

# 水泥类型对高温下混凝土的机械行为和渗透性的影响

卡塔日娜·特拉茨, 玛尔塔·哈格

所属单位: 波兰土木工程学院

**摘要:** 本文介绍了有关水泥类型 (CEMI 42.5 R 波特兰水泥和 CEMIII/A 42.5 N 矿渣水泥—含 53% 的粒化高炉矿渣) 对加热混凝土的机械和运输性能影响的实验调查。作者研究了火灾期间发生的高温暴露导致的性能变化。高温暴露会使混凝土的运输和机械性能发生变化, 但文献中还没有广泛研究水泥类型的影响。在本文中, 作者用两种类型的水泥制作混凝土。CEMI 和 CEMIII, 使用玄武岩 (B) 和河床骨料 (RB)。在高温暴露于 200、400、600、800 和 1000°C 之后, 作者测试了抗压和抗拉强度, 以及静态弹性模量和 Cembureau 渗透率。作者根据静态弹性模量的变化来评估高温效应对混凝土的破坏和裂缝的发展。试验结果清楚地表明, 渗透性随着破坏而增加, 而且对于两种类型的水泥来说, 渗透性都遵循一个指数型的公式。

**关键词:** 高温; 破坏; 渗透率; CEMI 和 CEMIII; 机械性能

## Effect of Cement Type on the Mechanical Behavior and Permeability of Concrete Subjected to High Temperatures

Katarzyna Tracz, Marta Hager

Affiliation: Faculty of Civil Engineering, Poland

**Abstract:** The paper presents experimental investigations concerning the influence of the cement type (CEMI 42.5 R Portland cement and CEMIII/A 42.5 N slag cement—with 53% granulated blast furnace slag) on the mechanical and transport properties of heated concretes. The evolution of properties due to high temperature exposure occurring during a fire was investigated. High temperature exposure produces changes in the transport and mechanical properties of concrete, but the effect of cement type has not been widely studied in the literature. In this paper, concretes were made with two cement types: CEMI and CEMIII, using basalt (B) and riverbed aggregates (RB). The compressive and tensile strength, as well as the static modulus of elasticity and Cembureau permeability, were tested after high temperature exposure to 200, 400, 600, 800, and 1000 °C. The evaluation of damage to the concrete and crack development due to high temperature effects was performed on the basis of the change in the static modulus of elasticity. The test results clearly demonstrated that permeability increases with damage, and it follows an exponential type formula for both types of cement.

**Keywords:** high temperature; damage; permeability; CEMI and CEMIII; mechanical properties

### 引言:

含有粒状高炉矿渣的水泥因其较低的碳足迹而被广泛采用, 是建筑领域可持续发展的一项战略。高炉渣是在高炉中制造生铁时获得的副产品, 由铁矿石中的土质成分与石灰石熔剂结合形成。当熔化的炉渣在池塘中被迅速用水浇灭, 或用强大的水柱冷却时, 它就会形成一种细小的、颗粒状的、几乎完全非结晶的、玻璃状的形式, 被称为颗粒炉渣, 具有潜在的水力特性。这样的粒状矿渣, 当被精细研磨并与波特兰水泥 (PC) 结合

时, 已被发现表现出优异的胶凝特性。磨碎的高炉矿渣 (GGBFS) 的反应性被认为是评估 GGBFS 在混凝土复合材料中有效性的一个重要参数。GGBFS 呈现出无定形结构, 并显示出沸石特性, 在混凝土中作为添加剂使用, 对新鲜和硬化混凝土的性能有积极影响。GGBFS 的使用提供了一个重要的优势, 即有助于避免由于低水化过程而产生的混凝土热裂缝。事实上, 正如以前的结果所示, GGBFS 的水化过程比普通 CEMI 水泥的水化过程要慢。使用磨细的高炉矿渣的混凝土凝固时间较晚, 刚度较低。

当使用等量的水泥和水粘合剂 (w/b) 时, 含矿渣的混凝土在早期的抗压强度较低, 在晚期的抗压强度比波特兰水泥高。此外, 在特定的抗压强度下, 矿渣混凝土在拉力方面的机械性能比用波特兰水泥制造的混凝土更好。然而, Shumuye 等人的研究表明, 混凝土的抗压强度随着矿渣含量的增加而下降。

环境条件和养护期间的温度暴露对混凝土的机械性能有很大影响。当材料被置于高达 1000 °C 的高温下加热时, 比如在火灾期间, 由于水泥浆的脱水以及收缩的水泥浆和膨胀的骨料之间的热应变不匹配, 会发生热损伤, 从而诱发开裂。此外, 在冷却到环境温度的阶段, 由逆向热梯度引起的应力导致水泥浆内出现裂缝, 这将影响渗透性, 也可能在火灾后损害材料的耐久性。混凝土的机械性能在高温下的变化已被广泛研究, 帮助我们更好地理解混凝土结构在火灾情况下的行为, 并确定影响其行为的参数。火灾中混凝土机械性能的演变取决于混凝土的组成: 矿物添加剂的存在, 水灰比, 骨料的性质和类型。此外, 混凝土的加热条件: 加热速度和最高暴露温度对混凝土强度的演变起着重要作用, 还有测试程序: 热测试的混凝土或在温度暴露和冷却到环境温度后测试的混凝土。然而, 对于材料的机械性能测试, 建议采用缓慢的加热速率, 以确保限制试样内部的热梯度。在文献调查中, 采用了 0.1–10 °C/min 的加热速率。然而, RILEM 国际建筑材料、系统和结构实验室和专家联盟推荐的加热速率取决于试样直径, 在意外情况下 (火灾) 的加热速率为 0.5–2.0 °C/min。

发生在工程设施中的火灾案例 (例如哥达隧道、春秋隧道或勃朗峰隧道) 已经造成了许多人的死亡, 但也造成了巨大的经济损失。在这些火灾中, 观察到隧道内衬的混凝土损失很大。由于爆炸性剥落, 结构件的承载能力下降。剥落可能有不同的形式, 从小的混凝土碎片, 被称为爆米花效应, 到爆炸行为, 当较大的混凝土碎片以巨大的能量从混凝土构件中分离。在所有情况下, 混凝土火灾剥落会导致钢筋暴露, 而钢筋对高温很敏感。到目前为止, 已经证实混凝土的类型和组成, 包括骨料类型、水灰比、掺杂矿物材料和混凝土的含水量, 都会影响其在火灾条件下的行为。旨在了解剥落现象的原因以及确定影响其强度的材料参数的研究已经通过实验和数值分析进行了。因此, 混凝土剥落是暴露在火灾条件下的混凝土中发生的最有趣和复杂的现象之一。RILEM 技术委员会 256-SPF: 火灾引起的混凝土剥落。测试和建模已经成立, 并主要致力于研究这种特殊的行为。

在加热过程中, 渗透性通常会逐渐增加, 除非混凝土的渗透性可能会由于水分的堵塞效应而减少。在这种情况下, 水蒸气压力在材料的孔隙网络中增加, 这可能导致剥落行为。人们认为, 高温、材料孔隙中水蒸气压力的增加以及内部应力状态的相互作用是导致混凝土剥落发生的原因。看来, 支配剥落发生的关键参数是其渗透性。在密度大、渗透性小的混凝土中, 发生剥落的风险更高。研究人员表明, 在火灾条件下, 添加了硅灰和钙质填料等矿物添加剂的混凝土很容易发生剥落行为。由于混凝土的剥落行为主要受其渗透性的制约, 研究人员一直在测试 GGBFS 的添加对混凝土渗透性的影响。最近, Karahan 表明, 在暴露于 400 °C 的温度下, 混凝土的运输性能增加, 同时伴随着抗压强度的降低。此外, 作者的结论表明, 从材料行为的角度来看, 在火中 50–70% 的矿渣含量作为水泥替代物的最佳 GGBFS/水泥混合物。

因此, 现有的结果并没有反映出这个主题的所有相关方面, 需要进行额外的调查。由于混合料的不同, 文献中的结果不能相互比较。因此, 我们提出了一个研究计划, 可以明确比较水泥类型对高温下混凝土的机械和物理性能的影响。为此, 我们对相同的混凝土混合物进行了各种测试, 其中唯一的变化因素是水泥。因此, 这项工作的主要目标是比较用两种不同的水泥类型 (CEMI 和 CEMIII) 制造的混凝土的机械和物理性能的变化。对于所有四种混凝土, 水泥浆的成分以及水泥浆和砂浆的体积都保持不变。因此, 本研究仅反映了波特兰水泥与矿渣水泥对使用两种类型骨料 (碎玄武岩 (B) 和河床砾石 (RB)) 的混凝土的机械性能和渗透性的影响。对于所有测试的混凝土, 除了水泥的类型外, 所有成分的数量 (水泥浆和砂浆量) 和骨料的类型和性质, 以及粒度分布都是相同的。

这项研究调查了用不同水泥制成的混凝土的机械性能和渗透性, 以比较它们在高温暴露后的参考质量运输能力、强度和刚度。渗透性的参考值使人们能够评估它们在火灾条件下剥落的潜力, 因为密度大、渗透性差的材料容易出现这种行为。此外, 还研究了渗透率随加热温度的变化, 以及抗压强度和分裂拉伸强度。此外, 还确定了应力应变曲线, 并确定了弹性模量。

所有的剩余机械性能 ( $f_{cT}$ 、 $f_{tT}$ 、 $ET$ ) 都是在加热到温度  $T$  (°C) 后评估的, 这相当于在需要评估材料性能的情况下混凝土的火后性能。在这种特定情况下, 混凝土的残余渗透性也是一个问题, 因为它制约着耐久性的所有方面, 当必须对火灾后混凝土构件的进一步使用做出决定时, 可能需要进行评估。

## 测试结果和讨论

### 初始性能

对于B CEMI、B CEMIII、RB CEMI和RB CEMIII混凝土, 90天后确定了体积密度 $\rho_{020^\circ\text{C}}$ 和渗透率 $k$ 的初始物理特性, 以及抗压强度 $f_c$ 、抗拉强度 $f_t$ 和弹性模量 $E_{20^\circ\text{C}}$ 的机械特性。作者列出了对非加热混凝土性能的初始测量结果, 并以符号 $20^\circ\text{C}$ 标记。

### 体积密度随温度的变化

温度的逐渐升高导致了自由水的蒸发和材料的逐渐脱水。在较高的温度下, C-S-H以及硅酸盐和碳酸钙的分解是渐进的。因此, 观察到了重量损失, 并记录了密度的逐渐变化。B CEMI、B CEMIII、RB CEMI和RB CEMIII混凝土的体积密度随着温度的变化而下降。根据体积密度的平均值, 这些值主要与骨料的类型有关: 玄武岩或河床。玄武岩CEMI混凝土的密度为 $2558.8\text{kg/m}^3$ , B CEMIII为 $2533.2\text{kg/m}^3$ 。RB CEMI和RB CEMIII混凝土的密度分别为 $2300.7$ 和 $2315.6\text{kg/m}^3$ 。除了在未加热的原始混凝土中观察到的初始密度值外, 两种水泥类型的密度随温度的变化是非常相似的。

### 抗压强度和劈裂抗拉强度随温度变化的情况

根据抗压强度的平均值和单个值, 可以得出结论, 对于使用玄武岩和河床骨料的CEMIII混凝土来说, 未加热的混凝土抗压强度更高。这种趋势在 $200^\circ\text{C}$ 时保持不变。当温度高于 $400^\circ\text{C}$ 时, B CEMI和B CEMIII之间以及RB CEMI和RB CEMIII混凝土之间的强度差异很小。它们都呈现出几乎相同的强度, 即 $60\text{MPa}$ 。

根据 $f_t$ 的平均值和单个值, 加热导致了强度的逐渐降低, 尽管如此, 在整个温度范围内, CEMI和CEMIII混凝土之间的差异可以被认为是微不足道的, 在测量误差的范围内, 或者在这个机械性能的结果的散乱中。

正如以前的研究已经表明的那样, 混凝土高温行为的一个重要方面是骨料在高温下的热稳定性。这可以通过热重分析和差热分析进行评估, 这表明骨料的物理或化学转化。正如已经报道的那样, 玄武岩在 $1000^\circ\text{C}$ 以下是热稳定的; 超过这个温度, 在 $1050^\circ\text{C}$ 就会观察到熔化, 膨胀和气体释放都会发生。

### 应力和应变的关系, 以及弹性模量的评估

根据混凝土的应力-应变关系, 伴随着温度的升高, 观察到了混凝土刚度的变化, 如应力-应变曲线的斜率所示。对于加热到 $600^\circ\text{C}$ 及以上的试样, 由于裂缝的存在, 应力-应变曲线在压缩过程中呈现出非线性行为, 当测试期间施加压缩载荷时, 裂缝会部分关闭。对于热测试和冷却后测试的混凝土, 也观察到了类似的压缩应

力-应变行为, 观察到了样品的重要开裂, 特别是对于含有硅质骨料的混凝土, 在加热时没有加载。非负载混凝土的开裂被加热过程中的热应变变化观察所证实。

根据加热的B CEMI和B CEMIII, 以及RB CEMI和RB CEMIII的静态弹性模量值(ET), 对于B CEMI和B CEMIII, 原始的非加热混凝土的弹性模量( $E_{20^\circ\text{C}}$ )分别为 $44.4$ 和 $48.9\text{GPa}$ 。对于河床骨料RB CEMI和RB CEMIII, 它们分别为 $30.6$ 和 $29.7\text{GPa}$ 。这些结果清楚地表明, 对于具有相同体积的水泥浆的混凝土, 弹性模量与骨料的性质有关, 并与混凝土密度密切相关。对于含有RB和B型集料的CEMIII混凝土, 都观察到了较高的ET值。

在整个加热温度范围内, 观察到ET值呈准线性下降。ET下降的斜率在 $400$ 到 $1000^\circ\text{C}$ 的温度范围内最为明显。这种刚度的急剧下降是由于在这个温度范围内观察到的水泥浆和骨料之间的应变不匹配导致的裂纹发展, 以及裂纹导致的热应变增加。

对于测试的混凝土来说, 弹性模量的相对变化几乎是相同的, 并且不取决于水泥类型。除了在 $20^\circ\text{C}$ 时出现的差异, RB CEMI和RB CEMIII的弹性模量值之间的差异并不明显。

### 加热混凝土的渗透性演变

对于RB CEMI和RB CEMIII, 在暴露于 $20^\circ\text{C}$ 后的非加热混凝土上测量的初始参考渗透率分别达到 $1.20 \times 10^{-17}\text{m}^2$ 和 $1.00 \times 10^{-17}\text{m}^2$ 。对于B CEMI和B CEMIII, 这一渗透率为 $0.70 \times 10^{-17}\text{m}^2$ 和 $0.52 \times 10^{-17}\text{m}^2$ 。随着加热温度的增加, 残余渗透率也增加。对于加热到 $1000^\circ\text{C}$ 的试样, 由于裂纹的发展, 渗透率无法测量, 而且气体流动无法稳定, 所以无法用Cembureau装置测量渗透率。对于B CEMIII和RB CEMIII混凝土, 一般来说, 渗透率的数值较低。对于河床骨料混凝土RB CEMIII, 在暴露于 $200$ 、 $400$ 、 $600$ 和 $800^\circ\text{C}$ 的高温下测量的渗透率系统地略低于RB CEMI。玄武岩骨料混凝土的渗透性比河床混凝土低。然而, 这些差异不能被认为是重要的。对于所有加热到 $1000^\circ\text{C}$ 的混凝土, 由于对混凝土的严重破坏和裂缝的产生, 无法用Cembureau方法测量其渗透性。

## 结论

本文旨在介绍水泥类型CEMI和矿渣水泥CEMIII(其中GGBFS含量达到 $54\%$ )对含有河床(RB)和玄武岩(B)骨料的加热混凝土的机械和物理性能的影响研究。本文调查了四种具有相同体积的水泥浆和砂浆的混凝土。区分RB和B混凝土的唯一参数是水泥类型。对所获得的实验数据的分析涉及到机械测试、刚度和四种混

凝土经受高温暴露（高达1000℃）的渗透性测试结果。得出了以下主要结论：

1. 水泥类型影响着90天混凝土的抗压强度和渗透性。对于玄武岩和河床骨料混凝土，使用CEMIII的混凝土呈现出较低的渗透性和较高的抗压强度。

2. 高温曝晒对混凝土的机械和物理性能有很大影响，混凝土的损伤随着曝晒温度的升高而增加。温度升高会导致强度和弹性模量的降低。劈裂抗拉强度的下降比抗压强度的变化更明显。

3. 加热的CEMI和CEMIII混凝土的机械性能之间存在微小的差异。体积密度值以及力学性能 $f_cT$ 、 $f_tT$ 和ET非常接近，或者差异在测量误差或测试性能结果的散乱范围内。

4. 集料的性质对测试混凝土的材料物理密度和力学性能有主导性的影响。在温度不超过400℃的情况下，抗压和抗拉强度取决于骨料的性质；在这个温度水平以上，观察到的强度值相似。

5. 机械性能的下降是由于水泥浆中的脱水和化学变化导致的水泥浆逐渐损坏的结果。此外，由于骨料和水泥浆的热混杂导致的裂缝发展导致了加热的混凝土的非线性行为。

6. 除了400℃的温度之外，所有被调查的混凝土的弹性模量的相对值的变化过程都非常相似。在这个温度下，河床骨料混凝土RB CEMI和RB CEMIII的破坏参数低于玄武岩骨料混凝土（B CEMI和B CEMIII）。对于200、600、800和1000℃，破坏水平相似。

7. 在加热后的渗透率值中观察到了高达六个数量级的重要变化。然而，混凝土之间的差异不能被认为是重要的。事实上，在整个温度范围内，CEMIII混凝土与CEMI混凝土相比，其渗透率值略低。另一方面，以玄武岩骨料为基础的混凝土比河床混凝土的渗透率略低。使用CEMI的混凝土：河床 $1.2 \times 10^{-17}$ ，玄武岩 $0.7 \times 10^{-17}$ ；使用CEMIII的混凝土：河床 $0.99 \times 10^{-17}$ ，玄武岩CEMIII  $0.53 \times 10^{-17}$ 。这种差异可以解释为玄武岩集料本身的渗透性较低。在200、400和600℃的温度下也观察到这种关系。

8. 对结果的分析允许制定构成指数法，提出了混凝土的渗透性和破坏之间的关系，它在600℃以下有效。

9. 可以认为，加热诱发破坏，可以用初始弹性模量的变化来表示，这在很小程度上取决于水泥的类型。在这个破坏范围内，骨料类型的影响也是不明显的。

#### 参考文献：

[1]Pal, S.C.; Mukherjee, A.; Pathak, S.R. Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. *Cem. Concr. Res.* 2003, 33, 1481 – 1486.

[2]Topçu, I.B. High-volume ground granulated blast furnace slag (GGBFS) concrete. In *Eco-Efficient Concrete*; Pacheco-Torgal, F., Jalali, S., Eds.; Elsevier: Cambridge, UK, 2013; pp. 218 – 240.

[3]Lura, P.; van Breugel, K.; Maruyama, I. Effect of curing temperature and type of cement on early-age shrinkage of high-performance concrete. *Cem. Concr. Res.* 2001, 31, 1867 – 1872.

[4]Shumuye, E.D.; Zhao, J.; Wang, Z. Effect of fire exposure on physico-mechanical and microstructural properties of concrete containing high volume slag cement. *Constr. Build. Mater.* 2019, 213, 447 – 458.

[5]Farzampour, A. Compressive Behavior of Concrete under Environmental Effects. In *Compressive Strength of Concrete*; IntechOpen: London, UK, 2019; pp. 1 – 12.

[6]Mindeguia, J.-C.; Hager, I.; Pimienta, P.; Borderie, C.L.; Carré, H. Parametrical study of transient thermal strain of high-performance concrete. *Cem. Concr. Res.* 2013, 48, 40 – 52.

[7]Hager, I. Behaviour of cement concrete at high temperature. *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.* 2013, 61, 145 – 154.

[8]Pimienta, P.; Jansson McNamee, R.; Mindeguia, J.-C. (Eds.) *Physical Properties and Behaviour of High-Performance Concrete at High Temperature*. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee HPB-227; Springer: Cham, Switzerland, 2019; pp. 1 – 130.

[9]Gawin, D.; Alonso, C.; Andrade, C.; Majorana, C.E.; Pesavento, F. Effect of damage on permeability and hygro-thermal behaviour of HPCs at elevated temperatures: Part 1. Experimental results. *Comput. Concr.* 2005, 2, 189 – 202.