

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.044



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



负温环境下电养护对砂浆成型温度及早期强度的影响

扬州州¹,毛江鸿¹,李碧雄¹,钱伟²,李莉斯³

(1. 四川大学建筑与环境学院,成都 610065;2. 西藏藏建科技股份有限公司,拉萨 851400;
3. 西藏大学工学院,拉萨 851400)

摘要:为了研究负温环境下电养护对掺甲酸钙早强剂砂浆早期强度发展的影响,在砂浆中添加甲酸钙早强剂,掺量为胶凝材料的 2%质量分数,并在 -10 ℃环境下通交流电进行电养护。试验过程中,通过温度仪监测不同通电参数下砂浆内部温度的实时变化,测试不同通电参数下砂浆通电 1 d 的强度以及后续标准养护 3、7 d 的强度。结果表明:电养护可以有效预防新拌砂浆在 -10 ℃环境下产生受冻损伤并加速砂浆固化成型;掺甲酸钙砂浆试件初始电阻仅为未掺甲酸钙砂浆的 1/4,说明掺甲酸钙能有效降低砂浆电阻,从而提高通电效率;掺甲酸钙砂浆的 3、7 d 强度较相同通电参数下未掺甲酸钙砂浆分别提高了 59%、29%,说明甲酸钙在电养护 1 d 后同样具有明显的早强作用,可以快速促进砂浆早期强度发展。

关键词:砂浆;电养护;早强剂;早期强度;寒冷地区

中图分类号:TU525.9 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2025)02-0191-06

Effect of electric curing on mortar forming temperature and early strength under negative temperature environment

YANG Zhouzhou¹, MAO Jianghong¹, LI Bixiong¹, QIAN Wei², LI Lisi³

(1. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, P. R. China; 2. Xizang Zangjian Technology Co., Ltd, Lhasa 851400, P. R. China; 3. College of Engineering, Xizang University, Lhasa 851400, P. R. China)

Abstract: In order to study the effect of electric curing on the early strength development of mortar mixed with calcium formate early strength agent under a negative temperature environment, calcium formate early strength agent with 2% mass of cementitious material was mixed into the mortar, and electric curing was carried out by passing alternating current in a -10°C environment. During the test, the real-time changes of the internal temperature of the mortar under different energization parameters were monitored by a thermometer, and finally, the strength of the mortar energized for one day and the strength of the subsequent standard curing for 3 days and 7 days under different energization parameters were tested. The test results show that the addition of calcium formate to the mortar can effectively reduce the resistance and thus improve the energizing efficiency,

收稿日期:2022-10-27

基金项目:四川省重点研发项目(2022YFQ0048)

作者简介:扬州州(1996-),男,主要从事混凝土结构耐久性研究,E-mail:zzyang0503@163.com。

毛江鸿(通信作者),男,研究员,博士生导师,E-mail:jhmao@scu.edu.cn。

Received: 2022-10-27

Foundation item: Key R & D Project of Sichuan Province (No. 2022YFQ0048)

Author brief: YANG Zhouzhou (1996-), main research interest: durability of concrete structures, E-mail:zzyang0503@163.com.

MAO Jianghong (corresponding author), research professor, doctoral supervisor, E-mail:jhmao@scu.edu.cn.

and the initial resistance of the mortar specimens with calcium formate is 1/4 that of the mortar without calcium formate, so that it can achieve a good heating effect at a lower applied voltage. Calcium formate also has an obvious early strength effect after 1 day of electrical curing, which can promote the early strength development of the mortar. The strengths at 3 days and 7 days of the calcium formate-doped mortar increased by 59% and 29%, respectively, compared with the un-doped calcium formate mortar under the same energizing parameters.

Keywords: mortar; electric curing; early strength agent; early strength; cold areas

在冬季寒冷地区,新拌水泥基材料的凝结和硬化会延迟,强度发展缓慢,并且存在受冻破坏的风险^[1-3]。混凝土在受冻前必须达到的最低强度称为受冻临界强度^[4],按照中国《建筑工程冬期施工规程》(JGJ/T 104—2011)的规定^[5]:采用硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥配制的混凝土,受冻临界强度不应低于混凝土设计强度标准值的30%。混凝土受冻前形成的强度越高,其抗冻性越好,面对低温、负温环境时,混凝土早期强度快速增长显得尤为重要。

为了避免混凝土强度发展缓慢导致施工进度减缓,冬季低温环境下施工会采用添加早强剂的方法,加快混凝土水化进程,提高早期强度^[6]。甲酸钙是常用的无机系早强剂之一,为白色结晶或粉末,常温下其掺量通常不超过胶凝材料质量分数的2.5%,早强效果随着掺量的增加而提高^[7]。许凤桐等^[8]研究发现,随着甲酸钙掺量(0~2.5%)的增加,水泥的凝结时间逐渐缩短,早期抗压强度逐渐提高,2.5%掺量较0掺量的砂浆3、7 d抗压强度约分别提高了27%、40%。张丰等^[9]发现,5℃下甲酸钙的早强作用主要在前3 d,掺2%甲酸钙砂浆1、3 d龄期的抗压强度比分别达2.19、1.54。

在低温(5℃以下)及负温环境下施工,由于早强剂效果不显著,会直接采用冬季养护措施。常用的养护方法有掺防冻剂法^[10]、暖棚法^[11]、高温蒸汽养护法^[12]等。这些方法均存在改进空间,如掺防冻剂法仅预防混凝土受冻损伤,而强度增长缓慢;暖棚法需消耗较多材料和劳动力,需要大量热源;高温蒸汽养护法对设备要求高,需要密闭室、容器、蒸汽发生器和输送机等大型设备。电养护是一种新型的混凝土养护方法,通过直接给混凝土施加外加电压,使其内部产生热量,维持自身养护环境温度并加快水泥水化和凝固,获得早期强度。

已有学者开展了电养护方法相关研究,Abubakri等^[13]发现,暴露在-10℃环境下养护的普通砂浆试件28 d抗压强度为27.2 MPa,而电养护砂浆试件抗压强度为51 MPa。程津等^[14]研究发现,在约0℃的低温环境下,电养护显著加快了硫铝酸盐水泥水化,减少了脱模时间,并显著提高了早强,具体表现为未通电试件、外加15 V电压试件的脱模时

间分别约为32、2 h。

目前,电养护存在的主要不足为,新拌混凝土逐渐固化,失去塑性,导致电阻增大,固化后升温效果不理想,使得低温、负温环境下其强度难以进一步提高。相关学者通过加入碳纤维^[15]、炭黑^[16]等导电材料来改善混凝土固化后的通电效果,但碳纤维、炭黑等导电材料成本较高且在混凝土中分散困难,不利于在工程中广泛使用。甲酸钙掺入混凝土可以提高其液相Ca²⁺的浓度,以加快水泥的硅酸钙结晶速度,并加速水泥中的C₃S生成更多水化硅酸凝胶,同时也会产生更多钙矾石类产物,从而提高早期强度^[17],混凝土液相离子浓度提高还能降低其塑性期的电阻,因此,甲酸钙可以作为理想的外加剂,用以改善混凝土塑性期的通电效果,同时还能起到早强作用。

在低温、负温环境下,结合电养护和添加甲酸钙,一方面,通过电养护使新拌混凝土内部升温,防止其在低温、负温环境下水化受阻及受冻破坏,并加速新拌混凝土固化成型;另一方面,通过添加甲酸钙改善通电效果并促进早期强度的增长,通过这两方面的共同作用,在低温甚至负温环境下使混凝土早期强度得到快速提升。笔者研究(-10±2)℃环境下电养护甲酸钙早强剂砂浆在不同外加电压下养护1 d的温度变化情况和力学性能以及继续标准养护至3、7 d的力学性能。

1 试验过程

1.1 试验方案

试验的分组、编号及通电参数如表1所示,为研究在电养护作用下掺甲酸钙对砂浆早期力学性能的影响,试件分为空白组(未掺甲酸钙)和早强组(2%甲酸钙)。为了在相近升温效果下对比空白组与早强组的早期力学性能,空白组分别设置0(未通电)、30、60 V的通电参数,早强组分别设置0(未通电)、15、30 V。试件ZQ0V、ZQ15V、ZQ30V分别与KB0V、KB30V、KB60V进行横向对比,早强组通电电压为空白组通电电压的1/2,原因是早强组中掺入甲酸钙降低了试件电阻作用,采用较低的通电参数可以达到与空白组接近的升温效果。

表1 试件通电参数

Table 1 Test piece energization parameters

试件分组	编号	通电电压/V
空白组	KB0V	0
	KB30V	30
	KB60V	60
早强组	ZQ0V	0
	ZQ15V	15
	ZQ30V	30

1.2 试件制备

砂浆采用P·O 42.5水泥、特细河砂(细度模数为1.3),外掺0.5%聚羧酸减水剂和0%、2%的早强组分甲酸钙,水胶比为0.3:1,胶砂比为1:1。

参考《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—2021)^[18],采用胶砂搅拌机和尺寸为40 mm×40 mm×160 mm(宽×高×长)的试件,先将水泥、砂、甲酸钙搅拌1 min,得到干混合料,然后加入水与减水剂继续搅拌3 min。在入模后的浆体试件两端插入尺寸为40 mm×60 mm的铜网电极,然后放置在振动台振捣30 s。

1.3 试件养护过程

负温环境采用(-10 ± 2)℃的冷冻箱进行模拟,将制备好的试件放入冷冻箱1 d,通电试件在此期间进行电养护,1 d结束后拆模转入标准养护箱养护至对应龄期(3、7 d),进行标准养护后的通电试件不再进行电养护。由于试件KB0V、KB30V、ZQ0V、ZQ15V冷冻1 d未能固化成型,故转入标准养护箱养护1 d后再拆模。

1.4 电养护过程

电养护过程中,采用多通道温度巡检仪测试砂浆内部温度,每隔1 min记录一次温度数据,温度探头插入新拌砂浆试件内部中心。采用STKB-5000VA型单相调压器施加交流稳压电压,输入电压为220 V,输出电压为AC 0~300 V,调压器两端接头接入试件两侧铜网处。试验示意及布置如1所示。

1.5 参数测试

1.5.1 初始电阻及初始电功率

采用同惠TL2812D型LCR数字电桥并设置10 kHz的高频刷新率进行测试,可以有效避免界面电阻对测试结果的影响,测试新拌砂浆试件两侧铜网电极间的电阻大小即为试件的实际初始电阻值。得到试件初始电阻值后,利用式(1)分别计算空白组、早强组在不同电压下的初始电功率。

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (1)$$

式中:P为电功率,W;U为电压,V;R为电阻,Ω。

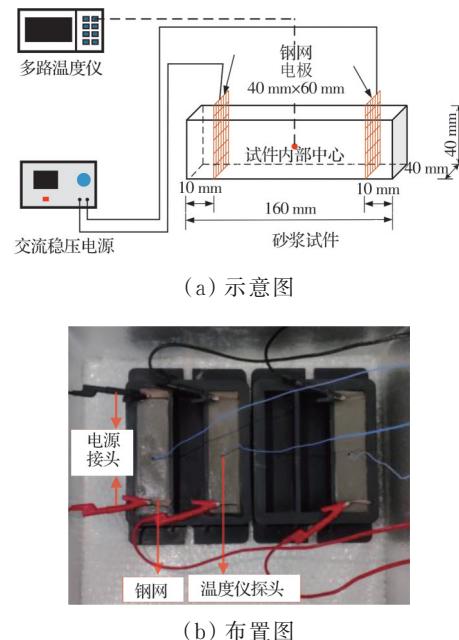


图1 电养护试验示意图及布置图

Fig. 1 Electric conservation test schematic and layout diagram

1.5.2 抗压强度

参考《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》进行抗折和抗压强度测试,试件分别在1、3、7 d进行强度测试,以研究早期抗压强度的发展情况。

2 结果与讨论

2.1 初始电阻及初始电功率的变化

空白组和早强组的初始电阻为3个试件初始电阻测定值的平均值,两组试件的初始电阻和初始电功率结果如表2所示。

表2 新拌砂浆试件初始电阻和初始电功率

Table 2 Initial mean resistance and initial electrical power of fresh mortar specimens

试件分组	初始电阻/Ω	电压/V	初始电功率/W
空白组	273.8	0	0
		30	3.3
		60	13.1
早强组	66.0	0	0
		15	3.4
		30	13.6

由表2可知,早强组初始电阻接近空白组的1/4,表明甲酸钙有明显降低新拌砂浆电阻的作用。主要原因是甲酸钙提高了砂浆液相中Ca²⁺浓度,液相离子浓度的提高降低了砂浆的电阻。

2.2 温度的变化规律

试件的温度变化取决于其产热量与散热量之间的差值,散热量主要取决于试件与周围环境的温

度差和散热面积。通电前各试件的初始温度(25°C)与环境温度($(10\pm 2)^{\circ}\text{C}$)的差值、尺寸(散热面积)相同,即初始散热量相同,之后的温度变化主要决定通电产生的热量。

由焦耳定律可知,通电产生的热量是电功率与通电时间的乘积,可以认为初始电功率决定了初始产热量,进而决定了之后整个通电过程的温度变化。试件KB0V与ZQ0V未通电,即初始电功率为0;试件KB30V与ZQ15V的初始电功率接近,分别为 3.3 、 3.4 W ;试件KB60V与ZQ30V的初始电功率接近,分别为 13.1 、 13.6 W 。空白组试件、早强组试件的温度-时间曲线分别如图2(a)、(b)所示。

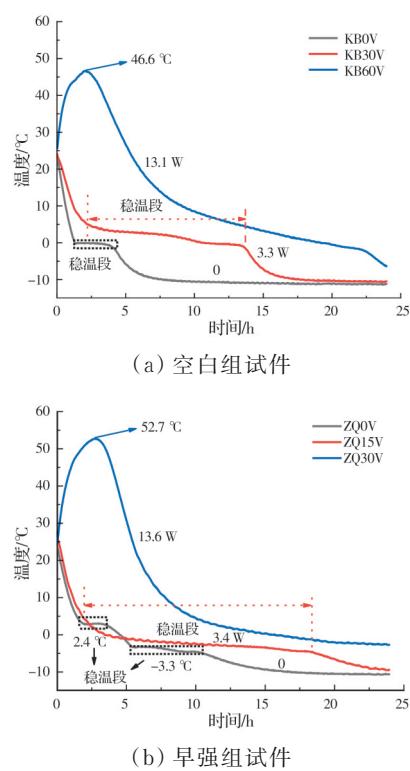


图2 负温环境下电养护试件内部温度-时间关系曲线

Fig.2 Negative temperature environment electric maintenance specimen internal temperature-time

由图2和表2可知,在 24 h 稳压交流电作用下,初始电功率接近的试件温度-时间曲线变化也接近,以初始电功率来预估温度-时间曲线的变化是一个

有效方法。添加甲酸钙使砂浆试件电阻降低,最终对早强组施加较低的稳压电压也能达到空白组同样的升温效果。

图2(a)中试件KB0V、图2(b)中试件ZQ0V都由室温逐渐降低至冷冻箱内部温度。试件KB0V在降温过程中出现一次稳温段(0°C),该阶段试件KB0V的内部自由水处于冰-水混合物状态,完全结冰约需 3 h ,在完全结冰后试件KB0V又开始逐渐降温。试件ZQ0V在降温过程中出现两次稳温段,分别在 2.4 、 -3.3°C 附近。甲酸钙的掺入提高了液相中 Ca^{2+} 的浓度,液相中的钙类盐浓度也随之提高,崔静忠等^[19]研究表明,盐浓度提高会导致混凝土冰点降低,当亚硝酸钠中分别掺入水泥重量 3% 、 8% 的混凝土,其冰点温度分别为 -2.7°C 、 -8.5°C 。由于砂浆液相中的盐浓度提高而冰点降低,试件ZQ0V在内部温度为 -3.3°C 左右出现稳温段。

图2(a)中试件KB30V、图2(b)中试件ZQ15V虽然有通电的作用,但因为电功率产热不足,导致两个试件都没有出现升温,直接由室温逐渐降低至冷冻箱内部温度,但相较于试件KB0V和ZQ0V,稳温段得到了较大的延长。

从通电开始经过 2.5 h ,图2(a)中试件KB60V、图2(b)中试件ZQ30V分别从室温升温至 46.6 、 52.7°C ,升温速率大约分别为 0.31 、 $0.35^{\circ}\text{C}/\text{min}$,然后逐渐降温至 -6.0 、 -3.0°C 附近,两组试件的温度-时间曲线接近。两组试件的温度-时间曲线均出现先升温后降温的变化趋势,通电开始时,试件未固化,内部自由水和离子较多,在交流电场作用下试件内部电子运动产生热量,此时产热量大于散热量,温度上升,但随着时间的推移,试件逐渐固化,电阻逐渐增大,在某一时刻,产热量小于散热量造成了降温。

2.3 早期抗压强度的发展特征

表3的抗压强度数据为6个测定值的平均值。

由 1 d 强度数据可知,试件KB0V、KB30V、ZQ0V、ZQ15V未能形成强度,试件ZQ30V、KB60V抗压强度接近。

表3 电养护试件不同龄期抗压强度及标准差

Table 3 Compressive strength and standard deviation at different ages of electrically maintained specimens

试件编号	1 d		3 d		7 d	
	抗压强度/MPa	标准差	抗压强度/MPa	标准差	抗压强度/MPa	标准差
KB0V	0		18.1	0.62	31.7	2.01
KB30V	0		24.9	1.66	40.4	1.06
KB60V	12.9	0.84	28.6	1.13	37.7	1.91
ZQ0V	0		23.2	0.86	33.8	2.07
ZQ15V	0		29.8	2.35	48.9	3.65
ZQ30V	12.4	0.61	45.6	2.85	48.8	1.14

由3 d强度数据可知,所有试件强度较1 d有较大幅度的提升。1 d未形成强度的试件也开始形成了强度。在空白组中,试件KB60V的3 d强度最高,与其1 d强度相比,提高了121.7%;在所有试件中,试件ZQ30V的3 d强度最高,与其1 d强度相比,提高了267.7%。早强组强度提升幅度明显高于空白组,说明甲酸钙促进早期强度发展效果显著;试件ZQ30V、KB60V的初始电功率接近,升温效果相同,但试件ZQ30V的3 d强度较试件KB60V提高了59%。

由7 d强度数据可知,所有试件7 d强度较3 d强度均有提升,但没有3 d强度较1 d强度提升的幅度大,试件ZQ15V、ZQ30V的强度均达到了48.5 MPa以上,试件ZQ30V的7 d强度较试件KB60V提高了29%。

2.4 机理分析

由温度规律和早期抗压强度特征分析可知,负温环境下电养护与早强剂的结合有效促进了水泥水化,共同促进了早期强度形成,其作用机理如图3所示。

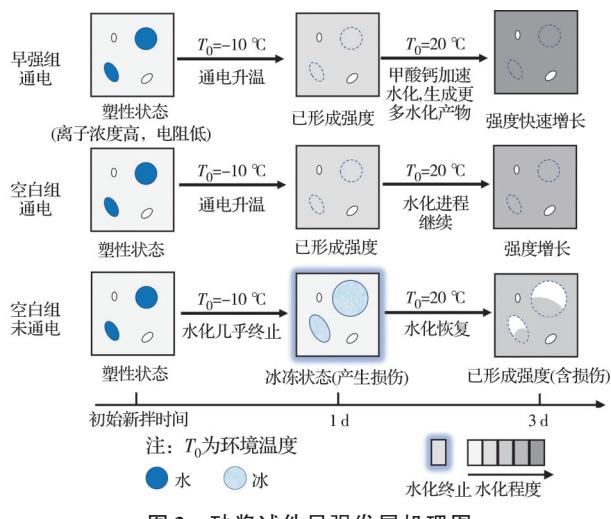


图3 砂浆试件早强发展机理图

Fig. 3 Mechanisms of early strength development of mortar specimens

空白组未通电:在新拌阶段呈塑性状态,水泥浆内部存在着水分和孔隙。直接暴露于负温环境时,试件由表及里逐渐降温至环境温度。当降温至0 °C时,试件温度停留约3 h,此时处于冰-水混合状态,水化进程终止。当继续在负温环境养护时,随着时间的推移,试件的水分逐渐完全结冰膨胀。在受冻1 d后,试件由塑性状态变为受冻凝固的损伤状态,水化进程早已终止,因此,无法形成强度。同时,内部水结冰,体积膨胀,造成孔隙增大^[20],产生损伤,这是试件KB0V、ZQ0V在各个龄期强度都远低于通电试件的原因。在负温环境下养护1 d后,过渡到标准养护箱养护至3 d,期间试件内部温度逐渐由负温(-10 °C)回升至养护箱温度(20 °C),水化进

程逐渐恢复。养护至3 d时,试件固化成型并形成强度,但由于之前受冻造成了试件孔隙增大,即便恢复水化,产生的水化物也不足以完全填充冰融化后的大孔隙^[16],所以仍然存在不可恢复的损伤。

空白组通电:负温环境下对新拌试件进行通电,内部水分的自由离子开始运动产生热量,试件逐渐升温,加速水泥水化和凝固进程。通电1 d的过程中,随着通电时间的增加,试件由塑性态逐渐固化,导致电阻也逐渐增大,升温到一定温度后开始逐渐降温。在此过程中,可以通过合理选择通电参数,保证试件内部温度不过早进入冻结温度(<0 °C)或在进入冻结温度前充分固化,快速形成可以抵抗冻结的骨架结构和强度,不会造成损伤;在负温养护1 d后,过渡到标准养护箱养护至3 d,期间试件由低温回升到养护箱温度(20 °C),水化进程继续,水化程度和强度进一步增大。

早强组通电:甲酸钙的掺入会提高砂浆液相中Ca²⁺浓度^[7],液相中Ca²⁺离子浓度的增加降低了砂浆的电阻,从而提高了通电效率,早强组试件使用较低的外加电压就能达到空白组试件同样的升温效果。早强组试件的1 d强度与空白组试件接近,均在12.5 MPa左右,说明在电养护1 d的过程中甲酸钙对提升早强组试件砂浆强度的贡献不大,仅起到了降低电阻的作用,试件的1 d强度主要由电养护过程中的温度决定。在负温养护1 d后,过渡到标准养护箱养护至3 d,期间早强组水化程度和强度快速增长,甲酸钙加速水化的作用已得到明显体现。其能够加速砂浆水泥组分中的C₃S生成更多的水化硅酸凝胶,同时也会产生更多的钙矾石类物质,从而快速提高早期强度^[9]。

综上所述,采用电养护方法可以有效防止砂浆冻害,同时加速砂浆固化,形成强度;甲酸钙在电养护后仍然具有加速砂浆组分中水泥水化、形成水化产物的作用,从而促进早期强度发展,说明结合电养护和添加甲酸钙的方法能够使砂浆快速形成早期强度。

3 结论

1)电养护可以有效预防新拌砂浆在-10 °C环境下产生受冻损伤并加速砂浆固化成型。

2)通过掺入甲酸钙可以有效降低砂浆电阻,从而提高通电效率。具体而言,掺甲酸钙砂浆试件的初始电阻仅为未掺甲酸钙砂浆的1/4。

3)甲酸钙在电养护1 d后同样具有明显的早强作用,可以促进砂浆早期强度快速发展。具体而言,掺甲酸钙砂浆试件3、7 d龄期强度较未掺甲酸钙砂浆试件分别提高了59%、29%。

参考文献

- [1] 胡晓鹏, 彭刚, 牛荻涛, 等. 早期受冻环境对混凝土服役期性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(5): 1061-1070.
HU X P, PENG G, NIU D T, et al. Effect of early frost environment on service performance of concrete [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(5): 1061-1070. (in Chinese)
- [2] ZHANG G, YU H Y, LI H M, et al. Experimental study of deformation of early age concrete suffering from frost damage [J]. Construction and Building Materials, 2019, 215: 410-421.
- [3] YI S T, PAE S W, KIM J K. Minimum curing time prediction of early-age concrete to prevent frost damage [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(3): 1439-1449.
- [4] 刘润清. 多因素影响下低温混凝土抗冻临界强度的研究[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2011.
LIU R Q. Study on frost-resistant critical strength of low-temperature concrete under the influence of many factors [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [5] 建筑工程冬期施工规程: JGJ/T 104—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Specification for winter construction of building engineering: JGJ/T 104—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [6] YONEYAMA A, CHOI H, INOUE M, et al. Effect of a nitrite/nitrate-based accelerator on the strength development and hydrate formation in cold-weather cementitious materials [J]. Materials, 2021, 14(4): 1006.
- [7] 张丰, 白银, 蔡跃波, 等. 混凝土低温早强剂研究现状[J]. 材料导报, 2017, 31(21): 106-113
ZHANG F, BAI Y, CAI Y B, et al. Research status of low temperature early strength agents for concrete [J]. Materials Review, 2017, 31(21): 106-113 (in Chinese)
- [8] 许凤桐, 陈瑞波, 顾轲. 甲酸钙早强剂在干粉砂浆中的应用[J]. 墙材革新与建筑节能, 2008(2): 56-58.
XU F T, CHEN R B, GU K. Application of calcium formate early strength agent in dry powder mortar [J]. Wall Materials Innovation & Energy Saving in Buildings, 2008(2): 56-58. (in Chinese)
- [9] 张丰, 白银, 蔡跃波. 5 °C养护下甲酸钙对水泥早期水化的影响[J]. 材料导报, 2021, 35(10): 10055-10061, 10087.
ZHANG F, BAI Y, CAI Y B. Effect of calcium formate on early hydration of cement at 5 °C [J]. Materials Review, 2021, 35(10): 10055-10061, 10087. (in Chinese)
- [10] 王振, 李化建, 黄法礼, 等. 铁路工程混凝土防冻剂研究现状与问题探讨[J]. 铁道建筑, 2018, 58(8): 142-146.
WANG Z, LI H J, HUANG F L, et al. Research status and problem discussion of concrete antifreeze admixture in railway engineering [J]. Railway Engineering, 2018, 58(8): 142-146. (in Chinese)
- [11] 朱淑坤, 郭爱兵. 暖棚法在混凝土冬季施工保温中的应用[J]. 河北水利水电技术, 2004(2): 39-40.
ZHU S K, GUO A B. Warm canopy law keeping warm in the concrete project winter construction [J]. Hebei Water Resources and Hydropower Technology, 2004 (2): 39-40. (in Chinese)
- [12] SHI J Y, LIU B J, ZHOU F, et al. Heat damage of concrete surfaces under steam curing and improvement measures [J]. Construction and Building Materials, 2020, 252: 119104.
- [13] ABUBAKRI S, MANGAT P S, STARINIERI V, et al. Electric curing parameters of mortar and its mechanical properties in cold weather [J]. Construction and Building Materials, 2022, 314: 125615.
- [14] 程津, 谭彬, 虞秀勇, 等. 低温条件下硫铝酸盐水泥砂浆的电养护[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(2): 447-452
CHENG J, TAN B, YU X Y, et al. Electric curing of sulfoaluminate cement mortar in low temperature environment [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(2): 447-452 (in Chinese)
- [15] 雷钟尧. 超低温环境下导电碳纤维水泥基材料电致固化性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
LEI Z Y. Study on electro-curing properties of conductive carbon fiber cement-based materials in ultra-low temperature environment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [16] ÇINAR E, UYGUNOĞLU T, ŞİMŞEK B, et al. Effect of carbon black on electrical curing of fresh concrete for cold regions [J]. Construction and Building Materials, 2020, 247: 118572.
- [17] 姜梅芬, 吕宪俊. 混凝土早强剂的研究与应用进展[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(10): 2527-2533
JIANG M F, LV X J. Research and application progresses of concrete early strength agent [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(10): 2527-2533 (in Chinese)
- [18] 水泥胶砂强度检验方法: GB/T 17671—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Test method of cement mortar strength(ISO method): GB/T 17671—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [19] 崔静忠. 混凝土的早期受冻[J]. 混凝土, 1983(2): 14-18.
CUI J Z. Early freezing of concrete [J]. Concrete, 1983 (2): 14-18. (in Chinese)
- [20] DONG S H, FENG D C, JIANG S H, et al. Effect of freezing temperature on the microstructure of negative temperature concrete [J]. Advanced Materials Research, 2013, 663: 343-348.