

钢纤维和聚合物乳液对混凝土力学性能及 微观结构特征影响研究

郭广磊¹,孙世强¹,李颖¹,郑艺伟²,梅迎军^{2*}

(1.中交路桥南方工程有限公司,北京市 101121;2.重庆交通大学 交通土建工程材料国家
地方联合工程实验室,重庆市 400074)

摘要:通过掺入钢纤维和聚合物乳液改善混凝土的微观结构及力学性能,测试得到钢纤维混凝土、聚合物乳液改性混凝土和钢纤维聚合物混凝土工作性能及3 d、28 d、90 d力学性能。利用氮吸附试验、压汞试验及密度法测试得到混凝土的总孔隙体积、体积中值孔径、闭口孔隙率等微观孔结构特征参数,分析钢纤维和聚合物乳液对混凝土微观结构特征及力学性能的影响规律。研究表明:在混凝土中复掺钢纤维和聚合物乳液后,抗压强度变化不大,但3 d、7 d及90 d抗折强度分别提高了24.1%~69.5%、34.3%~70.5%、3.4%~43.7%,压折比从6.37~8.34变化到3.99~5.93;混凝土总孔隙体积、总比表面积、平均孔径及体积中值孔径下降,闭口孔隙率增加;钢纤维掺量宜为0.6%~0.9%,乳液最佳掺量为6%~9%。钢纤维和聚合物乳液有效改善了混凝土的韧性和微观结构特征,且复掺作用效果明显优于单掺。

关键词:钢纤维;聚合物乳液;混凝土;力学性能;微观结构;闭口孔隙率

中图分类号:U414

文献标志码:A

0 引言

由于温缩、干缩和化学收缩等原因,普通混凝土易形成微裂缝,在混凝土内部存在结构缺陷,导致混凝土脆性大,抗裂性能差。在荷载作用下,当混凝土产生疲劳开裂后,有害离子与水易侵入混凝土裂缝中,在环境温度和湿度的耦合作用下,混凝土出现剥落,增加了结构的安全风险。为了解决普通混凝土先天性缺陷,降低混凝土内部微裂纹的产生,掺入纤维是最有效的途径之一^[1],掺入的纤维主要有钢纤维、聚丙烯纤维等。掺入钢纤维可有效增强混凝土抗裂性^[2-3],改善普通混凝土抗压、抗折等力学性能^[4-5]和耐久性^[6],表现出较好的抗剪性能^[7]、抗冲击性^[8]、弯曲疲劳性及抗裂韧性^[9]。

钢纤维与硬化水泥浆体之间存在界面层,是钢纤维混凝土中最薄弱的环节^[10]。如何改善钢纤维与水泥石之间的界面微观结构特征,增强界面黏结性

能,是发挥钢纤维增强作用的关键^[11-13]。聚合物具有良好黏附效应和成膜效应^[14],可有效改善钢纤维与水泥石界面黏结特征,进而改善混凝土微观结构特征与力学性能。

为此,本文采取在混凝土中掺入钢纤维和聚合物乳液,研究钢纤维和聚合物对混凝土工作性能、力学性能及微观孔结构特征的影响,分析钢纤维和聚合物乳液对混凝土微观结构特征及力学性能的影响规律。

1 原材料及材料配合比组成

1.1 原材料技术性能

水泥选用P.O 42.5R普通硅酸盐水泥,砂采用细度模数为2.83的黄砂,碎石采用5~20 mm连续级配碎石。钢纤维由某纤维制造公司生产,抗拉强度大于980 MPa,混凝土试样中钢纤维采用长度30 mm、直径0.51 mm的端钩型钢纤维。丁苯乳液:上海

收稿日期:2022-09-26(修改稿)

基金项目:重庆市科技局科技项目(编号:cstc2019jcsx-msxmX00140);中交路桥南方工程有限公司科技项目(编号:科技-2020-342)

作者简介:郭广磊,男,大学本科,高级工程师.E-mail:578250450@qq.com

*通信作者:梅迎军,男,博士,教授.E-mail:mycq_2000@163.com

BASF 公司羧基丁苯乳液,密度 1.01 g/cm^3 ,平均粒径 150 nm ,玻璃化温度 13°C ,含固量 $50\%\sim 52\%$,pH 为 $7.8\sim 10$, 25°C 黏度 $35\sim 150 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,表面张力 $30\sim 48 \text{ mN/m}$ 。

1.2 试验配合比

混凝土基准配合比为:水泥:砂:碎石:水=441:873:946:190,水灰比 $W/C=0.43$,钢纤维掺量为 $0\sim 1.2\%$,聚合物乳液掺量为 $0\sim 18\%$,钢纤维为混凝土体积掺量,聚合物乳液为水泥质量掺量。

2 试验方法

2.1 新拌混凝土工作性能评价

混凝土工作性能评价参考《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020)。

2.2 抗压、抗折强度试验方法

用于测试抗折强度的钢纤维混凝土试块的尺寸为 $100 \text{ mm}\times 100 \text{ mm}\times 400 \text{ mm}$,每个龄期每组试样 3 个。采用混凝土抗折试件断块测试抗压强度,上压板采用 $100 \text{ mm}\times 100 \text{ mm}$ 钢板,厚度大于或等于 40 mm 导向轴,上下压板两侧对准在一个垂直面上,下压板长度应能使两侧板与试件间保留 10 mm 的空隙,压板厚度、硬度与上压板相同。

2.3 微观结构表征方法

(1) 压汞试验孔径分布法

采用汞压入(MIP)试验测试水泥混凝土的微孔结构,具体方法参考文献[15]。

(2) 氮吸附法

采用氮吸附试验测试混凝土微观孔结构特征参数,具体方法参考文献[16]。

(3) 密度法

测试混凝土的表观密度、真密度及等温等湿条件下不同时间混凝土试样吸水率,通过试验测试获得的混凝土表观密度、真密度,计算混凝土总孔隙率、开口孔隙率和闭口孔隙率。

3 结果与分析

3.1 钢纤维和聚合物乳液对混凝土工作性能影响

钢纤维掺量为 $0\sim 1.2\%$ 、聚合物乳液掺量为 $0\sim 12\%$ 的新拌混凝土坍落度测试结果如图 1 所示。

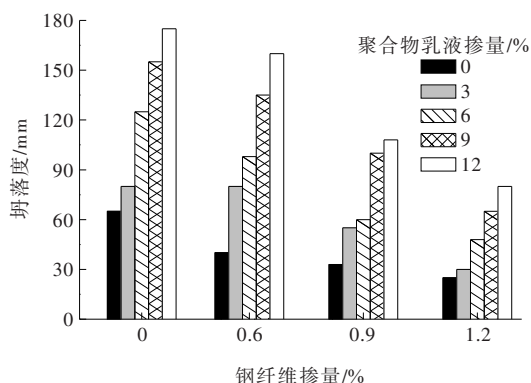


图 1 混凝土坍落度测试结果

3.1.1 钢纤维对混凝土工作性能影响

普通水泥混凝土的坍落度为 65 mm ,掺入钢纤维后,新拌混凝土的坍落度从 65 mm 下降到 25 mm 。当钢纤维掺量小于 0.9% 时,试验中捣棍还能在混合料中插动,而当钢纤维掺量为 1.2% 时,捣棍在混凝土拌和物中基本已插不动。表明钢纤维降低了混凝土流动性能,特别是掺量大时混凝土流动性降低尤为明显。钢纤维对混凝土工作性能的影响机理为:钢纤维成乱向分布于混合料中,对混合料各组分起到支撑、架空作用,造成拌和物内部摩擦力增大,从而使其流动度减小、和易性变差;同时由于钢纤维掺量增大后,纤维表面积增大,占用了大量的水,导致混凝土流动性变差。

3.1.2 聚合物乳液对混凝土工作性能影响

随着聚合物乳液掺入,新拌混凝土坍落度从 65 mm 增加到 175 mm ,混凝土流动性得到了极大改善。聚合物乳液改善混凝土工作性能机理为:聚合物乳液中的颗粒在混凝土中起到了“滚珠轴承”作用以及聚合物乳液中的表面活性作用,显著降低了浆体的极限屈服应力和塑性黏度,从而改善了新拌混凝土的流动性。聚合物乳液不仅能提高混凝土的流动度,也能减少混凝土的泌水和离析现象,这主要是由于乳液本身的亲水胶体特性以及乳液的减水性引起的。

3.1.3 钢纤维和聚合物乳液复掺对混凝土工作性能影响

对于钢纤维混凝土,随着聚合物乳液的掺入,混凝土坍落度得到一定的提高,但钢纤维掺量越多,聚合物乳液掺入后对改善混凝土工作性能作用效果变得不明显。

3.2 钢纤维和聚合物乳液对混凝土力学性能影响

7 d、28 d及90 d普通混凝土、钢纤维混凝土、聚合物乳液改性水泥混凝土及钢纤维聚合物水泥混凝土抗压、抗折强度、压折比测试结果见图2。

3.2.1 钢纤维对混凝土抗压抗折强度影响

由图2可知:

(1) 与普通混凝土相比,7 d、28 d及90 d龄期钢纤维混凝土抗压强度分别增加了8.9%~17.8%、10.5%~20.9%、4.6%~28.5%,且钢纤维掺量越大抗压强度越大。

(2) 与普通混凝土相比,7 d、28 d及90 d龄期钢纤维混凝土抗折强度分别增加了36.1%~69.3%、54.8%~65.9%、14.5%~15.6%,抗折强度随着纤维掺量增加先大幅度增加,当钢纤维掺量超过0.9%

后,混凝土抗折强度略有下降。可能是由于钢纤维掺量较大,难以均匀分散,在混凝土内部存在部分钢纤维相互叠加、未被水泥浆体完全包裹的现象。

(3) 根据不同龄期混凝土抗压抗折强度,结合施工和易性和经济性,建议钢纤维的掺量宜为0.6%~0.9%。

3.2.2 聚合物乳液对混凝土抗压抗折强度影响

由图2可知:

(1) 与普通混凝土相比,7 d、28 d及90 d龄期聚合物乳液改性混凝土抗压强度分别下降了14.8%~32.7%、25.3%~35.4%、19.2%~32.8%,且乳液掺量越大,抗压强度下降幅度越大。

(2) 与普通混凝土相比,聚合物乳液改性混凝土抗折强度随着乳液掺量增加而增加,当聚合物掺量

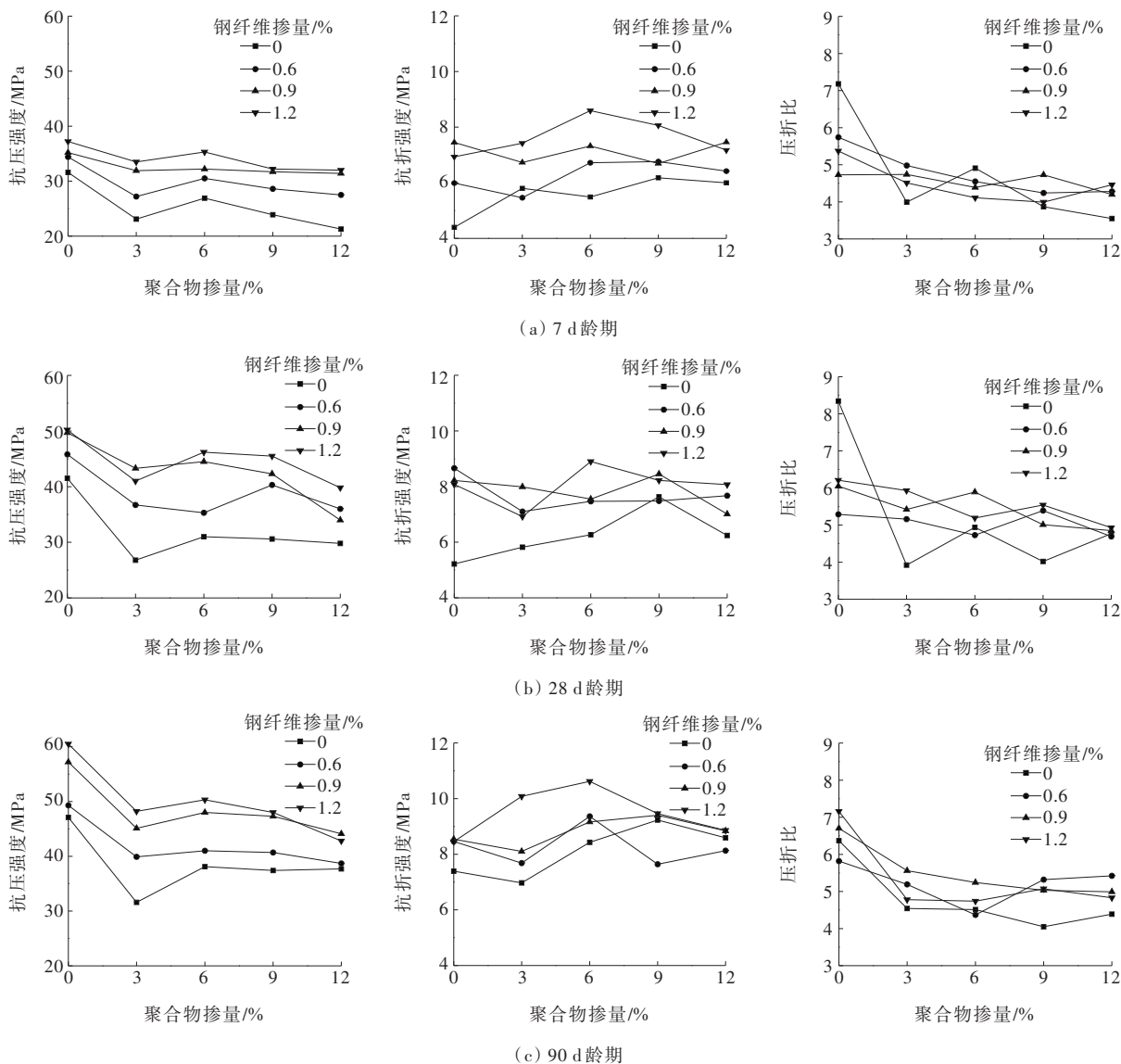


图2 不同龄期钢纤维聚合物改性水泥混凝土力学性能

为 9% 时抗折强度最大, 7 d、28 d 及 90 d 聚合物改性混凝土抗折强度较同龄期普通混凝土分别增大了 40.5%、46.2% 和 24.9%, 随着聚合物乳液掺量继续增加, 抗折强度略有下降。表明聚合物乳液最佳掺量为 9%。

3.2.3 钢纤维和聚合物乳液复掺对混凝土抗压抗折强度影响

根据测试结果, 钢纤维聚合物水泥混凝土 28 d、90 d 抗压抗折强度与钢纤维及聚合物乳液掺量的关系, 分别为:

28 d 抗压强度:

$$\sigma_{28} = 16.707V_f - 3.562V_f^2 - 1.428L + 0.073L^2 - 0.176V_f \cdot L + 35.695 \quad R^2 = 0.854$$

90 d 抗压强度:

$$\sigma_{90} = 9.91V_f + 3.31V_f^2 - 1.859L + 0.123L^2 - 0.585V_f \cdot L + 42.661 \quad R^2 = 0.891$$

28 d 抗折强度:

$$f_{28} = 3.838V_f - 1.4001V_f^2 + 0.142L - 0.004L^2 - 0.109V_f \cdot L + 5.578 \quad R^2 = 0.781$$

90 d 抗折强度:

$$f_{90} = -0.433V_f + 1.871V_f^2 + 0.369L - 0.022L^2 - 0.102V_f \cdot L + 7.090 \quad R^2 = 0.760$$

式中: σ_{28} 、 σ_{90} 分别为混凝土 28 d、90 d 抗压强度; f_{28} 、 f_{90} 分别为混凝土 28 d、90 d 抗折强度; V_f 为钢纤维掺量(%), 适用范围 0~1.2%; L 为聚合物乳液掺量(%), 适用范围 0~12%。

根据试验测试与理论分析结果, 钢纤维和聚合物乳液复掺对混凝土力学性能的影响规律如下:

(1) 与钢纤维混凝土相比, 复掺聚合物乳液后, 不同龄期混凝土的抗压强度先降低 20% 左右; 随着聚合物乳液掺量增加, 抗压强度又略有增加; 当聚合物乳液掺量超过 9% 后, 混凝土抗压强度又略有降低。

(2) 与钢纤维混凝土相比, 复掺聚合物后, 不同龄期钢纤维混凝土抗折强度先减小后增大, 当聚合物乳液掺量为 6%~9% 时, 钢纤维聚合物水泥混凝土抗折强度超过钢纤维混凝土抗折强度, 达最大值; 随着聚合物乳液掺量增加, 混凝土抗折强度有较小幅度降低。表明在钢纤维混凝土中复掺聚合物乳液可提高混凝土的抗折强度, 聚合物乳液最佳掺量为 6%~9%。

(3) 7 d、28 d 及 90 d 龄期时, 普通混凝土压折比分别为 7.18、8.34、6.37, 复掺钢纤维和聚合物乳液后, 压折比分别为 3.99~4.98、4.73~5.93、4.83~5.56。压折比是表示混凝土柔性的重要指标, 压折比越小, 混凝土韧性越好^[17], 钢纤维和聚合物乳液复掺可降低混凝土压折比, 有效提高混凝土的变形能力, 改善混凝土的韧性。

3.3 钢纤维和聚合物对混凝土微观结构特征影响

氮气吸附试验测试结果如表 1 所示, 压汞试验和密度法试验测试及计算结果如表 2 所示。

表 1 混凝土氮吸附试验孔结构特征参数

试样 编号	总孔隙体 积/(10 ⁻³ cm ³ ·g ⁻¹)	总比表 面积/ (m ² ·g ⁻¹)	试样 编号	总孔隙体 积/(10 ⁻³ cm ³ ·g ⁻¹)	总比表 面积/ (m ² ·g ⁻¹)
L0	34.90	41.11	S12	18.87	10.18
L6	39.27	44.85	S6L12	26.79	18.94
L12	27.85	17.25	S9L6	55.77	64.47
L18	14.03	7.29	S9L12	21.23	14.68
S6	34.13	37.84	S9L18	17.65	8.23
S9	29.54	25.51	S12L12	16.62	9.51

注: 试样编号中, S6 表示掺量为 0.6% 的钢纤维混凝土, L12 表示掺量为 12% 的聚合物乳液改性混凝土, S6L12 表示钢纤维掺量为 0.6%、聚合物乳液掺量为 12% 的钢纤维聚合物混凝土。下同。

3.3.1 钢纤维对混凝土微观结构的影响

根据试验测试结果(表 1、2), 在混凝土中掺入钢纤维后, 呈现如下规律:

(1) 混凝土总孔隙体积及总比表面积先是略有减小, 随着钢纤维掺量的增加, 总孔隙体积及总比表面积下降幅度增大, 当钢纤维掺量为 1.2% 时, 总孔隙体积及总比表面积分别减小了 45.9%、75.2%。

(2) 混凝土平均孔径及体积中值孔径分别下降了 9.2%~26.9%、6.7%~43.7%, 且钢纤维掺量越大, 下降幅度越大。

(3) 混凝土的表观密度、真密度及总孔隙率有一定幅度增加, 而开口孔隙率基本没有变化, 闭口孔隙率有一定幅度增加。

测试结果表明: 钢纤维对水泥混凝土的孔隙具有细化、封闭开口孔功能。主要原因是: 由于纤维对混凝土具有限缩、阻裂作用, 使混凝土在失水硬化过程中毛细孔的收缩变形受阻, 从而减小了混凝土特征

表2 混凝土孔结构特征参数

试样 编号	压汞试验			密度法				
	体积中值	表面积中值	平均孔	表观密度/	真密度/	总孔隙	开口孔	闭口孔
	孔径/nm	孔径/nm	径/nm	(g·cm ⁻³)	(g·cm ⁻³)	率/%	隙率/%	隙率/%
L0	76.4	8.7	26.0	2.261 1	2.533 0	10.73	10.38	0.35
L6	62.7	7.9	22.6	2.218 6	2.531 0	12.34	9.07	3.27
L12	64.6	8.2	23.5	2.185 4	2.500 0	12.58	6.74	5.85
L18	55.9	7.3	20.5	2.104 7	2.481 0	15.17	4.01	11.16
S6	71.3	8.1	23.6	2.298 4	2.584 0	11.05	10.25	0.81
S6L6	44.2	7.3	18.4	2.266 8	2.523 7	10.18	8.94	1.24
S6L12	47.2	7.4	18.9	2.205 2	2.493 0	11.54	6.91	4.63
S6L18	68.2	7.9	23.6	2.146 5	2.457 8	12.67	3.74	8.93
S9	52.6	7.8	20.5	2.307 1	2.609 0	11.57	10.23	1.34
S9L6	67.4	8.5	23.9	2.270 5	2.624 0	13.47	8.98	4.49
S9L12	86.3	8.8	28.5	2.203 4	2.579 0	14.56	5.65	8.91
S9L18	61.0	8.1	22.6	2.091 9	2.497 0	16.22	3.27	12.96
S12	43.0	7.9	19.0	2.336 1	2.660 0	12.18	10.31	1.86
S12L6	31.4	7.7	16.6	2.292 6	2.640 2	13.16	8.59	4.57
S12L12	48.8	7.6	19.6	2.263 7	2.621 0	13.63	6.85	6.79
S12L18	49.2	7.5	19.6	2.247 2	2.604 3	13.71	3.72	9.99

孔隙的尺寸。

3.3.2 聚合物乳液对混凝土微观结构的影响

根据试验测试结果(表1、2),在混凝土中掺入聚合物乳液后,呈现如下规律:

(1) 混凝土总孔隙体积及总比表面积先略有增加,随着聚合物乳液掺量增加,混凝土总孔隙体积及总比表面积减小,当聚合物乳液掺量为18%时,总孔隙体积及总比表面积分别减小了59.8%、82.3%。

(2) 混凝土平均孔径、体积中值孔径及表面积中值孔径均有下降,随着聚合物乳液的掺入,体积中值孔径下降幅度为17.9%~26.8%。

(3) 混凝土表观密度及真密度有小幅下降,总孔隙率增幅为15.0%~41.4%,开口孔隙率由普通混凝土的10.38%减小到4.01%~9.07%,而闭口孔隙率则由普通混凝土的0.35%增加到3.27%~11.16%。

聚合物乳液对混凝土微观结构特征影响的机理为:聚合物乳液改善了混凝土和易性,使混凝土在振捣作用下更易于密实,孔隙更小;同时,聚合物乳液失水成膜后,有助于封堵、堵塞混凝土中大孔及联通孔,聚合物乳液掺量越大,开口孔隙率越小,闭口孔隙率大幅度增加,改善了混凝土微观孔结构,有助于提高混凝土的抗折强度。

3.4 钢纤维聚合物混凝土微观结构特征与宏观力学性能

钢纤维聚合物水泥混凝土90 d抗压强度与平均孔径、90 d抗折强度与闭口孔隙占总孔隙百分比的关系(图3、4)为:

$$\sigma_{90}=0.029\,7\phi_{\text{ave}}^2-1.437\,2\phi_{\text{ave}}+25.614\quad R^2=0.454\,9$$
$$f_{90}=-0.001P^2+0.075\,1P+7.763\,8\quad R^2=0.241\,6$$

式中: ϕ_{ave} 为90 d龄期时混凝土平均孔径; P 为混凝土闭口孔隙占总孔隙百分比。

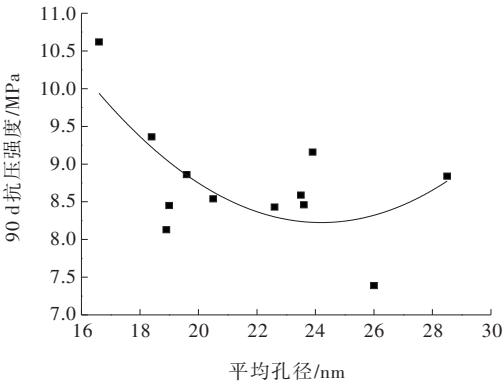


图3 钢纤维聚合物水泥混凝土90 d抗压强度与平均孔径关系

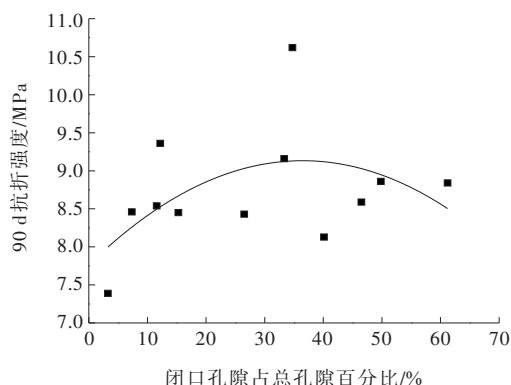


图 4 钢纤维聚合物混凝土 90 d 抗折强度与闭口孔隙占总孔隙百分比关系

由回归分析结果可知:对于聚合物乳液改性混凝土、钢纤维混凝土以及钢纤维聚合物水泥混凝土,随着混凝土平均孔径减小,混凝土 90 d 抗压强度先减小后增加;随着闭口孔隙占总孔隙比重增加,混凝土 90 d 抗折强度先增大后减小,当闭口孔隙率在总孔隙率中占比为 30%~40% 时,混凝土 90 d 抗折强度最大。表明混凝土抗折强度与微观孔结构存在内在的联系,混凝土特征孔隙尺寸越小、闭口孔隙在总孔隙中占比适中有助于提高混凝土抗折强度。

4 结论

(1) 钢纤维掺入大大降低了混凝土的流动性,在钢纤维混凝土中复掺聚合物乳液后,可提高混凝土的工作性能,钢纤维掺量越多,聚合物乳液复掺后对提高混凝土坍落度的作用效果变得不明显。

(2) 钢纤维提高了混凝土的抗压抗折强度,聚合物乳液降低了混凝土的抗压强度,但提高了混凝土的抗折强度。与普通混凝土相比,钢纤维和聚合物复掺时,混凝土抗压强度变化不大,但抗折强度显著提高。

(3) 钢纤维使混凝土总孔隙体积及总比表面积最大分别减小了 45.9%、75.2%,平均孔径及体积中值孔径最大分别减小了 26.9%、43.7%,聚合物乳液使混凝土总孔隙体积及总比表面积最大减小了 59.8%、82.3%,平均孔径及体积中值孔径最大分别减小了 21.2%、26.8%,而闭口孔隙率则由普通混凝土的 0.35% 增加到 11.16%。聚合物乳液封堵、填塞了混凝土中大孔及联通孔,开口孔隙率越小,闭口孔隙率则大幅度增加。

(4) 钢纤维和聚合物乳液复掺后,混凝土总孔隙

体积、总比表面积及体积中值孔径下降,闭口孔隙率在总孔隙中占比适中,有助于提高混凝土抗折强度。钢纤维聚合物混凝土中,钢纤维掺量宜为 0.6%~0.9%,聚合物乳液最佳掺量为 9%。

参考文献:

- [1] 姚晓超,方国强,张宁,等.钢纤维混凝土收缩时变特征研究[J].中外公路,2019,39(6):206-209.
- [2] 岳健广,夏月飞,方华.钢纤维混凝土断裂破坏机理及受拉损伤本构试验研究[J].土木工程学报,2021,54(2):93-106.
- [3] 徐文磊,宣卫红,陈育志,等.高性能水泥基复合材料断裂性能[J].建筑材料学报,2021,24(6):1139-1145.
- [4] 胡翱翔,梁兴文,于婧,等.超高性能混凝土轴心受拉力学性能试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(9):30-37.
- [5] 任大鹏,于吉鲲,方迪.钢纤维增韧高强混凝土的制备及性能研究[J].功能材料,2021,52(11):11132-11136.
- [6] 付建.不同纤维对高性能混凝土耐久性能及微观结构的影响[J].新型建筑材料,2020,47(4):34-38.
- [7] 赵秋红,董硕,朱涵.钢纤维-橡胶/混凝土抗剪性能试验[J].复合材料学报,2020,37(12):3201-3213.
- [8] 戎志丹,王亚利,孟亚奎.超高性能水泥基复合材料抗多次冲击性能[J].东南大学学报(自然科学版),2020,50(2):320-326.
- [9] 张志彪,郭蒙蒙,朱茹琳,等.钢纤维掺量对混凝土抗拉疲劳性能影响的试验研究[J].中外公路,2021,41(2):291-295.
- [10] 李瑶,邓永刚,徐长伟.掺纳米 SiO₂/粉煤灰/硅灰的钢纤维混凝土力学性能及界面的研究[J].混凝土,2020(5):60-63,68.
- [11] 史玉良,陈新明,焦华喆,等.纤维-聚合物混凝土性能研究现状及在巷道中的应用展望[J].混凝土与水泥制品,2020(2):51-54,70.
- [12] 常豹,陈伟.丁苯乳液对钢纤维混凝土韧性和微观结构的影响[J].硅酸盐通报,2015,34(7):1791-1797.
- [13] 李洋,刘纪伟,安小龙,等.钢纤维及丁苯乳液对混凝土韧性及耐磨性能的影响[J].混凝土,2015(12):71-74.
- [14] 华先乐,王鑫鹏,胡晓霞,等.聚合物水泥混凝土的研究和应用进展[J].青岛理工大学学报,2020,41(5):133-140.
- [15] 梅迎军,李志勇,王培铭,等.SBR 乳液对水泥砂浆长期收缩性能影响及机理分析[J].土木建筑与环境工程,2009,31(3):142-146.
- [16] 向超,梅迎军.硅灰对钢纤维混凝土力学性能及结构特征的影响[J].混凝土与水泥制品,2015(7):55-57.
- [17] 常晶,陈洪彬,高玲玲.基于弹塑性理论的水泥混凝土韧性研究[J].公路交通科技(应用技术版),2014,10(8):139-141.