

低温环境下引气剂对混凝土凝结硬化及强度发展的影响规律

段文梁

珠江水利委员会珠江水利科学研究院 广东 广州 510000

摘要: 低温延缓水泥水化, 改变混凝土孔隙结构, 影响其性能, 引气剂可改善混凝土性能, 二者耦合作用复杂。本文阐述低温下混凝土凝结硬化与强度发展理论, 分析引气剂对混凝土拌和物性能、凝结时间、微观结构、强度发展时间特征、抗冻融强度稳定性等的影响规律, 提出低温混凝土引气剂选型与掺量优化原则及施工质量控制措施, 为低温环境下混凝土应用提供参考。

关键词: 低温混凝土; 引气剂; 凝结时间; 孔隙结构; 抗压强度

引言: 在寒冷地区的工程建设中, 低温环境对混凝土施工极为不利, 会延缓水泥水化、改变孔隙结构, 进而影响混凝土性能。引气剂作为改善混凝土性能的关键外加剂, 在低温条件下与混凝土性能的关联更为复杂, 深入探究低温环境下引气剂对混凝土凝结硬化及强度发展的影响规律, 对于优化低温混凝土施工工艺、保障工程质量意义重大, 本文将围绕此展开详细探讨。

1 低温环境下混凝土凝结硬化与强度发展的基础理论

1.1 低温对混凝土性能的影响机制

低温环境会显著延缓混凝土中水泥的水化进程, 这是因为水泥水化反应需要适宜的温度条件, 温度降低会使水化反应速率大幅下降。当温度低于5°C时, 水化产物生成速率减慢, 水化硅酸钙凝胶等关键产物数量不足, 导致混凝土凝结硬化速度迟缓。同时, 低温会使混凝土内部自由水迁移能力降低, 部分自由水可能转化为冰, 冰的体积膨胀会在混凝土内部产生微裂缝, 破坏初始形成的微观结构。此外, 低温环境下混凝土的孔隙结构会发生改变, 大孔隙比例增加, 密实度降低, 进而影响后期强度发展^[1]。水化反应不充分还会导致混凝土中未水化水泥颗粒增多, 界面过渡区结合力减弱, 这些因素共同作用, 使混凝土的工作性能、力学性能和耐久性能均受到不利影响。

1.2 引气剂的作用原理

引气剂是一种表面活性物质, 其核心作用原理是通过降低混凝土拌和物中水溶液的表面张力, 促使空气以微小气泡的形式均匀分散在拌和物中。引气剂分子具有亲水基团和亲油基团, 亲水基团朝向水相, 亲油基团朝向空气相, 在气液界面形成稳定的吸附膜, 阻止气泡合并或破灭。这些微小气泡直径通常在0.02~0.2mm之间, 分布均匀, 能够填充混凝土中的部分孔隙。同时气泡可

以起到润滑作用, 改善混凝土拌和物的和易性, 减少拌和用水量。在混凝土硬化过程中, 均匀分布的气泡可以阻断毛细管通道, 降低混凝土的渗透性, 提高抗冻融性能。

1.3 低温与引气剂的耦合作用

低温与引气剂的耦合作用, 体现在二者对混凝土性能的综合影响上, 有协同也有制约。协同上, 低温时混凝土内部易形成冰结晶, 引气剂引入的微小气泡可为其提供膨胀空间, 减少冰胀应力对微观结构的破坏, 缓解低温对硬化过程的不利影响; 且引气剂改善和易性的作用在低温下更重要, 能弥补低温导致的拌和物流动性下降, 保证施工和易性。制约上, 低温会降低引气剂表面活性, 使气泡生成数量减少、稳定性下降, 引气效果减弱; 同时低温下水化反应慢, 早期强度发展滞后, 气泡在早期强度低时受外力易变形或破灭, 影响引气效果持久性。

2 低温环境下引气剂对混凝土凝结硬化的影响规律

2.1 对混凝土拌和物性能的影响

低温环境下, 引气剂对混凝土拌和物性能的影响主要体现在和易性、流动性、保水性和黏聚性等方面, 且影响规律与常温环境存在差异。低温会使混凝土拌和物的黏度增加, 流动性显著下降, 而引气剂通过引入微小气泡, 能够起到良好的润滑作用, 有效改善拌和物的流动性, 使坍落度损失速率减慢。在和易性方面, 引气剂引入的均匀气泡可以减少骨料之间的摩擦阻力, 使拌和物更易于搅拌均匀, 提高其工作性, 尤其在低温下骨料表面易吸附水分导致和易性变差的情况下, 这种改善作用更为明显。保水性和黏聚性方面, 引气剂形成的气泡膜能够阻止水分过快散失, 提高拌和物的保水性, 减少泌水现象; 同时, 气泡可以将水泥浆体与骨料更好地黏结在一起, 增强黏聚性, 降低离析风险^[2]。

2.2 对凝结时间的影响规律

低温环境下,引气剂对混凝土凝结时间的影响呈现出复杂的规律,主要受低温程度、引气剂类型和掺量等因素制约。总体而言,低温会显著延长混凝土的初凝和终凝时间,而引气剂对凝结时间的影响则具有双重性。一方面,引气剂引入的微小气泡会在混凝土内部形成一定的空间,降低水泥颗粒的堆积密度,减缓水泥颗粒与水的接触和反应速率,从而在一定程度上进一步延长凝结时间,且掺量越大,这种延长效应可能越明显。另一方面,部分引气剂具有一定的表面活性,能够在一定程度上促进水泥早期水化反应的进行,尤其在低温导致水化反应严重滞后的情况下,这种促进作用可能会抵消部分凝结时间的延长效应。此外,不同类型的引气剂对凝结时间的影响差异较大,阴离子型引气剂对凝结时间的延长作用相对较弱,而非离子型引气剂的延长作用可能更为明显。

2.3 对微观结构演化的影响

低温环境下,引气剂通过改变混凝土内部的气泡结构和水化产物分布,显著影响微观结构的演化过程。在水化初期,低温导致水化反应缓慢,水泥浆体中水化硅酸钙凝胶生成量少,结构松散,而引气剂引入的均匀气泡可以填充部分空隙,使松散结构得到一定的支撑,减少因水分迁移导致的孔隙集中。随着水化进程的推进,常温下混凝土会形成较为致密的微观结构,而低温下若未掺引气剂,会因冰胀作用产生微裂缝,导致结构疏松;掺加引气剂后,气泡可以缓冲冰胀应力,减少微裂缝的产生,使水化产物能够在相对稳定的环境中生长。引气剂还能影响水化产物的形貌和分布,促进水化硅酸钙凝胶在气泡周围均匀生长,形成更为致密的界面过渡区。但低温下引气效果若不佳,气泡分布不均或稳定性差,会导致局部出现大孔隙,反而使微观结构变差。

3 低温环境下引气剂对混凝土强度发展的影响规律

3.1 强度发展的时间演化特征

低温环境下,掺加引气剂的混凝土强度发展呈现出“早期缓慢、后期增长、长期趋于稳定”的时间演化特征,与常温环境和未掺引气剂混凝土存在明显差异。在早期(3-7天),低温严重抑制水泥水化反应,即使掺加引气剂,水化产物生成量依然不足,混凝土强度增长十分缓慢,甚至可能出现强度停滞现象,此时引气剂引入的气泡对强度有轻微不利影响,导致早期强度略低于未掺引气剂的低温混凝土。随着龄期延长(14-28天),水化反应逐渐积累,加上引气剂对微观结构的改善作用,强度增长速率加快,尤其在后期(28天以后),由于引气剂减少了

低温导致的微裂缝,混凝土密实度逐渐提高,强度持续增长,增长幅度大于未掺引气剂的低温混凝土。当龄期达到90天或更长时间时,强度增长速率逐渐减缓,趋于稳定,此时掺引气剂的混凝土强度可能超过未掺引气剂的混凝土,且强度稳定性更好。不同低温条件下,强度发展速率不同,温度越低,早期强度增长越慢,达到稳定强度的龄期越长^[3]。

3.2 “低温-引气剂”耦合作用对强度的影响

“低温-引气剂”耦合作用对混凝土强度的影响是两者单独作用的叠加与交互,其综合效应取决于低温程度、引气剂掺量和类型等因素。在低温程度较轻(0-5℃)时,耦合作用主要表现为协同增强效应,引气剂引入的均匀气泡能够有效缓解低温引起的轻微冰胀应力,减少微裂缝,同时改善拌和物和易性,保证施工质量,使混凝土强度发展虽慢于常温,但快于未掺引气剂的低温混凝土。当低温程度较重(低于0℃)时,耦合作用的复杂性增加,一方面引气剂仍能通过气泡缓冲冰胀应力,减少结构破坏;另一方面,低温会显著降低引气效率,气泡数量不足或分布不均,缓冲效果减弱,且低温导致水化反应严重滞后,混凝土早期强度极低,引气剂引入的气泡可能成为应力集中点,导致早期强度进一步下降。引气剂掺量过高时,即使在轻度低温下,过多的气泡也会降低混凝土密实度,抵消其改善微观结构的积极作用,导致强度下降;掺量过低则无法发挥足够的缓冲作用,耦合效果不佳。

3.3 强度发展与微观结构的关联机制

低温环境下掺引气剂的混凝土,其强度发展与微观结构之间存在紧密的关联机制,微观结构的致密性、孔隙特征和界面过渡区性能直接决定强度发展规律。在强度早期发展阶段,低温导致水化反应缓慢,水泥浆体中生成的水化硅酸钙凝胶量少,结构松散,此时引气剂引入的气泡虽填充部分孔隙,但整体微观结构仍存在较多缺陷,界面过渡区结合力弱,导致早期强度较低。随着龄期增长,水化反应逐渐深入,更多水化产物生成并填充孔隙,引气剂引入的均匀气泡可以引导水化产物在气泡周围生长,形成更为致密的结构,同时气泡阻断了有害孔隙的连通,减少了微裂缝的产生和扩展,使微观结构致密性提高,进而推动强度增长。当混凝土遭受冻融循环时,均匀分布的气泡能够容纳冰晶的膨胀,保护微观结构不受破坏,维持结构致密性,从而保证强度稳定性。反之,若引气效果不佳,气泡分布不均或数量不足,微观结构中会出现大量有害孔隙和微裂缝,强度发展会受到显著抑制。

3.4 抗冻融强度稳定性分析

低温环境下混凝土的抗冻融强度稳定性是其耐久性的关键指标,引气剂通过改善混凝土内部结构,对提升抗冻融强度稳定性发挥核心作用。冻融循环对混凝土强度的破坏主要源于内部自由水结冰膨胀产生的冻胀应力,反复冻融会使微裂缝不断扩展,导致结构松散,强度下降。掺加引气剂后,其引入的均匀微小气泡可以为冰结晶提供膨胀空间,有效释放冻胀应力,减少微裂缝的产生和扩展,从而保护混凝土微观结构的完整性。在多次冻融循环后,掺引气剂的混凝土仍能保持较好的致密性,强度损失率显著低于未掺引气剂的混凝土。但引气剂的改善效果受含气量控制,含气量过低时,气泡数量不足,无法充分缓冲冻胀应力;含气量过高则会降低混凝土密实度,导致初始强度下降,且在反复冻融后强度损失可能加剧。低温环境下混凝土早期水化不充分,若在强度未达到临界抗冻强度时遭受冻融,即使掺加引气剂,抗冻融强度稳定性也会大幅下降,因此需控制好受冻前的养护时间。

4 低温混凝土引气剂应用优化与质量控制建议

4.1 引气剂选型与掺量优化原则

低温混凝土引气剂的选型与掺量优化需遵循适配性、有效性和经济性原则,结合低温环境特点、混凝土原材料特性和工程要求综合确定。在选型方面,应优先选择表面活性高、气泡稳定性好、受低温影响小的引气剂类型,阴离子型引气剂如烷基苯磺酸盐类,在低温下仍能保持较好的引气效果,气泡分布均匀,适用于大多数低温施工场景;对于温度极低(低于 -5°C)的环境,可选用复合型引气剂,将引气成分与早强成分复配,既保证引气效果,又能促进早期强度发展。在掺量优化方面,需建立“低温等级-含气量-掺量”的对应关系,低温程度越重,引气剂掺量需适当提高以弥补低温导致的引气效率下降,但需控制含气量在4%~6%的合理范围,避免过量掺加导致强度下降。同时,需通过试验确定掺量,考虑水泥品种、骨料级配和外加剂相容性等因素,相同引气剂在不同原材料体系中引气效果差异较大,试验应模拟实际低温施工环境,确保掺量优化的准确性。

4.2 低温施工质量控制措施

低温环境下混凝土引气剂应用的施工质量控制需从原材料预热、拌和过程控制、浇筑养护和含气量监测等关键环节入手,确保引气效果和混凝土性能。原材料预热方面,应将水泥、骨料和拌和水进行适当预热,拌和水温度可控制在 $40\sim 60^{\circ}\text{C}$,骨料温度不低于 5°C ,避免低温原材料直接拌和导致混凝土初始温度过低,影响水化反应和引气效果^[4]。拌和过程控制方面,需延长拌和时间30%~50%,保证引气剂与其他原材料充分混合,使气泡分布均匀;严格控制拌和用水量,避免因低温和易性变差而盲目加水,导致含气量波动和强度下降。浇筑养护方面,浇筑前需清除模板和钢筋上的冰雪,浇筑过程中加快施工速度,缩短浇筑间隔时间,防止混凝土在浇筑过程中受冻;浇筑后立即覆盖保温材料,采用蓄热养护或加热养护方式,保证混凝土在受冻前达到临界抗冻强度。含气量监测方面,每批次混凝土浇筑前需检测拌和物含气量,若偏离设计范围,及时调整引气剂掺量,确保引气效果稳定。

结束语

低温环境给混凝土施工带来诸多挑战,引气剂在改善低温混凝土性能方面作用关键。通过研究可知,合理选用引气剂并优化掺量,严格把控施工各环节质量,能有效提升低温混凝土凝结硬化效果与强度发展水平,增强其抗冻融能力。未来需进一步深入研究,完善相关理论与应用技术,以更好地应对不同低温场景下混凝土施工需求,保障工程质量。

参考文献

- [1]姜丙进.浅谈高海拔低温环境混凝土施工质量控制措施[J].四川水利,2024,45(S1):76-79.
- [2]李慧.钢筋混凝土冬季施工技术难点及质量控制措施[J].四川水泥,2022,(07):135-136+141.
- [3]马勇,陈涛,雷英强,等.超早强高韧性喷射混凝土配合比优化设计与性能研究[J].四川水力发电,2025,44(S2):164-168.
- [4]王俊,罗宏,胡华君,等.超高海拔低温环境大体积混凝土配合比应用技术[J].四川水力发电,2025,44(S1):9-12.