

不同基材的钢纤维混凝土性能<sup>①</sup>

王 起 才

(兰州铁道学院土木工程系, 兰州 730070)

**摘 要** 基材的性质将影响钢纤维混凝土微观和宏观的性能。聚合物(VAE)能显著改善钢纤维界面层微观构造。陶粒对改善界面粘结性能也有益处。钢纤维界面层微观构造的改善和粘结强度的提高,为配制高强、高韧性钢纤维混凝土提供了一条途径。

**关键词** 钢纤维; 混凝土; 界面

**分类号** U214.18

金属纤维性能  
钢纤维混凝土

钢纤维混凝土良好的抗震、抗裂和断裂韧性早已被公认。但由钢纤维和混凝土基材经适当工艺复合而成的钢纤维混凝土,能否充分体现复合材料取长补短,协调工作的良好性质,主要取决于两相界面层的粘结特征。本文,主要研究基材性质对界面粘结特征和宏观力学性能的影响情况。

试验采用峨眉水泥厂生产的425普通硅酸盐水泥;杭州东岳厂生产的长径比为46,纤维长25 mm的E-1型钢纤维;石灰岩碎石;四川自贡产的粘土陶粒;四川维尼龙二厂生产的VAE(乙烯—醋酸乙烯共聚乳液)聚合物,配制成普通钢纤维混凝土、陶粒钢纤维混凝土和聚合物钢纤维混凝土。

## 1 钢纤维界面层微观测试

用扫描电镜和显微硬度计观察和测试钢纤维界面层微观构造及显微硬度情况。

图1电镜照片显示出,3种基材的钢纤维界面层有明显差异。普通钢纤维混凝土纤维界面处结构疏松,结晶颗粒粗,孔隙率大。陶粒钢纤维混凝土纤维界面层较致密, $C_3H_7OH$ 晶体颗粒较小,孔隙率较低。聚合物钢纤维混凝土纤维周围有聚合物膜覆盖并与水泥水化物构成交叉网状结构。

钢纤维界面层的显微硬度大小能全面反映各种因素综合影响情况。图2示出,界面过渡层厚大约75  $\mu m$ ,弱谷距钢纤维界面大约30  $\mu m$ 。钢纤维界面层显微硬度值最大的为聚合物钢纤维混凝土,且弱谷最浅;陶粒钢纤维混凝土次之;最差的为普通钢纤维混凝土。

从钢纤维界面微观结构测试得知,陶粒多孔结构的“微泵作用”和经煅烧后而具有较弱的火山灰效应对改善界面层结构有一定益处。聚合物掺入能显著改变界面微观构造,使界面过渡环趋于消失。

收稿日期:1995-05-10

①本文得到导师西南交通大学凤凌云教授的指导,在此表示衷心的感谢。



(a)普通 SFRC

(b)陶粒 SFRC

(c)聚合物 SFRC

图1 钢纤维界面 SEM 照片

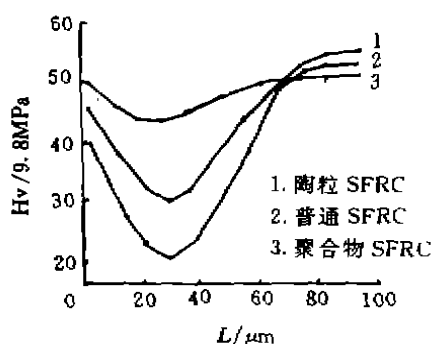


图2 纤维界面层显微硬度

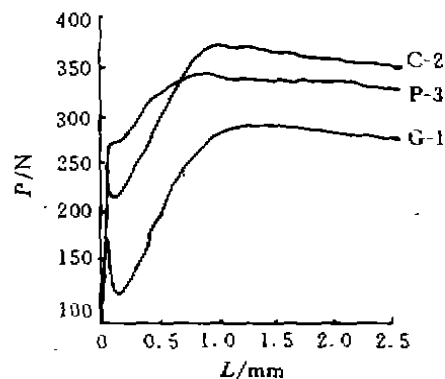


图3 钢纤维拔出荷载一位移曲线

## 2 界面粘结的力学行为

用钢纤维拔出试验分析基材性质对纤维界面粘结力学行为的影响. 试验结果见表1和图3.

纤维拔出荷载一位移曲线的形状,因砂浆基材不同有明显差异. 脱粘拔出荷载(或称静拔出荷载)小于最大拔出荷载(或称动拔出荷载). 拔出荷载一位移曲线形状及脱粘拔出荷载和最大拔出荷载的大小反映了钢纤维界面粘结的力学行为.

钢纤维拔出过程可用图4示意. 钢纤维受拉拔力作用时,沿纤维表面产生剪力,在垂直于钢纤维的基材截面上,距钢纤维表面愈近,剪应力愈大. 由于纤维周围基材并不是均质等强的,而在75  $\mu\text{m}$ 左右范围内存在一个界面过渡环,有弱谷存在. 虽然纤维表面处所受剪应力最大,

表 1 钢纤维拔出试验结果

类型	W/C	脱粘拔出荷载 $P_0$ (N)	最大拔出荷载 $P_{max}$ (N)	$P_{max}/P_0$	粘结强度 $\tau$ (MPa)	脱粘及拔出功 $A_{E,1}$ (N·m)
普通砂浆 G-1	0.47	201	286	1.423	3.763	0.584
陶粒砂浆 C-2	0.47	225	386	1.636	4.842	0.747
聚合物砂浆 P-3	0.30	268	330	1.231	4.342	0.740

注:  $d_f=0.52$  mm, 纤维埋深 10 mm, 聚灰比  $P/C=15\%$

但破坏面并不一定都在纤维表面,而是在其周围一定范围内,在最薄弱处破坏,并形成连续裂缝。此时即为纤维脱粘开始,所受荷载即为脱粘荷载。因破坏面不是平面而是有一定凹凸粗糙度的表面,在拉拔荷载作用下,钢纤维以及粘附在纤维周围的水泥基材一起产生滑动,粘附的水泥基材起到阻塞和楔紧作用,

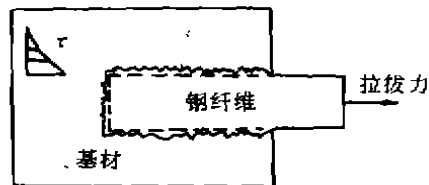


图 4 钢纤维拔出过程示意

导致拔出荷载进一步提高,达到最大拔出荷载(动拔出荷载)。当钢纤维物理特征一定时,拔出荷载值大小与纤维周围界面层性状有密切关系。脱粘荷载主要与纤维周围基材微裂缝数量和长度以及界面弱谷显微硬度大小有关。而动拔出荷载主要取决于纤维周围水泥基材抗压强度和刚度大小,其抗压强度和刚度愈大,动拔出荷载也就愈大。因聚合物有很好粘附成膜性,大大减少了界面微裂缝数量,因而脱粘荷载远较普通砂浆基材的高。聚合物砂浆 P-3 比陶粒砂浆 C-2 提高 19.1%,比普通砂浆 G-1 提高 33.3%。动拔出荷载最大的是陶粒砂浆,比普通砂浆提高 28.7%,比聚合物砂浆提高 11.5%。动拔出荷载与静拔出荷载的比值( $P_{max}/P_0$ )也能较好地反映纤维界面层粘结特征。由表 1 知, $P_{max}/P_0$  最大的是陶粒砂浆,说明陶粒砂浆中钢纤维周围水泥基材抗压强度和刚度最大。从而也证实陶粒的存在改善了纤维周围水泥基材性状。 $P_{max}/P_0$  最小的是聚合物水泥砂浆,由于聚合物本身形成了韧性好而刚度小的物质膜,因而阻塞作用变小。

钢纤维拔出荷载一位移曲线形状也有显著差别。普通砂浆基材中,荷载一位移曲线有明显凹谷现象,而陶粒和聚合物水泥砂浆中此凹谷大为减小,甚至消失。凹谷的形成是纤维界面层微观构造有关。普通砂浆中因纤维周围水灰比高于基体的,造成  $Ca(OH)_2$  和钙矾石晶体在纤维表面定向排列,使界面层孔隙率增大,当拉拔荷载超过脱粘荷载而在纤维周围水泥基材中形成连续裂缝时,就会产生较大的破碎区,造成钢纤维连同粘附的水泥基材产生一段错动,反映在荷载一位移曲线上就是拔出荷载突然降低形成明显凹谷。因陶粒有一定的火山灰效应和“微泵作用”,改善了钢纤维界面微观构造,使纤维周围晶体发育受到某种限制,孔隙率降低,因而凹谷明显变小。聚合物 VAE 含有表面活性物质,具有良好减水效果,对减薄纤维周围水膜厚度有显著作用,同时还有很强的粘附成膜功能,使聚合物粒子吸附于水泥颗粒和钢纤维表面,水泥水化时,聚合物失水形成连续的膜,与水泥水化物一并在钢纤维表面形成相互交叉的网状结构,使得荷载一位移曲线中的凹谷基本趋于消失。拔出试验结果表明,聚合物水泥砂浆的界面粘结性能最好,普通砂浆的最差。

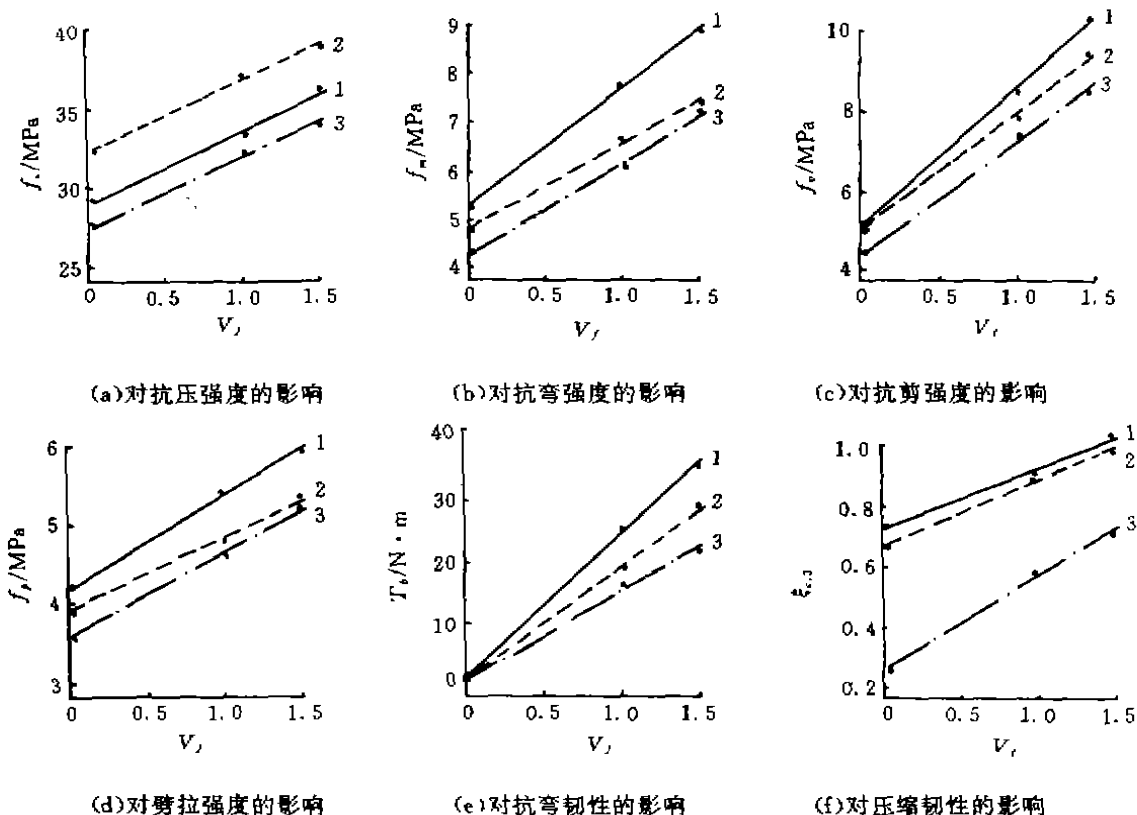


图5 不同基材对SFRC性能影响

1. 聚合物SFRC 2. 普通SFRC 3. 陶粒SFRC

### 3 基材类型对宏观力学性质的影响

在钢纤维混凝土宏观力学性质试验中,通过掺加高效减水剂FDN,保持等工作性,使普通钢纤维混凝土和陶粒钢纤维混凝土的水灰比保持为0.55;而掺加15%的聚合物VAE后,水灰比降至0.40.根据我国《钢纤维混凝土试验方法》(CECS13:89)标准,测试不同基材的钢纤维混凝土的抗压、抗弯、抗剪和劈拉强度,以及抗弯和抗压韧性,其结果如图5所示.试验结果表明,纤维体积率 $V_f$ 为0~1.5%时,不同基材钢纤维混凝土的抗压、抗弯、抗剪、劈拉等强度以及抗弯和抗压韧性均随 $V_f$ 的增大而提高.但基材不同,提高幅度有较大差别.提高值最大的是聚合物钢纤维混凝土,最小的为普通钢纤维混凝土.当基材一定时,这些力学性能与 $V_f$ 基本成线性关系;当 $V_f$ 一定时,随基材性能的提高而递增.当 $V_f=0$ ,即素混凝土时,陶粒混凝土性能最差,这主要与陶粒集料有关.由于陶粒强度低,使得陶粒混凝土成为复合硬质材料( $E_m > E_a$ ),与复合软质材料的普通混凝土在受力和变形方面有显著差别.当受压时,复合硬质材料中砂浆和集料的应变相等,而应力为两者之和<sup>[1]</sup>,即:

$$\epsilon = \epsilon_m = \epsilon_a, \sigma = \sigma_m \cdot (1 - n) + \sigma_a \cdot n$$

其中 $n$ 为集料体积率.因而砂浆组分和集料间的应力分配与弹性模量成正比, $\sigma_m/E_m = \sigma_a/E_a$ .由此可见,只有当陶粒集料弹性模量和强度大于砂浆变为复合软质材料时,混凝土才能达到砂

浆的强度. 由于砂浆弹性模量大于陶粒的, 因而砂浆承受的应力比陶粒的大. 为了达到所要求的强度, 砂浆组分强度必须高于混凝土的. 这就是所谓陶粒混凝土的水泥用量较大的原因. 因而在相同砂浆强度时, 陶粒混凝土比普通混凝土的低. 由于陶粒和砂浆共同承受荷载, 所以陶粒的强度和弹性模量对陶粒混凝土性能有较大的影响, 提高陶粒强度有较显著的作用.

钢纤维界面微观测试和界面粘结力学行为的分析表明, 聚合物对纤维界面层性状有很大改善, 陶粒在这方面也有一定益处. 这对钢纤维在受力过程中发挥抑制裂缝引发和扩展, 缓和裂缝尖端应力集中程度都是十分有利的. 因而, 在宏观力学性能上, 表现为纤维界面改善和粘结强度提高, 能进一步发挥钢纤维增强和增韧的效应.

## 5 结论

1) 扫描电镜可直接观察到钢纤维界面微观结构情况, 显微硬度和钢纤维拔出试验能综合反映纤维界面层的力学行为.

2) 钢纤维混凝土宏观力学性能与纤维界面粘结特征有非常密切的内在联系, 但两者还存在一定差别. 钢纤维混凝土不仅与钢纤维及界面层性能有关, 而且还受集料性能的影响.

3) 不同基材中的钢纤维, 其增强和增韧的作用是不同的. 通过改变基材的性能可配制出有优良综合力学性能的钢纤维混凝土.

## 参 考 文 献

- 1 刘巽伯. 结构用轻骨料混凝土. 混凝土及加筋混凝土, 1985, (2): 2~4

## Properties of Steel Fibre Reinforced Concrete in Different Elementary Materials

Wang Qicai

(Dept. of Civil Engineering, Lanzhou Railway Institute, Lanzhou 730070)

**Abstract** The microcosmic and macroscopic properties of steel fibre reinforced concrete are influenced by the character of elementary materials. VAE can obviously improve the microcosmic construct of steel fibre interfaces. Ceramsite can slightly improve steel fibre interface cohesive properties. The microcosmic construct and cohesive strength of steel fibre interfaces are improved, so steel fibre reinforced concrete of high strength and toughness can be produced.

**Key words** steel fibre; concrete; interfaces

责任编辑: 边际