

文章编号:1007-9629(2023)01-0071-07

# 人工砂 MB 值影响机制研究

李家正\*, 龚德新, 林育强, 李杨, 石妍  
(长江水利委员会长江科学院材料与结构研究所, 湖北武汉 430010)

**摘要:**研究了人工砂母岩岩性、粒径、石粉含量及比表面积、黏土矿物类型及含量对人工砂亚甲蓝值(MB 值)的影响规律及机制。结果表明:人工砂母岩岩性、粒径对其 MB 值影响较小,人工砂石粉含量及比表面积对其 MB 值有一定影响;人工砂黏土矿物类型和含量对 MB 值的影响显著,其中膨胀性黏土(如蒙脱石)的吸附性能远远强于非膨胀性黏土(如伊利石),相同含量蒙脱石人工砂 MB 值是伊利石人工砂的 10 倍左右。对于 MB 值超标的人工砂,降低其 MB 值的关键在于控制其中膨胀性黏土矿物的掺入及其他种类黏土矿物的含量。

**关键词:**人工砂;MB 值;石粉;黏土;膨胀性;吸附性能

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.01.010

## Study on Influential Mechanism of Artificial Sand MB Value

LI Jiazheng\*, GONG Dexin, LIN Yuqiang, LI Yang, SHI Yan

(Institute of Materials and Structure, Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** The influential law and mechanism about rock lithology, particle size, stone powder content and specific surface area, clay mineral type and content of artificial sand on the methylene blue value(MB value) were studied. The results show that rock lithology and particle size of artificial sand have less influence on MB value, stone powder content and specific surface area of artificial sand have some influence on MB value; clay mineral type and content affect significantly the artificial sand MB value. Adsorption performance of expansile clay(such as montmorillonite) is much stronger than that of non-expansile clay(such as illite), the MB value of montmorillonite artificial sand is about 10 times that of illite artificial sand with the same content. For artificial sand with excessive MB value, the key to reducing its MB value is to control the addition of expansile clay minerals and control the content of other kinds of clay minerals.

**Key words:** artificial sand; MB value; stone powder; clay; expansibility; adsorption performance

人工砂又称机制砂,通过岩石破碎加工而成。人工砂中微粒具有的吸附性对混凝土性能影响较大,特别是有较强吸附性能的微粒,不仅导致新拌混凝土流动性降低,坍落度损失增加,还会对混凝土强度造成不利影响<sup>[1-3]</sup>。人工砂中的微粒是指粒径( $d$ )不大于 0.16 mm 且其中含有石粉和黏土的颗粒<sup>[4]</sup>。文献<sup>[5]</sup>中表征人工砂微粒吸附性能的指标是人工砂的亚甲蓝

值(MB 值)。当 MB 值小于 1.4 g/kg 时,微粒以石粉为主;当 MB 值大于 1.4 g/kg 时,微粒以泥(黏土)为主。

相关研究<sup>[6-8]</sup>表明:人工砂 MB 值随着砂子粒径的逐渐减小而增大,当粒径小于 0.6 mm 后人工砂 MB 值增幅较大;石粉岩性、含量和比表面积对人工砂 MB 值影响很小;微粒的矿物特性、比表面积和含量共同决定人工砂 MB 值的大小。相同含量不同特性

收稿日期:2021-11-11; 修订日期:2021-12-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U2040222,52179122);中央级公益性科研院所基本科研业务费(CKSF2019374/CL,CKSF2019394/GC)

第一作者(通讯作者):李家正(1970—),男,湖北京山人,长江水利委员会长江科学院教授级高级工程师,硕士生导师,博士。E-mail:1659959395@qq.com

的微粒对人工砂MB值的影响依次为膨润土>自然土>高岭石>石粉.高岭石、蒙脱石均为硅酸盐黏土矿物,其独特的层状结构和表面过剩电荷使得它们具有由弱到强的阳离子交换能力.微粒的阳离子交换能力越强、含量越高,所吸附的亚甲基蓝溶液越多,MB值也就越大.

目前针对人工砂本身的各项特性、黏土对MB值的影响及黏土的吸附机理研究还不够全面、深入.鉴于此,本文通过研究这些因素对人工砂MB值的影响,探讨了黏土颗粒的吸附机理,以期对人工砂MB值的有效控制提供途径.

## 1 试验

### 1.1 原材料

不含黏土的人工砂由片麻岩、砂岩、灰岩和花岗岩这4种岩石加工而成,用标准筛将其筛分得到粒级为2.5~5、1.25~2.5、0.63~1.25、0.315~0.63、0.16~0.315 mm和小于0.16 mm的各级筛余颗粒;外掺黏土为高纯度黏土矿物,包括膨胀性黏土类的蒙脱石和非膨胀性黏土类的伊利石、高岭石、蛭石.根据试验需要,配制各组人工砂样品的细度模数在2.0~3.2之间,石粉含量(质量分数,文中涉及的含量、液限等均为质量分数)在5%~30%之间,黏土含量在0.5%~5.0%之间.

### 1.2 试验方法

提前筛分人工砂各粒级的颗粒,按每组试验需要重新配制人工砂级配,并控制掺入的石粉和黏土类型、含量,得到各组已知石粉、黏土含量的人工砂.采用单因素分析方法进行试验,每次试验控制1个变量,从而剥离和排除其他因素的干扰.按照SL/T352—2020《水工混凝土试验规程》测试一定量的人工砂悬浊液中所能吸附1%亚甲基蓝溶液的体积,并计算人工砂的MB值.据此,研究人工砂颗粒粒径,石粉含量,黏土类型、掺量等因素对其MB值的影响;对黏土进行表面微观形貌扫描电镜(SEM)分析、液塑限、塑性指数、颗粒粒径组成和比表面积测试,并建立黏土特性参数与人工砂MB值关系的数学模型,定性和定量地研究具有不同膨胀性能的黏土吸附机理及对人工砂MB值的影响.

## 2 结果与分析

### 2.1 人工砂颗粒对MB值的影响

最大粒径分别为0.315、0.63、1.25、2.5 mm且石粉含量均为9.3%的4组纯花岗岩人工砂MB值如图1所示.由图1可见:随着人工砂最大粒径的减小,MB值逐

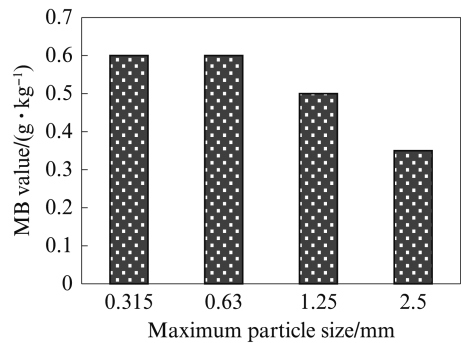


图1 人工砂MB值与最大粒径的关系  
Fig. 1 Relationship between MB value and maximum particle size of artificial sand

渐增大,当人工砂最大粒径从2.5 mm减小至0.315 mm,MB值仅从0.35 g/kg增加至0.60 g/kg,增大趋势不明显,说明粗颗粒砂对人工砂MB值的影响较小.

细度模数分别为2.0、2.4、2.8和3.2的4组纯花岗岩人工砂MB值如图2所示.由图2可见:当人工砂细度模数由3.2减小至2.4时,人工砂的MB值无变化;当细度模数达到2.0时,MB值也仅由0.50 g/kg增至0.60 g/kg,说明人工砂的MB值受其细度模数的影响较小.

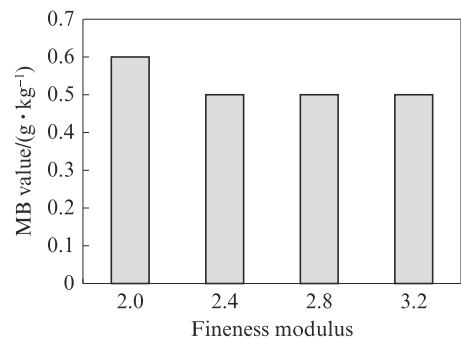


图2 人工砂MB值与细度模数的关系  
Fig. 2 Relationship between MB value and fineness modulus of artificial sand

粒级分别为2.5~5.1、1.25~2.5、0.63~1.25、0.315~0.63、0.16~0.315 mm和小于0.16 mm的6组纯花岗岩人工砂MB值如图3所示.由图3可见:人工砂MB值随着粒级的减小逐渐增大;粒级在0.16 mm以上时,MB值均未超过0.50 g/kg,而粒级小于0.16 mm的人工砂(石粉)MB值高达1.10 g/kg.这说明在人工砂的各粒级颗粒中,石粉对MB值的影响最大.

综上所述,纯花岗岩人工砂的MB值随着最大粒径、细度模数和粒级的减小而增大.这是因为人工砂颗粒的粒径越小,颗粒的比表面积越大,同时所附着的石粉更多,最终还应归结于人工砂所含石粉对MB值的影响.

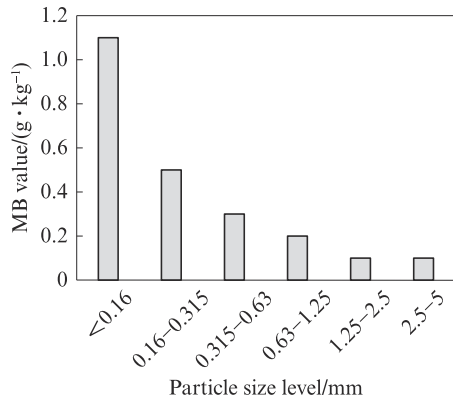


图3 人工砂MB值与粒级的关系

Fig. 3 Relationship between MB value and particle size level of artificial sand

### 2.2 石粉特性对人工砂MB值的影响

母岩分别为片麻岩、砂岩、灰岩、花岗岩且石粉含量分别为10%、20%和30%的纯人工砂MB值如图4所示.由图4可见:相同石粉含量的4种岩性人工砂MB值差值仅为0.20 g/kg左右,说明人工砂的MB值与石粉岩性关系不大.

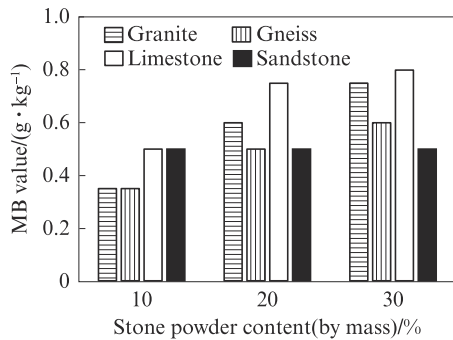


图4 不同石粉含量、岩性的人工砂MB值

Fig. 4 MB value of artificial sand with different contents of stone powder and its lithology

石粉含量分别为5%、10%、15%、20%、25%和30%的纯花岗岩人工砂MB值如图5所示.由图5可见:人工砂MB值随着石粉含量的增加呈近似线性增加;当人工砂石粉含量提高到30%时,MB值也仅为0.75 g/kg,说明石粉含量对人工砂MB值的影响不大.

石粉比表面积分别为143、565、886 m<sup>2</sup>/kg且石粉含量分别为10%、20%和30%的纯花岗岩人工砂MB值如图6所示.由图6可见:相同石粉含量的人工砂MB值随着石粉比表面积增大而增大,但当石粉比表面积增大超过5倍时,人工砂MB值只增大1倍,说明石粉比表面积对人工砂MB值的影响较小.

综上所述,人工砂石粉特性中对其MB值影响相对较大的因素为石粉含量和比表面积,但即使石粉

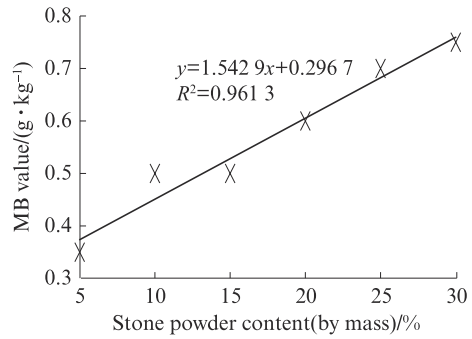


图5 人工砂MB值与石粉含量的关系

Fig. 5 Relationship between MB value and stone powder content of artificial sand

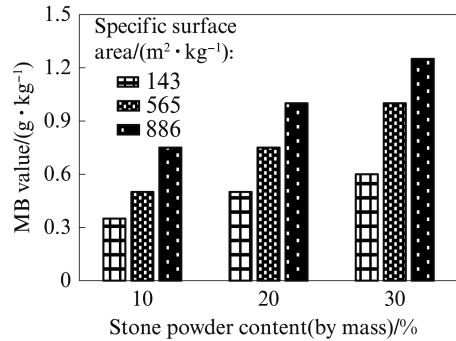


图6 人工砂MB值与石粉比表面积的关系

Fig. 6 Relationship between MB value and stone powder specific surface area of artificial sand

含量为30%且比表面积为886 m<sup>2</sup>/kg时,人工砂MB值也未超过1.40 g/kg.这是因为石粉主要由惰性非黏土类矿物组成,其表面致密、无明显可见的孔洞特征,且由于不具备水解特性而不带有电荷,其对亚甲蓝仅是一种吸附性能较弱的物理吸附<sup>[7]</sup>.

### 2.3 黏土特性对人工砂MB值的影响

分别掺入2%高纯度蒙脱石、伊利石、高岭石、蛭石4种黏土矿物粉末和10%石粉的花岗岩人工砂MB值如图7所示.由图7可见:4组含不同黏土矿物的人工砂MB值差异很大,含蒙脱石的人工砂MB值

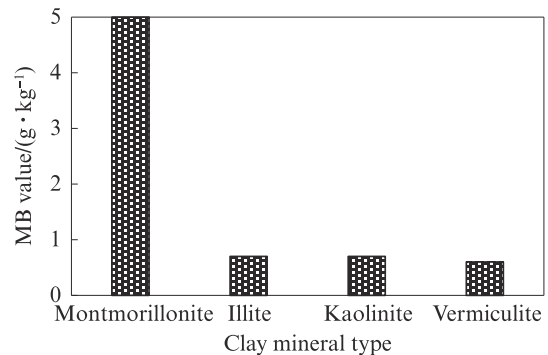


图7 黏土矿物类型对人工砂MB值的影响

Fig. 7 Influence of clay mineral type on MB value of artificial sand

高达 5.00 g/kg, 而分别含伊利石、高岭石、蛭石的人工砂 MB 值只有 0.60~0.70 g/kg.

黏土含量分别为 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%、4.0% 和 5.0% 且石粉含量为 10% 的花岗岩人工砂 MB 值如图 8 所示. 由图 8 可见: (1) 人工砂 MB 值随着黏土含量的增加而逐渐增大. (2) 当黏土含量从 0.5% 增加至 5.0% 时, 分别含高岭石、伊利石、蛭石黏土矿物的人工砂 MB 值从 0.25 g/kg 增大至 1.20 g/kg; 而含蒙脱石的人工砂 MB 值从 1.75 g/kg 增大至 13.00 g/kg.

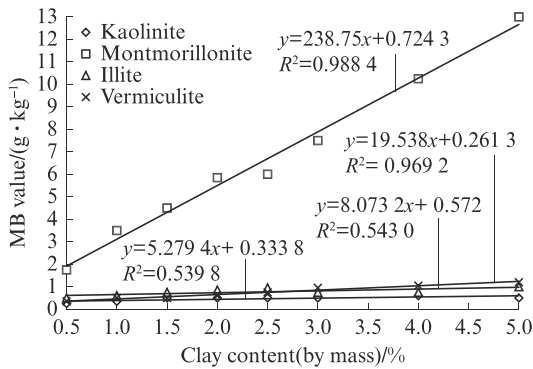


图 8 黏土含量对人工砂 MB 值的影响

Fig. 8 Influence of clay content on MB value of artificial sand

综上所述, 黏土矿物类型和含量是影响人工砂 MB 值的关键因素. 本试验中, 膨胀性黏土矿物类的蒙脱石含量为 0.28% 的人工砂 MB 值就达 1.40 g/kg. 人工砂中膨胀性黏土的含量是决定 MB 值超标的关键性因素, 而非膨胀性黏土含量对人工砂 MB 值的影响相对较小.

#### 2.4 不同石粉和黏土含量对人工砂 MB 值的影响

不同石粉含量(5%、10% 和 15%)条件下, 非膨胀性黏土伊利石含量分别为 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、3.0%、4.0% 和 5.0% 的纯花岗岩人工砂 MB 值如图 9 所示. 由图 9 可见: 在相同石粉含量下, 人工砂 MB 值随着黏土含量的增大几乎呈线性增加, 相关系数达 0.97 以上; 但在黏土含量相同的情况下, 不同石粉含量的人工砂 MB 值相差仅在 0.10~0.20 g/kg 之间, 差异较小. 这再次证明人工砂的 MB 值受石粉含量的影响较小, 受黏土含量的影响很大.

#### 2.5 黏土吸附性能机理及对人工砂 MB 值的影响

相关研究<sup>[9-10]</sup>表明, 黏土矿物的吸附性能可分为物理吸附、化学吸附和离子交换吸附. 物理吸附是指吸附剂与吸附质之间由于分子间引力作用而产生的吸附, 是可逆的; 另外由于黏土矿物颗粒极其分散, 比表面积大, 表面分子具有较大的表面能, 因此物理吸附性能较强. 化学吸附是指由吸附剂与吸附质之间的

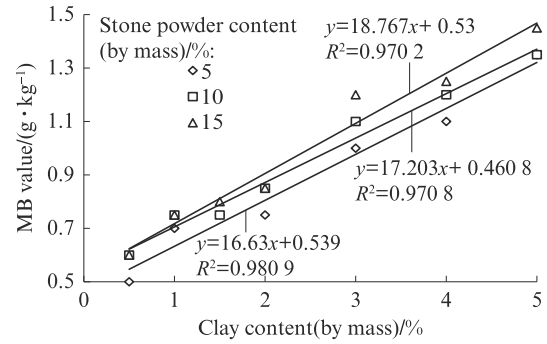


图 9 不同石粉含量下人工砂 MB 值与黏土含量的关系  
Fig. 9 Relationship between MB value of artificial sand and clay content under different stone powder contents

化学键力作用而产生的吸附, 由于黏土矿物晶体边缘带正电荷, 靠静电引力将阴离子基团吸附到黏土矿物边缘. 离子交换吸附是由于黏土矿物带有的不饱和电荷将其他等量异号离子吸附在黏土矿物表面上, 与溶液中的同号离子产生交换作用. 黏土矿物的离子交换吸附分为阴、阳离子交换吸附, 其吸附容量见表 1.

表 1 黏土矿物的阴、阳离子交换吸附容量

Table 1 Anion, cation exchange adsorption capacity of clay minerals<sup>[10]</sup>

		mmol/g			
Exchange capacity type	Montmorillonite	Vermiculite	Illite	Kaolinite	
Anion	0.2-0.3	0.04	0.04-0.17	0.07-0.20	
Cation	0.7-1.3	—	0.10-0.40	0.03-0.15	

李雪梅等<sup>[11]</sup>测试得到蛭石的阳离子交换容量为 0.61 mmol/g. 结合表 1 可知, 黏土矿物的离子交换吸附性能大小依次为: 蒙脱石 > 蛭石 > 伊利石 > 高岭石.

相关研究<sup>[10,12-15]</sup>表明: (1) 蒙脱石矿物晶体是由 1 层水铝氧八面体层  $[AlO_4(OH)_2]$  和 2 层硅氧四面体层  $[SiO_4]$  形成的 2:1 型单斜晶系、复网层结构的层状硅酸盐矿物; 层间主要依靠较弱的范德华力连接, 容易被打开, 导致大量的水分子进入晶体层间, 从而引起层间膨胀, 聚羧酸减水剂分子长侧链也容易插入层间; 层间阳离子处于层间域的中面, 存在较多的离子取代现象, 使电价平衡受到破坏, 复网层间的排斥作用增加, 结构的解离程度提高, 复网层间空隙加大, 对极性离子有较强的吸附作用, 电负性较大, 更易吸附阳离子. (2) 蛭石矿物晶体有 2:1 型结构单元层的二八面和三八面体型, 层间含有水化阳离子, 离子吸附性能也较强, 但层间膨胀性较蒙脱石弱. (3) 伊利石矿物晶体层间结构由  $K^+$  或  $Na^+$  连接, 虽然也存在较多的离子取代, 但由于  $K^+$ 、 $Na^+$  的存在使复网层

间的排斥作用减小,极性水分子不易进入复网层中,极性吸附性能较弱。(4)高岭石晶体是单层结构,层与层之间通过氢键联结,键力不强,且离子取代现象较少,故其晶体结构比较完整,对极性分子吸附性能一般。

采用扫描电镜(SEM)观察黏土矿物的表面形貌,试验用蒙脱石、蛭石、伊利石和高岭石4种黏土颗

粒的表面微观形貌照片见图10。由图10可见:蒙脱石颗粒呈多层状结构,表面粗糙且连接松散、疏松多孔、孔隙细密;蛭石颗粒呈片状结构,表面粗糙但连接较为紧密,孔隙较少;伊利石颗粒表面致密、平整,孔隙很少;高岭石颗粒较细,表面粗糙、分散。由此判断,蒙脱石、高岭石的吸附性能较强,蛭石、伊利石的吸附性能相对较弱。

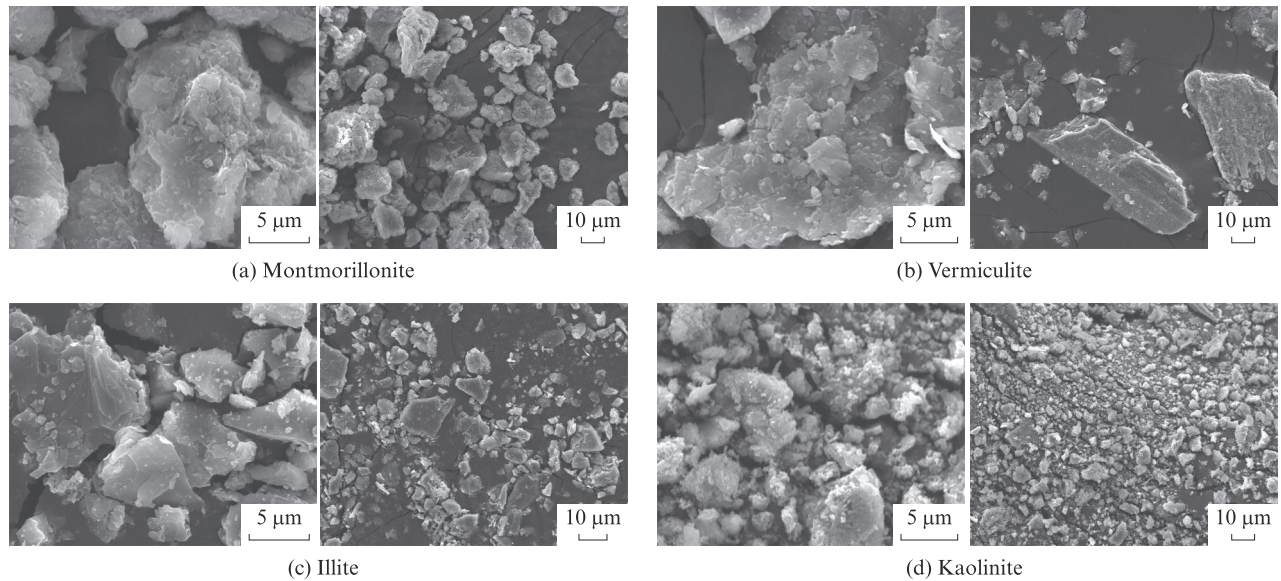


图10 黏土颗粒的SEM照片  
Fig. 10 SEM images of clay particles

黏土的液限是指在可塑状态与流动状态之间的界限含水率,即可塑状态的上限含水率。黏土的塑限是指在可塑状态与半固体状态之间的界限含水率,即可塑状态的下限含水率。黏土的塑性指数是液限与塑限的差值,其数值越大,表明黏土的颗粒越细,比表面积越大,其颗粒或亲水矿物成分含量越高,黏土处在可塑状态的含水率变化范围就越大,吸水性能越强。

4种黏土矿物的液限、塑限和塑性指数如表2所示。以塑性指数的大小对4种黏土矿物进行分类: $I_p > 17\%$ 的蒙脱石和蛭石属于黏土, $10\% < I_p \leq 17\%$ 的高岭石和伊利石属于粉质黏土。蒙脱石矿物的液限和塑性指数分别为157.1%和129.7%,是蛭石、伊利石、高岭石矿物平均值的3.7倍和6.6倍;塑性指数第二大者为蛭石矿物,达29.4%,是伊利石和高岭石矿物的2倍左右。黏土矿物液限、塑性指数大小依次为:蒙脱石>蛭石>高岭石>伊利石。

4种黏土矿物颗粒的比表面积测试结果如表3所示:4种黏土颗粒的比表面积很大,是前述试验用人工砂石粉总比表面积的18~430倍,且内比表面积占相当大的比例,表明黏土颗粒更细、内部疏松多孔;

表2 4种黏土矿物的液限、塑限和塑性指数

Table 2 Liquid limit, plastic limit and plastic index of four kinds of clay mineral

Clay mineral	Liquid limit	Plastic limit	Plastic index
Montmorillonite	157.1	27.4	129.7
Vermiculite	49.6	20.2	29.4
Kaolinite	45.2	29.3	15.9
Illite	32.6	18.8	13.8

不同矿物种类的黏土颗粒比表面积差异也较大,蒙脱石黏土颗粒的总比表面积是伊利石的20余倍,是蛭石和高岭石的4~5倍。4种黏土矿物颗粒的比表面积大小依次为:蒙脱石>高岭石>蛭石>伊利石。

4种黏土矿物的粒级组成如表4所示。从粉粒、胶粒含量上来看,蒙脱石矿物与高岭石、蛭石、伊利石矿物存在很大差异——蒙脱石矿物粘粒和胶粒含量分别高达72.5%和62.0%,是蛭石、伊利石和高岭石矿物平均值的3.4倍和5.3倍。蒙脱石中小于 $2.0 \mu\text{m}$ 的颗粒(胶粒)含量高达62.0%,颗粒粒径最细,因此其比表面积最大。4种黏土矿物中粘粒和胶粒含量大小依次为:蒙脱石>高岭石>蛭石>伊利石。这与其比表面积的排序、SEM照片中的微观形貌特点一致。

表3 4种黏土矿物颗粒的比表面积

Table 3 Specific surface area of particles of four kinds of clay mineral

Type of specific surface area	Montmorillonite	Kaolinite	Vermiculite	Illite
External	45.063 0	11.955 1	9.713 4	2.036 5
Internal	16.376 2	2.121 1	1.348 3	0.542 6
Total	61.439 2	14.076 2	11.061 7	2.579 1

m<sup>2</sup>/g

表4 4种黏土矿物的粒度组成

Table 4 Particle size level composition of four kinds of clay mineral

Clay mineral	Sand (0.5-0.25 mm)	Sand (0.25-0.075 mm)	Silt (0.075-0.005 mm)	Cosmid (<0.005 mm)	Idiozome (<0.002 mm)
Montmorillonite	0	0	27.5	72.5	62.0
Kaolinite	0	0	72.5	27.5	14.5
Vermiculite	0	5.7	74.7	19.6	11.6
Illite	0	4.5	78.5	17.0	9.1

w/%

从黏土矿物微晶结构、SEM照片微观形貌分析可知,蒙脱石矿物的吸附性能最强.从黏土矿物离子交换容量、液限、塑限、塑性指数、比表面积、粘粒和胶粒含量可知,蒙脱石矿物的数值远远大于蛭石、伊利石和高岭石矿物.其中,黏土矿物的比表面积、粘粒和胶粒含量实质上是强相关的,代表的是物理吸附性能;黏土矿物的液限、塑限和塑性指数代表的是吸水性能;离子交换容量代表的是离子吸附性能.

根据人工砂MB值测试原理,不管是溶液中亚甲蓝的有机阳离子与黏土矿物晶体上的阳离子交换,还是阴离子通过化学键吸附到带正电的黏土矿物表面上,只有达到饱和时,溶液中才会出现游离的亚甲蓝,滴定在滤纸上才会呈现浅蓝色色晕.MB值主要体现的是黏土矿物的化学吸附和离子交换吸附性能,而物理吸附性能对MB值的影响较小.因此,2.2中即使是比表面积(代表物理吸附性能)相差很大的石粉,其MB值也相差不大.虽然高岭石矿物的比表面积大于蛭石和伊利石矿物,但化学、离子交换吸附性能较弱.因此,黏土矿物综合体现在对亚甲蓝溶液的吸附性能,即其MB值的大小依次为:蒙脱石>蛭石>伊利石>高岭石.

将2.3中不同黏土矿物种类和含量的人工砂MB值扣除石粉对MB值的影响,得出各组人工砂仅在黏土影响下的MB值;并将黏土矿物总比表面积、塑性指数乘以各组人工砂中黏土的含量,得出各组人工砂所含黏土矿物的总表面积(S)和塑性状态下最大吸水量(V).将S、V作为自变量参数,MB值(Y)作为函数,通过回归拟合得出MB值与S、V的关系:

$$Y = 0.0018S + 0.9062V - 0.34 \quad (1)$$

式(1)显示:人工砂MB值与其所含黏土的总表面积(S)为线性关系,相关系数 $R^2$ 为0.966;V的系数为0.9062,远大于S的系数0.0018,说明黏土矿物的吸附性能受塑性指数的影响很大,受比表面积的影响较小.

### 3 结论

(1)不含黏土且石粉含量为5%~30%的人工砂MB值在0.35~0.75 g/kg之间;石粉含量及比表面积对人工砂MB值有一定影响,但即使是比表面积很大的纯石粉,人工砂MB值一般也不超过1.40 g/kg;人工砂MB值随着细度模数、粒度、最大粒径的减小呈小幅增大,随母岩岩性变化很小.

(2)含黏土的人工砂MB值随着黏土含量的增加呈较大幅度的增大;黏土的含量和矿物类型对人工砂MB值的影响很大,相同黏土含量、含有膨胀性黏土人工砂MB值远大于非膨胀性黏土人工砂MB值,在本试验中前者是后者的近10倍.

(3)含膨胀性黏土人工砂具有很大MB值的机理是黏土矿物晶体具有层状堆迭结构,层间膨胀性较强,比表面积、离子交换容量、液限和塑性指数较大;膨胀性黏土的吸附性能远大于非膨胀性黏土,人工砂MB值跟其膨胀性黏土的含量密切相关;降低人工砂中膨胀性黏土的含量是控制人工砂MB值的关键.

(4)MB值是表征人工砂所含石粉、黏土颗粒等物质吸附性能的综合指标;不同地域的人工砂中含有多种矿物类型的黏土,相同黏土含量的不同人工砂MB值并不相同,不能简单限定人工砂的黏土含量.

## 参考文献:

- [ 1 ] PLANK J, BIAN H. Method to assess the quality of casein used as superplasticizer in self-levelling compounds[J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40:710-715.
- [ 2 ] CHO H Y, SUH J M. Effects of the synthetic conditions of poly {carboxylate-g-(ethylene glycol) methyl ether} on the dispersibility in cement paste[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(5):891-899.
- [ 3 ] 王子明, 吴昊, 徐莹, 等. 黏土对聚羧酸减水剂应用性能的抑制机理[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(2):234-238.  
WANG Zhiming, WU Hao, XU Ying, et al. Inhibition mechanism of clays on applying performances of polycarboxylate superplasticizer [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(2): 234-238. (in Chinese)
- [ 4 ] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程天然建筑材料勘察规程: SL 251—2015[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.  
The Ministry of Water Resources of the PRC. Investigation procedures for natural construction materials of water conservancy and hydropower engineering: SL 251—2015[S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2015. (in Chinese)
- [ 5 ] 国家能源局. 水工混凝土砂石骨料试验规程: DL/T 5151—2014 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.  
National Energy Administration. Test procedure for hydraulic concrete and gravel aggregate: DL/T 5151—2014[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014. (in Chinese)
- [ 6 ] 董瑞, 沈卫国. 石粉和泥粉对MB值的动态关系研究[J]. 混凝土, 2017(12):67-74.  
DONG Rui, SHEN Weiguo. Dynamic relationships among MB value, microfines and clay powder content [J]. Concrete, 2017 (12):67-74. (in Chinese)
- [ 7 ] 刘战鳌, 周明凯, 姚楚康. 细粉对机制砂亚甲蓝值的影响研究 [J]. 混凝土, 2013(11):112-118.  
LIU Zhan'ao, ZHOU Mingkai, YAO Chukang. Research on the effect of microfines on methylene blue value of manufactured sand [J]. Concrete, 2013(11):112-118. (in Chinese)
- [ 8 ] 刘战鳌, 周明凯, 姚楚康. 机制砂中细粉的危害性及评价研究 [J]. 建筑材料学报, 2015, 18(1):150-155.  
LIU Zhan'ao, ZHOU Mingkai, YAO Chukang. Research on harmfulness and evaluation of various microfines in manufactured sand [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(1):150-155. (in Chinese)
- [ 9 ] 黄万抚. 矿物材料及其加工工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012:17-18.  
HUANG Wanfu. Mineral materials and their processing process [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012: 17-18. (in Chinese)
- [ 10 ] 赵杏媛, 张有瑜. 粘土矿物与粘土矿物分析[M]. 北京: 海洋出版社, 1990:47-48.  
ZHAO Xingyuan, ZHANG Youyu. Clay mineral and clay mineral analysis [M]. Beijing: China Ocean Press, 1990: 47-48. (in Chinese)
- [ 11 ] 李雪梅, 廖立兵, 李瑞, 等. 氯化铵-乙醇法测定蛭石的阳离子交换容量[J]. 岩矿测试, 2008, 27(3):204-206.  
LI Xuemei, LIAO Libing, LI Rui, et al. Measurement of the cation exchange capacity of vermiculite by ammonium chloride-ethanol method[J]. Rock and Mineral Analysis, 2008, 27(3):204-206. (in Chinese)
- [ 12 ] 廖国胜, 何正恋, 刘佩. 粘土矿物成分对聚羧酸减水剂吸附性能的研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(1):227-231.  
LIAO Guosheng, HE Zhenglian, LIU Pei. Mechanism research of clay mineral composition on the adsorption performance of polycarboxylate superplasticizer [J]. Silicate Bulletin, 2015, 34(1):227-231. (in Chinese)
- [ 13 ] 周亚栋. 硅酸盐物理化学[M]. 武汉: 武汉理工大学出版, 2010: 22-24.  
ZHOU Yadong. Silicate physicochemistry [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2010:22-24. (in Chinese)
- [ 14 ] 钱觉时, 尹道道, 郁东兴, 等. 聚羧酸减水剂对改性生土材料性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(3):378-384.  
QIAN Jueshi, YIN Daodao, YU Dongxing, et al. Effect of polycarboxylate water reducing agent on performance of modified adobe [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(3):378-384. (in Chinese)
- [ 15 ] 张光华, 王爽, 张策, 等. 双子季铵盐改善聚羧酸减水剂对黏土的敏感性能[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(1):81-86.  
ZHANG Guanghua, WANG Shuang, ZHANG Ce, et al. Improvement of clay sensitivity of polycarboxylate superplasticizer by gemini quaternary ammonium salt [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(1):81-86. (in Chinese)