DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20251298

减缩剂和膨胀剂对 UHPC 早龄期自收缩性能的影响

张晓闯[1]，叶婷婷[2]，陈 波[1]，宁紫缘[1]

（1. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室，江苏 南京 210029；
2. 南京审计大学智慧校园建设中心，江苏 南京 211815）

摘要：为了解决超高性能混凝土(UHPC)早期自收缩大、开裂风险高的问题，研究了膨胀剂、减缩剂掺量对UHPC早期自收缩性能的影响，开展了单掺膨胀剂、单掺减缩剂及两者复掺对UHPC自收缩的影响试验，分析了微观产物形貌。结果表明，单掺膨胀剂和减缩剂均会降低UHPC早期自收缩，两者复掺的减缩效果比单掺时更显著。单掺时，膨胀剂掺量越多，减缩效果越好，最优掺量为8%，而添加1.5%减缩剂降低自收缩的效果最好。膨胀剂单掺时，UHPC基体的孔隙被填充，结构更致密，抵抗收缩变形的能力增强；减缩剂单掺时，UHPC的基体孔隙率与孔隙尺寸比Blank组小，在掺量适当时，能够降低自收缩；膨胀剂和减缩剂复掺时，AFt晶体尺寸小于单掺膨胀剂组但大于单掺减缩剂组，结构较为致密，说明两者起到了协同减缩作用。

关键词：自收缩；UHPC；膨胀剂；减缩剂；微观形貌

中图分类号：TV431 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-7709(2026)01-0108-06

Effects of Shrinkage Reducing Agent and Expansive Agent on Autogenous Shrinkage of UHPC at Early Age

ZHANG Xiao-chuang[1], YE Ting-ting[2], CHEN Bo[1], NING Zi-yuan[1]

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Smart Campus Construction Center, Nanjing Audit University, Nanjing 211815, China)

Abstract: In order to solve the problem of large early autogenous shrinkage and high cracking risk of the UHPC, the effects of expansive agent and shrinkage reducing agent on the early autogenous shrinkage of the UHPC were studied. The effects of single expansive agent, single shrinkage reducing agent and their combination on the autogenous shrinkage of the UHPC were tested, and the microstructure of the products was analyzed. The results show that both expansive agent and shrinkage reducing agent can reduce the early autogenous shrinkage of the UHPC, and the shrinkage reducing effect of the combined admixture is more significant than that of the single admixture. When mixed alone, the more the amount of expansive agent is, the better the shrinkage reduction effect is. The optimal dosage is 8%, and the addition of 1.5% shrinkage reducing agent has the best effect on reducing autogenous shrinkage. When the expansive agent is added alone, the pores of the UHPC matrix are filled, the structure is denser, and the ability to resist shrinkage deformation is enhanced; When the shrinkage reducing agent is single-doped, the porosity and pore size of the matrix are smaller than those of the Blank group, and the autogenous shrinkage can be reduced under the appropriate dosage. When the expansive agent and the shrinkage reducing agent are mixed, the size of the AFt crystal is smaller than that of the single-doped expansive agent group but larger than that of the single-doped shrinkage reducing agent group, the structure is denser, indicating that the both of these play a synergistic role in shrinkage reduction.

Key words: autogenous shrinkage; UHPC; expansive agent; shrinkage reducing agent; microstructure

1 引言

超高性能混凝土(UHPC)是一种具有超高强度和高韧性的纤维增强水泥基复合材料[1-2]。UHPC制备时使用大量胶凝材料，导致UHPC会产生较大的收缩，尤其水化早期产生的自收缩占总收缩的80%以上，当受到强约束时，混凝土

收稿日期：2025-07-23，**修回日期**：2025-10-09，**接受日期**：2025-10-10

基金项目：国家重点研发计划(2024YFC3214904)

作者简介：张晓闯(2001-)，男，硕士，研究方向为超高性能混凝土，E-mail:1016604645@qq.com

通讯作者：陈波(1978-)，男，博士、教授、博导，研究方向为水工材料，E-mail:bchen@nhri.cn

中国知网 https://www.cnki.net

开裂风险显著提升[3]。为解决 UHPC 自收缩大的问题,通常采取掺入功能性减缩材料、调整改善养护方式、使用内养护材料等减缩措施。功能性减缩材料能够显著降低混凝土早龄期自收缩,如减缩剂和膨胀剂。减缩剂能够减小混凝土内部毛细管的孔隙压力,从而降低因基体内部自干燥效应引起的收缩应力[4]。同时,减缩剂通过降低水泥早期的水化速率,使早期的水化程度减小,起到降低收缩的作用[5-7]。邓宗才等[8]认为减缩剂能够有效降低 UHPC 的自收缩,掺量为 1.5%时,减缩效果最佳。膨胀剂反应后生成具有膨胀性的产物,掺入混凝土中,基体内部的孔隙结构得到改善,一定程度上可以降低收缩[9]。LI S K 等[10]发现 MgO 膨胀剂对 UHPC 早期收缩有补偿作用,活性越高,补偿效果越显著。还有研究采用减缩剂和膨胀剂复掺的方式,以同时满足减缩和减少力学性能损失的要求。龚建清等[11]发现减缩剂和膨胀剂复掺时,对 UHPC 收缩的抑制最强,力学性能最好。但无论是单掺膨胀剂或减缩剂,还是两者复掺,研究多集中于对普通混凝土和高强混凝土的影响,对 UHPC 早期自收缩的影响研究相对较少。由于 UHPC 早期自收缩测试的方法、零点等不同,就膨胀剂和减缩剂对 UHPC 的影响还存在不同认识。鉴此,本文通过设计对比试验,采取非接触式波纹管法,以材料加水搅拌完成时为零点完整记录 UHPC 浆体早期自收缩,考察单掺减缩剂、单掺膨胀剂和两者复掺对 UHPC 早龄期自收缩的影响,并采用 SEM 对水化产物的微观形貌进行分析,探讨减缩剂、膨胀剂对 UHPC 水化产物的影响。

2　试验设计

2.1　原材料

胶凝材料是普通硅酸盐水泥(P·O 42.5)、硅灰、粉煤灰;南京本地砂,细度模数为 2.9;聚羧酸系高性能减水剂,透明无色液体,密度为 1.04 g/cm^3,减水率>30%。采用高性能混凝土膨胀剂(HP-CSA),主要成分是 CaO、SO_3、AlO_3,见表 1。减缩剂采用基于多元醇的白色粉体减缩剂(SRA40),主要活性成分含量>60%,体积密度为 550~750 kg/m^3,600 μm 筛余<3%。改性聚醚类消泡剂,白色粉状固体。拌合水为自来水。

表 1　HP-CSA 的主要化学成分

Tab. 1　The main chemical constituents of HP-CSA

成分	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	SO_3
含量/%	1	1	4	70	18

2.2　配合比

试验基准配合比(Blank)见表 2,按胶凝材料质量占比外掺减缩剂,按水泥质量占比取代水泥掺入膨胀剂,组合见表 3(S 指减缩剂、C 指膨胀剂,如 S1C4 表示 1%减缩剂与 4%膨胀剂复掺)。

表 2　试验基准配合比

Tab. 2　Test benchmark mix ratio　kg/m^3

水泥	粉煤灰	硅灰	水	砂	减水剂	消泡剂
735	105	210	168	1 154	14.7	3.1

表 3　减缩剂和膨胀剂掺量组合

Tab. 3　Combination of shrinkage reducing agent and expansive agent dosage

编号	减缩剂/%	膨胀剂/%	编号	减缩剂/%	膨胀剂/%
S1	1	—	S1C8	1	8
S1.5	1.5	—	S1.5C4	1.5	4
S2	2	—	S1.5C6	1.5	6
C4	—	4	S1.5C8	1.5	8
C6	—	6	S2C4	2	4
C8	—	8	S2C6	2	6
S1C4	1	4	S2C8	2	8
S1C6	1	6			

注:"—"表示该试剂未掺入。

2.3　试验方法

按照规范《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082-2024)[12],采用波纹管测试 UHPC 的自收缩性能。测试零点设为原材料加水搅拌完成时,使用 GL240 采集仪记录数据。采用非接触式电涡流传感器,测量传感器与模具之间的距离,测试系统见图 1。测试完成后采用德国 ZEISS Sigma 360 型号电子扫描显微镜观察浆体的微观结构。

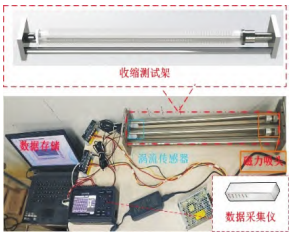


图 1　自收缩测试系统

Fig. 1　Self-shrinkage test system

3　结果与讨论

3.1　单掺膨胀剂对 UHPC 自收缩的影响

图 2 为单掺膨胀剂时,UHPC 在 7 d 内的自收缩发展曲线。由图 2 可看出,UHPC 自收缩曲线在 3 d 内迅速上升,之后逐渐趋于稳定;C8 组曲线高度显著低于其他组,自收缩程度最小。4 d 时,C4、C6、C8 组的自收缩值分别为 5 141×10^{-6}、5 040×10^{-6}、3 461×10^{-6},相较于 Blank 组

中国知网　https://www.cnki.net

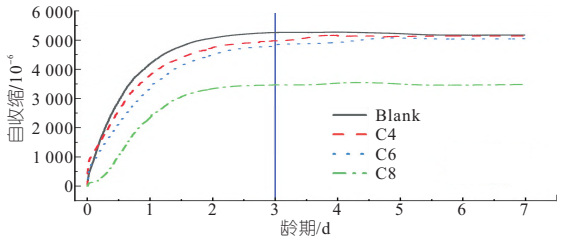


图 2 单掺膨胀剂 UHPC 的自收缩

Fig. 2 Autogenous shrinkage of UHPC with expansive agent alone

分别下降 2.6%、4.5%、34.4%，说明随着膨胀剂掺量增大，UHPC 自收缩逐渐减小，这与文献[9，13]的研究结果相似，但不同的是，在本试验中随着膨胀剂掺量增加，补偿收缩效果突变，膨胀剂掺量 8%的减缩效果显著高于 6%。

由于 UHPC 胶凝材料用量大，基体早期水化快，但此时膨胀剂无法产生足够多的膨胀性物质，补偿作用小于基体自收缩作用，所以自收缩曲线迅速上升。曲线在 3 d 后趋于平稳，是因为随着水化进行，未水化的水泥颗粒减少，且被产物包裹，阻碍与水分接触，反应速率大幅度下降，所以自收缩增加缓慢。掺膨胀剂组的基体中膨胀剂水化生成膨胀性物质补偿了收缩，使得掺膨胀剂组的最终收缩小于 Blank 组，膨胀剂掺量＞6%时，补偿收缩效果更显著。

3.2 单掺减缩剂对 UHPC 自收缩的影响

单掺减缩剂组 7 d 内 UHPC 自收缩发展曲线见图 3。

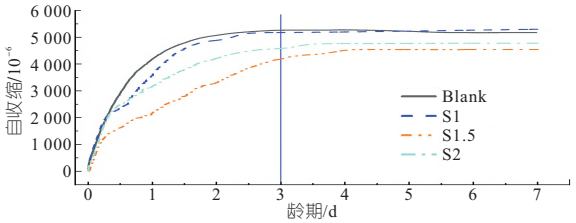


图 3 单掺减缩剂 UHPC 基体的自收缩

Fig. 3 Autogenous shrinkage of UHPC matrix with shrinkage reducing agent alone

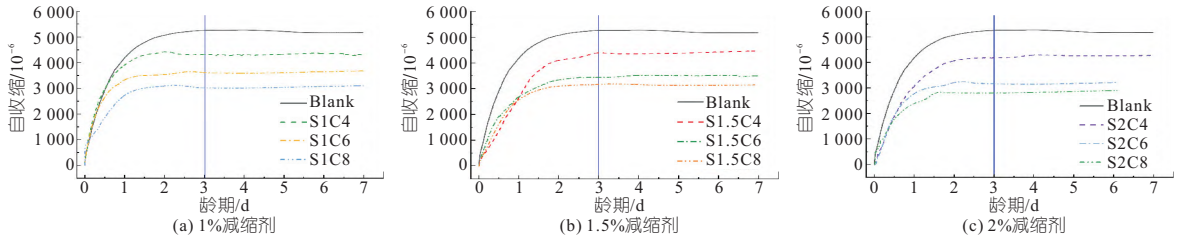
由图 3 可看出，UHPC 自收缩曲线在 3 d 内增长较快，3 d 后逐渐平稳，对比可知单掺膨胀剂组的自收缩曲线更饱满。4 d时，S1、S1.5、S2组的自收缩值分别为 $5\ 207\times10^{-6}$、$4\ 540\times10^{-6}$、$4\ 764\times10^{-6}$，相较于 Blank 组，自收缩值分别下降 1.3%、13.9%、9.7%。说明单掺减缩剂能够降低 UHPC 的自收缩，最优掺量为 1.5%。目前研究认为，随着减缩剂掺量增加[5，11]，混凝土自收缩降低越明显，本试验得出，随减缩剂掺量增加，减缩效果先增加后降低。

减缩剂是弱极性表面活性物质，能够降低孔隙的毛细管张力，从而起到降低收缩的作用，但是减缩剂掺量与减缩效果不成正比。这种现象可能是因为减缩剂的减缩效果存在阈值，当减缩剂掺过量后，并不会进一步降低孔隙的表面张力来降低收缩[14-16]。由图 3 可看出，单掺减缩剂组的曲线不饱满，可能是因为减缩剂会降低基体孔隙溶液中碱离子和 pH 值，抑制 $Ca(OH)_2$ 生成，从而降低基体的水化放热速率和峰值，导致水化放热峰延迟，水化诱导期延长，在相同时间内，单掺减缩剂组产生的收缩总量要小于 Blank 组，曲线增长变缓[5，7，17]。

3.3 复掺膨胀剂和减缩剂对 UHPC 自收缩的影响

当减缩剂掺量不变时，膨胀剂掺量对 UHPC 自收缩的影响见图 4。由图 4 可知，复掺组的曲线在 0～3 d 内迅速上升，自收缩值达 7 d 的 90%以上，3 d 后曲线趋于稳定，这与单掺时的规律相似。整体上看，复掺膨胀剂和减缩剂可显著降低 UHPC 的自收缩，且随膨胀剂掺量增加 UHPC 自收缩值降低。图 4(a)中 S1C4、S1C6、S1C8 组在 4 d 时的自收缩值分别为 $4\ 319\times10^{-6}$、$3\ 593\times10^{-6}$、$3\ 014\times10^{-6}$，相较于 Blank 组分别下降 18.1%、31.9%、42.9%。同理，根据图 4(b)、(c)得 S1.5C4、S1.5C6、S1.5C8 组分别下降 17.5%、33.4%、40.1%，S2C4、S2C6、S2C8 组分别下降 18.7%、40.2%、46.4%，复掺时 UHPC 的自收缩比单掺膨胀剂组的更小，证明减缩剂和膨胀剂复掺起到了协同作用。

当膨胀剂掺量不变时，减缩剂掺量对 UHPC 自收缩的影响见图 5。由图 5 可看出，随减缩剂掺量变化，UHPC自收缩曲线在3 d内有差异，

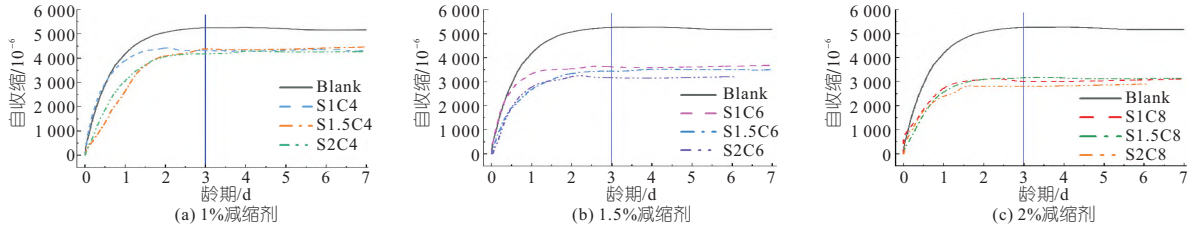


(a) 1%减缩剂 (b) 1.5%减缩剂 (c) 2%减缩剂

图 4 减缩剂掺量不变时膨胀剂掺量对自收缩的影响

Fig. 4 The effect of expansive agent content on autogenous shrinkage when the content of shrinkage reducing agent is constant

中国知网 https://www.cnki.net



(a) 1%减缩剂　(b) 1.5%减缩剂　(c) 2%减缩剂

图 5　膨胀剂掺量不变时减缩剂掺量对自收缩的影响

Fig. 5　The effect of shrinkage reducing agent content on autogenous shrinkage when the content of expansive agent is constant

3 d 之后收缩值差距小。4 d 时,S1C4、S1.5C4、S2C4 组的自收缩值分别为 $4\ 319\times10^{-6}$、$4\ 355\times10^{-6}$、$4\ 288\times10^{-6}$,相较 Blank 组的降低幅度分别为 18.1%、17.5%、18.7%,总收缩值差距较小;同理可得 S1C6、S1.5C6、S2C6 组分别下降 31.9%、33.4%、40.2%,S1C8、S1.5C8、S2C8 组分别下降 42.9%、40.1%、46.4%。与单掺减缩剂组对比时,UHPC 复掺组收缩程度更小,再次说明膨胀剂和减缩剂会发生协同作用。

由此可知,膨胀剂和减缩剂复掺时,膨胀剂对掺量越多,自收缩越小,膨胀剂发挥的减缩效果更佳。当减缩剂掺量不变、膨胀剂掺量变化时,自收缩曲线在早期发展相近;当膨胀剂掺量相同、减缩剂掺量不同时,曲线随时间增加逐渐靠近。这说明两者复掺时,膨胀剂对自收缩总量的影响显著,而减缩剂只影响极早期的自收缩,对收缩总量影响较小[6]。

膨胀剂和减缩剂复掺时,由于减缩剂延缓水泥水化,降低了基体的水化速率,能够降低 UHPC 早期自收缩程度。但在早期膨胀剂难以获得充分的水分产生膨胀源,并不能对早期收缩产生较大影响,但因减缩剂能够延缓水化,维持相对湿度,所以能够促使膨胀剂水化,生成具有膨胀性的物质,一定程度上能够降低 UHPC 的早期自收缩,此时两者发挥出协同作用。

UHPC 自收缩在 7 d 内的平均变化速率曲线见图 6。其中,自收缩变化率由自收缩曲线一阶导数得到。由图 6 可看出,测试初始,Blank 组、单掺膨胀剂组、单掺减缩剂组、复掺组的收缩值平均变化速率分别为 4.8×10^{-6}、2.8×10^{-6}、3.9×10^{-6}、$1.6\times10^{-6}\ \mathrm{min}^{-1}$,Blank 组的变化速率最大,

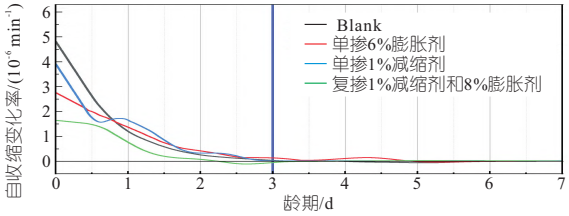


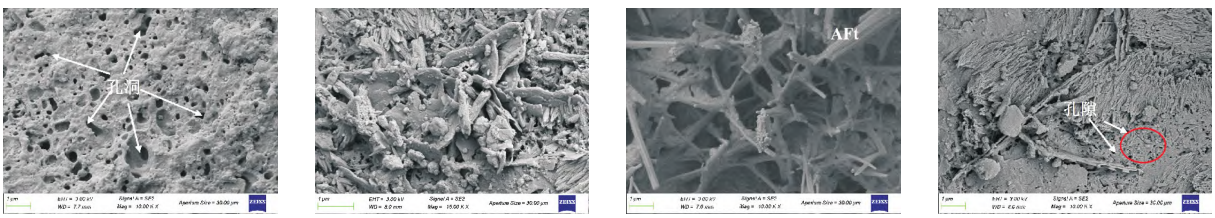
图 6　自收缩值平均变化速率

Fig. 6　Average change rate of autogenous shrinkage value

复掺组的变化速率最小。说明膨胀剂和减缩剂在水化极早期就开始发挥减缩作用,且膨胀剂和减缩剂复掺可以起到协同作用,减缩更明显。1 d 时,各组收缩值平均变化速率分别为 1.2×10^{-6}、1.4×10^{-6}、1.7×10^{-6}、$0.8\times10^{-6}\ \mathrm{min}^{-1}$,增长速率显著,其中复掺组速率最小,单掺减缩剂组速率最大。可能是减缩剂会延缓水化,导致基体强度形成缓慢,收缩速率大。2 d 时,各组速率分别为 0.2×10^{-6}、0.4×10^{-6}、0.3×10^{-6}、$0.05\times10^{-6}\ \mathrm{min}^{-1}$,各组降至 $0.5\times10^{-6}\ \mathrm{min}^{-1}$ 以下,说明基体自收缩完成绝大部分。3 d 时,各组收缩变化速率分别为 0.04×10^{-6}、0.14×10^{-6}、0.02×10^{-6}、$-0.05\times10^{-6}\ \mathrm{min}^{-1}$,说明基体的自收缩基本上已经完成。

3.4　UHPC 水化产物微观形貌分析

Blank 组的水化产物形貌见图 7。由图 7 可看出,基体微观结构中存在许多明显的孔隙,可能是化学收缩和自收缩在基体形成结构后仍在进行,体积减小以孔洞的形式表现。整体上看,Blank 组的微观结构较为疏松,水化产物钙矾石(AFt)呈细长棒状,水化产物之间未紧密搭接形成致密的三维网络结构。水化硅酸钙(C-S-H)凝胶的尺寸小,数量少,分布散,未能填充有害孔洞,以降低 UHPC 自收缩。



(a) 孔洞　(b) 水化产物　(c) AFt　(d) 孔隙

图 7　Blank 组 UHPC 微观结构

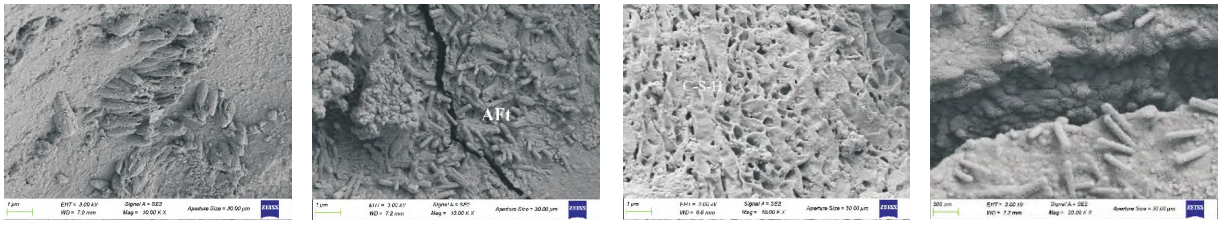
Fig. 7　Microstructure of UHPC in Blank group

中国知网　https://www.cnki.net

单掺 8%膨胀剂(C8)组 UHPC 的水化产物见图 8。由图 8 可看出,单掺膨胀剂组的 AFt 晶体呈现短粗棒状结构,相互交叉重叠;C-S-H 凝胶产物数量多并相互聚集,覆盖在其他水化产物上,形成整体相连的结构;膨胀剂促进水化生成许多体积较大的晶体,使结构更加致密,提升了基体抵抗收缩的能力。相对于 Blank 组,掺膨胀剂组的基体结构更加致密,水化产物更多、排列更紧密,未出现明显的层状结构和孔洞,说明膨胀剂促进了水化产物填充孔洞,宏观上表现为在一定程度上补偿 UHPC 收缩。

单掺 1%减缩剂(S1)组的 UHPC 水化产物见图 9。由图 9 可看出,相对于 Blank 组,单掺减缩剂组的 AFt 呈细长棒状,晶体尺寸小,但晶体数量相对较多;C-S-H 凝胶的形态和分布与 Blank 组相似,虽未充分填充孔隙,但减缩剂组的结构相对致密,抵抗收缩能力更强;由于减缩剂具有减缓水化的作用,基体中六方板状氢氧化钙晶体数量较多,有利于减小收缩[11]。且随着基体水化的进行,基体不断生成产物并逐渐致密,对收缩起到一定的降低作用。

掺入 4%膨胀剂和 2%减缩剂 UHPC 的水化产物见图 10。由图 10 可看出,相对于 Blank 组,复掺组基体的水化产物多,孔洞少,结构致密;相对于单掺膨胀剂组,水化产物未形成短棒状 Aft 晶体,但排列也较为致密;相对于单掺减缩剂组,水化产物数量多并排列密实,未形成较多大板块的氢氧化钙晶体,但水化程度高,抵抗收缩能力较好。说明减缩剂和膨胀剂发挥出协同作用,膨胀剂掺入改善了基体结构因减缩剂造成的不利影响,同时又发挥出膨胀剂和减缩剂减缩的作用,使得减缩效果更显著。



(a) 孔洞处水化产物 (b) 短粗棒状AFt (c) 褶皱状水化产物 (d) 钙矾石晶体

图 8 单掺 8%膨胀剂组 UHPC 微观结构

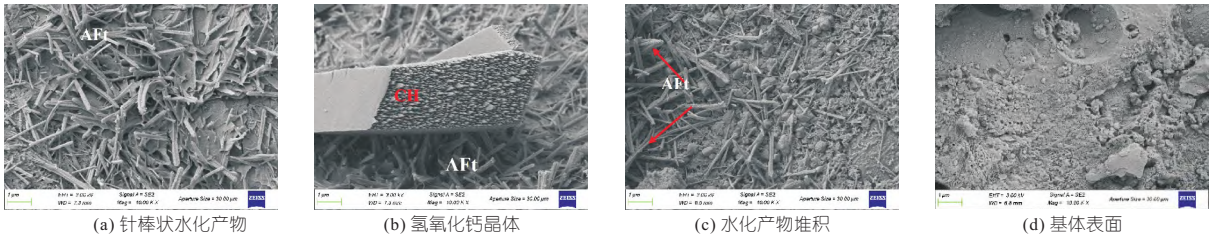
Fig. 8 Microstructure of UHPC with 8% expansive agent group



(a) 细小孔隙 (b) 针棒状水化产物 (c) 水化产物相互搭接 (d) 氢氧化钙晶体

图 9 单掺 1%减缩剂 UHPC 的微观结构

Fig. 9 Microstructure of UHPC with 1% shrinkage reducing agent alone



(a) 针棒状水化产物 (b) 氢氧化钙晶体 (c) 水化产物堆积 (d) 基体表面

图 10 复掺 4%膨胀剂和 2%减缩剂时 UHPC 的微观结构

Fig. 10 Microstructure of UHPC with 4% expansive agent and 2% shrinkage reducing agent

4 结论

a. 掺入膨胀剂有效降低 UHPC 早期自收缩,随着膨胀剂掺量增加,自收缩越小。掺入膨胀剂后基体水化产物更多,结构更加密实,抵抗收缩的能力变强。

b. 单掺减缩剂能降低 UHPC 早期自收缩,随着减缩剂掺量增加,自收缩先减小后增大。

c. 复掺膨胀剂和减缩剂能显著降低 UHPC 的早期自收缩,膨胀剂掺量越多,UHPC 自收缩越小。减缩剂会促进膨胀剂水化生成膨胀性物质,提升降低收缩的效果。

中国知网 https://www.cnki.net

参考文献:

[1] CWIRZEN A, PENTTALA V, VORNANEN C. Reactive powder based concretes: Mechanical properties, durability and hybrid use with OPC[J]. Cement and concrete research, 2008, 38(10): 1217-1226.

[2] LUO X Z,ZHANG S M,ZHANG Y C,et al. Investigation of cracking and ductility performance of layered UHPC-NC composite members with reinforced UHPC as protective layer under bending moment [J]. Thin-walled structures,2025,208:112828.

[3] LI Y, LI J Q. Capillary tension theory for prediction of early autogenous shrinkage of self-consolidating concrete[J]. Construction and building materials, 2014, 53: 511-516.

[4] 黄正峰, 欧忠文, 罗伟, 等. 硅灰和减缩剂对混凝土自收缩和孔隙的影响[J]. 硅酸盐通报, 2022(9): 3077-3083.(HUANG Z F, OU Z W, LUO W, et al. Effects of silica fume and shrinkage reducing admixture on autogenous shrinkage and porosity of concrete[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2022(9): 3077-3083.(in Chinese))

[5] 黎碧云, 孙振平, 胡匡艺, 等. 减缩剂对新拌水泥浆体体积变化的影响[J]. 建筑材料学报, 2020,23(3): 493-499.(LI B Y, SUN Z P, HU K Y, et al. Effect of shrinkage reducing agents on absolute volume change of fresh cement paste[J]. Journal of building materials, 2020, 23(3): 493-499.(in Chinese))

[6] 左文强, 田倩, 冉千平, 等. 两种混凝土减缩剂的性能及其作用机理[J]. 建筑材料学报, 2016,19(3): 503-509.(ZUO W Q, TIAN Q, RAN Q P, et al. Properties of shrinkage reducing admixtures (SRA)in concrete and its mechanism[J]. Journal of building materials, 2016, 19(3): 503-509.(in Chinese))

[7] 黄正峰,欧忠文,罗伟,等.聚醚型减缩剂延缓水泥水化的机理分析[J].材料导报,2024,38(10):70-74.(HUANG Z F, OU Z W, LUO W, et al. Mechanism analysis of polyether shrinkage reducing admixture (SRA) delaying cement hydration[J]. Materials reports, 2024, 38(10): 70-74.(in Chinese))

[8] 邓宗才, 连怡红, 赵连志. 膨胀剂、减缩剂对超高性能混凝土自收缩性能的影响[J]. 北京工业大学学报, 2021,47(1): 61-69.(DENG Z C, LIAN Y H, ZHAO L Z. Influence of expansion agent and shrinkage reducing agent on autogenous shrinkage of UHPC [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2021, 47(1): 61-69.(in Chinese))

[9] 付泽东, 吕林女, 肖静, 等. CSA 膨胀剂对超高性能混凝土性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2019, 37(4): 559-564, 594.(FU Z D, LYU N, XIAO J, et al. Effect of calcium sulphoaluminate expansive admixture on properties of ultra-high performance concrete [J]. Journal of materials science and engineering, 2019, 37(4): 559-564, 594.(in Chinese))

[10] LI S K,MO L W,DENG M,et al. Mitigation on the autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete via using MgO expansive agent[J]. Construction and building materials,2021,312:125422.

[11] 龚建清, 罗鸿魁, 张阳, 等. 减缩剂和 HCSA 膨胀剂对 UHPC 力学性能和收缩性能的影响[J]. 材料导报, 2021, 35(8): 8042-8048, 8063.(GONG J Q, LUO H K, ZHANG Y, et al. Effect of shrinkage reducing agent and HCSA expansion agent on mechanical properties and shrinkage properties of UHPC[J]. Materials reports, 2021, 35(8): 8042-8048, 8063.(in Chinese))

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082-2024[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for test methods of long-term performance and durability of concrete: GB/T 50082-2024[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2024.(in Chinese))

[13] ZHANG Z Q, LI S K, CHEN P, et al. Mitigating shrinkage in ultra-high performance concrete using MgO expansion agents with different activity levels[J]. Frontiers in materials, 2022, 9: 1033467.

[14] WU L M, FARZADNIA N, SHI C J, et al. Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review [J]. Construction and building materials, 2017, 149: 62-75.

[15] QIAN X Q, MENG T, ZHAN S L, et al. Influence of shrinkage reduce agent on early age autogenous shrinkage of concrete[J]. Key engineering materials, 2006, 302/303: 211-217.

[16] XIE T, FANG C, MOHAMAD ALI M S, et al. Characterizations of autogenous and drying shrinkage of ultra-high performance concrete (UHPC): An experimental study[J]. Cement and concrete composites, 2018, 91: 156-173.

[17] JUSTS J, WYRZYKOWSKI M, BAJARE D, et al. Internal curing by superabsorbent polymers in ultra-high performance concrete[J]. Cement and concrete research, 2015, 76: 82-90.

中国知网 https://www.cnki.net