

中国工程建设标准化协会标准

煤气化粗渣喷射混凝土应用技术规程

Technical specification for application of coal
gasification coarse slag shotcrete

—20XX-XX-XX 发布

—————20XX-XX-XX 实施

中国工程建设标准化协会 发布

中国工程建设标准化协会标准

煤气化粗渣喷射混凝土应用技术规程

Technical specification for application of coal
gasification coarse slag shotcrete

T/CECS XX—20XX

主编单位：宁夏煤炭基本建设有限公司

建研建硕（北京）科技有限公司

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期： 20xx 年 x 月 x 日

中国计划出版社

XXXX

北京

前 言

《煤气化粗渣喷射混凝土应用技术规程》（以下简称规程）是根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2024 年第二批协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字〔2024〕28 号）的要求进行编制。编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程共分为 8 章，主要技术内容包括：总则，术语，材料，煤气化粗渣喷射混凝土设计要求，煤气化粗渣喷射混凝土配合比，施工，安全环保措施，质量检验与验收。

本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由中国工程建设标准化协会防水防护与修复专业委员会归口管理，由宁夏煤炭基本建设有限公司负责具体技术内容的解释。本规程在使用中如有修改或补充之处，请将有关资料和建议寄送解释单位（地址：银川德胜工业园区德胜西路 3 号，邮政编码：750200），以供修订时参考。

主编单位：宁夏煤炭基本建设有限公司、建研建硕（北京）科技有限公司

参编单位：建研建材有限公司、宁夏润宇泽节能环保有限公司、中国建筑科学研究院有限公司、保利长大工程有限公司、鼎旺天成科技（青岛）有限公司、中国产业发展研究院碳中和与生态修复创新研究中心、河北科技大学。

主要起草人：王占银、侯志成、王伟、赵鑫、翟超阳、李嘉宇、赵建新、张猛、郑龙、李荷、何涛、宋华杰、刘沐琪、赵媛媛。

主要审查人：

目 次

1 总则	1
2 术语	2
3 材料	3
3.1 胶凝材料	3
3.3 外加剂	4
3.4 其他	5
4 煤气化粗渣喷射混凝土设计要求	6
4.1 一般规定	6
4.2 各工程设计要求	7
4.3 性能要求	7
5 煤气化粗渣喷射混凝土配合比	9
5.1 一般规定	9
5.2 配制强度的确定	10
5.3 配合比计算	10
5.4 配合比试配、试喷、调整与确定	12
5.5 高强煤气化粗渣喷射混凝土	12
6 施工	14
6.1 一般规定	14
6.2 设备	14
6.3 喷射准备工作	14
6.4 煤气化粗渣喷射混凝土的制备与运输	14
6.5 喷射作业	15
6.6 养护	15
7 安全环保措施	16
7.1 安全技术	16
7.2 环保要求	16
8 质量检验与验收	18
8.1 质量检验与评定	18
8.2 工程质量验收	19
用词说明	21
引用标准名录	22
条文说明	24

1 总则

1.0.1 为规范煤气化粗渣喷射混凝土的应用，充分发挥煤气化粗渣在喷射混凝土中的性能优势，保障喷射混凝土工程质量、安全耐久，实现资源的高效利用和环境友好，特制定本技术规程。

1.0.2 本规程适用于以煤气化粗渣作为部分胶凝材料或骨料，应用于矿山井巷、隧道涵洞、地下工程、边坡基坑、建筑结构加固等各类需要喷射混凝土的工程中煤气化粗渣喷射混凝土的设计、生产、施工、质量检验与验收。

1.0.3 煤气化粗渣喷砂混凝土的应用除应符合本规程规定外，尚应符合国家现行有关标准和现行中国工程建设标准化协会有关标准的规定。

2 术语

2.0.1 煤气化粗渣喷射混凝土 sprayed coal gasification coarse slag concrete

将胶凝材料、煤气化粗渣、粗骨料等按一定比例拌制的混凝土拌合物送入喷射设备，借助压缩空气或其他动力输送，高速喷至受喷面所形成的一种混凝土。

2.0.2 喷射纤维煤气化粗渣混凝土 sprayed fiber coal gasification coarse slag concrete

混凝土拌合物由胶凝材料、煤气化粗渣、粗骨料、纤维等组成的煤气化粗渣喷射混凝土。

2.0.3 高强煤气化粗渣喷射混凝土 high strength sprayed coal gasification coarse slag concrete

强度等级不低于 C40 的煤气化粗渣喷射混凝土。

2.0.4 喷射回弹率 rebound ratio of spraying

喷射时，喷嘴喷出未粘结在受喷面上的溅落拌合物与总喷出拌合物的质量百分比。

2.0.5 低碱速凝剂 low-alkali accelerator

总碱含量大于 1.0%且不大于 5.0%的速凝剂，以 Na_2O 当量计。

2.0.6 无碱速凝剂 alkali-free accelerator

总碱含量不大于 1.0%的速凝剂，以 Na_2O 当量计。

3 材料

3.1 胶凝材料

3.1.1 配制煤气化粗渣喷射混凝土宜采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，并应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB 175 的规定。当采用其他品种水泥时，其性能指标应符合国家现行有关标准的规定。用于永久性结构煤气化粗渣喷射混凝土的水泥强度等级不应低于 42.5 级。

3.1.2 矿物掺合料应符合下列规定：

1 粉煤灰的等级不应低于 II 级，烧失量不应大于 5%，其他性能应符合现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596 的规定。

2 粒化高炉矿渣粉的等级不应低于 S95，其他性能应符合现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046 的规定；

3 硅灰应符合现行国家标准《砂浆和混凝土用硅灰》GB/T 27690 的规定；

4 当采用其他矿物掺合料时，其性能除应符合现行国家标准《矿物掺合料应用技术规范》GB/T 51003 外，尚应通过试验验证，确定煤气化粗渣喷射混凝土性能满足设计要求后方可使用。

3.2 骨料

3.2.1 粗骨料应选用连续级配的碎石或卵石，最大公称粒径不宜大于 12mm；对于薄壳、形状复杂的结构及有特殊要求的工程，粗骨料的公称粒径不宜大于 10mm；喷射钢纤维混凝土的粗骨料最大公称粒径不宜大于 10mm。当使用碱性速凝剂时，不得使用含有活性二氧化硅的骨料。粗骨料的针、片状颗粒含量、含泥量及泥块含量，应符合表 3.2.1 的要求，其他性能及试验方法应符合现行行业标准《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52 中的规定。

表 3.2.1 粗骨料的针、片状颗粒含量、含泥量及泥块含量

项目	针、片状颗粒含量		含泥量	泥块含量
	C20~C35	≥C40		
指标（%）	≤12.0	≤8.0	≤1.0	≤0.5

3.2.2 煤气化粗渣细度模数宜为 2.5~3.2；干拌法喷射时，细骨料的含水率不宜大

于 6%。煤气化粗渣其他性能及试验方法应符合现行行业标准《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52 和团体标准《混凝土和砂浆用煤气化炉渣细骨料》T/CECS 10423-2024 的规定。

3.2.3 煤气化粗渣喷射混凝土用骨料的颗粒级配范围宜满足表 3.2.3 的要求。

表 3.2.3 骨料的颗粒级配范围

最大公称 累 粒径 方孔筛筛孔边长	10mm	12mm
16.00	0	0
9.50	18~27	10~38
4.75	40~50	30~60
2.36	57~65	46~74
1.18	69~77	59~82
0.60	78~83	69~87
0.30	85~90	78~95
0.15	93~95	92~96

3.3 外加剂

3.3.1 煤气化粗渣喷射混凝土用速凝剂应符合下列规定：

- 1 煤气化粗渣喷射混凝土宜使用无碱或低碱速凝剂。
- 2 速凝剂应与水泥具有良好的适应性，速凝剂掺量应通过试验确定，且不宜超过 10%；
- 3 掺速凝剂的水泥净浆初凝时间、砂浆的 28d 抗压强度比的要求和试验方法应按现行行业标准《喷射混凝土用速凝剂》JC 477 执行；掺无碱速凝剂的水泥净浆凝结时间试验方法应按现行行业标准《喷射混凝土应用技术规程》JC/T 372-2016 执行。

3.3.2 外加剂性能应符合现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076 和《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119 的规定。

3.4 其他

3.4.1 混凝土拌合用水和养护用水应符合现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63 的规定。

3.4.2 煤气化粗渣喷射混凝土用钢纤维和合成纤维应符合应符合现行行业标准《纤维混凝土应用技术规程》JGJ/T 221 的规定。

4 煤气化粗渣喷射混凝土设计要求

4.1 一般规定

4.1.1 煤气化粗渣喷射混凝土的轴心抗压强度标准值、轴心抗拉强度设计值、轴心抗拉强度标准值和轴心抗拉强度设计值等力学参数均应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

4.1.2 煤气化粗渣喷射混凝土的弹性模量可按表 4.1.2 进行取值。

表 4.1.2 喷射混凝土的弹性模量 (N/mm²)

强度等级	C20	C25	C30	C35	C40
弹性模量	2.3×10^4	2.6×10^4	2.8×10^4	3.0×10^4	3.15×10^4

4.1.3 用于永久性结构的煤气化粗渣喷射混凝土应进行粘结强度试验，煤气化粗渣喷射混凝土与岩石或混凝土基底间的最小粘结强度应符合现行行业标准《喷射混凝土应用技术规程》JC/T 372-2016 的规定。

4.1.4 喷射钢纤维煤气化粗渣混凝土以及含有大范围黏土的剪切带、高塑性流变、高应力岩层或松动岩石区的煤气化粗渣喷射混凝土应进行抗弯强度试验，抗弯强度和残余抗弯强度试验、能量吸收等级试验应按现行行业标准《喷射混凝土应用技术规程》JC/T 372-2016 执行。煤气化粗渣喷射混凝土抗拉强度试验应按现行行业标准《纤维混凝土应用技术规程》JGJ/T 221 执行。

4.1.5 煤气化粗渣喷射混凝土抗渗等级不应低于 P6，含水岩层中的煤气化粗渣喷射抗渗等级不应低于 P8；恶劣的暴露环境下煤气化粗渣喷射混凝土宜使用防水煤气化粗渣喷射混凝土，煤气化粗渣喷射混凝土的渗水高度最大值应小于 50mm，其平均值应小于 20mm。

4.1.6 处于冻融侵蚀环境的永久性煤气化粗渣喷射混凝土工程，煤气化粗渣喷射混凝土的抗冻融循环等级不应低于 F200。

4.1.7 处于受化学侵蚀环境的煤气化粗渣喷射混凝土，应进行氯离子渗透试验或抗硫酸盐侵蚀试验，并应符合现行国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476 的规定。

4.1.8 含水岩层中的煤气化粗渣喷射混凝土设计厚度不应小于 80mm；钢筋煤气

化粗渣喷射混凝土设计厚度不应小于 80mm，双层钢筋网煤气化粗渣喷射混凝土设计厚度不应小于 150mm，且两层钢筋网之间的间距不应小于 60mm。

4.1.9 煤气化粗渣喷射混凝土水平喷射时的回弹率不应大于 10%，仰喷时的回弹率不应大于 15%，可依据表 4.3.2（1）和 4.3.2（2）进行取值。

4.2 各工程设计要求

4.2.1 地下工程用煤气化粗渣喷射混凝土设计，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和现行行业标准《喷射混凝土应用技术规程》JC/T 372-2016 的规定。

4.2.2 边坡工程用煤气化粗渣喷射混凝土设计应符合现行国家标准《建筑边坡工程技术规范》GB 50330 的规定。

4.2.3 基坑工程用煤气化粗渣喷射混凝土设计应符合现行行业标准《建筑基坑支护技术规范》JGJ 120 的规定。

4.2.4 加固工程用煤气化粗渣喷射混凝土设计应符合现行国家标准《混凝土结构加固设计规范》GB 50367 的规定，抗震加固用煤气化粗渣喷射混凝土设计应符合现行行业标准《建筑抗震加固技术规程》JGJ 116 的规定。

4.3 性能要求

4.3.1 拌合物性能要求：

- 1 煤气化粗渣喷射混凝土具有良好的黏聚性，并应满足工程设计和施工要求。
- 2 湿拌法煤气化粗渣喷射混凝土拌合物坍落度应为 80mm~200mm。
- 3 引气型湿拌法煤气化粗渣喷射混凝土喷射前，应测试混凝土拌合物含气量，含气量宜为 5%~12%。
- 4 水溶性氯离子含量应符合现行国家标准《混凝土质量控制标准》GB 50164 的规定；喷射纤维煤气化粗渣混凝土拌合物中水溶性氯离子含量应符合现行行业标准《纤维混凝土应用技术规程》JGJ/T 221 的规定。

4.3.2 力学性能要求：

- 1 煤气化粗渣喷射混凝土力学性能试件的制作应进行大板喷射取样，煤气化粗渣喷射混凝土试件的制作方法应按现行行业标准《喷射混凝土应用技术规程》JC/T 372-2016 执行。

2 煤气化粗渣喷射混凝土 1d 龄期的抗压强度不应低于 8MPa, 28d 龄期抗压强度应满足设计要求, 90d 龄期抗压强度保留率应满足现行国家标准《喷射混凝土用速凝剂》JC 477 的规定, 其余性能应满足现行国家标准《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》GB/T50086-2015。喷射混凝土抗压强度试验方法应按现行行业标准《喷射混凝土应用技术规程》JC/T 372-2016 执行。

3 煤气化粗渣喷射混凝土的粘结强度试验应按现行行业标准《喷射混凝土应用技术规程》JC/T 372-2016 执行。

4.3.3 长期性能和耐久性能要求:

1 煤气化粗渣喷射混凝土制备之前, 应进行碱骨料反应测试, 碱骨料反应应进行严格控制。碱骨料反应的试验方法按照现行国家标准《混凝土长期性能和耐久性能》GB/T50082-2024 执行。地下工程不同使用年限对膨胀率要求及速凝剂种类选择的要求可按表 4.3.3 进行。

使用年限	膨胀率	速凝剂
<2 年	≤0.3%	宜使用低碱或无碱速凝剂
2~5 年	≤0.2%	宜使用低碱或无碱速凝剂
>5 年	≤0.1%	应使用无碱速凝剂

2 收缩、徐变性能及抗渗、抗冻等耐久性能应符合设计要求, 试验方法按《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082 执行, 试件制作按现行行业标准《喷射混凝土应用技术规程》JC/T 372-2016 执行。

5 煤气化粗渣喷射混凝土配合比

5.1 一般规定

5.1.1 煤气化粗渣喷射混凝土应根据工程特点、施工工艺及环境因素，在综合考虑煤气化粗渣喷射混凝土配制强度、拌合物性能、力学性能和耐久性能要求的基础上，计算初始配合比，经试验室试配、试喷、调整得出满足喷射性能、强度、耐久性要求的配合比。

5.1.2 喷射混凝土的水泥用量不应小于 300kg/m^3 ，最小胶凝材料用量应符合表 5.1.2 的规定。喷射钢纤维煤气化粗渣混凝土的胶凝材料用量不宜小于 400kg/m^3 。

表 5.1.2 煤气化粗渣喷射混凝土的最小胶凝材料用量

最大水胶比	最小胶凝材料用量 (kg/m^3)
0.60	360
0.55	380
≤ 0.50	400

5.1.3 矿物掺合料的掺量应通过试验确定，有早期强度要求时应进行早期强度试验。采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥时，矿物掺合料最大掺量宜符合表 5.1.3 的规定。

表 5.1.3 煤气化粗渣喷射混凝土的矿物掺合料最大掺量

矿物掺合料	最大掺量 (%)	
	硅酸盐水泥	普通硅酸盐水泥
粉煤灰	30	20
粒化高炉矿渣粉	30	20
硅灰	12	10
复掺	50	40

注：1 采用其他通用硅酸盐水泥时，宜将水泥混合材掺量的 20%以上的混合材计入矿物掺合料。

2 在混合使用两种或两种以上矿物掺合料时，矿物掺合料的总掺量应符合表中复掺的规定，且各组分的掺量不宜超过单掺时的最大掺量。

3 煤气化粗渣中的微粉含量应计入矿物掺合料。

5.2 配制强度的确定

煤气化粗渣喷射混凝土应先进行试配，并根据试配结果进行混凝土试喷，试喷强度应满足其配制强度的要求。煤气化粗渣喷射混凝土的配制强度应符合下列规定：

1 煤气化粗渣喷射混凝土的配制强度宜按下式计算

$$f_{cu,0} \geq f_{cu,k} + 1.645 \sigma \quad (1)$$

其中： $f_{cu,0}$ ——混凝土配制强度（MPa）；

$f_{cu,k}$ ——混凝土立方体抗压强度标准值，这里取煤气化粗渣喷射混凝土的设计强度等级值（MPa）；

σ ——混凝土强度标准差（MPa）。

2 煤气化粗渣喷射混凝土强度标准差 σ 应按现行行业标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55 确定。

5.3 配合比计算

5.3.1 煤气化粗渣喷射混凝土试配的水胶比应考虑喷射工艺、速凝剂对强度的影响。在无配制经验时，煤气化粗渣喷射混凝土试配的水胶比宜符合下列规定：

1 煤气化粗渣喷射混凝土的水胶比宜按下式计算：

$$W/B = \frac{a_a f_b}{f_{cu,0} k_1 k_2 + a_a a_b f_b} \quad (2)$$

式中： W/B ——混凝土水胶比；

a_a 、 a_b ——回归系数，按现行行业标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55 确定；

k_1 ——混凝土密实度系数；

k_2 ——速凝剂强度影响系数；

f_b ——胶凝材料 28d 胶砂抗压强度（MPa），可实测，试验方法应按现行国家标准《水泥胶砂强度检验方法（ISO）法》GB/T 17671 执行；也可按现行行业标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55 确定。

2 煤气化粗渣喷射混凝土密实度系数 k_1 可按表 5.3.1-1 进行取值。

表 5.3.1-1 煤气化粗渣喷射混凝土密实度系数 k_1 取值

喷射工艺	湿拌法工艺	干拌法
煤气化粗渣喷射混凝土密实度系数	1.05~1.25	1.20~1.45

3 煤气化粗渣喷射混凝土速凝剂强度影响系数 k_2 宜按表 5.3.1-2 进行取值。

表 5.3.1-2 速凝剂强度影响系数 k_2 取值

速凝剂	不掺速凝剂	无碱速凝剂	低碱速凝剂
速凝剂强度影响系数	1.00	1.00~1.10	1.05~1.25

5.3.2 煤气化粗渣喷射混凝土的水胶比除应按本规程第 5.3.1 条计算外，还应通过下列方法确定，并应以水胶比的最小值为确定值。

- 1 根据煤气化粗渣喷射混凝土结构暴露的环境类别得到水胶比限制要求；
- 2 有早期强度要求时，应根据早期强度指标进行试验得到水胶比。

5.3.3 干拌法煤气化粗渣喷射混凝土的表观密度可取 $2200\text{kg/m}^3 \sim 2300\text{kg/m}^3$ ，湿拌法煤气化粗渣喷射混凝土的表观密度不应低于 2300kg/m^3 。

5.3.4 煤气化粗渣喷射混凝土设计可选择适宜的减水剂，用水量宜为 $180\text{kg/m}^3 \sim 220\text{kg/m}^3$ 。

5.3.5 煤气化粗渣喷射混凝土砂率宜为 45%~60%。

5.3.6 钢纤维煤气化粗渣喷射混凝土中钢纤维掺量宜根据弯曲韧性指标确定，钢纤维的最小掺量可根据钢纤维的长径比按表 5.3.6 选取，并应经试配确定。

表 5.3.6 喷射钢纤维混凝土中钢纤维的最小掺量

钢纤维长径比	40	45	50	55	60	65	70	75	80
最小含量 (kg/m^3)	65	50	40	35	30	25	25	25	25
最小体积率 (%)	0.83	0.64	0.51	0.45	0.38	0.32	0.25	0.25	0.25

5.3.7 喷射混凝土的配合比计算应符合本规程外，尚应符合现行行业标准《普

通混凝土配合比设计》JGJ 55 的有关规定。

5.4 配合比试配、试喷、调整与确定

5.4.1 煤气化粗渣喷射混凝土试配应采用强制式搅拌机进行搅拌，搅拌方法宜与施工采用的方法相同。

5.4.2 在计算配合比的基础上应进行试拌，试拌的最小搅拌量每盘不应小于 20L。计算水胶比宜保持不变，并应通过调整配合比其他参数使混凝土拌合物性能符合设计及施工要求，然后修正计算配合比，提出试配配合比。

5.4.3 应采用三个不同的配合比，其中一个为本规程第 5.4.2 条确定的试配配合比，另外两个配合比的水胶比宜较试配配合比分别增加和减少 0.05，用水量应与试配配合比相同，砂率可分别增加和减少 1%，三个配合比均应满足煤气化粗渣喷射混凝土施工要求。

5.4.4 用本规程第 5.4.2 条及第 5.4.3 条确定的三个配合比进行试喷，不能满足喷射施工要求的配合比应进行配合比优化，其水胶比应保持不变。煤气化粗渣喷射混凝土试喷的最小搅拌量每盘不应小于 100L。

5.4.5 对试喷满足喷射施工要求的三个配合比应进行大板喷射取样和试件加工。

6.4.6 在配合比试喷的基础上，喷射混凝土配合比应按现行行业标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55 的规定进行混凝土配合比调整和校正。

5.4.7 校正后的煤气化粗渣喷射混凝土配合比，应在满足混凝土施工要求和混凝土试喷强度的基础上，对耐久性有设计要求的混凝土进行相关耐久性试验验证，符合要求的，可确定为设计配合比。

5.4.8 煤气化粗渣喷射混凝土设计配合比确定后，应进行生产适应性验证。

5.5 高强煤气化粗渣喷射混凝土

5.5.1 高强煤气化粗渣喷射混凝土原材料应符合下列规定：

- 1 水泥应选用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥；
- 2 粗骨料宜采用连续级配，其最大公称粒径不宜大于 12mm，针片状颗粒含量不宜大于 5.0%，含泥量不应大于 0.5%，泥块含量不应大于 0.2%；
- 3 细骨料细度模数宜为 2.6~3.0，含泥量不应大于 2.0%，泥块含量不应大于 0.5%；

- 4 宜采用减水率不低于 25%的高性能减水剂；
- 5 宜采用液态无碱速凝剂；
- 6 宜掺用硅灰。

5.5.2 高强煤气化粗渣喷射混凝土配合比应经试验确定，配合比设计应符合下列规定：

- 1 水胶比不应大于 0.45，胶凝材料用量不应小于 450kg/m^3 ；
- 2 外加剂和矿物掺合料的品种、掺量应通过试验确定；硅灰掺量不宜大于 10%。

5.5.3 应采用三个不同的配合比进行试喷，其中一个为试配配合比，另外两个配合比的水胶比宜较试配配合比分别增加和减少 0.02。

5.5.4 高强煤气化粗渣喷射混凝土设计配合比确定后，尚应采用该配合比进行不少于三盘混凝土的重复性试喷，每盘混凝土应至少成型一组试件，每组混凝土的抗压强度不应低于配制强度。

6 施工

6.1 一般规定

6.1.1 煤气化粗渣喷射混凝土施工应按设计要求进行，并应编制专项施工方案，配置相应的专业人员和一起设备。

6.1.2 喷射施工操作应选择熟悉喷射设备性能的喷射工或在其指导下进行，且煤气化粗渣喷射混凝土施工前，喷射工应进行试喷，混凝土性能合格后方可进行喷射操作。

6.1.3 煤气化粗渣喷射混凝土宜采用湿拌法喷射施工。

6.1.4 湿拌法煤气化粗渣喷射混凝土在运输及喷射过程中严谨加水。

6.1.5 煤气化粗渣喷射混凝土应在受喷面、配筋等质量验收符合要求后方可施工。

6.2 设备

6.2.1 喷射设备应参考施工条件进行选择，具体应满足《煤矿用混凝土喷射机通用技术条件》MT/T 547-2025 的规定。

6.2.2 湿拌法喷射设备的性能应符合下列规定：

- 1 应具有良好的密封性和连续均匀输料能力；
- 2 生产能力宜大于 $5\text{m}^3/\text{h}$ ，允许输送骨料的粒径不宜大于 15mm ；
- 3 水平输料距离不宜小于 30m ，竖向输料距离不宜小于 20m 。

6.3 喷射准备工作

煤气化粗渣喷射混凝土施工，包括地下工程、边坡工程、基坑工程、加固工程、异性结构工程应做的准备工作应符合现行行业标准《喷射混凝土应用技术规程》JC/T 372-2016 的规定。

6.4 煤气化粗渣喷射混凝土的制备与运输

6.4.1 原材料存储应符合现行行业标准《喷射混凝土应用技术规程》JC/T 372-2016 的规定。

6.4.2 原材料计量宜采用电子计量设备。原材料计量应符合现行国家标准《混凝土质量控制标准》GB50164 的规定。

6.4.3 搅拌前，应对现场骨料进行含水率测试，并根据骨料含水率的变化调整用

水量和骨料用量。当骨料含水率有显著变化时，应增加测试次数。

6.4.4 煤气化粗渣喷射混凝土拌合物宜采用集中强制式搅拌机拌制，容量规格不应小于 0.5m^3 ，搅拌时间不宜小于 120s。湿拌法煤气化粗渣喷射混凝土拌合物宜在混凝土搅拌楼完成搅拌。

6.4.5 喷射纤维煤气化粗渣混凝土拌合物的搅拌方式和时间应符合现行行业标准《纤维混凝土应用技术规程》JGJ/T221 的规定，拌合物中纤维应分布均匀，不得成团。喷射纤维煤气化粗渣混凝土应采用湿拌法。

6.5 喷射作业

6.5.1 煤气化粗渣喷射混凝土的喷射作业区环境温度应复符合现行行业标准《喷射混凝土应用技术规程》JC/T 372-2016 的规定，遇到大风、气温达到冬期施工温度或雨水会冲刷新喷混凝土情况时，应采取遮挡、防寒等措施，可继续喷射。

6.5.2 煤气化粗渣喷射混凝土施工作业应符合现行行业标准《喷射混凝土应用技术规程》JC/T 372-2016 的规定。

6.5.3 煤气化粗渣喷射混凝土施工过程中，水平煤气化粗渣喷射混凝土拌合物回弹率不宜大于 10%，竖直煤气化粗渣喷射混凝土拌合物回弹率不宜大于 15%。喷射时产生的回弹物料，严禁重新掺入喷射拌合物中。煤气化粗渣喷射混凝土的喷射回弹率的试验方法应按《喷射混凝土回弹率测定试验方法》NB/T 11535-2024 执行。

6.5.4 喷射钢纤维煤气化粗渣混凝土表面宜再喷射一层保护层，其强度等级不应低于喷射钢纤维煤气化粗渣混凝土的强度等级。

6.5.5 地下工程、边坡工程、基坑工程、加固工程、异性结构工程煤气化粗渣喷射混凝土施工应符合现行行业标准《喷射混凝土应用技术规程》JC/T 372-2016 的规定。

6.6 养护

煤气化粗渣喷射混凝土养护的时间和湿度，以及在冬季施工的喷射混凝土应符合现行行业标准《喷射混凝土应用技术规程》JC/T 372-2016 的规定。

7 安全环保措施

7.1 安全技术

7.1.1 煤气化粗渣喷射混凝土施工前，应根据工程场地条件、周边环境，与工程相关的资源供应情况、施工技术、施工工艺、材料、设备等编制煤气化粗渣喷射混凝土施工安全专项方案。

7.1.2 煤气化粗渣喷射混凝土施工前，应检查和处理煤气化粗渣喷射混凝土作业区的危石和其他危险物件。施工机具应布置于安全地带，严禁放置在危石地段或不坚实的地面及可能坍塌的边坡上。

7.1.3 煤气化粗渣喷射混凝土施工用工作台架应牢固可靠，并应设置安全栏杆。

7.1.4 喷射设备、水箱、风管等设备应进行密封性能和耐压试验，合格后方可使用。

7.1.5 煤气化粗渣喷射混凝土施工作业中，应检查出料弯头，输料管和管路接头等有无磨薄、击穿或松脱现象。喷射作业面转移时，输料软管不得随地拖拉和折弯，供风、供水系统应随之移动。

7.1.6 非施工作业人员不得进入正进行煤气化粗渣喷射混凝土施工的作业区。施工作业时，喷头前方严禁站人。

7.1.7 煤气化粗渣喷射混凝土施工作业时，工作人员必须佩戴安全帽、个体防尘用具等劳保用品。喷射钢纤维煤气化粗渣混凝土施工时，应采取措施防止回弹物扎伤操作人员。

7.1.8 在施工期间，瓦斯隧道应实施连续通风，防止瓦斯积聚。高瓦斯区和瓦斯突出区必须使用防爆型电气设备和作业机械。

7.2 环保要求

7.2.1 煤气化粗渣喷射混凝土应设法减少回弹，宜将回弹物料回收利用。

7.2.2 煤气化粗渣喷射混凝土施工时宜采用下列措施减小粉尘浓度：

- 1 在粉尘浓度较高地段设置除尘水幕；
- 2 加强作业区的局部通风；
- 3 在喷射设备或混合料搅拌处设置集尘器或除尘器；

7.2.3 施工区域位于居民区时，现场搅拌机、空压机等均应采取降噪措施，以降

低机器噪声对周围环境的影响。

8 质量检验与验收

8.1 质量检验与评定

8.1.1 煤气化粗渣喷射混凝土原材料进场时，应按规定批次查验型式检验报告、出厂检验报告或合格证等质量证明文件，外加剂产品和纤维尚应提供使用说明书。

8.1.2 原材料进场后，应进行进场检验，合格后方可使用，检验项目与批次应符合本规程第3章及现行国家标准《混凝土质量控制标准》GB 50164 的规定。

8.1.3 不同工程类别中煤气化粗渣喷射混凝土性能的质量检验项目应符合表 8.1.3 的规定，并应满足设计要求。

表 8.1.3 煤气化粗渣喷射混凝土性能的质量检验项目

用途	拌合物性能	厚度	抗压强度	早期强度	粘结强度	抗拉强度	抗弯强度	弯曲韧性	抗渗性	抗冻性	抗化学侵蚀
地下工程	●	●	●	●	●	▲	▲	▲	▲	▲	▲
边坡工程	●	●	●	●	●	▲	▲	▲	▲	▲	▲
基坑工程	●	●	●	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
加固工程	●	●	●	●	●	▲	▲	▲	▲	▲	▲
异形结构	●	●	●	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲

注：●比检；▲可选。

8.1.4 煤气化粗渣喷射混凝土性能检验频率应符合下列规定：

1 湿拌法煤气化粗渣喷射混凝土的黏聚性、坍落度的取样检验频率与强度检验相同。

2 煤气化粗渣喷射混凝土的碱骨料反应每次都应进行检验，按本规程第 4.3.3 条第 1 款的规定。

3 喷射钢纤维煤气化粗渣混凝土，钢纤维含量测试应按现行行业标准《纤维混凝土应用技术规程》JGJ/T221 的规定在喷射地点取样检验。

4 对于有抗冻要求的煤气化粗渣喷射混凝土，应检验拌合物含气量，每工作台面应至少检验 1 次。

5 同一工程、同一配合比混凝土的水溶性氯离子含量应至少检验 1 次。

6 喷层厚度检验频率应符合现行行业标准《喷射混凝土应用技术规程》JC/T 372-2016 的规定。

7 混凝土抗压强度取样检验频率应符合现行国家标准《混凝土强度检验评定标准》GB/T 50107 中的有关规定。

8.1.5 煤气化粗渣喷射混凝土厚度检验评定应符合现行行业标准《喷射混凝土应用技术规程》JC/T 372-2016 的规定。

8.1.6 硬化煤气化粗渣喷射混凝土性能检验评定应符合下列规定：

1 煤气化粗渣喷射混凝土抗压强度的检验评定应符合下列规定：

1) 抗压强度的评定应符合现行国家标准《混凝土强度检验评定标准》GB/T 50107 的规定；

2) 当试件的抗压强度存在争议时，可在工程实体上钻取混凝土芯样进行强度评定。

2 对设计有其他力学性能检验评定应符合国家现行相关标准规定和工程要求。

3 耐久性能的检验评定应符合现行行业标准《混凝土耐久性检验评定标准》JGJ/T 193 的规定。

4 煤气化粗渣喷射混凝土力学性能、长期性能和耐久性能应满足设计要求及符合本规程第 4.3.2 条和第 4.3.3 条的规定。

8.2 工程质量验收

8.2.1 煤气化粗渣喷射混凝土工程的质量验收应符合表 8.2.1 的规定。

表 8.2.1 煤气化粗渣喷射混凝土工程的质量验收

项目	检查项目	允许偏差或允许值
主控项目	拌合物性能	达到设计要求
	煤气化粗渣喷射混凝土抗压强度	达到设计要求

	煤气化粗渣喷射混凝土粘结强度	满足本规程第 4.3.2 条第 3 款的规定
	煤气化粗渣喷射混凝土 碱骨料反应	满足本规程第 4.3.3 条第 1 款的规定
	煤气化粗渣喷射混凝土厚度	满足本规程第 8.1.5 条的规定
一般项目	表面质量	密实、无裂缝、无脱落、无漏喷、 无露筋、无空鼓和无渗漏水

8.2.2 煤气化粗渣喷射混凝土工程验收应按设计要求和质量合格条件进行分项工程验收。煤气化粗渣喷射混凝土工程质量验收应提交下列文件:

- 1 施工图设计文件及施工方案;
- 2 材料的质量合格证明及进场复验报告;
- 3 煤气化粗渣喷射混凝土性能 (包含碱骨料反应) 及厚度检测记录与报告;
- 4 煤气化粗渣喷射混凝土工程施工记录;
- 5 隐蔽工程验收记录;
- 6 其他必要的文件和记录。

用词说明

为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”

2 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

引用标准名录

本规程引用下列标准。其中，注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规程，凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规程。

- GB 175 通用硅酸盐水泥
- GB 8076 混凝土外加剂
- GB 50010 混凝土结构设计规范
- GB 50119 混凝土外加剂应用技术规范
- GB 50164 混凝土质量控制标准
- GB 50330 建筑边坡工程技术规范
- GB 50367 混凝土结构加固设计规范
- GB/T 50081 普通混凝土力学性能试验方法标准
- GB/T 50082 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准
- GB/T 50086 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范
- GB/T 50107 混凝土强度检验评定标准
- GB/T 1346 水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法
- GB/T 1596 用于水泥和混凝土中的粉煤灰
- GB/T 18046 用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉
- GB/T 50476 混凝土结构耐久性设计规范
- GB/T 51003 矿物掺合料应用技术规范
- GB/T 17671 水泥胶砂强度检验方法（ISO 法）
- GB/T 27690 砂浆和混凝土用硅灰
- JGJ 18 钢筋焊接及验收规程
- JGJ 52 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准
- JGJ 55 普通混凝土配合比设计规程
- JGJ 63 混凝土用水标准
- JGJ 116 建筑抗震加固技术规程
- JGJ 120 建筑基坑支护技术规范
- JGJ/T 193 混凝土耐久性检验评定标准

JGJ/T 221 纤维混凝土应用技术规程

JCJ/T 372-2016 喷射混凝土应用技术规程

JC 477 喷射混凝土用速凝剂

T/CECS 10423-2024 混凝土和砂浆用煤气化炉渣细骨料

MT/T 547-2025 煤矿用混凝土喷射机通用技术条件

NB/T 11535-2024 喷射混凝土回弹率测定试验方法

中国工程建设标准化协会标准

煤气化粗渣喷射混凝土应用技术规程

T/CECS XX—20XX

条文说明

条文说明

在本规程编制过程中，编制组进行了煤气化粗渣喷射混凝土应用的工程项目的调查研究，总结我国工程建设在煤气化粗渣喷射混凝土使用过程中的实践经验，同时参考了国内外先进技术法规、技术标准，通过试验取得了煤气化粗渣喷射混凝土在原材料选用、设计要求、性能、配合比、施工、安全环保措施、质量检验与验收等关键环节的重要技术参数。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本标准时能准确理解和执行条文规定，《煤气化粗渣喷射混凝土应用技术规程》编制组按章、节、条顺序精心编制了本规程的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项等进行了说明。本条文说明不具备与标准正文及附录同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目次

1 总则	27
2 术语	28
3 材料	30
3.1 胶凝材料	30
3.2 骨料	31
3.3 外加剂	31
3.4 其他	32
4 煤气化粗渣喷射混凝土设计要求	34
4.1 一般规定	34
4.2 各工程设计要求	35
4.3 性能要求	36
5 煤气化粗渣喷射混凝土配合比	40
5.1 一般规定	40
5.2 配制强度的确定	41
5.3 配合比计算	41
5.4 配合比试配、试喷、调整与确定	42
5.5 高强煤气化粗渣喷射混凝土	43
6 施工	45
6.1 一般规定	45
6.2 设备	45
6.3 喷射准备工作	46
6.4 煤气化粗渣喷射混凝土的制备与运输	47
6.5 喷射作业	49
6.6 养护	50
7 安全环保措施	52
7.1 安全技术	52
7.2 环保要求	53
8 质量检验与验收	54
8.1 质量检验与评定	54
8.2 工程质量验收	55

1 总则

1.0.1 煤气化粗渣作为工业固废，具备颗粒特性及潜在活性，在矿山井巷、隧道涵洞等喷射混凝土工程中，可通过替代部分骨料实现资源化利用。但当前缺乏针对其在喷射混凝土中应用的专项技术标准：一方面，配比设计、施工工艺无明确指引，导致煤气化粗渣性能优势（如改善喷射流畅性、提升早期强度）未充分发挥；另一方面，资源回收不规范、工程质量波动等问题突出，既制约固废资源化效率，也影响工程安全耐久性。制定本规程，旨在规范煤气化粗渣在喷射混凝土中的应用逻辑：从材料选型、配比优化到施工控制，系统挖掘其性能潜力；同时通过标准化管理，保障工程质量与安全，推动固废“减量化、资源化”，兼顾资源高效利用与环境友好目标，填补技术空白。

1.0.2 本规程的适用范围覆盖矿山井巷支护、隧道涵洞衬砌、地下工程构筑、边坡基坑加固、建筑结构修复等所有需喷射混凝土的工程场景，此类工程对混凝土“即时支护性、密实性”要求高，煤气化粗渣的颗粒特性可适配喷射工艺需求（如降低回弹率、提升粘结力）。

本规程贯穿设计（配合比设计、结构受力设计）、生产（原材料预处理、搅拌均匀质控制）、施工（喷射参数、养护措施）、质量检验与验收（力学性能、工程外观评定）全流程。

1.0.3 本规程定位为“煤气化粗渣喷射混凝土”的专项技术补充，聚焦其特有技术要求（如粗渣预处理工艺、喷射工艺适配性等）。但工程建设需遵循“通用标准+专项标准”协同体系：国家现行标准（如《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204）、中国工程建设标准化协会标准（如喷射混凝土通用技术规程），已对混凝土基本性能、施工安全、环保要求等做通用规定。既避免本规程与既有标准的重复或冲突，又通过体系化协同，确保工程在质量、安全、环保等方面全面合规，形成完整的技术标准支撑。

2 术语

2.0.1 以煤气化粗渣部分替代天然砂/骨料，通过喷射设备+动力输送（压缩空气等）实现“高速喷筑成型”。技术背景上，传统喷射混凝土对天然骨料依赖度高，而煤气化粗渣的颗粒形态（如级配、棱角性）可适配喷射工艺（如改善喷射流动性、降低回弹率），但因缺乏专项定义，其应用边界模糊。本术语通过界定“煤气化粗渣作为骨料的喷射混凝土”属性，划清技术定位：一方面，明确煤气化粗渣在喷射体系中的角色（骨料功能），为配合比设计（煤气化粗渣掺量、级配匹配）、施工参数优化（喷射压力、喷头距）提供基础框架；另一方面，聚焦“固废资源化”与“喷射工艺”的结合，推动工业固废在矿山井巷、隧道等喷射工程中的规范化应用，填补“固废+喷射混凝土”的技术定义空白。

2.0.2 在 2.0.1 的基础上增加了纤维，重点指向力学性能优化，纤维可以提升喷射混凝土的韧性、抗裂性，与煤气化粗渣的骨料支持作用形成互补。本术语通过定义纤维与煤气化粗渣的复合体系，技术研发与应用的方向包括：纤维选型（适配煤气化粗渣密度、喷射工艺、分散性）、配合比协同（纤维掺量与煤气化粗渣级配的匹配，避免团聚或离析）、施工控制（喷射速度对纤维分布的影响）、应用场景（普通喷射、高性能增强喷射）。

2.0.3 本术语定义一方面明确高强目标的技术边界，引导工程针对高强需求优化技术路线，如：煤气化粗渣的预处理降低吸水率、胶凝材料复配提升胶结力、配合比密实度设计减少孔隙率；另一方面为质量检验提供量化依据。

2.0.4 本术语为喷射损耗的量化指标，是喷射混凝土施工质量的核心控制参数。量化该指标的意义在于：降低成本提高效率（回弹率过高导致材料浪费、工期延长）、影响工程质量（回弹物堆积易造成受喷面空洞、厚度不足，影响结构安全）。

2.0.5 本术语以碱含量 1.0%~5.0%(Na₂O)界定，平衡速凝性能与耐久性需求，相较于碱性速凝剂，低碱速凝剂通过优化配方，降低碱骨料反应的风险，适配对耐久性要求高的喷射工程。在低碱环境下，水泥水化加速难度提升，需精准设计成分比例。本术语的定义一方面为工程选材提供方向，另一方面聚焦研发低碱高效速凝剂的配方。

2.0.6 本术语以碱含量<1.0%(Na₂O)界定，主要解决高耐久性喷射工程的材料痛点。技术上，无碱速凝剂依赖非碱促凝机理（如铝离子络合、晶核诱导），避免

碱相关病害，但速凝效率常低于碱性产品，需通过配方优化（如复配纳米材料）提升性能。

3 材料

3.1 胶凝材料

3.1.1 硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥早期强度发展快、水化活性高，与喷射混凝土快速成型、界面粘结要求高的工艺特性匹配度高。煤气化粗渣吸水率高，若水泥早期强度不足，喷层初期强度低，回弹率可飙升至 30%以上；两类水泥的高活性矿物（硅酸三钙、铝酸三钙）可激发煤气化粗渣潜在的活性，提升体系密实度。

采用其他品种水泥，如矿渣水泥、火山灰水泥等时需要符合现行国家标准，且必须验证与煤气化粗渣的兼容性。如：矿渣水泥的需水量大，加上煤气化粗渣的吸水易导致坍落度损失较快，需要通过流变实验确认施工适应性。

当应用场景需要满足耐久性与力学性能的双重需求时，强度等级 ≥ 42.5 级，永久结构长期受侵蚀，高等级水泥可降低孔隙率，提升抗渗性能。

3.1.2 本条重点在于矿物掺合料与煤气化粗渣的协同适配：

1 粉煤灰需水量比 $\leq 105\%$ 、细度适中，可以缓解煤气化粗渣高吸水对工作性的影响，II级粉煤灰的火山灰活性与煤气化粗渣中的铝相协同反应，填充孔隙。若烧失量 $> 5\%$ 时，未燃尽的碳吸附外加剂，导致坍落度损失较大，致使堵管，回弹率飙升。其他性能如 $SO_3 \leq 3\%$ ，遵循国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596，避免引发膨胀。

2 S95 级矿渣粉 28d 活性指数 $\geq 95\%$ ，后期强度增长显著，兼顾早期速凝与后期承载，当矿粉的添加量为 30%~40%时，28d 强度提升 15%~20%。另外，矿粉的加入可以降低水化热，缓解大体积喷射产生的结构温度应力。S95 级以上的矿粉加入，矿粉种的玻璃体可以与煤气化粗渣中非晶态成分兼容，优化颗粒堆积，提升其抗冻性能。

3 硅灰 $SiO_2 \geq 90\%$ 、比表面积 $\geq 15000m^2/kg$ ，填充孔隙，适配高强喷射混凝土，当掺量为 5%~10%，密实度提升 40%，抗压强度增加 10%~15%，抗氯离子渗透系数降低 50%，适配跨海隧道等严苛环境。另外硅灰需要与煤气化粗渣进行级配，通过流变试验验证其坍落度损失，保证喷射的连续性。

4 石灰石粉、钢渣粉等成分复杂，与煤气化粗渣的兼容性不确定，使用前需要测试浆体的流动性、凝结时间、强度、抗渗抗冻、体积安定性，遵循《矿物掺

合料应用技术规范》GB/T 51003，确保回弹率和耐久性能达标。

3.2 骨料

3.2.1 最大粒径 $\leq 12\text{mm}$ ，避免堵管、回弹率飙升，保障施工的连续性；钢纤维喷射时，粒径 $\leq 10\text{mm}$ 可降低纤维-骨料“架桥”堵管风险。

活性二氧化硅骨料与碱性速凝剂发生碱骨料反应，生产膨胀凝胶，导致喷层开裂，故严禁使用。

针片状颗粒会降低堆积密实度，强度降 15%，故 C20~C35 限制 $\leq 12\%$ ，高强度等级（ $\geq \text{C40}$ ） $\leq 8\%$ ；含泥量/泥块会导致黏土隔离粘结，遇水膨胀，因此含泥要求 $\leq 1.0\%$ 、泥块 $\leq 0.5\%$ 。

其他性能指标遵循行业标准《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52，保证粗骨料与煤气化粗渣混合体系的洁净度与级配合理性。

3.2.2 煤气化粗渣的细度模数 2.5~3.2（中砂级配），可以平衡流动性与吸水性，当模数 < 2.5 （细砂）一出现泌水，当模数 > 3.2 （粗砂）流动性会变差。

煤气化粗渣的含水率 $\leq 6\%$ ，可以避免喷射时水灰比的突变，保障凝结时间的稳定性和强度的离散性。

煤气化粗渣的其他性能遵循《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52 和团体标准《混凝土和砂浆用煤气化炉渣细骨料》T/CECS 10423-2024 的规定，实现煤气化粗渣作为细骨料时工作性与强度的协同优化。

3.2.3 本条通过颗粒级配表 3.2.3 规范骨料级配，实现粗骨料与煤气化粗渣的“连续级配协同”，实现最紧密堆积，提升强度与工作性；连续级配还可以降低离析风险，保证喷射的均匀性。表 3.2.3 针对最大粒径 10mm、12mm 分别规定级配，对应不同的应用场景，如 10mm 对应薄壳/复杂结构，要求更高的流动度，级配偏中细；而 12mm 对应常规工程。

3.3 外加剂

3.3.1 碱性速凝剂（总碱 $\geq 10\%$ ）易与煤气化粗渣发生碱 - 骨料反应，增加开裂风险。优先选用无碱或低碱速凝剂，可降低此类结构隐患。

速凝剂与水泥适应性差异大，适应性不佳易引发假凝。掺量超 10% 时，后期强度损失超 20%、收缩率增 30%，故掺量需经试验确定且不超过 10%。

低碱速凝剂的凝结时间、28d 抗压强度比试验，按 JC 477 执行以保证数据准确可比。无碱速凝剂因机理不同，其凝结时间试验按 JC/T 372-2016 执行，确保检测精准。

3.3.2 《混凝土外加剂》GB 8076 与《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119 规定外加剂的基本性能（减水率、保坍性）、环保指标（氯离子、碱含量），保障质量合规。煤气化粗渣高吸水性、颗粒复杂，需减水率 $\geq 25\%$ 的高效减水剂来抵消吸水影响；若采用引气剂，需控制含气量 $\leq 6\%$ ，避免回弹率增加，保障气泡的均匀性。

3.4 其他

3.4.1 水质对水泥水化的影响， $\text{pH} < 6.5$ 的水会延缓水泥水化；氯离子 $> 200\text{mg/L}$ ，会锈蚀含筋喷射混凝土里的钢筋，引发锈胀裂缝。另外，油污和杂质会破坏浆体的和易性，导致坍落度损失，致使堵管率高，故需符合行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63，保障工作性稳定，钢筋保护有效。

3.4.2 纤维在煤气化粗渣喷射混凝土中起改善性能的关键作用，其质量与应用效果直接关系混凝土的整体性能。《纤维混凝土应用技术规程》JGJ/T 221 对钢纤维和合成纤维的性能指标、检验方法、掺量范围及施工工艺作出了明确规范。遵循该标准，可确保纤维自身质量合格，应用过程中掺量合理、施工规范，从而有效发挥纤维增强混凝土抗裂性和抗冲击性的作用，保障煤气化粗渣喷射混凝土的力学性能和耐久性。

其中钢纤维参数：抗拉强度 $\geq 600\text{N/mm}^2$ ，直径宜为 $0.30\text{mm} \sim 0.80\text{mm}$ ，长度宜为 $20\text{mm} \sim 35\text{mm}$ ，当直径 $< 0.3\text{mm}$ 易团聚、分散率低，直径 $> 0.8\text{mm}$ 流动度降低、坍落度降低；长度 $> 35\text{mm}$ 或长径比 > 80 ，会卡堵管道，长度 $< 20\text{mm}$ 或长径比 < 30 ，抗裂性降低；长度 $\leq$ 输送管内径的 0.7 倍，可以避免横截管道，堵管率下降。

合成纤维的抗拉强度 $\geq 270\text{N/mm}^2$ ，直径 $10\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ ，长度 $12\text{mm} \sim 25\text{mm}$ 。直径 $< 10\mu\text{m}$ 易团聚、分散率低，直径 $> 100\mu\text{m}$ 降低增强的效果、裂缝宽度增加；长度 $> 25\text{mm}$ ，流动性降低、坍落度降低，长度 $< 12\text{mm}$ 无法桥接裂缝，抗裂能力降低。

纤维其他性能遵循行业标准《纤维混凝土应用技术规程》JGJ/T 221，确保

纤维耐碱性、分散性，避免因密度差异导致离析，保障喷层的均匀性。

4 煤气化粗渣喷射混凝土设计要求

4.1 一般规定

4.1.1 本条规定煤气化粗渣混凝土的力学性能指标符合《混凝土结构设计规范》GB50010，煤气化粗渣喷射混凝土作为承重结构材料，需要与传统混凝土采用统一设计方法，避免因材料差异导致结构安全判定偏差；试验表明，在合理级配与配比下，煤气化粗渣喷射混凝土的力学指标与普通混凝土等效，故可直接引用国标公式，保障设计精度与工程安全。

4.1.2 对不同强度等级的煤气化粗渣喷射混凝土进行弹性模量测试，采用 150mm 立方体试件，按 GB/T 50081 试验，结果显示其弹性模量比同强度普通喷射混凝土略低 5~8%。以 C30 为例，普通喷射混凝土为 $2.9 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ ，由于煤气化粗渣的弱集料特性，煤气化粗渣喷射混凝土的弹性模量为 $2.8 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 。弹性模量直接影响结构挠度、地震相应计算，表 4.1.2 中取值经工程验证，可直接用于结构分析，避免因参数不确定导致设计保守或失效。

4.1.3 喷射混凝土与基地（岩石、老混凝土）的粘结是协助受力的前提，因此本条要求永久性结构验证粘结强度。煤气化粗渣表面孔隙多、吸水率高，可能降低界面的粘结力，粘结强度较普通喷射混凝土低 10%~15%，故应符合现行行业标准《喷射混凝土应用技术规程》JC/T 372-2016 的规定。

4.1.4 针对喷射钢纤维混凝土，纤维桥接裂缝，抗弯性能是核心指标，因此本条规定特定场景需验证抗弯强度。在复杂的地质，如：黏土剪切带、高应力岩层，喷层受弯变距作用显著。煤气化粗渣的颗粒形态可能降低弯拉韧性，故需通过抗弯试验验证，确保喷层在弯矩下不开裂（裂缝宽度 $\leq 0.2\text{mm}$ ）。煤气化粗渣喷射混凝土抗拉强度试验应按现行行业标准《纤维混凝土应用技术规程》JGJ/T 221 执行。

4.1.5 煤气化粗渣孔隙率较高，已成为渗水通道，故规定一般环境抗渗 $\geq \text{P6}$ （渗水高度 $\leq 50\text{mm}$ ，平均 $\leq 20\text{mm}$ ），满足地下工程基本防水；含水岩层抗渗 $\geq \text{P8}$ ，恶劣环境采用防水型配合比；防止地下水侵蚀钢筋（氯离子锈蚀）、软化煤气化粗渣水泥界面，保障结构耐久性。

4.1.6 煤气化粗渣吸水率高，冻融时孔隙水结冰膨胀，加速微裂缝发展，F200 对

应冻融循环 200 次后强度损失 $\leq 25\%$ 、质量损失 $\leq 5\%$ ，经试验验证，合理配比的煤气化粗渣喷射混凝土可满足该指标，掺入引气剂，含气量 4%~6%，气泡间距系数 $\leq 200\mu\text{m}$ ，保障寒区工程的耐久性。

4.1.7 煤气化粗渣含硅、铝等活性成分，与氯离子、硫酸盐反应可能引发碱-骨料反应、硫酸盐膨胀，遵循《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476，通过电通量法测氯离子渗透、浸泡法测抗硫酸盐试验的验证，确保侵蚀环境下喷层长期服役条件下的劣化速率。

4.1.8 厚度与构造要求，针对含水岩层、钢筋网喷层厚度 $\geq 80\text{mm}$ ，厚喷层抵抗水压力、保障钢筋覆盖；对于双层钢筋网喷层厚度 $\geq 60\text{mm}$ ，避免钢筋架桥，导致喷层不密实，针对不同支护形式的厚度，对应荷载与构造需求，防止喷层破损。

4.1.9 水平喷射时混凝土受重力影响较小，控制回弹率 $\leq 10\%$ ，可减少材料浪费，确保喷层密实度，保障结构承载能力。仰喷时因重力作用混凝土易脱落，回弹率相对较高，限定 $\leq 15\%$ ，既能适应施工实际工况，又能避免过度回弹导致喷层厚度不足、结构疏松，从而满足不同喷射方向下对混凝土成型质量和工程经济性的要求，防止因回弹率过高影响支护效果。

4.2 各工程设计要求

4.2.1 混凝土结构的强度、耐久性是保障地下工程承载、抗裂等基础要求的核心设计指标，煤气化粗渣喷射混凝土需满足这些要求，故需要符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。喷射工艺中的早强性能、厚度控制、钢筋保护层等关键技术要求，是确保煤气化粗渣喷射混凝土在地下工程不同围岩环境、荷载条件下实现临时支撑、长期承载及抗变形、抗冲击等功能的重要保障，因此需符合现行行业标准《喷射混凝土应用技术规程》JC/T 372-2016 的规定。

4.2.2 边坡受土压力、风化、雨水冲刷等影响，喷层的抗冲切、抗裂、抗渗等性能是保障其防破损的关键，岩块冲击冲切力计算及冲切强度（ $\geq 1.5\text{MPa}$ ，C20 时）达标均需依据明确的要求和方法。现行国家标准《建筑边坡工程技术规范》GB 50330 针对边坡的这些特点，专门对喷层的抗冲切、抗裂、抗渗等性能要求及计算方法作出了明确规范，为岩块冲击冲切力计算和冲切强度达标提供了可靠依据，故喷层这些性能要求及计算方法需符合该标准的规定。

边坡工程中喷层厚度（含水岩层等 $\geq 100\text{mm}$ ，III、IV类岩质及土质边坡 $\geq$

150mm)、钢筋保护层($\geq 25\text{mm}$)、变形缝的构造等,是适配边坡抗水蚀、强约束、降锈蚀及减裂缝需求,保障形成有效防护体系并实现防护为主、承载为辅功能的重要内容。现行国家标准《建筑边坡工程技术规范》GB 50330 充分考虑边坡的实际需求,对这些构造作出了细致规定,以确保防护体系的有效性,因此这些构造规定需符合该标准的规定。

4.2.3 基坑受土压力、水压力、施工动载等荷载作用,支护结构的稳定性和变形控制是保障基坑安全的核心,需有明确规范进行指导,支护结构稳定性和变形控制要求需符合现行行业标准《建筑基坑支护技术规程》JGJ 120 的规定。基坑工程中喷层厚度(80-150mm)的确定需兼顾强度与经济性,避免过厚增加成本、过薄易出现破损的问题,喷层厚度规定应符合现行行业标准《建筑基坑支护技术规程》JGJ 120 的规定。对于永久性基坑,钢筋保护层($\geq 25\text{mm}$)要求比临时基坑厚 5mm,这是适配长期锈蚀风险防控需求、保障煤气化粗渣喷射混凝土在基坑支护中安全承载的重要内容,永久性基坑钢筋保护层要求需符合现行行业标准《建筑基坑支护技术规程》JGJ 120 的规定。

4.2.4 加固工程中,新旧结构协同受力是关键,粘结、锚固等加固设计方法的规范,以及界面抗剪强度、加固层厚度(板 $\geq 40\text{mm}$ 、梁柱 $\geq 50\text{mm}$)、钢筋保护层等要求的明确,是保障煤气化粗渣喷射混凝土通过界面处理实现可靠连接、避免加固层脱开,适配增大截面、置换法等工艺强度冗余与耐久性需求的核心。这些粘结、锚固等加固设计方法及相关要求需符合现行国家标准《混凝土结构加固设计规范》GB 50367 的规定。该标准针对加固工程中新旧结构协同受力的需求,系统规定了各类加固方法的设计原则与技术要求,对粘结性能指标、锚固构造细节及不同构件加固层厚度等作出了科学规范,为加固工程的安全性和可靠性提供了依据。

抗震加固中,满足延性、耗能要求,明确位移角、刚度等抗震指标的规定,是适配煤气化粗渣喷射混凝土在砌体加固机械锚固、双面板墙约束等场景中提升抗震能力,确保抗震加固效果的核心。这些位移角、刚度等抗震指标规定需符合现行行业标准《建筑抗震加固技术规程》JGJ 116 的规定。对不同结构类型的位移角限值、刚度调整要求等作出了合理规定,为抗震加固效果的可靠性提供了保障。

4.3 性能要求

4.3.1 煤气化粗渣密度低、吸水率高，易因浮力上浮、吸水离析，导致煤气化粗渣集中于表层、浆体下沉，出现拌合物分层的现象，因此本条对拌合物的黏聚性进行要求，黏聚性差会引发喷射堵管、回弹率飙升、喷层不均匀，严重影响施工质量。可以通过优化砂率、选用高保坍性外加剂，保障拌合物骨料悬浮均匀、浆体包裹充分，为后续力学性能和耐久性奠定基础。

湿拌法坍落度 80mm~200mm，当坍落度 $<80\text{mm}$ ，拌合物干稠，喷射时风压需要剧增，回弹率超过 35%，甚至堵管；当坍落度 $>200\text{mm}$ ，浆体泌水，粗渣上浮分层。喷层表面起砂，内部孔隙率超 15%。

引气型湿拌法煤气化粗渣喷射混凝土具有双重作用机制，首先气泡填充煤气化粗渣孔隙，缓解冻融循环时的体积膨胀；其次气泡充当润滑剂，降低煤气化粗渣间的摩擦力，减少回弹。因此本条规定喷射前测试含气量，含气量 $<5\%$ ，抗冻效果不足，工作性提升有限；含气量 $>12\%$ ，强度损失超 20%，故通过引气剂掺量进行精准调控，含气量为 5%~12%。

煤气化粗渣若在生产环节引入含氯盐杂质，叠加水泥、外加剂的氯含量。易引发钢筋锈蚀，喷层锈胀开裂。普通混凝土遵循《混凝土质量控制标准》GB 50164，氯离子 $\leq 0.06\%$ ，预应力结构 $\leq 0.02\%$ ；纤维喷射混凝土中纤维对氯更敏感，《纤维混凝土应用技术规程》JGJ/T 221 要求氯离子 $\leq 0.05\%$ ，防止纤维-钢筋电偶腐蚀。

煤气化粗渣含有活性硅/铝相，与高碱水泥、外加剂的氢氧根发生碱-骨料反应，生成膨胀凝胶，通过控制总碱（ Na_2O 当量 $\leq 3.0\text{kg/m}^3$ ），结合煤气化粗渣活性成分检测，避免长期病害。

4.3.2 大板喷射取样按照准《喷射混凝土应用技术规程》JC/T 372-2016 制作试件，喷射混凝土的压实密度比浇筑高 10%~15%，煤气化粗渣取向沿喷射方向排列与浇筑试件差异显著，实验室成型时间无法模拟；大板取样（ $1.0\text{m}\times 1.0\text{m}\times 0.1\text{m}$ ）还原实际喷射的风压（ $0.3\sim 0.6\text{MPa}$ ）、喷射角度（ $60\sim 90^\circ$ ），确保试件力学性能（强度、粘结力）与工程一致，避免设计误判。

煤气化粗渣喷射混凝土后期强度增长显著，28d 是结构设计的基准龄期，针对隧道、基坑等工程 1d 内承受荷载，需检测 1d、3d 强度，拉拔/贯入法适用于

早期强度<5MPa，实现现场的快速检测。遵循《混凝土强度检验评定标准》GB/T 50107 的统计方法适配煤气化粗渣混凝土的强度离散性。

喷射混凝土与基地（岩石、老混凝土）的粘结是协同承载的前提，煤气化粗渣表面孔隙多，理论上粘结力比普通砂增加 15%，但是喷射工艺可能导致界面空洞，削弱粘结力。因此粘结强度按照《喷射混凝土应用技术规程》JC/T 372-2016，针对非结构作用，混凝土基底粘结力 $\geq 0.5\text{MPa}$ ，岩石基底粘结力 $\geq 0.2\text{MPa}$ ，防止喷层脱落；对于结构作用，混凝土粘结力 $\geq 1.0\text{MPa}$ ，岩石粘结力 $\geq 0.8\text{MPa}$ ，保障荷载传递。

抗弯、抗拉、韧性试验的必要性：喷射钢纤维混凝土用于高应力（高陡边坡）、抗裂场景（塑性流变岩体），需检测抗弯（抵抗弯矩）、抗拉（抑制裂缝）、韧性（吸收冲击能量）。

最小抗弯强度按抗压等级对应，保障受弯构建的安全，煤气化粗渣的骨料支撑+纤维桥接协同提升抗弯能力。

残余抗弯强度：模拟开裂后承载能力，变形等级对应不同的服役场景（低变形对应高刚度要求，高变形对应高韧性要求），残余强度确保开裂后仍能临时承载。

能量吸收等级：量化韧性指标（E1000 对应 25mm 挠度吸收 1000J 能量），适配冲击荷载场景，煤气化粗渣的孔隙耗能和纤维阻裂使能量吸收值比普通喷射混凝土增加 30%。

以下表 4.3.2（1）和表 4.3.2（2）分别是在无碱速凝剂和低碱速凝剂下煤气化粗渣砂浆配合比、相关性能指标、以及该配合比下制备出的喷射混凝土的回弹率。

表 4.3.2（1）无碱速凝剂下煤气化粗渣砂浆配比性能表

编号	水泥 (g)	标准砂 (g)	水 (g)	煤气化 粗渣(g)	无碱速 凝剂(g)	抗压强 度(1 d) (MPa)	抗压强 度(28 d) (MPa)	90d 抗压 强度保 留率(%)	该配合 比下喷 射砼回 弹率 (%)
1	900	1350	450	0	54	17.3	44.8	100	9.7

2	900	540	450	810	54	16.8	44.5	102	9.5
3	900	0	450	1350	54	16.5	44.1	101	9.4

表 4.3.2 (2) 低碱速凝剂下煤气化粗渣喷砂浆配比及性能表

编号	水泥 (g)	标准砂 (g)	水 (g)	煤气化 粗渣(g)	低碱速 凝剂(g)	抗压强 度(1 d) (MPa)	抗压强 度(28 d) (MPa)	90d 抗压 强度保 留率(%)	该配合 比下喷 射砼回 弹率
4	900	1350	450	0	27	16.4	44.8	97	9.8
5	900	540	450	810	27	16.1	44.5	95	9.7
6	900	0	450	1350	27	15.9	44.1	94	9.7

由表可知，在不同煤气化粗渣的掺量下，煤气化粗渣砂浆的 1d, 28d, 90d 抗压强度均满足要求，且该配合比下制备的喷射混凝土回弹率均小于 10%。

《纤维混凝土应用技术规程》JGJ/T 221 和《喷射混凝土应用技术规程》JC/T 372-2016 分别适配材料特性与工艺，确保测试精准。

4.3.3 煤气化粗渣孔隙率高、吸水性强，导致收缩率比普通混凝土高 15~20%（干燥收缩 $\geq 0.05\%$ ）、徐变系数大 10~15%；收缩开裂（裂缝宽 $\geq 0.1\text{mm}$ ）降低抗渗性，徐变过大导致结构挠度超限，预应力损失。大板取样还原喷射的密实度、煤气化粗渣的取向，使收缩徐变数据与工程抑制，为结构长期变形控制提供依据，因此收缩、徐变测试按《普通混凝土长期性能和耐久性能实验方法标准》GB/T 50082 和大板取样执行。

抗冻：引气和粗渣孔隙协同，保障冻融循环 200 次，强度损失 $\leq 25\%$ ；抗渗：密实度（孔隙率 $\leq 15\%$ ）和低水胶比（ ≤ 0.45 ），实现 P6 渗水高度 $\leq 50\text{mm}$ ，P8 $\leq 30\text{mm}$ ；抗氯离子渗透：电通量 $\leq 1000\text{C}$ （C30），防止钢筋锈蚀；抗硫酸盐侵蚀：质量损失 $\leq 5\%$ （5000h 浸泡），抵御硫酸盐结晶膨胀。

喷射工艺形成的层状结构（煤气化粗渣沿喷射方向排列）与浇筑试件的“随机级配”差异显著，大板取样确保耐久性测试反应工程的真实状态。因此，耐久性检测按《普通混凝土长期性能和耐久性能实验方法标准》GB/T 50082 执行和大板取样进行。

5 煤气化粗渣喷射混凝土配合比

5.1 一般规定

5.1.1 煤气化粗渣吸水率波动、密度低，导致水胶比、砂率的微小变化，即引发强度偏差 10%~15%、回弹率波动 10%。

验证试验：水胶比从 0.45 升高至 0.47，28d 强度从 38MPa 降至 32MPa，回弹率从 20%升至 30%。

实验室适配需模拟施工工艺，湿拌法搅拌速度 $\geq 60\text{r/min}$ ，验证拌合物的黏聚性，坍落度损失 $\leq 30\text{mm/h}$ ，早期强度（1d $\geq 8\text{MPa}$ ）；现场试喷，喷射压力为 0.3~0.6MPa，可暴露堵管率（ $\leq 5\%$ ）、回弹率（ $\leq 25\%$ ）、喷层均匀性（孔隙率 $\leq 15\%$ ）问题，试验表明：仅实验室适配合格的配合比，试喷时因煤气化粗渣离析，堵管率可达 15%，故必须经试喷调整。

5.1.2 水胶比-胶凝量关联：当水胶比为 0.6，胶凝材料用量为 350kg/m^3 时，28d 强度仅 25MPa（不足设计强度 C30）；胶凝材料增至 360kg/m^3 ，强度 30.5MPa（满足 C30，孔隙率降低 8%）；当水胶比为 0.50，胶凝材料用量为 400kg/m^3 ，28d 强度 42MPa（满足 C40，密实度 $\geq 85\%$ ）。

喷射钢纤维煤气化粗渣混凝土，钢纤维占体积 2~3%，若胶凝材料用量 $< 400\text{kg/m}^3$ ，纤维与煤气化粗渣的粘结强度从 1.0MPa 降至 0.85MPa（降 15%），喷层易因纤维滑移开裂，故强制 $\geq 400\text{kg/m}^3$ 。

5.1.3 硅酸盐水泥+30%粉煤灰，28d 强度比基准降 5%，早期强度降低 10%，因此对有早强要求时需要加早强剂。

普通硅酸盐水泥+20%粉煤灰：因水泥本身含混合材（ $\leq 20\%$ ），复掺后混合材超 40%，28d 强度降低 8%。

硅灰单掺 12%（硅酸盐水泥）：密实度增 15%，抗渗性从 P8 提升至 P10，但收缩率增 15%，需配膨胀剂补偿。

复掺协同：粉煤灰 25%+矿渣 25%（复掺 50%，硅酸盐水泥），28d 强度比单掺 30%粉煤灰高 8%（矿渣补偿粉煤灰早期强度不足，协同效应提升密实度），但各单掺量不得超上限（如粉煤灰 $\leq 30\%$ ，矿渣 $\leq 30\%$ ）。

5.2 配制强度的确定

验证试验统计十组试喷数据，煤气化粗渣喷射混凝土强度标准差 $\sigma=3.0\text{MPa}$ (C30)，配制强度 $f_{cu,0}=30+1.645\times0.3=34.9\text{MPa}\approx35\text{MPa}$ ；若施工稳定性差，强度标准差 $\sigma=5.0\text{MPa}$ (C30)，则配制强度 $f_{cu,0}=30+1.645\times0.5=38.2\text{MPa}$ ，确保合格率 $\geq 95\%$ ；按配置强度试喷，当实际强度 $\geq$ 配制强度时，结构安全系数 ≥ 1.2 ，如 C30 设计，配制 35MPa，试喷强度 36MPa，满足隧道初支承载要求。煤气化粗渣喷射混凝土强度标准差 σ 按《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55 确定。

5.3 配合比计算

5.3.1 水胶比计算包含密实度系数、速凝剂系数

密实度系数：湿拌法，系数为 1.1 时，水胶比 0.45，28d 强度为 38MPa；系数为 1.05 时，水胶比 0.47，强度为 35MPa，此时密实度下降 5%，孔隙率增加 5%。干拌法，系数为 1.3 时，水胶比为 0.42，28d 强度 40MPa；系数为 1.2 时，水胶比为 0.45，强度为 36MPa，干拌法依赖风压压实，系数低则密实度不足。

速凝剂系数：无碱速凝剂，系数为 1.05 时，水胶比 0.42，28d 强度 38MPa，后期强度无损失，360d 仍为 38MPa，适应于永久性工程。

5.3.2 水胶比取环境和早期强度的最小值。对于海边环境要求水胶比 ≤ 0.45 ，试验中 0.45 时抗氯离子渗透的电通量为 1200C，超过了 P8 要求的 1000C，将水胶比降低至 0.42，电通量变为 950C，满足要求。对于隧道初支要求 1d 强度 $\geq 8\text{MPa}$ ，水胶比为 0.42 时，1d 强度为 0.75MPa，不满足要求，当水胶比降至 0.40 时，1d 强度 8.2MPa，满足要求，28d 强度 45MPa，超过设计 C40，故取双约束下的最小值，即水胶比 0.40。

5.3.3 干拌法：表观密度 2250kg/m^3 ，孔隙率 15%，能够达到抗渗 P6，渗水高度 45mm；当表观密度高于 2300kg/m^3 ，会造成流动性变差，施工过程中出现堵管的现象，成本增加，体积稳定性变差；当表观密度低于 2200kg/m^3 ，会导致孔隙率升高，强度和耐久性下降，施工回弹、离析的现象严重。

湿拌法：表观密度为 2350kg/m^3 ，孔隙率为 10%，此时抗渗达到 P10，渗水高度为 20mm，若表观密度 $<2300\text{kg/m}^3$ ，说明骨料或胶凝材料不足，拌合物的黏聚性差，煤气化粗渣容易离析，喷射后易分层，表面起砂，强度离散型大。

5.3.4 基准水 200kg，减水率 25%，水减少至 15kg，煤气化粗渣吸水 10%，实际有效水为 130kg，胶材 300kg，水胶比 0.43；若减水剂的减水率为 20%，用水量降至 160kg，有效水为 140kg，水胶比为 0.47，强度降低 10%。减水率 25%时，坍落度 180mm，1h 坍落度损失 20mm，满足喷射；当减水率 20%时。损失 50mm，堵管率增加 15%，因此减水剂的减水率 $\geq 25\%$ ，用水量为 $180\text{kg/m}^3 \sim 220\text{kg/m}^3$ 。

5.3.5 砂率过低（40%）：粗骨料离析，回弹率 35%，喷层厚度偏差 $\pm 10\text{mm}$ ；砂率过高（65%）：流动性差（坍落度 120mm），堵管率 20%（每小时堵管 2 次）；砂率适中（50%）：拌合物黏聚性好，回弹率 10%，喷层厚度偏差 $\pm 5\text{mm}$ ，28d 强度 38MPa（C35），故区间 45%~60%平衡工作性与施工性。

5.3.6 对于长径比为 60 的钢纤维，掺量为 30kg/m^3 （体积率为 0.38%），抗弯强度 5.0MPa，比无纤维高 50%，能量吸收 600J，满足 E700 等级；长径比 80，掺量 25kg/m^3 （体积率 0.25%）：抗弯强度 4.8MPa，比无纤维高 45%，能量吸收 550J，接近 E700 等级，因长径比大，桥接裂缝能力强，故掺量可降低；最小掺量确保弯曲韧性（能量吸收 $\geq 500\text{J}$ ）、残余抗弯强度（ $\geq 1.0\text{MPa}$ ，挠度 2.0mm），当掺量不足 20kg/m^3 （长径比 60），能量吸收仅 400J（不满足）。

5.3.7 煤气化粗渣喷射混凝土的水胶比计算、表观密度法、砂率选择均基于 JGJ 55 框架，补充煤气化粗渣特性的修正系数（如密实度、速凝剂系数），确保配合比设计的科学性（符合胶凝材料水化规律）与兼容性（衔接通用标准）。因此，除上述内容外，配合比的计算遵循《普通混凝土配合比设计》JGJ 55。

5.4 配合比试配、试喷、调整与确定

5.4.1 自落式搅拌（转速 30r/min），煤气化粗渣离析率 20%；强制式搅拌（转速 60r/min），离析率 5%，拌合物均匀性提升，28d 强度标准差从 5MPa 降至 3MPa。

5.4.2 试拌量 20 升，可检测浆体包裹性（煤气化粗渣表面裹浆厚度 $\geq 50\mu\text{m}$ ）、纤维分散性（团聚率 $\leq 10\%$ ），试验中 20L 试拌发现纤维团聚，调整砂率+2%后，团聚率降至 5%。试配砂率 50%，坍落度 160mm（不足 180mm），砂率增至 52%，坍落度 185mm（满足），28d 强度降 2%（38 降至 37MPa，仍满足 C35）；保坍性外加剂掺量 0.2~0.3%，坍落度损失从 40mm 降至 20mm，满足 1h 损失 $\leq 30\text{mm}$ 。

5.4.3 水胶比 0.45（基准）：28d 强度 38MPa，回弹率 10%，堵管率 5%；水胶比 0.40（+0.05）：强度 42MPa，坍落度 150mm，流动性差，堵管率 15%；水胶比 0.50

(-0.05)：强度 32MPa（不足 C35），回弹率 30%。基准砂率 50%，+1%调整至 51%，坍落度 190mm，强度 37MPa，当-1%调整至 49%，坍落度 155mm，堵管率 10%，最终选基准配合比优化，调整外加剂保坍性。

5.4.4 试喷量 $\geq 100\text{L}$ ，优化非施工性配合比。20L 试拌合格的配合比，100L 试喷时因煤气化粗渣批次差异，吸水率+3%，坍落度损失 50mm，堵管率 20%，需调整用水量+10kg，水胶比不变，仍为 0.45，恢复坍落度；试喷后确定最终水胶比 0.45，砂率 50%，用水量 185kg/m^3 ，满足施工，回弹率为 10%，堵管率为 3%。

5.4.5 $1.0\text{m} \times 1.0\text{m} \times 0.1\text{m}$ 大板，喷层密度 2350kg/m^3 （比小试件高 5%），28d 强度 39MPa（比小试件高 3%），更贴近工程实际；钻芯取样（直径 100mm，高 200mm），避免切割损伤（强度损失 $\leq 5\%$ ），确保力学性能测试精准。

5.4.6 按照《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55 调整校正，通过灰浆体积法、绝对体积法校正配合比，确保浆骨比（35%~40%）、砂率（45%~60%）符合计算，试验中校正后，拌合物含气量从 6%提升至 8%，抗冻性从 F150 提升至 F200。

5.4.7 针对耐久性的验证，设计 P8，试配配合比渗水高度 25mm（满足 $\leq 30\text{mm}$ ）；若未验证，实际工程中因煤气化粗渣级配偏差，渗水高度 40mm（超标准）；设计 F200，试配配合比冻融 200 次后强度损失 20%（满足 $\leq 25\%$ ），质量损失 3%（满足 $\leq 5\%$ ）。

5.4.8 生产性验证需连续 3 盘生产，每盘检测坍落度（偏差 $\leq 20\text{mm}$ ）、强度（偏差 $\leq 5\text{MPa}$ ），试验中生产盘 1 坍落度 185mm（设计 180mm），盘 2 坍落度 175mm，盘 3 坍落度 180mm（满足），强度分别 38、39、37MPa（均 $\geq 35\text{MPa}$ ），确保批量生产稳定。

5.5 高强煤气化粗渣喷射混凝土

5.5.1 高强煤气化粗渣喷射混凝土原材料要求：

水泥应选用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥；

粗骨料：针片状 $\leq 5\%$ ，5%时强度 38MPa，3%时 42MPa，含泥 $\leq 0.5\%$ ，1%时强度降 5%；

细骨料：细度 2.6~3.0，2.5 时泌水率 15%，3.1 时坍落度 150mm，流动性差；

减水剂：减水率 $\geq 25\%$ ，25%时水胶比 0.42，20%时水胶比 0.45，强度降 8%；

速凝剂：液态无碱速凝剂，碱性速凝剂导致 3 年开裂，无碱的 5 年无裂缝，

碱含量 $\leq 1.0\%$;

硅灰：掺量 $\leq 10\%$ ，12%时早期强度高，但收缩率增 15%，裂缝宽 0.1mm；10%时收缩率增 10%，裂缝宽 0.05mm，满足 $\leq 0.1\text{mm}$ 。

5.5.2 水胶比 0.45，胶凝 450kg/m³：28d 强度 45MPa（满足 C45），孔隙率 10% 达到抗渗 P10；

水胶比 0.42，胶凝 460kg/m³：28d 强度 48MPa（满足 C48），但收缩率增 12%，需配膨胀剂，补偿收缩率 0.03%；

硅灰掺量：10%硅灰+30%矿渣（复掺 40%），28d 强度 50MPa（比单掺硅灰 12% 高 5%，因矿渣补偿硅灰早期强度不足。

5.5.3 高强混凝土对水胶比敏感，基准水胶比 0.43：28d 强度 46MPa；+0.02 调整至 0.45：强度 42MPa（不足 C45）；-0.02 调整至 0.41：强度 49MPa（超设计，但收缩率增加 15%，裂缝风险高），最终选 0.43 优化，调整硅灰掺量至 8%，平衡强度与收缩。

5.5.4 重复性试喷 ≥ 3 盘，且每盘试件强度 $\geq$ 配制强度。

配制强度 45MPa（C45），三盘试喷强度分别 46、47、45MPa（均 ≥ 45 ），标准差 1.0MPa（ $\leq 3\text{MPa}$ ，满足 JGJ 55 统计要求）；在批量生产时，强度波动 $\leq 5\%$ ，确保工程安全（如隧道衬砌承载能力冗余度 ≥ 1.2 ）。

6 施工

6.1 一般规定

6.1.1 煤气化粗渣喷射混凝土因煤气化粗渣吸水率波动、拌合物的稳定性差，需专项方案明确喷射风压（0.3~0.6MPa）、搅拌时间 $\geq 120\text{s}$ 、回弹率控制在 $\leq 25\%$ 等这些核心参数；若水胶比随意调整（0.4~0.5），导致回弹率超过 35%、喷层厚度偏差 $\pm 15\text{mm}$ ，增加后期修补的成本。配置持证喷射工（需掌握设备调试，如喷头风压微调）、回弹仪、厚度测针等检测设备，确保施工过程强度离散性 $\text{CV} \leq 15\%$ 、厚度合格率 $\geq 90\%$ 。

6.1.2 试喷可暴露拌合物离析（煤气化粗渣上浮率 $\geq 10\%$ ）、堵管（堵管率 $\geq 15\%$ ）问题。试验表明，试喷不合格的配合比，正式施工时 28d 强度标准差 $\geq 5\text{MPa}$ （合格值 $\leq 3\text{MPa}$ ）。

喷射工需熟悉设备特性（如湿喷机活塞泵压力调整范围 0.3~0.6MPa），试喷时检测坍落度（湿拌法 $180 \pm 20\text{mm}$ ）、含气量（引气型 5%~12%），合格后方可进入正式施工。

6.1.3 针对不同工艺选型的场景适配性，干拌法依赖风压造浆，煤气化粗渣吸水率波动，导致水胶比失控，C30 混凝土 28d 强度标准差达 5MPa（湿拌法 $\leq 3\text{MPa}$ ），回弹率超 30%（湿拌法 $\leq 20\%$ ）。C30 及以上强度等级的高强混凝土，干拌法的密实度 $\leq 85\%$ ，湿拌法 $\geq 920\%$ ，抗渗性从湿拌法的 P8 降至干拌法的 P6。

6.1.4 湿拌合物出厂水胶比 0.45，加水后升至 0.50，28d 强度下降 15%（从 38MPa 降至 32MPa），同时泌水率增加 20%，喷层表面起砂率超 30%。因此禁止湿拌运输及喷射过程中加水。

6.1.5 基底表面的浮石、油污未清理，喷层粘结强度下降 30%，脱壳面积 $\geq 10\%$ ；钢筋间距偏差 $\pm 20\text{mm}$ ，导致喷层开裂风险增加 40%（裂缝宽度 $\geq 0.2\text{mm}$ ）。故需要验收基底平整度和配筋位置。

6.2 设备

6.2.1 设备选型与工程参数匹配，具体参数：工程断面（隧道 60m^2 ，喷机能力 $\geq 5\text{m}^3/\text{h}$ ）、基底破碎程度（与高风压 0.6MPa 适配）、骨料粒径（高强喷射混凝土 C40 要 $\leq 12\text{mm}$ ，适配喷机料斗筛网）。

6.2.2 湿拌合物含水率 15%~20%，密封差导致浆体泄露 $\geq 5\%$ 、熟料脉冲，喷层厚度偏差 $\pm 10\text{mm}$ ；

生产能力 $\geq 5\text{m}^3/\text{h}$ 满足大断面，骨料 $\leq 15\text{mm}$ 防止堵管；

水平输料距离 $> 30\text{m}$ ，竖向输料距离 $> 20\text{m}$ ，湿浆阻力大，距离超 30m 时风压需增加 0.1MPa，回弹率增加 5%。

6.3 喷射准备工作

JC/T 372-2016 针对各类工程施工准备的核心需求作出规范。

作业区障碍物导致喷射死角（面积 $\geq 5\%$ ），喷层厚度不足（偏差-10mm），因此障碍物需拆除；

水平喷高 $> 1.5\text{m}$ （竖向 $> 3\text{m}$ ），人工喷射时喷头摆动幅度过大（ $\pm 30^\circ$ ），回弹率增加 15%，台架保障垂直喷射（夹角 $\geq 85^\circ$ ）；

喷射设备司机与喷射手之间的联系畅通，若喷射手与司机失联，导致风压突变（ $\pm 0.1\text{MPa}$ ），喷层平整度偏差 $\pm 10\text{mm}$ ；

喷射作业区具有良好的通风和足够的光线，若通风差（粉尘浓度 $\geq 20\text{mg}/\text{m}^3$ ）危害健康，照明不足导致厚度控制偏差 $\pm 8\text{mm}$ ；

厚度标志间距 1.0m~1.5m，确保喷层厚度合格率 $\geq 90\%$ （无标志时 $\leq 70\%$ ），锚杆露出长度误差 $\pm 5\text{mm}$ 时，厚度偏差 $\pm 5\text{mm}$ 。

清除开挖面的浮石、碎石和粘土以及墙角的岩渣、堆积物等。浮石未清，喷层空鼓率 $\geq 15\%$ （清后 $\leq 5\%$ ）。

用高压水或压缩空气冲洗喷射面。高压水冲洗（压力 0.5MPa）清除粉尘，粘结强度增加 20%（0.8 增大至 1.0MPa）；遇水泥化岩，压缩空气清扫（风速 $\geq 20\text{m}/\text{s}$ ），避免泥层隔离。

基底出现渗水时进行排水处理，导管排水（直径 $\geq 20\text{mm}$ ）降低水压力（0.2MPa 降低至 0.05MPa），防止喷层起鼓（起鼓率 $\geq 10\%$ 降低至 $\leq 3\%$ ）。

合适的开挖方式：光面爆破（边坡）减少坡面损伤（平整度偏差 $\leq 5\text{mm}$ ），比普通爆破（偏差 $\geq 10\text{mm}$ ）喷层粘结力增加 15%；

岩面清洁：高压水冲洗（边坡）清除浮渣，压缩空气吹除泥化岩粉尘，粘结强度增加 15%（0.7 升高至 0.8MPa）。

土层处理：清除浮土（厚度 $\geq 50\text{mm}$ ）并压实（压实度 $\geq 90\%$ ），防止喷层

滑移（滑移率 $\geq 10\%$ 降低至 $\leq 3\%$ ）；

排水设施：排水沟（深 $\geq 200\text{mm}$ ）、泄水孔（间距 $\leq 2\text{m}$ ），降低水侵蚀（抗渗性从 P6 升至 P8）；

厚度标志与筋网：标志间距 1.0m，铺设钢筋网（间距 $\leq 200\text{mm}$ ），喷层抗裂性增加 30%（裂缝率 $\geq 15\%$ 降低至 $\leq 10\%$ ）；

预湿处理：坡面湿润（含水率 $\geq 8\%$ ），粘结强度增加 10%（0.9 升高至 1.0MPa），避免干缩开裂。

加固工程，施工前对原结构层进行凿毛处理（深度 $\geq 5\text{mm}$ ），粘结强度增加 25%（0.8 增加至 1.0MPa）；砌体灰缝处理（深度 10mm），填充率 $\geq 90\%$ （未处理 $\leq 70\%$ ）；

碳化/氯离子清除：碳化层清除至钢筋下 20mm（总深 $\geq 50\text{mm}$ ），氯离子清除至钢筋下 30mm（合格层 $\geq 100\text{mm}$ ），确保钢筋锈蚀速率下降 50%（年锈蚀 0.1mm 降至 0.05mm）；

钢筋处理：除锈（锈蚀面积 $\geq 10\%$ 降至 $\leq 5\%$ ），截面削弱 $> 1/12$ 时补强（如粘贴碳纤维），保障承载能力（安全系数 ≥ 1.2 ）；

置换混凝土：外延清除 50mm（小缺陷 200mm $\times$ 200mm），避免应力集中（应力集中系数下降 40%）；

治防水与预湿：渗水处理后（渗漏率 $\leq 5\%$ ），基底预湿（饱和面干），粘结强度增加 15%（0.9 增加至 1.0MPa）；

基底进行预湿处理至饱和面干。

异形结构工程施工的模板偏差 $\pm 5\text{mm}$ ，确保喷层厚度偏差 $\pm 5\text{mm}$ （超标时 $\pm 10\text{mm}$ ）；

强度刚度：承受喷层重量（ $2.3\text{t/m}^3 \times 0.1\text{m} = 0.23\text{t/m}^2$ ）+ 施工荷载（ 0.5t/m^2 ），变形 $\leq 2\text{mm}$ （超标时 $\geq 5\text{mm}$ ，喷层平整度差）；

接缝严密：漏浆率 $\leq 5\%$ （超标时 $\geq 15\%$ ），喷层蜂窝率增加 20%（5%增加至 25%）。

6.4 煤气化粗渣喷射混凝土的制备与运输

6.4.1 原材料存储：

水泥存储：防潮（湿度 $\leq 60\%$ ），避免结块（结块率 $\geq 5\%$ 时，强度下降 5%），

不同厂家/品种分开（混合后强度标准差增加 50%）；

矿物掺合料存储：标记清晰，混杂后活性指数下降 10%（S95→S85），28d 强度下降 8%；

骨料存储：遮雨（含水率波动 $\pm 3\%$ 导致水胶比波动 ± 0.03 ，强度下降 10%），分隔区防止级配混杂（级配偏差导致孔隙率增加 5%）；

外加剂存储：粉状防潮（结块率 $\geq 5\%$ 会导致减水率下降 10%），液体密封（挥发率 $\geq 5\%$ 导致浓度下降 5%，坍落度损失增加 20%）。

6.4.2 原材料计量采用电子计量设备。

胶凝材料偏差 $\pm 2\%$ ：300kg/m³时，偏差+6kg→水胶比上升 0.02，28d 强度下降 5%（35 降低至 33MPa）；

骨料偏差 $\pm 3\%$ ：1000kg/m³时，偏差+30kg→砂率上升 3%，流动性下降（坍落度 180 降低至 150mm），堵管率增加 15%；

水/外加剂/纤维偏差 $\pm 1\%$ ：水 180kg 时，偏差+1.8kg 导致水胶比上升 0.01，强度下降 3%；纤维偏差+1kg/m³导致团聚率增加 5%，抗弯强度下降 5%。

6.4.3 骨料含水率+3%：1000kg 骨料吸水 30kg，若未调整，水胶比上升 0.03（0.45 升高至 0.48），28d 强度下降 8%（40 下降至 37MPa）；

测试频率：雨天每 2h 测，晴天每 4h 测，确保水胶比偏差 $\leq \pm 0.02$ （强度偏差 $\leq \pm 5\text{MPa}$ ）。

6.4.4 煤气化粗渣喷射混凝土拌合物采用集中强制式搅拌机拌制，搅拌容量规格 $\geq 0.5\text{m}^3$ ，满足小批量，避免频繁搅拌，稳定水胶比。搅拌时间为 120s 时，煤气化粗渣裹浆率 $\geq 90\%$ （60s 时 70%），拌合物均匀性提升（标准差 $\leq 3\text{MPa}$ ，60s 时 $\geq 5\text{MPa}$ ）；湿拌法煤气化粗渣喷射混凝土拌合物在混凝土搅拌楼完成搅拌，连续生产能力 $\geq 30\text{m}^3/\text{h}$ ，比现场搅拌强度离散性下降 50%。

6.4.5 喷射纤维煤气化粗渣混凝土拌合物的搅拌方式和时间遵循《纤维混凝土应用技术规程》JGJ/T221 的规定。

搅拌方式：纤维分散机（转速 $\geq 1500\text{r}/\text{min}$ ），团聚率 $\leq 5\%$ （人工搅拌 $\geq 20\%$ ），抗弯强度增加 20%（4.0 增加至 4.8MPa）；

湿拌法强制逻辑：干拌法纤维易结团（团聚率 $\geq 15\%$ ），故强制湿拌，保障喷层韧性（能量吸收值增加 30%，500 增加至 650J）。

6.5 喷射作业

6.5.1 煤气化粗渣喷射混凝土的喷射作业区温度为 $5^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ ，煤气化粗渣喷射混凝土拌合物温度为 $10^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 。温度 $> 35^{\circ}\text{C}$ ，拌合物失水快（1h 含水率下降 5%），坍落度损失 $\geq 50\text{mm}$ ，喷层开裂率增加 30%（5%增加至 18%）；冬期施工时，在结冰面喷射，粘结强度下降 50%（由 1.0 下降至 0.5MPa），故需保温（如篷布覆盖，温度 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ ），拌合物预热（ $\geq 10^{\circ}\text{C}$ ，强度增加 10%，1d 强度由 7 增加至 7.7MPa）。

6.5.2 煤气化粗渣喷射混凝土施工作业：

分片分段（ $\leq 6\text{m}$ ）：过长段（ $> 6\text{m}$ ）导致喷层厚度偏差从 $\pm 5\text{mm}$ 增至 $\pm 10\text{mm}$ ，自下而上喷射避免浆体流淌（流淌率 $\geq 15\%$ 降低至 $\leq 5\%$ ）；

缺陷处理：蜂窝、裂缝未处理，喷层脱壳率 $\geq 20\%$ （处理后 $\leq 5\%$ ）；

喷嘴角度与距离： 90° 夹角粘结强度增加 20%（0.8 增加至 0.96MPa），湿喷距离 1.0~1.5m（1.5m 时回弹 20%，2.0m 时 25%）；

分层喷射：厚喷层（ $> 100\text{mm}$ ）分层（每层 50~80mm），避免收缩裂缝（裂缝率 $\geq 20\%$ 减少至 $\leq 5\%$ ），终凝后间隔 $< 1\text{h}$ 无需清洗（ $> 1\text{h}$ 清洗，粘结强度增加 15%，0.8 增加至 0.92MPa）；

6.5.3 煤气化粗渣喷射混凝土施工过程中，水平煤气化粗渣喷射混凝土拌合物回弹率 $\leq 10\%$ ，竖直煤气化粗渣喷射混凝土拌合物回弹率 $\leq 15\%$ ，严禁回用。

回用回弹料（含游离煤气化粗渣、速凝剂残渣），导致强度下降 10%（由 35MPa 降低至 31.5MPa），氯离子含量增加 50%（由 0.04% 增加至 0.06%）；通过优化砂率和调整喷嘴角度，降低回弹率。

6.5.4 喷射钢纤维煤气化粗渣混凝土表面再喷射一层保护层，钢纤维外露率 $\geq 5\%$ ，锈蚀速率增加 3 倍（年锈蚀 0.1 增加至 0.3mm），保护层厚 $\geq 10\text{mm}$ ，覆盖纤维（外露率 $\leq 1\%$ ）；保护层强度同喷层，避免界面脱开。

6.5.5 特殊天气防护后施工，大风（ ≥ 6 级）：遮挡后，回弹率下降 10%（25% 降低至 15%），喷层平整度提升（偏差 ± 10 提升至 $\pm 5\text{mm}$ ）；冬期/雨天：防寒（温度 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ ）、防雨（含水率 $\leq 15\%$ ），确保 1d 强度 $\geq 8\text{MPa}$ （冬期保温后可达，未保温仅 5MPa）。

地下工程煤气化粗渣喷射混凝土施工：施工应紧跟开挖，滞后距离 $\leq 5\text{m}$ ，以实

现及时封闭围岩，使收敛速率下降 30%（从 10mm/d 降至 7mm/d）；爆破作业需在喷层终凝后 $\geq 3\text{h}$ 进行，避免喷层受震动开裂；厚度过渡时，厚部应向薄部延伸 2~3m，使应力集中系数下降 40%（从 1.5 降至 0.9），防止局部开裂。

边坡工程和基坑工程煤气化粗渣喷射混凝土施工：喷射应自下而上从坡底开始，减少回弹物堆积（夹层率从 $\geq 10\%$ 降至 $\leq 3\%$ ），提升喷层整体性；平缓坡面需及时清理回弹物，避免孔隙率增加 10%（从 12%升至 22%）导致抗渗性从 P8 降至 P6；严禁在冻土或松土上喷射，冻土会使粘结强度下降 50%（从 1.0MPa 降至 0.5MPa），松土则会导致喷层滑移率 $\geq 20\%$ （压实处理后可降至 $\leq 5\%$ ）。

加固工程煤气化粗渣喷射混凝土施工：钢筋施工应保证焊接合格率 $\geq 95\%$ ，搭接长度偏差控制在 $\pm 10\text{mm}$ ，以提升粘结强度 15%（从 0.9MPa 增至 1.0MPa）；模板宽度偏差 $\leq \pm 5\text{mm}$ ，确保喷层厚度偏差 $\leq \pm 5\text{mm}$ （超标时可达 $\pm 10\text{mm}$ ）；界面需采用界面剂（粘结强度增 20%，从 0.8MPa 增至 0.96MPa）或锚筋（间距 $\leq 300\text{mm}$ ，抗剪强度增 30%，从 1.0MPa 增至 1.3MPa）增强粘结；喷射应自下而上进行，减少浆体流淌（流淌率从 $\geq 15\%$ 降至 $\leq 5\%$ ），并通过针探法检测厚度（偏差 $\pm 2\text{mm}$ ），及时补喷（补喷率 $\leq 5\%$ ，未检测时 $\geq 20\%$ ）。

异形结构工程煤气化粗渣喷射混凝土施工：筒形薄壳从拱脚向拱顶对称喷射，降低偏压变形率（从 $\geq 10\%$ 降至 $\leq 5\%$ ）；球形薄壳从底部向壳顶螺旋喷射，保证厚度均匀（偏差 $\pm 5\text{mm}$ ，非对称时达 $\pm 10\text{mm}$ ）；扁壳结构及多跨连续薄壳采用对称喷射，使应力集中系数下降 40%（从 1.5 降至 0.9），防止开裂；厚度检测采用针探法（同加固工程），确保及时补喷，使缺陷率 $\leq 5\%$ 。

煤气化喷射粗渣混凝土的表面修整：修整应在初凝后（强度 $\geq 1\text{MPa}$ ）进行，过早修整会导致表面起砂（强度下降 10%）、粘结力下降 15%；修整方法为人工或机械清除多余料（偏差 $\pm 5\text{mm}$ ），必要时喷砂浆找平（厚度 $\leq 10\text{mm}$ ），确保表面平整度偏差 $\leq 5\text{mm}$ 。

6.6 养护

普通工程混凝土终凝后养护时间不应少于 7d，此时 28d 强度可达 38MPa（以 C35 为例）；若仅养护 3d，强度仅能达到 32MPa，无法满足要求。重要工程（如隧道二衬）养护时间需不少于 14d，可使强度提升至 40MPa，超出设计强度 5MPa。

在高湿环境（如湿度 98%的地下溶洞）中，喷层可自然保湿，其含水率能维持在 10%以上，收缩率 $\leq 0.03\%$ ，与常规养护 7d 的效果相当。因此此类环境下无需额外采取保湿养护措施，可节省养护成本。

冬期施工时需严格遵循特殊养护规定：当日均温度低于 5°C 时，禁止喷水养护，以防表面结冰导致强度下降 30%（如从 20MPa 降至 14MPa），应改用岩棉等材料覆盖保温，确保环境温度 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ ；喷层受冻前强度需达到 6MPa 以上（普通水泥需达到设计强度的 40%，如 C30 需达 12MPa），以保证冻融循环后强度损失 $\leq 25\%$ ；养护至强度达到设计值的 50%（如 C30 需达 15MPa）方可拆除养护设施，此时拆除后变形率 $\leq 0.05\%$ ，可有效防止开裂。

7 安全环保措施

7.1 安全技术

7.1.1 煤气化粗渣喷射混凝土施工涉及高压设备（风压 0.6MPa）、高空作业（台架高 3~5m）、粉尘环境（浓度可能超 20mg/m³），需专项方案明确危险源辨识（如危石坠落、管路爆管）、应急措施（如急救设备、疏散通道）。编制煤气化粗渣喷射混凝土施工安全专项方案，包含设备安全距离（空压机距明火≥10m）、粉尘防护（口罩+通风）、高压管路巡检频次（2h/次）等，可使施工事故率下降。

7.1.2 未处理的危石（直径≥30cm）坠落速度可达 5m/s，冲击力≥10kN，足以击穿安全帽，故需爆破或机械清除；针对危石地段放置设备，坍塌概率≥15%（坚实地面≤1%）；软基（承载力<100kPa）放置空压机（重 5t），沉降量≥10cm，导致设备倾斜（管路破裂率增加 30%），故需置于硬化场地（C20 混凝土，厚度≥10cm）。

7.1.3 台架强度：承载≥2kN/m²（含人员+机具），挠度≤1/200（跨度 3m 时≤15mm）；

安全栏杆：高度≥1.2m，横杆间距≤60cm，挡脚板≥18cm，防止人员失足（未设栏杆时坠落风险增加 5 倍，设置后降至 0.1%）。

7.1.4 水箱、风管泄漏率≤1%（压力 0.8MPa 时），泄漏超 5%会导致风压骤降、喷层不密实，同时高压水喷射伤人；

耐压试验：管路耐压≥1.2 倍工作压力（0.6MPa 增加至 0.72MPa），试验合格后爆管率从 8%降低至 1%，确保设备运行安全。

7.1.5 部件磨损风险：输料管壁厚从 8mm 磨至 4mm 时，爆管概率增加 20 倍，故需每日检查（磨损超 50%立即更换）；

转移规范：输料软管随地拖拉会导致接口松动（漏气率增加 10%）、管壁破损，正确做法是用吊具转移（弯曲半径≥1m），转移后故障排查时间缩短 50%。

7.1.6 非人员管控：喷射区回弹物速度≥10m/s（钢纤维回弹动能≥5J），非人员误入被击中概率≥30%，故需设置围挡（高度≥2m）+警示标识；

喷头安全距离：喷头前方 3m 内为高危区（回弹物密集），站人被击中概率≥50%，需强制禁止。

7.1.7 安全帽抗冲击 $\geq 5\text{kN}$ （防坠落物），防尘口罩过滤效率 $\geq 95\%$ （PM10 过滤率，长期暴露粉尘易患尘肺病，佩戴后发病率降低）；钢纤维回弹速度 $\geq 15\text{m/s}$ ，穿透普通手套概率 $\geq 20\%$ ，需戴防刺手套（穿刺阻力 $\geq 10\text{N}$ ）、护目镜（防飞溅入眼）。

7.1.8 连续通风（风量 $\geq 3\text{m}^3/\text{min}\cdot\text{人}$ ）可将瓦斯浓度从 1.0%（爆炸临界值 5%）降至 0.5%以下；高瓦斯区（浓度 $\geq 0.5\%$ ）使用防爆电机（表面温度 $\leq 100^\circ\text{C}$ ）、铜制工具（无火花），避免引爆瓦斯。

7.2 环保要求

7.2.1 喷射回弹率约 20%（ 100m^3 喷射产生 20m^3 回弹物），随意丢弃占用土地（ 100m^3 需 20m^2 堆场）、污染土壤（煤气化粗渣 $\text{pH}\geq 12$ ，可能碱化土壤）；回弹物破碎筛分后（粒径 $\leq 5\text{mm}$ ）可作为骨料掺用（掺量 $\leq 10\%$ ），节省骨料成本。

7.2.2 粉尘浓度 $20\text{mg}/\text{m}^3$ 时，施工人员尘肺病发病率是 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 以下的 5 倍；干拌法粉尘浓度约 $15\sim 25\text{mg}/\text{m}^3$ （超标），湿拌法因浆体包裹骨料，浓度降至 $5\sim 8\text{mg}/\text{m}^3$ （达标）。因此，当施工区域位于居民区时，采用湿拌法喷射混凝土。

7.2.3 煤气化粗渣喷射混凝土施工时降尘措施：

水幕降尘：喷头处设水幕（压力 0.3MPa ），粉尘浓度下降 30%（20 降低至 $14\text{mg}/\text{m}^3$ ）；

局部通风：轴流风机（风量 $\geq 10\text{m}^3/\text{s}$ ）将粉尘排出作业区，浓度再降 40%（14 降低至 $8.4\text{mg}/\text{m}^3$ ）；

集尘器：搅拌机加装集尘器（效率 $\geq 90\%$ ），源头减少粉尘排放（干拌法从 25 降低至 $10\text{mg}/\text{m}^3$ ）；

增粘剂：掺量 0.2%使煤气化粗渣表面粘性增加，粉尘飞扬量减少 20%，综合措施可确保浓度 $\leq 8\text{mg}/\text{m}^3$ 。

8 质量检验与验收

8.1 质量检验与评定

8.1.1 型式检验报告（每年 1 次）确保材料批量稳定性（如水泥强度波动 $\leq 5\%$ ），出厂检验报告（每批次 1 份）验证单批材料合格（如煤气化粗渣吸水率 $\leq 15\%$ ），使用说明书（外加剂、纤维）指导正确掺量（如减水剂超掺 3% 会导致缓凝）。

8.1.2 煤气化粗渣等材料批次差异大（如吸水率波动 $\pm 3\%$ 、石粉含量 $\pm 2\%$ ），不检验会导致配合比失效（水胶比偏差 0.03，强度降 8%）；检验项目与批次衔接本规程第 3 章及现行国家标准《混凝土质量控制标准》GB 50164 的规定。水泥每 200t 检测 1 次，煤气化粗渣每 500t 检测 1 次，确保材料性能波动 $\leq 5\%$ （强度、吸水率等），为后续施工质量奠定基础。

8.1.3 必检项目：拌合物性能（黏聚性、坍落度），直接影响施工（如黏聚性差导致回弹率超 30%），所有工程必检；厚度、抗压强度，结构承载核心指标（如地下工程厚度不足设计 80%，承载力降 20%），必检；早期强度、粘结强度：地下/加固工程需快速承载（1d 强度 $\geq 8\text{MPa}$ ）、界面协同（粘结 $\geq 1.0\text{MPa}$ ），故必检；

可选项目：抗化学侵蚀，仅适用于化工隧道、盐碱地边坡（占比 $\leq 10\%$ ），普通工程无需检验；弯曲韧性：仅钢纤维喷射混凝土（占比 $\leq 20\%$ ）需检验，素喷混凝土可选。

8.1.4 煤气化粗渣喷射混凝土性能检验频率：

湿拌法性能检验：坍落度与强度同频（如每 50m³ 检验 1 组），因坍落度损失 $\geq 30\text{mm}$ 会导致强度降 5%，同步检验可及时调整外加剂（如保坍剂掺量+0.1%）；

钢纤维含量检验：喷射点取样（每 10m³ 取 1 次），纤维含量偏差 $\pm 10\%$ 时，抗弯强度降 15%（由 4.0 降低至 3.4MPa），高频检验确保均匀性（团聚率 $\leq 5\%$ ）；

抗冻含气量：每台班检验 1 次，含气量波动 $\pm 1\%$ （如从 5%降低至 4%），冻融循环后强度损失从 20%升至 30%，故需严格控制；

氯离子含量：至少 1 次/工程，超标（ $\geq 0.06\%$ ）会使钢筋锈蚀速率增 3 倍（年锈蚀 0.1 增加至 0.3mm），1 次检验可覆盖全周期风险；

喷层厚度检验频率:对于地下工程、边坡工程和基坑工程,结构性喷层为每 50m^2 /个,密集点确保厚度合格率 $\geq 80\%$ (稀疏点易漏检超薄区,如5%的点 $< 60\%$ 设计厚度);加固工程间距 $\leq 2\text{m}$ 时,构件边角易超薄(偏差 -10mm),密集点可及时补喷(补喷率 $\leq 5\%$);

抗压强度频率:按《混凝土强度检验评定标准》GB/T 50107(每 100m^3 检测1组)。

8.1.5 煤气化粗渣喷射混凝土厚度检验:

超声波检测误差 $\pm 5\text{mm}$,钻孔法(直径 10mm)误差 $\pm 1\text{mm}$,用超声波易出现误判,故强制钻孔;

喷层厚度:平均值 $\geq$ 设计:避免整体偏薄(如设计 100mm ,平均 90mm ,承载力降 10%);80%点 $\geq$ 设计:允许20%点略薄($\geq 60\%$ 设计),但超薄区需补喷;加固工程偏差 $\pm 5\text{mm}$:构件尺寸精度要求高(如梁宽偏差 $\pm 5\text{mm}$ 影响配筋保护层)。

8.1.6 硬化煤气化粗渣喷射混凝土性能检验评定规定:

抗压强度的评定遵循国家标准《混凝土强度检验评定标准》GB/T 50107;

当试件的抗压强度存在争议时,在工程实体上钻取混凝土芯样进行强度评定;

对其他力学性能检验评定符合国家现行相关标准规定和工程要求;

耐久性能的检验评定遵循《混凝土耐久性检验评定标准》JGJ/T 193的规定;

煤气化粗渣喷射混凝土力学性能、长期性能和耐久性能满足设计要求及符合本规程第4.3.2条和第4.3.3条的规定。

8.2 工程质量验收

8.2.1 煤气化粗渣喷射混凝土工程的质量验收规定:

主控项目:拌合物性能,不达标会导致施工失败(如堵管、回弹率超 30%);抗压强度,低于设计值(如C30强度仅为 28MPa),结构安全系数 < 1.0 (需返工);粘结强度,低于 0.8MPa (结构作用),喷层脱壳率 $\geq 15\%$ (运营中脱落);厚度,80%点不达标,承载力降 20% ,坍塌风险增5倍。

一般项目:表面质量,空鼓(面积 $\leq 5\%$)、裂缝(宽 $\leq 0.2\text{mm}$)不影响安全,但需修补(否则渗水加速劣化)。

8.2.2 煤气化粗渣喷射混凝土工程验收按设计要求和质量合格条件进行分项工程

验收。煤气化粗渣喷射混凝土工程质量验收应需提交下列文件:

施工图与方案: 证明施工按设计进行;

材料报告: 可追溯不合格材料(如水泥强度不达标, 批号对应供应商追责);

检测记录: 厚度、强度数据可验证施工质量;

施工记录: 喷射参数(风压 **0.6MPa**)、养护时间(**7d**)可追溯过程合规性;

隐蔽工程记录: 如锚杆与喷层结合部(隐蔽), 无记录无法验证粘结质量;

其他必要的文件和记录。