

# 水泥基体中弓形钢纤维拔出耗能模型

许碧莞<sup>1,2</sup>, 施惠生<sup>1</sup>, JU Jiannwen Woody<sup>2</sup>

(1. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 美国加州大学洛杉矶分校 土木与环境工程系, CA90095)

**摘要:** 鉴于弓形钢纤维几何形状的特殊性, 对弓形钢纤维拔出过程中的摩擦能量和弯钩端塑性变形能量分别进行了理论推导; 并采用能量叠加法完成了水泥基体中弓形钢纤维拔出能耗理论计算. 模型预测结果与试验结果的验证表明, 不论是对部分拔出还是全部拔出的弓形钢纤维拔出能量预测均与试验结果较为吻合, 模型具有较好的准确性, 这将有利于今后弓形钢纤维增强水泥基材料宏观断裂能理论预测研究工作的开展.

**关键词:** 水泥基材料; 弓形钢纤维; 摩擦能量; 塑性变形能量; 模型预测

**中图分类号:** TU 528

**文献标识码:** A

## Modeling Pullout Energy of Hooked End Steel Fiber in Cementitious Matrices

XU Biwan<sup>1,2</sup>, SHI Huisheng<sup>1</sup>, JU Jiannwen Woody<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 20092, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Los Angeles, CA90095)

**Abstract:** Due to the unique geometry of hooked end steel fiber (HSF), frictional pullout energy of HSF and plastic deformation energy of steel fiber hooked end during fiber pullout process were theoretically derived, respectively. Then, energy superposition principle was adopted to calculate the total energy consumption during HSF pullout process. Good performances that were obtained in comparison with experimental results of single HSF pullout test well support the validity and accuracy of this proposed model, which indicate applicability of this model to a further prediction of fracture energy of hooked end steel fiber reinforced cementitious composites (HSFRCC).

**Key words:** cementitious matrices; hooked end steel fiber (HSF); frictional pullout energy; plastic deformation energy;

modeling prediction

随着钢纤维生产技术的发展, 现应用于水泥基体中的钢纤维种类繁多, 主要可分为以下两大类, 即: 平直钢纤维和异形钢纤维. 相对于平直钢纤维简单的几何形状, 异形钢纤维形状较为复杂, 但其与水泥基体接触面积较大, 且经异化后的钢纤维能在拔出过程中产生额外的“机械锚固”作用, 增大纤维拔出难度, 提高拔出能耗<sup>[1]</sup>. 目前, 异形钢纤维已基本取代了平直钢纤维在水泥基材料中的应用<sup>[2]</sup>; 然而, 由于异形钢纤维形状复杂, 关于异形钢纤维水泥基材料宏观性能模型理论研究尚很少报道. Chanvillard<sup>[3]</sup>、Alwan 等<sup>[4]</sup>、Sujivorakul 等<sup>[5]</sup>、董振英等<sup>[6]</sup>和陈应波等<sup>[7]</sup>曾对异形钢纤维中较为广泛应用的弓形钢纤维(hooked end steel fiber, HSF)在水泥基体中的拉拔行为进行了模型理论研究. 其中, Chanvillard<sup>[3]</sup>将钢纤维分成微段进行分析, 综合钢纤维拔出过程中的粘结、摩擦、“机械锚固”等作用, 并沿纤维轴向进行积分, 最后得到异形钢纤维拉拔力—位移关系. Alwan 等<sup>[4]</sup>建立弓形钢纤维“摩擦滑轮组”模型对弓形钢纤维动态拔出过程进行了理论研究. Sujivorakul 等<sup>[5]</sup>采用一个等效非线性弹簧来模拟钢纤维弯钩端的“机械锚固”作用. 董振英等<sup>[6]</sup>在前人研究工作基础上, 考虑纤维弯钩段在拉拔过程中发生的塑性变形、弯曲和由弯曲作用引起的界面附加摩擦力变化等建立了弓形钢纤维拉拔计算模型. 陈应波等<sup>[7]</sup>在董振英等<sup>[6]</sup>模型基础上, 对弓形钢纤维末端平直段的压力进行求解, 考虑纤维与基体摩擦渐进硬化、衰减效应等, 最后得到了与试验较接近的预测结果. 这些模型适应性均较好, 但是模型推导过程和所得解析公式均较为繁琐和复杂, 较难直接应用到弓

收稿日期: 2009-05-07

基金项目: 国家“973”重点基础研究发展规划资助项目(2009CB623100)

作者简介: 许碧莞(1981—), 女, 工学博士, 主要研究方向为新型建筑材料. E-mail: xubiwan1223@163.com

施惠生(1953—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为高性能水泥基材料. E-mail: shs@tongji.edu.cn

钢纤维增强水泥基材料宏观性能理论研究中.

众所周知,在水泥基体中掺入钢纤维最主要目的之一是为了提高水泥基材料断裂性能,增大材料韧性.因此,对材料断裂性能进行理论预测研究对钢纤维水泥基体材料的优化设计有着十分重要的意义.为了对弓形钢纤维增强水泥基材料断裂性能进行理论预测研究,且考虑到现有单根弓形钢纤维拉拔模型的复杂性,本文在前人工作<sup>[4,6,8]</sup>基础上,建立了水泥基体中单根弓形钢纤维拔出耗能模型,为今后弓形钢纤维增强水泥基材料宏观性能的进一步研究做好铺垫.

## 1 理论模型

### 1.1 弓形钢纤维拉拔过程分析

图1所示为弓形钢纤维几何形状示意图.由图1可见,弓形钢纤维形状组成简单,且呈对称分布,其与平直钢纤维的最大区别在于弓形钢纤维平直段两端分别多出了个弯钩端,且该弯钩端主要由两个小平直段和两个小弯曲段组成.为了便于以下的模型推导,现对弓形钢纤维弯钩端组成进行如下标记:将与纤维主轴方向平行的平直段记为 $S_1$ ,与纤维主轴方向斜交的平直段记为 $S_2$ ;将连接 $S_1$ 和 $S_2$ 的弯曲段记为 $C_1$ ,将连接 $S_2$ 和纤维平直主体段的弯曲段记为 $C_2$ . $S_1$ 和 $C_1$ 长度之和记为 $l_{h1}$ , $S_2$ 和 $C_2$ 长度之和记为 $l_{h2}$ ,其中 $l_{h1}$ 和 $l_{h2}$ 中的下标h表示钢纤维弯钩端; $C_1$ 和 $C_2$ 曲率半径分别记为 $\rho_1$ 和 $\rho_2$ ;  $S_1$ 和 $S_2$ 之间的夹角记为 $\alpha$ .

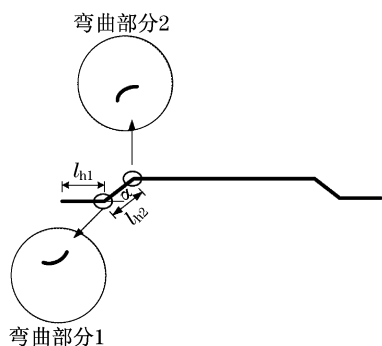


图1 弓形钢纤维几何形状示意图

Fig.1 Schematic geometry of HSF

与平直钢纤维在水泥基体中的拉拔过程相似,弓形钢纤维拔出过程同样由纤维脱粘和摩擦拔出两大部分组成<sup>[4]</sup>.其中,弓形钢纤维与水泥基体间的脱粘特性与平直钢纤维基本类似,但是其摩擦拔出过

程却存在较大差异.这主要是因为当弓形钢纤维置于新拌水泥基体中时,由于新拌水泥基材料的可塑性使其会根据弓形钢纤维几何形状在基体硬化后形成一条硬化通道,所以在水泥基体硬化强度和弓形钢纤维相互匹配情况下,弓形钢纤维弯钩端必须发生塑性拉直变形才能保证钢纤维完全通过硬化通道<sup>[1,4]</sup>.与钢纤维摩擦拔出能量相比,钢纤维的脱粘能量很小,通常可以将其忽略<sup>[9]</sup>.因此,主要考虑弓形钢纤维在水泥基体中完全脱粘后的拔出过程,其主要可分为如图2所示的三个阶段,即:I-II-III为阶段1,III-IV为阶段2,IV之后为阶段3.阶段1中,弯钩段 $l_{h1}$ 和 $l_{h2}$ 的部分纤维段都需要分别经过硬化弯曲通道 $C_1$ 和 $C_2$ ;阶段2中,仅弯钩段 $l_{h1}$ 的部分纤维段需要通过硬化弯曲通道 $C_2$ ;阶段3中,弓形钢纤维弯钩端被完全拉出硬化通道,该阶段的拔出行为特征与平直钢纤维基本相同.图中弓形钢纤维弯钩端弯曲段分别用圆点1和2表示.

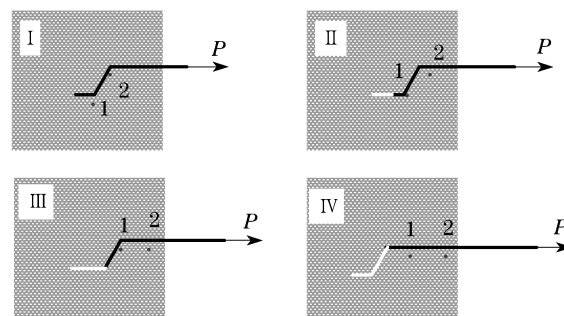
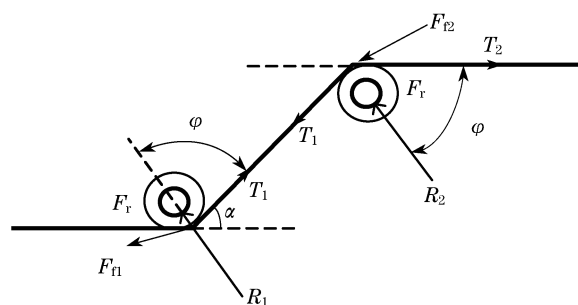


图2 完全脱粘后弓形钢纤维在水泥基体中的拔出过程

Fig.2 Pullout process of HSF in cementitious matrices after fully debonding

弓形钢纤维弯钩端在纤维拔出阶段1和2中的受力情况分析,可参见Alwan等<sup>[4]</sup>提出的“摩擦滑轮组”模型(如图3所示).由图3可见,该模型中弓形钢纤维被视为跨过两个塑性铰,因此,在拔出力( $T_1$ 和 $T_2$ )的作用下,钢纤维在拔出过程中会产生转动摩擦阻力 $F_r$ 和切线方向摩擦阻力 $F_{f1}$ , $F_{f2}$ 阻碍钢纤维的滑移拔出.其中,转动摩擦力 $F_r$ 主要用于考虑弓形钢纤维弯钩端拉直作用;切线方向摩擦力 $F_{f1}$ 和 $F_{f2}$ 则主要用于考虑拉拔过程中,弯钩端弯曲段对水泥基体的压力( $R_1$ 和 $R_2$ )作用产生的库伦摩擦力.由此不难看出,弓形钢纤维弯钩端在拔出过程中,不仅会消耗塑性功用于拉直纤维弯钩端,而且还要消耗一部分功用于克服弯钩端在硬化通道弯曲段 $C_1$ 和 $C_2$ 产生的库伦摩擦力作用.

图3 弓形钢纤维“摩擦滑轮组”模型<sup>[4]</sup>Fig.3 Frictional pulley model of HSF<sup>[4]</sup>

综合上述分析,纵观弓形钢纤维整个拔出过程,可将纤维拔出能量归纳为以下两个部分:(1)克服摩擦阻力所需能量,包括整个埋置弓形钢纤维段和水泥基体之间的表面摩擦,以及在硬化通道弯曲段  $C_1$  和  $C_2$  处产生的库伦摩擦;(2)弯钩端拉直变形所需塑性功。因此,弓形钢纤维在水泥基体中拔出耗能理论推导可采用如图4所示方法,即:分别推导由摩擦作用产生的能量损耗以及由弯钩端拉直变形引起的能量损耗,然后根据能量可叠加性原理完成整个弓形钢纤维的拔出耗能理论计算。如图4a所示,推导摩擦能耗时可将弓形钢纤维弯钩端虚拟成平直形状后借鉴平直钢纤维拔出能量模型推导该部分能量;如图4b所示,推导弯钩端拉直变形能量则在弯钩端周围无摩擦阻力作用下进行。

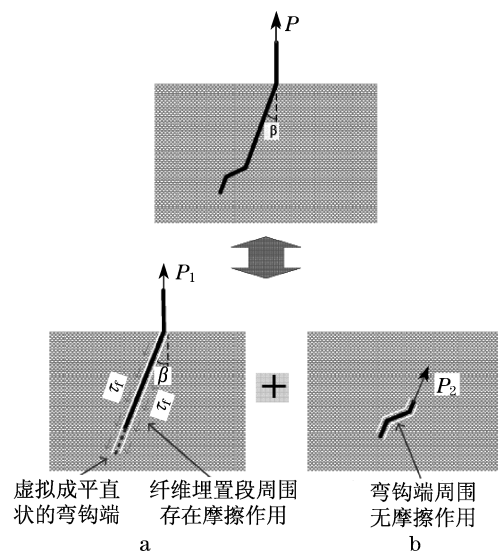


图4 叠加法分析弓形钢纤维拔出能量

Fig.4 Analysis on pullout energy of HSF by superposition principle

## 1.2 弓形钢纤维摩擦能量

Li 等<sup>[8,10]</sup>曾提出“固定摩擦剪应力( $\tau_f$ )”模型描

述平直纤维拉拔行为,纤维拔出力与位移( $P-\delta$ )关系表示如下:

$$P(\delta, \beta) = k\pi\tau_f d_f(l_e - \delta), \quad 0 \leq \delta \leq l_e \quad (1)$$

式中: $\beta$ 为图4中所示的纤维轴向与拔出力( $P$ 或 $P_1$ )之间的夹角,简称为纤维拔出角度; $d_f$ 为纤维直径; $l_e$ 表示钢纤维埋置长度; $k = e^{\beta^2} = \frac{2}{4+f^2}(1 + e^{\pi f/2})$ 为“纤维咬合作用”因子,用于考虑因纤维斜向埋置引起的拔出力与能量增大作用; $f$ 为“纤维咬合作用”系数,该系数值的大小不仅与纤维种类有关,还与纤维—水泥基体间的过渡层性能有关,一般通过纤维拉拔试验测得。当钢纤维轴向埋置时, $f$ 为0,斜置钢纤维  $f$  值在0.5~1.0之间<sup>[8,11]</sup>。

虽然图4a中将弓形钢纤维弯钩端视为虚拟平直段,但是弯钩端在通过弯曲硬化通道  $C_1$  和  $C_2$  处时引起的库伦摩擦力作用可用修正因子  $c_0$  等效表示。因此,与图4a相对应的由摩擦作用引起的拔出力—位移( $P-\delta$ )关系为

$$P = c_0 k\pi d_f \tau_f (l_e - \delta), \quad 0 \leq \delta \leq l_e \quad (2)$$

式中:修正系数  $c_0$  可由初始条件求得,即:当纤维拔出位移  $\delta = 0$  时,  $P = P_{\max-f}$ , 其中,  $P_{\max-f}$  为最大摩擦拔出力。弓形钢纤维最大摩擦拔出力  $P_{\max-f}$  除应考虑钢纤维表面摩擦力  $P_{\delta=0} = \pi\tau_f d_f l_e$  外,还应考虑弯钩端在硬化弯曲通道  $C_1$  和  $C_2$  处的库伦摩擦力  $F_{f1}$  和  $F_{f2}$  (如图3所示),其可以表示为<sup>[4]</sup>

$$F_{f1} = \frac{\mu\sigma_y \pi r_f^2 \cos \phi}{6\cos \alpha (1 - \mu \cos \phi)} \quad (3)$$

$$F_{f2} = \frac{\mu\sigma_y \pi r_f^2 \cos \phi (3 - \mu \cos \phi)}{6\cos \alpha (1 - \mu \cos \phi)^2} \quad (4)$$

式中: $\mu$ 为库伦摩擦系数; $r_f$ 为钢纤维半径; $\sigma_y$ 为弓形钢纤维屈服应力; $\phi = (\pi - \alpha)/2$ 为图3所示水泥基体弯曲段  $C_1$  或  $C_2$  处的支撑力  $R_1$  或  $R_2$  与水平方向间的夹角。

因此,弓形钢纤维最大摩擦拔出力  $P_{\max-f}$  为

$$P_{\max-f} = F_{f1} + F_{f2} + P_{\delta=0} = \frac{\mu\sigma_y \pi r_f^2 \cos \phi (2 - \mu \cos \phi)}{3\cos \alpha (1 - \mu \cos \phi)^2} + \pi\tau_f d_f l_e \quad (5)$$

修正系数  $c_0$  为

$$c_0 = \frac{P_{\max-f}}{\pi\tau_f d_f l_e} \quad (6)$$

综合式(2),(5)和(6)可得弓形钢纤维摩擦拔出力—位移( $P-\delta$ )关系,并对该  $P-\delta$  关系进行积分,

可得弓形钢纤维摩擦能耗为

$$g_f(l_e, \delta, \beta) = \int_0^\delta P d\delta = \int_0^\delta c_0 \pi d_f \tau_f (l_e - \delta) e^{\beta \delta} d\delta = \frac{kP_{\max-f}}{l_e} \left( l_e \delta - \frac{1}{2} \delta^2 \right) \quad (7)$$

式中:  $\delta \leq l_e$ .

### 1.3 弓形钢纤维弯钩端塑性变形能量

弓形钢纤维弯钩端必须经过拉直变形才能最终通过弯钩状硬化通道,在这一拉直变形过程将消耗大量塑性变形能量,这也正是弓形钢纤维具有较为优越的增强和增韧效果的主要原因.弯钩端塑性变形能量推导可以通过将弯钩端纤维微段当作弯曲梁,计算梁的变形能量来完成<sup>[6]</sup>.在进行纤维梁变形能量计算推导之前,做以下两个基本假设:

(1) 如图5所示,钢纤维材料具有完美的弹-塑性性能(Perfect elastic-plastic property, PPE),即:钢纤维材料在塑性变形阶段的拉伸应力  $\sigma$  始终为一固定常量且等于钢纤维的屈服强度  $\sigma_y$ .图5中  $\varepsilon_y$  为屈服强度  $\sigma_y$  处所对应的应变.

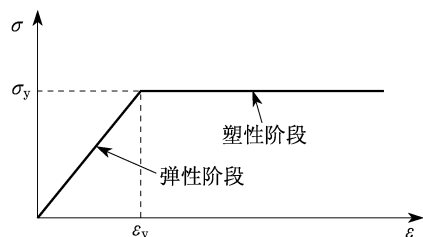


图5 钢纤维材料特性

Fig.5 Material property of steel fiber

(2) 如图1所示,弓形钢纤维弯钩端弯曲段  $C_1$  和  $C_2$  分别为近似圆弧,所以假定弯曲段  $C_1$  和  $C_2$  曲率半径  $\rho_1$  和  $\rho_2$  分别为某固定常量,其中  $\rho_1$  和  $\rho_2$  取值可相等或不等,取决于实际弓形钢纤维的材料设计.

由于将弯钩端纤维微段视为弯曲梁,因此在弹性变形、弹塑性变形以及塑性变形各个阶段下,钢纤维截面弯矩  $M$  与截面曲率半径  $\rho$  间的关系分别为

(1) 弹性变形阶段

$$M = \frac{\pi E_f r_f^4}{4\rho} \quad (8)$$

式中:  $E_f$  为钢纤维弹性模量;  $r_f$  为纤维半径.

(2) 弹塑性变形阶段<sup>[6]</sup>

$$M = M_e + M_p = 4\sigma_y r_f^3 \left[ \frac{1}{\sin \theta_e} \left( \frac{\theta_e}{8} - \frac{\sin(4\theta_e)}{32} \right) + \frac{\cos^3(\theta_e)}{3} \right] \quad (9)$$

式中:  $M_e$  和  $M_p$  分别表示为弹性区和塑性区弯矩;

$\theta_e = \arcsin\left(\frac{\sigma_y \rho}{E_f r_f}\right)$  为纤维截面塑性区与轴线间的夹角.

(3) 塑性变形阶段

$$M = \frac{4}{3} \sigma_y r_f^3 \quad (10)$$

当弯钩端纤维微段  $dx$  进入硬化弯曲通道  $C_1$  或  $C_2$  时,纤维微段  $dx$  发生弯曲变形;当纤维微段  $dx$  从弯曲通道  $C_1$  或  $C_2$  中拔出时,其又将发生拉直变形.由基本假设(2)可知,纤维微段  $dx$  在弯曲段  $C_1$  或  $C_2$  中的滑移拔出过程不耗功,仅在纤维微段  $dx$  进入或滑出弯曲通道时消耗塑性功.因此,综合考虑纤维截面在弹性、弹塑性以及塑性阶段的弯矩与曲率半径关系( $M-\rho$ )式(8),(9)和(10),可得纤维微段  $dx$  在该滑移过程中所消耗的塑性功如图6所示阴影部分面积与纤维微段长度  $dx$  的乘积,其可以表示为通式如下:

$$de_{Pi} = \left[ \int M d(1/\rho) \right] dx = (A_{i1} + A_{i2}) dx \quad (11)$$

式中:  $de_{Pi}$  表示弓形钢纤维弯钩端微段  $dx$  所在滑移过程中所消耗的塑性功;  $i$  表示纤维微段  $dx$  所通过的弯曲通道,即:当  $i=1$  时,表示纤维微段  $dx$  通过弯曲通道  $C_1$ ;当  $i=2$  时,表示纤维微段  $dx$  经过弯曲通道  $C_2$ .如图6所示,  $A_{i1}$  表示纤维微段  $dx$  进入弯曲通道时,弯矩和曲率( $M-1/\rho$ )曲线面积;  $A_{i2}$  表示纤维微段  $dx$  被拉出弯曲通道时,弯矩和曲率( $M-1/\rho$ )曲线面积,其中字母  $i$  同样表示硬化弯曲通道  $C_1$  或  $C_2$ ;  $\rho_y$  为在屈服强度  $\sigma_y$  处对应的曲率半径;  $\rho_{fc}$  为弯钩端弯曲处的曲率半径;  $M_y$  为曲率半径  $\rho_y$  所对应的弯矩.

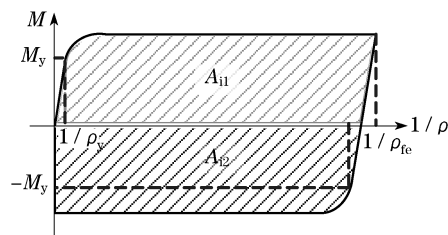


图6 纤维截面塑性功消耗计算示意图

Fig.6 Scheme of plastic deformation energy of fiber section

由式(11)可知,弯钩端单位长度纤维段  $dx$  通过弯曲通道  $C_1$  所消耗的塑性功为

$$e_{P1} = A_{11} + A_{12} \quad (12)$$

同理,弯钩端单位长度纤维段  $dx$  通过弯曲通道  $C_2$  所消耗的塑性功为

$$e_{p2} = A_{21} + A_{22} \quad (13)$$

从弓形钢纤维拉拔过程的分析可知,在拔出阶段 1 ( $0 \leq \delta < l_{h1}$ ),硬化弯曲通道  $C_1$  和  $C_2$  中同时有纤维微段  $dx$  通过,因此该阶段 1 纤维弯钩端消耗的塑性变形能量与拔出位移间的关系为

$$E_{p1}(\delta) = (e_{p1} + e_{p2})\delta, \quad 0 \leq \delta < l_{h1} \quad (14)$$

在弓形钢纤维拔出阶段 2 ( $l_{h1} \leq \delta < l_{h1} + l_{h2}$ ),仅弯曲通道  $C_2$  中有纤维微段  $dx$  通过,因此该阶段 2 弯钩端总塑性变形能量与拔出位移间的关系为

$$E_{p2}(\delta) = e_{p1} l_{h1} + e_{p2} \delta, \quad l_{h1} \leq \delta < l_{h1} + l_{h2} \quad (15)$$

在弓形钢纤维拔出阶段 3 ( $\delta \geq l_{h1} + l_{h2}$ ),此时整个弓形钢纤维弯钩端已全部脱离弯曲通道,所以在此后的纤维拔出过程中,弯钩端将不再消耗塑性变形能量,且弯钩端总塑性变形能量为

$$E_{p3}(\delta) = (e_{p1} + e_{p2})l_{h1} + e_{p2} l_{h2} \quad (16)$$

$$l_{h1} + l_{h2} \leq \delta \leq l_e$$

式(14)、(15)和(16)中,  $E_{p1}$ 、 $E_{p2}$  和  $E_{p3}$  下标数字 1、2 和 3 分别表示弓形钢纤维拔出阶段 1、2 和 3。综合式(14)、(15)和(16)弓形钢纤维弯钩端塑性变形能量和纤维拔出位移关系 ( $E_p - \delta$ ) 如图 7 所示。

## 2 模型验证与评价

以上对弓形钢纤维摩擦能量和弓形钢纤维弯钩端塑性变形能量分别进行了理论推导,现由能量叠加法原则可得水泥基体中弓形钢纤维在某一拔出位移处的拔出能耗为

$$g_{tP}(l_e, \delta, \beta) = g_t(l_e, \delta, \beta) + E_{pj}(\delta) \quad (17)$$

式中:  $g_{tP}(l_e, \delta, \beta)$  为弓形钢纤维在某一拔出位移处的拔出能耗;  $g_t(l_e, \delta, \beta)$  为弓形钢纤维在拔出位移  $\delta$  处所消耗的摩擦能量;  $E_{pj}(\delta)$  为弓形钢纤维在拔出位移  $\delta$  处所消耗的塑性变形能量,其中下标  $j = 1, 2, 3$  分别表示拔出阶段 1、2 和 3。

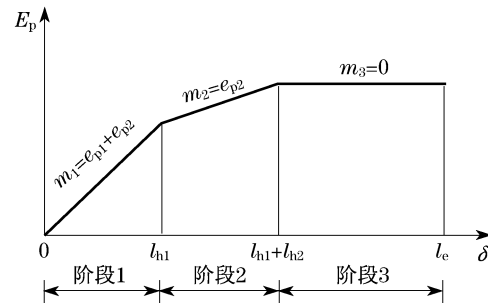


图 7 弓形钢纤维弯钩端塑性变形能量与拔出位移关系 ( $E_p - \delta$ )

Fig. 7 Relation between plastic deformation energy and pullout displacement of steel fiber hooked end ( $E_p - \delta$ )

以下将对弓形钢纤维在不同拔出位移处的拔出能耗理论预测进行试验验证和评价。

### 2.1 试验概况和基本参数确定

本研究采用 Cunha 等<sup>[12]</sup>和 Kim 等<sup>[13]</sup>的弓形钢纤维拉拔试验结果对弓形钢纤维理论拔出能量进行试验验证。表 1 为试验所用弓形钢纤维的几何形状和物理性能,其中  $L_f$  为纤维总长;表 2 为试验材料的其他相关信息,其中  $w/c$  为水泥基材料的水灰比;  $l_e$  为埋置在水泥基体中的钢纤维长度;  $\delta$  为钢纤维拔出位移;  $\tau_f$  为钢纤维与水泥基体之间的摩擦剪应力;  $v_{LR}$  为试验的荷载加载速率。

表 1 弓形钢纤维形状参数和相关物理性能

Tab. 1 Geometry parameters and physical property of HSF

作者	$E_t$ /GPa	$\sigma_y$ /MPa	$L_f$ /mm	$d_f$ /mm	$l_{h1}$ /mm	$l_{h2}$ /mm	$\rho_1$ /mm	$\rho_2$ /mm	$\alpha$	$\varphi$
Cunha 等 <sup>[12]</sup>	200	1 050	60	0.75	2.78	2.62	3.44	3.62	$\pi/4$	$3\pi/8$
Kim 等 <sup>[13]</sup>	200	2 100	30	0.40	1.76	1.44	3.00	3.20		

表 2 试验材料的其他相关信息

Tab. 2 Other relevant experimental material information

作者	$w/c$	$l_e$ /mm	$\delta$ /mm	$\tau_f$ /MPa	$v_{LR}/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$f$
Cunha 等 <sup>[12]</sup>	0.29	10;20;30	1;3	1.6; 1.8;2.1	0.01	0
Kim 等 <sup>[13]</sup>	0.65;0.30;0.26	15	15	3.5;5.7;4.6	0.018;0.18;1.8;18	

由表 2 还可以看到, Cunha 等<sup>[12]</sup>仅对弓形钢纤维部分拔出时的能量进行计算,此时弓形钢纤维弯钩端仅发生部分塑性拉直变形;而 Kim 等<sup>[13]</sup>则研究

的是在不同加载速度下,弓形钢纤维完全拔出水泥基体时的能量,在该研究中弓形钢纤维弯钩端已经全部发生拉直变形。

## 2.2 验证结果

图8为弓形钢纤维拔出能量理论计算值 $g_{tP}$ 与试验测量值 $g_{tE}$ 之间的比较.由图8可见,整体而言,不论是弯钩端发生部分拉直变形,还是发生全部拉直变形的弓形钢纤维,其拔出能量理论预测值与试验测量值吻合良好.这也表明了采用能量叠加法对弓形钢纤维在水泥基体中拔出能量计算的可行性.

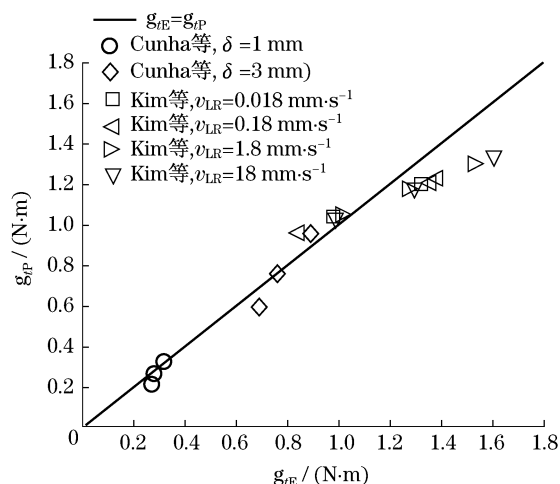


图8 弓形钢纤维拔出能量理论计算与试验值的比较

Fig.8 Experimental verification of pullout energy of HSF

## 3 结论

由于弓形钢纤维形状的独特性,以及弓形钢纤维拉拔荷载—位移关系推导过程和结果的复杂性,采用先分别推导计算弓形钢纤维因摩擦作用和弯钩端塑性变形消耗能量大小,最后采用能量叠加方法实现对弓形钢纤维在各个拔出位移点的拔出能量进行理论推导和计算.与试验结果的验证表明,模型预测值与试验结果吻合良好,这将十分有利于今后对弓形钢纤维水泥基材料断裂能量理论预测研究.

### 参考文献:

[1] Banthia N. A study of some factors affecting the fiber-matrix bond in steel fiber reinforced concrete[J]. Canadian Journal of

Civil Engineering, 1990, 17(4): 610.

- [2] 杨萌. 钢纤维高强混凝土增强、增韧机理及基于韧性的设计方法研究[D]. 大连: 大连理工大学土木工程学院, 2006.  
YANG Meng. Strengthening and toughening mechanism of steel fiber reinforced high-strength concrete and design method based on toughness [D]. Dalian: Dalian University of Technology. Department of Infrastructure Engineering, 2006.
- [3] Chanvillard N. Modeling the pullout of the wire-drawn steel fibers[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(3): 1027.
- [4] Alwan J M, Naaman A E. Effect of mechanical clamping on the pull-out response of hooked steel fibers embedded in cementitious composites [J]. Concrete Science and Engineering, 1999, 1(3): 15.
- [5] Sujivorakul G, Waas A M, Naaman A E. Pullout response of a smooth fiber with an end anchorage[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(9): 986.
- [6] 董振英, 李庆斌. 异型钢纤维拉拔界面模型[J]. 工程力学, 2004, 21(6): 102.  
DONG Zhenying, LI Qingbin. An interfacial pullout model for hooked fiber in cementitious materials [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(6): 102.
- [7] 陈应波, 梅华东, 范小春. 非直钢纤维拔出过程的数值模拟[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(7): 78.  
CHEN Yingbo, MEI Huadong, FAN Xiaochun. Numerical modeling of pullout process of non-straight steel fiber [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(7): 78.
- [8] Li V C, Leung C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(11): 2246.
- [9] Jain L K, Wetherhold R C. Effect of fiber orientation on the fracture toughness of brittle matrix composites [J]. Acta Metallic Materials, 1992, 40(6): 1135.
- [10] Li V C. Postcrack scaling relations for fiber reinforced cementitious composites [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1992, 4(1): 41.
- [11] Li V C, Wang Y J, Backer S. A micromechanical model of tension softening and bridging toughening of short random fiber reinforced brittle matrix composites [J]. Journal of Mechanics Physics Solids, 1991, 39(5): 607.
- [12] Cunha V M C F, Barros J A O, Sena-Cruz J M. Pullout behavior of steel fibers in self-compacting concrete [J]. ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(1): 1.
- [13] Kim D J, Ei-Tawil S, Naaman A E. Loading rate effect on pullout behavior of deformed steel fiber [J]. ACI Materials Journal, 2008, 105(6): 576.