

文章编号:1007-9629(2023)09-1011-12

铁路隧道 C30 早高强喷射混凝土试验研究与应用

高玉军^{1,2,3,*}, 邓 翀^{1,2,3}, 秦明强^{1,2,3}, 刘旷怡^{1,2,3}, 唐 凯^{1,2,3}

(1. 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 海工结构新材料及维护加固技术
湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430040; 3. 中交二航武汉港湾新材料有限公司, 湖北 麻城 438300)

摘要:为了解决传统 C30 喷射混凝土早期强度低、难以满足铁路隧道高性能支护体系 8、24 h 抗压强度分别不低于 10、15 MPa 设计要求的问题, 试验研究了原材料特性、配合比设计、纳米早强剂与无碱速凝剂的配合使用以及混凝土拌和物温度与养护温度的协同影响, 配制出了工作性良好、早期强度高且后期强度无倒缩的 C30 早高强喷射混凝土, 并对其进行了现场工艺试验验证。结果表明, 所制备的 C30 早高强喷射混凝土不仅流动性好, 坍落扩展度经时损失小, 回弹率低, 各项性能指标均能满足设计及施工的要求。

关键词:铁路隧道; 高性能支护体系; 早高强喷射混凝土; 早期强度; 纳米早强剂; 无碱速凝剂; 拌和物温度; 养护温度

中图分类号: TU528.31

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2023.09.009

Experimental Research and Application of C30 Early and High-Strength Shotcrete in Railway Tunnel

GAO Yujun^{1,2,3,*}, DENG Chong^{1,2,3}, QIN Mingqiang^{1,2,3}, LIU Kuangyi^{1,2,3}, TANG Kai^{1,2,3}

(1. CCCC Wuhan Harbor Engineering Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430040, China; 2. Hubei Key Laboratory of Advanced Materials and Reinforcement Technology Research for Marine Environment Structures, Wuhan 430040, China; 3. CCCC SHEC Wuhan Harbour New Materials Co., Ltd., Macheng 438300, China)

Abstract: To solve the problem that the early strength of traditional C30 shotcrete is low, and difficult to meet the design requirements that 8 h compressive strength is not lower than 10 MPa and 24 h compressive strength is not lower than 15 MPa for railway tunnels high performance support system, the C30 high early-strength shotcrete with good workability, high early strength and no lowering of late strength was prepared and verified in on-site tests by the analysis of raw material characteristics, ratio design, the use of nano early-strength agent and alkali-free quick-setting agent, and the synergistic influence of concrete mix temperature and curing temperature. The results show that the prepared C30 high early-strength shotcrete has good fluidity, small loss of slump over time and low rebound rate. All performance indicators can meet the design and construction requirements.

Key words: railway tunnel; high performance support system; shotcrete; early strength; nano early-strength agent; alkali-free quick-setting accelerator; concrete temperature; curing temperature

川藏铁路雅安至林芝段新建隧道共计 72 座, 总长 838 km, 隧线比高达 83.0%, 隧道占比大, 特长隧道及隧道群密集^[1]。其中, 全线隧道轨面高程在 3 000 m 及以上的隧道共计 46 座, 总长 636 km, 占隧道总长的 75.6%, 高海拔隧道的占比较大^[2]。隧道建设将会面临大量的深大活动断裂带^[3-4]、高地应力(岩

爆、软岩大变形)^[5-6]、高频高烈度地震带^[7-8]、高地温^[9-10]和高原高寒^[11-12]等不良地质及复杂恶劣的环境问题。对此, 中国铁路隧道设计者们提出了一种高性能支护体系, 相比于传统支护体系, 该体系与围岩变形的协调性好, 安全性、韧性和耐久性也比较高^[13-14]。然而, 该体系对喷射混凝土早期强度的要求很高, 依

收稿日期: 2022-12-07; 修订日期: 2023-01-30

第一作者(通讯作者): 高玉军(1987—), 男, 湖北武汉人, 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司高级工程师, 硕士。E-mail: 510908052@qq.com

据川藏铁路隧道工程设计标准的规定,C30早高强喷射混凝土的8、24 h抗压强度应不低于10、15 MPa^[15],这远高于传统C30喷射混凝土对早期强度的要求(24 h抗压强度不低于10 MPa)^[16].因此,研究C30早高强喷射混凝土的配制及应用关键技术对于快速提升隧道支护刚度、增强围岩稳定性、提高施工工效和保证施工安全具有重要的意义.

近年来,关于喷射混凝土小时强度的研究鲜有报道.王子明等^[17]将无碱液体速凝剂与促凝早强剂进行复掺,其6、8、24 h抗压强度最高分别可达3.8、6.3、14.0 MPa;张兴德等^[18]将HB7-2W型纳米材料应用在喷射混凝土中,其12、24 h抗压强度分别可达5.7、10.5 MPa;赵爽等^[19]使用苏博特产SBT[®]-HDC(Ⅱ)喷射混凝土纳米掺合料配制郑万高铁巫山隧道C25喷射混凝土,其3、12、24 h抗压强度分别达到3.5、8.4、15.3 MPa;李子强^[20]在C25喷射混凝土中掺入适量的早强剂三乙醇胺和硫酸铁并采用硅灰部分替代水泥,其4、8、12、24 h抗压强度分别可达0.82、2.31、4.70、11.93 MPa;李冬等^[21]将长度30.0 mm、直径0.5 mm的端钩型钢纤维掺入到喷射混凝土中,研究了不同钢纤维掺量下混凝土的弯曲性能,在0、20、40、60 kg/m³钢纤维掺量下其10 h抗压强度分别为4.0、5.1、5.1、3.8 MPa.然而,这些研究结果与C30早高强喷射混凝土8、24 h抗压强度的设计要求还相差甚远.

从早强机理看,无碱速凝剂主要通过迅速促进

水泥水化,生成大量的钙矾石,加速混凝土凝结来提高其早期强度,但过量钙矾石会延缓硅酸三钙(C₃S)的水化,不利于强度的增长^[22-24].纳米水化硅酸钙(C-S-H)能在水泥水化初期提供成核位点,降低成核势能,加速水泥水化,尤其是C₃S的水化,促进早期强度的增长,且能保证后期强度不倒缩^[25-27].

因此,本文利用自制纳米早强剂中C-S-H纳米微晶的晶核早强作用和无碱速凝剂的促凝增强作用,研究了纳米早强剂对水泥浆体流动性和水化程度的影响,并通过水泥和洞渣自产砂石料的特性分析、配合比的设计与试验,研究了纳米早强剂、无碱速凝剂、混凝土拌和物温度(拌和物温度指的是添加无碱速凝剂前混凝土拌和物的温度,主要通过提前将试验原材料置于特定环境温度下并在拌和前进行温度测试,确保拌和物温度在试验研究范围内)与养护温度对喷射混凝土性能的影响,配制出了工作性良好、不同龄期抗压强度均符合设计要求的C30早高强喷射混凝土,且经现场工艺试验验证,其8、24 h抗压强度也均达到了设计要求,回弹率低,能满足施工要求.

1 原材料

1.1 水泥

水泥为华新(迪庆)有限公司产P·O 42.5水泥,其主要特性见表1.

表1 水泥的主要特性

Table 1 Main characteristics of cement

Specific surface area/(m ² ·kg ⁻¹)	Density/(kg·m ⁻³)	Standard consistency water consumption(by mass)/%	Setting time/min		Compressive strength/MPa		Bending strength/MPa	
			Initial	Final	3 d	28 d	3 d	28 d
326	3 060	26.8	164	202	27.5	47.6	4.5	7.8

1.2 集料

粗集料为川藏铁路某标段利用洞渣自产的5~

10 mm连续级配碎石;细集料为洞渣自产的细度模数为2.6的Ⅱ区中砂.集料的主要特性分别见表2、3.

表2 粗集料的主要特性

Table 2 Main characteristics of coarse aggregate

Apparent density/(g·cm ⁻³)	Compact void ratio (by volume)/%	Total content of needle flake particles(by mass)/%	Crush value(by mass)/%	w(mud)/%	w(mud lump)/%
2.740	40.0	1.0	12.0	0.6	0.1

表3 细集料的主要特性

Table 3 Main characteristics of fine aggregate

Apparent density/(g·cm ⁻³)	Crush value(by mass)/%	Methylene blue value/(g·kg ⁻¹)	w(stone powder)/%	w(mud lump)/%	w(mica)/%	w(light substance)/%
2.720	17.0	0.6	6.2	1.0	0.4	0.3

1.3 功能材料

减水剂为武汉产CP-J缓凝型聚羧酸高性能减水

剂,固含量(质量分数,文中涉及的含量、减水率、水胶比等除特别说明外均为质量分数或质量比)

20.8%,减水率 27.4%;自制纳米早强剂为一种 C-S-H 纳米微晶与有机聚合物杂化的白色悬浮液,固含量 19.2%,平均粒径 97.3 nm,钙硅比 1.48,其中有机聚合物占纳米早强剂总质量的 1.1%;速凝剂为山西产早强型的液体无碱速凝剂,固含量 51.9%。

2 试验

2.1 水化程度测试

将制备好的水泥浆体倒入试模,振实、抹面成型后用保鲜膜密封,放入标准养护箱中养护 8、24 h 后敲成小碎块并用无水乙醇浸泡 24 h,然后放入真空干燥箱 45 °C 烘干直至恒重,取部分小碎块用玛瑙研钵磨细并过 80 μm 筛备用。

将坩埚和粉末样品放入 105 °C 的真空干燥箱中烘干至恒重,然后称取 1.000 0 g 粉末样品(每个样品称取 3 份)装入坩埚后置于高温炉中以 10 °C/min 的速率升温至 1 050 °C 并恒温 6 h,最后将坩埚取出置于干燥皿中冷却至常温,称重并取其平均值。

水化样的烧失量(W_1)和化学结合水的生成量(Q)按式(1)、(2)计算。

$$W_1 = (m_0 - m_1) / m_1 \quad (1)$$

$$Q = (W_1 - W_0) / (1 - W_0) \quad (2)$$

式中: m_0 为烧前样品的质量,g; m_1 为烧后样品的质量,g; W_0 为未水化试样的烧失量,%。

水化程度(α)按式(3)计算。其中:0.24为每克硅酸盐完全水化所需水的含量。

$$\alpha = Q / 0.24 \quad (3)$$

2.2 其他性能测试

水泥净浆流动度测试参照 GB/T 8077—2012《混凝土外加剂匀质性试验方法》;喷射混凝土拌和物坍落扩展度测试参照 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》;回弹率测试参照 JGJ/T 372—2016《喷射混凝土应用技术规程》中的附录 G;喷射混凝土抗压强度试件的制作采用喷大板切割法,具体参照 TB 10424—2018《铁路混凝土工程施工质量验收标准》中的附录 J,所制作的抗压强度试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm;抗压强度测试参照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》,尺寸换算系数为 0.95。

3 掺有纳米早强剂的水泥浆体流动性研究

试验在水胶比为 0.37 且纳米早强剂掺量为水泥总质量的 0%~15% 时,通过调节减水剂掺量来控制水泥浆体的初始流动度保持在(200±20) mm,并分

别测试其 1 h 流动度,结果如图 1 所示。由图 1 可以看出,当纳米早强剂掺量从 0% 增至 15% 时,减水剂掺量降低了 87.5%,水泥浆体的 1 h 流动度经时损失也逐渐减小,且当纳米早强剂掺量达到 10% 及以上时,水泥浆体的 1 h 流动度会略高于初始流动度。由此可知,纳米早强剂的掺入不仅改善了水泥浆体的初始流动性,而且对其流动性的保持也有一定程度的提高。这主要是因为纳米早强剂中吸附于 C-S-H 纳米微晶表面的羧酸共聚物与减水剂具有类似的分子结构,对水泥颗粒也具有一定的分散作用,能在水泥水化过程中不断从微晶表面脱吸附而游离于水泥浆体中,补充水泥水化对减水剂分子的消耗,进而保持对水泥颗粒的持续分散,使水泥浆体保持良好的流动性。

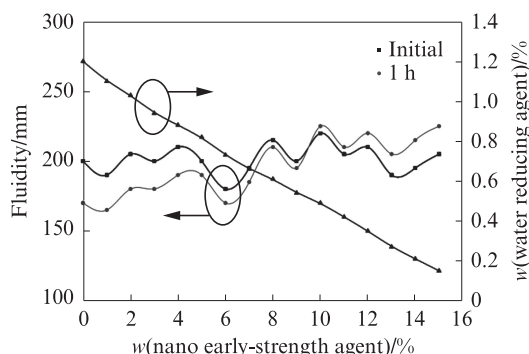


图1 纳米早强剂掺量与水泥净浆流动性的关系

Fig. 1 Relationship between nano early-strength agent amount and cement paste fluidity

4 纳米早强剂掺量对水化程度的影响

图 2 为纳米早强剂掺量与水泥净浆水化程度的关系。由图 2 可以看出:

(1)随着纳米早强剂掺量的增加,水泥净浆 8、24 h 龄期的水化程度逐渐提高;对于 8 h 龄期的水泥

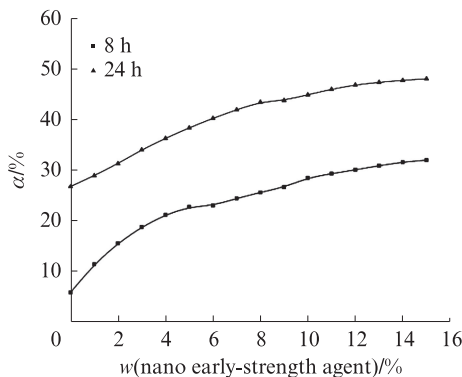


图2 纳米早强剂掺量与水泥净浆水化程度的关系

Fig. 2 Relationship between nano early-strength agent amount and hydration degree of cement paste

净浆,当纳米早强剂掺量从0%增至5%时,其水化程度的增幅最大,为284.1%;当纳米早强剂掺量从5%增至15%时,其水化程度的增幅仅为40.6%。

(2)对于24 h龄期的水泥净浆,其水化程度的增长较为平缓.当纳米早强剂掺量从0%增至15%时,其水化程度的增幅为79.2%,说明纳米早强剂的掺入对水泥早期特别是8 h龄期水化程度的提升作用显著。

这主要是因为C-S-H纳米微晶的加入提供了大量的成核位点,降低了水泥水化产物C-S-H凝胶的成核势垒,加速了水化产物的形成,水化程度增加.此外,随着龄期的增长,在相同的纳米早强剂掺量下,水泥净浆24 h龄期的水化程度较8 h龄期的增长

幅度在50.2%~152.6%之间,且在纳米早强剂掺量较低时增长幅度较高.这也说明纳米早强剂的促水化作用主要发生在水泥水化初期,对后期水化程度的提升相对较弱.因此,为充分发挥纳米早强剂在C30早高强喷射混凝土中的促水化作用,最大幅度地提升其8 h抗压强度,纳米早强剂掺量宜为5%及以上。

5 C30早高强喷射混凝土的配合比设计

根据JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》、JGJ/T 372—2016和TB 10417—2018《铁路隧道工程施工质量验收标准》,经理论计算与试验研究,选取如表4所示P1~P5系列C30早高强喷射混

表4 试验的配合比
Table 4 Mix proportions of experiments

Specimen No.	Mix proportion/(kg·m ⁻³)				$w(\text{nano early-strength agent})/\%$	$w(\text{water reducing agent})/\%$
	Cement	Gravel	Sand	Water		
P1-0	460	845	879	166	0	1.20
P1-5	460	845	879	166	5	0.93
P1-8	460	845	879	166	8	0.74
P1-10	460	845	879	166	10	0.68
P1-12	460	845	879	166	12	0.61
P1-15	460	845	879	166	15	0.40
P2-0	470	838	872	170	0	1.20
P2-5	470	838	872	170	5	0.93
P2-8	470	838	872	170	8	0.74
P2-10	470	838	872	170	10	0.68
P2-12	470	838	872	170	12	0.61
P2-15	470	838	872	170	15	0.40
P3-0	480	846	846	178	0	1.20
P3-5	480	846	846	178	5	0.93
P3-8	480	846	846	178	8	0.74
P3-10	480	846	846	178	10	0.68
P3-12	480	846	846	178	12	0.61
P3-15	480	846	846	178	15	0.40
P4-0	490	839	839	181	0	1.20
P4-5	490	839	839	181	5	0.93
P4-8	490	839	839	181	8	0.74
P4-10	490	839	839	181	10	0.68
P4-12	490	839	839	181	12	0.61
P4-15	490	839	839	181	15	0.40
P5-0	500	832	832	185	0	1.20
P5-5	500	832	832	185	5	0.93
P5-8	500	832	832	185	8	0.74
P5-10	500	832	832	185	10	0.68
P5-12	500	832	832	185	12	0.61
P5-15	500	832	832	185	15	0.40

混凝土配合比作为试验研究对象.其中,根据上文中纳米早强剂和减水剂掺量对水泥浆体流动性的协同影响规律以及纳米早强剂掺量与水泥净浆水化程度的关系,选取纳米早强剂掺量分别为0%、5%、8%、10%、12%和15%,同时控制混凝土拌和物的坍落扩展度在 (550 ± 20) mm,对应的减水剂掺量分别为1.20%、0.93%、0.74%、0.68%、0.61%和0.40%.

6 C30早高强喷射混凝土的性能研究

6.1 混凝土的工作性能研究

图3为纳米早强剂掺量与混凝土坍落扩展度的关系.由图3可以看出:

(1)随着纳米早强剂掺量的增加,为使得混凝土拌和物的坍落扩展度保持在 (550 ± 20) mm之间,所

需减水剂的掺量逐渐降低.与此同时,混凝土拌和物的1 h坍落扩展度损失也随着纳米早强剂掺量的增加而逐渐减小.

(2)与未参加纳米早强剂的混凝土相比,当纳米早强剂的掺量达到15%以后,混凝土拌和物的1 h坍落扩展度损失从30~40 mm降至0~10 mm,说明纳米早强剂的掺入有利于混凝土拌和物工作性能的保持.这主要是因为纳米早强剂中吸附于C-S-H纳米微晶表面的羧酸共聚物与减水剂具有类似的分子结构,对水泥颗粒也具有一定的分散作用,能在水泥水化过程中不断从微晶表面脱吸附而游离于混凝土拌和物中,然后逐步补充水化作用对减水剂分子的消耗,进而保持对水泥颗粒的持续分散,保证混凝土拌和物具有良好的流动保持性.

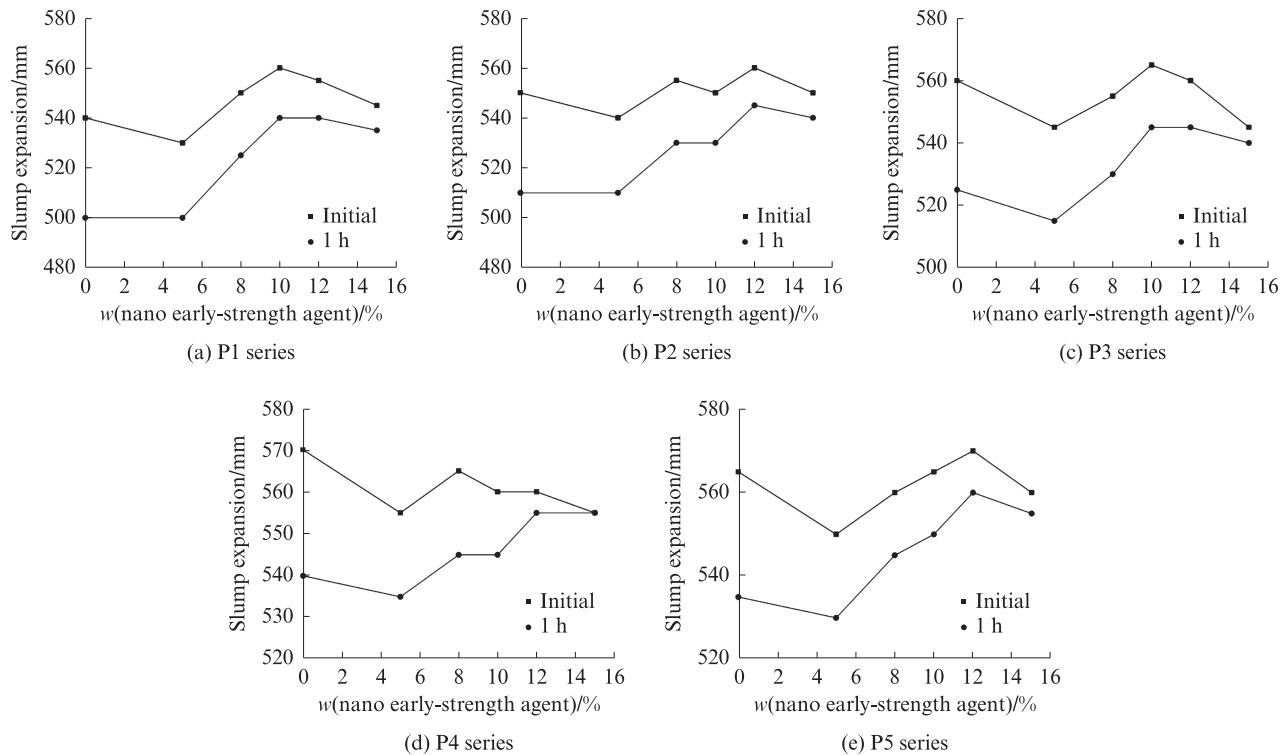


图3 纳米早强剂掺量与混凝土坍落扩展度的关系

Fig. 3 Relationship between nano early-strength agent amount and concrete slump expansion

6.2 纳米早强剂掺量对混凝土性能的影响

试验控制混凝土拌和物温度为 $20\sim 25$ °C、养护温度为 $20\sim 25$ °C,无碱速凝剂掺量取10%,研究了纳米早强剂掺量对混凝土抗压强度的影响,结果如图4所示.由图4可以看出:

(1)随着纳米早强剂掺量的增加,P1~P5系列混凝土不同龄期的抗压强度均逐步增加.对于8 h龄期的混凝土,当纳米早强剂掺量从0%增至5%,P1~P5系列混凝土抗压强度的增幅均最大,分别为

84.2%、88.1%、91.1%、95.7%和102.0%,这与纳米早强剂提升8 h水泥水化程度的变化规律一致.

(2)将纳米早强剂掺量15%与5%时的结果相比,P1~P5系列混凝土8 h抗压强度的增幅相对较低,分别为64.3%、53.2%、54.7%、46.7%和34.0%.此外,对于P1~P5系列混凝土,为达到8 h抗压强度不低于10 MPa的设计要求,所需纳米早强剂的掺量分别为12%、10%、8%、8%和5%及以上.这主要是因为当水泥用量较低时,为达到相同的强度,需要掺

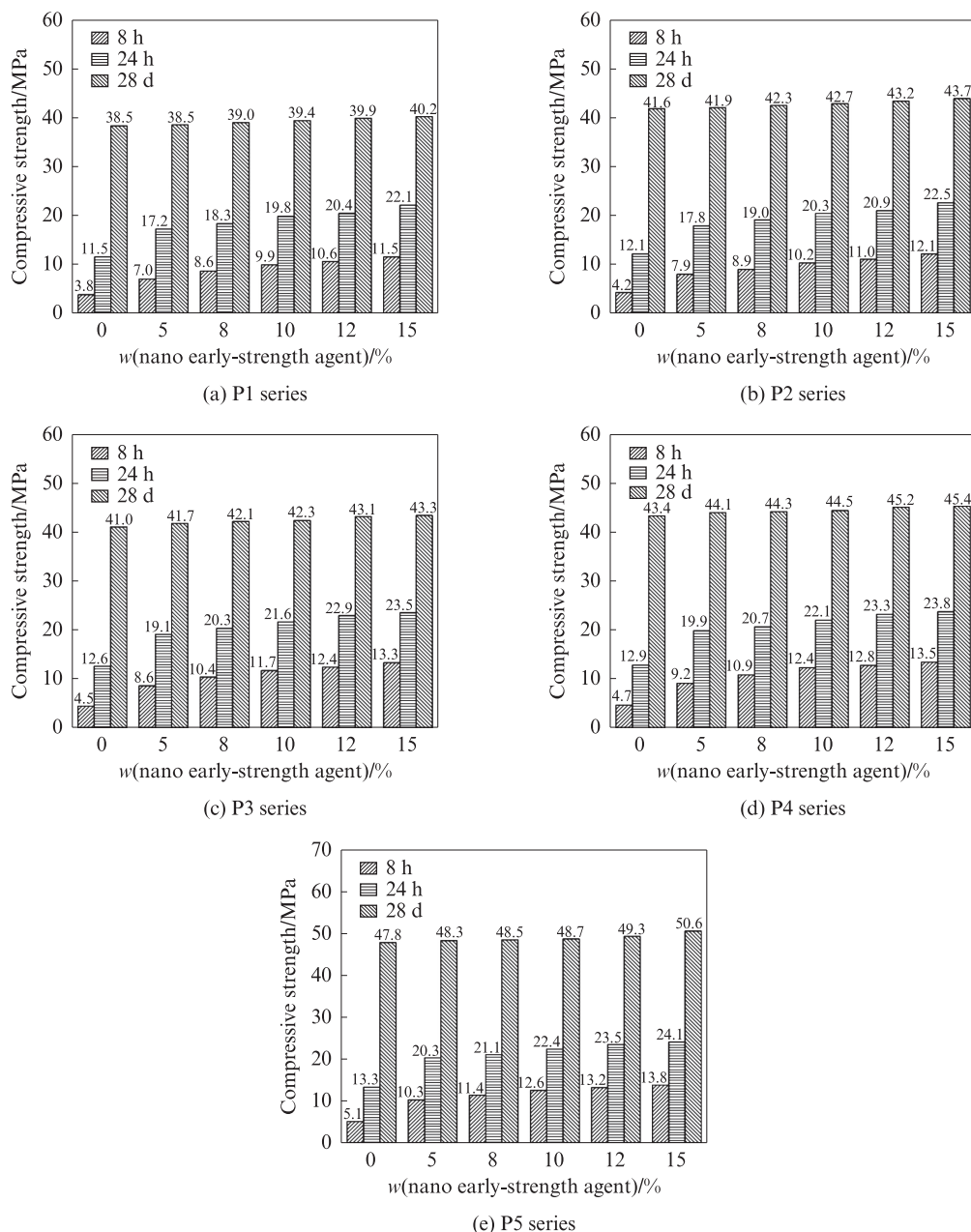


图4 纳米早强剂掺量对混凝土抗压强度的影响

Fig. 4 Effects of nano early-strength agent amounts on compressive strength of concretes

加更多纳米早强剂来为水泥的早期水化提供成核位点,促进更多水化产物的形成.当水泥用量较高时,水泥自身早期水化产物的含量较高,较低掺量的纳米早强剂即可以促进同等数量水化产物的形成,从而保证达到相同的强度要求.

(3)将纳米早强剂掺量15%与5%时的结果相比,P1~P5系列混凝土24 h抗压强度的增幅也逐渐降低,分别为28.5%、26.4%、23.0%、19.6%和18.7%,但各配合比混凝土的24 h抗压强度均能达到15 MPa以上.P1~P5系列混凝土28 d抗压强度的增幅分别仅有5.0%、5.0%、5.6%、4.6%和5.9%,说明纳米早强剂对混凝土的后期强度影响不大.

6.3 无碱速凝剂掺量对混凝土性能的影响

试验控制混凝土拌和物温度为20~25℃、养护温度为20~25℃,纳米早强剂掺量取10%,研究了无碱速凝剂掺量对混凝土抗压强度的影响,结果如图5所示.由图5可以看出:混凝土各龄期的抗压强度均随着无碱速凝剂掺量的增加先增加后降低;当无碱速凝剂掺量从6%增加到10%时,P1~P5系列混凝土8 h抗压强度的增幅分别为30.5%、30.6%、21.6%、19.8%和19.1%,24 h抗压强度的增幅分别为18.4%、17.6%、16.2%、15.3%和17.7%,28 d抗压强度的增幅分别为6.3%、5.8%、6.7%、5.8%和5.4%.说明在此范围内无碱速凝剂

掺量的增加对P1、P2系列混凝土的8 h抗压强度的提升作用最大,而对P3~P5系列混凝土的8 h抗压强度的提升效果基本相当,且对P1~P5系列混凝土的24 h和28 d抗压强度的促增长作用也基本相同。

这主要是因为无碱速凝剂能短时间加速水泥水化,生成大量的钙矾石,加速了混凝土的凝结。适量的钙矾石在混凝土基体中起着骨架作用,能大大提高其早期强度。对于水泥用量较低的P1和P2系列混凝土,6%掺量的无碱速凝剂促使水泥水化生成的钙矾石数量较少,强度较低;当无碱速凝剂掺量达到10%后,钙矾石的数量增多,混凝土的强度出现

大幅增长。对于水泥用量较高的P3~P5系列混凝土,无碱速凝剂掺量的变化对生成钙矾石数量的影响不大,因而其8 h抗压强度的增幅也基本无差异。由于无碱速凝剂对水泥水化的促进作用主要在早期,因此其掺量的变化对P1~P5系列混凝土24 h和28 d抗压强度的影响不大。此外,当无碱速凝剂的掺量超过10%后,生成钙矾石的数量过多,基体密实度降低,同时也抑制了C₃S的水化, P1~P5系列混凝土各龄期的抗压强度降低。因此,无碱速凝剂的掺量宜为10%。

6.4 拌和物温度对混凝土性能的影响

试验取纳米早强剂掺量为10%、无碱速凝剂掺

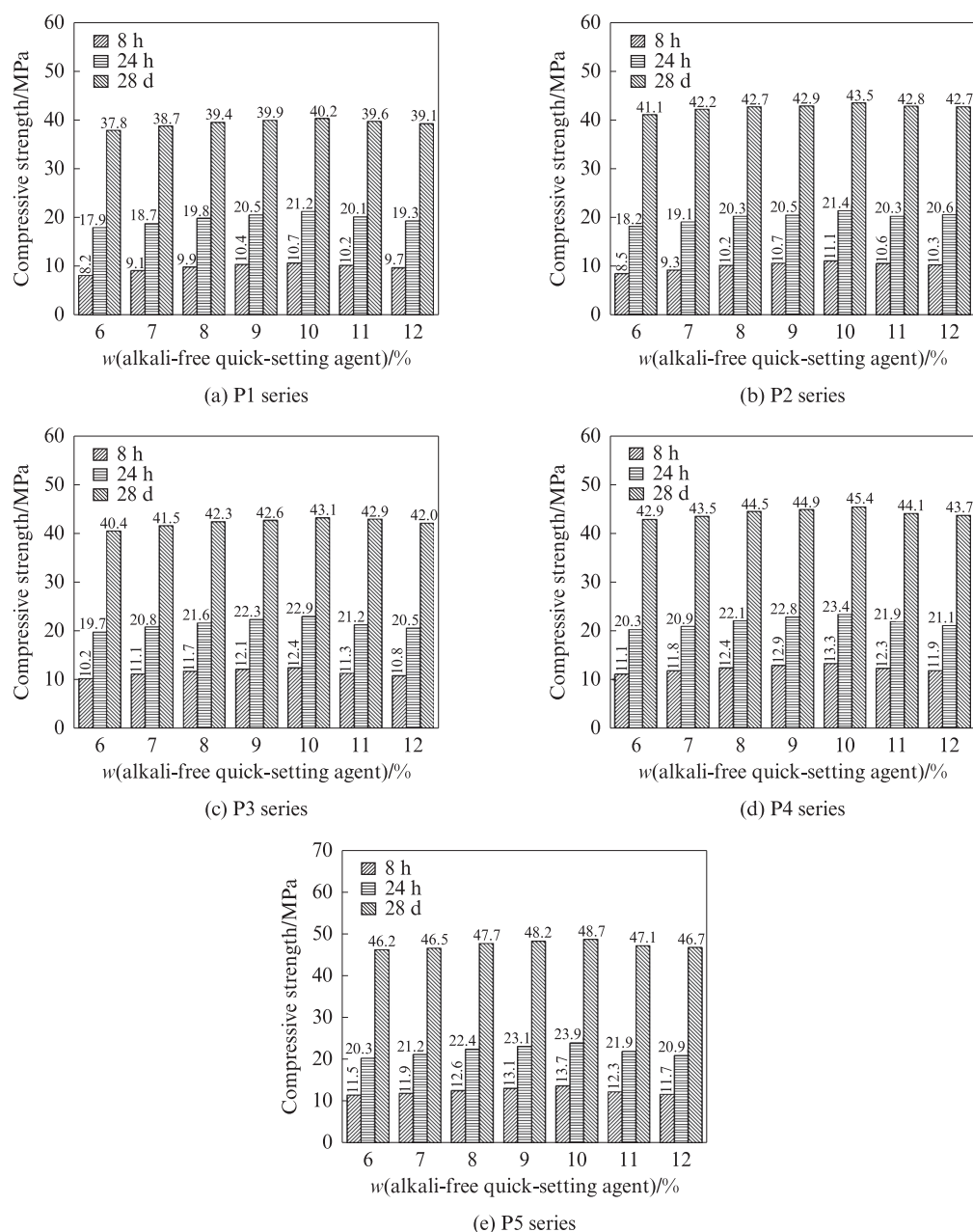


图5 无碱速凝剂掺量对混凝土抗压强度的影响

Fig. 5 Effects of alkali-free quick-setting agent amounts on compressive strength of concretes

量为10%并控制养护温度为20~25℃,研究了拌和物温度对混凝土抗压强度的影响,结果如图6所示。由图6可以看出:

(1)随着拌和物温度的提升,与10~15℃条件下相比,P1~P5系列混凝土25~30℃条件下8 h抗压强度的增幅分别为18.6%、16.7%、21.3%、21.1%和17.8%,24 h抗压强度的增幅分别为10.6%、10.4%、14.1%、11.1%和7.1%,28 d抗压强度的增幅分别为4.9%、4.6%、6.0%、4.6%和3.7%,说明拌和物温度对P1~P5系列混凝土抗压强度增长的影响不大。这主要是因为纳米早强剂的诱导结晶作用和无碱速凝剂的促凝作用大大加速了混凝土的早期水化,产

生了大量的水化热,在一定程度提升了混凝土自身的温度,可以保证混凝土强度的增长。

(2)对于P1系列混凝土,当拌和物温度在10~15℃时,其8 h抗压强度未达到10 MPa,且15~20℃时的8 h抗压强度也仅有10.3 MPa,富余系数较低,仅有3.0%。同样,对于P2系列混凝土,当拌和物温度在10~15℃和15~20℃时,其8 h抗压强度也仅有10.2、10.5 MPa,且P3系列混凝土在10~15℃时的8 h抗压强度为10.8 MPa,富余系数均未超过10%。因此,考虑到8 h抗压强度的富余,对于P1~P5系列混凝土,其拌和物温度分别宜控制在25、20、15、10、10℃以上。

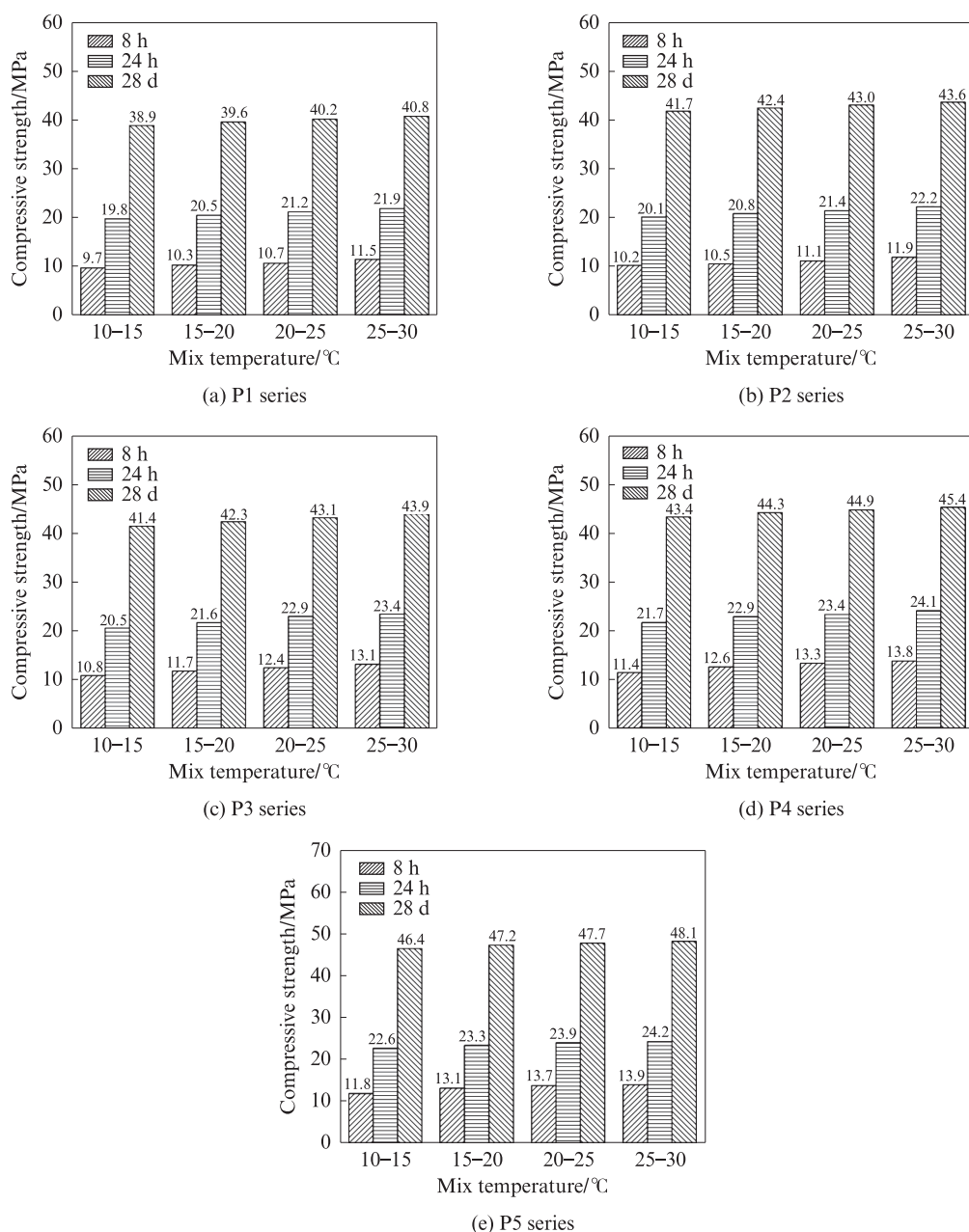


图6 拌和物温度对混凝土抗压强度的影响

Fig. 6 Effects of mix temperatures on compressive strength of concretes

6.5 养护温度对混凝土性能的影响

试验取纳米早强剂掺量为10%、无碱速凝剂掺量为10%并控制拌和物温度为20~25℃,研究了养护温度对混凝土抗压强度的影响,结果如图7所示。由图7可以看出:

(1)P1~P5系列混凝土的抗压强度随着养护温度的提高逐渐增加,与10~15℃条件下相比,其25~30℃条件下8 h抗压强度的增幅分别为23.4%、24.0%、28.4%、29.9%和24.8%,24 h抗压强度的增幅分别为18.0%、18.2%、16.7%、15.8%和13.0%,28 d抗压强度的增幅分别为19.0%、16.9%、16.4%、14.6%和12.5%,说明养护温度的增加对P1~P5系

列混凝土各龄期的抗压强度均有一定程度的提升作用。这主要是因为随着养护温度的提高,水泥的水化程度增加,更多的水化产物填充并胶结于混凝土基体中,使得基体更加密实,混凝土的抗压强度增加。

(2)当养护温度为10~15℃时,仅有P5系列混凝土的8 h抗压强度的富余系数较高,超过10%,P1和P2系列混凝土均未达到10 MPa,P3和P4系列混凝土的强度富余系数较低,仅有2%和7%。因此,对于P1~P5系列混凝土,其养护温度分别宜控制在25、20、20、15、10℃以上。

综上,对于不同配合比的C30早高强喷射混凝土,为使其8、24 h抗压强度分别能达到10、15 MPa

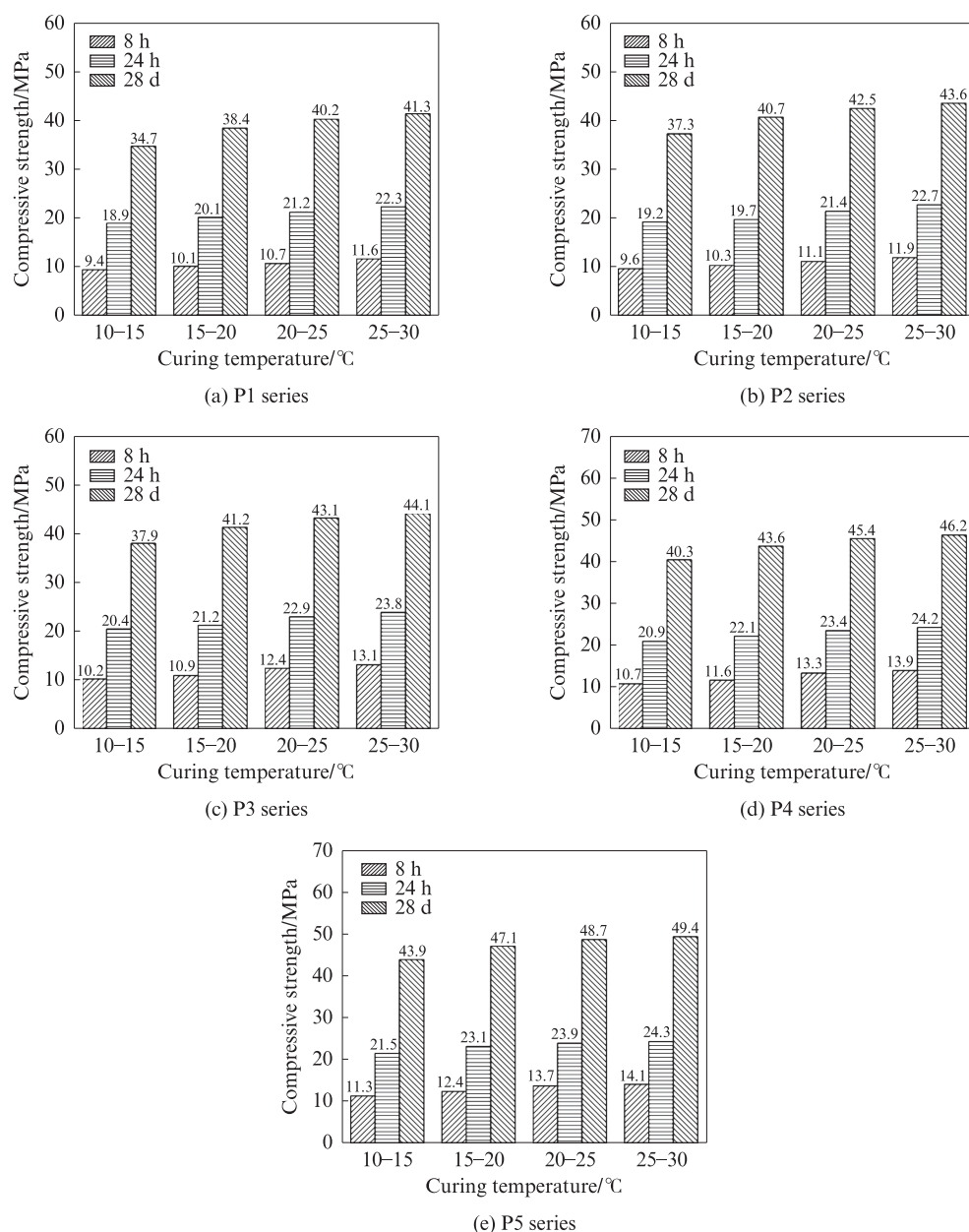


图7 养护温度对混凝土抗压强度的影响

Fig. 7 Effects of curing temperatures on compressive strength of concretes

以上,并考虑一定的富余系数,应依据工程应用过程中隧道内各里程段的围岩等级、掌子面实际状况、支护情况和洞内温度变化等来选用对应的配合比和纳米早强剂、无碱速凝剂掺量,且应合理控制拌和物温度。

7 工程应用

工艺试验段位于川藏铁路某隧道工程的交通洞,

C30早高强喷射混凝土设计方量为 63 m^3 ,洞内环境温度实测为 $13\text{ }^{\circ}\text{C}$,试验采用配合比P3作为生产配合比,纳米早强剂掺量取 10% ,无碱液体速凝剂掺量取 10% ,控制拌和物温度在 $20\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。现场混凝土状态、喷射过程以及大板成型、切割和抗压试件强度测试如图8所示。经检验,此次试验C30早高强喷射混凝土的8 h抗压强度为 10.7 MPa ,24 h为 19.1 MPa ,回弹率为 9.4% 。

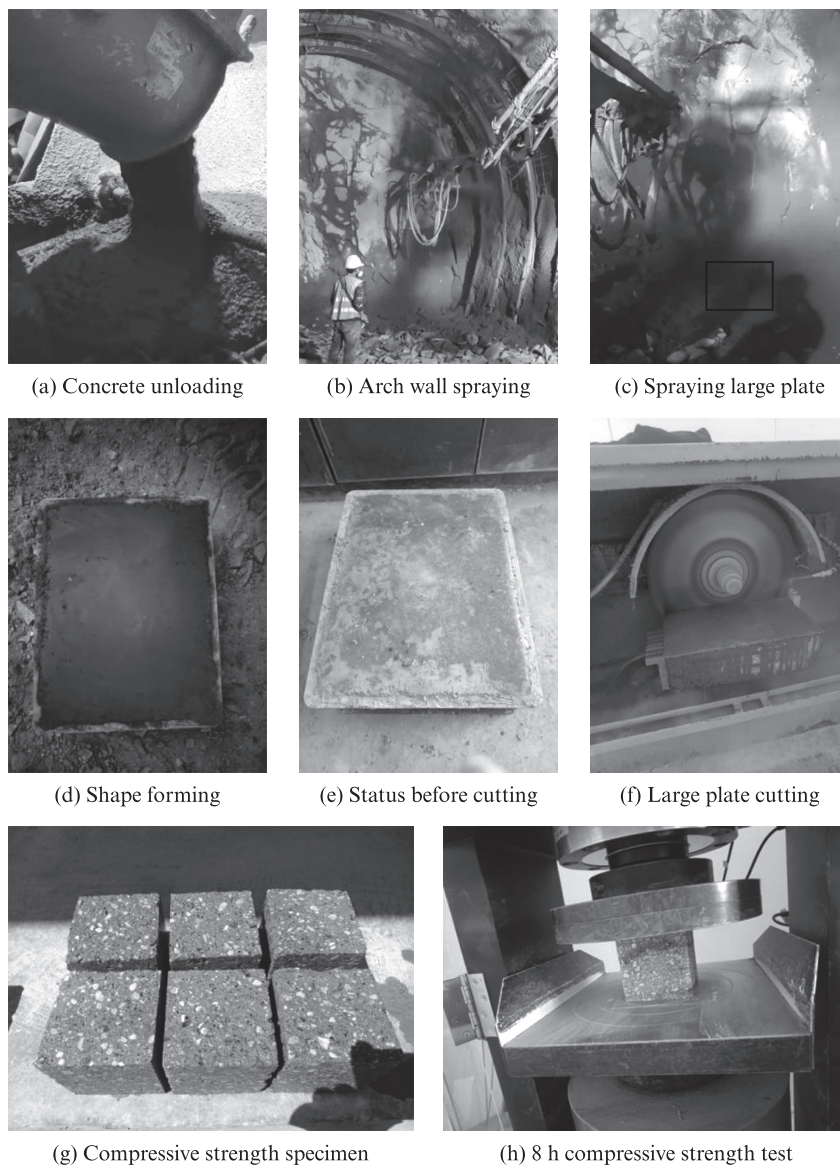


图8 工艺试验与强度检验

Fig. 8 Process test and strength inspection

8 结论

(1)纳米早强剂不仅可以降低减水剂的掺量,提高水泥净浆的工作性,对水泥早龄期特别是8 h的水化程度也有显著的提高,在C30早高强喷射混凝土配合比设计时其掺量宜在 5% 以上。

(2)对于不同水泥用量的配合比,通过试验优化纳米早强剂和无碱速凝剂的掺量,并控制拌和物温度与养护温度,均能配制出流动性好、坍落扩展度经时损失小,工作性能和力学性能均满足设计及施工要求的C30早高强喷射混凝土。

(3)对于水泥用量为 $460\sim 500\text{ kg/m}^3$ 的配合比,

为达到其8 h抗压强度不低于10 MPa的强度设计要求,所需纳米早强剂的掺量分别应达12%、10%、8%、8%和5%及以上,无碱速凝剂掺量宜为10%及以上,拌和物温度宜分别对应控制在25、20、15、10、10℃及以上,养护温度宜分别对应控制在25、20、20、15、10℃及以上.在此条件下,其24 h抗压强度均能达到15 MPa以上,且28 d抗压强度也符合设计要求.

(4)相比较低水泥用量的混凝土配合比,为达到8 h抗压强度不低于10 MPa的强度设计要求,较高水泥用量的配合比对纳米早强剂掺量的需求较低且对拌和物温度与养护温度要求也较低.

(5)不同因素对同一配合比混凝土不同龄期抗压强度的影响程度不同,从高到低依次为纳米早强剂掺量、无碱速凝剂掺量、养护温度与拌和物温度,但拌合物温度和养护温度最低均不能低于10℃.

(6)采用水泥用量480 kg/m³的配合比配制的C30早高强喷射混凝土,不仅各项性能指标符合设计及施工要求,而且回弹率低.

参考文献:

- [1] 郑宗溪,孙其清.川藏铁路隧道工程[J].隧道建设,2017,37(8):138-143.
ZHENG Zongxi, SUN Qiqing. Sichuan-Tibet railway tunnel engineering[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(8):138-143. (in Chinese)
- [2] 朱颖.川藏铁路建设的挑战与对策[M].北京:人民交通出版社,2017:1-2.
ZHU Ying. Challenges and countermeasures of Sichuan-Tibet railway construction[M]. Beijing:People's Transport Publishing House, 2017:1-2. (in Chinese)
- [3] 张景,李国良,杨木高,等.川藏铁路隧道穿越活动断裂带工程措施探讨[J].铁道标准设计,2021,65(10):148-154.
ZHANG Jing, LI Guoliang, YANG Mugao, et al. Discussion on engineering measures for Sichuan-Tibet railway tunnels crossing active fault zones[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(10):148-154. (in Chinese)
- [4] 薛翊国,孔凡猛,杨为,等.川藏铁路沿线主要不良地质条件和工程地质问题[J].岩石力学与工程学报,2020,39(3):445-468.
XUE Yiguo, KONG Fanmeng, YANG Wei, et al. Main unfavorable geological conditions and engineering geological problems along Sichuan-Tibet railway[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3):445-468. (in Chinese)
- [5] 周路军,汤印,卓彬,等.川藏铁路深埋隧道围岩灾变分析与思考[J].工程科学与技术,2022,54(2):1-20.
ZHOU Lujun, TANG Yin, ZHUO Bin, et al. Analysis and thoughts on surrounding rock mass catastrophe of deep-buried tunnels along Sichuan-Tibet railway[J]. Engineering Science and Technology, 2022, 54(2):1-20. (in Chinese)
- [6] 吴建和,刘世杰,钟友江.川藏铁路高地应力软岩大变形隧道施工方法研究[J].水利与建筑工程学报,2021,19(6):165-171,178.
WU Jianhe, LIU Shijie, ZHONG Youjiang. Construction method of high stress soft rock large deformation tunnel in Sichuan-Tibet railway[J]. Journal of Water Resources and Construction Engineering, 2021, 19(6):165-171, 178. (in Chinese)
- [7] 兰恒星,张宁,李郎平,等.川藏铁路可研阶段重大工程地质风险分析[J].工程地质学报,2021,29(2):326-341.
LAN Hengxing, ZHANG Ning, LI Langping, et al. Risk analysis of major engineering geological hazards for Sichuan-Tibet railway in the phase of feasibility study[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(2):326-341. (in Chinese)
- [8] 宋章,张广泽,蒋良文,等.川藏铁路沿线特殊环境地质问题的认识与思考[J].铁道工程学报,2017(1):1-5,59.
SONG Zhang, ZHANG Guangze, JIANG Liangwen, et al. Some cognitions and thinkings about the specific geo-environmental problems along the Sichuan-Tibet railway[J]. Journal of Railway Engineering, 2017(1):1-5, 59. (in Chinese)
- [9] 严健,何川,汪波,等.高地温高应力隧道岩爆特征及机制研究[J].铁道学报,2020,42(12):186-194.
YAN Jian, HE Chuan, WANG Bo, et al. Research on characteristics and mechanism of rockburst occurring in high geo temperature and high geo stress tunnel[J]. Journal of Railway, 2020, 42(12):186-194. (in Chinese)
- [10] 刘珣.川藏铁路高地温隧道建设技术[J].铁道建筑,2019,59(9):53-56.
LIU Xun. Construction technology of tunnels in area of high geo-temperature for Sichuan-Tibet railway[J]. Railway Architecture, 2019, 59(9):53-56. (in Chinese)
- [11] 黄河,马芹永.川藏铁路雅安至林芝段工程地质环境及主要工程地质问题[J].工程科学与技术,2021,53(3):29-41.
HUANG He, MA Qinyong. Engineering geological environment and main engineering geological problems of Ya'an-Linzi section of the Sichuan-Tibet railway[J]. Engineering Science and Technology, 2021, 53(3):29-41. (in Chinese)
- [12] 黄河,马芹永.川藏铁路雅安至林芝段隧道建造面临的主要工程技术难题与对策建议[J].隧道建设,2021,41(7):1079-1090.
HUANG He, MA Qinyong. Technical difficulties and countermeasure suggestions in tunnel construction of Ya'an-Linzi section of Sichuan-Tibet railway[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(7):1079-1090. (in Chinese)
- [13] 赵勇,刘大刚.特殊地质条件下隧道工程高性能支护体系[J].中国铁路,2020(12):20-34.
ZHAO Yong, LIU Dagang. High-performance support system for tunnel engineering under special geological conditions[J]. China Railway, 2020(12):20-34. (in Chinese)
- [14] 霍建勋,林传年,刘喆.隧道高性能支护喷射纤维混凝土配比试验研究[J].现代隧道技术,2021,65(10):65-73.
HUO Jianxun, LIN Chuannian, LIU Zhe. Experimental study on high performance fiber shotcrete ratio for tunnel support[J]. Modern Tunnel Technology, 2021, 65(10):65-73. (in Chinese)
- [15] 刘喆,姜艳红,杨旸.铁路隧道早高强喷射混凝土设计标准及应用研究[J].现代隧道技术,2022,66(9):1-8.

- LIU Zhe, JIANG Yanhong, YANG Yang. Study on design standard and application of early high-strength shotcrete in railway tunnel[J]. Modern Tunnel Technology, 2022, 66(9):1-8. (in Chinese)
- [16] 中铁二局集团有限公司. 铁路隧道工程施工质量验收标准:TB 10417—2018[S]. 北京:中国铁道出版社,2019.
- CREGC. Construction quality acceptance standard for railroad tunneling: TB 10417—2018 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019. (in Chinese)
- [17] 王子明,赵攀,刘晓,等. 不同促凝早强剂对喷射混凝土性能的影响研究[J]. 混凝土世界, 2022(5):12-16.
- WANG Ziming, ZHAO Pan, LIU Xiao, et al. Effects of different setting and strength accelerating on the properties of shotcrete[J]. World of Concrete, 2022(5):12-16. (in Chinese)
- [18] 张兴德,雷英强,丁建彤. 纳米材料在喷射混凝土中的应用研究[J]. 四川水力发电, 2021, 40(6):24-27.
- ZHANG Xingde, LEI Yingqiang, DING Jiantong. Study on the application of nano material in shotcrete[J]. Sichuan Hydropower, 2021, 40(6):24-27. (in Chinese)
- [19] 赵爽,洪锦祥,乔敏,等. 早强型喷射混凝土在郑万高铁巫山隧道中的施工试验[J]. 隧道建设, 2020, 40(增刊1):369-373.
- ZHAO Shuang, HONG Jinxiang, QIAO Min, et al. Construction test of rapid hardening shotcrete in Wushan tunnel on Zhengzhou-Wanzhou high-speed railway[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(Suppl 1):369-373. (in Chinese)
- [20] 李子强. 软岩隧道早强型喷射混凝土外加剂配方试验研究[J]. 建筑机械化, 2020, 41(6):55-57.
- LI Ziqiang. Experimental study on admixture formulation of early strength shotcrete for soft rock tunnel [J]. Construction Mechanization, 2020, 41(6):55-57. (in Chinese)
- [21] 李冬,丁一宁. 钢纤维对喷射混凝土方板早龄期弯曲性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(1):78-82.
- LI Dong, DING Yining. Effect of steel fiber on the bending behavior of shotcrete plate at early age[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(1):78-82. (in Chinese)
- [22] MA Z Y, SUN Z P, TIAN J T, et al. Properties of the cement paste mixed with various types of aluminum sulfate based liquid alkali-free accelerator[J]. Key Engineering Materials, 2021, 876:45-50.
- [23] LI G X, ZHANG J B, NIU M D, et al. The mechanism of alkali-free liquid accelerator on the hydration of cement pastes[J]. Construction and Building Materials, 2020, 233:117296.
- [24] NIU M D, LI G X, ZHANG J B, 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, 253:119246.1-119246.10.
- [25] KANCHANASON V, PLANK J. Role of pH on the structure, composition and morphology of CSH-PCE nanocomposites and their effect on early strength development of portland cement[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 102:90-98.
- [26] KANCHANASON V, PLANK J. Effectiveness of a calcium silicate hydrate-polycarboxylate ether (CSH-PCE) nanocomposite on early strength development of fly ash cement[J]. Construction and Building Materials, 2018, 169:20-27.
- [27] PLANK J, SCHONLEIN M, KANCHANASON V. Study on the early crystallization of calcium silicate hydrate(C-S-H) in the presence of polycarboxylate superplasticizers [J]. Journal of Organometallic Chemistry, 2018, 869:227-232.