无碱液体速凝剂的有机-无机复合改性机理及应用性能研究

张焱鑫

(天津中铁工程检测有限责任公司,天津 300308)

摘要:为解决现有无碱液体速凝剂早期强度低、后期强度损失大、稳定性差等问题,基于有机-无机复合改性策略,以硫酸铝为铝源,二乙醇胺为有机络合剂稳定 Al^{3+},并复配硫酸镁、拟薄水铝石与碳酸锂,制备了一种新型无碱液体速凝剂。通过凝结时间、抗压强度测试及微观分析(XRD、SEM),系统研究了其性能与促凝机理。当速凝剂掺量为 7%时,3 种水泥净浆初凝时间≤4 min、终凝时间≤10 min,28 d 抗压强度比≥90%;其中,曲寨水泥的 1 d 抗压强度最高,达 22.6 MPa。微观分析揭示了硫酸铝与拟薄水铝石协同供铝、Li^+ 与 Mg^{2+} 加速 C_3S 水化、二乙醇胺络合稳定的三元促凝机制。工程应用表明,该速凝剂配制的 C25 湿喷混凝土回弹率由 30.0%降至 17.6%,表现出优异的工程适应性。

关键词:无碱液体速凝剂;喷射混凝土;早期强度;回弹率;促凝机理

中图分类号:TU528 **文献标志码**:A **文章编号**:2095-0373(2026)02-0119-08

0 引言

喷射混凝土是隧道、地下工程围岩支护的关键材料,其凝结硬化性能直接关系施工安全与效率。速凝剂作为核心外加剂,能显著缩短混凝土凝结时间,保证喷射后快速提供支护力[1]。速凝剂主要分为粉状、碱性液体和无碱液体 3 类。传统碱性速凝剂虽促凝效果显著,但存在碱含量高、后期强度损失大、腐蚀性强、施工安全性差等问题[2]。低碱及无碱液体速凝剂因后期强度保持率高、水泥适应性广、对人体友好等优点,已成为当前研究与应用的主流[3]。

围绕无碱液体速凝剂的开发,学者们开展了大量研究。Sheng et al[4]利用硫酸铝、氟化盐、醇胺等合成了新型无碱液体速凝剂(不含 Li^+ 或 Mg^{2+});Zhang et al[5]使用硫酸铝、硫酸镁、三乙醇胺等制备了无碱液体速凝剂(含 Mg^{2+} 但不含 Li^+);Wang et al[6]使用硫酸铝、二乙醇胺等也制备了同类产品(不含 Li^+ 或 Mg^{2+})。上述研究多采用 P·I 或 P·O 42.5 水泥、(20±1)℃水养条件,与本研究基本一致。然而,现有产品仍普遍存在早期强度不足(1/4 d 抗压强度多低于 1.0 MPa,1 d 抗压强度仅 10~15 MPa,如陈荣辉等的研究[7]为 14.0 MPa,Huang et al[8]的研究为 11.58 MPa)、溶液稳定性差、固含量低导致掺量高等问题[9-10]。从配方角度看,上述文献中除 Zhang et al[5]添加了 Mg^{2+} 外,其余均未引入 Li^+ 或 Mg^{2+},缺乏对 C_3S 水化的双离子协同加速。因此,开发高早强、稳定性好、后期强度损失小的无碱液体速凝剂具有重要意义。

针对上述问题,提出有机-无机复合改性思路,以二乙醇胺为有机组分提升稳定性,以硫酸镁、碳酸锂为无机组分协同增强早强,制备综合性能优良的无碱液体速凝剂。通过凝结时间、抗压强度及微观水化研究揭示其促凝机制,并结合工程应用验证其性能,以期为高性能无碱液体速凝剂的开发与应用提供参考。

1 试验

1.1 原材料

水泥采用 P.I 42.5 基准水泥(中国建筑材料科学研究总院)、曲寨水泥(河北曲寨水泥有限公司)和矿

收稿日期:2026-03-27 **责任编辑**:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20260061

作者简介:张焱鑫(1995—),男,工程师,研究方向为混凝土性能设计专业试验检测。E-mail:929810723@qq.com

张焱鑫.无碱液体速凝剂的有机-无机复合改性机理及应用性能研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2026,39(2):119-126.

中国知网 https://www.cnki.net

峰水泥(河北矿峰水泥有限公司),其基本性能符合GB 175—2023《通用硅酸盐水泥》要求,化学组成如表1所示。砂采用ISO标准砂,符合GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》要求。速凝剂合成原材料:十八水合硫酸铝(工业级,$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$含量≥99%),二乙醇胺(分析纯,纯度≥99%),硫酸镁(分析纯,$MgSO_4 \cdot 7H_2O$含量≥99%),碳酸锂(工业级,Li_2CO_3含量≥99%)和拟薄水铝石(工业级,AlOOH含量≥98%)。

表1 3种水泥的主要化学组成(质量分数) %

水泥类型	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	SO_3	Loss
基准水泥	20.67	5.03	64.23	3.18	2.01	2.06	2.82
曲寨水泥	21.00	5.30	65.40	3.50	1.45	2.05	1.30
矿峰水泥	17.47	4.90	62.13	3.20	1.71	2.22	1.09

1.2 速凝剂合成工艺

速凝剂合成采用有机-无机复合改性工艺,各组分质量配比为:十八水合硫酸铝100份,二乙醇胺10份,硫酸镁6份,拟薄水铝石4份,碳酸锂1.5份,去离子水60份。首先将拟薄水铝石加入去离子水中,在65 ℃、500~700 r/min下搅拌30 min,使其分散均匀。拟薄水铝石比表面积大于300 m^2/g,酸性条件下可快速释放活性Al_2O_3,释放时间小于5 s[8]。搅拌后溶液无肉眼可见沉降或分层。将分散液在65 ℃下静置72 h后,沉降体积比(沉降层体积/总体积)为5.2%,表明拟薄水铝石在水中具有较好的分散稳定性,有利于速凝剂的长期储存。随后加入一半量的硫酸铝,搅拌至完全溶解,再加入剩余硫酸铝和二乙醇胺,调整转速至1 000 r/min搅拌30 min,使二乙醇胺与Al^{3+}充分络合(加入二乙醇胺后溶液由微浑浊变为澄清透明,且60 d内无絮凝沉淀;而未加二乙醇胺的溶液在7 d内即产生白色沉淀)。保持转速1 000 r/min,加入硫酸镁和碳酸锂,继续搅拌45 min。将反应体系在65 ℃下保温静置90 min,而后冷却至室温,即得成品速凝剂。

1.3 试验方案

为系统考察速凝剂在不同掺量下对水泥性能的影响,选取基准水泥、曲寨水泥和矿峰水泥3种水泥,设置速凝剂掺量(按胶凝材料质量计)为5%、6%、7%、8%、9%共5个水平,分别测试各掺量下3种水泥的凝结时间及胶砂抗压强度。试验中,净浆或胶砂试件的胶凝材料用量固定为500 g,净浆用水量为175 g、胶砂用水量为250 g,胶砂中标准砂用量为1 500 g;对应5%~9%的掺量,速凝剂用量依次为25、30、35、40、45 g。

1.4 试验方法

水泥净浆凝结时间及胶砂抗压强度测试参照GB/T 35159—2017进行。净浆凝结时间采用维卡仪测试,水灰比为0.35;胶砂抗压强度采用微机控制电液伺服压力试验机测试,各组试验均进行重复测试3次,结果取平均值。将养护至规定龄期的净浆试块芯部样品置于无水乙醇中终止水化,于40 ℃真空干燥箱中烘干至恒重,研磨过75 μm筛。XRD测试采用德国布鲁克D8 Advance型衍射仪,扫描范围5°~70°,速度0.42°/s,采用Rietveld法进行物相定量分析。SEM测试采用日本日立SU8010型场发射扫描电镜,样品经干燥、喷金处理后观察微观形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 速凝剂对水泥凝结时间的影响

采用基准水泥、曲寨水泥和矿峰水泥3种不同来源的水泥,测试速凝剂掺量5%~9%对净浆凝结时间的影响,结果如图1所示。掺入速凝剂后,3种水泥的初凝、终凝时间均大幅缩短。当掺量为7%时,3种水泥的初凝时间均≤4 min、终凝时间均≤10 min,满足GB/T 35159—2017要求;掺量增至9%时,曲寨水泥的初凝时间可缩短至2 min以内,终凝时间在4 min以内。无论速凝剂掺量为多少,基准水泥的初凝、终凝时间均长于曲寨水泥和矿峰水泥;其中,基准水泥与后2种水泥的初凝时间最大差值为1.3 min(基准水泥更长),终凝时间最大差值为4.5 min(基准水泥更长)。该速凝剂对曲寨水泥的作用最显著,其初凝与终凝的时间间隔最短,仅1.7 min。总体而言,该速凝剂对不同品牌水泥均表现出良好的适应性。

中国知网 https://www.cnki.net

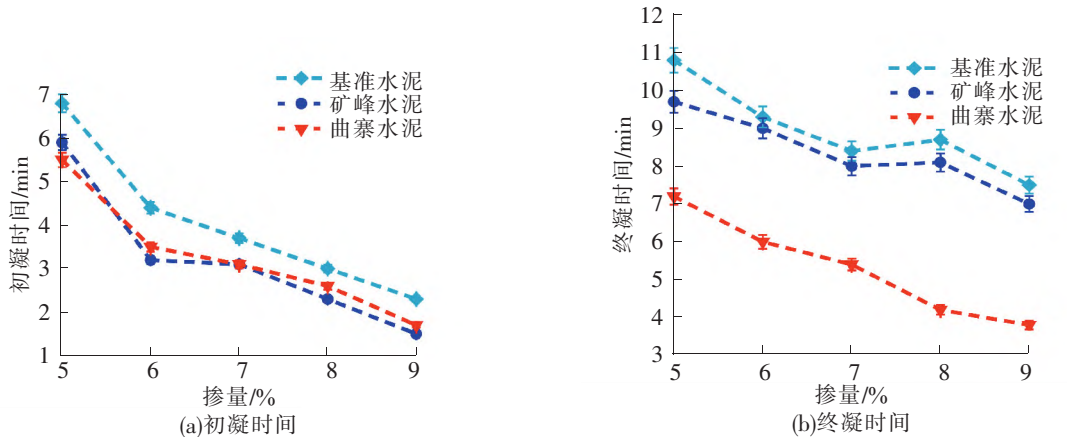


图 1　不同掺量下水泥净浆凝结时间

2.2　速凝剂对水泥胶砂抗压强度的影响

参照 GB/T 35159—2017 测试不同速凝剂掺量下水泥胶砂的 6 h、1 d 及 28 d 抗压强度，并计算 28 d 抗压强度比，结果如图 2 所示。由图 2 可见，28 d 抗压强度比均≥90%。当掺量≤5%时，6 h 未形成有效强度，1 d 强度低于 10 MPa，无法满足工程要求。掺量增至 8%～9%时，6 h 强度达 1.0 MPa 以上；当掺量为 7%时，曲寨水泥 1 d 强度最高，达 22.6 MPa，远高于国标 10.0 MPa。与本领域近年同类研究对比可见，现有硫酸铝基无碱液体速凝剂的 6 h 抗压强度多介于 1.0～1.2 MPa，与本研究水平相当；但 1 d 抗压强度典型值为 10～15 MPa，例如陈荣辉等[7]制备的速凝剂 1 d 强度为 14.0 MPa，Huang et al[8]报道值为 11.58 MPa。本速凝剂在 7%掺量下 1 d 强度最高达 22.6 MPa，显著优于上述文献值，表明 Li^+ 与 Mg^{2+} 的引入对 C_3S 早期水化具有明显的协同加速效果，这也是本研究区别于同类产品的主要性能优势。

2.3　速凝剂与矿物掺合料及减水剂的适应性

为考察速凝剂在复杂混凝土体系中的适应性，研究了矿物掺合料（矿粉、粉煤灰）及减水剂（聚羧酸高效减水剂、高性能减水剂）对掺速凝剂水泥浆体凝结时间及强度的影响，结果如图 3 所示。随着矿粉或粉煤灰掺量增加，体系终凝时间逐步延长，粉煤灰掺量达 15%时终凝时间达峰值，但初凝时间仍稳定在 4～8 min，满足快速凝结要求；抗压强度方面，外掺材掺量增加导致 1 d 及 28 d 强度比下降，粉煤灰组衰减幅度大于矿粉组，这可能与粉煤灰活性较低、需水量较大有关，使其对水泥早期水化的延缓作用更强。聚羧酸高效减水剂掺量在 0%～1.2%，初凝时间由 3.5 min 增至 5 min，终凝时间由 6.5 min 升至 12 min；高性能减水剂组表现基本一致，终凝时间由 6.5 min 增至 12.5 min，两类减水剂均未破坏速凝剂的快速凝结特性。综上，该速凝剂对矿粉、粉煤灰及两类聚羧酸减水剂均表现出良好适应性，外掺材掺量≤15%、减水剂掺量≤1.2%时凝结时间可控。

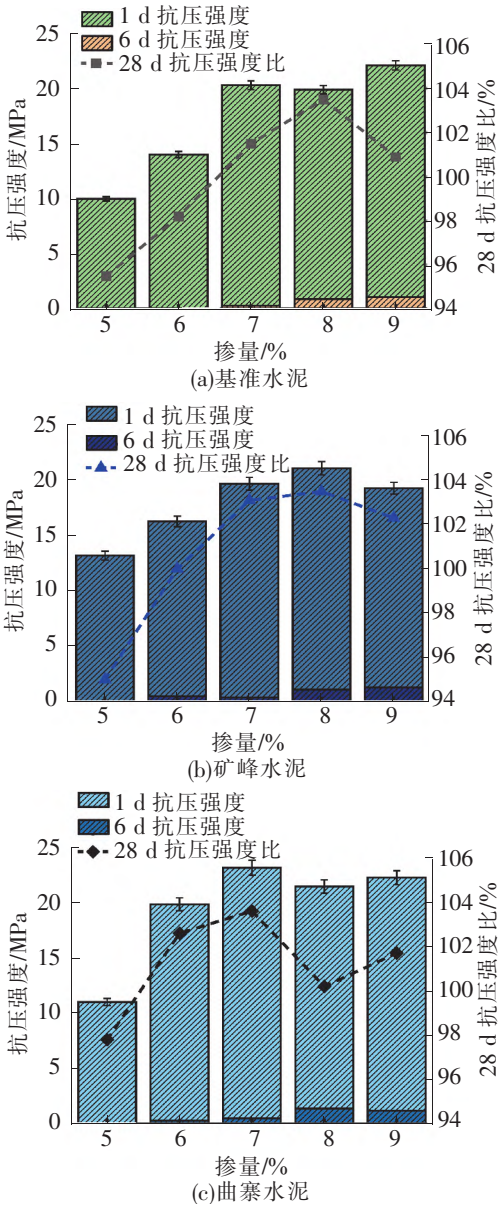
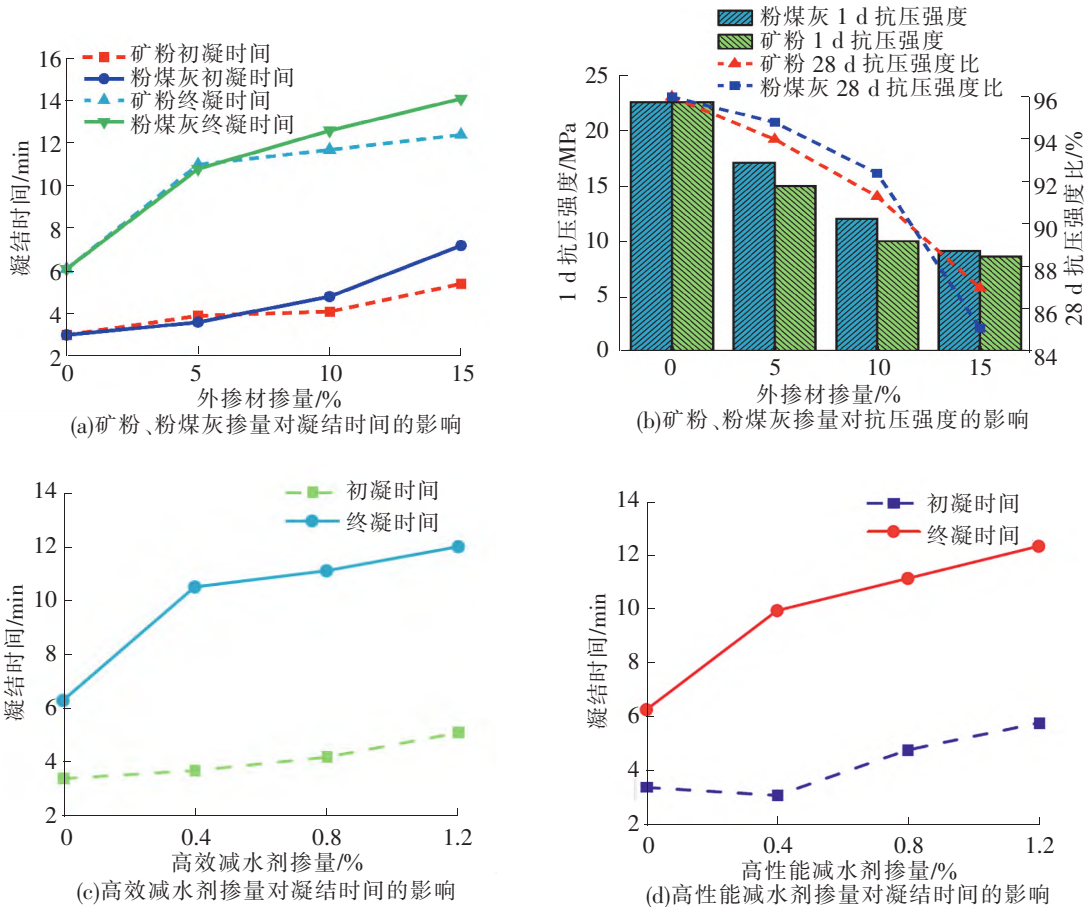


图 2　不同掺量下水泥胶砂抗压强度

中国知网　https://www.cnki.net



(a)矿粉、粉煤灰掺量对凝结时间的影响

(b)矿粉、粉煤灰掺量对抗压强度的影响

(c)高效减水剂掺量对凝结时间的影响

(d)高性能减水剂掺量对凝结时间的影响

图 3 与矿物掺合料和减水剂的适应性

2.4 硬化水泥浆体微观分析

2.4.1 XRD 物相分析

取掺速凝剂(掺量 7%)的水泥净浆样品于 1/4、1、7、28 d 进行 XRD 测试,以 15% ZnO 为内标物,采用 Rietveld 法计算各物相相对含量,结果如图 4 和表 2 所示。不同龄期浆体主要物相均为 AFt、$Ca(OH)_2$、C_3S 和 C_2S。1/4 d 时 AFt 含量为 3.1%,28 d 增至 10.5%;$Ca(OH)_2$ 含量由 1/4 d 的 0.8%增至 28 d 的 19.0%;C_3S 和 C_2S 含量持续快速下降,表明速凝剂有效消除了诱导期,促进了其快速水化。C_3S 与 C_2S 总含量减少 46%,远高于 AFt 与 $Ca(OH)_2$ 总增量(25.6%),表明有大量无定形 C-S-H 凝胶生成,是后期强度的主要来源。

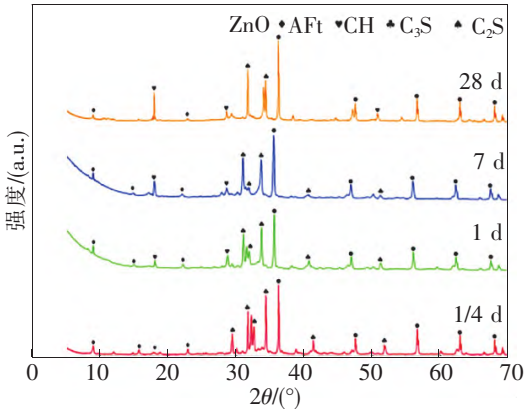


图 4 掺无碱液体速凝剂水泥浆体不同龄期物相组成图

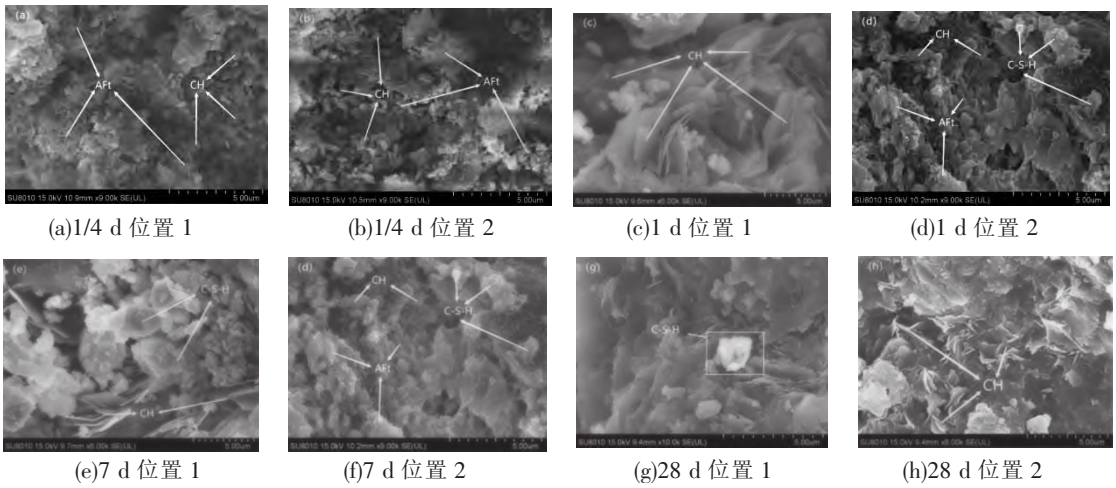
表 2 掺无碱液体速凝剂水泥浆体不同龄期物相含量 %

龄期/d	AFt	$Ca(OH)_2$	C_3S	C_2S
1/4	3.1	0.8	39	29
1	7.5	2.7	34	21
7	8.1	9.5	26	12
28	10.5	19.0	15	7

中国知网 https://www.cnki.net

2.4.2　SEM 形貌分析

采用 SEM 观察掺速凝剂水泥净浆 1/4、1、7、28 d 的微观形貌，如图 5 所示。由图 5(a)、图 5(b)可知，当龄期为 1/4 d 时，可见大量细小的针棒状 AFt 晶体相互穿插搭接，形成网状结构，六角板状$Ca(OH)_2$晶体依附于 AFt 附近。当龄期为 1 d 时(图 5(c)、图 5(d))，AFt 晶体长大，$Ca(OH)_2$ 晶体发生团聚，同时出现 C-S-H 凝胶颗粒，表明 C_3S 已开始水化。当龄期为 7 d 时(图 5(e)、图 5(f))，AFt 晶体进一步长大呈粗棒状，C-S-H 凝胶大量生成，层状团簇状凝胶形态明显。当龄期为 28 d 时(图 5(g)、图 5(h))，水化产物大量生成，层片状 C-S-H 凝胶包裹未水化水泥颗粒和 $Ca(OH)_2$ 晶体，AFt 晶体被包裹于凝胶之中，形成致密整体。



(a)1/4 d 位置 1　(b)1/4 d 位置 2　(c)1 d 位置 1　(d)1 d 位置 2

(e)7 d 位置 1　(f)7 d 位置 2　(g)28 d 位置 1　(h)28 d 位置 2

图 5　掺无碱液体速凝剂硬化水泥浆体不同龄期 SEM 图

2.5　速凝剂促凝机理分析

综合上述分析，该无碱液体速凝剂的促凝机理可归结为有机与无机组分的三元协同作用。首先，硫酸铝快速解离出 Al^{3+}，拟薄水铝石在酸性环境中迅速释放活性 Al_2O_3，两者形成持续供铝模式，足量 Al^{3+} 与浆体中的 Ca^{2+}、SO_4^{2-} 迅速反应生成大量 AFt 晶体(1/4 d 含量 3.1%，28 d 增至 10.5%)，AFt 相互穿插形成网状骨架，实现快速凝结；同时，Li^+ 通过吸附于 C_3S 颗粒表面并部分取代 Ca^{2+} 来降低双电层电位，从而缩短水化诱导期[6]，Mg^{2+} 则能够掺入 C-S-H 凝胶中替代部分 Ca^{2+} 位置，改变其链长和局部结构，促进 C-S-H 的快速生长[11]，两者协同加速 C_3S 水化(C_3S 含量由 1/4 d 的 39%降至 28 d 的 15%)，1 d 即出现 C-S-H 凝胶，7 d 后凝胶大量生成并致密化，使 1 d 抗压强度达到 22.6 MPa；此外，二乙醇胺通过配位作用与 Al^{3+} 形成可溶性络合物，实现了“快速络合-逐步释放”的动态平衡(不加二乙醇胺时 7 d 内即产生 $Al(OH)_3$ 沉淀，而加入后 60 d 内保持澄清)，保障了 Al^{3+} 的有效浓度和持续供应。上述三方面协同作用，使该速凝剂实现了凝结速度、早期强度与后期强度保持率的同步优化(协同机理如图 6 所示)。

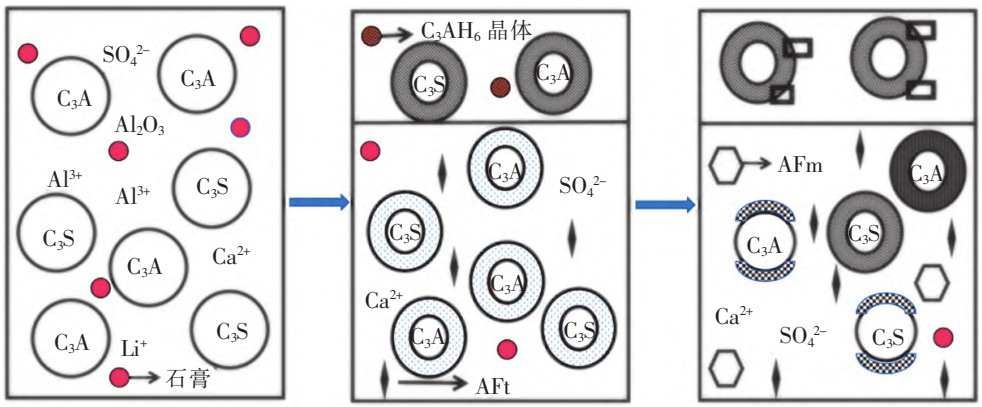


图 6　协同机理示意图

中国知网　https://www.cnki.net

3 工程应用

3.1 工程背景

为验证该速凝剂的工程应用效果,将其应用于延榆铁路文安驿隧道初支喷射混凝土施工。该隧道隧址内黄土陷穴整体散落分布,局部段落发育集中,多呈串珠状及蜂窝状,直径 3～10 m,最深可达 7 m,空间分布复杂,且局部地下水系密集。初支混凝土施工面临喷射混凝土与黄土结合难度大、洞内局部涌水造成掉块严重、回弹率高等不利因素。

3.2 湿喷混凝土配合比设计

依据《铁路隧道湿喷混凝土施工技术规程》Q/CR 9249—2020,选定速凝剂掺量 7%, C25 喷射混凝土配合比见表 3。

表 3 湿喷混凝土试验配合比 kg/m³

水泥	砂子	石子	减水剂	水	速凝剂
449	902	833	4.49	156	31.43

计算 28 d 配制强度

$$f_{cu,0} = f_{cu,k} k_1 k_2 + 1.645\sigma \tag{1}$$

式中,$f_{cu,k}$ 为喷射混凝土立方体抗压强度标准值,取 25 MPa;σ 为标准差,取 5.0 MPa;k_1 为湿喷混凝土密实性系数,取 1.05;k_2 为速凝剂强度影响系数,取 1.00。计算得 28 d 配制强度为 34.5 MPa。

设计湿喷混凝土配合比各龄期强度如表 4 所示。

表 4 设计湿喷混凝土配合比各龄期强度

龄期/d	设计强度/MPa	强度/MPa
1/4	1.0	1.2
1	10.0	18.6
7	24.8	26.8
28	34.5	35.9

3.3 工程应用效果

采用上述配合比,在相同施工工艺下,以相同掺量改良速凝剂对照传统无碱液体速凝剂,对隧道初支混凝土整体性、回弹率及强度进行对比。

3.3.1 喷射混凝土整体性

掺加改良速凝剂的喷射混凝土附着性好,结构密实,无局部掉块与脱空现象,表面平整度高,整体性良好,见图 7。



(a)初期支护 (b)初始喷射 (c)二次喷射 (d)喷射回弹评估

图 7 工程应用现场图

3.3.2 喷射混凝土回弹率对比

采用断面法计算喷射混凝土方量,据此计算回弹率

$$V = (S_1/2 + S_2 + S_3 + \cdots + S_{n-1} + S_n/2)\, L \tag{2}$$

$$V_{人工} = L_{深度} L_{弧长} L_{拱架宽} \tag{3}$$

$$回弹率 = (V_{实} - V)/V_{实} \tag{4}$$

式中,V 为场地总挖方或者总填方体积;$V_{实}$ 为现场实际喷射方量;S_1、S_2、S_3,…,S_n 为各个垂直截面的面积;L 为 2 个相邻垂直截面之间的间距;$L_{深度}$ 为人工测量开挖平均深度;$L_{弧长}$ 为人工测量开挖拱架弧长;

中国知网 https://www.cnki.net

$L_{拱架宽}$为人工测量开挖拱架宽度；$V_{人工}$为人工测量总挖方体积（$V_{人工}$仅用于与仪器检测数据对比，实际值以仪器检测为准）。

回弹率测试具体流程如下：喷射施工前在受喷面区域按 5 m 间距布置测量断面，采用激光断面仪测量喷射前后的断面轮廓面积并按式(2)计算理论方量 V，实际喷射方量 $V_{实}$ 以混凝土运输车出料记录与喷射设备计量系统累计值为准，人工测量数据仅用于校核仪器结果的合理性，每组测试重复 2 次喷射作业。传统速凝剂与改良速凝剂的对比测试在同一隧道段、同一施工班组及同一喷射设备条件下完成，喷射风压保持(0.6±0.05) MPa，喷嘴与受喷面距离 1.0～1.2 m，喷射角度与受喷面垂直，单层喷射厚度 5～8 cm，混凝土坍落度控制在(180±20) mm。

回弹率结果如表 5 所示。由表 5 可知，掺加传统速凝剂的湿喷混凝土平均回弹率为 30.0%，而掺加改良速凝剂的平均回弹率为 17.6%，降幅达 41.3%，显著降低了材料损耗。

表 5　掺加传统、改良速凝剂湿喷混凝土回弹率

次数	理论方量 /m³	实际方量 /m³		回弹率 /%	
		掺加传统速凝剂	掺加改良速凝剂	掺加传统速凝剂	掺加改良速凝剂
第 1 次	32.5	42.6	37.6	31.1	17.5
第 2 次	31.5	42.5	37.1	28.9	17.7

对比可见，同工艺水平下，掺加传统速凝剂的湿喷混凝土的回弹率平均值为 30.0%，而掺加改良速凝剂的湿喷混凝土的回弹率平均值为 17.6%，改良速凝剂使现场湿喷混凝土的回弹率显著降低。

3.3.3　喷射混凝土强度对比

现场取样测试不同龄期抗压强度，结果如表 6 所示。掺加改良速凝剂的湿喷混凝土各龄期强度均高于传统速凝剂组，且 7 d 至 28 d 龄期间未出现强度损失，表明该速凝剂具有优异的早期强度和后期强度稳定性。

表 6　掺加不同速凝剂湿喷混凝土各龄期强度

龄期/d	掺加传统速凝剂强度 /MPa	掺加改良速凝剂强度 / MPa
1/4	0	1.2
1	10.7	19.4
7	26.0	28.5
28	35.0	37.6

4　结论

(1)基于有机-无机复合改性策略，以硫酸铝为铝源、二乙醇胺为络合剂，复配硫酸镁、拟薄水铝石与碳酸锂，制备了一种新型无碱液体速凝剂。当掺量为 7%时，3 种水泥净浆初凝时间≤4 min、终凝时间≤10 min，28 d 抗压强度比≥90%；其中，曲寨水泥 1 d 抗压强度最高达 22.6 MPa。此外，该速凝剂与不同水泥、矿物掺合料及减水剂适应性良好。

(2)该速凝剂的促凝机制在于有机组分与无机组分的三元协同效应：硫酸铝与拟薄水铝石协同供铝保障 AFt 快速生成与骨架构建，二乙醇胺络合稳定金属离子维持反应持续进行，Li^+ 与 Mg^{2+} 的引入则显著加速 C_3S 水化并缩短诱导期，三者共同促进水化产物致密化，实现了早期强度与后期强度保持率的同步提升。

(3)工程应用表明，该速凝剂配制的 C25 湿喷混凝土各龄期强度均满足设计要求，现场回弹率由 30.0%降至 17.6%，喷射混凝土整体性良好，可适用于复杂地质条件下的隧道支护工程。

参　考　文　献

[1]杨力远，田俊涛，杨艺博，等. 喷射混凝土液体速凝剂研究现状[J]. 隧道建设，2017，37(5)：543-552.

中国知网　https://www.cnki.net

[2]万甜明，舒豆豆，罗率，等. 铝酸盐型低碱液体速凝剂的合成工艺及性能研究[J]. 新型建筑材料，2019，46(6)：127-130.

[3]古朝建，任豪，任启进，等. 氟铝络合物制备无碱液体速凝剂及性能研究[J]. 新型建筑材料，2019，46(6)：123-126.

[4]Sheng Yanping，Xue Bin，Li Haibin，et al. Preparation and performance of a new-type alkali-free liquid accelerator for shotcrete[J]. Advances in Materials Science and Engineering，2017，2017(1)：1264590.

[5]Zhang Jianbing，Liu Rongjin，Fu Siyuan，et al. Preparation and performance of a fluorine-free and alkali-free liquid accelerator for shotcrete[J]. Journal of Renewable Materials，2021，9(11)：2001-2013.

[6]Wang Lin，He Xinxin，Shu Chunxue，et al. Research on the working performance and the corresponding mechanical strength of polyaluminum sulfate early strength alkali-free liquid accelerator matrix cement[J]. Materials (Basel)，2022，15(22)：8086.

[7]陈荣辉，李顺凯，窦华康，等. 常温下无氟无碱液体速凝剂的制备及其机理研究[J]. 新型建筑材料，2025，52(7)：94-97.

[8]Huang Wang，Wu Zhihong，Li Hui，et al. Utilizing the adsorbability of pseudoboehmite for tailoring the stability of an aluminum sulfate alkali-free accelerator for shotcrete[J]. Langmuir，2024，40(11)：5878-5889.

[9]Niu Mengdie，Li Guoxin，Zhang Jiangbo，et al. Preparation of alkali-free liquid accelerator based on aluminum sulfate and its accelerating mechanism on the hydration of cement pastes[J]. Construction and Building Materials，2020，253：119246.

[10]Cui Ying，Tan Zhongsheng，Zhou Zhenliang，et al. Preparation and application of low rebound liquid alkali-free accelerator for shotcrete[J]. Construction and Building Materials，2023，367：130220.

[11]Ellina B，Barbara L，Fabien L G，et al. Effect of magnesium on calcium silicate hydrate (C-S-H)[J]. Cement and Concrete Research，2017，97：61-72.

Study on the Organic-Inorganic Composite Modification Mechanism and Application Performance of Alkali-free Liquid Accelerator

ZHANG Yanxin

(Tianjin Zhongtie Engineering Inspection Co. Ltd.，Tianjin 300308，China)

Abstract：To address the problems of low early strength，significant later-stage strength loss，and poor stability in existing alkali-free liquid accelerators，a novel alkali-free liquid accelerator was prepared via an organic-inorganic composite modification strategy. Aluminum sulfate was used as the aluminum source，diethanolamine was used as an organic complexing agent to stabilize Al^{3+}，and magnesium sulfate，pseudoboehmite，and lithium carbonate were compounded. The performance and accelerating mechanism were systematically investigated through setting time tests，compressive strength tests，and microstructural analysis (XRD，SEM). At a dosage of 7%，the initial setting time of the three types of cement pastes was ≤4 min，the final setting time was ≤10 min，and the 28 d compressive strength ratio was ≥90%；among them，the 1 d compressive strength of Quzhai cement reached 22.6 MPa. Microstructural analysis reveals a ternary accelerating mechanism consisting of synergistic aluminum supply from aluminum sulfate and pseudoboehmite，accelerated C_3S hydration by Li^+ and Mg^{2+}，and stabilization by diethanolamine complexation. Engineering application shows that the C25 wet-mix shotcrete prepared with this accelerator exhibited a reduction in rebound rate from 30.0% to 17.6%，demonstrating excellent engineering adaptability.

Key words：alkali-free liquid accelerator；shotcrete；early strength；rebound rate；accelerating mechanism

中国知网 https://www.cnki.net