

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2021.03.046

碱矿渣胶凝材料的开裂性能研究

陈逸群^{1,2}

(1. 上海建工建材科技集团股份有限公司, 上海市 200086; 2. 上海高大结构高性能混凝土工程技术研究中心, 上海市 201114)

摘要: 碱矿渣胶凝材料是具有高强、高耐久性的胶凝材料,但其收缩大,易开裂,是阻碍其广泛应用的主要原因。通过圆环法研究了 MgO 膨胀剂、聚丙烯纤维和减缩剂单掺或复掺对碱矿渣胶凝材料开裂性能的影响。研究表明:单掺 MgO 膨胀剂对碱胶凝体系抗裂不利,减缩剂和聚丙烯纤维的掺入能够有效延缓裂缝的形成,减小开裂面积。

关键词: 碱矿渣胶凝材料; 圆环开裂; 减缩剂; 纤维; MgO 膨胀剂

中图分类号: TU528.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)03-0151-04

0 引言

水泥行业是我国国民经济建设的重要基础材料产业,同时也是主要的能源资源消耗和污染物排放行业之一。水泥行业能源消耗总量约占全国能源消耗总量的5%,颗粒物排放量约占工业排放总量的30%左右。此外大量工业废产品的丢弃或利用不足也是一个严重的问题。我国每年矿渣产量约为8000万t~1亿t,粉煤灰产量达2.0亿t。而碱矿渣胶凝材料是以工业废渣(矿渣和粉煤灰等)为原料,无需高温煅烧,工艺过程简单,无污染,应用于建筑,既有利于环保和节能,又能改善混凝土的性能。与通用硅酸盐水泥相比,碱矿渣胶凝材料具有特殊优良的性能,如强度高,耐腐蚀、抗渗性、抗冻性、耐火性均优于通用硅酸盐水泥,是一种资源节约型和环境友好型的“绿色”材料^[1-3]。但碱矿渣胶凝材料存在一个“通病”,其早期自生收缩过大,容易造成砂浆或混凝土开裂,这已成为制约这一类胶凝材料作为结构材料被广泛应用的“瓶颈”^[4-5]。开裂是工程中普遍存在的一种现象,其中限制状态下的干燥收缩是导致混凝土早期开裂的主要因素。本文利用矿渣粉在试验研究的基础上,外加水玻璃作为激发剂,掺加轻烧氧化镁膨胀剂、聚丙烯纤维和减缩剂等,应用圆环法对比研究其对碱矿渣胶凝材料开裂性能的影响。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

本试验中矿粉系由南京梅山钢铁厂矿渣粉磨而

得,比表面积4550 cm²/g,化学成分见表1。水玻璃选用模数为3.19,固含量35.07%,其组成及基本物性参数见表2,使用时加水稀释后再加NaOH(分析纯AR)调制成模数为1.35的稀水玻璃。试验所用MgO膨胀剂由菱苦土在800℃煅烧并保温1h,然后冷却至室温所得。试验所用的减缩剂为江苏特制新材料有限公司所生产的SRA减缩剂。聚丙烯纤维密度为0.91 kg/m³,抗拉强度不小于400 MPa,当量直径28 μm,长度12 mm。

表1 矿粉的化学组成

单位:%

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	烧矢量
矿渣粉	31.39	9.80	1.89	37.90	13.09	0.21	-	-	-

表2 水玻璃化学成分基本物性参数

SiO ₂ /%	Na ₂ O/%	模数 n	固含量/%
26.48	8.59	3.19	35.07

1.2 试验方法

本试验通过圆环法研究碱矿渣胶凝材料的抗裂性能,试验中成型了四个圆环试样,配比见表3。成型过程中掺纤维的

表3 碱矿渣胶凝材料圆环开裂试验配比

单位:g

编号	矿粉	氧化镁	减缩剂	纤维	砂	水玻璃	水
F1	416.6	33.4			1 350	167.0	83.1
F2	450		6.75		1 350	180.3	82.1
F3	450			1.35	1 350	180.3	73.1
F4	416.6	33.4	6.2	1.25	1 350	167.0	95.4

收稿日期: 2020-08-06

作者简介: 陈逸群(1985—),男,博士,工程师,从事高性能混凝土与绿色建材研究工作。

干料事先充分干拌,使得纤维能分散均匀。养护1 d脱模后,在试件的上表面涂上硅胶进行密封以防止水分散失,这样裂缝就只能出现在圆环的外表面上。在测试过程中,随时观测圆环并记录其初始开裂时间。砂浆的初始开裂时间直接反应了砂浆硬化过程中抵抗早期干缩开裂的能力以及聚丙烯纤维、减缩剂的掺入对于早起裂缝的限制作用。圆环的裂缝宽度用度数显微镜读取。

2 实验结果与讨论

2.1 圆环开裂试验结果

裂缝形态、数量、分布情况及长度测量用数码照相、图像分析与读数显微镜测量相结合的方法。传统方法为单独用读数显微镜测量裂缝宽度,用直尺测量裂缝长度,由于裂缝各部位宽度是不相同的,用读数显微镜仅能测定个别点的宽度,对弯曲裂缝的长度的测量更是存在较大误差。本试验中结合了数码照相、图像分析和读数显微镜测量的两种方法的优点,使得测定结果更为准确。裂缝形态、数量、分布情况及长度测量用数码照相、图像分析与读数显微镜测量相结合的方法。照相时在裂缝旁边放置一直尺或某一已知尺寸的物品作为长度的参照物。

用Image-Pro plus 图像分析软件对图像进行分析。将数码照相输入计算机后,先用“Measure”菜单中的“Calibration”条目下“Spatial Calibration Wizard”功能标定图像尺寸,见图1(以F2为例),中标定直尺上划定的间距为30mm。然后选择“Measure”菜单中的“Measure Distance”功能,根据裂缝弯曲情况,逐点测量裂缝(用鼠标点击测量点)长度,测量值自动显示在图像上。将测得的各段长度相加,即得弯曲裂缝的实际长度。

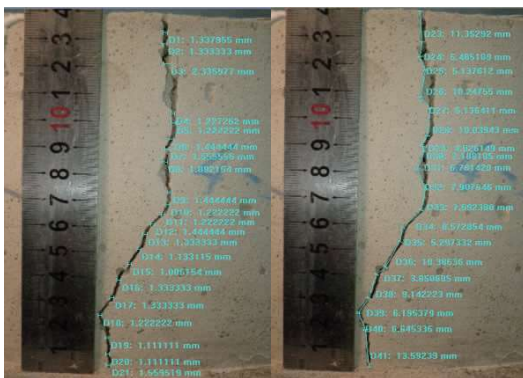


图1 试样F2的主裂缝宽度和长度(单位:mm)

对四组不同配比的圆环开裂试样,从脱模后记录其初始开裂的时间,收集最终(7 d)裂缝条数、主

裂缝平均宽度、主裂缝长度以及裂缝总面积,结果见表4。试件的总开裂面积是按照各裂缝的平均宽度乘以裂缝长度,结果累加计算的,计算中忽略了微裂纹。主裂缝的宽度发展见图2。

表4 圆环试样裂缝参数统计

试件编号	初始开裂时间/d	裂缝条数	主裂缝平均宽度/mm	主裂缝长度/mm	裂缝总面积/mm ²
F1	2	1	4.96	142.32	705.9
F2	4	6	1.34	149.67	410.8
F3	2.5	2	1.95	145.15	566.4
F4	3	2	3.22	146.50	470.1

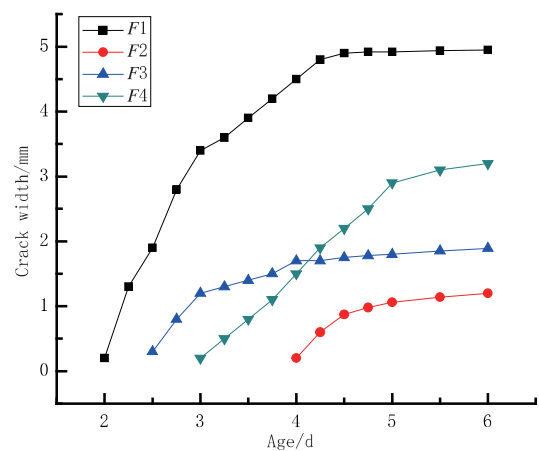


图2 各组试件主裂缝宽度随龄期发展趋势(单位:mm)

对比四组试验,F1为单掺氧化镁的最先开裂,为一条裂缝且裂缝扩展最快,裂缝宽度最大,最终宽度将近5 mm。其次开裂的是F3单掺纤维的,有两条对称的裂缝,其主裂缝宽度为1.95 mm。之后开裂的为F4复掺氧化镁、纤维和减缩剂的,同样有两条近似对称的裂缝,而且次裂缝较主裂缝形成迟,为贯穿的细小裂缝,宽度约为0.3 mm。最后开裂的是F2单掺减缩剂的,有6条裂缝且裂缝扩展最慢,其中有两贯穿的裂缝,另外均为长短不一的非贯穿裂缝,主裂缝长度为149.67 mm,宽度为1.34 mm,其余次裂缝的长度和宽度发展很慢,有的裂缝最终长度仅为4 mm,宽度为0.05 mm,6条裂缝在圆环外表面近似均匀分布。

从上述描述我们可以看出:减缩剂的掺入在一定程度上降低了开裂面积和最大裂宽,对于早期的开裂具有显著的抑制作用;纤维的掺入也能在一定程度上起到较好的阻裂效果;而在水分快速蒸发的条件下,膨胀剂的单独掺入使得开裂面积和最大裂宽均有所增加,不仅没有抑制作用,对于抵抗早期的塑性开裂反具有明显的不利影响。从总的开裂面积

来看, $F_1 > F_3 > F_4 > F_2$, 由此可知抗裂效果优劣次序为: 减缩剂 > 减缩剂 + 纤维 + 膨胀剂 > 纤维 > 膨胀剂。

2.2 砂浆多缝开裂的形成机理

在自由干燥的条件下, 由于水分的蒸发和限制收缩导致砂浆内部收缩应力增大, 弹性变形能富集, 圆环内储存的弹性应变能可以表示为:

$$U = \int_0^{\delta_0} F d\delta \quad (1)$$

式中: F 为试件内部的收缩应力, N ; δ 为收缩应力所作用的位移, m ; δ_0 为在裂缝出现的瞬间 F 作用的累积位移, 且 $\delta_0 = \varepsilon_0 c$, ε_0 为开裂前时间储存的应变, c 是圆环的周长。

材料本身具有抵抗裂纹扩展的能力, 只有一方面试件内部所积累的能量逐渐积累到一定程度超过了产生裂缝所形成的表面能, 另一方面试件内部由于收缩所产生的收缩应力超过了材料的抗拉强度, 这个时候才能导致裂缝的产生。

当基体上产生了第一条裂缝后, 试件内部的能量得到释放。在裂缝增大到一定程度时会导致该裂缝附近的砂浆与圆环脱离, 即这部分砂浆不受圆环的约束了; 反之若裂缝的发展受到限制而不能达到一定宽度时, 裂缝附近砂浆仍然受到圆环的约束力, 这部分应力传递到基体, 当应力积聚到一定程度超过了另一薄弱点开裂所需要的能量就会出现新的裂缝。由于应力的聚集需要一个过程, 所以次裂缝的产生都是在试件初裂后慢慢形成的。先出现的裂缝消耗了大部分的弹性应变能, 从而使出现的次裂缝具有的弹性应变能相对较小, 因此除主裂缝外, 其他的裂缝长度和宽度发展都会相对减慢。

同济大学姚武^[9]在关于圆环干缩开裂的模型中给出了一个是否产生新裂缝的判据: 只有当裂缝形成所释放的能量与形成裂纹面积所需要的能量差额随着裂纹增长而越来越小, 在这种情况下, 由于试件所储存的应变能在裂缝扩展过程中释放速率慢, 也就是说裂纹的发展所需要的能量不足以消耗试件中所储存的弹性应变能, 试样中的残余应变能逐渐积累满足了产生新裂缝所需能量, 也就导致了多缝开裂。

2.3 膨胀剂、纤维、减缩剂在圆环试验中的分析

此次试验中我们所采用的胶凝材料为矿粉, 由于矿粉本身所具有收缩大的特点, 因此试验中的开裂较水泥砂浆的略快, 也比通常情况下水泥砂浆开

裂宽度略大。我们试验的目的就是为了通过掺加膨胀剂、纤维、减缩剂以及复掺, 试图改善矿粉砂浆的开裂性能, 使其尽量减小到水泥砂浆的水平。

由上述试验我们可知, 单掺氧化镁膨胀剂的情况下开裂最厉害(见图2), 这可能是与试件成型后没有很好的养护有关。本试验中我们是拆模后即放入相对干燥环境下进行圆环抗裂试验, 所掺的氧化镁没有在标准养护室内充分养护的情况下充分水化, 因而也未能取到膨胀作用而补偿收缩。可见没有提供必要的养护环境, 是造成掺膨胀剂的试件反而达不到减缩抗裂目的的决定因素。如果能够适当延长标准养护时间, 掺膨胀剂的砂浆的初裂时间会有所延长, 抵抗干缩开裂的能力明显增强, 这表明在养护充分的条件下, 膨胀剂提供的膨胀源在基体内部的膨胀产生了一定的预压应力, 部分地抵消了收缩应力因而使基体的抗裂能力大大增强^[7]。

聚丙烯纤维对砂浆和混凝土的限裂作用主要在于其能阻滞塑性收缩裂缝的产生和限制裂缝的发展。在塑性阶段, 由于胶凝材料的水化和水分的蒸发和转移产生塑性收缩, 其内部的抗拉应变能低于塑性收缩产生的应变, 因而引起内部塑性裂缝的产生。单掺聚丙烯纤维的较掺膨胀剂的有较好的阻裂效果, 我们可以从两方面来解释。一方面, 纤维掺入后, 提高了材料的极限拉伸强度, 这样圆环要开裂的话就必须是能量积累到更大的程度, 这样就能推迟初始裂缝的形成时间; 另一方面, 纤维的掺入如同在砂浆中掺入了纤维筋, 这样裂缝尖端的扩展就会受到纤维筋的约束和阻挡, 迫使裂缝只能绕过纤维或者将纤维拉断或者拔出才能继续发展, 这样势必需要更高的能量, 从而纤维就起到较好的阻裂效果。由图3可以看出纤维的分布比较均匀, 印证了试验中搅拌工艺的可行性。纤维断裂时有的是拔出, 有的则为拉断破坏。

试验中单掺减缩剂的裂缝出现最迟而且开裂面积也最小, 表明其对抵抗干缩开裂有着较好的作用。同样也可以从两个方面加以解释。一方面, 减缩剂主要依靠降低孔隙溶液的表面张力来抑制收缩, 表面张力的降低意味着毛细管负压的下降, 也即引起收缩应力的下降, 导致了开裂的延迟。由于其减缩过程并不依赖于水源, 因此对于干燥环境下的收缩具有更好的抑制作用。另外一方面, 由于减缩剂的掺入, 使得胶凝材料的水化变慢, 前期由于水化而产生的收缩减少, 而且减缩剂能延缓内部的湿度变化, 具有

较强的保湿能力,可以认为由此产生的干缩也会变小,综合二者可知减缩剂的掺入减少了由收缩引起的收缩应力,弹性应变能聚集缓慢,从而也延长了开裂时间^[8]。而多裂缝的产生主要是由于前期抗拉强度的降低,砂浆整体强度不高,收缩应力的积累容易导致多处开裂。

对于复掺膨胀剂、减缩剂和纤维的试件 F4,其抗裂效果在单掺减缩剂与单掺纤维之间,一主裂缝和一很小的次裂缝,见图 3。我们可以认为是三者的共同影响,膨胀剂对其不利的影响和减缩剂、纤维的有利作用共同作用。



图 3 F4 膨胀剂、减缩剂和纤维复掺开裂效果图

3 结 论

通过圆环开裂试验,并结合 Image-Pro plus 图

像分析软件研究了碱矿渣胶凝材料的开裂问题。从开裂时间来看,单掺氧化镁膨胀剂的最先开裂,其后依次为单掺纤维,膨胀剂、纤维和减缩剂三者复掺,单掺减缩剂。从裂缝面积大小来看,单掺氧化镁膨胀剂的开裂面积最大,其后开裂面积依次减小为单掺纤维,减缩剂、纤维和氧化镁膨胀剂三者复掺,单掺减缩剂。从以上两方面综合来考虑,抗裂效果优劣次序为:减缩剂 > 减缩剂 + 纤维 + 膨胀剂 > 纤维 > 膨胀剂。

参考文献:

[1] 史才军.碱-激发水泥和混凝土[M].北京:化学工业出版社,2008.
 [2] 陈逸群,方永浩,贾丽丽.碱矿渣胶凝材料硬化浆体及其与骨料界面结构[J].河海大学学报(自然科学版),2010,38(1):72-75.
 [3] 顾亚敏,方永浩.碱矿渣水泥的收缩与开裂特性及其减缩与增韧[J].硅酸盐学报,2012(1):82-90.
 [4] 贾丽丽,方永浩,陈逸群.碱矿渣胶凝材料的减缩防裂研究[J].材料导报,2008,22(11):153-156.
 [5] 孙小巍,吴陶俊.碱激发矿渣胶凝材料的试验研究[J].硅酸盐通报,2014,33(11):3036-3040.
 [6] 姚武,封志辉.聚丙烯纤维砂浆圆环干缩开裂判据的理论分析模型[C]//中国建筑学会上海硅酸盐学会.商品砂浆的研究与应用,2005.
 [7] 史美生.膨胀混凝土裂缝问题讨论[J].混凝土,2001(5):22-25.
 [8] Palacios M, Puertas F. Effect of shrinkage-reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(5):691-702.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com