

耐磨低收缩道面水泥技术指南

Technical guide for wear-resistant low shrinkage pavement
cement

福建省公路事业发展中心

二〇二二年•福州

目录

1 耐磨低收缩道面水泥组分技术标准.....	1
2 耐磨低收缩道面水泥的生产工艺.....	3
3 耐磨道面混凝土材料与技术要求.....	4
4 耐磨道面混凝土设计控制指标.....	8
5 耐磨道面混凝土掺合料掺配建议.....	11

1 耐磨低收缩道面水泥组分技术标准

表 1 耐磨低收缩道面水泥改良技术指标要求

序号	技术指标	耐磨低收缩道面水泥	备注
1	铝酸三钙 (%)	熟料中 (≤ 5)	参考《道路硅酸盐水泥》(GB/T 13693-2017)
2	铁铝酸四钙 (%)	熟料中 (≥ 15)	
3	游离氧化钙 (%)	熟料中 (≤ 1.0)	
4	氧化镁 (%)	≤ 5.0	
5	三氧化硫 (%)	≤ 3.5	
6	含碱量 (%) ($\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$)	≤ 0.6	
7	氯离子含量 (%)	≤ 0.06	
8	混合材种类及掺量	满足规范要求的 F 类粉煤灰、粒化高炉矿渣；若掺加石灰石粉，掺量不大于 3%。混合材总掺量应小于 10%。宜优先使用钢渣。	
9	安定性	雷氏夹合格	参考《道路硅酸盐水泥》(GB/T 13693-2017)
10	初凝时间 (min)	≥ 180	
11	终凝时间 (min)	≤ 300	
12	标准稠度需水量 (%)	≤ 26.0	
13	比表面积 (m^2/kg)	330~350	
14	细度 ($80\mu\text{m}$ 筛余, %)	1.0~10.0	
15	28d 干缩率 (%)	≤ 0.09	
16	耐磨性 (kg/m^2)	≤ 2.5	
17	强度/MPa	28d 抗折强度 $> 8.0\text{MPa}$	
18	助磨剂	不建议添加	
19	烧失量 (%)	≤ 3.0	

(1) 水泥组分的建议。

不同的水泥组分对混凝土的水化放热特性和路用性能影响较大,可以使用耐磨低收缩道面水泥提高道面混凝土性能,道路水泥组分设计时应控制 C_3A 含量,不必控制很低。本技术指南认为, C_3A 含量在 4.25%左右时,便可较大幅度降低水化热和混凝土早期收缩; C_4AF 含量提升到 17%左右时,道面混凝土的磨损体积减少,耐磨性能较高;但也发现 C_3S 和 C_3A 含量低时,早期强度下降比较明显,还应尽量保持 C_3S 含量在 50%以上。

同时发现混合材对水泥性能影响也比较大,混合材掺量大且种类杂时,能明显降低混凝土强度和耐磨性能,添加少量品质好的混合材时,能提高水泥的强度和其它性能,其中添加钢渣可以提高耐磨性能,并对强度也有一定提升,掺加石

灰石能提高强度。掺加混合材时，应保证混合材的品质，保持添加种类不能多，掺量在 5% 以下，对于品质好的混合材可以适当提高其掺量。

改良参考指标：

建议不能添加助磨剂，否则水泥易磨损；

建议硅酸三钙含量宜控制在 50%，硅酸二钙含量宜控制在 25%。

(1) 严格控制耐磨低收缩道面水泥中铝酸盐矿物的含量。

水泥中 C_3A 和 C_4AF 含量需要控制，水泥中 C_3A 含量过多，容易使水泥凝结时间过短，早期水化热过大，混凝土拌合性能变差，增加道面早期开裂的可能性。《道路硅酸盐水泥》规范中规定水泥熟料中 C_3A 含量不超过 5%。本技术指南认为使用的水泥 C_3A 含量应在满足这一要求的基础上尽可能降低。

耐磨性试验结果表明，增加水泥熟料中 C_4AF 的含量有助于提高混凝土的耐磨性，并且一般来说提高 C_4AF 含量同时也能够降低 C_3A 含量。《道路硅酸盐水泥》规范中规定水泥熟料中 C_4AF 含量不低于 15%。可以在满足生产工艺的情况下进一步提高 C_4AF 含量。

熟料烧制过程中应保证一定的铝酸盐含量，即保证 $\omega(C_3A+C_4AF)$ 接近 20%，主要是由于 C_3A 和 C_4AF 在熟料中多为不稳定的玻璃体，在熟料烧制到一定温度时会熔融成液相，而一定的液相含量和液相粘度是形成 C_3S 的必要条件，即铝酸盐矿物的存在能够促进 C_3S 的生成。

(2) 控制耐磨低收缩道面水泥中硅酸盐矿物的比例。

熟料中 C_3S 和 C_2S 为主要的硅酸盐矿物，含量一般能占到熟料的 70% 以上。 C_3S 是水泥早期强度和一年内强度的主要贡献者，国内生产的水泥 C_3S 含量普遍在 52%~63%， C_3S 含量过高，容易增加产生收缩裂缝的可能。

C_2S 为水泥后期强度的主要贡献者，其水化放热量低，收缩变形小，与对水泥的要求相契合。《道路硅酸盐水泥》与民航施工规范均没有对水泥这两个矿物的含量进行规定。根据本技术指南相关研究成果与实践经验，建议水泥调整两种矿物的比例，宜控制熟料中 C_3S 含量在 50%~55% 左右，不要超过 60%。 C_2S 含量在 25%~30% 左右，这种比例的水泥早期放热低，后期强度高，有利于减小道面早期开裂的可能性。

(3) 控制耐磨低收缩道面水泥的细度与比表面积。

目前我国生产的水泥比表面积通常在 $370\text{ m}^2/\text{kg}$ ~ $400\text{ m}^2/\text{kg}$ ，比表面积大的水泥早期反应速率快，早期强度也高。研究表明，混凝土早期开裂与其 1d 强度有关，1d 强度越高，开裂的可能性越大。为减小混凝土早期开裂的可能，可放弃一定的早期强度，即控制水泥比表面积在一个合理的范围内。规范中对水泥比表面

积的规定较为宽泛，根据试验结果和施工经验，建议控制水泥比表面积在 $340\text{m}^2/\text{kg}\sim 360\text{m}^2/\text{kg}$ ，可有效降低早期开裂的可能。

2 耐磨低收缩道面水泥的生产工艺

针对耐磨低收缩道面专用水泥质量要求和客户反馈的问题，课题组与华润雁石水泥企业开展满足耐磨道面使用要求的“耐磨、高抗裂、低收缩的耐磨低收缩道面专用水泥”的生产工作。具体生产工艺如下：

（1）质量要求

所用水泥满足以下质量要求：4h 水化热 $<12\text{J/g}$ ，48h 水化热 $<160\text{J/g}$ ，28d 抗折强度 $\geq 8.0\text{MPa}$ ，28d 磨耗量 $\leq 2.50\text{kg/m}^3$ ，28d 干缩率 $\leq 0.09\%$ 。

（2）生产组织

1) 主要材料选择。

石灰石： $\text{CaO}\geq 49.0\%$ ， $\text{SiO}_2\leq 7.0\%$ ， $\text{Al}_2\text{O}_3\leq 1.20\%$ ， $\text{MgO}:2.5\%\pm 0.5\%$ ；

铁质材料： $\text{Fe}_2\text{O}_3\geq 40.0\%$ ，全硫 $<1.0\%$ ；

煤炭：热值 $\geq 23000\text{kJ/kg}$ ，全硫 $\leq 1.0\%$ 。

2) 控制窑投料量 350t/h ，采用薄料快烧的操作思路，降低窑内物料填充系数，改善窑内通风。

3) 窑头煤粉燃烧器内外风开度从 100% 和 50% 调整为 50% 和 100% ，有效降低火焰的核心温度，同时根据熟料煅烧与质量情况及时加减头煤，窑尾分解炉出口温度从 900°C 降低至 860°C ，控制窑主机电流 $600\sim 700\text{A}$ ，避免窑内温度过高造成熟料烧结异常及窑皮的不稳定。

4) 调整煤粉燃烧器的横向坐标位置，由正常的 -30mm 调整到 $+0\text{mm}$ 坐标位置，加大窑口冷却带长度，降低出窑熟料的温度及黏度，避免窑口篦冷机固定篦板堆积“雪人”。

5) 降低出磨煤粉的水分（全无烟煤出磨风温由 75°C 调整到 80°C ），降低出磨煤粉细度（控制指标由 $1.5\%\sim 1.8\%$ 降低到 $1.0\%\sim 1.5\%$ ），提高煤粉燃烧速率及燃尽率，减少煤粉机械不完全燃烧造成窑内煤粉沉降导致的结圈结蛋等异常现象。

6) 当上过渡带及窑尾末端出现筒体温度下降并有结圈趋势时，通过每 4h 移

动煤管坐标位置（从-40mm 坐标至+0mm 坐标），能够有效抑制结圈的形成。

基于室内水化热试验和工程应用的成果，将研究得到的不同配比胶凝组分水化放热特性主要结论总结如下：

1) C₃A 水化速度最快，放热量最高。C₃A 含量越高，初始水解期的放热峰值和放热量都要越高。C₃A 含量增加还会明显缩短水化诱导期的持续时间，使水泥水化几乎没有诱导期。

2) 水化加速期的放热特征主要取决于 C₃S 含量与水泥细度。从试验结果来看，水泥中 C₃S 含量不能过高，比表面积不能过大，否则会导致水泥水化加速期提前和放热量增加。

3) C₃A 含量和 C₃S 含量分别对水泥水化放热初始期和加速期性状影响显著，通过严格控制水泥中这两种矿物的含量，可显著降低道面混凝土的水化热，减少早期开裂可能。而提高 C₄AF 含量能改善道面耐磨性能，降低维护费用。

4) 耐磨低收缩道面水泥的 C₃S、C₂S 的比例较为恰当，其 C₂S 的含量达到 25%，在保证强度的同时，降低水泥水化热，为更适合道面使用的低水化热水泥。

3 耐磨道面混凝土材料与技术要求

（1）细集料应耐久、洁净、质地坚硬，宜采用天然砂，在设计文件许可的部位可采用机制砂。细集料应符合表 2、表 3、表 4 规定的技术指标。

表 2 细集料的技术指标

项次	项目	技术指标	实验方法
1	机制砂母岩抗压强度（MPa）	≥60.0	JTG E41 T0221
2	机制砂母岩磨光值	≥35.0	JTG E42 T0321
3	机制砂单位粒级最大压碎值（%）	≤25.0	JTG E42 T0350
4	机制砂石粉含量（%）	≤7.0	JTG E42 T0333
5	机制砂 MB 值	≤1.4	JTG E42 T0349
6	机制砂吸水率（%）	≤2.0	JTG E42 T0330
7	氯离子含量（按质量计，%）	≤0.02	GB/T 14684
8	坚固性（按质量损失计，%）	≤8.0	JTG E42 T0340
9	云母与轻物质含量（按质量计，%）	≤1.0	JTG E42 T0337
10	含泥量（按质量计，%）	≤2.0	JTG E42 T0333

11	含泥块量（按质量计，%）	≤0.5	JTG E42 T0335
12	硫化物及硫酸盐（按 SO ₃ 计，%）	≤0.5	JTG E42 T0341
13	有机物含量（比色法）	合格	JTG E42 T0336
14	其他杂物	不应混有石灰、煤渣、草根、贝壳等杂物	
15	表观密度（kg/m ³ ）	≥2500	JTG E42 T0328
16	松散堆积密度（kg/m ³ ）	≥1400	JTG E42 T0331
17	空隙率（%）	≤45	JTG E42 T0331
18	碱活量	不应有碱活性反应，当岩相法判断疑似碱活性时，以砂浆棒法为准	JTG E42 T0324/T0325

注：①机制砂母岩抗压强度、氯离子含量、硫化物及硫酸盐、碱活性在细集料使用前应至少检验一次。②表中注明机制砂的指标仅为机制砂检验指标，未注明机制砂的指标为天然砂与机制砂通用指标。

表 3 天然砂的级配范围

砂分级	细度模数	方孔筛尺寸							
		9.5	4.75	2.36	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075
		累计筛余（以质量计）（%）							
粗砂	3.1-3.7	0	0-10	5-35	35-65	70-85	80-95	90-100	95-100
中砂	2.3-3.0	0	0-10	0-25	10-50	40-70	70-92	90-100	95-100
试验方法		JTG E42 T0327							

表 4 机制砂的级配范围

砂分级	细度模数	方孔筛尺寸						
		9.5	4.75	2.36	1.18	0.60	0.30	0.15
		累计筛余（以质量计）（%）						
粗砂	3.1-3.7	0	0-10	5-50	35-70	70-85	80-95	90-100
中砂	2.3-3.0	0	0-10	0-20	15-50	40-70	80-90	90-100
试验方法		JTG E42 T0327						

注：①水泥混凝土面层采用机制砂的实例比较少，但考虑在部分地区难以找到符合要求的天然砂，可考虑允许使用符合要求的机制砂。机制砂只能用于设计文件许可的部位，采用机制砂需考虑对水泥混凝土工作性、耐磨性、耐久性等的影响，并采取相应措施。②宜采用细度模数为 2.6-3.2 的细集料，同一配合比用砂的细度模数变化范围不应超过 0.3。③机制砂应采用制砂机生产。

（2）粗集料应采用碎石或破碎卵石，质地坚硬、耐久、耐磨、洁净，级配

碎石和破碎卵石应符合表 5、表 6、表 7 的规定。

表 5 碎石和破碎卵石技术指标

项次	项目		技术指标	试验方法
1	压碎值 (%)		≤ 21.0	JTG E42 T0316
2	坚固性 (按质量损失计) (%)		≤ 5.0 (年最低月平均气温不低于 0°C)	JTG E42 T0314
			≤ 3.0 (年最低月平均气温低于 0°C)	
3	针片状 (按质量计) (%)		≤ 12.0	JTG E42 T0311
4	含泥量 (%)		< 0.5	JTG E42 T0310
5	泥块含量 (按质量计) (%)		< 0.2	JTG E42 T0310
6	吸水率 (按质量计) (%)		≤ 2.0	JTG E42 T0307
7	硫化物及硫酸盐 (按 SO_3 质量计, %)		≤ 1.0	GB/T 14685
8	有机物含量 (比色法)		合格	JTG E42 T0313
9	氯离子含量 (按氯离子质量计) (%)		≤ 0.02	GB/T 14685
10	碎石红白皮含量 (%)		≤ 10.0	参照 JTG E42 T0311
11	岩石抗压强度 (MPa)	岩浆岩	≥ 100	JTG E41 T0221
		变质岩	≥ 80	
12	表观密度 (kg/m^3)		≥ 2500	JTG E42 T0308
13	松散堆积密度/ kg/m^3		≥ 1350	JTG E42 T0309
14	空隙率 (%)		≤ 45	JTG E42 T0309
15	洛杉矶磨耗量损失 (%)		≤ 30	JTG E42 T0317
16	碱活性		不应有碱活性反应, 当岩相法判断疑似碱活性反应是以砂浆棒法为准	JTG E42 T0324 JTG E42 T0325

注: ①硫化物及硫酸盐含量、碱活性反应、岩石抗压强度在使用前至少检验一次。②.红白皮是指颗粒中有一个及一个以上有水锈的天然裂隙面。

表 6 粗集料的级配范围

<div> <div>粒径</div> <div>类型 级配</div> </div>		方孔筛尺寸 (mm)							
		2.36	4.75	9.50	16.0	19.0	26.5	31.5	37.5
		累计筛余 (按质量计)							
合成级配	4.75-16	95-100	85-100	40-60	0-10	-	-	-	-
	4.75-19	95-100	85-95	60-75	30-45	0-5	0	-	-
	4.75-26.5	95-100	90-100	70-90	50-70	25-40	0-5	0	-
	4.75-31.5	95-100	90-100	75-90	60-75	40-60	20-35	0-5	0

表 7 粗集料单粒级的级配范围

<div> <div>粒 径</div> <div>方孔筛尺寸 (mm)</div> </div>									
		2.36	4.75	9.50	16.0	19.0	26.5	31.5	37.5
		累计筛余 (按质量计)							
类型	级配								
	4.75-9.5	95-100	80-100	0-15	0	-	-	-	-
	9.5-16	-	95-100	80-100	0-15	0-5	0	-	-
	9.5-19	-	95-100	85-100	40-60	0-15	0	0	-
	16-26.5	-	-	95-100	55-70	25-40	0-10	0	0
	16-31.5	-	-	95-100	85-100	55-70	25-40	0-10	0

注：①碎石或碎卵石的合成级配应采用两个或三个单粒级的粗集料掺配，以最小松散堆积孔隙率为确定各粒级的比例。②碎石不应含有可溶盐。

(3) 机制砂石粉的建议。

机制砂带有一定量的石粉时，不仅可以改善施工性能，还能改善孔结构和界面，从而提高强度和耐磨性能。从本研究中发现，含有两种石粉的混凝土强度和耐磨性能均随着石粉含量的增大，先提高后降低，在 10%左右性能最优，但随着石粉的继续增大，不仅施工性能会降低，强度和耐磨性能也会随之下降。而且随着石粉含量的增加，混凝土早期收缩性能先增大后减少，在石粉含量达到 10%时，混凝土早期收缩率比未掺加石粉时增大了 100×10^{-6} 左右，石粉掺量对混凝土早期收缩影响较大，所以要控制机制砂中的石粉含量，对使用耐磨低收缩道面水泥的混凝土应控制石粉含量在 10%以下。

(4) 减水剂的建议。

选用缓凝型的聚羧酸减水剂，其能使混凝土由体积收缩变为体积膨胀，添加适量减水剂可以改善施工性能，提高强度和耐磨性能。减水剂掺量不宜过大，过大会在道面混凝土表面产生气泡，强度发展缓慢。要控制减水剂的掺量，防止减水剂出现不稳定情况，影响混凝土性能，并且在有石粉存在的情况下更应降低减水剂的掺量。

(5) 配合比的建议。

为使道面混凝土路用性能综合较好，结合本技术指南研究，可以保持水灰比在 0.4 左右，单位水泥用量不超过 380kg/m^3 ，砂率低于 38%。调整水灰比大小对混凝土强度和收缩耐磨性能的作用更大，其次是调整水泥用量，尽量不增大砂率。

4 耐磨道面混凝土设计控制指标

耐磨道面混凝土配合比设计方法采用绝对体积法。

混凝土配合比设计方法中的绝对体积法认为单位混凝土是由水泥、砂、石和水四种材料的绝对体积和所含空气体积之和。这种设计方法是以经验为基础的半定量设计方法，适用范围广，理论较为完整，实用价值高，使用相对成熟。

耐磨道面混凝土配合比设计以混凝土抗折强度为设计特征值。

结合现场气候条件、施工机具等因素。依据公路水泥混凝土路面设计规范，弯拉强度的变异系数不宜大于 0.1，保证率为 0.45，标准差为 0.4。

设计设计强度为 5.0MPa，室内配制强度应为 $f_c=f_t/1-1.04c_v+t_s=5.76\text{MPa}$ 。

体积法是耐磨道面混凝土设计中常用的设计方法。假定在单位体积内，根据各种材料的密度计算组成部分的用量。

$$\frac{m_{c0}}{\rho_c} + \frac{m_{f0}}{\rho_f} + \frac{m_{g0}}{\rho_g} + \frac{m_{s0}}{\rho_s} + \frac{m_{w0}}{\rho_w} + 0.01\alpha = 1 \quad (1)$$

式中： m_{c0} ——单位体积混凝土中外掺剂用量；

m_{f0} ——单位体积混凝土中水泥用量；

m_{g0} ——单位体积混凝土中粗集料用量；

m_{s0} ——单位体积混凝土中砂用量；

m_{w0} ——单位体积混凝土中水用量；

ρ_c ——水泥的表观密度， kg/m^3 ；

ρ_g ——石的表观密度， kg/m^3 ；

ρ_s ——砂的表观密度， kg/m^3 ；

ρ_w ——水的表观密度， kg/m^3 ；

α ——混凝土中含气量，在没有使用引气型外加剂时， $\alpha=1$ 。

耐磨道面混凝土宜采用干硬性混凝土类型，配合比推荐值如下。

表 8 耐磨道面混凝土平衡设计控制性指标

内容		指标要求	备注
原材料	水泥	符合水泥混凝土路面技术指标要求	提高耐磨性可增加铁相

	粗集料	级配连续, 控制最大粒径不大于 37.5mm, 公称粒径不得大于 31.5mm	/
	细集料	级配连续不断档, 细度模数 2.6~3.2	/
	水	符合规范	/
	外加剂	不建议使用, 如需要可适当采用减水剂, 特殊要求时可适当加入引气剂、增稠剂等	注意外加剂间的适应性
配合比	水泥	建议选用 42.5 道路专用水泥, 单位水泥用量宜为 320kg/m ³ ~330kg/m ³	/
	粗集料	1350~1450kg/m ³	/
	细集料	砂率与细度模数及砂的级配相关, 在 ±1~2%内调整	/
	水	单位体积用水量不宜大于 160kg/m ³	/
	水灰比	0.38~0.4	可满足耐久性要求
	外加剂	减水剂 1~2%; 引气剂 0.3~0.5‰; 增稠剂 0.4~0.6‰	/
	混凝土密度	每立方混凝土质量不低于 2400kg	/
参数指标	摊铺坍落度	0~2cm	/
	维勃稠度	25±5s	/
现场施工	拌合楼	拌合楼设置在面层施工区附近具有足够的拌和总能力, 混凝土出仓到摊铺时间不宜大于 40min, 视施工温度调整	振捣密实、合理养生、减少早龄期病害是服役期强度和性能、耐久性的保证
	运输	符合规范	
	摊铺	振捣密实、适当养生	

(1) 单位水泥用量。

水泥混凝土面层建议选用 42.5 硅酸盐水泥, 福建没有抗冻要求, 单位水泥用量不应小于 310kg/m³。为了方便施工, 使用水泥为 320kg/m³ 与 330kg/m³。

(2) 砂率。

推荐值 32%。混凝土中细集料一般占总体积的 20~40%, 是混凝土不可缺少的一部分。细集料如果砂粒过粗, 将会使混凝土拌合物松散, 导致砂密度降低, 如果过细, 比表面积增大, 要保持流动性不变, 就要增加用水量, 同时还要增加水泥用量, 提高了成本。

(3) 水灰比。

推荐值 0.38。水灰比也叫水灰比率, 是指混凝土中水的用量与水泥用量的重量比值。水灰比影响混凝土的流变性能、水泥浆凝聚结构以及其硬化后的密实度, 因而在组成材料确定的条件下, 水灰比是决定混凝土强度、耐久性和其他一系列物理力学性能的主要参数。对特定的水泥存在着一个最适宜的比值, 过大过小都

会使强度等性能受到影响。

通常情况下，在水泥品种和标号不变的情况下，混凝土的强度随着水灰比增大有规律的降低，水灰比的降低会相应提高混凝土的密实度、抗冻能力和早期强度增长速度。

（4）石粉含量。

采用机制砂时，可以掺加石粉，配合比试验得出较优的石粉含量为 5~10%。石粉技术要求参照《石粉在混凝土中应用技术规程》，具体要求见表 9。

表 9 石粉技术指标

项目		技术指标
碳酸钙含量（%）		≥75
流动度比（%）		≥100
细度（45um 方孔筛筛余，%）	A 型	≤15
	B 型	≤45
抗压强度比（%）	7d	≥60
	28d	≤60
含水量（%）		≤1.0
亚甲基值（g/kg）	I	≤0.5
	II	≤1.0
	III	≤1.4
氯离子含量（%）		≤0.06
总有机碳含量 TOC（%）		≤0.5

（5）摊铺塌落度。

拌和出仓坍落度小于 40mm，摊铺施工开始振捣时混凝土坍落度 20mm。确保混凝土耐磨道面的耐磨性。

（6）石料的公称粒径与级配

粗集料是混凝土的骨架，是保证混凝土强度的主要材料。

粗集料的针片状含量越大，将增加集料的孔隙率，降低混凝土拌合物的和易性，集料界面粘结力下降，并且针片状颗粒受力时容易折断，进而影响混凝土强度，同时还会影响混凝土的抗渗性能。

粗集料在拌合过程中，会直接吸收部分拌合用水，降低混凝土的水灰比，使得混凝土拌合物的工作性变差，混凝土的塌落度减小，强度降低，此外，吸水率高的集料对混凝土抗冻性，收缩变形亦有不利影响。

粗集料中常含有一些粉尘、粘土、泥块，它们对混凝土的性能将产生不同影响，粉尘，粘土长包裹在石子表面，形成一层粘结能力很弱的薄膜，降低石子与水泥砂浆的粘结力，使混凝土强度降低，粉尘、粘土含量多时还会增加混凝土的干缩和徐变，降低抗渗性能进而影响混凝土的耐久性，泥块对混凝土的影响与粘土基本相同，但由于泥块颗粒较大，在混凝土中成为较大的缺陷或薄弱部分，因而对混凝土的影响更大。

压碎值影响强度较高的混凝土（C40 及以上）的强度。压碎值低的碎石抗冲击能力、耐久性也会受到影响。压碎值低的岩石强度和耐久性也可能较差，它们在混凝土搅拌时可能破碎成细小颗粒，从而影响混凝土的工作性能。一般原则是骨料的强度不能小于混凝土的名义抗压强度。

建议：可采用三档石料进行配合比设计，碎石级配为 4.75~9.5mm，9.5~16mm，16~31.5mm。具体比例根据现场体积填充试验确定。

（7）混凝土设计密度和石子比例。

从确保石子质量，确保混凝土的抗折强度和收缩特性的角度，推荐建议每立方混凝土质量不低于 2450kg，石子骨料不低于 1450kg。

5 耐磨道面混凝土掺合料掺配建议

一般工况下，耐磨道面混凝土施工不添加掺合料。但在耐磨低收缩道面水泥无法满足要求或者添加掺合料后性能改善明显时，可选择添加掺合料。根据项目的研究成果，现将适用于道路使用的粉煤灰、矿渣和钢渣三种掺合料对耐磨道面混凝土性能的影响结果汇总于表 10、表 11。

表 10 单掺掺合料对耐磨道面浆体和混凝土性能的影响

掺合料 性能	单掺粉煤灰	单掺矿渣	单掺钢渣
水化热	可有效降低水化热，并延迟早期水化	能降低早期水化放热，但后期放热与纯水泥相差不大	水化程度低，能有效降低水化热
净浆化学收缩	有效抑制早期和 28d 的化学收缩	仅对早期化学收缩有抑制	能有效抑制早期的收缩，但对 28d 收缩的抑制效果不如粉煤灰

净浆流变性	低掺量时能改善浆体流变性, 掺量过高时浆体粘聚性下降	能改善浆体流变性, 并掺加后浆体粘聚性较好	能提高浆体流动性, 但掺量过大浆体的粘聚性下降明显
砂浆强度	早期强度下降, 低掺量时提高 28d 强度	低掺量时 28d 强度增加明显	掺加后强度下降
混凝土工作性	低掺量时改善拌合性能和提浆性能, 掺量过大时粘聚性下降	掺加后能改善提浆性能, 但对拌合性能的改善不如其他掺合料	低掺量时能改善工作性, 但掺量过高时粘聚性下降并离析泌水
混凝土早期收缩	较有效抑制早期	早期收缩抑制不明显	有效抑制早期收缩
混凝土耐磨性	掺量过大时不利于混凝土耐磨	不利于混凝土耐磨	能有效提高混凝土耐磨性
混凝土色泽	会提高明度值 L 和 b 值, 对色泽不利	会略微提高明度 L 和 b 值, 但幅度较小	略微提高 L 值, 但会降低 b 值, 对色泽有利

表 11 复掺掺合料对浆体和混凝土性能的影响

性能 \ 掺合料	粉煤灰-矿渣	粉煤灰-钢渣	矿渣-钢渣
水化热	能有效降低水化热, 降低效果介于粉煤灰与矿渣之间	明显降低水化热, 降低程度与单掺相似	能降低水化热, 降低程度与粉煤灰-矿渣复掺接近
净浆化学收缩	对 28d 化学收缩降低效果最好	效果介于另两种复掺之间	对早期化学收缩降低效果最好
净浆流变性	流变性介于两种复掺之间	流动度最大, 流变参数最小	流动度最小, 流变参数大
砂浆强度	三种复掺体系中强度最大	三种复掺体系中强度最低	强度介于两者之间, 与粉煤灰-矿渣接近
混凝土工作性	掺量低时可改善工作性能	粘聚性下降明显	效果与粉煤灰-矿渣接近
混凝土早期收缩	效果介于两种之间	收缩抑制效果最明显	收缩抑制效果最差
混凝土耐磨性	耐磨性较差	耐磨性一般	耐磨性好
混凝土色泽	与基准组相差不大	明度值 L 上升, 对混凝土色泽不利	降低明度值 L 和 b 值, 有利于混凝土色泽

技术说明如下:

(1) 针对单掺的形式, 建议使用粉煤灰单掺。单掺粉煤灰后, 水化热降低

明显，浆体和混凝土收缩变形减小，抗折强度提升，混凝土工作性能变好。但粉煤灰掺量需控制，掺量过大容易使混凝土强度降低过多，并影响耐磨性，建议控制在 20% 以下。

(2) 矿渣和钢渣不建议单掺使用，矿渣单掺后，水化热降低不明显，并会增加浆体的化学收缩和早期收缩。钢渣掺加后，由于其活性低，混凝土的强度得不到保障，并且钢渣掺量过高会降低浆体的粘聚性，使混凝土发生离析泌水现象。但钢渣耐磨性好，可考虑与粉煤灰和矿渣复掺使用。

(3) 针对复掺的形式，建议首选粉煤灰与矿渣复掺的形式。粉煤灰与矿渣复掺后混凝土的路用性能较好，并且强度是三种复掺形式中最高的，工作性能也较好。建议复掺各 10% 的粉煤灰与矿渣。粉煤灰与钢渣复掺后强度下降明显，且拌出来的混凝土粘聚性不好，不建议复掺。

(4) 粉煤灰-矿渣复掺唯一不足之处在于耐磨性一般，而矿渣-钢渣复掺形式各项指标与粉煤灰-矿渣相接近，混凝土色泽好，且有利于改善耐磨性，对于有较高耐磨性要求的位置，可考虑用矿渣-钢渣复掺形式替代粉煤灰-矿渣复掺。