

文章编号:1007-9629(2024)06-0528-08

三乙醇胺对掺偏高岭土水泥水化及硫酸盐平衡的影响

刘志伟^{1,2}, 卢子臣^{1,2,*}, 张立恒^{1,2}, 潘 晔^{1,2}, 孙振平^{1,2}

(1. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804;

2. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804)

摘要:在 2 种类型石膏(无水石膏和半水石膏)情况下,研究了 3-乙醇胺(TEA)对掺偏高岭土水泥(MKC)水化进程及其硫酸盐平衡的影响,并与自配硅酸盐水泥(APC)进行对比。结果表明:无 TEA 加入时, MKC 中偏高岭土(MK)的存在可延长水泥的水化诱导期并加快硫酸盐的消耗, 2 种类型石膏表现基本一致; TEA 的加入能够显著促进水泥中铝相矿物的水化, 增加硫酸盐平衡所需石膏掺量, 同时石膏类型对水泥水化进程与硫酸盐平衡影响显著; 对于 APC 与 MKC, 在 TEA 作用下能有效维持其硫酸盐平衡的石膏类型分别为无水石膏与半水石膏, 这与水泥中硫酸根离子溶出-吸附-沉淀的动态平衡密切相关。

关键词:偏高岭土; 石膏类型; 水泥水化; 硫酸盐平衡; 三乙醇胺

中图分类号: TU521.3

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2024.06.007

Effect of Triethanolamine on Hydration and Sulfate Balance of Metakaolin Blended Cement

LIU Zhiwei^{1,2}, LU Zichen^{1,2,*}, ZHANG Liheng^{1,2}, PAN Ye^{1,2}, SUN Zhenping^{1,2}

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai

201804, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Compared with artificial Portland cement (APC), the effect of triethanolamine (TEA) on the hydration process and sulfate balance of metakaolin blended cement (MKC) with two types of sulfate carriers (anhydrite and hemihydrate) was investigated. The results show that without the addition of TEA, the incorporation of MK in APC retards the hydration process and stimulates the depletion of sulfate carriers. Different sulfate carriers show similar effects. However, TEA can significantly accelerate the hydration of the aluminate phase and increase the needed amount of sulfate carriers to keep the sulfate balance. Meanwhile, the types of sulfate carriers significantly affect the hydration and sulfate balance. The most suitable sulfate carrier for maintaining the sulfate balance of APC and MKC is anhydrite and hemihydrate, respectively. This phenomenon is related to the dynamic balance of sulfate ions in dissolution-adsorption-precipitation.

Key words: metakaolin; type of sulfate carrier; cement hydration; sulfate balance; triethanolamine

煅烧黏土水泥具有原料充足、低碳环保等突出优点, 被视为应用前景广阔的新型低碳胶凝材料^[1]。

但其水化活性低, 需要使用早强剂提升其早期强度^[2]。三乙醇胺(TEA)是一种常用的混凝土早强剂,

收稿日期: 2023-08-13; 修订日期: 2023-11-28

基金项目: 上海市自然科学基金资助项目(22ZR1464300); 国家自然科学基金资助项目(52208282)

第一作者: 刘志伟(1997—), 男, 江苏淮安人, 同济大学硕士生. E-mail: 2132875@tongji.edu.cn

通讯作者: 卢子臣(1987—), 男, 河北涿州人, 同济大学副教授, 博士生导师, 博士. E-mail: luzc@tongji.edu.cn

具有掺量低、效用强等优点^[2-4].研究表明,水泥中的原材料是决定TEA使用性能的关键因素之一,特别是水泥中的石膏类型及掺量^[5].不同类型石膏因溶解速率及溶解度上的差异,导致水泥水化初期硫酸根离子的供给速率与供给总量存在差别,进而影响水泥中铝相及硅相矿物的反应进程.

硫酸盐平衡是水泥凝结硬化性能的关键因素,可通过调控水泥中的石膏掺量实现^[6-7].相较普通硅酸盐水泥(OPC),煅烧黏土水泥中的煅烧黏土比表面积较高,可为水泥矿物溶出离子提供更多的吸附位点^[8].此外,TEA通过络合作用可以促进煅烧黏土中铝酸根离子的溶出^[3,9].显然,上述2种过程均可能导致水泥中的硫酸盐失衡.然而,TEA与不同类型石膏的协同作用对煅烧黏土水泥的水化进程及硫酸盐平衡的影响尚无定论.

考虑到煅烧黏土中的主要矿物为偏高岭土(MK).为简化试验变量,本文使用MK替代煅烧黏土,将其与水泥熟料及石膏混合,制备得到掺偏高岭土水泥.通过改变石膏类型及掺量,系统研究不同石

膏类型情况下TEA对掺偏高岭土水泥水化进程与硫酸盐平衡的影响,分析了内在反应机制,以期为煅烧黏土水泥更加广泛的应用提供一定理论指导.

1 试验

1.1 原材料

水泥熟料为灵寿县岩行矿产品贸易有限公司产P·I 42.5普通硅酸盐水泥熟料;偏高岭土(MK)为河南焦作煜坤矿业有限公司产偏高岭土;半水石膏(Hem)、无水石膏(Ahy)及氢氧化钠(NaOH)由国药集团化学试剂有限公司提供,分析纯;三乙醇胺(TEA)由国药集团提供,分析纯,掺量(质量分数,文中涉及的掺量、水灰比等均为质量分数或质量比)为0%、0.1%和0.5%(以水泥质量计).水泥熟料和偏高岭土的化学组成如表1所示.水泥熟料的矿物组成见表2.

试验用硅酸盐水泥(APC)与掺偏高岭土水泥(MKC)由实验室自配,两者的BET比表面积均控制在1.41 m²/g左右,水灰比为0.4,配合比见表3.

表1 水泥熟料和偏高岭土的化学组成
Table 1 Chemical compositions (by mass) of cement clinker and metakaolin

Material							Unit: %
	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	SiO ₂	IL
Cement clinker	6.60	56.40	4.37	0.36	5.10	24.03	0.41
Metakaolin	48.59	0.63	5.46	3.39	0.23	40.91	0.11

表2 水泥熟料的矿物组成
Table 2 Mineral composition (by mass) of cement clinker

						Unit: %
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A (cub)	C ₃ A (ortho)	C ₄ AF	Arcanite	
65.50	13.50	5.20	2.10	12.80	0.90	

表3 自配硅酸盐水泥和掺偏高岭土水泥的配合比
Table 3 Mix proportions of artificial Portland cements and metakaolin blended cements

No.					Unit: g/100 g
	MK	Hem	Ahy	Clinker	
APC-Ahy	0	0	1.5/3.0/5.0/7.0	98.5/97.0/95.0/93.0	
MKC-Ahy	30.0	0	1.5/3.0/5.0/7.0	68.5/67.0/65.0/63.0	
APC-Hem	0	1.5/3.0/5.0/7.0	0	98.5/97.0/95.0/93.0	
MKC-Hem	30.0	1.5/3.0/5.0/7.0	0	68.5/67.0/65.0/63.0	

1.2 试验方法

为保证各组充分混合,先将水泥熟料、石膏及偏高岭土在vortex-2型漩涡混匀仪中搅拌24 h,搅拌速率为1 500 r/min;再在25℃下将去离子水或TEA溶液与上述原材料搅拌1 min制得水泥浆体.采用TAM Air八通道等温量热仪测试浆体的水化放热数据,测试温度为25℃,放热速率与放热量试验值基于

胶材总量进行归一化处理.依照GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》测试水泥浆体在3、7、28 d时的抗压强度,重复测试3次,取其平均值作为试验值.采用梅特勒Five Easy Plus测定2种类型石膏在溶液中的电导率,以表征其溶解速率,具体步骤如下:将25.00 mg Ahy或26.65 mg Hem分别加到100 g NaOH(pH值为11)与TEA的混合溶液,其

中TEA质量为0.125 g(对应水泥浆体中TEA掺量为0%和0.5%)。待石膏加入上述混合溶液后即开始记录数据,初始5 min,每30 s记录1次;5~30 min时,每1 min记录1次;30 min后,每5 min记录1次。测试过程中对溶液进行持续搅拌,搅拌速率为1 000 r/min。

2 结果与分析

2.1 无TEA作用时不同类型石膏对APC和MKC水化进程的影响

图1为无TEA作用时不同类型石膏对APC和MKC水化进程的影响。由图1(a)、(b)可见:无TEA加入情况下,不论石膏是无水石膏还是半水石膏,当石膏掺量由1.5%提高到3.0%时,APC的水化峰值放热速率和总放热量均显著增加,与Zunino等^[10]研究结果一致,说明石膏掺量的增加能够促进水泥中硅相矿物反应;无论石膏类型及掺量如何,APC的水化曲线中均无明显的铝相矿物二次水化峰。

由图1(c)、(d)可见:无TEA加入情况下,与APC相比,MK的存在延长了MKC的水化诱导期,降低了峰值放热速率;当石膏掺量为1.5%时,水泥的水化主放热峰形状尖锐,应为铝相矿物的快速反应与硅相反应的放热叠加所致,铝相矿物反应提前,表明MK增加了水泥中的硫酸盐含量,1.5%的石膏掺量并不能抑制水泥中铝相矿物反应;随着石膏掺量的增加,铝

相矿物反应逐渐推迟,在主水化放热峰后出现放热峰肩,说明此时水泥中具有足够多的硫酸盐,抑制了铝相矿物的反应;试样MKC-Ahy的峰肩放热强度略高于MKC-Hem,表明试样MKC-Ahy在水化过程中消耗的石膏更多,铝相矿物反应更显著。

2.2 TEA作用下不同类型石膏对APC和MKC水化进程的影响

2.2.1 TEA作用下不同类型石膏对APC水化进程的影响

图2为TEA作用下不同类型石膏对APC水化进程的影响。由图2可见:(1)整体而言,TEA的加入促进了水泥中铝相矿物的水化反应,抑制了硅相矿物的水化进程,延长了水泥水化诱导期;随着石膏掺量的增加,TEA对硅相的抑制作用逐渐减弱,水泥水化诱导期缩短。(2)当TEA掺量为0.1%、石膏掺量为1.5%时,铝相矿物反应极大提前(初始放热量极大提高),说明此时水泥为欠硫酸盐状态,石膏掺量不足以抑制铝相矿物的快速反应;当石膏掺量大于3.0%时,铝相矿物反应出现在硅相反应放热峰之后,说明有足够多的石膏抑制了铝相矿物的反应。(3)当TEA掺量增至0.5%时,试样APC-Ahy的水化诱导期随着石膏掺量的增加而显著缩短;而试样APC-Hem中的石膏掺量达到7.0%才有效缩短了水泥水化诱导期,说明TEA掺量为0.5%时,相较半水石膏,无水石膏更能抑制APC中的铝相矿物反应。

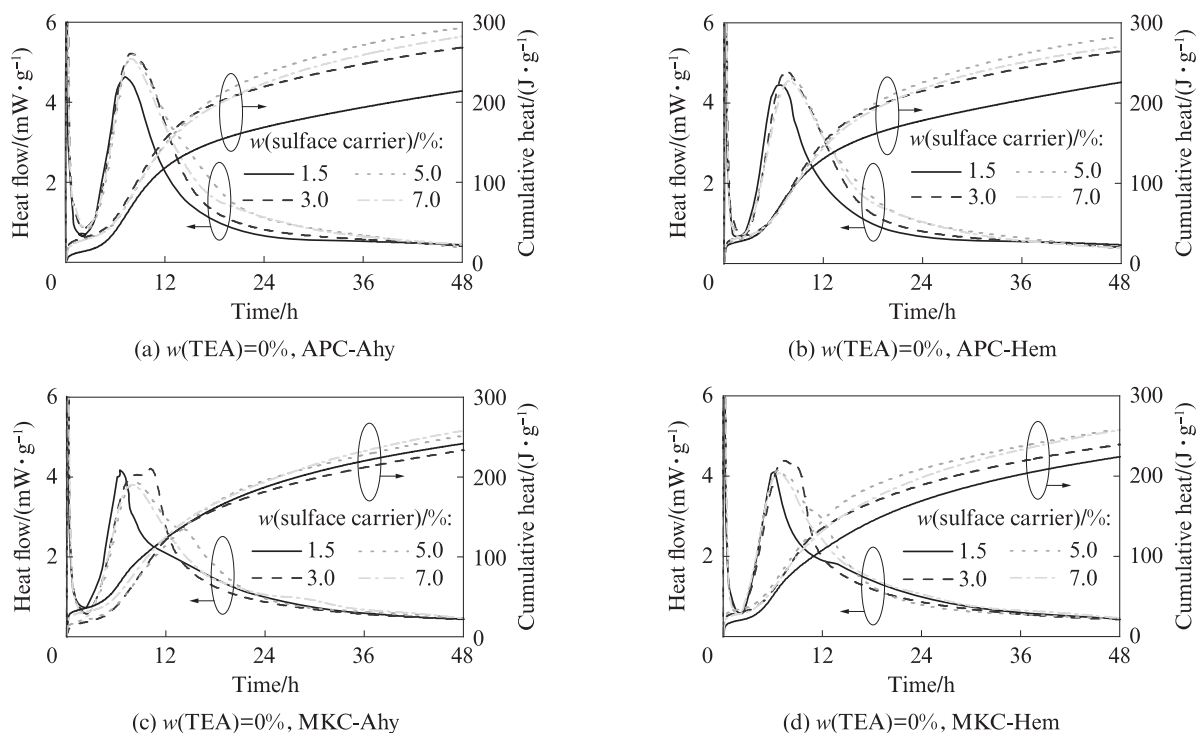


图1 无TEA作用时不同类型石膏对APC和MKC水化进程的影响

Fig. 1 Effect of different types of sulfate carriers on APC and MKC hydration process without presence of TEA

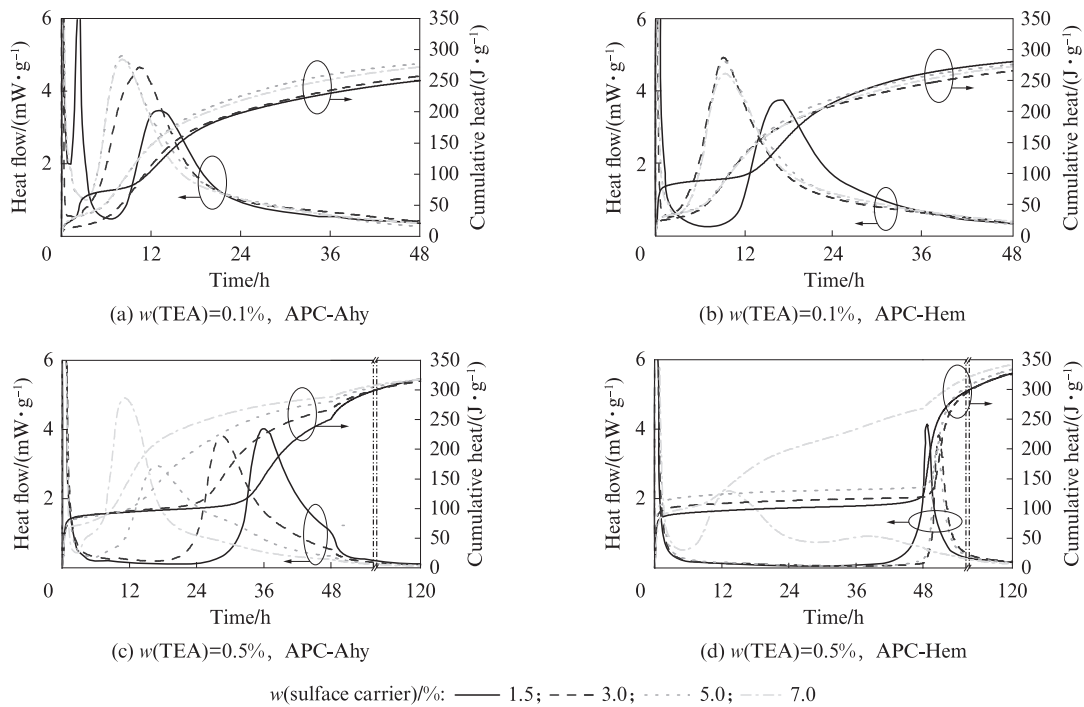


图2 TEA作用下不同类型石膏对APC水化进程的影响

Fig. 2 Effect of different types of sulfate carriers on APC hydration process in the presence of TEA

2.2.2 TEA作用下不同类型石膏对MKC水化进程的影响

图3为TEA作用下不同类型石膏对MKC水化进程的影响.由图3可见:(1)与对APC水化进程的影响一致,TEA的加入显著促进了MKC中铝相矿物的水化反应并抑制了硅相矿物的水化进程.(2)与APC相比,MK的引入进一步加剧了TEA的此种作用.如在掺有无水石膏的试样APC-Ahy中,当TEA掺量为0.1%时铝相矿物水化峰出现在2.2 h左右,硅相反应放热峰值在12.0 h左右(图2(a));而MK的引入使铝相矿物在初始阶段就能够迅速反应,同时硅相矿物反应峰值出现时间被延长到18.0 h.(3)当TEA掺量为0.5%且石膏掺量由1.5%提高至3.0%时,与APC相同的是,掺有无水石膏的试样MKC-Ahy的水化诱导期显著缩短,而掺有半水石膏的试样MKC-Hem的水化进程基本没有影响;与APC不同的是,当石膏掺量进一步升至5.0%或7.0%时,掺有半水石膏的试样MKC-Ahy水化诱导期随着石膏掺量的增加而显著减短,并且水化峰肩出现时间长于掺有无水石膏体系,说明在这2种石膏掺量下,相较无水石膏,半水石膏在MKC中更能抑制水泥中铝相矿物反应,这与APC中所得结论相反.

2.3 TEA作用下不同类型石膏对MKC抗压强度的影响

强度测试是检验水泥硫酸盐平衡的重要手段.图4为TEA作用下不同类型石膏对MKC抗压强度

的影响.需要说明的是,不论TEA掺量如何,当石膏掺量为1.5%或3.0%时,MKC均为欠硫酸盐状态,水泥放热总量较石膏掺量为5.0%或7.0%时低.因此,为简化试验,MKC抗压强度试验中石膏掺量仅选为1.5%、5.0%及7.0%.由图4可见:(1)在无TEA加入情况下,MKC的抗压强度达到最大值时无水石膏的掺量为7.0%,半水石膏的掺量为5.0%,这与图3中MKC的累积放热量规律一致.(2)在TEA掺量为0.1%的情况下,MKC的抗压强度达到最大值时2种石膏掺量与无TEA情况一致;同时与无TEA的MKC试样相比,TEA的掺入降低了其3 d抗压强度,提高了其28 d抗压强度,这源于TEA对水泥硅相矿物早期水化的抑制作用(图3(a)、(b)).(3)在TEA掺量为0.5%的情况下,石膏掺量为1.5%时,由于水泥水化过程被严重抑制(图3(c)、(d)),试样MKC-Ahy和MKC-Hem在3 d时几乎没有抗压强度;MKC的抗压强度达到最大值时无水石膏的掺量为7.0%,半水石膏的掺量为5.0%,说明在MKC体系中,相较无水石膏,半水石膏更利于体系强度发展.

2.4 TEA对APC及MKC硫酸盐平衡的影响

相较传统的强度测试方法,通过水化放热量判断水泥的硫酸盐平衡更加快捷有效^[11].图5为TEA作用下不同类型石膏对APC及MKC 48 h水化放热量的影响.一般而言,体系达到硫酸盐平衡所需的石膏掺量对应其最高放热量.

由图5(a)、(b)可见:在无TEA加入情况下,对

于APC,不论参加的是无水石膏还是半水石膏,当石膏掺量为5.0%时水泥的水化放热量都达到最大值,表明5.0%的石膏掺量为该体系的硫酸盐平衡点;对于MKC,由于MK较水泥的反应活性低,其48 h的总

放热量较APC显著降低.不同类型石膏导致水泥体系达到硫酸盐平衡时石膏掺量出现差异——MKC-Hem体系中石膏掺量为5.0%,MKC-Ahy体系中石膏掺量增至7.0%.

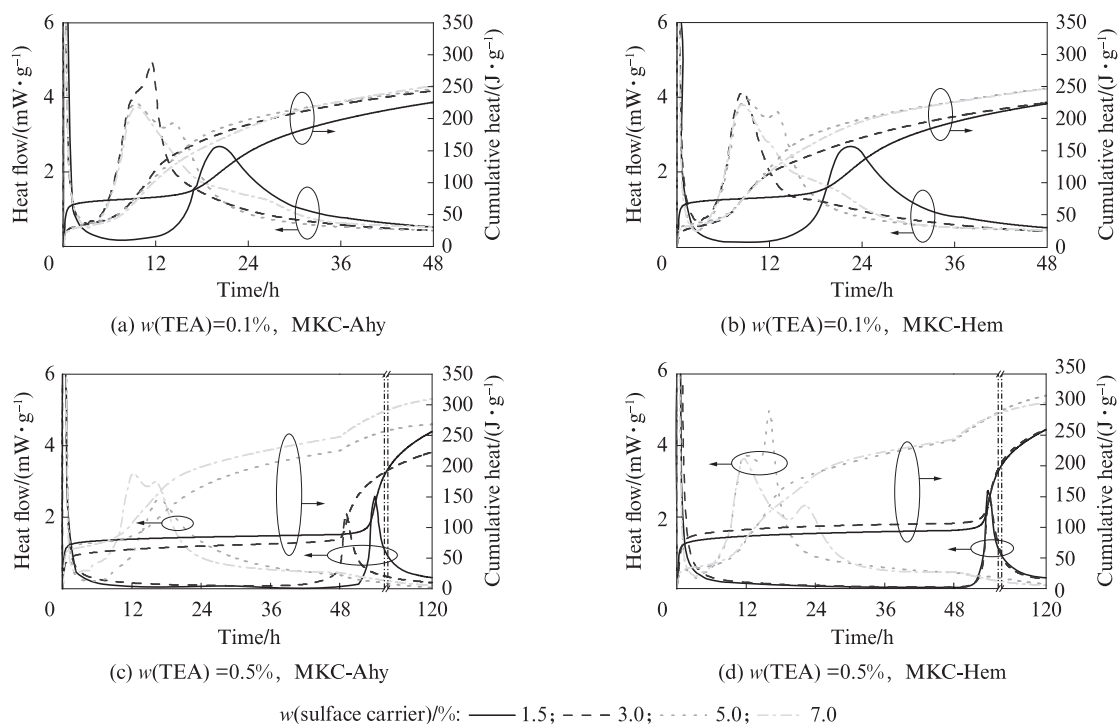


图3 TEA作用下不同类型石膏对MKC水化进程的影响

Fig. 3 Effect of different types of sulfate carriers on MKC hydration process in the presence of TEA

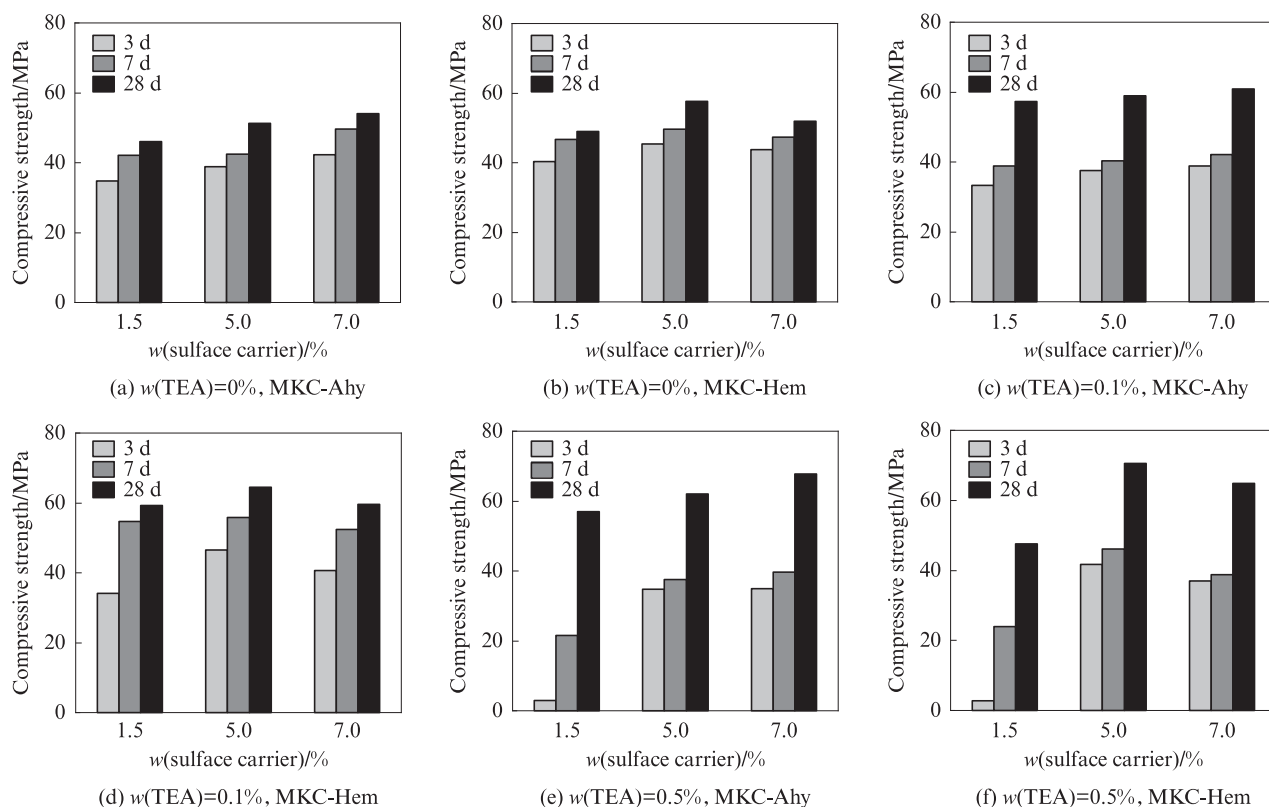


图4 TEA作用下不同类型石膏对MKC抗压强度的影响

Fig. 4 Effect of different types of sulfate carriers on compressive strength of MKC in the presence of TEA

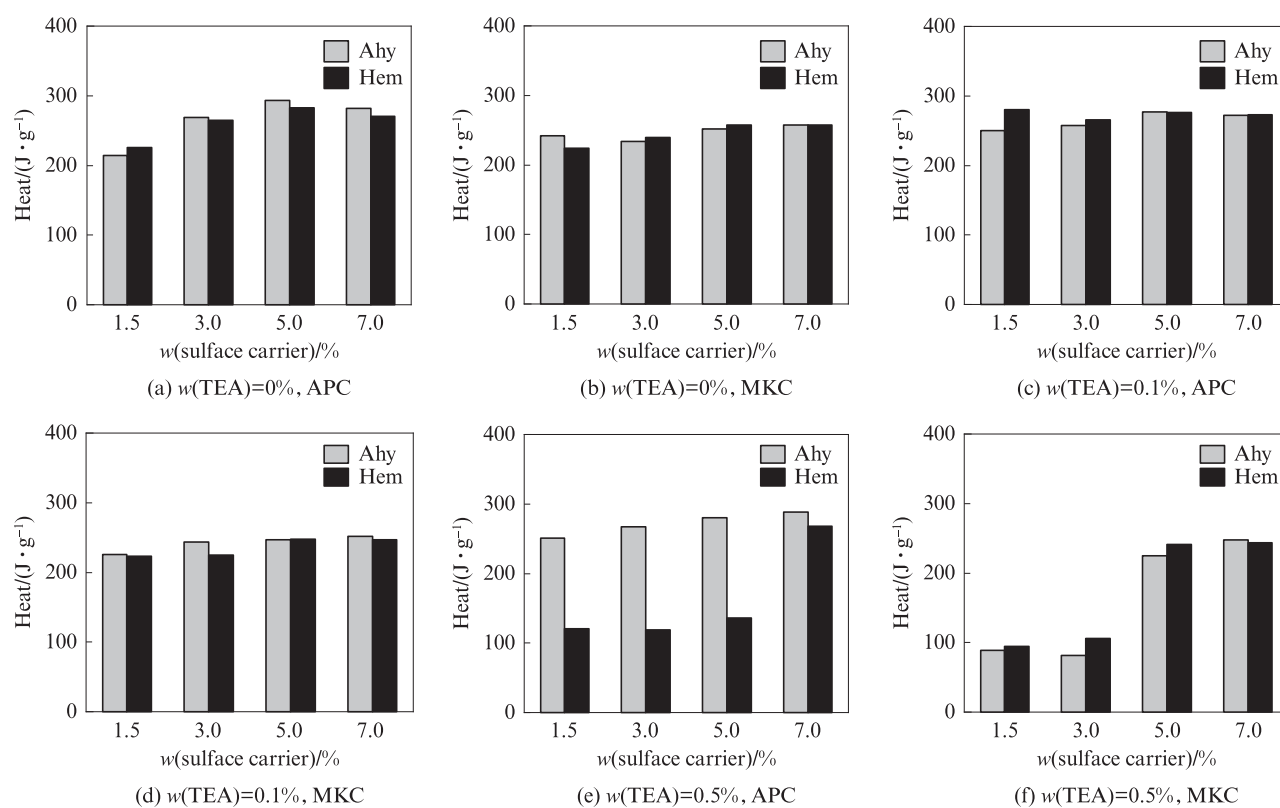


图5 TEA作用下不同类型石膏对APC及MKC 48 h放热量的影响

Fig. 5 Effect of different types of sulfate carriers on heat released within 48 h of APC and MKC in the presence of TEA

由图5(c)、(d)可见:在TEA掺量为0.1%情况下,体系内硫酸盐平衡点与无TEA加入情况下一致,即对于APC,不论参加的是无水石膏还是半水石膏,其硫酸盐平衡点均为5.0%;对于MKC, MKC-Hem体系中石膏掺量为5.0%, MKC-Ahy体系中石膏掺量增至7.0%。值得注意的是,在TEA掺量为0.1%情况下,对于APC-Hem体系,石膏掺量为1.5%时放热量更高,这是由于铝相矿物的水化被TEA极大促进(图2(a)),使其出现在硅相矿物水化之前,因而在此掺量下APC-Hem体系实际为欠硫酸盐状态。

由图5(e)、(f)可见:在TEA掺量提高至0.5%情况下,对于APC,虽然无水石膏与半水石膏均需要7.0%的掺量才可使体系达到最大放热量,但相较无水石膏,半水石膏掺量低于5.0%时,水泥的水化放热量显著降低,这是硅相矿物水化被严重抑制所致;对于MKC,当石膏掺量低于3.0%时,不论参加的是无水石膏还是半水石膏,水泥的水化放热量均较低,当石膏掺量增至5.0%时,水泥试样的水化放热量显著增加,同时,相较无水石膏,掺加半水石膏的MKC水化放热量更高。

2.5 讨论

上述研究表明,在无TEA加入情况下,不同类

型石膏对APC水化进程影响有限,而MK的引入能够促进体系中铝相矿物的水化反应,出现明显放热峰肩。由于水泥中铝相矿物二次反应的出现为石膏耗尽后硫酸根离子在铝酸三钙(C_3A)表面的脱附所致,因此放热峰肩的出现说明MK的引入可加速水泥中硫酸根离子的消耗^[12]。这一方面可能由于MK通过溶出铝酸根离子,促进了硫酸根离子的消耗^[13];另一方面也可能由于MK的高比表面积吸附一定量的硫酸根离子,减少了其在 C_3A 表面的吸附量^[14]。

当TEA掺量为0.1%时,不同类型石膏对APC与MKC水化进程的影响与无TEA加入情况下类似。对于TEA掺量为0.5%时的APC体系,相较半水石膏,APC中无水石膏掺量的增加可显著缩短水泥的水化诱导期,更能有效抑制水泥中铝相矿物的快速水化反应。

图6为不同TEA掺量下2种类型石膏溶液的电导率。由图6可见:无论是否加入TEA,半水石膏的溶解速率总是高于无水石膏,而TEA更能促进2种石膏的溶解,说明半水石膏在短时间内能提供更多的硫酸根离子。考虑到水泥中铝相矿物的水化反应会通过吸附硫酸根离子而被抑制^[15],如果半水石膏溶解出的硫酸根离子大量吸附在铝相矿物表面,那么半水石膏掺量的增加应能够显著抑制铝相矿物的

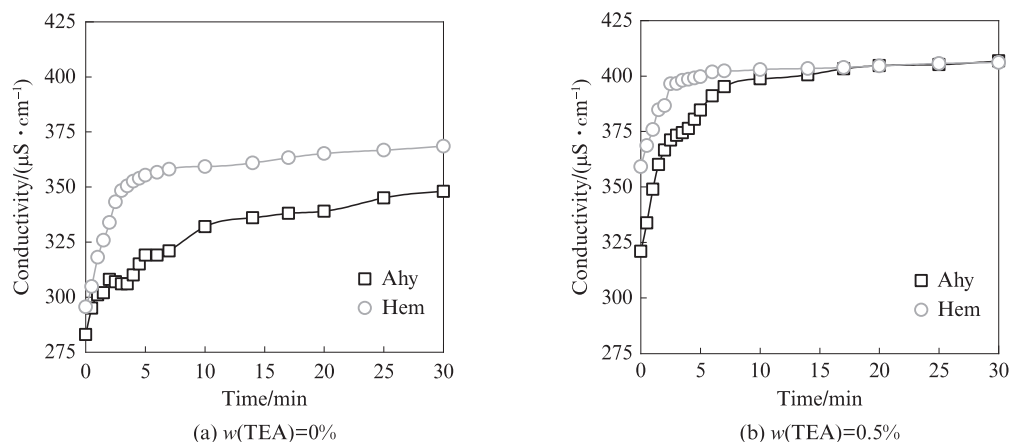


图6 不同TEA掺量下不同类型石膏溶液电导率

Fig. 6 Conductivity of sulfate solution prepared at different TEA dosages

反应,进而缩短水化诱导期;但这与TEA掺量为0.5%时在APC中观察到的现象相反,说明半水石膏快速溶解出的硫酸根离子并没有全部吸附在铝相矿物表面,只是部分被TEA加速溶解出的铝酸根离子所消耗,生成钙矾石(Aft)等水化产物^[4]。另外,由于半水石膏溶解速率很快,硫酸根离子的快速消耗导致半水石膏短时间内完全溶解,体系不能持续提供硫酸根离子来抑制铝相矿物的反应,因此体系需要更多的石膏以维持硫酸盐平衡。而在APC中,由于无水石膏溶解速率较慢,硫酸根离子可在较长时间内持续溶出以抑制水泥中铝相矿物的反应^[16]。因此在APC中,无水石膏掺量增加更能有效抑制水泥中铝相矿物的水化反应。

对于TEA掺量为0.5%时的MKC体系,当MKC体系中石膏掺量不足(1.5%或3.0%)且石膏类型相同时,MKC水化诱导期显著长于APC,这可能源于MK通过溶出铝酸根离子或吸附硫酸根离子,加速了水泥浆液相中硫酸根离子的消耗,促进了铝相矿物的水化,进而抑制了硅相矿物水化。与APC相似,MKC体系中无水石膏由于溶解速率缓慢,可持续提供硫酸根离子,当其掺量增加时,能够显著缩短诱导期,但半水石膏在此掺量下影响有限。当石膏掺量大于5.0%时,APC-Ahy诱导期仍略短于MKC-Ahy,这与MK促进铝相矿物水化规律一致。但MKC-Hem的诱导期较APC-Hem显著缩短,并且铝相矿物的二次水化峰更为延迟,这说明当半水石膏掺量充足时(大于等于5.0%),MK的引入反而会抑制铝相矿物的水化,从而降低了达到体系硫酸盐平衡时所需的石膏掺量。

3 结论

(1)在无三乙醇胺(TEA)加入情况下,不同类型

石膏对自配硅酸盐水泥(APC)的水化进程影响有限。偏高岭土(MK)的加入会促进体系中铝相矿物的水化反应,改变APC中原有的硫酸盐平衡并延缓硅相矿物水化。

(2)由于TEA的加入会促进水泥中铝酸盐相及石膏的溶解,需要更高的石膏掺量以维持体系内硫酸盐平衡。同时,石膏类型与掺量的变化将通过改变水泥中硫酸根离子溶出-吸附-沉淀的动态平衡,对APC和掺偏高岭土水泥(MKC)的水化进程及硫酸盐平衡产生显著影响。

(3)对于APC,当TEA掺量为0.5%时,相较半水石膏,无水石膏掺量的增加可显著缩短水泥水化诱导期,更能有效抑制水泥中铝相矿物的快速水化反应,减缓铝酸根离子对硅相矿物水化进程的抑制作用,可能是由于无水石膏较低的溶解速率使体系中一直有硫酸根离子的溶出,进而更能有效抑制水泥中铝相矿物的反应。对于MKC,当石膏掺量大于5.0%时,相较无水石膏,半水石膏更有助于抑制铝相矿物的水化。这可能是由于半水石膏快速溶出的硫酸根离子不仅可形成水化产物,还可吸附在MK表面,作为硫酸根离子供给源,在水化后期脱附进入液相,能够持续抑制水泥中铝相矿物反应。

参考文献:

- [1] FRIAS M, RODRIGUEZ O, VEGAS I, et al. Properties of calcined clay waste and its influence on blended cement behavior [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2008, 91(4): 1226-1230.
- [2] HUANG H, LI X R, AVET F, et al. Strength-promoting mechanism of alkanolamines on limestone-calcined clay cement and the role of sulfate[J]. Cement and Concrete Research, 2021, 147:106527.

- [3] LU Z C, KONG X M, JANSSEN D, et al. Towards a further understanding of cement hydration in the presence of triethanolamine[J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 132: 106041.
- [4] 董耀武, 孙振平, 周晓阳, 等. 三乙醇胺和三聚磷酸钠助磨剂对水泥颗粒表面性质的影响[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(7): 722-729.
- DONG Yaowu, SUN Zhenping, ZHOU Xiaoyang, et al. Effect of triethanolamine and sodium tripolyphosphate as grinding aids on the surface properties of cement particle[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(7):722-729. (in Chinese)
- [5] 张永娟, 吴蓉. SO_3 对脱硫石膏-偏高岭土-水泥复合胶凝体系性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(1):24-29.
- ZHANG Yongjuan, WU Rong. Influence of SO_3 on properties of flue gas desulphurization gypsum (FGD)-metakaolin-cement compound system[J]. *Journal of Building Materials*, 2017, 20(1): 24-29. (in Chinese)
- [6] HIRSCH T, LU Z C, STEPHAN D. Impact of triethanolamine on the sulfate balance of Portland cements with mixed sulfate carriers[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2021, 104(9):4829-4842.
- [7] 马璐璐, 张楠, 刘芳, 等. 赤泥-粉煤灰稳定煤矸石基层强度特性及机理[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(7):762-770.
- MA Lulu, ZHANG Xiao, LIU Fang, et al. Strength characteristics and mechanism of red mud-fly ash stabilized coal gangue base[J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(7): 762-770. (in Chinese)
- [8] 胡传林, 陶永征, TARIQ Jamil, 等. 煅烧黏土反应活性及其影响机理[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(2):179-185,220.
- HU Chuanlin, TAO Yongzheng, TARIQ Jamil, et al. Reactivity of calcined clay and its influence mechanism [J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(2):179-185,220. (in Chinese)
- [9] 杜渊博, 葛勇. 偏高岭土、玻璃粉和石灰石粉对水泥石微观结构和性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(8):773-780.
- DU Yuanbo, GE Yong. Effects of metakaolin, glass powder and limestone filler on microstructure and properties of cement paste [J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(8):773-780. (in Chinese)
- [10] ZUNINO F, SCRIVENER K. Factors influencing the sulfate balance in pure phase $\text{C}_3\text{S}/\text{C}_3\text{A}$ systems[J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 133:106085.
- [11] BENTZ D P, BARRETT T, VARGA I, et al. Relating compressive strength to heat release in mortars[J]. *Advances in Civil Engineering Materials*, 2012, 1(1):14.
- [12] ZUNINO F, SCRIVENER K. The influence of the filler effect on the sulfate requirement of blended cements[J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 126:105918.
- [13] MAIER M, SPOSITO R, BEUNTNER N, et al. Particle characteristics of calcined clays and limestone and their impact on early hydration and sulfate demand of blended cement[J]. *Cement and Concrete Research*, 2022, 154:106736.
- [14] SCHERB S, MAIER M, BEUNTNER N, et al. Reaction kinetics during early hydration of calcined phyllosilicates in clinker-free model systems[J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 143:106382.
- [15] QUENNOZ A, SCRIVENER K L. Interactions between alite and C_3A -gypsum hydrations in model cements [J]. *Cement and Concrete Research*, 2013, 44:46-54.
- [16] LU Z C, PENG X Y, LIU Z W, et al. Influence of mixing speed on the hydration and setting performance of cement paste in the presence of triethanolamine [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 385:131490.