

建筑垃圾再生骨料的界面过渡区强化技术研究

张莹莹

(开封大学土木建筑工程学院,河南省开封市,475004)

摘要 再生骨料“双重界面”(O-ITZ与N-ITZ)的孔隙劣化、晶体取向生长及微裂纹等缺陷是制约再生混凝土性能的关键瓶颈。本文系统分析了ITZ形成机理与微观缺陷对宏观性能的影响机制,综述了物理强化(碳化、热活化)、化学改性(硅烷、矿物掺合料)及纳米强化(SiO_2 、 CaCO_3)三类技术的作用原理,探讨了“碳化+纳米”复合策略的协同增效机制。研究表明,碳化强化可降低吸水率40%~60%,纳米 SiO_2 改性可使ITZ厚度减薄40%、断裂能提高80%,二者复合可使抗压强度达天然骨料混凝土的95%以上。

关键词 建筑垃圾;再生骨料;界面过渡区;微观结构;碳化强化;纳米改性

中图分类号:TU528.041 文献标识码:B
文章编号:1008-0899(2026)04-0068-02

1 再生骨料ITZ的形成机理与微观特征

1.1 ITZ的结构组成与形成过程

再生骨料界面过渡区(Interfacial Transition Zone, ITZ)具有原始界面(Old Interfacial Transition Zone, O-ITZ)与新界面(New Interfacial Transition Zone, N-ITZ)双层结构特征。O-ITZ形成于原始混凝土制备阶段,因骨料表面“壁效应”导致水泥颗粒富集、水灰比升高,形成30~50 μm 多孔区,主产物为定向排列的CH晶体;破碎时成为力学薄弱面,使再生骨料表面附着老砂浆。N-ITZ形成于新拌混凝土硬化阶段,老砂浆的高吸水性导致新拌浆体水分迁移、局部水灰比失衡,形成40~60 μm 厚、孔隙率较基体高20%~35%的薄弱区域,成为再生混凝土性能退化的关键。

1.2 ITZ的微观结构缺陷

SEM和MIP表征揭示ITZ三类微观缺陷:①孔隙劣化:O-ITZ与N-ITZ临界孔径(120~220nm)较基体(80~100nm)显著增大,氯离子扩散系数提高2~4倍;②晶体取向生长:CH晶体垂直骨料表面择优排列,界面各向异性明显;③微裂纹:老/新砂浆弹性模量差异引发N-ITZ应力集中,100%取代时微裂纹密度达天然骨料混凝土的3~5倍。上述缺陷通过多尺度

传递,导致再生混凝土弹性模量降低15%~30%、抗压强度损失20%~40%,干燥收缩与徐变显著增大。

2 界面过渡区强化技术

2.1 物理强化技术

2.1.1 颗粒整形与表面清理

采用立式冲击破碎机或球磨机对再生骨料进行整形处理,通过颗粒间的相互研磨去除棱角和薄弱颗粒,改善粒形和表面粗糙度。研究表明,经整形处理后,再生骨料的针片状颗粒含量从25%降至8%以下,压碎指标降低10~15个百分点,但吸水率仅下降3%~5%,对ITZ的改善效果有限^[1]。

湿法清理技术利用旋转滚筒或超声波清洗去除再生骨料表面的松散附着物。日本开发的水力喷砂法可有效清除粒径大于5mm骨料表面50%~70%的老砂浆,但处理后的细骨料(<5mm)仍保留大量附着砂浆,且用水量高达100~150L/t,污水处理成本较高。

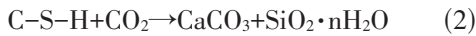
2.1.2 热活化与碳化强化

热活化处理将再生骨料加热至300~600 $^{\circ}\text{C}$,使老砂浆中的C-S-H凝胶脱水、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 分解,产生微裂纹和孔隙,随后在机械力作用下易于剥离。最佳活化温度为500 $^{\circ}\text{C}$,处理30min后,再生骨料吸水率可降低25%~35%,但能耗高达80~120kWh/t,经济性较差。

碳化强化技术利用 CO_2 与水泥水化产物(主要为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和C-S-H)的化学反应,在再生骨料表面生成致密的 CaCO_3 晶体,填充孔隙并增强颗粒强度。

作者简介:张莹莹(1987~),女,河南焦作人,硕士,讲师,研究方向:建筑材料和建筑结构。

碳化反应方程式为:



研究表明,在CO₂浓度20%、压力0.2MPa、温度60℃条件下碳化2h,再生骨料表面形成厚度50~100μm的致密碳化层,吸水率降低40%~60%,压碎指标提高15%~20%。碳化产物CaCO₃的莫氏硬度为3,高于Ca(OH)₂的2.5,且与水泥石结合紧密,显著改善了N-ITZ的微观结构。

2.2 化学改性技术

2.2.1 有机硅烷偶联剂改性

硅烷偶联剂(如KH-550、KH-570)具有双重反应活性,其烷氧基团水解后与再生骨料表面的硅羟基缩合,有机官能团则与有机聚合物或水泥水化产物反应,在界面形成化学键桥。采用1%浓度的KH-550乙醇溶液浸泡再生骨料2h,可在表面形成单分子疏水层,吸水率降低30%~45%,同时提高界面粘结强度25%以上^[2]。

然而,硅烷改性存在耐久性隐患:在碱性环境中,Si-O-Si键可能发生水解断裂;在高温条件下,有机基团易分解失效。因此,硅烷改性更适用于非承重结构或干燥环境。

2.2.2 无机矿物掺合料改性

在再生混凝土中掺加粉煤灰、矿渣粉、硅灰等活性矿物掺合料,可通过物理填充效应和火山灰反应改善ITZ微观结构。硅灰的粒径(0.1~0.3μm)远小于水泥颗粒,能够填充ITZ中的毛细孔隙;其高活性SiO₂与CH反应生成附加C-S-H凝胶,降低ITZ的Ca/Si比,提高界面密实度。

研究表明,掺加10%硅灰可使N-ITZ的孔隙率降低18%,CH晶体含量减少35%,界面粘结强度提高40%。但硅灰需水量大,单独掺加会增大混凝土收缩,宜与粉煤灰或矿渣复配使用。

2.3 纳米强化技术

2.3.1 纳米SiO₂改性

纳米SiO₂(nSiO₂)具有极高的比表面积(50~600m²/g)和反应活性,可在早期快速消耗CH,促进C-S-H凝胶生成^[3]。将nSiO₂配制成稳定悬浮液,采用浸渍法或拌合法引入再生混凝土,可在ITZ处形成纳米增强相。

透射电镜(TEM)观察显示,nSiO₂颗粒均匀分散

于ITZ中,粒径10~30nm,与C-S-H凝胶紧密交织,形成纳米-微米多尺度复合结构。掺加1.5%nSiO₂的再生混凝土,ITZ厚度从50μm减薄至30μm,显微硬度提高55%,界面断裂能力提高80%。

nSiO₂的改性机理包括:①晶核效应:作为C-S-H凝胶的成核位点,促进水化产物在ITZ均匀沉积;②填充效应:纳米颗粒填充凝胶孔,降低孔隙率;③化学反应:与CH生成低Ca/Si比的C-S-H,优化界面化学组成。

2.3.2 纳米CaCO₃与碳纳米管改性

纳米CaCO₃(nCaCO₃)可作为碳化强化的人工模拟产物,在ITZ处提供成核位点并细化晶体尺寸。与nSiO₂相比,nCaCO₃的化学活性较低,但成本仅为前者的1/5~1/3,更适合大规模工程应用。

碳纳米管(CNTs)具有优异的力学性能和长径比,可在ITZ中形成三维网络结构,桥接微裂纹并传递应力。但CNTs的分散困难和界面粘结弱是制约其应用的技术瓶颈,需通过表面羧基化或超声分散处理改善其分散性。

2.4 复合强化策略

单一强化技术往往存在局限性,复合强化策略可实现协同增效。例如,“碳化预处理+nSiO₂改性”组合:先对再生骨料进行碳化强化,封闭表面大孔隙;再引入nSiO₂优化N-ITZ的纳米结构。该组合使再生混凝土的抗压强度达到同配比天然骨料混凝土的95%以上,氯离子扩散系数降低60%。

3 结论与展望

综上所述,碳化预处理与纳米改性的复合策略可实现协同增效,使再生混凝土抗压强度达到天然骨料混凝土的95%以上。未来研究应聚焦于低成本复合强化工艺的开发、长期性能演化机制揭示以及智能化制备技术的融合,以推动高性能再生混凝土的规模化工程应用。

参考文献

- [1] 马昆林,刘建,申景涛,等.骨料强化方法对再生混凝土多界面过渡区微观结构的影响[J].铁道科学与工程学报,2023,20(10):3809-3819.
- [2] 刘昌燊,邓俊双.基于化学强化的再生骨料品质提升研究[J].江西建材,2025,(09):13-15+20.
- [3] 吴定远.纳米SiO₂改性洞渣粗骨料混凝土的性能及微观结构研究[J].混凝土与水泥制品,2025,(10):107-112.