文章编号：1004-4051(2024)02-0236-09 DOI：10.12075/j.issn.1004-4051.20230390

隧道洞渣制备机制砂的细度模数控制系统研究与应用

林 靖[1]，任 阳[1]，郑 军[1]，周 磊[1]，高旭东[1]，姜世霖[1]，王 肖[2]，汪 峥[3]

（1. 中铁工程服务有限公司，四川 成都 610083；
2. 川藏铁路技术创新中心有限公司，四川 成都 610213；
3. 中铁二院工程集团有限责任公司，四川 成都 610083）

摘 要：隧道洞渣岩石特性多变，成品机制砂细度模数波动大，不利于工程应用。通过理论分析和试验研究等方法，研究了各公称粒径区间占比对细度模数的影响，将 0～5.0 mm 砂分为 0～2.5 mm 与 2.5～5.0 mm 两区间，以《建设用砂》细度模数的计算公式为基础，结合实测数据得出细度模数简化预测公式，并基于该预测公式构建了控制逻辑，实现了细度模数的在线调配与闭环控制。研究结果表明：将 0～5.0 mm 砂分为 0～2.5 mm 与 2.5～5.0 mm 两区间，可推导出细度模数的简化预测公式，通过两区间砂的比值即可快速准确预测细度模数；当细度模数在 2.6～2.8 之间且调配系数 k 取 2.1 时，m_3 与 m_2 的比值为 3.1～4.8，m_3 与 v 的比值为 78.12～120.96。基于简化预测公式构建的细度模数控制系统，可实现细度模数稳定控制，对隧道洞渣资源化利用有积极作用。

关键词：隧道洞渣；机制砂；细度模数；闭环控制；简化公式
中图分类号：TD985; TU521.1 **文献标识码：**A

Research and application of fineness modulus control system for preparing crushed sand from tunnel slag

LIN Jing[1]，REN Yang[1]，ZHENG Jun[1]，ZHOU Lei[1]，GAO Xudong[1]，JIANG Shilin[1]，WANG Xiao[2]，WANG Zheng[3]

（1. *China Railway Engineering Services Co., Ltd., Chengdu* 610083, *China*；
2. *Sichuan-Tibet Railway Technology Innovation Center Co., Ltd., Chengdu* 610213, *China*；
3. *China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu* 610083, *China*）

Abstract： The characteristics of tunnel slag rock are changeable and the fineness modulus of final crushed sand fluctuates greatly, which is not conducive to engineering application. Through theoretical analysis and experimental research, the influence of the proportion of each nominal particle size interval on the fineness modulus is studied. Divide 0-5.0 mm sand into 0-2.5 mm and 2.5-5.0 mm intervals, based on the calculation formula for fineness modulus of *Construction Sand* and combined with measured data, a simplified prediction formula for fineness modulus is obtained. Based on the prediction

收稿日期：2023-05-30 **责任编辑：**聂虹
基金项目：成都市产业集群协同创新项目资助（编号：2021-XT00-00002-GX）
第一作者简介：林靖（1987—），男，工程师，主要从事隧道机械装备设计研发工作，E-mail：254741852@qq.com。
通讯作者简介：郑军，高级工程师，E-mail：294161292@qq.com。
引用格式：林靖，任阳，郑军，等. 隧道洞渣制备机制砂的细度模数控制系统研究与应用[J]. 中国矿业，2024，33(2)：236-244.
LIN Jing, REN Yang, ZHENG Jun, et al. Research and application of fineness modulus control system for preparing crushed sand from tunnel slag[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(2): 236-244.

formula, a control logic is constructed to achieve online allocation and closed-loop control of fineness modulus. The research results show that 0-5.0 mm sand is divided into 0-2.5 mm and 2.5-5.0 mm intervals, and a simplified prediction formula for fineness modulus is derived, the fineness modulus can be quickly and accurately predicted by the ratio of sand between 0-2.5 mm and 2.5-5.0 mm intervals; when the fineness modulus is between 2.6 and 2.8 and the blending coefficient is 2.1, the ratio of m_3 and m_2 is 3.1 to 4.8, and the ratio of m_3 and v is 78.12 to 120.96. The fineness modulus control system based on the simplified prediction formula can realize the fineness modulus stability control, and has a positive effect on the resource utilization of tunnel slag.

Keywords：tunnel slag；crushed sand；fineness modulus；closed-loop control；simplify formula

0　引　言

机制砂是指由机械设备破碎、筛分等工艺制成的粒径小于 4.75 mm 的岩石颗粒，主要性能参数包括颗粒形状、级配、细度模数以及石粉含量、含泥量、压碎值指标等[1]。近年来，随着国内外建筑、市政工程、铁路、隧道等建设的飞速发展，机制砂作为天然砂的一种替代资源已占据越来越重要的地位[2-3]。面对天然砂石骨料的短缺，我国在 20 世纪中期开始对机制砂产品进行研究与应用，最早应用于水利水电建设中，后期的应用越来越广泛[4]。目前，隧道建设过程中需要大量的砂石骨料，而隧道洞渣岩石特性多变[5]，生产出的成品机制砂细度模数波动大。因此，在利用隧道洞渣制备机制砂时，有必要对隧道洞渣制备机制砂的细度模数控制进行研究，从而缓解隧道建设过程中砂石骨料短缺和降低工程造价需求。

国内外学者针对机制砂级配对混凝土的影响，以及隧道洞渣制备机制砂和机制砂质量控制等方面开展了大量的研究，取得了丰硕的研究成果。在机制砂细度模数对混凝土的影响方面，从不同侧重点分别就主要参数对混凝土性能的影响规律展开了研究，并提出了控制标准建议值[6-8]。庄绍牧[9]研究了机制砂细度模数的变化对堆积密度、混凝土工作性、力学性能的影响。刘波[10]研究了人工砂的细度模数，通过降低人工砂的空隙率及表面积，可以调节混凝土的和易性，减小了混凝土裂缝的产生。吴立红等[11]研究了砂子细度模数的不同对混凝土和易性的影响，得出细度模数每减小 0.1，坍落度就降低约 10 mm。吴永根等[12]研究得出细度模数对道面混凝土性能的影响规律，确定适合机场道面混凝土用砂细度模数范围。SHEN 等[13]参照富勒曲线调整机制砂颗粒级配，研究了现颗粒级配对机制砂混凝土工作性能和抗冻性能的影响。KUMAR 等[14]研究了细集料级配，得出保持机制砂较细组分和较粗组分的适当级配，自密实混凝土能达到预期的耐久性特征。因此，控制机制砂颗粒级配是提高机制砂性能的关键因素。

在隧道洞渣制备机制砂和机制砂质量控制等方面，邓涛[15]通过工艺优化与质量控制，将洞渣制备的机制砂成功应用于 C30 水下混凝土、C25 二衬防水混凝土、M5 路面水泥混凝土及 C50 T 梁混凝土。张立人等[16]利用隧道花岗岩洞渣生产的机制砂，制备出具有力学性能优良且高抗渗和抗冻性能的 C50 混凝土。TANG 等[17]对隧道矿渣机制砂浆和混凝土的性能进行研究，得出机制砂混凝土的抗折强度、抗压强度均大于相同石粉含量的标准砂。宋宏伟等[18]研究一种砂率修正方法，为花岗岩机制砂混凝土的工程应用积累经验。邵建峰等[19]研究了高品质机制砂的生产工艺，并建立了质量控制模型。何文敏[20]研究了砂的细度模数与级配之间关系，对配制混凝土选用砂具有重要参考意义。杨毅[21]研究了混凝土细骨料试验细度模数计算方式，得出了细度模数计算法准确率较高且实际误差较小。

目前，虽然在机制砂细度模数对混凝土的影响，以及隧道洞渣制备机制砂和机制砂质量控制等方面已有一定研究，但对机制砂细度模数的在线调配与闭环控制的研究较为少见。在现阶段的工程实践中，大部分生产者只能通过粗略地调整筛网规格和物料比例试产后，以砂堆取样试验室监测的方式来判断机制砂的级配，无法在线调控机制砂的细度模数，导致混凝土生产企业经常需要更改配方和试验，不仅增加工作人员的劳动强度，而且无法保证混凝土的稳定性。因此，亟需研究一种可用于机制砂细度模数的在线控制系统，实现对砂石生产细度模数的闭环控制，降低综合成本。

1　控制系统总体方案设计

机制砂作为建筑、市政工程、铁路、隧道等建设的重要来源，如果能实现隧道洞渣制备机制砂细度模数的闭环控制，就可以让后期混泥土的质量得到保证。根据不同的制砂工艺，应从以下几个方面进行研究设计。

1）不同破碎工艺生产的机制砂的粒形、颗粒级配、细度模数不同。本文以“常速+高速”双立轴制砂工艺为基础，结合双重选粉和细度模数、颗粒级配、

石粉含量、产物比例可控制调节功能的新型双立轴联合整形制砂工艺，进行隧道洞渣制备机制砂细度模数控制系统的研究。主要设备配置见表 1，工艺路线如图 1 所示。

表 1 主要设备配置表

Table 1 Configuration table of primary device

设备名称	性能参数
常速立轴破	生产能力：280～500 t/h；驱动功率：2×250 kW；启动方式：变频启动；破碎腔型：石打石破碎腔；转子尺寸：Φ947 mm×366 mm
高速立轴破	生产能力：55～75 t/h；驱动功率：250 kW；启动方式：变频启动；破碎腔型：石打铁破碎腔；转子尺寸：Φ827 mm×307 mm
水平振动筛	生产能力：350～1 200 t/h；驱动功率：45 kW；激振形式：三轴强迫振动（偏心块）；筛面规格：2 400 mm×6 000 mm；筛网配置：20 mm/10 mm/5 mm/3 mm
产物比例调节系统	生产能力：150 t/h；驱动功率：4×0.75 kW；驱动形式：电动液驱
一次选粉	处理能力：350 t/h；给料粒度：40 mm；风量：40 000 m^3/h；设备类型：V 型箱体/风力选粉；驱动功率：55+1.5 kW
细度模数控制系统	生产能力：100 t/h；驱动功率：4+3 kW
二次选粉	处理能力：80 t/h；给料粒度：5 mm；风量：20 000 m^3/h；设备类型：V 型箱体/重力选粉
在线检测装置	颗粒分析能力：>1 000 000 个/min；下料方式：电磁振动；分散方式：超声分散
除尘器系统	处理风量：100 000 m^3/h；过滤面积：2 050 m^2；过滤风速：0.96 m/s；清灰方式：离线脉冲喷吹；出口浓度：20 mg/m^3；驱动功率：200 kW
皮带传输系统	输送能力：150 t/h；驱动功率：5×5.5 kW；皮带宽度：650 mm

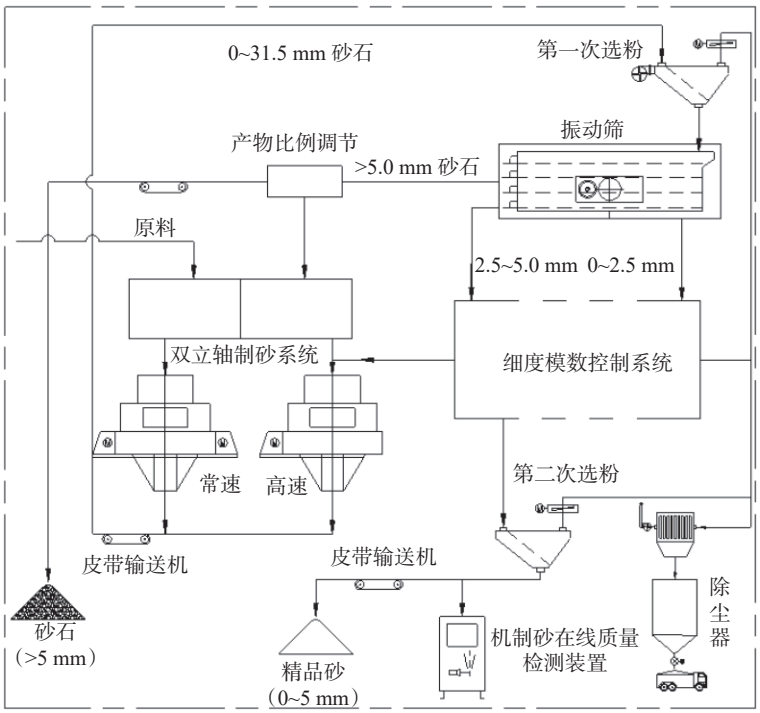

图 1 制砂工艺

Fig. 1 Process of sand making

2）在实际工程应用中，基于筛分设备的性能因数、成本控制等问题。选择将公称粒径为 0～5.0 mm 的机制砂分为两类，第一类是公称粒径为 0～2.5 mm，第二类是公称粒径为 2.5～5.0 mm。通过调配两类砂的比例，实现对细度模数的调节。

3）将其中一类砂设置为定速传输，另一类砂设置为变速传输，并且两条输出路径均配置称重系统，实现两种类型砂的比例调节，实现调节细度模数比例的便捷性。

4）将其中一类砂的进料量进行分流控制，设计

相应的溢流口，实现两种类别的砂对最小需求量的功能。

5)在变速传输皮带上设计相应的定量装置，实现变速传送对输出砂的在线线性控制。

6)要配置细度模数在线监测装置和电气控制系统，实现细度模数的在线闭环控制。

2　控制系统原理设计

生产系统将粒径为 0～31.5 mm 的原料送入制砂系统，生产系统生产出来的料会输送到筛分系统，筛分系统将砂石骨料按不同粒径进行筛分处理。将筛分系统输出的公称粒径为 0～2.5 mm 和 2.5～5.0 mm 的砂输送到细度模数控制系统。将公称粒径为 0～2.5 mm 的砂输送到定速皮带，配备称重系统，实现定速定量称重；利用电动分料装置将公称粒径为 2.5～5.0 mm 的砂输送到调速皮带，配备称重系统，实现变速变量称重。根据定速皮带上公称粒径为 0～2.5 mm 的砂量来调节变速皮带的速度，控制公称粒径为 2.5～5.0 mm 的砂输出量。

变速皮带的输出量需要根据定速皮带的输出量进行调节。首先，需要保证变速皮带的进料量处于饱满状态，同时需要设计溢料装置，利用溢料装置将富余的公称粒径为 2.5～5.0 mm 的砂返回制砂系统。其次，需要保证变速皮带上公称粒径为 2.5～5.0 mm 的砂到达称重系统之前其输出的截面恒定，这样才能通过调节速度的方式来调节公称粒径为 2.5～5.0 mm 的砂输出量。

当生产系统处于稳定状态后，通过实验确定机制砂的颗粒级配，对公称粒径为 2.5～5.0 mm 的砂输送量进行设定，进而调配出满足标准要求的细度模数。另外，也可将混合后的两类砂经过在线质量监测装置对其细度模数进行监测，监测结果反馈至控制系统，控制系统再来调节相应的参数，实现对成品砂细度模数的控制调节，实现细度模数的闭环控制。细度模数控制系统原理如图 2 所示。

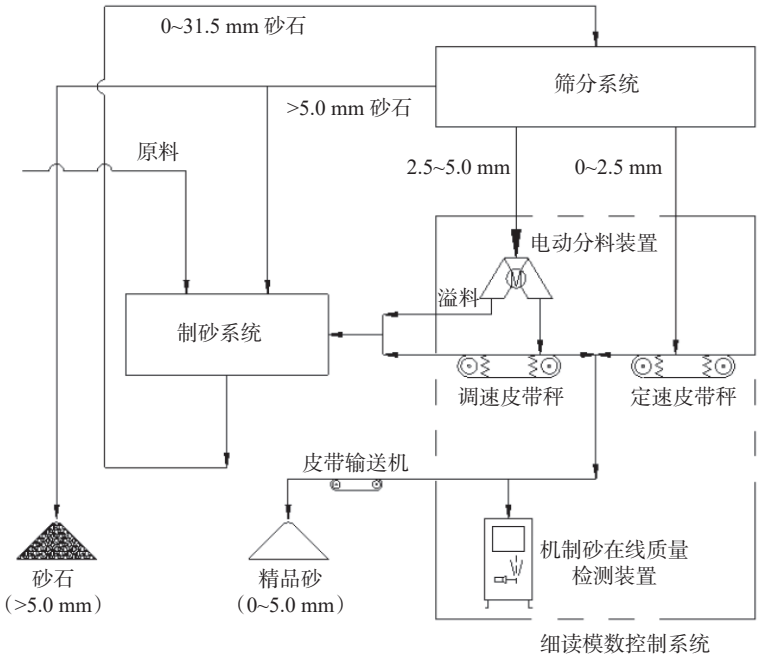

图 2　控制系统原理图

Fig. 2　Schematic diagram of control system

3　控制系统性能参数

3.1　机制砂的细度模数

根据《建设用砂》(GB/T 14684—2022)[22]、《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)[23]、《建设用卵石、碎石》(GB/T 14685—2022)[24] 等标准中的相关规定，机制砂细度模数 M_x 的计算见式(1)。

$$M_x = \frac{(A_2+A_3+A_4+A_5+A_6)-5\times A_1}{100-A_1} = \frac{5a_2+4a_3+3a_4+2a_5+a_6}{100-a_1} \tag{1}$$

式中：M_x 为细度模数；A_1、A_2、A_3、A_4、A_5、A_6 分别为 4.75 mm、2.36 mm、1.18 mm、0.60 mm、0.30 mm、0.15 mm 方孔筛的累计筛余百分率；a_1、a_2、a_3、a_4、a_5、a_6 分别为 4.75 mm、2.36 mm、1.18 mm、0.60 mm、0.30 mm、0.15 mm 方孔筛的分计筛余百分率。

3.2　定义调配系数 k

定义 m 为成品砂的总质量，计算见式(2)。

$$m = \sum_{i=1,2,3} m_i \tag{2}$$

式中：m_1 为公称粒径≥5.0 mm 的砂质量；m_2 为公称粒径 2.5～5.0 mm 的砂质量；m_3 为公称粒径 0～2.5 mm 的砂质量。将 m_3 的质量细化，计算见式(3)。

$$m_3 = \sum_{i=1,2,\ldots,5} m_{3i} \tag{3}$$

式中，m_{31}、m_{32}、m_{33}、m_{34}、m_{35} 分别为公称粒径为 1.250～2.500 mm、0.630～1.250 mm、0.315～0.630 mm、0.160～0.315 mm、0～0.160 mm 的砂质量。

将式(2)和式(3)带入式(1)，计算见式(4)。

$$M_x = \frac{5m_2 + 4m_{31} + 3m_{32} + 2m_{33} + m_{34}}{m_2 + \sum_{i=1,2,\ldots,5} m_{3i}} \tag{4}$$

定义调配系数 k，可得式(5)。

$$4m_{31} + 3m_{32} + 2m_{33} + m_{34} = k \sum_{i=1,2,\ldots,5} m_{3i} \tag{5}$$

将式(5)带入式(4)，得出成品砂细度模数的简化预测公式 M_x，见式(6)。

$$M_x = k + (5-k)\frac{1}{1+\frac{m_3}{m_2}} \tag{6}$$

在母材岩性、设备性能等外部环境变化很小的情况下，系统中的 k 值变化幅度很小，可认为 k 为定值，k 值可以通过大量实验数据获得。由式(6)可知，细度模数值 M_x 的大小只与 m_3 和 m_2 的比值有关。m_2 值越大，M_x 值越大，即反应砂的粒径越粗，反之越小，砂的粒径越细。由此得出：m_2 值的大小对细度模数 M_x 的调配有着重要影响。

根据标准《建设用砂》(GB/T 14684—2022)要求，将细度模数的上下极限值($2.3 \leqslant M_x \leqslant 3.4$)带入式(6)，可以得出 m_3 与 m_2 的比值范围，见式(7)。

$$\frac{1.6}{3.4-k} \leqslant \frac{m_3}{m_2} \leqslant \frac{2.7}{2.3-k} \tag{7}$$

根据实际建设工程的需要以及各类设备本身制砂性能的特性，一般铁路工程建设所需砂的细度模数应控制在 2.6～2.8，见式(8)。

$$\frac{2.2}{2.8-k} \leqslant \frac{m_3}{m_2} \leqslant \frac{2.4}{2.6-k} \tag{8}$$

3.3 试验确定调配系数 k

以高原铁路某试点项目所配套的隧道洞渣制备机制砂系统为例，随机抽取同一批母材中的 12 组试样检测，其检测结果见表 2。

表 2 试点项目试样的岩性检测结果

Table 2 Lithology test results of pilot project samples

试样编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
抗压强度/MPa	106	122	100	134	78	88.2	85.9	95.2	106	120	91.9	136
块体干密度/(kg/m³)	2 620	2 830	2 610	2 780	2 790	2 760	2 630	2 600	2 620	2 640	2 640	2 730
坚固性/%	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	2.4	2.7	1.0	3.1	3.2	2.0
吸水率/%	0.5	0.3	0.5	0.4	0.3	0.5	0.2	0.3	0.5	0.3	0.4	0.3

对已检测的隧道洞渣破碎制砂，将成品砂进行大量筛分试验，通过试验得出试点项目的系数 k 以及得出 m_3 与 m_2 的比值范围。以《建设用砂》(GB/T 14684—2022)为试验依据，随机抽取其中的 3 次试验(每次试验包含 5 组筛分试验，共计 15 组，每组试验样品的重量为 500 g)样品的筛分颗粒级配见表 3，级配曲线如图 3 所示。

依据大量筛分试验数据，得出该项目细度模数平均值 $\overline{M_x}$ 为 2.7，调配系数平均值 $\bar{k}$ 为 2.1。将 $\bar{k}=2.1$ 带入式(8)，得出 m_3 与 m_2 的比值范围，见式(9)。

$$3.1 \leqslant \frac{m_3}{m_2} \leqslant 4.8 \tag{9}$$

由此可见，当细度模数在 2.6～2.8 之间时，试点项目 m_3 与 m_2 的比值范围在 3.1～4.8 之间。

表 3 试验样品的筛分颗粒级配

Table 3 Sieve particle grading of the test samples

筛孔尺寸/mm	累计筛余百分率/%														
	实验 1	实验 2	实验 3	实验 4	实验 5	实验 6	实验 7	实验 8	实验 9	实验 10	实验 11	实验 12	实验 13	实验 14	实验 15
4.75	1.2	1.2	1.0	1.4	1.0	2.0	1.0	1.2	1.2	1.6	1.0	1.2	1.6	1.4	1.2
2.36	22.8	23.4	23.0	24.2	23.8	23.4	22.8	22.4	22.6	22.6	22.6	23.0	23.6	23.0	23.0
1.18	37.6	38.0	37.8	38.6	38.8	37.0	38.0	38.4	36.6	36.6	37.6	37.4	37.6	37.8	37.4
0.60	50.8	51.0	50.0	49.8	49.2	48.2	51.2	52.6	49.0	50.4	51.4	51.4	850.6	54.0	54.4
0.30	72.4	72.0	71.4	71.4	71.0	71.2	71.4	72.6	71.2	71.4	72.6	72.4	71.8	72.0	72.4
0.15	90.2	90.2	86.4	86.4	86.0	83.2	86.2	88.0	86.6	87.0	88.4	88.4	86.6	88.2	88.8
筛底	99.0	99.2	99.6	99.6	99.8	99.2	99.6	99.8	99.8	99.6	99.0	98.8	99.6	99.4	99.8
细度模数	2.71	2.72	2.66	2.67	2.66	2.58	2.70	2.70	2.63	2.64	2.70	2.70	2.66	2.72	2.73

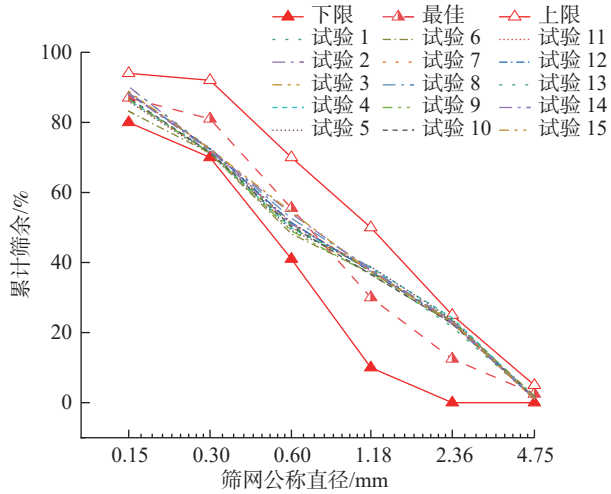

图 3　试验样品的级配曲线

Fig. 3　Grading curves of the test samples

根据制砂总量为 100 t/h，得出式(10)。

$$\begin{cases} 0 \leqslant m_2 + m_3 \leqslant 100 \\ 0 \leqslant m_2 \leqslant 100 \\ 0 \leqslant m_3 \leqslant 100 \end{cases} \tag{10}$$

根据式(9)和式(10)，可以得出 m_3 与 m_2 的取值范围的分布情况，如图 4 所示。

将 $\overline{k} = 2.1$ 带式(6)，得式(11)。

$$M_x = 2.1 + 2.9\frac{m_2}{m_2 + m_3} \tag{11}$$

试验得出：在隧道洞渣合格的情况下进行破碎制砂，其细度模数 M_x 在标准范围内呈现一定波动，而细度模数 $\overline{M_x}$ 的值也满足标准要求。因此，母材必须在检测合格后方能进行制砂。如果检测出制砂的母材呈现阶段性变化时，需要提前做好母材的分类处理。

3.4　确定变速皮带机的速度 v

利用电动分料斗的开合度来实现调速皮带对 m_2 输送量的控制，保证料斗与调速皮带之间为满料状态，多余的 2.5～5.0 mm 物料则通过溢料口返回制砂系统。调速皮带上方设置固定截面罩，保证皮带单位长度上物料的均匀性。设固定截面罩物料横截面的面积为 s，调速皮带的速度为 v(精度 0.1 m/s)。通过变频器调节 v 的值，进而调节 m_2 的值，计算见式(12)。

$$m_2 = 3600\rho s v \tag{12}$$

式中：ρ 为砂的密度，取 1.4 t/m³；s 为粒径为 2.5～5.0 mm 砂的截面面积；v 为调速皮带的速度。

根据不同生产线的产能确定 s 值，根据 100 t/h 制砂量的产能来确定该试点项目的 s=0.005 m²。如果产能变化则截面积 s 会有一定的变化。调速皮带结构如图 5 所示。

将 s=0.005 m² 带入式(12)，可得式(13)。

$$m_2 = 25.2v \tag{13}$$

将式(13)带入式(11)中，可得式(14)。

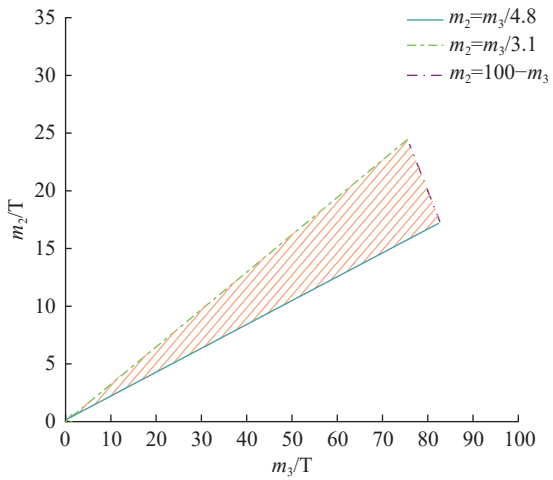

图 4　m_3 与 m_2 的取值范围

Fig. 4　Value range of m_3 and m_2

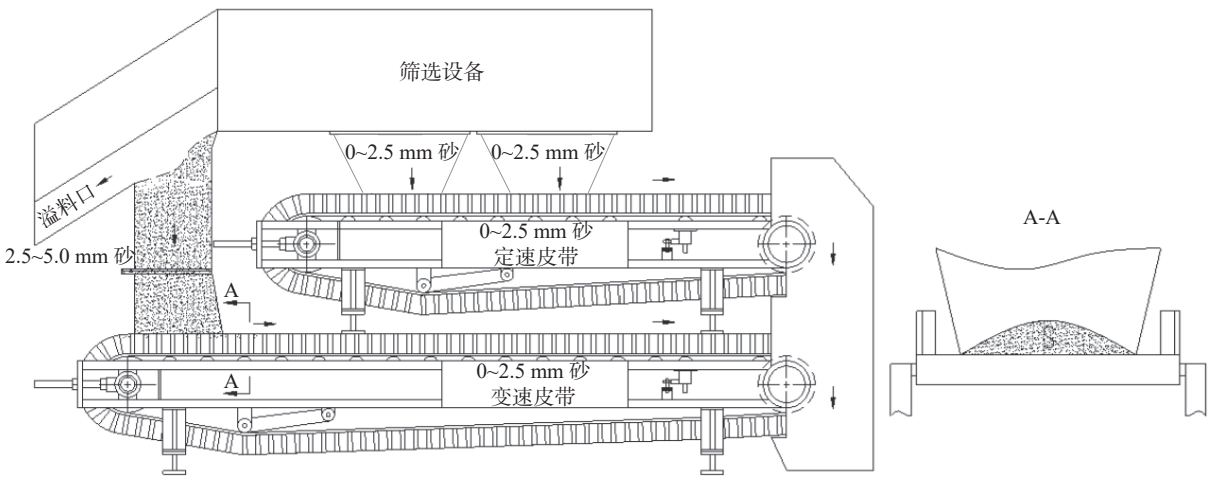

图 5　调速皮带结构图

Fig. 5　Structure diagram of speed regulating belt

$$M_x = 2.1 + \frac{73.08}{73.08 + \frac{m_3}{v}} \tag{14}$$

得出细度模数值 M_x 的大小只与 m_3、v 的比值有关。v 值越大，M_x 值越大，即反应砂的粒径越粗，反之越小。

将式(13)带入式(9)中，得出 m_3 与 v 的比值范围，可得式(15)。

$$\frac{m_3}{120.96} \leqslant v \leqslant \frac{m_3}{78.12} \tag{15}$$

当细度模数在 2.6～2.8 之间时，试点项目 m_3 与 v 的比值在 78.12～120.96 之间。试点项目的制砂产能约为 100 t/h 时，当细度模数在 2.6～2.8 之间时，可得式(16)。

$$\begin{cases} 2.1 + 2.9\dfrac{m_2}{m_2 + m_3} \geqslant 2.6 \\ 2.1 + 2.9\dfrac{m_2}{m_2 + m_3} \leqslant 2.8 \end{cases} \tag{16}$$

结合式(10)、式(15)和式(16)，当细度模数在 2.6～2.8 之间时，变速皮带速度 v 应该设置在 0～0.8 m/s。m_3 与 v 的曲线关系如图 6 所示。

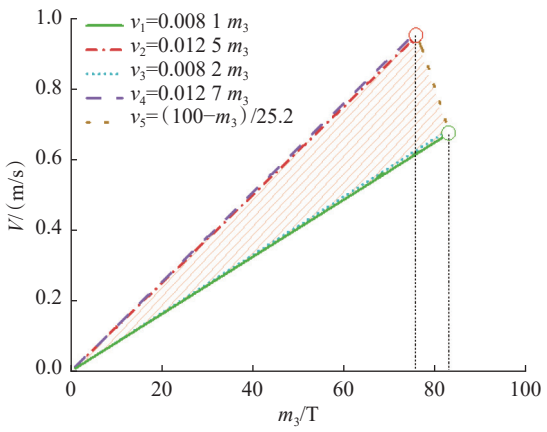

图 6　m_3 与 v 的曲线关系图

Fig. 6　Curves diagram of m_3 and v

3.5　闭环控制监测系统

该系统配置了型号为 TK-JS-1001 的细度模数在线监测系统[25]，将测定细度模数值 M_x' 与设定细度模数值 M_x 进行比较，监测结果返回到集中控制系统，集中控制系统发出指令调节变速皮带的速度，从而达到细度模数的在线闭环控制调节。细度模数判别逻辑如图 7 所示。

在线监测系统采用图像识别法[25]，在颗粒自由下落过程中拍摄通过镜头的颗粒图像，在拍摄图像的同时电脑软件对颗粒进行快速识别和处理，在屏幕上实时显示每个颗粒的图像和粒径粒形数据。机制砂生产质量在线监测系统的分析结果包括反映颗粒

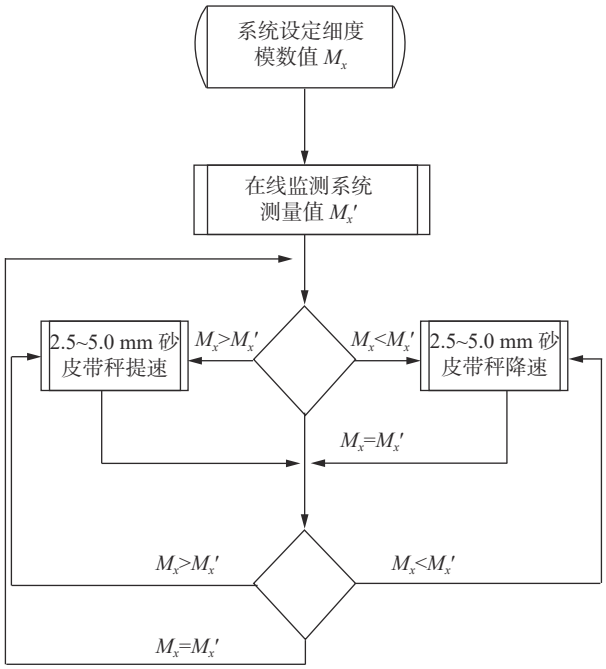

图 7　细度模数判别逻辑

Fig. 7　Discriminant logic of fineness modulus

形貌的圆形度、长径比和反映颗粒大小的细度模数、含粉量、分计筛余、累计筛余等参数。

4　试点应用

目前，该细度模数控制系统已在新建高原铁路某隧道洞渣制备机制砂项目进行试点应用。试点项目已进入稳定生产阶段，经在线细度模数控制系统调配后的成品砂质量良好。该试点项目的细度模数控制系统结构、机制砂成品料、细度模数在线监测情况分别如图 8、图 9 和图 10 所示。

5　结论与讨论

5.1　结论

本文基于现有干法机制砂工艺对细度模数调配困难的问题，结合相关标准、筛分设备性能等因素，着重研究了公称粒径 2.5～5.0 mm 的砂比例大小对细度模数的影响，设计出了机制砂细度模数控制系统。通过以上工作，本文得到的主要结论如下所述。

1)基于实际应用中各筛分设备的性能因数、成本控制等因素，将 0～5.0 mm 砂分为 0～2.5 mm 与 2.5～5.0 mm 两区间，推导出公称粒径为 2.5～5.0 mm 与 0～2.5 mm 的砂之间的简化预测公式为 $M_x = k + (5-k)\dfrac{1}{1+\dfrac{m_3}{m_2}}$；同时得出公称粒径为 2.5～5.0 mm 的砂对细度模数影响较大，具体为：当调配系数 k 一定时，公称粒径为 2.5～5.0 mm 的砂越多，细度模数越大，反之细度模数越小。

(a)

(b)

图 8　细度模数控制系统结构

Fig. 8　Structure of fineness modulus control system

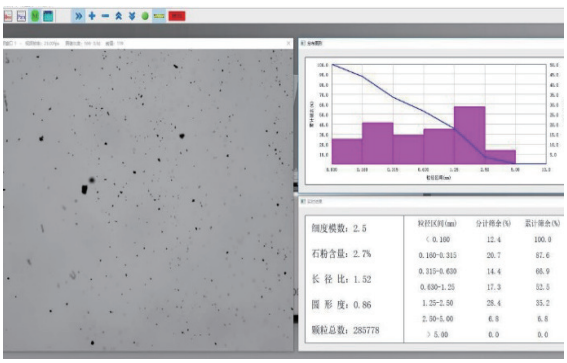

图 9　细度模数在线监测

Fig. 9　Online monitoring of fineness modulus

图 10　机制砂成品料

Fig. 10　Finished materials of crushed sand

2)当细度模数在 2.6～2.8 之间且调配系数 k 取 2.1 时，m_3 与 v 的比值为 78.12～120.96 且皮带的速度 v 在 0～1.0 m/s 之间，从而通过控制皮带的速度实现对公称粒径为 2.5～5.0 mm 的砂流量调节，实现对细度模数的调配。

3)基于简化预测公式构建的细度模数控制系统，可实现对细度模数稳定闭环控制，对隧道洞渣资源化利用有积极作用，实现降本增效。

5.2　讨论

本文是基于市面现有筛分设备，考虑到筛分性能、经济成本等因素进行的研究，得出了一些研究结论，但对机制砂细度模数控制的研究还有待进一步研究。

1)本文是将公称粒径为 2.5～5.0 mm 的砂与公称粒径为 0～2.5 mm 的砂进行了分离研究，未将公称粒径在 0～2.5 mm 区间内的砂再细分研究。后续可根据制造技术、生产工艺等因素，再进一步的研究。

2)本文基于机制砂母材相对稳定(在一定时间变化不大)的前提下进行的研究分析，同时在线质量监测系统需要较短的时间进行检测，导致研究的细度模数控制系统不能实时地进行细度模数调节，有一定的滞后性。

参考文献(References)：

[1] 胡志波，贺佰冻. 机制砂特性对混凝土性能的影响及机理研究[J]. 区域治理，2018(35)：228.
HU Zhibo, HE Baidong. Study on the influence of characteristics of crushed sand on concrete performance and its mechanism[J]. Regional Governance, 2018(35): 228.

[2] 徐健，蔡基伟，王稷良，等. 人工砂与人工砂混凝土的研究现状[J]. 国外建材科技，2004，25(3)：20-24.
XU Jian, CAI Jiwei, WANG Jiliang, et al. Research status of artificial sand and artificial sand concrete[J]. Science and Technology of Overseas Building Materials, 2004, 25(3): 20-24.

[3] CHAPARRO Marcos, GNANASARAVANAN S, PACHAMUTHU R. Trace and major minerals of (natural and manufactured) sand: the importance of manufactured sand for construction purposes and the preservation of rivers[J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2021, 6(2): 52.

[4] 张建博，刘明，葛小博，等. 水电工程人工制砂技术的应用及展望[J]. 水力发电，2018，44(7)：72-76.
ZHANG Jianbo, LIU Ming, GE Xiaobo, et al. Application and prospect of artificial sand production technology in hydropower engineering[J]. Water Power, 2018, 44(7): 72-76.

[5] 袁政成，黄法礼，王振，等. 隧道洞渣在建筑材料中的资源化综合利用研究进展[J]. 硅酸盐通报，2020，39(8)：2468-2475.
YUAN Zhengcheng, HUANG Fali, WANG Zhen, et al. Review on resources comprehensive utilization of tunnel muck in building materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(8): 2468-2475.

[6] 艾长发，彭浩，胡超，等. 机制砂级配对混凝土性能的影响规律与作用效应[J]. 混凝土，2013(1)：73-76.
AI Changfa, PENG Hao, HU Chao, et al. Influence law and action ef-

fect of manufactured sand gradation on concrete performance[J]. Concrete, 2013(1): 73-76.

[7] 李北星, 柯国炬, 赵尚传, 等. 机制砂混凝土路用性能的研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(4): 529-534.
LI Beixing, KE Guoju, ZHAO Shangchuan, et al. Research on pavement performance of manufactured sand concrete[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(4): 529-534.

[8] MANE K M, KULKARNI D K, PRAKASH K B. Properties and microstructure of concrete using pozzolanic materials and manufactured sand as partial replacement of fine aggregate[J]. SN Applied Sciences, 2019, 1(9).

[9] 庄绍牧. 机制砂细度模数对混凝土工作性及力学性能的影响[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2019, 18(2): 20-23.
ZHUANG Shaomu. Influence on fineness modulus of mechanism sand for concrete[J]. Journal of Guangdong Communications Polytechnic, 2019, 18(2): 20-23.

[10] 刘波. 浅谈人工砂细度模数对混凝土性能的影响[J]. 四川建材, 2015, 41(1): 6-7.
LIU Bo. The influence of the fineness modulus of artificial sand on the properties of concrete was discussed[J]. Sichuan Building Materials, 2015, 41(1): 6-7.

[11] 吴立红, 赵丽平, 张小波. 砂的细度模数对混凝土性能的影响[J]. 施工技术, 2012, 41(S2): 107-110.
WU Lihong, ZHAO Liping, ZHANG Xiaobo. The influence of sand fineness modulus on concrete performance[J]. Construction Technology, 2012, 41(S2): 107-110.

[12] 吴永根, 李文哲, 韩照, 等. 砂细度模数对道面混凝土性能的影响[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2013, 14(4): 5-8.
WU Yonggen, LI Wenzhe, HAN Zhao, et al. Effect of sand fineness modulus on performance of pavement concrete[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2013, 14(4): 5-8.

[13] SHEN W G, LIU Y, WANG Z W, et al. Influence of manufactured sand's characteristics on its concrete performance[J]. Construction and Building Materials, 2018, 172: 574-583.

[14] KUMAR D P, SASHIDHAR C. Effect of fineness modulus of manufactured sand on durability characterstics of self compacting concrete[J]. International Journal of Engineering, Science and Mathematics, 2019, 6(3): 43-51.

[15] 邓涛. 隧道洞渣制备机制砂及机制砂混凝土应用技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.

[16] 张立人, 王岩, 张仲权, 等. 隧道洞渣加工机制砂在预制T梁中的应用研究[J]. 交通科技, 2021(4): 12-16.
ZHANG Liren, WANG Yan, ZHANG Zhongquan, et al. Application of manufactured sand from tunneling mucks in concrete precast T-beam[J]. Transportation Science & Technology, 2021(4): 12-16.

[17] TANG Y, QIU W C, LIU D W, et al. Experimental study on the properties of mortar and concrete made with tunnel slag machine-made sand[J]. Materials, 2022, 15(14).

[18] 宋宏伟, 何磊, 王浩, 等. 粤西地区花岗岩机制砂细度模数及修正砂率研究[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(8): 14-18.
SONG Hongwei, HE Lei, WANG hao, et al. Fineness modulus and correction sand rate of granite machine-made sand in Western Guangdong[J]. China Harbour Engineering, 2020, 40(8): 14-18.

[19] 邵建峰, 姚绍武, 张文彬, 等. 高品质机制砂大规模生产工艺和质量控制技术研究[J]. 混凝土, 2013(5): 144-146, 150.
SHAO Jianfeng, YAO Shaowu, ZHANG Wenbin, et al. Research of mass production technology and quality control of superior quality manufactured-sand[J]. Concrete, 2013(5): 144-146, 150.

[20] 何文敏. 砂的细度模数与颗粒级配关系的探讨[J]. 山东建材, 2007, 28(4): 47-49.
HE Wenmin. The discussion of relationship between fineness module and grain composition on sand[J]. Shandong Building Materials, 2007, 28(4): 47-49.

[21] 杨毅. 混凝土细骨料试验中砂细度模数问题研究[J]. 江西建材, 2020(3): 36-37.
YANG Yi. Study on sand fineness modulus in concrete fine aggregate test[J]. Jiangxi Building Materials, 2020(3): 36-37.

[22] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 建设用砂(GB/T 14684—2022)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.

[23] 交通部公路科学研究所. 公路工程集料实验规程(JTG E42—2005)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.

[24] 中国建筑材料联合会. 建设用卵石、碎石(GB/T 14685—2022)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.

[25] 王振, 韩自力, 赵有明, 等. 基于图像分析方法的机制砂颗粒形貌参数研究[J]. 铁道建筑, 2020, 60(11): 144-147, 152.
WANG Zhen, HAN Zili, ZHAO Youming, et al. Study on particle shape parameters of manufactured sand based on image analysis method[J]. Railway Engineering, 2020, 60(11): 144-147, 152.