

喷射混凝土

问答

李赤波 编著



煤炭工业出版社

喷射混凝土问答

李 赤 波 编著

煤炭工业出版社

2034/31

内 容 提 要

本书从喷射混凝土各组分材料的性质和结构层次出发,着重论述了喷射混凝土的形成因素和结构因素对其技术性质和支护性能的影响。详细介绍了回弹率、粉尘浓度与材料性质的关系;喷射混凝土的配合比设计、质量控制方法和喷射混凝土抗压强度的非破损测试技术。提出了在喷射混凝土施工中应注意的安全与环境保护问题以及处理措施。最后对喷射混凝土技术的国际动态和今后研究工作亦作了扼要的介绍。

本书按问答形式编写,便于读者依题索解。书中提问鲜明,论理较深,但又深入浅出,可作为矿建、铁路、水利、工业与民用建筑以及国防地下工程专业师生和有关设计、施工技术人员的参考读物。

喷 射 混 凝 土 问 答

李 赤 波 编 著

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平北路16号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本787×1092¹/₃₂

印张 5⁰/₁₆ 插页 1

字数 118 千字

印数 1—5,600

1981年 7 月第 1 版

1981年 7 月第 1 次印刷

书号 15035·2423 定价 0.65 元

前 言

采用喷射混凝土作为矿山、铁路、水利、工业与民用建筑和国防地下工程支护结构的材料，已有三十年左右的历史了。三十年来，国内外不少学者和工程技术人员对于喷射混凝土支护理论、施工工艺和材料的性质等进行了许多有实用价值的研究，写出了不少精辟的论文。这些论文和研究结果对喷射混凝土技术作出了中肯的评价，同时，也提出了急待研究解决的问题和最有吸引力的设想。虽然，在一些具体的技术问题上仍有争论，但是，喷射混凝土支护确实解决了传统支护型式难以突破的某些地质条件问题，对加快工程建设速度、节省材料、保证后续工种安全作业、以及为实现岩体支护机械化等方面创造了有利条件。

新的支护理论要求有相适应的支护结构形式，而新的支护结构形式的实现必然导致施工工艺的改革和对材性提出更新、更严格的要求。在一切工程技术的变革中，材料的改革或改性始终属于第一性，而工艺改革总是第二性的。目前，过于强调施工条件对提高喷射效率 and 支护效果的影响，而对材性所起的作用则重视不够，研究也不够。即便有一些属于材性研究的内容，在研究方法上仍未脱出研究普通混凝土的范畴，忽视了喷射混凝土材料形成结构的特殊因素和新的支护理论对材性提出的特殊要求。同时，也忽视了材料组分对回弹率和粉尘浓度的影响。喷射混凝土是一种多相复合型材料。它的技术性质受各相组成和浓度波动的影响很大，其支护效果与时空因素又密切相关，这些都是从事于喷射混凝土工作者值得注意的问题。

目 录

前 言

一、水泥	1
1. 硅酸盐水泥熟料的矿物成分是什么？其含量范围如何？	1
2. 单矿物与水作用时有何特性？	1
3. 在硅酸盐类水泥中，为什么要加入适量的石膏？	2
4. 硅酸盐水泥的凝结硬化过程是怎样进行的？	4
5. 影响水泥凝结速度的因素有哪些？	5
6. 为什么要对水泥标准进行改革？水泥的新、老标号强度应如何进行换算？	7
7. 影响水泥石强度发展的主要因素有哪些？为什么水泥石硬化以后维持适当温度和湿度，其强度还会随硬化龄期的延长而逐渐增大？	8
8. 水泥在储存与运输时应注意什么问题？	9
9. 什么叫做水泥净浆标准稠度？标准稠度用水量对喷射混凝土施工和质量有什么影响？	9
10. 选择喷射混凝土用的水泥应注意哪几项技术指标？为什么？	10
11. 快凝（瞬凝）、假凝（急凝、先期凝固、似凝、早期凝固、粗凝）、速凝的涵义是什么？如何解决喷射混凝土施工中的“急凝”问题？	11
12. 喷射混凝土为什么优先选用硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥？矿渣水泥能否用于喷射混凝土？	12

13. 火山灰水泥、粉煤灰水泥能否用于喷射混凝土?	13
14. 什么叫做喷射水泥? 国内有哪些水泥可直接用于喷射 混凝土? 它们的主要矿物成分是什么?	14
15. 硅酸盐类水泥为什么不能与矾土水泥、超早强水泥混 合使用?	17
16. 引起硅酸盐水泥石腐蚀的原因有哪些? 怎样预防水泥石 的腐蚀?	18
二、外加剂	22
17. 速凝剂对水泥的适应性包括哪些内容?	22
18. 国产的速凝剂有哪几种? 它们的成分是什么?	23
19. 速凝剂为什么能促使硅酸盐水泥速凝?	24
20. 影响硅酸盐水泥与速凝剂适应性的原因是什么? 为什 么要特别强调二者的适应性?	24
21. 水泥与速凝剂不相适应时应如何处理?	25
22. 如何正确地确定速凝剂掺量?	26
23. 影响速凝剂使用效果的外界因素有哪些?	26
24. 速凝剂为什么会影响混凝土后期强度?	29
25. 速凝剂对喷射混凝土的其它技术性能有什么影响?	31
26. 速凝剂掺拌不均匀时, 对喷射混凝土施工和质量有什 么不良影响?	37
27. 速凝剂在储存和运输时要注意什么问题?	40
28. 为什么不宜将粉状速凝剂调成膏状使用?	40
29. 受潮后的速凝剂能不能再用?	42
30. 液体(可溶性固体)速凝剂有什么优点?	43
31. 为什么速凝剂不能与矾土水泥混合使用?	45
32. 氯化钙能不能作为速凝剂? 在喷射混凝土中掺用氯化 钙时应注意什么问题?	45
33. 氟化钠对水泥的速凝效果如何? 它对水泥熟料矿物组 成有什么要求?	47
34. 有人认为速凝剂掺得越多, 水泥净浆的凝结时间就	

越快。这种看法对不对?	48
35. 增加速凝剂掺量是否可以降低回弹率?	50
36. 掺有速凝剂的混合料的停放时间, 对喷射混凝土施工 和强度有什么影响?	50
37. 粉状速凝剂能否用于湿法喷射?	51
38. 三乙醇胺对水泥水化有什么作用?	51
39. 什么是表面活性剂?	53
40. 什么叫做“临界胶束浓度”(c.m.c)?	54
41. 什么叫做“润湿作用”(渗透作用)?	56
42. 什么叫做减水剂? 它的作用机理是什么?	57
43. 常用的减水剂有哪几种?	58
44. 喷射混凝土拌合物中加入减水剂后能取得哪些方面的 技术经济效果?	64
45. 常用的早强剂有几类? 它们的早强机理是什么?	65
46. 影响早强剂增强效果的外界因素有哪些?	67
47. 早强剂与水泥品种的适应性如何?	68
48. 早强剂对喷射混凝土的其它物理力学性能是否有 影响?	68
49. 什么叫做加气剂? 常用的加气剂有哪些?	71
50. 使用含有 Na_2O 、 K_2O 的盐类或碱类作为喷射混凝土的 外加剂时, 应注意什么问题?	73
三、粗、细骨料	74
51. 喷射混凝土对砂、石骨料有什么技术要求?	74
52. 什么叫做骨料的颗粒级配? 怎样测定骨料的颗粒 级配?	75
53. 什么叫做“连续级配”和“间断级配”? 喷射混凝土用骨 料为什么一定要用“连续级配”?	78
54. 什么叫做骨料的“最大粒径”? 如何确定喷射混凝土骨 料的“最大粒径”?	80
55. 选择喷射混凝土骨料时, 在材质方面应注意哪些问	

题? 为什么特别强调选用石英砂、花岗岩质砾石作为 高强喷射混凝土的骨料?	81
56. 碱-骨料反应是怎么回事?	81
57. 哪些岩石属于碱性活性岩石? 如何进行活性骨料的 鉴定?	82
58. 什么叫做碱-骨料反应的“安全膨胀率”? 如何测定 “安全膨胀率”?	84
59. 如何抑制碱-骨料反应?	84
60. 骨料的含水状态有几种? 怎样计算骨料的含水率?	86
61. 喷射混凝土(干法)用骨料为什么要求适当的 含水率?	88
62. 石末能否代砂?	90
63. 为什么要按骨料“最大粒径”确定喷射混凝土砂率?	91
四、喷射物的稠度和粘滞度	92
64. 喷射物“最大稠度临界点”的含义是什么? 为什么要控 制喷射物的“最大稠度临界点”?	92
65. 影响喷射物稠度的因素有哪些?	93
66. 如何控制喷射物的“最大稠度临界点”?	94
67. 什么叫做“捣实系数(Compacting Factor)”? 混凝 土喷射物的“捣实系数”应控制在什么范围内?	94
68. 什么叫做“扩散度”? 喷射混凝土的拌合物其“扩散度” 应控制在什么范围内?	96
69. 什么叫做“工作度”? 喷射物的“工作度”应控制在什么 范围内?	97
70. 什么叫做“和易性”? 喷射物的“和易性”指标如何 控制?	98
71. 湿法喷射混凝土时, 为什么特别强调随拌随喷?	100
72. 喷射物的干湿状态(稠度)与喷射物的和易性是不是 一回事?	100
73. 工作面温度变化时, 同一配合比拌合物的坍落度有什	

么变化?	101
74. 怎样才能提高喷嘴对物料料流的湿化效果?	103
75. 在干法喷射工艺中, 如何实现自动供水?	105
五、喷射混凝土配合比设计和质量控制	108
76. 为什么要对喷射物进行配合比设计?	108
77. 进行喷射混凝土配合比设计之前, 应作哪些准备工作?	108
78. 如何正确地选定喷射混凝土的早期强度和后期强度?	110
79. 怎样确定喷射混凝土骨料的最大粒径和砂率(配合比设计步骤之一)?	110
80. 怎样确定水泥及细粉掺料用量(配合比设计步骤之二)?	111
81. 有人认为: “增加单位体积喷射混凝土中的水泥(或细粉料)用量, 可以提高喷射混凝土的强度, 降低回弹损失, 在经济上仍是合理的”。这种看法是否全面?	113
82. 为什么细粉料用量和砂率随骨料最大粒径增大而降低?	115
83. 选择细粉掺料时应注意什么问题?	117
84. 为什么不得用粘土作细粉掺料?	118
85. 选用火山灰质材料作喷射混凝土的细粉掺料时应注意什么问题?	120
86. 石灰石粉的掺量为什么宜限制在10%左右?	121
87. 选择粒状高炉矿渣(水渣)或重矿渣作细粉掺料时应注意哪几项指标?	122
88. 怎样确定水灰比及用水量(配合比设计步骤之三)?	123
89. 喷射混凝土对水质有什么要求? 压气中为什么不能含油?	124

90. 什么叫做“最佳水灰比”?	124
91. 为什么不能用加大水量的办法改善喷射物的 粘聚性?	127
92. 怎样确定砂、石用量(配合比设计步骤之四)?	128
93. 在设计喷射混凝土配合比时, 怎样才能最大限度地解 决回弹率与强度之间的矛盾?	128
94. 喷射混凝土的配合比为什么一定要采用重量比?	129
95. 喷射混凝土的抗压强度与容重的相关程度如何? 抗压 强度与孔隙率有没有相关性?	130
96. 喷射混凝土抗压强度与龄期的关系如何?	132
97. 为什么说喷射混凝土的抗拉强度和拉伸应力——应变 特性将决定衬砌的支护能力?	133
98. 如何评价纤维配筋喷射混凝土?	134
99. 怎样才能提高岩石与喷射混凝土界面的粘结强度和摩 阻强度?	135
100. 喷射混凝土支护可能遇到哪些岩层条件问题?	136
101. 喷层常见的病害有哪些? 是什么原因造成的? 应如何 防治?	137
102. 喷射混凝土的收缩裂纹是怎样形成的?	138
103. 影响喷射混凝土干缩的主要因素有哪些?	140
104. 喷射混凝土的碳化对其质量有什么影响?	143
105. 喷射混凝土的体积变形包括哪些内容? 它们对喷射混 凝土支护能力有什么影响?	144
106. 什么叫做蠕变? 比蠕变? 它对喷射混凝土与围岩共同 工作有什么影响?	146
107. 什么叫做“出石率”? 喷射混凝土每立方米干拌合料的 “出石率”应如何计算?	149
108. 为什么对喷射混凝土要进行现场试验?	151
109. 如何对喷射混凝土进行施工质量控制?	151
110. 如何根据施工控制水平, 确定喷射混凝土的“配制	

强度”?	153
六、喷射混凝土的安全及环境保护	156
111. 如何测量粉尘浓度?如何防护粉尘?	156
112. 现在防化学腐蚀的情况如何?	158
113. 干法喷射工艺中如何解决静电问题?	158
114. 如何消除“隐患”?	158
115. 关于环境保护应注意哪些问题?	159
七、喷射混凝土强度非破损测试技术	160
116. 用于混凝土质量非破损测试的方法有哪些?目前有哪 些非破损测试方法可用于喷射混凝土?	160
附: 美国喷射混凝土的现状与未来——喷射混凝土 国际会议总结摘要	165

一、水 泥

1. 硅酸盐水泥熟料的矿物成分是什么？其含量范围如何？

答：硅酸盐水泥熟料为硅酸盐类水泥的主要组分，其矿物成分名称和含量范围如下：

硅酸三钙(A矿、阿利特)， $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2(\text{C}_3\text{S})$ ，含量37~60%；

硅酸二钙(B矿、贝利特)， $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2(\text{C}_2\text{S})$ ，含量15~37%；

铝酸三钙 $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3(\text{C}_3\text{A})$ ，含量7~15%；

铁铝酸四钙(C矿、才利特)， $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{C}_4\text{AF})$ ，含量10~18%。

调整熟料矿物成分的比例，可以制成适用于不同工程性质要求的各种硅酸盐类水泥(表1)。

表 1 各种硅酸盐类水泥的矿物组成

矿物名称	工 程 性 质					
	一 般	一 中 中	般 抗 热	早 强	快 硬	低 热 高 抗
C_3S	—	—	—	—	50~60	35 ≤50
C_2S	—	—	—	—	—	40 —
C_3A	—	8	15	8~14	7	5
$\text{C}_3\text{A}+\text{C}_3\text{S}$	—	—	—	60~65	—	—
$\text{C}_4\text{AF}+2\text{C}_3\text{A}$ 或 $\text{C}_4\text{A}+\text{C}_2\text{F}$ (固溶体)	—	—	—	—	—	20

2. 单矿物与水作用时有何特性？

答：各种熟料矿物单独与水作用时表现出的特征如表2所示。

硅酸三钙水化速度中等，体积收缩较小，虽然单位重量

表 2 硅酸盐水泥熟料矿物水化特征

指标名称	单 位	C ₃ S			C ₂ S			C ₃ A			C ₄ AF		
		3天	7天	28天	3天	7天	28天	3天	7天	28天	3天	7天	28天
水化速度	%	42	48	59	6	8	16	77	79	86	88	89	92
水化热	卡/克	120			62			207			100		
抗压强度	公斤/厘米 ²	176			8			13			60		

注：一克水泥的水化热按 $Q = 136(C_3S) + 62(C_2S) + 200(C_3A) + 30(C_4AF)$ 计算。括号内分别为各矿物含量的百分率。

的发热量低于铝酸三钙，但在诸矿物成分中所占比例最大，故要求低热的混凝土工程，所用水泥必须限制 C_3S 的含量。

硅酸二钙水化速度最慢，水化放热最低，体积收缩最小。强度发展早期较慢，后期却较快，是保证水泥后期强度的主要成分。随着 C_2S 含量的增加，水泥的抗蚀性将有所提高，故低热(大坝)水泥中 C_2S 含量可高达40%。

铝酸三钙水化速度较快，水化时放热量最高，硬化时体积收缩也最大。强度发展早期最快，后期不继续发展或有所降低。 C_3A 含量愈大，水泥对氧化镁与硫酸盐侵蚀的抗蚀性愈差，干湿交替时的安定性愈小。当 C_3A 的含量从3%提高到14%时，承受拉力的延伸率将从20%减至11%。

铁铝酸四钙水化速度最快，水化时放热量较低，硬化时体积收缩。增加 C_4AF 的含量能提高水泥对碱性及化学侵蚀的抗蚀性，但抗冻性将有所降低。

3. 在硅酸盐类水泥中，为什么要加入适量的石膏？

答：1) 石膏的调凝作用 水泥的凝结速度主要由水泥浆体中胶体微粒聚集作用决定，高价带电离子对胶体的聚集作用有很大影响。铝酸三钙在水中溶解度较大，且可电离生成三价离子 Al^{+++} ，促使胶体凝结。当加入适量的石膏之

后，则生成难溶于水的水化硫铝酸钙晶体，减少了溶液中的 Al^{+++} ，因而延缓了水泥浆体的凝结速度。

C_4AF 实际上是 $C_3A_2F-C_2F$ 的固溶体系列之一。它的水化产物为 C_2AH_6 和 C_4AH_{13} 的混晶；其中： C_2AH_6 为水泥的速凝成分。在有石膏的条件下， C_4AF 水化则生成水化硫铝酸钙晶体，延缓了水泥的凝结时间。表 3 为不同的石膏掺量对水泥凝结时间的影响。

表 3 石膏掺量对水泥凝结时间的影响

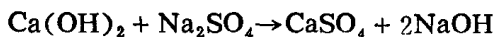
石膏掺量 (%)	凝 结 时 间	
	初 凝	终 凝
0	1'50"	4'0"
0.5	6'10"	>15'
1.0	>15'	—
3.0	2:25'	4:35'

注：500*硅酸盐水泥，水灰比0.4。

当加入过量的石膏时， C_3A 的三价离子固然被消除， $CaSO_4$ 离解而得的二价离子开始起着聚结作用，又会产生促凝作用。

2) 石膏的调强作用 水化硫铝酸钙的形成过程，主要受碱性的制约。碱度适当时，水化硫铝酸钙形成的数量多、速度快、晶体大而呈长柱状，大多数在液相中单个地析出，生成于固体颗粒间空隙的地方。即使水泥石结构已经形成，也不致于引起膨胀而产生内应力，反而能密实水泥石结构而提高其强度。表 4 为石膏掺量对水泥石强度的影响。

3) 提高水泥抗硫酸盐腐蚀性能 在没有石膏的条件下， C_3A 及 C_4AF 水化生成 C_3AH_6 立方型水化铝酸钙。水泥硬化以后，在含硫酸盐地下水的作用下将生成水化硫铝酸钙。



这些在固相中生成的针状晶体(水泥杆菌), 比原有体积增加1.5倍以上, 不仅不能密实水泥石结构, 反而使已形成的水泥石结构因膨胀应力而招致极大的破坏。

表 4 石膏掺量对水泥石强度的影响

石膏掺量 (%)	抗压强度 (公斤/平方厘米)				
	二小时	四小时	一天	三天	廿八天
0	3	5	17	120	417
0.5	3	5	64	158	417.5
3.0	—	—	120	262	482

注: 试件尺寸: $2 \times 2 \times 2$ 厘米, 水泥净浆, 水灰比 0.4。

4. 硅酸盐水泥的凝结硬化过程是怎样进行的?

答: 硅酸盐水泥的凝结硬化过程可以分为以下四个阶段(表 5)。

表 5 水泥的凝结硬化过程

凝结硬化阶段	一般的放热反应速度	一般的持续时间	主要的物理化学变化
初始反应期 潜伏期	40卡/克·小时 1卡/克·小时	5~10分钟 1小时	初始溶解和水化 凝胶体膜层围绕水泥 颗粒成长
凝 结 期	在 6 小时内逐渐增加到 5 卡/克·小时	6 小时	膜层破裂, 水泥颗粒 进一步水化
硬 化 期	在 24 小时内逐渐降低到 1 卡/克·小时	6 小时至若干年	凝胶体填充毛细孔

硬化后的水泥石是由凝胶体(凝胶和无规则排列的晶

体)、未水化水泥内核和毛细孔组成。凝胶体粒子之间的微小空隙称为胶孔,胶孔尺寸为 $15\sim 20\text{ \AA}$,只比水分子大一个数量级。胶孔约占凝胶体总体积的28%。对于给定的水泥,当养护环境的湿度不变时,这一孔隙率的实际数值在水化的任何阶段都保持不变,并与调拌水泥浆时的水灰比无关。毛细孔与胶孔不同,其大小和占水泥石体积的份数随水灰比的增大而增大,随水化进程而逐渐减小,水泥石的强度和密实度因此而逐渐提高。

T.C.Powers通过对水泥浆体胶孔的研究,于六十年代提出了不依混凝土龄期为依据的混凝土强度值:

$$R = Kx^n$$

式中 R ——混凝土强度 (公斤/厘米²);

x ——胶空比 (胶体体积/水泥石所占空间);

n ——指数, $n = 2.7\sim 3.0$;

K ——常数。为胶空比等于1.0时,混凝土理想强度值 (公斤/厘米²)。

其中:
$$x = \frac{2.06v_c a}{v_c a + w_o/c}$$

取干水泥的比容 (v_o) 为0.319厘米³/克, 则:

$$x = \frac{0.647a}{0.319a + w_o/c}$$

式中 x ——胶空比;

a ——已水化的水泥比例;

w_o ——拌和水量;

c ——水泥用量。

5. 影响水泥凝结速度的因素有哪些?

答: 如前所述, 水泥的凝结速度主要由水泥浆体中胶体

微粒聚集作用决定。因此，凡能影响胶体微粒生成速度和胶体微粒聚集作用的因素，都能影响水泥凝结速度。归纳起来约有以下几个方面：

1) 矿物成分（参见表2）。

2) 细度：水泥颗粒的水化从其表面开始。水泥颗粒愈细，单位重量水泥颗粒的总表面积（比表面积，厘米²/克）愈大，水化较快而且较完全，胶空比增长的速度也快，水泥浆的可塑性降低，加速了水泥的凝结。

3) 外加剂：

(1) 速凝剂（参见第19题）。

(2) 缓凝剂：常用的缓凝剂有纸浆废液、酒石酸、柠檬酸、淀粉、己糖二酸钙等；其它如硼酸盐、氟化物、磷酸盐及碳酸盐等亦可作为缓凝剂。近几年来，国内大量采用己糖二酸钙作缓凝塑化剂（又叫糖密缓凝剂），效果甚好。己糖二酸钙对水泥产生缓凝的原因，是由于糖剂掺入水泥浆体以后，因其表面活性作用，使水泥水化时所产生的晶核和微晶体增多，因其扩散作用又阻碍了微晶体的凝聚，从而达到了缓凝目的。

己糖二酸钙的适宜掺量为水泥重量的0.2~0.3%，当温度为23~28℃时，掺量每增加0.1%，就能延缓凝结1小时。

表 6 在不同温度下72小时后的水化热

水泥品种	水 化 热 (卡/克)			
	4.4℃	24℃	32℃	40.6℃
普通硅酸盐水泥	36.9	68.0	73.9	80.0
早强水泥	52.9	83.2	85.3	93.2
低热水泥	25.7	46.6	45.8	51.2