电作用产生的物理吸附，又有聚羧酸减水剂分子侧链嵌入到粘土层间的化学吸附；与水泥颗粒相比，粘土颗粒能够优先吸附聚羧酸减水剂分子，且吸附量较大，倪子<sup>[44]</sup>通过对三种不同粘土理化性能的

研究得出蒙脱土对水泥砂浆性能影响最为显著，并且通过三种粘土复配模拟重庆部分地区的粘土矿物，分析其对砂浆的各项性能，也有诸如胡倩文<sup>[45]</sup>从层间吸附性能出发，探究了不同粘土对聚羧酸减水剂得层间吸附性能，结果发现蒙脱土对聚羧酸减水剂层间存在吸附作用，而伊利土，高岭土并未发生层间吸附。

改善泥对聚羧酸减水剂吸附的方式有很多种，在施工现场，最常用的措施就是对集料进行清洗或者进行减水剂的一个补偿掺量，然而在施工现场进行粗细集料的冲洗并非易事，首先尽管冲洗后的集料的含泥量会降低很多，但是这会使得集料富含更多的水，并且过度的水洗会冲散集料原本的级配，导致集料级配变差，而且增加冲洗这个步骤会严重增加人力成本和时间成本，影响施工进度，因此这个方式对于正在施工的现场来说并不可取。而对于补偿减水剂掺量来说，补偿的减水剂掺量能够保证在泥粉含量较多的劣质砂石拌合的混凝土在一段时间内仍然具有较好的工作性能，同时也能改善泥粉对混凝土强度的影响，但是对于具体的补偿掺量来讲，把握不好补偿掺量的量，容易导致施工现场中的混凝土出现泌水和离析的现象，因此，对于具体粉体含量的补偿减水剂掺量，到目前的研究还较少，有学者诸如唐盛轩<sup>[46]</sup>发现，补偿减水剂掺量能够有效的改善泥粉对混凝土的影响，并且在含泥量小于 5%时，补偿减水剂掺量都能起到很好的效果，而且补偿减水剂掺量同时也会增加成本。

现阶段，对含泥量较高的集料，也有学者<sup>[47-52]</sup>通过研究合成抗泥型的聚羧酸减水剂或者通过添加牺牲剂等这两种方式来减少其对聚羧酸减水剂的吸附。

## 1.4 研究内容及技术路线

### 1.4.1 研究内容

基于上述研究现状分析，本文将研究一种基于计算机视觉的机制砂亚甲蓝测试系统及方法，并且利用此测试系统，研究机制砂中携带的泥粉粘土种类对机制砂 MB 值的影响，以及不同石粉含量和泥粉含量的机制砂 MB 值，在此基础上，采用不同泥粉和石粉占比的机制砂开展净浆试验，研究不同粉体含量对于聚羧酸减水剂的吸附情况以及减水剂增掺掺量，以流动性和力学行为为指标，探究其相关关系。以内掺掺量和 MB 值作为输入变量，石粉和泥粉含量作为输出变量，建立 MB 值和粉体含量之间的神经网络模型，同样以不同粉体含量为输入变量，减水剂增掺掺量作为输出变量，建立不同粉体含量下的减水剂增掺掺量的神经网络模型，并且分析其模型推定效果。

具体研究内容包括：

(1) 原材料性能分析。对本文试验所用原材料（东方希望水泥、矿山泥粉和石粉，聚羧酸减水剂母液等）进行物化性能分析。

(2) 基于计算机视觉的机制砂亚甲蓝测试系统及方法。通过计算机视觉，将

机制砂 MB 值检测方法进行智能替换，使用 MATLAB 计算机视觉代替人眼对亚甲基蓝形成的光晕进行识别，然后是检测硬件装置的设计，包括工业相机参数的设定，相机位置的确定，支架的摆放，光源的设置；最后编写数据采集和特征提取的 GUI 程序。

(3) 不同粘土成分及粉体含量对机制砂 MB 值影响研究。由泥土成分中最常见的三种粘土成分为分析依据，研究不同粘土成分对于机制砂 MB 值的影响规律，同时将所取机制砂产地矿山的泥土和洗净机制砂进行破碎得到的泥粉和石粉进行 MB 值试验，研究不同占比对于机制砂 MB 值的影响。

(4) 不同粉体占比对减水剂增掺掺量影响研究。通过开展不同粉体占比（包括矿山泥粉和石粉）的水泥净浆试验，以不同减水剂增掺量下的净浆流动度作为指标，得到不同粉体占比与减水剂增掺掺量之间的关系。

(5) 神经网络模型的构建。以粉体内掺占比和 MB 值作为输入变量，石粉和泥粉含量作为输出变量，建立 MB 值和粉体含量之间的神经网络模型，同样以不同粉体含量为输入变量，减水剂增掺掺量作为输出变量，建立不同粉体含量下的减水剂增掺掺量的神经网络模型。

(6) 验证环节。对不同含粉量机制砂砂浆和混凝土做减水剂增掺掺量预测，并通过试验验证其实际预测效果。

#### 1.4.2 技术路线

本文的研究技术路线如图 1-2 所示：

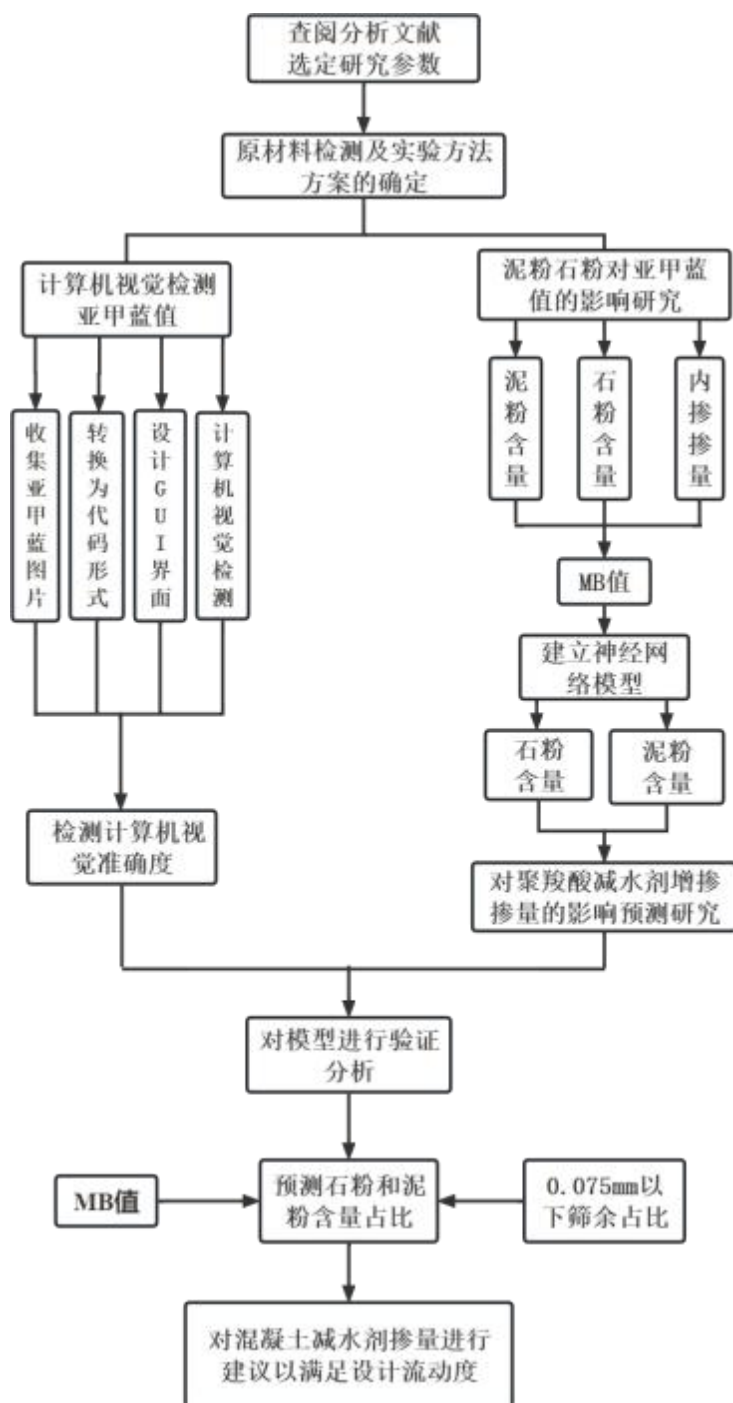


图 1-2 研究技术路线图

## 第二章 试验原材料及方法

### 2.1 试验原材料

#### 2.1.1 水泥

水泥选用东方希望重庆水泥有限公司生产的同一批次 P.O 42.5 水泥。水泥的性能检验按照《通用硅酸盐水泥》（GB 175）和《水泥胶砂强度检验方法（IOS）法》（GB/T 17671）进行，东方希望 P.O 42.5 水泥化学成分如表 2.1 所示，物理性能如表 2.2 所示。

表 2.1 东方希望 P.O 42.5 水泥化学成分表

| 化学成分   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> |
|--------|------------------|--------------------------------|------|------|--------------------------------|------------------|------------------|-------------------|-----------------|
| 测试结果/% | 19.05            | 4.76                           | 58.3 | 2.38 | 3.44                           | 0.24             | 0.87             | 0.18              | 2.26            |

表 2.2 东方希望 P.O 42.5 水泥的物理性能

| 检测项目        | 单位                | 技术要求 | 试验结果  |
|-------------|-------------------|------|-------|
| 细度（80μm 筛余） | %                 | ≤10  | 8.4   |
| 标准稠度用水量     | %                 | 实测值  | 29.2  |
| 比表面积        | m <sup>2</sup> /g | >300 | 363   |
| 凝结时间        | 初凝                | min  | ≥45   |
|             | 终凝                | min  | ≤390  |
| 抗压强度        | 3d                | MPa  | ≥17.0 |
|             | 28d               | MPa  | ≥42.5 |
| 抗折强度        | 3d                | MPa  | ≥3.5  |
|             | 28d               | MPa  | ≥6.5  |

#### 2.1.2 聚羧酸减水剂

本文试验所用聚羧酸减水剂母液由重庆巴源建材有限公司生产，其各项物理性能如表 2.3 所示，红外分析结果见图 2-1。



表 2.3 巴源减水剂母液性能

| 巴源母液 | 固含量 (%) | pH 值 | 减水率 (折固掺量 0.25%) | 状态    |
|------|---------|------|------------------|-------|
| BY   | 48      | 6.9  | 28.0%            | 淡黄色液体 |

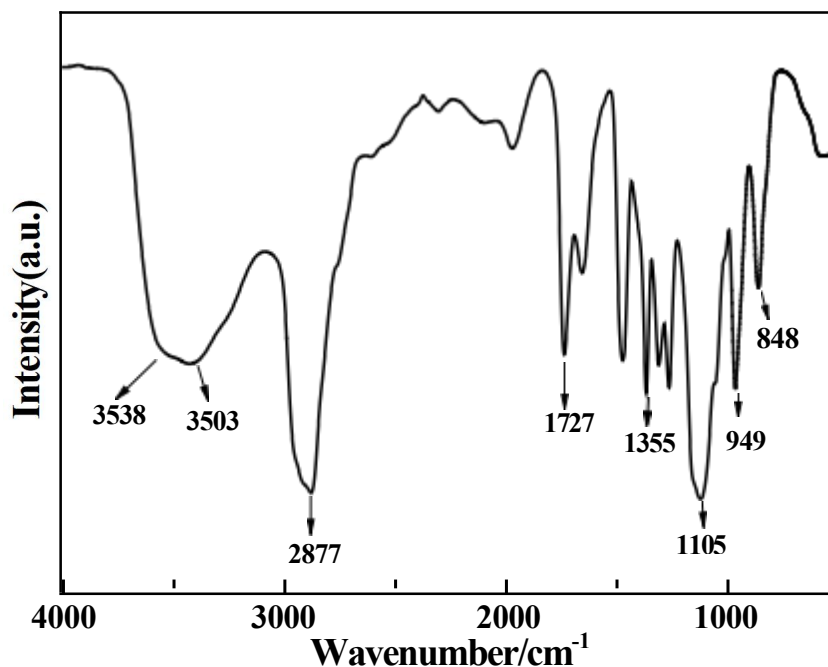


图 2-1 巴源减水剂母液红外光谱图

由图 2-1 可知，在  $3538\text{cm}^{-1}$ - $3503\text{cm}^{-1}$  左右的宽吸收峰，为减水剂母液样品分子内缔合羟基-OH 的伸缩振动峰； $2877\text{cm}^{-1}$  处存在吸收峰，主要为饱和烷烃甲基与亚甲基 C-H 的伸缩振动峰； $1965\text{cm}^{-1}$  处存在羰基 C=O 伸缩振动峰； $1727\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰，为 C=O 的吸收峰； $1355\text{cm}^{-1}$  和  $1300\text{cm}^{-1}$  左右的吸收峰，为 C-O 的伸缩振动峰； $1105\text{cm}^{-1}$  左右的强吸收峰和为  $\text{SO}_4^{2-}$  的振动吸收； $949\text{cm}^{-1}$  附近的吸收峰，为成键的 O-H 键的面外弯曲振动峰； $540\text{cm}^{-1}$  左右的吸收峰为羧酸 C-C=O 的面内弯曲振动峰。综上，该减水剂分子有羟基 (-OH)、羧基 (-COOH)、醚键 (C-O-C)、硫酸根 ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) 等基团。

### 2.1.3 粉体及粘土矿物

论文研究中采用了矿山泥粉和石灰石粉，亚甲蓝值 (MB 值) 是反映机制砂中小于  $0.075\text{mm}$  的粉体的吸附性能，通常受机制砂粉体中母岩矿石粉和泥粉含量的影响，而本文采用的母岩矿石粉为石灰石粉，为了方便表述，后文均采用石粉表示石灰石粉。泥粉取自重庆龙积达建材有限公司合川矿山，将其放入烘箱中于  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$  烘干至恒重，由多功能粉碎机破碎后再过  $0.08\text{mm}$  的方孔筛，得到本试验用泥粉，石粉加工自重庆龙积达建材有限公司合川矿山的石灰石机制砂，先用试验室用水洗净机制砂表面所含粉体，再放入烘箱中烘干，洗净烘干后，由多功能粉碎机

破碎粉磨后再过 0.08mm 的方孔筛，得到本试验用石粉，本试验所用粘土矿物分别为伊利土、高岭土和蒙脱土，其细度均为 325 目，来自灵寿县德航矿产品有限公司，各粉体和粘土矿物实物形貌如图 2-2 所示，将其放入烘箱中烘干至恒重，冷却至室温后备用。采用 X 荧光分析 (XRF) 法测定两种粉体和粘土矿物 (伊利土、高岭土、蒙脱土) 的化学成分，结果如表 2.4 所示。



图 2-2 粉体及粘土矿物实物形貌

表 2.4 粉体及粘土矿物化学成分表 (wt%)

| 不同粉体 | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> | Loss |
|------|------------------|--------------------------------|------|------|--------------------------------|------------------|------------------|-------------------|-----------------|------|
| 泥粉   | 48.16            | 20.70                          | 0.93 | 1.25 | 9.95                           | 1.19             | 3.28             | 0.12              | 0.07            | 15.3 |
| 石粉   | 3.43             | 0.96                           | 51.4 | 0.99 | 0.74                           | -                | -                | -                 | 0.44            | 41.9 |
| 蒙脱土  | 67.97            | 11.99                          | 3.22 | 1.59 | 0.84                           | 0.08             | 1.78             | 1.54              | 0.06            | 10.9 |
| 高岭土  | 62.36            | 23.27                          | 0.47 | 0.15 | 2.21                           | 0.77             | 0.06             | 0.20              | 0.95            | 9.56 |
| 伊利土  | 61.48            | 23.31                          | 0.67 | 0.33 | 1.71                           | 0.85             | 3.82             | 2.51              | 0.06            | 5.26 |

#### 2.1.4 砂

论文实验所用机制砂来自重庆宁泰混凝土有限公司，经过人工洗净表面粉尘并烘干后使用。机制砂筛细度模数经试验结果为 2.7，是Ⅱ区中砂。机制砂性能检

验按照《建设用砂》（GBT 14684）进行，其主要技术性能如表 2.5 所示。

表 2.5 机制砂主要技术性能

| 检测项目 | 表观密度/ (kg/m <sup>3</sup> ) | 堆积密度/ (kg/m <sup>3</sup> ) |       | 空隙率/% |     | 压碎值/% |
|------|----------------------------|----------------------------|-------|-------|-----|-------|
|      |                            | 紧密                         | 松散    | 紧密    | 松散  |       |
| 技术要求 | ≥2500                      | /                          | ≥1400 | /     | ≤44 | ≤30   |
| 试验结果 | 2705                       | 1720                       | 1500  | 32    | 42  | 12    |

### 2.1.5 亚甲基蓝

本实验所用的亚甲基蓝粉末来自天津市致远化学试剂有限公司，（C<sub>16</sub>H<sub>18</sub>CN<sub>3</sub>S·3H<sub>2</sub>O）含量≥98.5%，将其放入烘箱中于（105±5）℃烘干至恒重，冷却至室温后备用。按照《建设用砂》（GBT 14684）中第 7.5 条的规定，用其配制亚甲基蓝溶液。

### 2.1.6 试验用水

亚甲基蓝试验采用的是蒸馏水，来自重庆西南化学试剂有限公司，其他试验采用的实验室自来水。

## 2.2 试验方法

### 2.2.1 机制砂 MB 值试验

亚甲基蓝溶液的制备参照《建设用砂》（GB/T14684）中配置亚甲基蓝溶液的方法，在进行配制过程中要对亚甲基蓝粉末进行烘干。为了保证试验的准确性，借鉴研究者董瑞<sup>[53, 54]</sup>和沈卫国<sup>[55]</sup>等一些文献的方法，在保证试验准确性的前提下，本文采用蠕动泵进行辅助滴定，用蠕动泵向悬浮液中加入亚甲基蓝溶液时，可精确至 0.001mL，比传统采用胶头滴管的方式更精确，污染更小，密封性更好。

亚甲基蓝值按式（2-1）计算，精确至 0.1。

$$MB = \frac{V}{G} \times 10 \quad (2-1)$$

式中：

MB——亚甲基蓝值，g/kg<sup>1</sup>，表示每千克 0mm~2.36mm 粒级试样所消耗的亚甲基蓝值；

G——试样质量，g；

V——所加入的亚甲基蓝溶液的总量，mL；

### 2.2.2 水泥净浆流动度和强度

水泥净浆流动度按 GB /T 8077《混凝土外加剂匀质性试验方法》的相关规定测定，W/C=0.29，减水剂母液掺量为折固掺量。

在研究不同粉体含量对于聚羧酸减水剂的吸附情况时，不同粉体含量采用外

掺的方式，即按水泥质量的一定百分比额外加入。考虑外掺的原因在于实际的砂石含粉的情况，粉体都是破碎过程中携带进去的，水泥基材料体系中的胶凝材料总量并没有发生变化，所以在模拟含不同粉体的水泥净浆试验中也保持水泥质量不变，然后外掺部分的粉体。

净浆力学性能参照规范 GB/T 17671《水泥胶砂强度试验》。每个配比的强度试验结果以三块试件的代表值表示。

### 2.2.3 减水剂与水泥的相容性

水泥与减水剂的相容性测试方法按照 JC/T1083《水泥与减水剂相容性试验方法》以及 GB/T 8077《混凝土外加剂匀质性试验方法》相关规范进行测定。减水剂母液掺量为折固掺量（下文中涉及减水剂母液掺量均为折固掺量）。

### 2.2.4 水化放热试验

水泥的水化放热采用 TAM-AIR 型八通道微量热仪测定，测试温度恒定为 20℃。从加水至 72h 的水化放热速率和水化放热量。

### 2.2.5 膨胀容试验

向 50mL 量筒加入 25mL 蒸馏水和 0.5g 粘土；上下摇晃 2min 后加入 12.5mL 1:1 的 HCl，并加蒸馏水至量筒 50 mL 刻度处；上下摇晃 2min 后静置 24h 读取刻度值。

粘土膨胀容即为：

$$V_s = V/m \quad (2-2)$$

式中： $V_s$ —膨胀容，单位 mL/g；

$m$ —粘土质量，单位 g；

$V$ —静置 24h 后粘土与溶液界面处刻度值，单位 mL。

### 2.2.6 水泥砂浆流动度和强度试验

参照 GB/T2419《水泥胶砂流动度测定方法》中的方法进行，采用跳桌法，砂浆配比按具体试验确定。砂浆强度参照 GB 17671《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》中的方法进行砂浆各龄期抗折抗压强度测定。

### 2.2.7 混凝土流动性和强度

参照 GB/T50080《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》中混凝土坍落度和扩展度以及强度的试验方法进行。

## 2.3 试验仪器

表 2.6 主要试验仪器

| 仪器名称         | 型号            | 生产厂家         |
|--------------|---------------|--------------|
| 水泥净浆搅拌机      | NJ-160        | 河北科建试验仪器有限公司 |
| 水泥净浆流动度截锥圆模  | -             | 河北科建试验仪器有限公司 |
| 跳桌           | -             | 河北科建试验仪器有限公司 |
| 水泥胶砂振实台      | HY210721-3903 | 河北科建试验仪器有限公司 |
| 蠕动泵          | YX-LP01-3     | 上海岩晓科技有限公司   |
| 亚甲蓝试验装置      | NSF-1 型       | 河北同力仪器设备有限公司 |
| 电子天平         | JY5001        | 上海浦春计量仪器有限公司 |
| 水泥胶砂抗折抗压试验机  | TYE-300D      | 无锡建仪仪器机械有限公司 |
| 单卧轴强制式混凝土搅拌机 | HJW-60 型      | 河北科建试验仪器有限公司 |
| 数显恒温鼓风干燥箱    | 101-3         | 河北科建试验仪器有限公司 |
| 标准恒温恒湿养护箱    | YH-90B        | 河北科建试验仪器有限公司 |
| 多功能粉碎机       | XY-200        | 壁鹤市鑫运仪器有限公司  |
| pH 酸度计       | -             | 河北科建试验仪器有限公司 |
| 水泥细度负压筛析仪    | GB1345        | 绍兴市博锐仪器有限公司  |
| 全自动勃氏比表面积仪   | -             | 河北科建试验仪器有限公司 |

## 第三章 机制砂 MB 值智能测试系统设计

### 3.1 测试装置设计

#### 3.1.1 测试装置的总体设计

亚甲蓝测试装置的示意图如图 3-1 所示，主要包括拍摄组件、调节组件和处理组件，拍摄组件位于调节组件上，拍摄组件用于拍摄机制砂滴定测试结果的亚甲蓝值测试图像，调节组件用于调节拍摄组件与机制砂滴定结果图的拍摄距离，处理组件用于获取亚甲蓝值测试图像，并识别亚甲蓝色晕。为保证光线充足，不会对成像质量造成太大影响，因此设置了照明光源组，照明光源设置多组，接处理组件，处理组件测试初始时向任一组照明光源发送点亮信号。

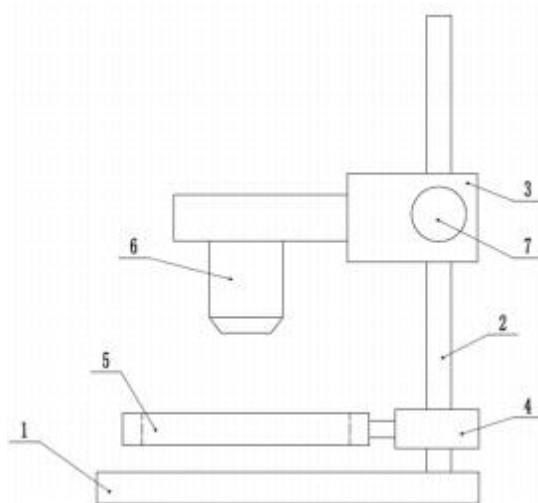


图 3-1 测试装置示意图

#### 3.1.2 图像采集装置的设计

图像采集装置是本系统的核心部件，计算机视觉（computer vision）是通过采集到的图片或者视频进行信息处理，相当于计算机的处理系统代替人的大脑，获取信息的设备代替人的眼睛，让计算机像人一样，能够感知周围的环境<sup>[56]</sup>。而工业摄像头相比于传统式的民用型摄像头(摄像机)而言，它具备高的影像稳定性能、高传输数据能力和高抗干扰性等。因此本试验选取的摄像头为工业摄像头，详细参数见表 3.1，由于本文采用的基于 Matlab 软件开发设计的系统，而 Matlab 本身是不支持直接读取摄像头数据的，因此需要安装软件支持包才可以获取，目前最常用的两个支持包分别是 MATLAB Support Package for USB Webcams 和 Image Acquisition Toolbox Support Package for OS Generic Video Interface。并且由于本文是外接的工业摄像机，还需要下载 GigE Vision（一种基于千兆以太网开发的相机接口标准）

才能正确调用摄像头。为了保证图像分析的精确性，因此摄像头固定在能够拍摄完整个滤纸的位置。

表 3.1 摄像头详细参数

| 像素     | 型号   | 成像距离  | 传感器尺寸    | 感光类型 | 对焦方式 |
|--------|------|-------|----------|------|------|
| 1600 万 | UC50 | 1cm~∞ | 1/2.33'' | CMOS | 手动   |

## 3.2 测试软件设计

### 3.2.1 机制砂亚甲蓝图像处理

世界正因为存在不同的颜色，因此得以光鲜亮丽，五彩斑斓，颜色也是物体存在的重要属性之一，而在计算机系统中，不同的颜色是用特定的公式来表达的，而表达这些颜色的公式，就是常说的颜色空间<sup>[57]</sup>。正因为表达颜色空间公式的存在，才使得表示图像和处理图像成为可能。颜色空间主要可以分为两类，基于色以及基于色亮分离的颜色空间，每种颜色空间都有各自的特点和应用场景。目前熟知的基于色的颜色空间主要是 RGB 模型，RGB 颜色空间利用三个颜色分量的线性组合来表示颜色，但是人眼对于这三种颜色分量的敏感程度是不一样的，在单色中，人眼对红色最不敏感，蓝色最敏感，所以 RGB 颜色空间是一种均匀性较差的颜色空间。而在基于色亮分离的颜色模型主要有 HSV、HIS 颜色空间等，在图像处理中使用较多的是 HSV 颜色空间，它比 RGB 更接近人们对彩色的感知经验。非常直观地表达颜色的色调、鲜艳程度和明暗程度，方便进行颜色的对比<sup>[58]</sup>。HSV 是一种将 RGB 色彩空间中的点在倒圆锥体中的表示方法<sup>[59]</sup>。HSV 中 H 表示色相(Hue)，度量方式为角度度量，其范围在 0。~360。，描述的是物体的色彩属性，S 代表饱和度(Saturation)，一种接近于光谱色的程度，光谱色的白光成分为 0，饱和度达到最高。通常取值范围为 0%~100%，值越大，颜色越饱和，而 V 表示亮度(Value)，即图像中各个区域的明亮程度，其存在目的在于区分颜色属性和明亮程度，取值范围为 0-1<sup>[60]</sup>。HSV 颜色空间模型在图像处理的领域应用十分广泛，能够解决大多数的图像预处理工作。

利用计算机视觉获取所要识别亚甲蓝图片，基于 Matlab 软件编写识别亚甲蓝色晕的程序，通过对 HSV 三个阈值的调整，得到想要的颜色范围。HSV 对应的各类颜色的阈值范围如表 3.2 下所示：

表 3.2 HSV 的各颜色阈值取值范围

|      | 黑   | 灰   | 白   | 红   | 橙   | 黄   | 绿   | 青   | 蓝   | 紫   |     |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| hmin | 0   | 0   | 0   | 0   | 156 | 11  | 26  | 35  | 78  | 100 | 125 |
| hmax | 180 | 180 | 180 | 10  | 180 | 25  | 34  | 77  | 99  | 124 | 155 |
| smin | 0   | 0   | 0   | 43  | 43  | 43  | 43  | 43  | 43  | 43  | 43  |
| smax | 255 | 43  | 30  | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 |
| vmin | 0   | 46  | 221 | 46  | 46  | 46  | 46  | 46  | 46  | 46  | 46  |
| vmax | 46  | 220 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 | 255 |

通过调节预设颜色模型中的色调阈值、饱和度阈值和亮度阈值，可以分割出不同颜色范围的图像，如下图 3-2、3-3 所示：

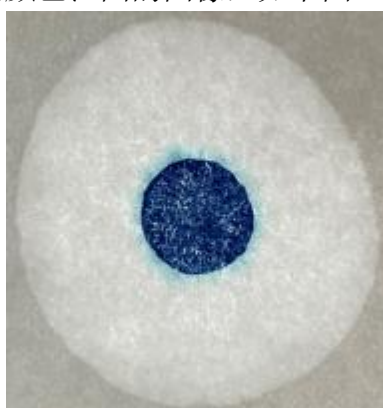


图 3-2 亚甲蓝原始图像

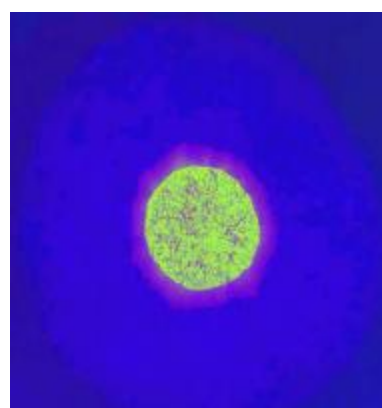


图 3-3 颜色分割后的图像

得到对比明显的颜色区分后的图像后，对应关系通过函数  $[row,col] = ind2sub(sz,ind)$  返回数组  $row$  和  $col$ ，其中包含与大小为  $sz$  的矩阵的线性索引  $ind$  对应的等效行和列下标。要获得满足特定条件的矩阵元素的线性索引，可以带一个输出参数使用  $find$  函数。然后根据 HSV 三个参数对应的不同颜色阈值，调整 HSV 的范围，最终找出图中蓝色部分和浅蓝色部分的区域。将带色晕颜色区域和不带色晕颜色区域近似成圆进行面积计算，利用面积公式  $bwarea$  计算带色晕区域和不带色晕区域的面积，然后利用公式得到带色晕区域的面积和不带色晕区域的面积对应的半径，将其半径作差得到色晕宽度。最后用色晕宽度所对应的像素点与  $1mm$  对应的数量阈值进行比较，当像素点数量大于数量阈值时，判断亚甲蓝试验滴定终点识别成功，带色晕的区域图和不带色晕的区域图如下图 3-4 所示。





图 3-4 左为带色晕的区域，右为不带色晕的区域

### 3.2.2 机制砂亚甲蓝图像识别优化

考虑到本文所采用的机制砂泥粉有不同类型，并且各泥粉掺量不同，形成的亚甲蓝色晕存在一定显示差异，而上述采用的确定阈值范围在一定程度上对亚甲蓝的识别有作用，但是当泥粉含量较少或者泥粉含量较多即出现的色晕太浅或者太深都会对图像的识别存在一定的干扰，因此，在此基础上考虑到自适应阈值法来对机制砂亚甲蓝图像进行优化处理。

利用计算机视觉获取的亚甲蓝图片，基于 MATLAB 平台编写识别亚甲蓝色晕的程序，对于一个 RGB 图像，首先需要转换成 HSV 图像格式，下图 3-5 为亚甲蓝图片各颜色分量的图片，用以体现不同颜色深度：

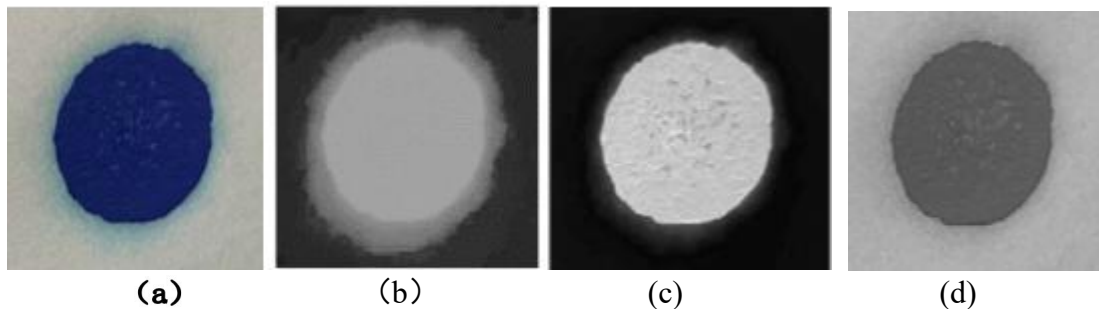


图 3-5 亚甲蓝 HSV 转换图像  
(a 为原始图像，b 为 h 颜色分量，c 为 s 颜色分量，d 为 v 颜色分量)

对亚甲蓝图片进行识别时，首先对各分量进行边缘检测，提出带色晕与不带色晕的边缘信息。Canny 算法作为非常传统的边缘检测算法，其过程包括了去噪，计算梯度值，双阈值检测和边缘连接，其使用非常广泛，但是检测效果与阈值的选择关联很大，而 OTSU 算法作为一种自适应的阈值确定方法，在除去人工设定阈值方法外是被作为寻找最佳阈值的常用方法。OTSU 算法是一种自适应的阈值确定的方法，又叫大津法<sup>[61]</sup>。它是按图像的灰度特性，将图像分成背景和目标两部分。背景和目标之间的类间方差越大，说明构成图像的两部分的差别越大，当部分目标错分为背景或部分背景错分为目标都会导致两部分差别变小。因此，使类间方差最大的分割意味着错分概率最小。类间方差的定义如下<sup>[62]</sup>：

$$\sigma^2 = p_1(m_1 - m_G)^2 + p_2(m_2 - m_G)^2 \quad (3-1)$$

式中： $\sigma$  为类间方差； $p_1$ 、 $p_2$  分别为像素为前景或背景区域的概率； $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_G$  分别为前景、背景和全局平均灰度值。

由于不同的亚甲蓝图片直接处理起来误差偏差较大，需要对亚甲蓝图片进行形态学的腐蚀膨胀和开闭运算将其他杂乱的误差去掉<sup>[63]</sup>。如果图像元  $I$  是二值化后的亚甲蓝图片合集，结构元  $S$  本身也是一个图像集合，则腐蚀操作记为：

$$I * S = \{X | (\hat{S}) \subseteq I\} \quad (3-2)$$

腐蚀的过程是收缩变细的过程，那膨胀就是加粗边长的过程，过程由结构元素  $S$  控制，膨胀操作记为：

$$I \Delta S = \{X | (\hat{S}) \cap I\} \quad (3-3)$$

通过形态学处理能够处理大多数的噪音，对于自适应灰度阈值已区分出来的蓝色与淡蓝色区域经上述膨胀腐蚀操作后，处理结果如下图 3-6 所示：



图 3-6 亚甲蓝二值图像膨胀腐蚀处理结果

将图像二值化处理好后，就可以进行连通域标记，调用函数 `mybwlabel` 对淡蓝色色晕进行区域标记，由于淡蓝色色晕区域直接分割存在识别误差的问题，因此先标记淡蓝色色晕，然后分别通过边缘检测，以便更好找出淡蓝色区域和深蓝色区域的四点极坐标，之后通过拟合最小外接圆，创建淡蓝色和深蓝色区域的外接圆，最后将淡蓝色区域拟合半径减去深蓝色拟合半径区域相减即得到色晕宽度，其中处理过程如下图 3-7 所示：

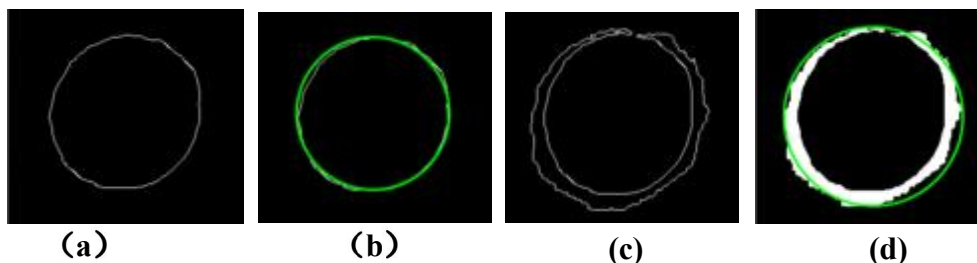


图 3-7 亚甲蓝边缘检测及外接圆的拟合结果

(a 为深蓝色部分边缘检测图，b 为深蓝色部分拟合圆，c 为浅蓝色部分边缘检测图，d 为浅蓝色部分边缘检测图)

### 3.2.3 机制砂亚甲蓝图像识别结果

对于集料中粉体吸附亚甲蓝形成的色晕情况，不同的粉体含量以及粉体种类

形成的颜色情况略有差别，试验人员在试验过程中对较浅和较深颜色的判别都受主观判断影响较大，因此，利用相机获取的亚甲蓝图片对其进行光晕识别。

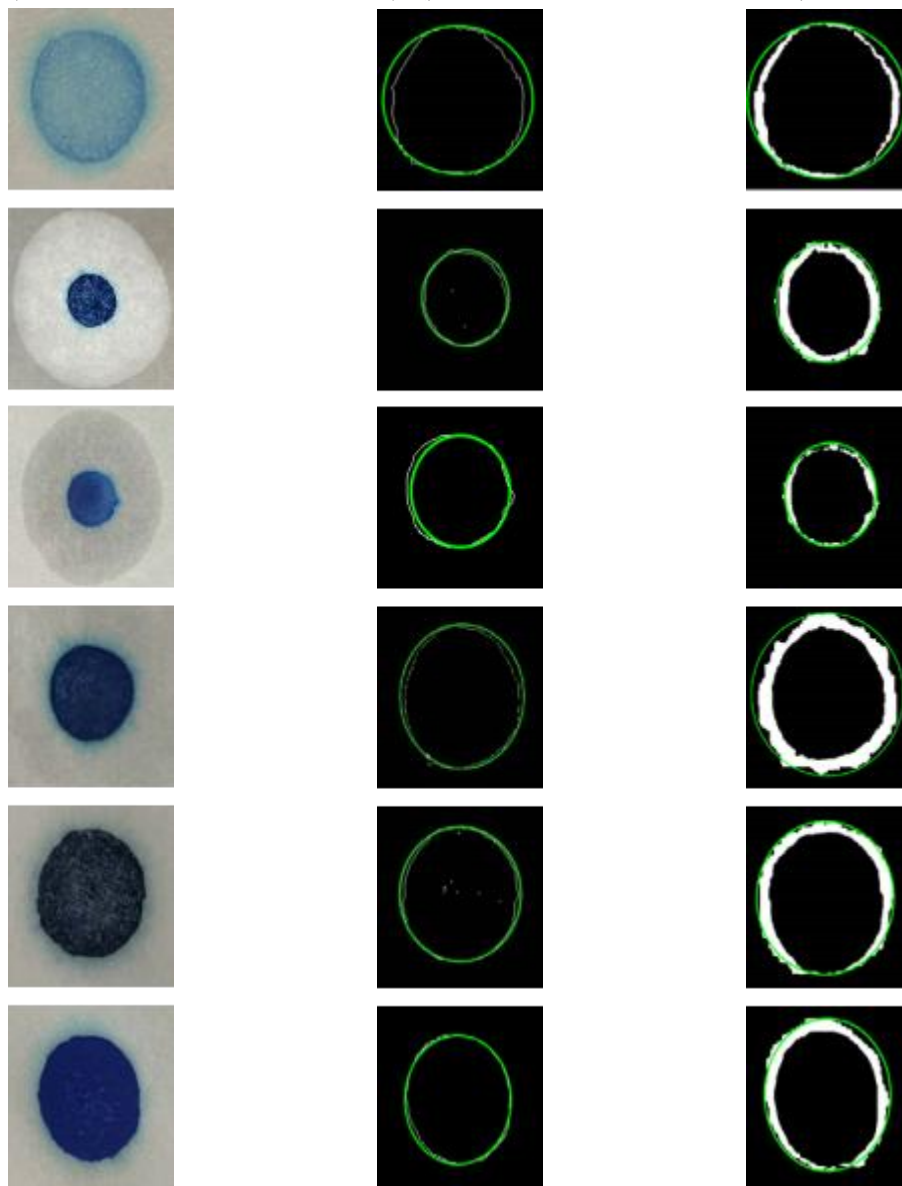


图 3-8 对不同亚甲蓝图片识别结果

从本文基于 HSV 颜色空间模型以及自适应阈值调整的亚甲蓝识别方法的结果来看，在针对不同情况下形成的亚甲蓝色晕，该识别方法都能准确的对深蓝色部分和浅蓝色部分进行识别，并拟合其大致范围内的圆，并根据内外圆差计算得到色晕宽度，从图 3-8 可以看出该机制砂亚甲蓝测试方法有较高的识别效率。

### 3.2.4 APP 界面设计

为了方便亚甲蓝图片的识别，交互式的图形界面显得尤为重要，而 MATLAB 的图形界面开发工具在以前一直是 GUI 界面，随着版本的更新，新的 APP designer 工具受到了更多人的喜欢，他的界面更加友好，代码管理更加的方便，有利于开发

出更加快捷和方便的基于 MATLAB 的科学计算软件。因此，本文基于 MATLAB 软件开发工具，开发了对应的亚甲蓝图像处理的 APP。

调用摄像头采用的是 Matlab 和 Image Acquisition 工具箱开发设计的，首先可以在 Image Acquisition 工具箱里设置摄像机的相关参数，包括亮度、饱和度、对比度、色调等，而且可以先调用出摄像头，通过手动调焦，确保摄像头所拍摄画面和质量最优。设计 APP 界面如下图 3-9 所示：

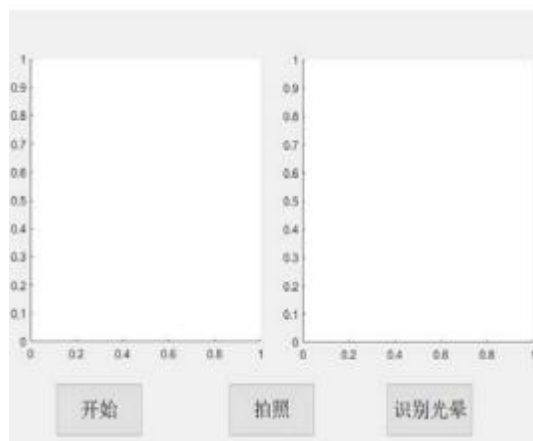


图 3-9 设计 APP 界面图

根据结果图的亚甲蓝值，判断亚甲蓝值是否位于预设范围内，预设范围根据相关的规范进行设置。例如，规范规定要求 MB 值小于 1.4，若 MB 值计算结果得出小于 1.4，则 MB 值符合要求，且输出结果，若计算结果大于 1.4，则 MB 值不符合要求，且输出 MB 值结果。亚甲蓝值的计算步骤为：在判断亚甲蓝试验滴定终点识别成功时，弹出对话框，采用最终滴定结束后的亚甲蓝值滴定量作为输入参数，按照标准规定的预设方式计算得到亚甲蓝值。譬如，当刚好识别成功，输入亚甲蓝值结束滴定量 50mL，接下来就会自动计算结果并判断，判断结果如下图 3-10 所示：

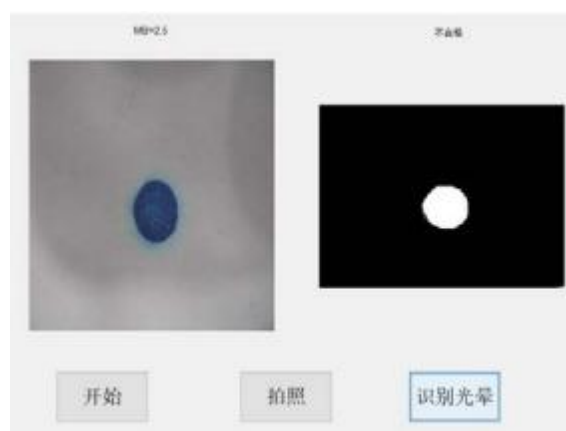


图 3-10 APP 界面中 MB 值的识别

### 3.3 智能测试系统流程

本论文设计的 MB 值智能测试系统流程如图 3-11 所示。首先是设备的安装，包括拍摄组件、调节组件和处理组件；拍摄组件，位于调节组件上，用于拍摄机制砂滴定测试结果的亚甲基蓝值测试图像；调节组件，用于调节拍摄组件与机制砂滴定结果图的拍摄距离；处理组件，用于获取亚甲基蓝值测试图像，并识别亚甲基蓝色晕。然后对于所拍摄到的画面进行图像处理。通过拍摄得到的机制砂滴定测试结果的亚甲基蓝值测试图像，按照预设 HSV 颜色模型将亚甲基蓝值测试图像分割成多种对比明显的颜色区域，将图像进行二值化处理后通过膨胀腐蚀运算，就可以进行连通域标记，调用函数 mybwlabel 对淡蓝色色晕进行区域标记，由于淡蓝色色晕区域直接分割存在识别误差的问题，因此先标记淡蓝色色晕，然后分别通过边缘检测，以便更好找出淡蓝色区域和深蓝色区域的四点极坐标，之后通过拟合最小外接圆，创建淡蓝色和深蓝色区域的外接圆，最后将淡蓝色区域拟合半径减去深蓝色拟合半径区域相减即得到色晕宽度，由于建设用砂的规范明确规定当色晕大于 1mm 时，亚甲基蓝滴定达到终点，而对于如何转换 1mm 的色晕宽度成了要解决的首要问题，以设置的图像分辨率进行尺寸转换，得到预设色晕宽度对应的像素点数量，将像素点数量与数量阈值进行对比，当像素点数量大于数量阈值时，判断亚甲基蓝试验滴定终点识别成功，并计算机制砂滴定结果图的亚甲基蓝值，判断亚甲基蓝值是否位于预设范围内，若是，则亚甲基蓝值符合要求。

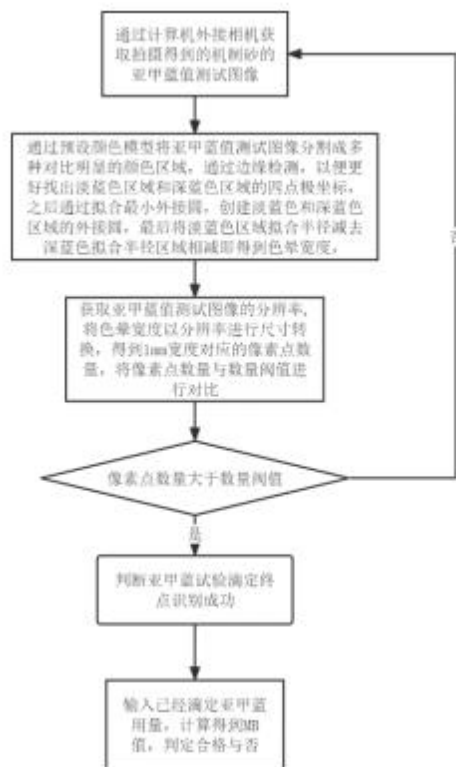


图 3-11 机制砂亚甲基蓝值测试系统检测流程图

### 3.4 MB 值智能测试系统准确率验证

结合《建设用砂》规范开展 MB 值智能测试系统测试结果的验证，本次参与试验验证环节的有，刚了解判定规范的其他专业测试伙伴（以下简称 L），以及持有检测师资格证的从业人员（以下简称 P），还有就是本次的亚甲蓝检测系统（以下简称 T），将每次试验的结果以两位持有检师资格证的从事本行业多年的专业人员进行最终结果的判定。

为了实验的准确和全面性，本次实验组有内掺纯石粉或纯泥粉的样本，以及石粉和泥粉混掺的混合粉类型，还有以蒙脱土、高岭土和伊利土为主的粘土矿物组成的单粘土矿物类型，和来自不同施工现场的机制砂组成的五种对照组，按照标准流程对各类机制砂进行测试，把 L、P 以及 T 的测试结果进行对比，样本的结果以两位检师的识别结果为判别标准。具体试验结果如下表 3.3 所示。

表 3.3 各试验组亚甲蓝图片识别准确率

| 样本类型    | 样本容量<br>/(组) | P/(组) | L/(组) | 准确率/% | T/(组) | 准确率<br>/% |
|---------|--------------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 纯石粉     | 30           | 30    | 23    | 76.6  | 26    | 86.0      |
| 纯泥粉     | 100          | 100   | 88    | 88.0  | 95    | 95.0      |
| 混合粉     | 30           | 30    | 20    | 66.6  | 28    | 93.3      |
| 三种单粘土矿物 | 80           | 80    | 67    | 83.7  | 75    | 93.7      |
| 现场机制砂   | 30           | 30    | 24    | 80.0  | 29    | 96.7      |
| 总准确率/%  |              | 100   |       | 82.2  |       | 93.7      |

通过对以上亚甲蓝图片识别结果的数据分析，可见对于初识规范进行亚甲蓝识别的试验人员来说，主要的识别困难在于对于色晕的出现把握得不准确，对于掺纯石粉的实验组来说，形成的亚甲蓝的图像颜色偏浅，色晕不明显，很难判定是否达到滴定终点，而对于吸附性较大的单粘土矿物，比如蒙脱土，由于滴定的亚甲蓝滴定量较多，导致形成的颜色较深，而继续滴加亚甲蓝溶液，刚开始会出现色晕，随着不断的搅拌，又会被粘土所吸附，导致后面的色晕消失，从而造成试验人员的判断失误。相较于初识规范的试验人员来说，基于计算机视觉的亚甲蓝识别系统在图像识别方面有较大的优势，因为在识别方面，机器视觉是按照既定的算法来进行运算的，不会受每个人的主观因素所影响，因此在判定色晕方面具备一定的优势，并且经过自适应色晕调整过后的图像识别更具优势可言，但是同样在识别过程中，依旧会出现没有识别的情况，原因可能在于滴定过程中滴定不规范，导致的图像重叠明显，并且识别过程中只能针对单个图像进行识别，在识别的多样性上存在部分缺陷，需要人工及时转换滴定图像，操作性上有待加强。

### 3.5 本章小结

结合计算机视觉技术设计了机制砂 MB 值智能测试系统，主要包括装置的构成，图像的获取，图像的处理以及 APP 界面设计和最终结果的处理，验证了计算机视觉的方法与人工识别在准确性上的差别。本章主要结论如下：

1) 测试系统主要由拍摄组件、调节组件和处理组件组成，还包括照明光源组，目的是在保证成像清晰，主要功能在于获取图像数据并对图像数据进行识别；

2) 对亚甲蓝图像的识别通过 HSV 颜色空间来进行颜色分割，主要通过调整蓝色区域的阈值，分割出带色晕和不带色晕的部分，计算出 1mm 所对应的像素点，并通过换算 1mm 所对应的像素点，与之比较，判断亚甲蓝滴定是否达到终点；

3) 考虑到识别过程的准确性以及试验过程中亚甲蓝图片出现的颜色深浅形状问题等，优化了识别代码，从自适应阈值着手，拟合圆的半径出发，得到色晕的像素点，优化后的识别精度较优化前精度明显提高；

4) 为了界面优化，提高效率，设计了亚甲蓝识别的 APP 界面，通过 APP 界面可以实现调用摄像头，拍照，识别的整体过程；

5) 通过基于计算机视觉的亚甲蓝测试系统与试验人员人工识别的准确率进行比较分析，发现人工判定的主观误差较大，而计算机视觉识别的准确率与人工识别相比，占据一定的优势。

## 第四章 不同粉体占比及粘土种类对机制砂吸附影响

由于机制砂是由岩石破碎而成的，在生产过程中附着泥粉，而泥粉和石粉对机制砂 MB 值的影响有差异。泥粉颗粒小，表面疏松多孔，比表面积大，对亚甲蓝的吸附能力强，而石粉对亚甲蓝的吸附能力弱。石粉和泥粉的粒径小，在混凝土中都可以起到填充作用，但石粉结构紧密，对水只有表面物理吸附作用，泥粉结构疏松，吸水膨胀后会影响混凝土强度和耐久性。

有学者进行了相关的研究，秦丹<sup>[64]</sup>等人把石粉最大掺量掺到 25%后，研究不同含量的石粉对亚甲蓝的吸附情况，发现单掺纯石粉的含量并没有使 MB 值有明显的增加，尹慧<sup>[65]</sup>同样也发现石粉对亚甲蓝的吸附较小，李家正<sup>[66]</sup>等人研究发现机制砂 MB 值不仅会受石粉含量的影响，还会受到石粉比表面积的影响，但就算纯石粉的比表面积很大时，其 MB 值一般也不会超过 1.4，董瑞<sup>[67]</sup>等人研究发现几种不同岩性的机制砂对亚甲蓝的敏感程度相差不大，石粉岩性和含量的变化对机制砂 MB 值的影响较小。李北星<sup>[68]</sup>研究发现花岗岩细粉对亚甲蓝有很强的吸附性，MB 值随机制砂中的细粉含量增大而增大。

而对于泥粉相关的研究，刘超群<sup>[69]</sup>等人研究发现在泥粉含量相同的情况下，石粉对机制砂 MB 值的影响非常微弱；而在石粉含量相同的情况下，亚甲基蓝 MB 值随着泥粉含量的增加而逐渐增大，并且掺量越高，变化越明显。吴智取<sup>[70]</sup>对广西地区机制砂的性能参数之间进行相关性分析得到：泥粉含量与 MB 值之间存在中度相关。Kumar<sup>[71]</sup>研究发现不同矿物类型的黏土性质不同，其原因是黏土的晶体结构是具有层状结构的各种硅酸盐组成。

不同粉体对于亚甲蓝的吸附不同，本文针对矿山重庆龙积达建材有限公司生产的机制砂进行洗净烘干破碎后得到的石粉以及取自矿山的泥土烘干破碎得到的泥粉进行相关 MB 值影响实验，在此基础上分析含泥含粉量与 MB 值动态关系。

### 4.1 不同粉体占比对机制砂 MB 值影响试验

#### 4.1.1 石粉对机制砂 MB 值影响

将机制砂洗净烘干后破碎，通过 0.075mm 的筛孔筛分后得到试验所需石粉，由于不同厂家破碎机制砂方式方法以及母岩强度不同，各个厂家得到的机制砂含粉量参差不齐，因此根据规范《石灰石粉在混凝土中应用技术规程 JGJ/T318》中在普通硅酸盐水泥中最大掺量为 25%来考虑本次的石粉最大掺量范围，而实际上使用硅酸盐水泥的钢筋混凝土中石灰石粉的掺量最大能达到 35%，由于本文采用的是普通硅酸盐水泥，为了实验数据的客观性选择石粉的最大掺量为 30%。



将石粉按机制砂质量的 3%、5%、7%、10%、12%、15%、18%、20%、22%、25%、28%、30%等 12 个比例分别内掺到洗净烘干筛分的机制砂中，混合充分后进行亚甲蓝值测试，由于测试过程中，石粉对亚甲蓝的吸附比较小，因此采用蠕动泵来滴加量比较小的试验，如图 4-1 所示。用蠕动泵向悬浮液中加入亚甲基蓝溶液时，可精确至 0.001mL，比传统采用胶头滴管的方式更精确，污染更小，密封性更好。但是在处理数据的时候按照规范规定的要求处理数据，保留一位小数（下文 MB 值数据均按此要求保留），具体试验结果如表 4.1，图 4-2 所示。



图 4-1 蠕动泵

表 4.1 石粉含量对机制砂 MB 值的影响

| 石粉含量/%       | 3   | 5   | 7   | 10   | 12   | 15   | 18   | 20   | 22   | 25   | 28   | 30   |
|--------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 亚甲蓝<br>用量/mL | 4.0 | 6.7 | 8.7 | 11.0 | 13.0 | 15.1 | 15.5 | 16.0 | 16.6 | 17.1 | 17.5 | 18.0 |
| MB 值         | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.6  | 0.7  | 0.8  | 0.8  | 0.8  | 0.8  | 0.9  | 0.9  | 1.0  |

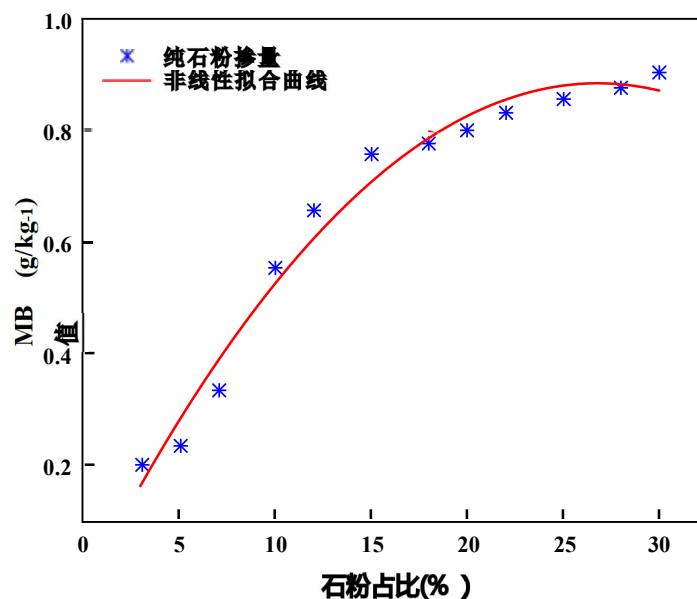


图 4-2 不同石粉含量的机制砂 MB 值

由上图 4.2 可知，在不同石粉占比的机制砂 MB 值试验中，石粉对于亚甲蓝的吸附是有限的，并且吸附量非常少，石粉含量与 MB 值之间的关系大致符合如上图所示的多项式关系，其相关系数  $R^2$  达到了 0.987。在石粉含量占机制砂质量的 3% 时，只需相当少的亚甲蓝溶液就可以使其达到吸附饱和，而就算石粉含量占机制砂质量的 30%，最终的 MB 值也只有 1.0，远没有达到规范亚甲蓝试验不合格的 MB 值，并且随着石粉含量的继续增多，MB 值的增加幅度逐渐减缓，充分说明了石粉对亚甲蓝的吸附较小，对机制砂 MB 值的影响较小。

#### 4.1.2 泥粉对机制砂 MB 值影响

将破碎筛分后的泥粉按机制砂质量的 1%-10% 等间距的掺入并混合均匀后，测试其 MB 值，泥粉掺量的确定是由于在加入大量泥粉过后，泥粉对亚甲蓝的吸附性非常强，每次所需的亚甲蓝溶液滴定量十分大，因此在能获得部分数据的情况下，最大掺入量确定为 10%。试验结果如表 4.2，图 4-3 所示。

表 4.2 泥粉含量对机制砂 MB 值的影响

| 泥粉含量                                    | 1%   | 2%   | 3%   | 4%   | 5%    | 6%    | 7%    | 8%    | 9%    | 10%   |
|-----------------------------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 亚甲蓝用量/mL                                | 23.0 | 43.2 | 59.1 | 88.9 | 109.6 | 128.0 | 144.6 | 157.0 | 178.0 | 192.0 |
| MB 值/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 1.2  | 2.2  | 3.0  | 4.4  | 5.5   | 6.4   | 7.2   | 7.8   | 8.9   | 9.6   |

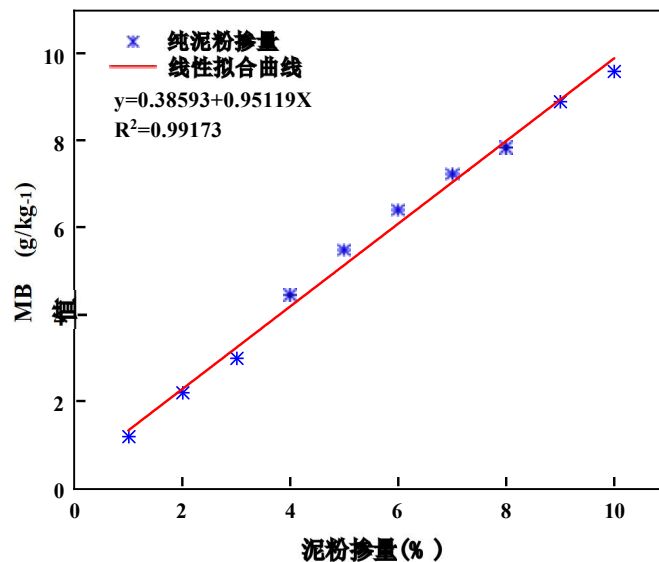


图 4-3 不同泥粉含量的机制砂 MB 值

由上图 4-3 可知，随着泥粉掺量的增大，MB 值呈相同的增长趋势，并且泥粉掺量与 MB 值的大小有着极强的线性相关性，相关系数  $R^2$  为 0.99173，并且由表 4.2 可知，在泥粉掺量为 1% 的情况下，MB 值只有 1.2，但当泥粉掺量为 10% 时，亚甲蓝滴定量已经达到了 192mL，MB 值为 9.6，可见矿山的泥土对于亚甲蓝的吸附量是相当大的，相比于石粉来讲，在同样掺量 10% 的情况下，矿山泥粉对亚甲蓝的吸

附强度是石粉的 16 倍。

通过对矿山泥粉进行XRD全岩定量测试分析了矿山泥粉对亚甲蓝的吸附性大的原因。测试结果如图 4-4 和表 4.3 所示。

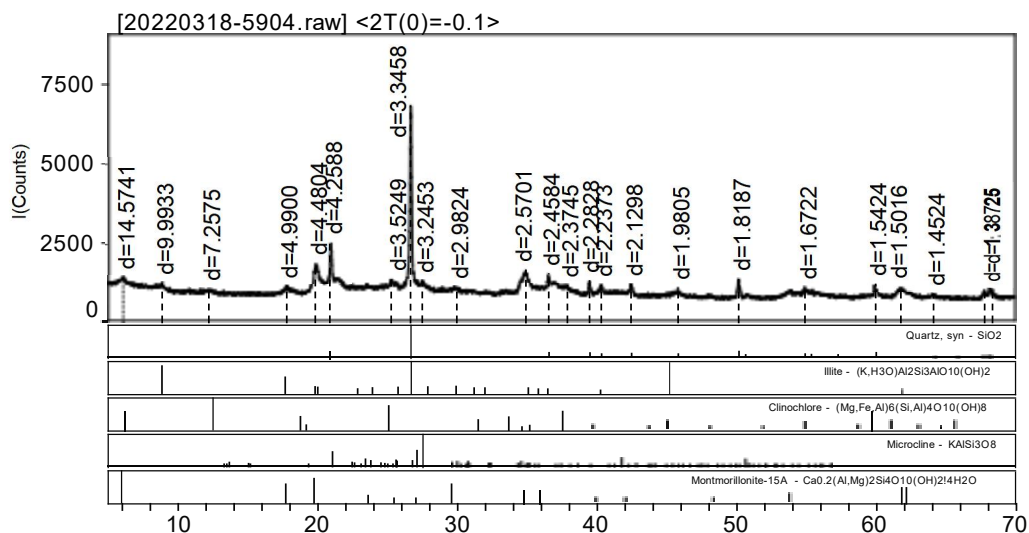


图 4-4 泥粉全岩定量分析图谱

表 4.3 泥粉 XRD 全岩定量分析报告

| 成分     | 蒙脱土  | 伊利土  | 绿泥土 | 铝酸钙 | 石英   | 钾长石 |
|--------|------|------|-----|-----|------|-----|
| 含量/wt% | 44.7 | 19.9 | 2.6 | 0   | 29.5 | 3.3 |

通过以上对泥粉进行的 XRD 全岩定量分析可知，矿山泥粉中的粘土矿物种类较多，其中组成成分占比最多的是蒙脱土，其次就是石英和伊利土。而蒙脱土是一种硅酸盐的天然矿物，具有一定的膨胀性，蒙脱土是一种 2:1 型的层状硅酸盐，属于单斜晶系。其单元晶层为两片硅氧四面体中间夹一个铝氧八面体晶片构成，蒙脱土的单元晶层之间靠氧原子联接，联接力较弱，因此其层间距较大，一般大多维持在 0.9~2.1nm 之间。同时，蒙脱土的晶层间还具有较强的吸水特性，吸水之后体积发生膨胀，且其吸水膨胀性随着层间可交换阳离子数和水分子层数的不同而不同，一般变化在 1.2~2.0nm 之间<sup>[72]</sup>。所以，蒙脱土含量占比最多的泥粉，对亚甲蓝的吸附量较大。

#### 4.1.3 混合粉对机制砂 MB 值影响

研究了纯石粉和纯泥粉与机制砂 MB 值的关系后，由于现实生产中的机制砂中的粉体通常是泥粉和石粉混合粉体，为了更好的分析石粉和泥粉与机制砂 MB 值的动态关系，本文控制石粉和泥粉的含量，研究在不同占比的石粉和泥粉含量的掺比下，机制砂 MB 值的变化关系。

混合粉掺量的最大掺比按照纯石粉的最大掺比来试验，由于考虑到泥粉对亚甲蓝的吸附较大，因此设计不同粉体掺比时，泥粉最大占比随着粉体掺比的增加而减少。试验结果如下表 4.4 和下图 4-5 所示。

表 4.4 粉体含量为 3%、5%、7%的机制砂 MB 值

| 粉体占比 \ 泥粉占比 | 粉体占比 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|             | 0    | 9   | 18  | 27  | 36  | 45  | 54  | 63  | 72  | 81  | 90  | 100 |
| 3% (MB 值)   | 0.2  | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.3 | 1.5 | 1.8 | 2.0 | 2.5 | 2.6 | 2.8 | 3.0 |
| 5% (MB 值)   | 0.3  | 0.7 | 1.1 | 1.5 | 1.9 | 2.3 | 2.9 | 3.4 | 3.9 | 4.5 | 5.1 | 5.5 |
| 7% (MB 值)   | 0.4  | 0.9 | 1.5 | 2.1 | 2.7 | 3.5 | 4.2 | 4.7 | 5.5 | 6.1 | 6.7 | 7.2 |

注：表中粉体占比表示总的粉体占机制砂质量的比例，泥粉占比表示泥粉占总的粉体的质量比例。

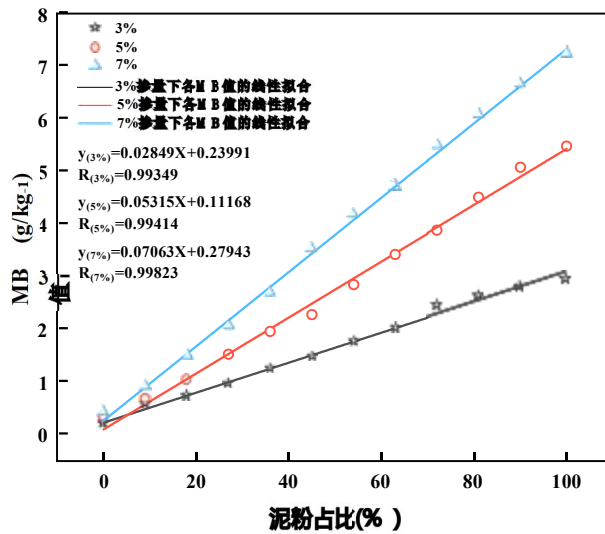


图 4-5 粉体含量为 3%、5%、7%的机制砂 MB 值拟合曲线

从图 4-5 可知，在泥粉和石粉的混合粉掺量下，MB 值与泥粉的占比呈现强烈的线性相关，相关系数都在 0.99 以上，很明显石粉含量的增多并没有对 MB 值起到关键性作用，掺量从 3%到 7%，泥粉占比与 MB 值得线性相关性越大，在纯石粉中 MB 值差距较小，而随着泥粉含量的增多，MB 值增加的幅度也越大，从 7%最大掺量的 MB 增加到了 3%最大掺量的 MB 2.4 倍。

表 4.5 粉体含量为 10%、12%、15%的机制砂 MB 值

| 粉体占比 \ 泥粉占比/% | 粉体占比 |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
|---------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
|               | 0    | 9   | 18  | 27  | 36  | 45  | 54  | 63  | 72  |  |
| 10% (MB 值)    | 0.6  | 1.6 | 2.3 | 3.3 | 4.3 | 5.2 | 5.7 | 6.7 | 7.4 |  |
| 12% (MB 值)    | 0.7  | 1.9 | 2.7 | 3.6 | 4.5 | 5.8 | 6.7 | 7.7 | 8.8 |  |
| 15% (MB 值)    | 0.8  | 2.2 | 3.6 | 4.4 | 5.7 | 6.9 | 8.1 | 9.3 | 9.9 |  |

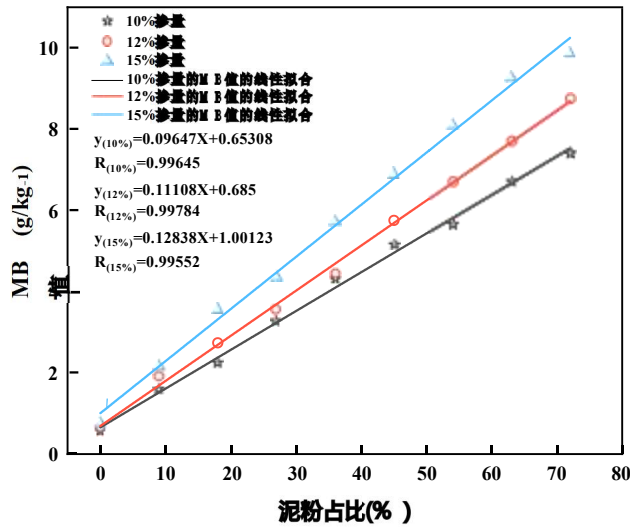


图 4-6 粉体含量为 10%、12%、15%的机制砂 MB 值拟合曲线

表 4.6 粉体含量为 18%-30%的机制砂 MB 值

| 泥粉占比/%     | 0   | 9   | 18  | 27  | 36  | 45   |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 18% (MB 值) | 0.8 | 2.5 | 3.8 | 5.3 | 6.4 | 8.2  |
| 20% (MB 值) | 0.8 | 3.2 | 4.9 | 6.1 | 7.9 | 9.0  |
| 22% (MB 值) | 0.8 | 3.6 | 5.2 | 6.4 | 8.2 | 9.4  |
| 25% (MB 值) | 0.9 | 3.4 | 5.4 | 6.7 | 9.0 | 10.3 |
| 28% (MB 值) | 0.9 | 3.5 | 5.6 | 7.6 | 9.7 | 11.0 |
| 30% (MB 值) | 0.9 | 3.7 | 5.8 | 8.2 | 9.9 | 11.9 |

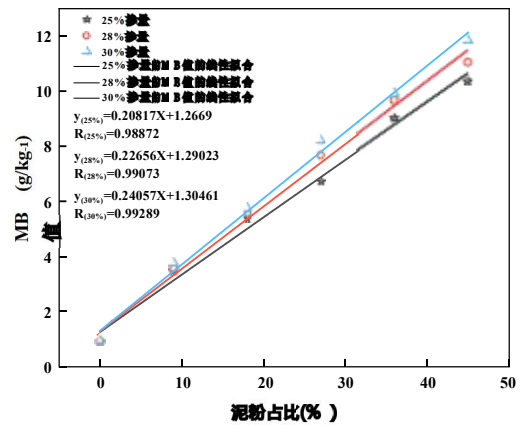
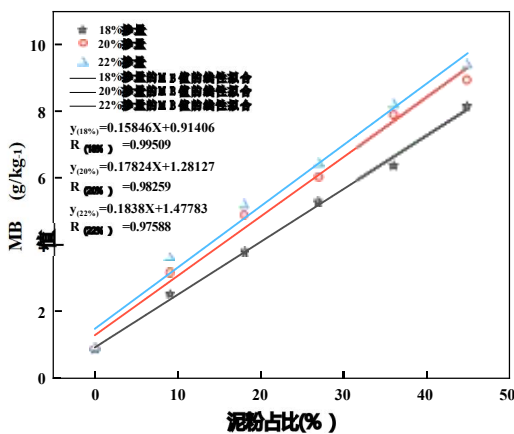


图 4-7 粉体含量为 18%-30%的机制砂 MB 值拟合曲线

单独从泥粉占比的角度来分析， 不管粉体的掺比是多少， MB 值都与泥粉的含量呈明显的线性相关， 各相关系数基本均在 0.99 以上。当泥粉掺量掺到最大 30%

时，MB 值为 11.9 是泥粉掺量最小 3% 时的 4 倍，由此可见，泥粉与机制砂 MB 值保持相当强的线性关系，并且起主要吸附作用的就是泥粉，石粉的吸附作用远小于泥粉。但是石粉的含量也是变化的，因此通过对以下图 4-8 来分析表示泥粉和石粉共同作用下的 MB 值变化情况。

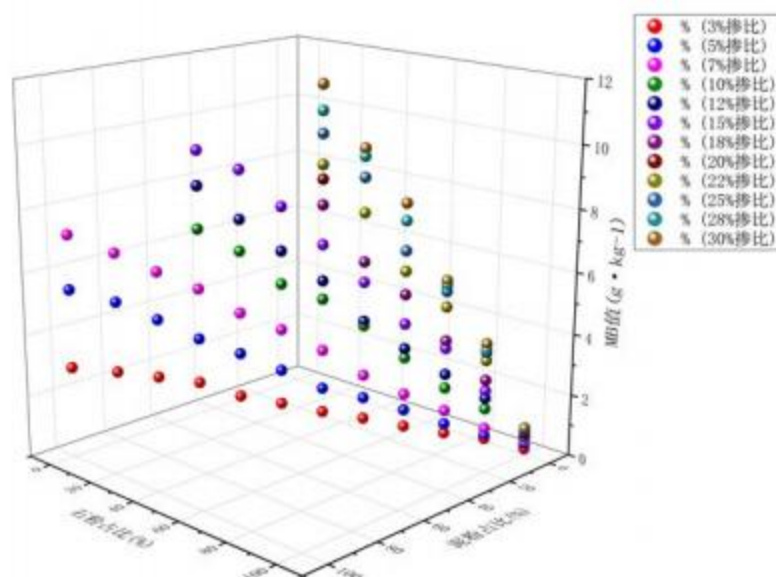


图 4-8 混合粉体含量为 0%-30% 的机制砂 MB 值三维散点图

通过对混合粉体即泥粉和石粉占比的三维散点图观察可知，验证了之前的观点，即泥粉是对 MB 值增加起主导作用的因素，并且随着泥粉含量的不断增加，各相同颜色的散点组成的虚线越接近 Z 轴，即对亚甲蓝的吸附越来越大，并且石粉的作用更加微弱，通过三维图像，能更加直观地感受到混合粉体对 MB 值的影响。

## 4.2 不同矿物粉体的吸附性研究

泥之所以对混凝土性能有较大的影响，是因为其含有吸水性、膨胀性较强的粘土，粘土是细分散的层状铝硅酸盐类矿物总称，最为常见的粘土为蒙脱土、伊利土和高岭土三种。它们在浆体搅拌过程中不但消耗大量拌合水，还会与水泥颗粒竞争吸附聚羧酸减水剂，由此导致浆体中的聚羧酸减水剂对水泥颗粒等丧失分散能力，对混凝土工作性能和强度产生显著影响。因此探究集料中的粉体，以及泥粉的粘土主要矿物组成的吸附特性，对了解不同粉体占比对水泥基材料的影响有很大的作用。

### 4.2.1 不同粉体的膨胀容试验

粘土矿物和泥粉吸水膨胀导致层间距离增大，或者细化导致表面积增大，从而吸附更多外加剂或者拌合水，导致减水剂和拌合水的减少，从而影响混凝土的工作性，研究不同粉体的膨胀性能，就能更好的了解各粉体性能，可以根据其膨胀特性寻找解决方法抑制其膨胀，能够改善含减水剂的水泥基胶材的工作性能。

粘土的膨胀性用膨胀容来表示，膨胀容是指粘土在 1:1 HCl 溶液中膨胀后的



溶剂，以毫升/克表示，一般来说，粘土的膨胀容越大，吸水后膨胀能力越强。本文以破碎筛分后的泥粉、石粉、高岭土、蒙脱土以及伊利土五种粉体为测试样本，分别测试这五种粉体的膨胀容，具体试验结果如下图 4-8、4-9 所示：

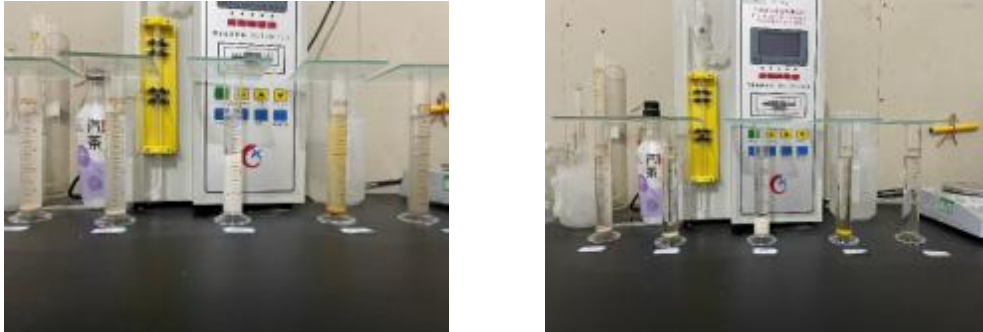


图 4-8 粉体膨胀容试验照片（左为试验刚结束，右为沉淀 24h 后）

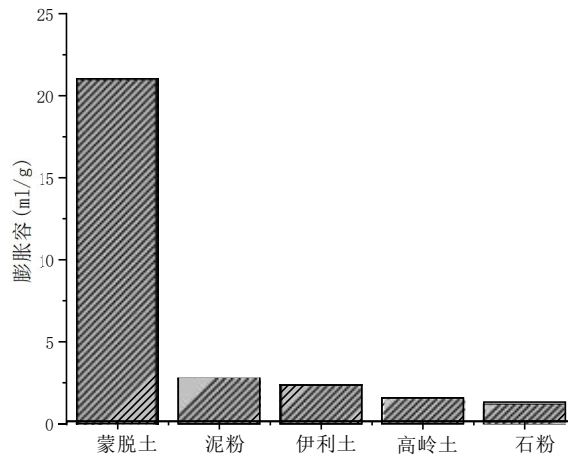


图 4-9 五种不同粉体的膨胀容

上图 4-9 为五种不同粉体的膨胀容试验结果，从上图可以看出，不同粉体的膨胀容差异性很大，其中蒙脱土由于其独特的层间结构其膨胀容远超其他粉体，达到了 21ml/g，而泥粉、伊利土、高岭土、石粉的膨胀容有差异，但是差距不大，其中由于石粉在稀盐酸中会与盐酸反应，并且石粉基本不会膨胀，因此，石粉的膨胀容是最小的。而矿山的泥粉，由于其矿物组成成分最多的是蒙脱土，因此它的膨胀容是第二高的，但它的膨胀容也只有纯蒙脱土的八分之一左右，其次是伊利土的膨胀容略高于高岭土。

#### 4.2.2 不同粘土矿物粉体的 MB 值试验

将伊利土、高岭土按 200g 机制砂质量的 3%、6%、9%、12%、15%、18%、21%、24%、27%、30%等 10 个比例分别内掺到机制砂中充分混合后测定，试验结果如表 4.6 表 4.7 所示，图 4-9 所示；在设计蒙脱土掺量时，发现其对亚甲蓝的吸附能力比其他两种泥粉强很多，因此蒙脱土的试验掺量与前面两种泥粉的试验掺量设计不同，将蒙脱土按 200g 机制砂质量的 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、1.2%、1.4%、1.6%、1.8%、2.0%等 10 个比例分别内掺到机制砂中充分混合后测定，

结果如表 4.8，图 4-10 所示。

表 4.6 伊利土含量对机制砂 MB 值的影响

|          |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
|----------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 伊利土含量/%  | 3    | 6    | 9    | 12   | 15   | 18   | 21    | 24    | 27    | 30    |
| 亚甲蓝用量/mL | 16.5 | 25.0 | 44.1 | 58.9 | 75.6 | 90.2 | 111.6 | 124.7 | 137.1 | 145.7 |
| MB 值     | 0.8  | 1.3  | 2.2  | 2.9  | 3.8  | 4.5  | 5.6   | 6.2   | 6.9   | 7.3   |

表 4.7 高岭土含量对机制砂 MB 值的影响

|          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 高岭土含量/%  | 3    | 6    | 9    | 12   | 15   | 18   | 21   | 24   | 27   | 30    |
| 亚甲蓝用量/mL | 14.9 | 25.5 | 36.1 | 48.6 | 57.5 | 66.3 | 75.8 | 87.2 | 95.2 | 118.4 |
| MB 值     | 0.7  | 1.3  | 1.8  | 2.4  | 2.9  | 3.3  | 3.8  | 4.4  | 4.8  | 5.9   |

表 4.8 蒙脱土含量对机制砂 MB 值的影响

|          |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| 蒙脱土含量/%  | 0.2  | 0.4  | 0.6  | 0.8  | 1.0  | 1.2  | 1.4  | 1.6   | 1.8   | 2.0   |
| 亚甲蓝用量/mL | 24.0 | 34.0 | 50.3 | 61.1 | 72.6 | 82.9 | 98.3 | 111.3 | 120.8 | 137.9 |
| MB 值     | 1.2  | 1.7  | 2.5  | 3.1  | 3.6  | 4.1  | 4.9  | 5.6   | 6.0   | 6.9   |

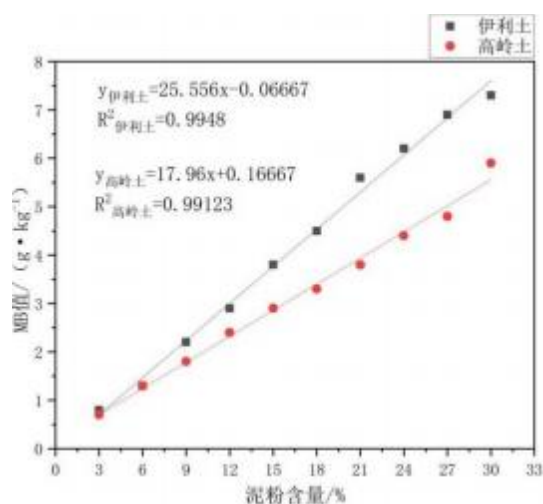


图 4-9 不同伊利土和高岭土含量的 MB 值

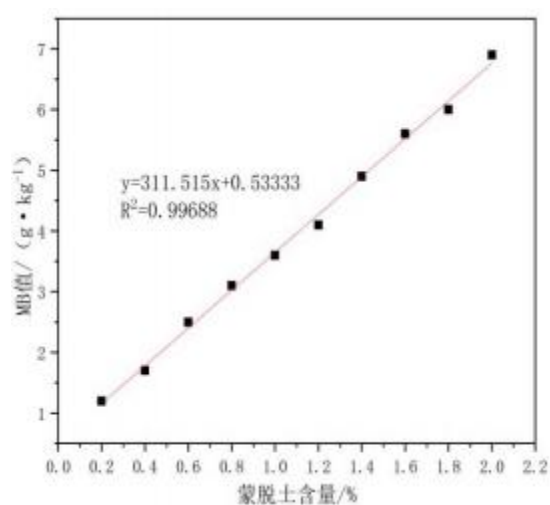


图 4-10 不同蒙脱土含量的机制砂 MB 值

由表 4.6 和表 4.7 可知，当伊利土含量为 3%时，MB 值为 0.8，伊利土含量为 30%时，MB 值为 7.3，伊利土含量与 MB 值的相关性线性公式为  $y=25.556x-0.06667$ ，其相关系数为 0.9948。当高岭土含量为 3%时，MB 值为 0.7，高岭土含量为 30%时，MB 值为 5.9；高岭土含量与 MB 值的线性公式为  $y=17.96x+0.16667$ ，其相关系数为 0.99123。随着粘土矿物粉体含量的增大，MB 值逐渐增大，其增幅较大，两种粘土矿物粉体对 MB 值的影响都远大于石粉对 MB 值的影响。

由图 4-9 可知，在泥粉含量较小时，伊利土和高岭土对 MB 值的影响相差不



大，随着泥粉含量的增大，伊利土的 MB 值增幅大于高岭土的 MB 值增幅，这就表明了伊利土对 MB 值的影响大于高岭土对 MB 值的影响。

由表 4.8 和图 4-10 可知，蒙脱土含量与 MB 值的线性公式为  $y=311.515x+0.53333$ ，其线性相关系数为 0.99688。当蒙脱土含量为 0.2% 时，MB 值为 1.2，蒙脱土含量为 2% 时，MB 值为 6.9，与上文中的石粉和前两种粘土矿物粉体含量到 30% 时，MB 值为 1.1，7.3 和 5.9 相比，蒙脱土的 MB 值增幅非常大，远超过石粉和前两种粘土矿物粉体，这说明蒙脱土是三种粘土矿物粉体中对亚甲蓝的吸附是最强的，它对 MB 值的影响最大。

不同粘土矿物粉体对 MB 值的影响不同，本试验使用的三种粘土矿物粉体对亚甲蓝的敏感程度：蒙脱土 > 伊利土 > 高岭土，三种粘土矿物粉体与 MB 值的线性相关系数都 > 0.99。

三种粘土矿物粉体对亚甲蓝的敏感程度不同时因为其晶体结构的不同。蒙脱土属于 2:1 型晶格，结构层间有阳离子或水分子存在，强氧离子链加强结构层之间的连结，因此有很强的吸附能力。伊利土也属于 2:1 型晶格，但是与蒙脱土不同的是，其晶层之间通过钾离子连接，因此晶层间距离比较固定，不易改变，膨胀性也小。高岭土属于 1:1 型晶格，即结构单元层由硅氧四面体片与氢氧铝石八面体片连结形成的结构层沿 c 轴堆垛而成，层间没有阳离子或水分子存在，因此其吸附能力低于蒙脱土和伊利土。

### 4.3 不同粉体对水泥水化放热的影响

水泥水化是水泥基材料性能的基础，而机制砂不可避免的带来的粉体一直是大家思考的问题之一，集料带来的粉体是否会对水泥水化产生影响。有研究<sup>[73]</sup>表明水泥颗粒有被泥土包裹的可能，并且粘土可有与水泥发生反应的可能，进而影响水化过程，最终导致水泥水化不充分，影响水泥强度等。Davis<sup>[74]</sup>认为粘土颗粒是与水泥直接发生化学反应从而影响水泥水化过程，影响后期强度。本文将集料中所携带的泥粉、石粉以及粘土矿物组成蒙脱土、高岭土、伊利土分别与水泥混合进行水化放热试验，研究在水泥水化过程中水化放热以及粉体对减水剂的吸附后对水化放热影响。

水化热作为反映水泥基本性质的一个指标，其中放热速率和水化放热量在一定程度上能够很好的反映水泥水化放热过程。通过对不掺聚羧酸减水剂的各粉体进行水化放热试验，具体试验结果如下图所示：

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/177032000014006030>