

水泥熟料矿物组成对水泥性能的影响研究

汪贝娣

浙江宁工检测科技有限公司 浙江 宁波 315211

摘要：本文聚焦水泥熟料矿物组成对水泥性能的影响。先阐述水泥熟料主要矿物组成及水泥基本性能指标，概述矿物组成与性能关系。接着分析其对水泥物理性能（凝结时间、强度、安定性）和化学性能（水化反应、水化热、耐久性）的影响。最后提出优化建议，包括根据工程需求、成本及环保要求优化矿物组成，为水泥性能提升和行业发展提供理论依据。

关键词：水泥熟料；矿物组成；水泥性能；水化反应

1 水泥熟料矿物组成与水泥性能相关理论基础

1.1 水泥熟料的主要矿物组成

水泥熟料是水泥制造关键中间产物，主要由四种矿物构成。硅酸三钙（ C_3S ）含量最多，占50%-70%，水化活性高，是水泥早、后期强度发展主要贡献者，常温下反应迅速，短时间形成大量水化产物，赋予水泥石强度。硅酸二钙（ C_2S ）含量通常在15%-30%，水化速度慢，早期强度发展不如 C_3S ，但后期强度持续增长，对长期强度贡献大，且水化热低，可减少硬化时温度应力，提高体积稳定性。铝酸三钙（ C_3A ）含量一般在5%-15%，水化速度极快，是影响凝结时间关键因素，水化时放热多，不加控制会影响水泥质量与耐久性^[1]。铁铝酸四钙（ C_4AF ）含量约10%-18%，水化速度较快，水化热相对低，对强度发展有贡献，还能改善抗冲击和抗硫酸盐侵蚀性能。

1.2 水泥的基本性能指标

水泥是建筑工程不可或缺的胶凝材料，其性能指标影响工程质量与耐久性，主要包括凝结时间、强度、安定性和水化热。凝结时间分初凝和终凝，初凝是从加水到水泥浆开始失塑的时间，终凝是到完全失塑并产生强度的时间，合适凝结时间对施工至关重要，初凝短施工难完成，终凝长会延长工期。强度是重要指标，有抗压、抗折强度等，强度发展逐渐，早期强度反映短时间成结构能力，对快速施工承载工程重要；后期强度体现长期耐久性与承载能力。安定性指硬化时体积变化均匀性，不均匀膨胀会使水泥石开裂，降低工程质量，良好安定性是正常使用基本要求。水化热是水化过程放出的热量，大体积混凝土工程中，水化热致内部升温，与外界温差大产生应力，可能引起开裂，控制水化热很关键。

1.3 矿物组成与水泥性能的关系概述

水泥熟料的矿物组成是决定水泥性能的内在因素。

不同矿物的含量和比例变化会显著影响水泥的凝结时间、强度发展、安定性和水化热等性能指标。例如， C_3S 含量较高时，水泥的早期强度发展较快，但水化热也相对较高； C_2S 含量增加会使水泥的后期强度增长明显，同时降低水化热； C_3A 含量对凝结时间影响较大，含量过高会导致水泥快凝，而含量过低则可能使凝结时间过长； C_4AF 的存在可以调节水泥的性能，改善水泥的抗侵蚀性能等。因此，通过合理调整水泥熟料的矿物组成，可以制备出满足不同工程需求的水泥产品。

2 水泥熟料矿物组成对水泥物理性能的影响

2.1 对凝结时间的影响

水泥熟料中不同矿物对凝结时间的影响各不相同。铝酸三钙（ C_3A ）是影响水泥凝结时间的关键矿物。 C_3A 水化速度极快，在水泥加水后迅速与水反应生成水化铝酸钙等产物，这些产物会迅速形成网络结构，使水泥浆体失去流动性，从而导致水泥快速凝结。如果 C_3A 含量过高，水泥会出现快凝现象，给施工带来极大困难，甚至无法正常施工。硅酸三钙（ C_3S ）和硅酸二钙（ C_2S ）对凝结时间也有一定影响，但相对较小。 C_3S 水化速度较快，能在较短时间内形成一定的结构，对水泥的初凝时间有一定促进作用； C_2S 水化速度较慢，主要影响水泥的终凝时间和后期强度发展。铁铝酸四钙（ C_4AF ）的水化速度较快，但与其他矿物相比，其对凝结时间的影响相对较弱。

2.2 对强度发展的影响

硅酸三钙（ C_3S ）是水泥强度发展的主要贡献者，尤其是早期强度。在水泥水化的早期阶段， C_3S 迅速与水反应生成水化硅酸钙（C-S-H）凝胶和氢氧化钙（ $Ca(OH)_2$ ）。C-S-H凝胶是水泥石强度的主要来源，它具有较高的粘结性和强度。随着水化的进行，C-S-H凝胶不断增多，相互交织形成网络结构，使水泥石的强度不

断提高。在28天内, C_3S 对水泥抗压强度的贡献可达70%~80%。硅酸二钙(C_2S)的水化速度较慢, 早期强度发展不明显, 但对水泥的后期强度增长有重要贡献。在水泥水化的后期, C_2S 逐渐水化生成C-S-H凝胶和 $Ca(OH)_2$, 不断填充水泥石中的孔隙, 使水泥石的结构更加致密, 从而提高水泥的后期强度。一般来说, C_2S 在90天甚至更长时间后仍能持续提供强度增长。铝酸三钙(C_3A)和铁铝酸四钙(C_4AF)对水泥强度的贡献相对较小。 C_3A 水化迅速, 但生成的水化产物强度较低, 且在水泥石中形成的结构不够稳定。 C_4AF 的水化产物对水泥强度有一定贡献, 同时还能改善水泥的抗冲击性能和抗硫酸盐侵蚀性能^[2]。

2.3 对安定性的影响

水泥的安定性不良主要是由于水泥熟料中含有过多的游离氧化钙(f-CaO)、游离氧化镁(f-MgO)或过量的三氧化硫(SO₃)。而这些成分的产生与水泥熟料的矿物组成和煅烧工艺密切相关。在水泥熟料煅烧过程中, 如果原料配比不当或煅烧温度、时间控制不好, 会导致部分氧化钙和氧化镁未能完全与酸性氧化物结合, 形成游离态的f-CaO和f-MgO。f-CaO在水泥硬化后会在水分的作用下逐渐水化生成氢氧化钙, 体积膨胀约1.5倍; f-MgO的水化速度更慢, 水化后生成氢氧化镁, 体积膨胀可达2倍以上。这种体积膨胀会导致水泥石内部产生应力, 当应力超过水泥石的抗拉强度时, 就会引起水泥石开裂, 影响水泥的安定性。另外, 如果水泥中石膏掺量过多, 过量的SO₃在水泥硬化后可能与水化铝酸钙反应生成高硫型水化硫铝酸钙(钙矾石), 钙矾石在后期会转化为低硫型水化硫铝酸钙, 体积膨胀约1.5倍, 也会导致水泥石开裂, 影响安定性。

3 水泥熟料矿物组成对水泥化学性能的影响

3.1 对水化反应的影响

水泥的水化反应是水泥与水发生的一系列复杂物理化学变化过程, 水泥熟料中不同矿物的水化反应特点和速度差异明显。硅酸三钙(C_3S)的水化反应会放热, 水化速度较快, 加水后几分钟内便开始反应。早期主要生成针状的C-S-H凝胶和片状的 $Ca(OH)_2$ 。随着水化推进, C-S-H凝胶不断增多, 相互交织形成网络结构, 促使水泥石逐渐硬化, 它是水泥早期和后期强度发展的主要贡献者。硅酸二钙(C_2S)的水化反应与 C_3S 类似, 不过速度较慢。其水化产物同样是C-S-H凝胶和 $Ca(OH)_2$, 但因水化慢, 早期生成的水化产物少, 对水泥早期强度贡献不大, 不过后期强度会持续增长, 对水泥长期强度发展有重要作用。铝酸三钙(C_3A)的水化反应极为迅速, 常温

下加水几分钟内就会剧烈反应, 生成水化铝酸钙。在有石膏存在时, 会进一步反应生成钙矾石, 钙矾石的形成能延缓 C_3A 的水化速度, 进而调节水泥的凝结时间。铁铝酸四钙(C_4AF)的水化反应也较快, 其水化产物为水化铝酸钙和水化铁酸钙, 这些产物对水泥的强度和抗侵蚀性能会产生一定影响。

3.2 对水化热的影响

水泥水化过程中会放出大量的热量, 称为水化热。水泥熟料中不同矿物的水化热差异较大, 其中铝酸三钙(C_3A)的水化热最高, 硅酸三钙(C_3S)次之, 硅酸二钙(C_2S)的水化热最低, 铁铝酸四钙(C_4AF)的水化热介于 C_3S 和 C_2S 之间。 C_3A 在水化初期迅速反应, 放出大量的热量, 其单位质量的水化热可达865~1100J/g。 C_3S 的水化速度也较快, 早期水化热较高, 单位质量的水化热约为500J/g左右。 C_2S 水化速度慢, 水化热释放缓慢且总量较低, 单位质量的水化热仅为260J/g左右。 C_4AF 的水化热相对较低, 对水泥总水化热的贡献较小。在大体积混凝土工程中, 由于混凝土体积庞大, 水泥水化热难以散发, 会导致混凝土内部温度急剧升高, 与外部环境产生较大的温差, 从而产生温度应力^[3]。当温度应力超过混凝土的抗拉强度时, 就会引起混凝土开裂, 影响工程质量和耐久性。因此, 对于大体积混凝土工程, 应选择水化热较低的水泥品种, 如低热水泥, 通过调整水泥熟料的矿物组成, 降低 C_3A 和 C_3S 的含量, 增加 C_2S 的含量, 以减少水泥的水化热。

3.3 对耐久性的影响

水泥的耐久性是指水泥制品在长期使用过程中, 抵抗各种自然因素和人为因素破坏的能力, 包括抗渗性、抗冻性、抗侵蚀性等。水泥熟料的矿物组成对水泥的耐久性有重要影响。硅酸三钙(C_3S)含量较高的水泥, 其水化产物中 $Ca(OH)_2$ 含量相对较多。 $Ca(OH)_2$ 是一种溶解度较大的物质, 在水的侵蚀作用下容易溶解流失, 导致水泥石中的孔隙增多, 降低水泥的抗渗性和抗侵蚀性。另外, $Ca(OH)_2$ 还会与环境中的酸性物质发生反应, 进一步破坏水泥石的结构。硅酸二钙(C_2S)水化产物中 $Ca(OH)_2$ 含量相对较少, 且 C_2S 的水化速度慢, 水化产物结构较为致密, 有利于提高水泥的抗渗性和抗侵蚀性。铝酸三钙(C_3A)在水泥石中形成的水化产物结构不够稳定, 在硫酸盐等侵蚀介质的作用下, 容易发生化学反应, 生成膨胀性产物, 导致水泥石开裂, 降低水泥的抗硫酸盐侵蚀性能。因此, 对于有抗硫酸盐侵蚀要求的工程, 应选择 C_3A 含量较低的水泥品种。铁铝酸四钙(C_4AF)的存在可以改善水泥的抗侵蚀性能, 它能与硫

酸盐等侵蚀介质反应生成稳定的产物，减少对水泥石的破坏。同时， C_4AF 还能提高水泥的抗冲击性能，增强水泥石的韧性。

4 水泥熟料矿物组成的优化建议

4.1 根据工程需求优化矿物组成

不同的工程对水泥的性能要求各不相同，因此应根据工程的具体需求来优化水泥熟料的矿物组成。对于需要快速施工和早期承载的工程，如道路抢修、预制构件生产等，应选择硅酸三钙(C_3S)含量较高、铝酸三钙(C_3A)含量适中的水泥品种，以保证水泥具有较快的凝结时间和较高的早期强度。对于大体积混凝土工程，如水坝、大型基础等，应选择水化热较低的水泥，可通过增加硅酸二钙(C_2S)的含量，降低 C_3S 和 C_3A 的含量来实现。这样可以减少水泥水化过程中产生的热量，降低混凝土内部温度应力，防止混凝土开裂。对于有抗硫酸盐侵蚀要求的工程，如海洋工程、地下工程等，应选择铝酸三钙(C_3A)含量较低、铁铝酸四钙(C_4AF)含量较高的水泥品种，以提高水泥的抗侵蚀性能，延长工程的使用寿命。

4.2 考虑生产成本的优化策略

在优化水泥熟料矿物组成的过程中，生产成本是一个不容忽视的关键因素。由于不同矿物在生产过程中的成本存在显著差异，所以必须在满足工程性能要求的前提下，精心挑选成本较低的矿物组成方案，以此实现经济效益与工程质量的双赢。硅酸二钙(C_2S)在生产方面具有独特优势，其煅烧温度相对较低，这意味着在生产过程中消耗的能源较少，进而使得生产成本相对较低。基于此，在确保水泥性能不受影响的前提下，适当提高 C_2S 的含量，同时降低硅酸三钙(C_3S)的含量，是一种行之有效的降低成本策略。合理利用工业废渣和矿物掺合料也是降低生产成本的重要途径。像粉煤灰、矿渣等工业废渣，其中含有一定量的活性成分，这些活性成分可以作为水泥的混合材料掺入水泥中，部分替代水泥熟料。这样做不仅能够显著降低水泥的生产成本，还

能在一定程度上改善水泥的性能，并且减少工业废渣对环境的污染，实现资源的循环利用和可持续发展。

4.3 环保型矿物组成的探索

随着环保意识的不断提高，探索环保型水泥熟料矿物组成成为水泥行业发展的重要方向。环保型水泥应具有低能耗、低污染、高性能等特点。一方面，可以通过优化矿物组成，降低水泥生产过程中的能耗和污染物排放。例如，开发低钙水泥，减少硅酸三钙(C_3S)的含量，增加硅酸二钙(C_2S)和其他低钙矿物的含量，降低水泥熟料的煅烧温度，减少能源消耗和二氧化碳排放^[4]。另一方面，利用工业废渣和再生材料制备环保型水泥。例如，利用钢渣、磷渣等工业废渣作为水泥的原料，不仅可以减少废渣的堆存和污染，还能降低水泥生产对天然资源的依赖。同时，研发新型的胶凝材料，如地聚物水泥等，这些材料具有较低的碳排放和良好的性能，是未来水泥行业发展的重要方向。

结束语

水泥熟料矿物组成是影响水泥性能的关键内在因素，对水泥的物理和化学性能均有着深远影响。通过深入研究并合理调整矿物组成，能够制备出满足不同工程需求的水泥产品。同时，在优化过程中综合考虑生产成本与环保要求，有助于推动水泥行业向低成本、高性能、绿色环保的方向发展，实现经济效益与环境效益的双赢，促进建筑行业的可持续发展。

参考文献

- [1]程稳,王尉,刘晨浩,等.水泥窑协同处置废弃土对生料制备的影响[J].中国水泥,2021,(08): 84-85
- [2]王伟,刘旭月,李波,等.二氧化硅性能及对水泥熟料煅烧的影响[J].水泥技术,2020(06):86-89.
- [3]邓青山,李书明,谢永江,等.熟料粒度分布与矿物组成对硅酸盐水泥抗裂性的影响[J].水泥,2023(10):1-7.
- [4]谢礼兰,邓敏.率值对含磷硅酸盐水泥熟料矿物组成和微观结构的影响[J].南京工业大学学报(自然科学版),2021,43(4):473-479.