

水泥基复合材料的孔结构与强度相关性研究

蒋林华¹ ,关宇刚² ,朱卫华³

(1. 河海大学土木工程学院 ,江苏 南京 210098 ; 2. 南京市建委 ,江苏 南京 210024 ;
3. 河海大学理学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 采用 X 射线小角散射技术和压汞法测定了水泥基复合材料的孔结构 ,结合孔结构模型试验和有限元计算分析 ,研究了水泥基复合材料的孔结构与强度的相关性 . 结果表明 ,孔隙率、孔分布、孔形状和孔界面分形维数与强度之间存在一定的相关性 ,孔结构对抗压强度的影响与对抗折强度的影响有所不同 .

关键词 水泥基复合材料 ,孔结构 ,强度

中图分类号 :TU525 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2003)06-0666-03

水泥基复合材料的孔结构与其宏观物理力学性能密切相关 . 孔结构的研究对掌握水泥基复合材料的本质具有重要的价值 ,并可为设计新一代水泥基复合材料提供理论依据 . 国内外已对水泥基复合材料结构与性能之间的关系作了大量研究^[1] . 研究结果表明 ,总孔隙率、孔分布和抗压强度之间存在较好的相关关系 . 但有关孔形状、孔界面分形维数对强度的影响以及孔结构对抗折强度的影响极少有研究报导 . 本文采用 X 射线小角散射技术和压汞法测定了水泥基复合材料的孔结构 ,结合孔结构模型试验和有限元计算分析 ,研究了水泥基复合材料的孔结构与强度的相关性 .

1 实 验

1.1 材料

水泥为葛洲坝工程局水泥厂生产的 525[#] 中热硅酸盐水泥 ,粉煤灰为重庆热电厂生产的粉煤灰 ,水泥和粉煤灰的主要化学成分及物理力学性能指标列于表 1 . 外加剂为 SA-1 高效减水剂 .

表 1 水泥和粉煤灰的物理性能和主要化学成分

Table 1 Physical properties and chemical components of the cement and fly ash

	密度	细度 / %	化学成分 / %								
	(g · cm ⁻³)	(45 μm 筛余)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	烧失量
水泥	3.16	8.5	21.07	4.68	6.15	62.81	1.88	1.08	0.19	0.53	1.55
粉煤灰	2.38	2.3	44.98	30.08	13.92	3.69	1.41	0.15	—	—	4.34

1.2 材料制备

制备水泥基复合材料时 ,粉煤灰掺量为 55 % 和 70 % ,水胶比为 0.26 ~ 0.38 . 成型时以等稠度为原则 ,试件尺寸为 4cm × 4 cm × 16 cm ,在 20 ± 1℃ 的水中养护 28 d 后进行强度和孔结构试验 .

1.3 孔结构模型制作

假定孔的形状为圆形和方形 ,孔结构模型试件的尺寸见图 1 . 试件成型后 24 h 拆模 ,在标准条件下养护 28 d 后进行抗压强度试验 .

1.4 测试与表征

用压力机直接测定抗压强度 . 采用美国 Quanta-Chrome 公司制造的 Outoscan-60 型测孔仪和日本理学 (Rigaku) 电机株式会社生产的 D/max-rb 型 X 射线小角散射仪测定孔结构 . X 射线小角散射仪配有理学

2203E5型四狭缝准直小角测角仪,测试时采用的入射狭缝为0.04 mm,接收狭缝为 0.1 mm,CuKα 辐射,功率为 50 kV × 100 mA.X 射线小角散射测定孔结构的理论和计算方法详见文献[2~4].

2 有限元计算

2.1 计算模型

对图 1(b)(d)(e)三种模型试件进行了有限元计算,计算时,根据对称性,相应地取每种模型的 1/4 进行计算.

2.2 计算程序及网格划分

采用美国结构研究及分析公司推出的有限元分析系统软件 COSMOS/M,采用平面四结点不协调单元,网格划分由计算机自动生成.3 种模型的单元数、结点数分别为 454 501 448 504 和 596 662.

计算时水泥基复合材料的取值为:抗压强度 $f_c = 45.0$ MPa,拉压比 $f_t/f_c = 0.16$,弹性模量 $E = 3.2 \times 10^4$ MPa,泊松比 $\mu = 0.22$.

3 结果与讨论

3.1 孔隙率与强度之间的关系

试验结果表明,水泥基复合材料的抗压、抗折强度均随总孔隙率的增加而降低.经回归分析,发现总孔隙率与抗压、抗折强度之间均存在较好的线性关系,关系式分别为

$$f_c = 127.04 - 2.93P \qquad f_f = 10.29 - 0.20P$$

式中: f_c 、 f_f ——抗压和抗折强度; P ——总孔隙率.

3.2 孔径分布对强度的影响

为分析孔径分布对强度的影响,对试验结果进行了多元回归分析.抗压强度

$$f_c = 93.53 - 0.05P_{<20} - 3.30P_{20\sim50} - 0.71P_{50\sim100} - 10.87P_{>100} \tag{1}$$

式中, $P_{<20}$ 、 $P_{20\sim50}$ 、 $P_{50\sim100}$ 和 $P_{>100}$ 分别表示孔径为小于 20 nm、20 ~ 50 nm、50 ~ 100 nm 和大于 100 nm 的孔在水泥基复合材料中所占的体积(%).式(1)表明:孔径不同的孔对抗压强度的影响是不同的,孔径小于 20 nm 的小孔对抗压强度的影响极小,而孔径大于 100 nm 的孔对抗压强度影响特别大.值得注意的是,孔径为 20 ~ 50 nm 的孔对抗压强度的影响比孔径为 50 ~ 100 nm 的孔的影响要大,似乎有悖于孔径越大,强度越低的常识.经扫描电镜观察发现,部分孔径为 20 ~ 50 nm 的孔是掺和料粉煤灰颗粒周围的界面裂缝.

孔径分布与抗折强度之间关系的回归方程为

$$f_f = 11.60 - 0.08P_{<20} - 0.36P_{20\sim50} - 0.21P_{50\sim100} - 0.45P_{>100} \tag{2}$$

式(2)表明,孔径分布对抗折强度的影响与对抗压强度的影响是不同的.不同孔径的孔对抗折强度均有影响.

3.3 孔界面分形维数与抗压强度之间的关系

由图 2 可见,抗压强度随分形维数的增加而降低.由于试验数据有限,没有作定量分析.

3.4 孔结构模型试验结果

表 2 为孔结构模型试验结果,在孔隙体积(孔隙率)相同的情况下,孔径越小,抗压强度越高;孔的形状对抗压强度亦有影响,圆孔模型的强度高于方孔模型的强度,孔隙率增大,抗压强度降低.

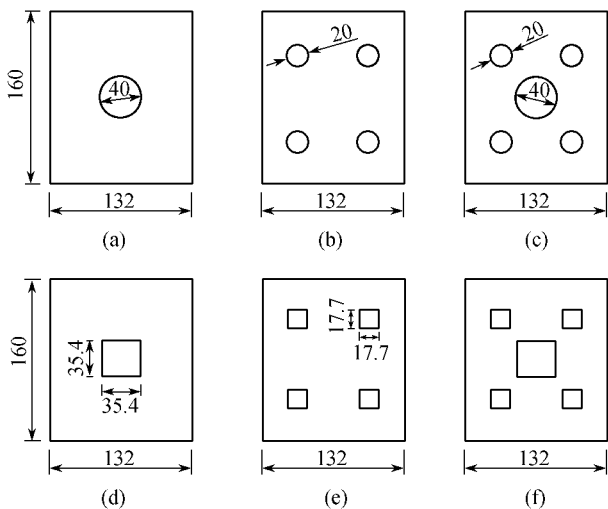


图 1 孔结构模型试件(厚度为 40,单位:mm)
Fig.1 Specimens for pore structure model test

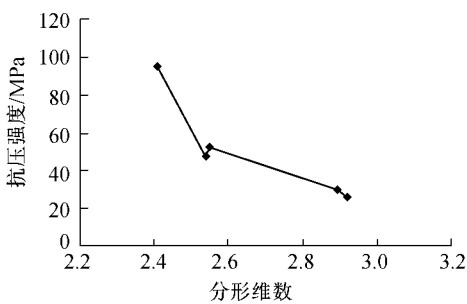


图 2 抗压强度与分形维数的关系
Fig.2 Compressive strength vs. fractal dimension

表 2 孔结构模型试验抗压强度试验结果

Table 2 Compressive strength of specimens from pore structure model tests

试件	图 1(a)	图 1(b)	图 1(c)	图 1(d)	图 1(e)	图 1(f)
抗压强度/MPa	19.4	20.5	11.6	16.4	17.7	10.9

3.5 有限元计算结果

有限元计算结果表明,孔隙细化后(比较图 1(d)(e)),最大主拉应力、最大主压应力和损伤因子均减小,应力分布的不均匀性有所缓和,材料内部的应力分布得到改善.三种模型(图 1(d)(b)(e))到破坏时(以损伤因子判别)的外加应力分别为 16.9 MPa、20.3 MPa 和 19.8 MPa,计算结果与试验结果较接近.因此,通过计算同样可以得到与试验结果相类似的规律.即在孔隙率相同时,孔径越小,抗压强度越高;孔隙形状对抗压强度有影响,圆孔模型的强度高于方孔模型的强度.

4 结 论

- a. 水泥基复合材料的抗压、抗折强度均随总孔隙率的增加而降低,强度和孔隙率之间存在较好的线性关系.
- b. 孔径分布和孔的形状对强度有影响.孔径越小,抗压强度越高;圆孔模型的强度高于方孔模型的强度.
- c. 孔径分布对抗折强度的影响与对抗压强度的影响有所不同.小于 20 nm 的孔对抗压强度的影响极微,大于 100 nm 的孔对抗压强度影响显著.对抗折强度,所有孔径的孔均会产生影响.
- d. 抗压强度与孔界面分形维数之间存在一定的关系,定量确切关系有待进一步研究.

参考文献:

[1] 蒋林华.高掺量粉煤灰混凝土的水化、微结构和机理研究[D].南京:河海大学,1998.

[2] 蒋林华,朱卫华,夏颂佑.粉煤灰水泥浆体的分形结构研究[J].河海大学学报(自然科学版),1999,27(1):43—46.

[3] 朱卫华,印友法,蒋林华,等.硅粉水泥石小角度 X 射线散射实验研究(Ⅰ)——微孔各向异性[J].建筑材料学报,2001,4(2):116—121.

[4] 朱卫华,蒋林华,印友法,等.硅粉水泥石小角度 X 射线散射实验研究(Ⅱ)——微孔界面过渡层厚度[J].建筑材料学报,2001,4(3):228—231.

Pore structure and its correlation with strength
of cement matrix composite material

JIANG Lin-hua¹, GUAN Yu-gang², ZHU Wei-hua³

- (1. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;
- 2. Nanjing Construction Committee, Nanjing 210024, China;
- 3. College of Sciences, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract The pore structure of cement matrix composite material is measured by use of the small angle X-ray scattering technique and the mercury intrusion method. In combination with pore structure model tests and FE calculation, a study is made on the correlation between the pore structure and strength of cement matrix composite material. The results show that certain relationships exist between the porosity, pore distribution, pore shape, pore surface fractal dimension, and strength of the material, and that the effect of pore structure on the compressive strength is different from that on the flexural strength.

Key words cement matrix composite material; pore structure; strength