

文章编号:1671-8879(2017)03-0047-06

氯氧镁水泥流变特性研究

徐安花^{1,2}, 关博文¹, 马 慧¹, 夏 雨¹, 吴佳育¹, 陈华鑫¹

(1. 长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 青海省交通科学研究院, 青海 西宁 810001)

摘 要:针对氯氧镁水泥早强快硬特性导致其制备的混凝土存在长距离运输时不易搅拌、难泵送等施工受限问题。通过旋转黏度试验测定了氯氧镁水泥浆体在不同剪切速率下的剪切应力及塑性黏度值,采用幂律(Power-law)流体模型拟合氯氧镁水泥流变曲线,并通过该模型分析氯氧镁水泥材料组成设计参数 MgO 、 MgCl_2 、 H_2O 的物质的量比对氯氧镁水泥浆体的剪切应力、塑性黏度及流变特性的影响。研究结果表明:Power-law 模型适用于氯氧镁水泥浆体流变曲线拟合,其拟合判定系数均大于 0.9,拟合度高,并且可以对稠度系数、流变指数等流变参数进行较好的描述;氯氧镁水泥浆体的剪切应力随剪切速率的增大而增大,而塑性黏度随剪切速率的增大先迅速降低后趋于平稳;剪切速率相同时,氯氧镁水泥浆体的剪切应力随 MgO 与 MgCl_2 物质的量比增大而增大,随 H_2O 与 MgCl_2 物质的量比增大而减小;随着水泥水化的进行,浆体剪切应力和塑性黏度均增大,当 MgO 、 MgCl_2 与 H_2O 的物质的量比为 7 : 1 : 15 时浆体最稳定。

关键词:道路工程;氯氧镁水泥;流变学;剪切应力;塑性黏度;Power-law 模型

中图分类号:U414.18;TQ172;TB 321

文献标志码:A

Research on rheological properties of magnesium oxychloride cement

XU An-hua^{1,2}, GUAN Bo-wen¹, MA Hui¹, XIA Yu¹, WU Jia-yu¹, CHEN Hua-xin¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. Qinghai Transportation Research Institute, Xining 810001, Qinghai, China)

Abstract: The early hard and fast characteristics of magnesium oxychloride cement lead to the construction problems of the concrete with long-distance transportation, is difficult to stir and difficult to pump and so on, which limits the popularization and application of magnesium oxychloride cement material. The shear stress and plastic viscosity of magnesium oxychloride cement paste at different shear rates were measured by the rotational viscosity test. The Power-law model was used to fit the rheological curves of magnesium oxychloride cement, and the influence of the design parameters on the rheological properties of magnesium oxychloride cement were analyzed by the model. The results show that the Power-law model can be used to fit the rheological curves of magnesium cement slurry, and the rheological parameters such as consistency coefficient and rheological index can be described. The shear stress of magnesium oxychloride cement paste increases with the increase of shear rate. The plastic viscosity decreases

收稿日期:2016-11-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51308062);青海省重大科技专项项目(2014-GX-A2A);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(310831163501,310831172201)

作者简介:徐安花(1976-),女,青海西宁市,青海省交通科学研究院研究员,长安大学工学博士研究生,E-mail:1185982085@qq.com。

通讯作者:陈华鑫(1976-),男,安徽太湖人,教授,博士研究生导师,E-mail:chx@gl.chd.edu.cn。

rapidly and then tends to be stable. When the shear rate is the same, the shear stress increases with the increase of the amount-of-substance ratio of MgO to MgCl₂, and decreases with the increase of the amount-of-substance ratio of H₂O and MgCl₂. With the hydration of cement, the shear stress and plastic viscosity increase. When the amount-of-substance ratio of MgO, MgCl₂ and H₂O is 7 : 1 : 15, the paste is the most stable. 7 tabs, 5 figs, 16 refs.

Key words: road engineering; magnesium oxychloride cement; rheology; shear stress; plastic viscosity; Power-law model

0 引言

氯氧镁水泥是具有活性的轻烧氧化镁(MgO)与氯化镁(MgCl₂)、水(H₂O)三元体系按合理比例配制而成的一种新型胶凝材料^[1-2]。采用氯氧镁水泥制备的混凝土不需潮湿养护,具有低温凝结快、黏结强度高、耐磨性好和耐盐腐蚀等优点,适用于中国西部干旱少雨地区^[3]。氯氧镁水泥 MgO-MgCl₂-H₂O 三元体系中水化后主要产物相 5·1·8 结构会向 3·1·8 结构转化,导致其耐久性变差等,影响其工作性能;在氯氧镁水泥组成材料性能稳定不变的情况下,对其工作性能造成直接影响的是三者之间的添加比例。良好的工作性是获得优质镁水泥混凝土的重要保证^[4-7],超高层建筑、公路桥梁等大型工程对新拌混凝土工作性要求很高^[8-9],而新拌混凝土工作性与水泥浆体流变特性关系密切。已有研究表明,流变学方法评价水泥基材料的流动性比传统的流动度、坍落度等方法更优越^[10-12]。针对普通硅酸盐混凝土流动度的流变学方法评价方面,国内外学者做了一系列研究。王子明用 Bingham 模型拟合了“水泥-水-高效减水剂”体系的流变曲线,在此基础上研究了高效减水剂种类对新拌水泥浆体流变特性的影响^[13];王超等通过低速搅拌混凝土时扭矩和转速的关系得出水泥混凝土的流变特性,认为其符合 Bingham 流体特性^[14];邓德华等用 H-B 模型研究了超塑化剂和石灰石粉对水泥浆体剪切增稠行为的影响^[15];谢友均等的研究表明,水泥浆体存在一个临界剪切速率,低于该剪切速率时浆体表现出剪切变稀现象,高于该剪切速率时浆体表现出剪切变稠现象^[16]。综上,以往的研究仅局限于以硅酸盐水泥为研究对象,而针对气硬性的氯氧镁胶凝材料的流变性研究却鲜有报道。氯氧镁水泥早强快硬特性导致其制备的混凝土在长距离运输时存在不易搅拌、难泵送等施工问题,限制了氯氧镁水泥材料的推广应用。

鉴于此,本文通过旋转黏度试验测定氯氧镁水

泥浆体在不同剪切速率下浆体的剪切应力及塑性黏度,选用合理的模型对氯氧镁水泥的流变特性进行描述,基于该模型优化了氯氧镁水泥的材料组成,研究成果可为今后氯氧镁水泥混凝土道路工程材料设计与施工提供参考。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

(1)轻烧氧化镁:产自辽宁海城海汇镁业有限公司,氧化镁含量(质量分数,下同)大于 80%,活性氧化镁含量为 58%,主要化学成分如表 1 所示。

表 1 轻烧氧化镁的化学成分

| Tab. 1 Chemical compositions of light burned magnesium oxide % | | | | | | | | | |
|--|-------|------------------|--------------------------------|------|------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------|
| 成分 | MgO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | CaO | K ₂ O | Na ₂ O | Fe ₂ O ₃ | P ₂ O ₅ | TiO ₂ |
| 质量分数 | 80.21 | 6.87 | 2.01 | 1.58 | 0.22 | 0.15 | 1.32 | 0.21 | 0.02 |

(2)氯化镁:青海格尔木产,为工业氯化镁(六水合物),氯化镁含量大于 45%,主要化学成分如表 2 所示。

表 2 氯化镁的化学成分

| Tab. 2 Chemical compositions of magnesium chloride % | | | | | |
|--|-------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------|-----|
| 成份 | MgCl ₂ | SO ₄ ²⁻ | K ⁺ 、Na ⁺ | CaCl ₂ | 其他 |
| 质量分数 | 45.0 | 0.2 | 0.7 | 0.2 | 0.9 |

1.2 试验方法

室温下,轻烧氧化镁、氯化镁和水按不同物质的量比称料。*a*、*b*、*c* 分别为 MgO、MgCl₂、H₂O 的物质的量,首先控制 *c* : *b* = 15 : 1, *a* : *b* 分别为 6 : 1、7 : 1、8 : 1;再控制 *a* : *b* = 7 : 1, *c* : *b* 分别为 15 : 1、16 : 1、17 : 1、18 : 1、19 : 1,分别按上述配比称料配制氯氧镁水泥浆体。将氯化镁溶于水形成一定浓度的 MgCl₂ 溶液,加入称量过的轻烧氧化镁粉,然后在水泥净浆搅拌锅中搅拌 2 min,搅拌均匀制得氯氧镁水泥浆体,最后采用 NDJ-1F 型布氏旋转黏度计测定氯氧镁水泥浆体在不同剪切速率下的剪切应力及塑性黏度。Power-law 流体属于典型的非牛顿流体,流体的剪切应力与剪切速率呈非线性关系。

氯氧镁水泥浆体属于非牛顿流体,其流变曲线用 Power-law 流体模型进行拟合,同时根据流体的剪切应力与剪切速率呈非线性关系,其也可分为剪切稀化流体($n<1$)和剪切稠化流体($n>1$),其公式为

$$\tau=K\gamma^n \tag{1}$$

式中: τ 为剪切应力; K 为稠度系数; γ 为剪切速率; n 为流动特性指数, $n=1$ 为牛顿流体, $n<1$ 为假塑性流体, $n>1$ 为胀塑性流体。

2 结果与讨论

2.1 流变曲线

氯氧镁水泥浆体剪切应力与剪切速率的变化曲线如图 1 所示。由图 1 可见:剪切速率由 5 s^{-1} 增至 50 s^{-1} 时,剪切应力随之不断增加;而当剪切速率由 50 s^{-1} 降低至 5 s^{-1} 时,剪切应力随之减小。随着剪切速率的提高,浆体的塑性黏度增大,剪切应力随之增大,浆体呈现出明显的剪切稀化特征(剪切稀化又称假塑性,是指流体的黏度随剪应变率的增加而减小);随着剪切速率逐渐减小,浆体的塑性黏性逐渐减小,剪切应力也随之减小。

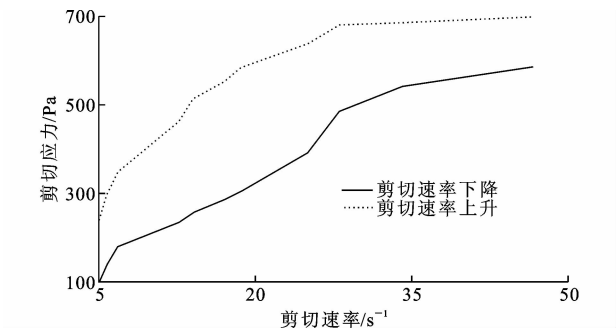


图 1 氯氧镁水泥剪切应力与剪切速率变化曲线
Fig. 1 Change curves of shear stresses with shear rates of chlorine oxychloride cement

用 Power-law 模型拟合图 1 所示的流变曲线,结果如表 3 所示。

表 3 Power-law 模型拟合氯氧镁水泥浆体流变曲线拟合参数
Tab. 3 Fitting parameters of rheological curves of magnesium chloride cement slurry using Power-law model

| 参数 | 剪切上升段 | 剪切下降段 |
|-------|--------|---------|
| K | 40.092 | 166.882 |
| n | 0.716 | 0.402 |
| R^2 | 0.966 | 0.916 |

由表 3 可知:用 Power-law 模型分别拟合氯氧镁水泥上升和下降阶段的流变曲线所得判定系数 R^2 分别为 0.966 和 0.916,因此,用 Power-law 模型拟合氯氧镁水泥流变曲线的精度较高。

2.2 材料组成对氯氧镁水泥流变性能的影响

2.2.1 MgO 与 MgCl_2 的物质的量比

控制 H_2O 与 MgCl_2 的物质的量比为 15 : 1, MgO 与 MgCl_2 的物质的量比为 6 : 1~8 : 1,配制氯氧镁水泥净浆。 MgO 与 MgCl_2 物质的量比对初始水化流变曲线的影响如图 2 所示。

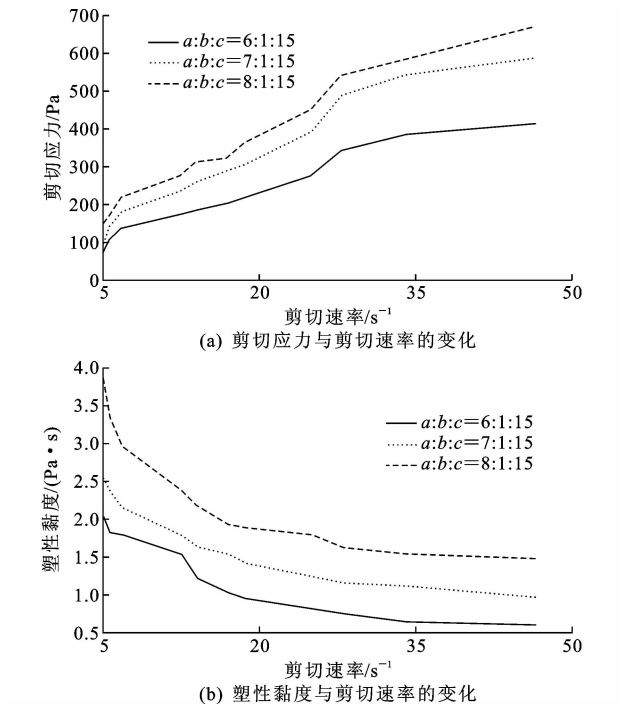


图 2 MgO 和 MgCl_2 物质的量比对初始水化流变曲线的影响
Fig. 2 Effect of amount-of-substance ratio of MgO to MgCl_2 on initial hydration rheological curves

由图 2 可知:随着剪切速率的增大,氯氧镁水泥浆体剪切应力均呈增加的趋势,塑性黏度均先迅速降低最后趋于平稳;相同剪切速率条件下,氯氧镁水泥浆体的剪切应力随 MgO 与 MgCl_2 物质的量比增大而增大, MgO 相对含量越高,浆体塑性黏度越大。初始水化流变曲线得到的 Power-law 模型的拟合参数数值如表 4 所示。

表 4 不同 MgO 与 MgCl_2 物质的量比对应的初始水化流变曲线拟合参数
Tab. 4 Fitting parameters of initial hydration rheological curves corresponding to different amount-of-substance ratios of MgO to MgCl_2

| 物质的量比 | K | n | R^2 |
|------------|--------|-------|-------|
| 6 : 1 : 15 | 26.930 | 0.741 | 0.975 |
| 7 : 1 : 15 | 40.092 | 0.716 | 0.966 |
| 8 : 1 : 15 | 57.214 | 0.643 | 0.972 |

由表 4 可知,用 Power-law 模型拟合氯氧镁水泥浆体的判定系数 R^2 均大于 0.96,进一步验证了 Power-law 模型适用于氯氧镁水泥浆体流变特性拟合。当 MgO 与 MgCl_2 物质的量比从 6 : 1 : 15 增大

到 8 : 1 : 15 时,对应的 K 值从 26.93 增大到 57.21, MgO 与 MgCl_2 物质的量比增大,浆体黏度增大。氯氧镁水泥浆体流动特性指数 n 随 MgO 与 MgCl_2 物质的量比增大而减小,但都小于 1,表明在试验范围内改变 MgO 与 MgCl_2 物质的量比,氯氧镁水泥浆体均表现出剪切变稀现象;当 $n < 1$ 时, n 值越接近 1,浆体剪切变稀程度越低,随着 MgO 与 MgCl_2 物质的量比增大,其拟合曲线 n 值依次减小,说明随着 MgO 含量的增加,浆体剪切变稀程度越严重。

当水化 60 min 后,几组浆体在同剪切速率下的剪切应力值及塑性黏度值均较初始水化时有明显增加,表明随着水化的进行,粒子间相互碰撞,使其相互作用力增大,只有增大剪切应力才能使浆体发生流动。浆体水化 60 min 后的浆体流变曲线如图 3 所示。

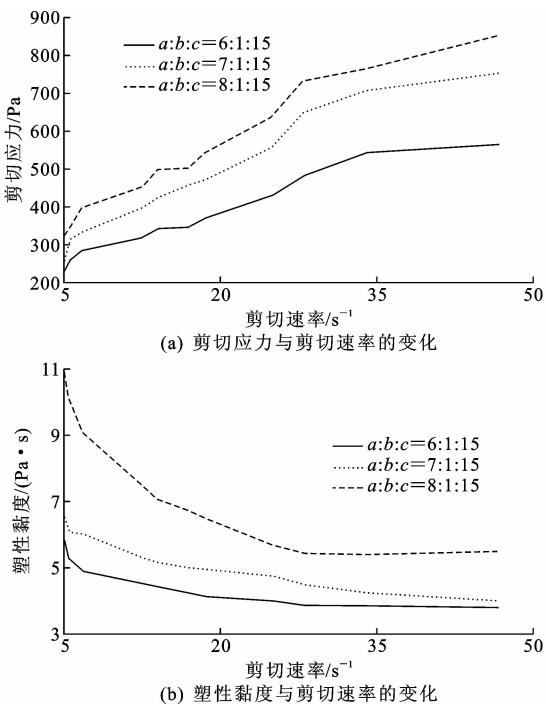


图 3 MgO 与 MgCl_2 物质的量比对水化 60 min 后流变曲线的影响
Fig. 3 Effect of amount-of-substance ratio of MgO to MgCl_2 on rheological curve of hydration after 60 min

由图 3 可知:水化 60 min 后水泥浆体仍呈剪切变稀状态,但在剪切速率增大到 35 s^{-1} 后,物质的量比为 8 : 1 : 15 的浆体流变曲线表现出略微的上升趋势,即类似剪切增稠状态(剪切增稠流体是指在冲击载荷的作用下发生由液相向固相的转变)。相同冲击荷载下,剪切增稠流体比非剪切增稠流体应变率降低,动态应力提高;冲击速度越大和约束力越大,越有利于向剪切增稠转变且增稠转变所需的时间越短。通过图 3 与图 2 对比发现,相同剪切速率下,水化 60 min 后浆体剪切应力和塑性黏度均较初始水化时

增大。随着水化的进行,当达最大剪切速率时,3 组浆体的剪切应力、塑性黏度均较初始水化时增大。物质的量比为 8 : 1 : 15 的浆体随水化进行黏度增幅最大,7 : 1 : 15 的浆体增幅最小,可见在试验范围内 7 : 1 : 15 浆体最为稳定。用 Power-law 模型拟合后各参数值如表 5 所示。

表 5 不同 MgO 和 MgCl_2 物质的量比对应的水化 60 min 后流变曲线拟合参数

| Tab. 5 Fitting parameters of theological curve after 60 min corresponding to different amount-of-substance ratios of MgO to MgCl_2 | | | |
|--|---------|-------|----------|
| 物质的量比 | K | n | R^2 |
| 6 : 1 : 15 | 116.945 | 0.413 | 0.955 31 |
| 7 : 1 : 15 | 124.922 | 0.474 | 0.967 84 |
| 8 : 1 : 15 | 153.406 | 0.448 | 0.973 54 |

通过表 4 与表 5 结果对比发现,水化 60 min 后 3 种浆体的稠度系数均有较大提升,增长幅度由大到小排序为 8 : 1 : 15、6 : 1 : 15、7 : 1 : 15,印证了上文由黏度变化图得出的结论,当 MgO 、 MgCl_2 、 H_2O 物质的量比为 7 : 1 : 15 时浆体最稳定。

2.2.2 H_2O 与 MgCl_2 的物质的量比

控制 MgO 与 MgCl_2 的物质的量比为 7(恒定不变), H_2O 与 MgCl_2 物质的量比为 15 : 1 ~ 19 : 1,分别按照以上物质的量比配制氯氧镁水泥净浆; H_2O 与 MgCl_2 物质的量比对初始水化流变曲线的影响如图 4 所示。

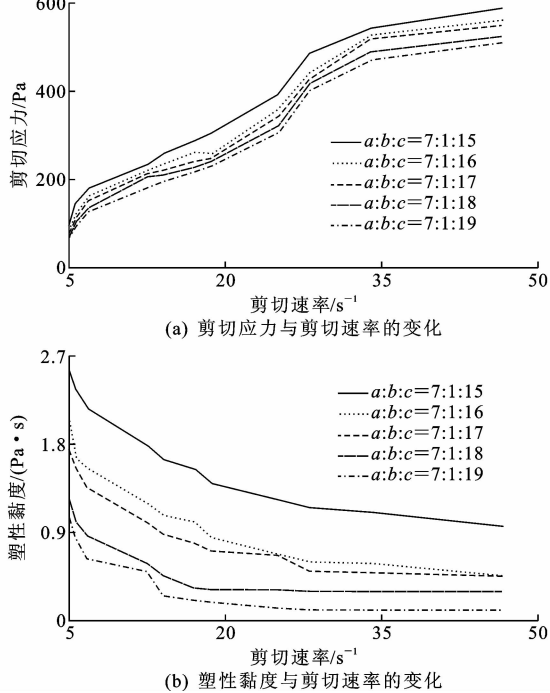


图 4 H_2O 与 MgCl_2 物质的量比对初始水化流变曲线的影响
Fig. 4 Effect of amount-of-substance ratios of H_2O to MgCl_2 on initial hydration rheological curves

由图 4 可知,随着 H_2O 与 MgCl_2 物质的量比增大,氯氧镁水泥浆体流变曲线趋势相近。氯氧镁水泥浆体剪切应力随剪切速率的增大而增大,塑性黏度随剪切速率的增大先迅速降低最后接近平稳;相同剪切速率条件下,氯氧镁水泥浆体的剪切应力随 H_2O 与 MgCl_2 物质的量比的增大而减小,黏度也随 H_2O 相对含量的增大而降低;Power-law 模型拟合参数值如表 6 所示。

表 6 不同 H_2O 与 MgCl_2 物质的量比对应的初始水化流变曲线拟合参数

| Tab. 6 Fitting parameters of initial hydration rheological curves corresponding to different amount-of-substance ratios of H_2O to MgCl_2 | | | |
|--|--------|-------|----------|
| 物质的量比 | K | n | R^2 |
| 7 : 1 : 15 | 40.092 | 0.716 | 0.965 77 |
| 7 : 1 : 16 | 32.172 | 0.761 | 0.960 90 |
| 7 : 1 : 17 | 28.095 | 0.791 | 0.958 21 |
| 7 : 1 : 18 | 25.666 | 0.804 | 0.958 43 |
| 7 : 1 : 19 | 22.068 | 0.836 | 0.961 70 |

表 6 结果表明:随着 H_2O 与 MgCl_2 物质的量比从 15 : 1 增大到 19 : 1,对应的拟合参数 K 值从 40.092 降低到 22.068,即水的相对含量增大,浆体黏度降低。其原因是随着 H_2O 与 MgCl_2 物质的量比增大,用于氯氧镁水泥水化的自由水量增多,故其黏度减小。5 组浆体的流动特性指数 n 均小于 1,表现出剪切变稀特征。在 MgO 、 MgCl_2 、 H_2O 物质的量比从 7 : 1 : 15 变至 7 : 1 : 19 过程中,浆体的流动特性指数 n 依次增大,表明随着 H_2O 与 MgCl_2 物质的量比增大,浆体剪切变稀的程度减小。

当水化进行到 60 min 后, H_2O 与 MgCl_2 物质的量比对流变曲的影响如图 5 所示。

由图 5 可知:不同 H_2O 与 MgCl_2 物质的量比下,氯氧镁水泥水化 60 min 后浆体仍呈剪切变稀状态。对比图 4 与图 5 发现:相同剪切速率下经过 60 min 后的水化,浆体剪切应力和塑性黏度均较初始水化时增大了许多;最大剪切速率下,5 组浆体水化 60 min 后的剪切应力、塑性黏度均较初始水化时增大。在剪切速率增大到一定程度时,物质的量比为 7 : 1 : 18 与 7 : 1 : 19 的 2 组浆体的剪切应力-剪切速率曲线和塑性黏度-剪切速率曲线几乎重合,表明氯氧镁水泥浆体波美度增大到一定程度以后,再增加水的相对含量对流变曲线影响较小。Power-law 模型拟合参数值如表 7 所示。

由表 7 可知:水化 60 min 后,随着 H_2O 与 MgCl_2 物质的量比从 15 : 1 增大到 19 : 1,拟合参数 K 值从 124.9 降低到 66.16,黏度依次减小;拟合

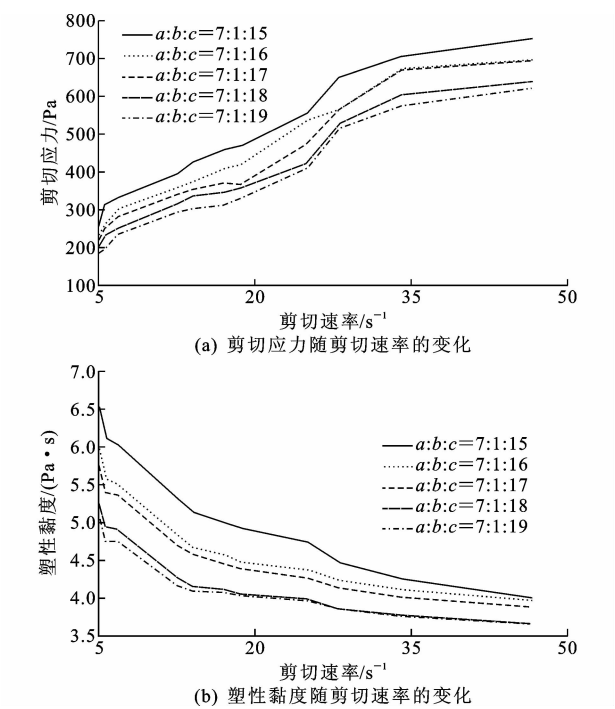


图 5 H_2O 与 MgCl_2 物质的量比对水化 60 min 后流变曲线的影响
Fig. 5 Effect of amount-of-substance ratio of H_2O to MgCl_2 on rheological curves of hydration after 60 min

表 7 不同 H_2O 与 MgCl_2 物质的量的水化 60 min 后流变曲线拟合参数

| Tab. 7 Fitting parameters of rheological curves after 60 min corresponding to different amount-of-substance ratios of H_2O to MgCl_2 | | | |
|---|---------|-------|-------|
| 物质的量比 | K | n | R^2 |
| 7 : 1 : 15 | 124.912 | 0.474 | 0.965 |
| 7 : 1 : 16 | 103.525 | 0.506 | 0.966 |
| 7 : 1 : 17 | 88.434 | 0.551 | 0.937 |
| 7 : 1 : 18 | 81.524 | 0.543 | 0.963 |
| 7 : 1 : 19 | 69.167 | 0.588 | 0.955 |

参数 n 值依次增大,但均小于 1,仍为剪切变稀状态。 n 依次增大,表明随着 H_2O 与 MgCl_2 物质的量比的增大,浆体剪切变稀的程度减小。对比表 6 与表 7 发现:水化 60 min 后浆体的稠度系数较初始水化时有较大提升,其原因是氯氧镁水泥水化 60 min 后,体系内自由水大幅度降低,且伴随有水化物的凝结硬化,故随着水化时间的增长,氯氧镁水泥浆体黏度增大;但是 5 组浆体中物质的量比为 7 : 1 : 15 的浆体 K 值增长率最小,认为物质的量比为 7 : 1 : 15 时氯氧镁水泥浆体稳定度最高。

3 结 语

(1)采用 Power-law 模型拟合氯氧镁水泥浆体流变曲线得到的判定系数 R^2 较高,故此模型可以作为氯氧镁水泥流变特性研究模型。

(2)随着剪切速率的增大,氯氧镁水泥浆体剪切应力均增大,塑性黏度均先降低后趋于平稳;相同剪切速率条件下,氯氧镁水泥浆体的剪切应力、塑性黏度均随 MgO 和 MgCl_2 物质的量比增大而增大。随着水化的进行,浆体剪切应力和塑性黏度均增大,但 MgO 和 MgCl_2 物质的量比为 7:1 时浆体最为稳定。

(3)相同剪切速率条件下,氯氧镁水泥浆体的剪切应力、塑性黏度均随 H_2O 和 MgCl_2 物质的量比增大而减小。随着水化时间的增长,氯氧镁水泥浆体黏度增大,当 H_2O 和 MgCl_2 物质的量比为 15:1 时其黏度增长率最小,稳定度最高。

(4)在氯氧镁水泥的实际应用中通常会掺入防水剂等外加剂以改善其耐久性,因此,下一步将在本文研究的基础上进一步考虑防水剂等对氯氧镁水泥流动度的影响。

参考文献:

References:

- [1] QIAO H X, LIU Y, ZHOU M R, et al. Influence of MgCl_2 solution concentration on strength of magnesium oxychloride cement concrete[J]. *Advanced Materials Research*, 2012(450/451):791-795.
- [2] LI Z, CHAU C K. Influence of molar ratios on properties of magnesium oxychloride cement[J]. *Cement & Concrete Research*, 2007, 37(6):866-870.
- [3] 马 慧, 关博文, 王永维, 等. 氯氧镁水泥胶凝材料的研究进展[J]. *材料导报*, 2015, 29(15):103-107.
MA Hui, GUAN Bo-wen, WANG Yong-wei, et al. Research progress of magnesium oxychloride cement gelled material[J]. *Materials Review*, 2015, 29(15):103-107.
- [4] MISRA A K, MATHUR R. Magnesium oxychloride cement concrete[J]. *Bulletin of Materials Science*, 2007, 30(3):239-246.
- [5] XU B, MA H, HU C, et al. Influence of curing regimes on mechanical properties of magnesium oxychloride cement-based composites[J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 102:613-619.
- [6] 乔宏霞, 刘 尧, 周茗如, 等. 改性氯氧镁水泥砂石混凝土强度的试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2012, 61(3):2222-2236.
QIAO Hong-xia, LIU Yao, ZHOU Ming-ru, et al. Experimental investigation on strength development of modified magnesium oxychloride cement concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2012, 61(3):2222-2236.
- [7] 罗时勇. 混凝土工作性控制技术及评估方法研究

[D]. 南京:东南大学, 2015.

LUO Shi-yong. The assessment of concrete workability and key control techniques[J]. Nanjing: South-east University, 2015.

- [8] DEMBOVSKA L, BAJARE D, PUNDIENE I, et al. Effect of pozzolanic additives on the strength development of high performance concrete[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 172:202-210.
- [9] PAPO A, PIANI L. Effect of various superplasticizers on the rheological properties of Portland cement pastes[J]. *Cement & Concrete Research*, 2004, 34(11):2097-2101.
- [10] WALLEVIK O H, WALLEVIK J E. Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes[J]. *Cement & Concrete Research*, 2011, 41(12):1279-1288.
- [11] MELO J P, AGUILAR A S, OLIVARES F H. Rheological properties of aerated cement pastes with fly ash, metakaolin and sepiolite additions[J]. *Construction & Building Materials*, 2014, 65(13):566-573.
- [12] VANCE K, KUMAR A, SANT G, et al. The rheological properties of ternary binders containing portland cement, limestone, and metakaolin or fly ash[J]. *Cement & Concrete Research*, 2013, 52(10):196-207.
- [13] 王子明. “水泥-水-高效减水剂”系统的界面化学现象与流变性能[D]. 北京:北京工业大学, 2006.
WANG Zi-ming. Interfacial chemical phenomena and rheological properties of “cement-water-superplasticizer” system[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006.
- [14] 王 超, 田 波, 孙 涛, 等. 建立新拌水泥混凝土流变模型的试验方法[J]. *公路*, 2014(1):210-214.
WANG Chao, TIAN Bo, SUN Tao, et al. Test method for establishment of new cement concrete rheological model[J]. *Highway*, 2014(1):210-214.
- [15] 邓德华, 朱 蓉, 彭建伟, 等. 超塑化剂和石灰石粉对水泥浆剪切增稠行为的影响[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(5):744-751.
DENG De-hua, ZHU Rong, PENG Jian-wei, et al. Effect of superplasticizers and limestone powders on shear thickening behavior of cement paste[J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(5):744-751.
- [16] 谢友均, 陈小波, 马昆林, 等. 粉煤灰对水泥浆体的剪切变稀和剪切增稠作用[J]. *硅酸盐学报*, 2015, 43(8):1040-1046.
XIE You-jun, CHENG Xiao-bo, MA Kun-lin, et al. Effects of fly ash on shearing thinning and thickening of cement paste[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 43(8):1040-1046.