

# 钢纤维增强混凝土的电阻率 – 影响参数

迈克尔·马舍伊, 西蒙·雷帕赫, 托马斯·克莱文

所属: 德国建筑材料研究所

**摘要:** 本文对纤维含量为  $0\text{kg/m}^3 \sim 80\text{kg/m}^3$  的不同钢筋混凝土的电阻率进行了系统研究, 以识别混凝土成分与纤维类型和含量之间相互作用对电阻率的可能影响。在文献综述的基础上, 本文确定了对普通混凝土电阻率有显著影响的  $w/c$  比、粘结剂含量、磨粒高炉渣 (GGBS) 和细度 4 个参数, 研究了它们对电阻率和相互作用的影响。实验结果强调, 纤维的添加导致电阻率显著降低, 与混凝土成分的所有其他参数无关。此外, 本文还表明混凝土的孔隙率较高, 例如, 由于较高的  $w/c$  比率, 也会导致较低的电阻率。这些结果与平纹混凝土的文献综述一致, 而随着纤维含量的增加, 混凝土成分对电阻率的影响较小。因此, 纤维加固的影响不受混凝土成分变化的影响。一般来说, 纤维用量越高会导致电阻率降低, 但对电阻率的影响随不同类型的钢纤维而略有不同。基于这项研究, 可以清楚地展示使用电阻率测量来确定纤维含量的潜力。

**关键词:** 钢纤维增强混凝土; 电阻率; 纤维含量

## Electrical Resistivity of Steel Fibre-Reinforced Concrete – Influencing Parameters

Michael Matschei, Simon Raypach, Thomas Cleven

Affiliation: Institute of Building Materials Research, Germany

**Abstract:** This paper presents a systematic study of the electrical resistivity of different steel fibre-reinforced concretes with fibre contents from  $0\text{ kg/m}^3$  to  $80\text{ kg/m}^3$  in order to identify possible effects of interactions among concrete composition and fibre type and content regarding electrical resistivity. Based on a literature review, four parameters,  $w/c$  ratio, binder content, ground granulated blast-furnace slag (GGBS) and fineness of cement, which show a significant influence on the electrical resistivity of plain concrete, were identified, and their influence on the electrical resistivity as well as interaction effects were investigated. The results of the experiments highlight that the addition of fibres leads to a significant decrease in electrical resistivity, independent of all additional parameters of the concrete composition. Additionally, it was shown that a higher porosity of the concrete, e.g., due to a higher  $w/c$  ratio, also results in a lower electrical resistivity. These results agree with the literature review on plain concrete, while the influence of the concrete composition on the electrical resistivity is weaker with the increase in fibre content. The influence of fibre reinforcement is thus not affected by changes in the concrete composition. In general, a higher fibre dosage leads to a decrease in electrical resistivity, but the impact on the electrical resistivity varies slightly with different types of steel fibres. Based on this study, the potential of determining the fibre content using electrical resistivity measurements could be clearly presented.

**Keywords:** Steel fibre-reinforced concrete; Electrical resistivity; Fibre content

### 引言:

作为民用建筑的常用复合材料, 钢纤维增强混凝土 (SFRC) 结合了两种基本材料在承重性能方面的优点。但是, 耐久性差, 因而不受控制, 使用寿命短是 SFRC 的主要问题之一。实践中的大多数规范都基于“视为满

足”规则, 对最大水/水泥比率, 最小水泥含量或最小混凝土覆盖深度进行了限制。这种关于结构耐久性的设计方法主要是经验性的。这些设计规范中没有指定可用于评估结构耐久性能的方法。施工质量低是混凝土结构中耐久性问题的另一个原因。从现有结构中获得的经验表

明, 当前的规范和实践没有提供充分控制的耐久性, 应使用基于性能的方法。

由于普通混凝土具有出色的抗压应力能力, 但几乎没有承受拉伸应力的能力, 因此纤维部分会占用剩余的拉伸力。使用这种材料, 人们可以生产出几乎每种形状的元素, 具有足够的耐用性和改进的机械特性。SFRC的主要应用包括工业地板, 地震带或地下建筑中的结构以及结构暴露于扭转, 冲击或疲劳的应用。这种类型的建筑材料的一个缺点是纤维含量, 分布和方向对其机械性能的巨大影响。有研究表明, 由于缺乏对混凝土纤维部分的控制, 相同混凝土试样的机械参数可以相差高达20%。因此, 静态计算必须使用较大的安全系数。

虽然新建项目中的纤维含量可以很容易地通过从定义的新鲜混凝土样品中清洗纤维或通过检查称重协议来确定, 但在硬化混凝土或现有建筑中, 迄今为止, 还没有简单的方法来计算确切的纤维含量。一种似乎适用于测定混凝土中纤维含量和方向的无损检测方法是测量混凝土的电阻。众所周知, 使用所谓的多环电极进行电阻测量可以监测混凝土的耐久性, 以及钢筋的潜在腐蚀过程。

混凝土的电阻率是一种材料属性, 可以定义为对电流流动的阻力。水/水泥比、水泥类型、火山灰外加剂和水化程度等因素会影响混凝土的电阻率。电阻率可用于不同的目的, 其中之一是混凝土结构的条件测量。利用电阻率可以评估混凝土性能。还可以对新混凝土进行电阻率测量, 以确定早期年龄特征。研究证实, 电阻率测量是一种简单、无损、可靠和快速的测试方法, 也可用于施工期间混凝土的质量控制。市售的便携式手持式和电池供电电阻率测量设备可用于实验室和现场。电阻率测试是一种低成本且可重复的方法, 允许在不同时间进行测试, 因此, 可以使用相同的试样监测混凝土性能的变化。混凝土的电阻率可以在几分钟内测量, 因为不需要特殊的试样制备。

混凝土孔隙结构的水饱和度和孔隙率及孔隙溶液的电导率是影响混凝土电阻率的最相关因素。然而, 应该考虑到, 孔溶液化学的影响相对较小, 除非发生极端的干燥和碳酸化效应。通常, 由于水合反应和离子的相关溶解过程, 孔隙溶液的组成随着正在进行的水合过程而变化, 特别是在水合的早期阶段, 直到28天。通常, 化学成分随后稳定下来, 并显示出0.3至1  $\Omega\text{m}$ 范围内的电阻率。

对于SFRC来说, 纤维对材料的导电性有重大影响, 因为它们能够作为金属导体发挥作用, 而孔隙溶液仅通

过离子转移导电。因此, 对于混凝土, 如果在受控湿度下进行研究, 特别是孔隙结构会影响电阻率, 进而受水化过程和混凝土成分的影响。通过筛选文献, 其他几个参数变得明显, 这些参数会影响混凝土的孔隙结构, 例如水/水泥比, 水泥含量和混凝土成分, 例如水泥类型或应用的补充胶凝材料和骨料。

对混凝土的孔隙率和电阻率影响最大的参数是水/水泥比和水泥含量。增加的水/水泥比率与孔隙率的增加相匹配; 因此, 观察到由于毛细管网络扩大而导致的电阻率降低。在恒定的w/c比率下, 总水量受水泥含量的影响, 这也会影响总孔隙率。在水泥含量恒定的情况下, 随着水/水泥比在0.4和0.6之间增加, 电阻率几乎线性下降可见, 而在恒定w/c比下更高的水泥含量也会导致电阻率降低。这两个参数彼此独立, 并且没有显示任何交互。

不同类型的水泥以及单片机的使用会显著影响孔隙溶液的电导率以及由此产生的混凝土孔隙结构。一般来说, 普通硅酸盐水泥的电阻率最低, 而使用不同类型的水泥或添加硅粉、粉煤灰或磨粒高炉渣(GGBS)会显著降低混凝土的孔隙率, 从而导致电阻率的折痕。主要是由于SCM的喷水或潜水反应, 如GGBS, 硅粉或粉煤灰, 孔隙结构变得更细, 渗透性更小, 因此孔隙溶液的导电性降低。使用更细的水泥也可以观察到相同的现象, 例如具有较高强度等级的水泥。

此外, 骨料可能会影响混凝土的导电性, 因为这些混凝土组分的不同粒度分布或吸水能力会影响混凝土的总孔隙率。例如, 使用碎骨料比圆形晶粒形状具有更高的电阻率。此外, 较大的最大晶粒尺寸会增加电阻率, 因为大晶粒不导电, 并增加混凝土的曲率。必须提到的是, 在某些情况下, 导电骨料也用于混凝土, 这导致电阻率显著降低。

与混凝土成分无关, 可能对电阻率产生重大影响的另一个参数是混凝土的老化作为服务暴露的函数, 这与孔隙结构的变化相结合影响浸出和干燥过程。此外, 持续的水化过程导致孔隙结构的细化和致密化, 从而提高电阻率。由于离子浸出效应, 也会产生相同的效果。

在研究SFRC时, 导电纤维(例如钢)的使用也有助于导电过程, 从而显著影响复合材料的电阻率。由于钢是金属导体, 因此纤维的导电性比混凝土高得多。因此, 通过添加钢纤维, 形成复合材料, 其中包括并联和串行电气连接的组合。因此, 复合材料的电阻率取决于纤维的量和结构中的取向。高纤维含量导致电阻率显著降低, 并且与电传输方向平行取向的纤维会降低电阻率。

此外, 纤维的几何形状会影响导电性。一般来说, 小纤维往往表现出均匀的分布和取向, 而使用较长的纤维会增加纤维直接接触纤维的可能性, 从而导致短路, 因此混凝土对导电性几乎没有影响。然而, 纤维长度的这些影响仅在低纤维剂量下发生。

混凝土电阻率的测量表明, 作为测定SFRC纤维含量的无损测试方法, 具有很高的潜力, 因此已知其他参数的可能负面影响, 可以使用简单的测试设置获得足够和准确的结果。尽管过去曾进行过研究以显示纤维对电阻率的影响或分析混凝土成分对混凝土渗透率或电阻率的影响, 但缺乏结合SFRC效应和混凝土成分不同参数的系统研究。

在本研究中, 研究了混凝土成分与纤维添加相结合对导电性的影响。本文的目的是确定单一效应和相互作用, 这些效应和相互作用允许构建模型和/或表示一个重要的数据集, 用于将来开发基于电阻率测量的新鲜和硬化混凝土上纤维含量和取向的测试方法。在这种新型测试方法的帮助下, 可以简化SFRC的监测过程, 并允许更精确地预测SFRC的机械特性, 这可能导致安全系数较低的静态计算, 从而提高SFRC在建筑领域的接受度。

#### 单参数变化对混凝土成分的影响

##### 一、水/水泥比例的变化

基本的混凝土混合料设计根据其水/水泥比例进行了修改。F或所有纤维含量, w/c比电阻率有明显的影响, 纤维含量的增加导致全球电阻率显著降低。虽然0.55的w/c比导致所有纤维含量的全球电阻率最高, 但0.60和0.65的较高w/c比并没有显示出同样连续的趋势。w/c比值为0.55和0.60的曲线可以通过几乎平行的偏移来表征, 但w/c比值为0.65的曲线显示出不同的行为和更平滑的进展。显然, 在w/c比大于0.6且纤维含量高于30 kg/m<sup>3</sup>时, 达到平台, 此时w/c比的增加不会显著影响电阻率。

总之, 与纤维含量无关, 由于混凝土中的水量较高和孔隙率增大, w/c比率的增加会导致电阻率降低或电导率增加。这种效应已经在几篇论文中描述了普通混凝土。然而, w/c比和电阻率之间没有线性相关性, 特别是当添加纤维时。对于较高的纤维含量, 期望值与测量结果之间的差异可以通过纤维的影响和较低的电阻率来解释。虽然对于低纤维含量, 混凝土对电阻率有巨大影响, 但随着纤维含量的增加, 纤维逐渐成为材料的主要导电部分。基于混凝土流动性略微变化的纤维分布和取向的变化会对SFRC的全球电阻率产生重大影响。

##### 二、活页夹内容的变化

除了水/水泥比例外, 由于在基本混凝土混合料设计

中缺乏SCM, 粘合剂含量在本例中与水泥含量同义, 直接影响混凝土混合物中水和水泥浆的总量。因此, 混凝土的总孔隙率变化, 而孔径分布仅受到轻微影响。较高的水量导致几乎所有纤维含量的电阻率降低。所有水泥的曲线都显示出几乎相同的行为, 电阻率随着纤维含量的增加而降低, 而曲线的扁平化则为更高的纤维含量。只有水泥含量为270 kg/m<sup>3</sup>、纤维含量为10~30 kg/m<sup>3</sup>的混凝土似乎偏离了不断递减的行为, 但这可以通过实验的分散来解释。

对于所研究的水泥含量, 可以观察到水泥含量与电阻率之间的几乎线性相关。在这一系列实验中, 恒定的w/c比率导致水泥石总量发生变化, 并且孔隙结构可能没有变化。基于骨料的隔离特性, 这与整个材料的电导率的增加相匹配。

#### 三、水泥类型的变化

水泥类型, 在这种情况下, 强度等级, 与水泥的特定表面同义, 被改变, 以确定水泥更细孔隙结构对更高强度等级的影响。比较CEM I 32.5 R和CEM I 42.5 R的结果, 可以观察到这种预期的行为, 但最好的水泥(CEM I 52.5 R)不符合这些期望。确定了三种植用水泥的比表面, 显示出接近线性, 其中CEM I 32.5 R显示最低表面, CEM I 52.5是最高表面, CEM I 42.5 R的比表面近似于两者的平均值。当三种混凝土混合物的全局电阻率曲线时, 很明显, 特别是对于纤维含量小的水泥, 表面最高的水泥表现出最低的电阻率。对于较高的纤维含量, 与预期相反, 水泥的曲线相交, CEM I 52.5 R的电阻率超过CEM I 32.5 R, 但仍低于CEM I 42.5 R。这些影响无法解释, 将在今后的分析中加以处理。

水泥类型对电阻率的影响与纤维含量无关。如前所述, 只有两种强度较低的水泥才能看到电阻率较高、水泥细度较高的预期趋势, 而CEM I 52.5 R的结果远低于预期。一个合理的解释可能是水泥熟料中的成分略有不同, 尽管所有水泥都是在同一生产工厂生产的。

#### 四、添加研磨造粒高炉渣(GGBS)

除了不同的水泥强度等级外, GGBS还被用作混凝土组分, 因为它具有显著改变混凝土孔隙结构的公知能力。为了确定GGBS在与不同水泥熟料没有任何相互作用的情况下的影响, 将相同的基础水泥(CEM I 32.5 R)与GGBS以恒定的水/粘合剂比例混合。GGBS的含量是在考虑矿渣水泥添加剂的限量的情况下选择的。

使用总粘合剂含量35%的GGBS含量不会导致电阻率的任何显著变化。对于小纤维剂量, OPC混凝土具有略高的电阻率, 而随着纤维含量的增加, 差异减小。相

比之下,使用65%的GGBS含量导致电阻率显著增加,其中差异再次减小,因为纤维含量较高。

### 多参数变化的影响

#### 一、光纤类型对全球电阻率的影响

通过单一参数变化分析的最后一个参数是纤维类型。使用两种纤维长度分别为60 mm和35 mm的宏观纤维,以及一种纤维长度为8 mm的超细纤维。变化的结果表明,对所有三种纤维的电阻率几乎没有影响。虽然所有三种普通混凝土混合物几乎相同,这表明基本混合物具有可比性,纤维含量增加,但仅添加较小的大纤维(35毫米长)即可导致电阻率略高。最长和最短的纤维显示出几乎相同的结果。因此,主效应图显示,对于这种混凝土混合物,所有三种类型的纤维的行为都相似。

#### 二、光纤类型对水平方向电阻率的影响

虽然对不同类型纤维的混凝土的整体电阻率几乎没有可见的影响,但根据纤维类型和制造工艺,确定了不同试样方向分布的可能变化,这是使用振动台进行的。已经研究了不同纤维对在试样的两个水平方向上测量的电阻率的影响。水平方向是那些与振动台方向正交的方向。与上一章类似,对于所有纤维含量,几乎没有可见的影响。最长的纤维再次导致最小的电阻率,但没有显著的可测量效应。

比较全局电阻率和水平方向的电阻率,值得注意的是,SFRC在水平方向上的电阻率略小于全局电阻率

#### 三、光纤类型对垂直方向电阻率的影响

与水平电阻率相比,垂直电阻率明显高于全局电阻率,不同纤维曲线的扩散比全局电阻率或水平方向的曲线更宽。这种现象是基于制造过程的预期,其中混凝土被分成两层填充到模板中,并且压实是通过垂直方向的振动台进行的,这导致纤维的更水平方向,从而在水平方向上具有更高的导电性。对于较高的纤维含量,微纤维混凝土垂直方向的电阻率低于大纤维。

与纤维含量无关,长度为60 mm的大纤维混凝土的混凝土电阻率与垂直方向的超细纤维之间的电阻率差异很明显,而全局电阻率几乎相等。这一事实表明微纤维在垂直方向上的首选方向,尽管压实是垂直进行的。对于超细纤维,水平和垂直电阻率之间的电阻率差相当小,低于5  $\Omega\text{m}$ ,而对于大纤维,在高于10  $\Omega\text{m}$ 时存在显著差异。

#### 四、混凝土时长和贮存介质的影响

除了研究影响因素,混凝土成分和纤维含量外,混凝土的年龄和储存条件也会影响混凝土的电阻率。为了显示这些因素的影响,使用了来自同一混合批次的样品。

研究了混凝土时长(与存储介质无关)对电阻率的影响。可以看出,对于所有纤维含量,较高的混凝土年龄导致较高的电阻率,这可以通过孔隙结构的形成和导电孔隙通道的闭合来解释。很明显,对于普通混凝土,混凝土的年龄对电阻率的影响大于SFRC,因为纤维参与传导过程,因此混凝土的影响降低。

### 讨论

本研究的目的是确定影响参数对SFRC电阻率的相关性。因此,分析了混凝土成分的变化以及储存条件和混凝土年龄的变化。为了能够使用电阻率测量来检测SFRC的纤维含量,纤维含量是影响电阻率的最大参数。用双电极设置测量的电阻率受到钢纤维增强混凝土纤维含量变化的显著影响。所有测量的平均结果表明,添加80 kg/m<sup>3</sup>的纤维导致电阻率从平均值的约43.5  $\Omega\text{m}$ 降低到13.8  $\Omega\text{m}$ ,相当于减少了约70%,对电阻率有主要影响,并且无法观察到纤维含量与电阻率上其他不同参数之间的相互作用。混凝土成分的变化也导致电阻率的影响,但与纤维含量相比,效果要小得多。

由于钢纤维是金属导体,即使混凝土完全饱和,它们的电导率也超过了混凝土孔隙溶液的离子电导率,因此可以解释所鉴定的钢纤维量的巨大影响。此外,大量的纤维导致混凝土的渗透性更高。对于较低的混凝土饱和度和,纤维和混凝土的电导率之间的差异可能会显著扩大,但是由于对电极的耦合效应,电阻率的测量将更加复杂。因此,电导率的巨大差异允许使用电阻率测量来表征已知混凝土组合物的纤维含量。由于混凝土成分和混凝土的年龄对电阻率还有其他影响因素,因此有必要确定混凝土的电阻率。为此,对这些参数进行了分析,以找到与纤维在电阻率方面的可能相互作用,并获得一个数据库,以便将来使用测试装置来确定SFRC的纤维含量。

使用不同的纤维类型,两种长度为60 mm和35 mm的大纤维以及一种长度仅为8 mm的超细纤维,涂有黄铜,对混凝土的整体电阻率几乎没有影响。这表明SFRC的纤维含量几乎可以独立于所使用的纤维进行检测。这一事实可以用纤维材料的导电性和混凝土的孔隙溶液之间的巨大差异来解释。即使纤维材料的差异也只是导致与普通混凝土的高电阻率相比对导电性的影响无法识别。在几项研究中,由于两种或多种纤维可能直接连接的现象,纤维长度的影响仅对小纤维含量有预期。然而,正如我们的实验所示,即使纤维含量为10 kg / m<sup>3</sup>,这在实践中并不常见,也无法检测到这种影响。综上所述,可以得出结论,SFRC的导电性主要受纤维量的影响,分别

是钢, 而不是纤维的数量, 因此不可能区分通过一根纤维的连续导电路径或通过多个纤维的不连续导电路径和两种材料之间具有过渡区的混凝土。

观察到的不同纤维的唯一影响是由于在混合和压实过程中微纤维的分布和取向预期略有不同。由于试样尺寸有限, 长纤维可以在模板中自由对齐, 但受生产过程的影响极大。由于混凝土模板是按照欧洲标准填充的, 因此填充了两层混凝土, 长纤维倾向于在水平方向上更加对齐。此外, 通过振动台的压实过程导致垂直压力, 从而也支持纤维的水平方向。相反, 超细纤维足够小, 几乎可以自由地在混凝土中对齐, 并且大多不受骨料, 分层制造工艺或垂直压实的影响。然而, 无法观察到大纤维之间的差异。因此, 可以得出结论, 每公斤有一个临界纤维长度和纤维数量, 这导致对纤维取向的影响, 当没有达到这个临界值时, 不会有任何影响。

混凝土的年龄在7天至185天的范围内, 导致普通混凝土的电阻率变化在40  $\Omega\text{m}$ 至70  $\Omega\text{m}$ 之间, SFRC的电阻率变化为10  $\Omega\text{m}$ 和20  $\Omega\text{m}$ , 但纤维添加的影响再次主导了混凝土年龄的影响。这些结果证实了观察结果, 其中还研究了混凝土年龄, 纤维添加和w/c比的影响。在混凝土寿命的最初几天和几个月中, 反应过程引起了水化程度的显著变化, 从而引起了孔隙结构的显著变化。基于粘合剂材料, 最大部分的水合作用在28天至90天后完成。因此, 混凝土年龄对电阻率的影响随着年龄的增加而降低, 这等同于水化程度的增加。

尽管孔隙溶液的初始电导率对混凝土的电阻率有影响, 但对于SFRC来说, 存储介质对电阻率的影响很小。较高的初始碱度会略微降低混凝土的电阻率。对于未来的分析, 这意味着必须使用恒定的储存条件, 即在测量电阻率之前应对试样进行一定的调节, 但结构构件中混凝土的未知条件不是该测试方法的排除标准。

### 结论

该研究表明, SFRC电阻率的测定是监测纤维含量的合适测试方法, 例如, 在预制工厂或新建筑中, 可以表征普通混凝土成分的电阻率。作为金属导体的钢和作为离子导体的混凝土的电导率之间的巨大差异导致纤维含量对电阻率有显著影响, 这导致SFRC的电阻率比普通混凝土低70%, 为80 kg/m<sup>3</sup>。然而, 由于混凝土成分也存在影响, 例如w/c比和粘合剂含量, 因此该测试方法的应用领域需要事先对混凝土混合料设计进行校准, 而无需添加纤维。否则, 混凝土组合物的影响(其电阻率可影响约15%至25%), 可能会在纤维含量分析中引起重大误差。在维修或维护工作中对现有结构进行的调查只有

在普通混凝土的成分或电阻率是众所周知的情况下, 才能得出足够的纤维含量近似值, 例如, 借助广泛的数据库或没有纤维的普通混凝土的表征。扩展测试设置以使其能够用于现有结构的表征以及纤维取向评估的两种可能方法是我们未来研究的主题。

### 参考文献:

- [1]Reichling K, Raupach M, Klitzsch N. Determination of the distribution of electrical resistivity in reinforced concrete structures using electrical resistivity tomography. *Mater. Corros.* 2015; 66: 763 - 771.
- [2]Andrade C. Model for prediction of reinforced concrete service life based on electrical resistivity. *IBRACON Mater. J.* 2005, 1, 1 - 5.
- [3]Büchler D. Der elektrische Widerstand von zementösen Werkstoffen. *ETH Zürich* 1996.
- [4]Chen B, Wu K, Yao W. Conductivity of carbon fiber reinforced cement-based composites. *Cem. Concr. Compos.* 2004; 26: 291 - 297
- [5]Azarsa P, Gupta R. Electrical resistivity of concrete for durability evaluation: A review. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2017; 2017: 8453095.
- [6]Lübeck A, Gastaldini ALG, Barin DS, et al. Compressive strength and electrical properties of concrete with white portland cement and blast-furnace slag. *Cem. Concr. Compos.* 2012; 34: 392 - 399.
- [7]Ramezani-pour AM, Esmaeili K, Ghahari SA, et al. Influence of initial steam curing and different types of mineral additives on mechanical and durability properties of self-compacting concrete. *Constr. Build. Mater.* 2014; 73: 187 - 194.
- [8]Beek van A, Stenfert Kroese W. 24 Years of Experience with the Electrical Conductivity to Determine Material Properties of Concrete. *HERON* 64 2019; ½: 3 - 19.
- [9]Cosoli G, Mobili A, Tittarelli F, et al. Electrical resistivity and electrical impedance measurement in mortar and concrete elements: A systematic review. *Appl. Sci.* 2020; 10: 9152.
- [10]Liu S, Wang L, Gao Y, et al. Comparing study on hydration properties of various cementitious systems. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2014; 118: 1483 - 1492.
- [11]Chen W, Brouwers HJH. The hydration of slag, part 2: Reaction models for blended cement. *J. Mater. Sci.* 2006; 42: 444 - 464.