

循环荷载下钢锭铣削型纤维混凝土 基本力学性能试验

刘思维¹, 刘玉擎²

[1. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092; 2. 同济大学 桥梁工程系, 上海市 200092]

摘要: 钢锭铣削型钢纤维凭借其独特的径向扭曲外形、表面粗糙特性和带弯钩的锚尾构造,在混凝土基体中表现出良好的黏结锚固性能。以波浪型钢纤维混凝土和未掺加混凝土试件作为对照组,对钢锭铣削型钢纤维混凝土试件,开展了在循环荷载作用下的三点弯曲梁的试验,测试了荷载-裂缝口张开位移(crack mouth opening displacement, CMOD)曲线等基本力学性能。试验结果表明:在循环加载上限对应的CMOD一定时,混凝土试件的刚度和恢复系数随着加载次数的增加呈现减小趋势;循环加载上限对应的CMOD越大,混凝土试件刚度和恢复系数越小。在正常使用状态下,即当CMOD小于0.5 mm时,相比波浪型钢纤维,钢锭铣削型钢纤维在增益混凝土残余强度、循环刚度上表现更为优异。

关键词: 钢纤维;钢锭铣削型;混凝土;力学性能;模型试验

中图分类号: U414; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)12-0302-05

Test on Basic Mechanical Properties of Steel Ingot Milled Fiber Concrete under Cyclic Loading

LIU Siwei¹, LIU Yuqing²

[1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China]

Abstract: Steel ingot milled steel fibers exhibit excellent bonding and anchoring performances in concrete matrices due to their unique radially twisted shape, rough surface characteristics and anchor tail structure with hooks. Taking the wavy steel fiber reinforced concrete specimens and the specimens without concrete addition as the control group, the three-point bent beam test under cyclic loading is conducted on the steel ingot milled steel fiber reinforced concrete specimens to test the basic mechanical properties such as the load - crack mouth opening displacement (CMOP) curve. The test results indicate that when the CMOD corresponding to the upper limit of cyclic loading is fixed, the stiffness and recovery coefficient of concrete specimens show a decreasing trend with the increase of loading times. The larger the CMOD corresponding to the upper limit of cyclic loading, the smaller the stiffness and recovery coefficient of the concrete specimen. Under the normal usage conditions, when CMOD is less than 0.5 mm, compared with the wave-shaped steel fibers, the steel ingot milled steel fibers perform more outstandingly in increasing the residual strength and cyclic stiffness of concrete.

Keywords: steel fiber; steel ingot milling-type; concrete; mechanical properties; model test

0 引言

钢纤维混凝土凭借其优异的力学性能逐渐成为工程中广泛应用的建筑材料之一。钢纤维的加入,提高了混凝土的抗拉强度和裂后残余强度,同时改善了混凝土的裂缝控制能力^[1]。通过改善纤维形状和表面特性来提高钢纤维增益效果是一种常用手

段,代表性产品包括表面带压痕且具有多个弯折锚固点的波浪型钢纤维,以及端部弯折的端钩型钢纤维^[2-4]。

近年来,钢锭铣削型钢纤维在路面、隧道管片等工程中逐步推广应用^[5]。其生产工艺通过综合优化纤维表面粗糙度、端部弯钩结构及纵向扭曲形态,显著提升了纤维与混凝土基体的黏结锚固性能^[6-7]。如图1所示,该纤维以特定牌号的低合金钢坯为原料,经圆盘铣刀直接加工成型,长度32 mm,等效直径0.91 mm,长径比35.2。其横截面呈三角形,其中

收稿日期: 2025-08-25

作者简介: 刘思维(1981—),男,博士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

一个表面经机械加工呈光滑平面,有效降低纤维在混凝土中的团聚倾向,保障拌合物良好的流动性;另外两个表面粗糙洁净,且横、纵截面均有锯齿状粗糙纹理,增强了纤维与基体间的黏结效果^[8]。同时,纤维整体呈纵向螺旋扭曲形态,具有两端带钩的锚尾,进一步提高了其在基体中的锚固效果。

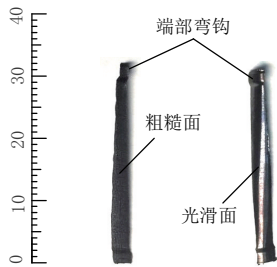


图1 钢锭铣削型钢纤维

研究表明,相较于端钩型钢纤维,钢锭铣削型钢纤维在水泥基材料中的平均黏结强度提升了23%~40%,破坏阶段纤维强度利用率提高了17%~30%^[9]。得益于其优异的黏结锚固性能,钢锭铣削型钢纤维在各类工程结构中具有广阔的应用前景。然而相比端钩型和波浪型钢纤维,目前对钢锭铣削型钢纤维在混凝土中增强效果的研究较为有限。同时考虑到某些结构构件,如桥面板在服役期间会承受循环荷载作用^[10-13],而目前尚未见到有关对钢锭铣削型钢纤维混凝土循环力学性能的研究报道,因而有必要研究循环荷载下该类钢纤维对混凝土力学性能的增强效果。

1 试验分组

本试验采用三种混凝土 C-MF, C-CF 和 C-P, 三者配合比设计一致, 仅纤维掺入类型存在差异。混凝土配合比为水泥用量 384 kg/m³, 骨料最大粒径 25 mm, 水灰比 0.38, 减水剂 4.57 L/m³。其中, C-MF 掺入钢锭铣削型钢纤维, C-CF 掺入波浪型钢纤维, C-P 为未掺入钢纤维的对照组。钢纤维基本性能如表 1 所示, 钢纤维掺量均设定为工程常用的 60 kg/m³。

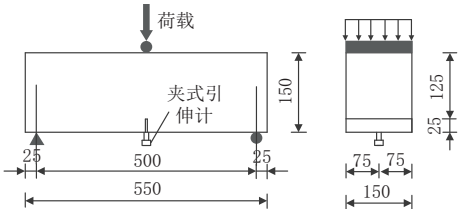
表1 钢纤维基本性能

纤维类型	掺量/ (kg·m ⁻³)	长度/ mm	等效直径/ mm	长径比	抗拉强度/MPa
钢锭铣削型	60	32	0.91	35.2	>700
波浪型	60	38	0.70	54.3	>600

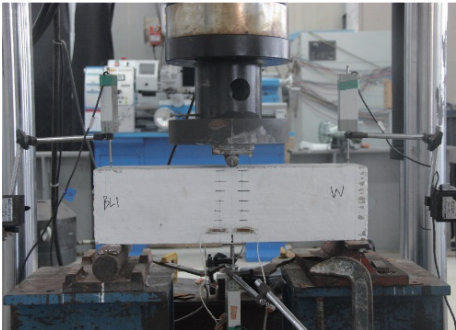
2 试验测试方法

本文采用三点弯曲梁试验方法,测试混凝土的断裂性能,每种混凝土均制备并测试了5根切口梁

试件。试件规格依据欧洲规范 EN 14651^[14], 尺寸为 150 mm×150 mm×550 mm, 加载跨度为 500 mm, 如图 2 所示。每根切口梁试件底面均切割一条深度为 25 mm、宽度为 3 mm 的预制裂缝。在凹槽中的预制裂缝口两侧安装一个夹式引伸计, 以测试裂缝口张开位移 (CMOD)。为了探究混凝土的循环力学性能, 试验采用循环加载制度。



(a) 试件尺寸(单位: mm)



(b) 加载装置

图2 三点弯曲梁试验

如表 2 所示, 加载过程分为两个阶段。阶段 I (循环加载阶段) 在峰值荷载前进行, 此时试件处于弹塑性变形阶段, 力学响应稳定。为精准量化循环滞回特性, 采用力控制加载 (速率 4 kN/min), 在 0.2~15.7 kN 范围内循环加载 5 次。

表2 三点弯曲梁试验加载制度

阶段	循环次数	循环上限	循环下限	加载或重复加载速率	卸载速率
I	1~5	Load=15.7 kN	Load=0.2 kN	4 kN/min	4 kN/min
	6~8	CMOD=0.5 mm			
	9~11	CMOD=1.0 mm			
	12~14	CMOD=1.5 mm			
II	15~17	CMOD=2.0 mm	Load=0.2 kN	0.2 mm/min	2 kN/min
	18~20	CMOD=2.5 mm			
	21	CMOD=3.0 mm			
	22	CMOD=3.5 mm			

阶段 II (软化段加载阶段) 试件达到峰值荷载后进入软化阶段, 承载力持续下降。为避免失稳断裂并精准捕捉裂缝宽度与残余承载力的关联性, 切换为位移控制加载。具体流程为: 当 CMOD 到达预设阈值 (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 及 3.5 mm) 时卸载至 0.2 kN, 随后改用位移控制 (速率 0.2 mm/min) 重新加载至原

CMOD 值。其中,CMOD 为 0.5 ~ 2.5 mm 时重复上述流程 3 次,CMOD 为 3 ~ 3.5 mm 时因大变形下损伤累积显著,仅重复一次。

3 试验结果及分析

各组混凝土试件的抗压强度与弹性模量试验数据详见表 3。每组测试 3 个标准圆柱体试件($\phi 150\text{ mm}\times 300\text{ mm}$),以算术平均值作为试验结果,3 种混凝土间的抗压强度和弹性模量差别较小。

表 3 混凝土基本力学性能测试结果 单位:MPa		
混凝土种类	圆柱体抗压强度	圆柱体弹性模量
C-MF	62.8	5.04×10^4
C-CF	63.8	5.25×10^4
C-P	59.4	5.01×10^4

图 3 所示为三点弯曲梁试验中三个典型试件的荷载-CMOD 曲线。由图可知,三组试件在达到峰值荷载前表现出显著的差异,这源于钢纤维对裂缝扩展的抑制效果不同。C-P 试件仅依赖基体强度,微裂缝萌生后迅速失稳扩展,CMOD 随荷载增长迅速增大,呈典型脆性特征。C-MF 因纤维几何特征优化,峰值前有效约束裂缝扩展,表现出高抗裂刚度^[15]。C-CF 中波浪型钢纤维虽具桥联作用,但因形状特性导致黏结不足或分布不均,裂缝延缓效率显著降低^[16]。

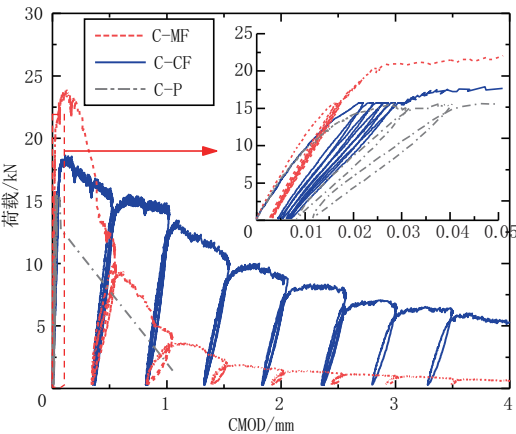


图 3 荷载-CMOD 曲线

此外,所有 C-MF 试件与 C-CF 试件的峰值荷载均显著高于 C-P 试件。达到峰值荷载后,C-P 试件的荷载值呈现迅速下降趋势,而 C-MF 和 C-CF 均能保持一定水平的残余荷载。然而,受纤维类型对失稳阶段调控差异的影响,尽管 C-MF 试件的峰值荷载高于 C-CF,但在峰值荷载后其荷载下降速率明显快于后者。

表 4 汇总了抗折强度平均值 $f_{l,m}$ 以及 4 个特征

CMOD 值(0.5、1.5、2.5、3.5 mm)对应的残余强度平均值 $f_{R1,m}$ 、 $f_{R2,m}$ 、 $f_{R3,m}$ 和 $f_{R4,m}$ 。分析表明,相较于 C-P 试件,C-MF 和 C-CF 的 $f_{l,m}$ 在三点弯曲梁试验中分别提高了 45% 和 12%。相较于 C-CF 试件,C-MF 的 $f_{R1,m}$ 值则提升了 4%。

表 4 混凝土断裂性能测试结果 单位:MPa					
混凝土种类	$f_{l,m}$	$f_{R1,m}$	$f_{R2,m}$	$f_{R3,m}$	$f_{R4,m}$
C-MF	7.29	4.54	1.06	0.46	0.29
C-CF	5.63	4.37	3.35	2.36	1.69
C-P	5.04	—	—	—	—

然而,随着 CMOD 的进一步增大,C-MF 试件的残余强度 $f_{R2,m}$ 、 $f_{R3,m}$ 和 $f_{R4,m}$ 呈现显著衰减趋势。CMOD=2.5 mm 时,C-MF 试件的 $f_{R3,m}$ 较 C-CF 试件降低了 81%。fib Mode code 2010^[17]指出,对应于 CMOD 值为 0.5 mm 和 2.5 mm 的残余弯曲强度 f_{R1} 和 f_{R3} ,分别反映了混凝土在正常使用阶段和极限承载阶段的性能。由此可知,钢锭铣削型钢纤维在正常使用阶段拥有更高的残余强度增益效果,但在极限承载阶段增益效果弱于波浪型纤维。

为进一步研究三点弯曲试验中混凝土梁在循环荷载下的力学性能,如图 4 所示,定义了循环刚度 k 以及恢复系数 R 。

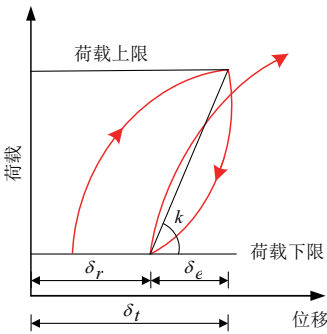


图 4 循环参数定义

循环刚度 k 定义为荷载-挠度曲线中每次循环卸载起点至卸载终点连线的斜率,用以定量表征试件在该次循环加载下的抗变形能力。恢复系数 R 则定义为该次循环卸载后产生的可恢复位移 δ_e 与总位移 δ_t 之比,可用于定量评价试件在该次循环加载下的变形恢复能力。

由图 5 可知,循环刚度随 CMOD 的增大而减小,且循环上限一定时,刚度随着加载次数的增加而减小。这表明裂缝张开程度的增大以及反复加-卸载过程加剧了试件内部损伤的积累,从而显著削弱了其抵抗变形的能力。在阶段 I,C-MF 和 C-CF 的循环刚度均显著高于 C-P,表明在峰值荷载前已有部

分纤维开始发挥增强作用。在该阶段,C-MF的循环刚度较C-CF高25%~37%,这主要得益于钢锭铣削型纤维的粗糙表面提供的初始高黏结强度。

在阶段Ⅱ的前三个循环内,C-MF的循环刚度仍高于C-CF,但优势幅度减小至6%~8%;在后续循环中,C-MF的循环刚度急剧下降,较C-CF减少约30%~66%。这一现象与两类纤维的破坏模式差异直接相关,在高周反复荷载下,MF与基体的高黏结强度导致纤维承受的应力集中程度更高,能量主要通过界面滑移耗散,伴随不可逆损伤。而CF在循环荷载下主要表现为纤维逐步拔出,此过程虽导致刚度缓慢衰减,但纤维仍能通过滑移摩擦持续耗散能量,维持部分残余刚度。

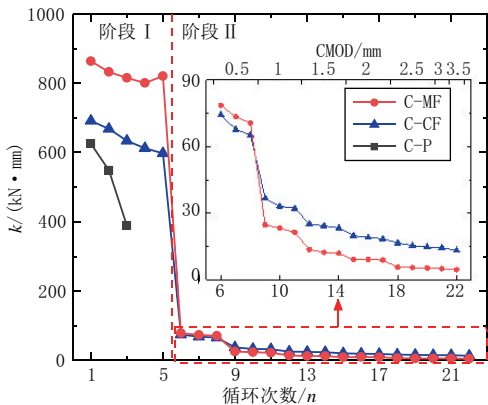


图5 三点弯梁试验中k随n变化关系

如图6所示,恢复系数R随CMOD和循环次数的变化规律与循环刚度类似,表明随着裂缝张口的增大以及反复加-卸载过程的持续进行,试件内部不可恢复变形逐渐累积,导致其变形恢复能力同步衰退。当CMOD=0.5 mm时,C-MF的恢复系数较C-CF高约2.6%~5.2%;然而,当CMOD超过0.5 mm后,C-MF的恢复系数快速下降至较C-CF低约1%~96%。

结果表明,在正常使用阶段(CMOD≤0.5 mm),钢锭铣削型钢纤维的高分散性能有效桥接微裂缝,抑制裂缝扩展并提升循环刚度与变形恢复能力。然而,随着CMOD进一步增大,因黏结强度高,C-MF中纤维断裂比例增加,桥接作用急剧减弱,其增益效果快速退化至弱于波浪型钢纤维。而C-CF的界面滑移虽造成累积滑移变形,但避免了应力突增,且波浪型纤维的几何特征在滑移中可重新建立摩擦平衡,从而延缓了性能退化。

如图7所示,试件破坏时,钢锭铣削型钢纤维多呈现纤维端部断裂的破坏模式,而波浪型钢纤维则主要表现为从混凝土基体中拔出的失效模式。两种

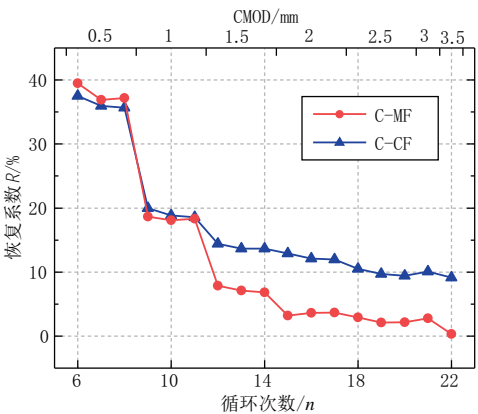


图6 三点弯梁试验中R随n变化关系

纤维在破坏模态及前述力学性能提升效果上的差异,根源在于其与混凝土相互作用的机理存在本质区别。

对于波浪型钢纤维,由于其表面较为光滑,与混凝土基体间的黏结效应较弱,主要在宏观裂缝形成后发挥作用。此时,纤维通过波形弯曲处形成的机械锚固效应,桥接裂缝并传递应力。随着裂缝宽度增大,纤维与基体间发生界面滑移,波形锚固结构逐渐被拉直导致锚固作用失效,最终呈现整体拔出的失效模式。

钢锭铣削型钢纤维则基于其粗糙表面赋予的强黏结效应以及端部机械锚固协同作用来传递裂缝间拉应力。这种强黏结特性使其能在宏观裂缝形成前便能分散或部分抵消内应力,从而有效抑制细微裂缝的产生与发展。此外,良好的黏结锚固效应大幅限制了纤维与基体间相对滑移趋势。随着裂缝扩展,纤维所受应力持续增大,当裂缝张开度超过纤维强度承载的临界极限值时,纤维将在应力集中显著的端部区域发生断裂。

4 结 语

通过开展三点弯曲梁试验,探讨了钢锭铣削型钢纤维混凝土在循环荷载下的基本力学性能,得到了以下结论。

(1)试件破坏时,钢锭铣削型钢纤维主要呈现端部断裂的破坏模态,而波浪型钢纤维主要呈现从混凝土基体中拔出的破坏模态,两者破坏模态及增强效果存在显著差异。

(2)循环加载上限对应的CMOD一定时,混凝土试件的循环刚度和恢复系数随加载次数的增加呈现减小趋势;循环加载上限对应的CMOD越大,混凝土试件的循环刚度和恢复系数越小。



图7 钢纤维破坏模式

(3)当纤维掺量为 60 kg/m^3 时,裂缝口张开位移小于 0.5 mm 时,相较于波浪型钢纤维,钢铰铣削型钢纤维在增强混凝土残余强度、循环刚度和变形恢复能力方面表现更为优异。

参考文献:

- [1] Zhang J, Li V C. Simulation of crack propagation in fiber-reinforced concrete by fracture mechanics[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(2): 333-339.
- [2] 韩宇晴,秦拥军,梁芮,等.钢纤维特征对UHPC力学性能影响及其机理研究[J].混凝土,2025(7):81-86;94.
- [3] 李妍,郭远哲.不同钢纤维类型对高性能混凝土抗折性能影响模拟分析[J].吉林建筑大学学报,2024,41(1):17-22.
- [4] 曹玉新.钢纤维类型对钢纤维混凝土性能影响的试验研究[J].兰州交通大学学报,2019,38(6):1-8.
- [5] C Gong, W Ding, K M Mosalam, *et al.* Comparison of the structural

behavior of reinforced concrete and steel fiber reinforced concrete tunnel segmental joints[J]. Tunnelling Underground and Space Technology, 2017(68): 38-57.

- [6] Wang X, Liu Y, Liu S. Effect of chloride-induced corrosion on bond performance of various steel fibers in cracked SFRC[J]. Cement and Concrete Composites, 2023(140): 105113.
- [7] 刘诗琪,刘玉擎,李永君,等.钢铰铣削型纤维增强混凝土的弯曲性能及韧性评估[J].结构工程师,2025,41(2):74-82;216.
- [8] An Q, Wang C, Xu J, *et al.* Experimental investigation on hard milling of high strength steel using PVD-AlTiN coated cemented carbide tool [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2014(43): 94-101.
- [9] Feng Hu, Sheikh M Neaz, Hadi M N S, *et al.* Pullout Behaviour of Different Types of Steel Fibres Embedded in Magnesium Phosphate Cementitious Matrix[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2019(13): 33.
- [10] Li D, Huang P, Chen Z, *et al.* Experimental study on fracture and fatigue crack propagation processes in concrete based on DIC technology[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020(235): 107166.
- [12] Xiang D, Liu S, Li Y, *et al.* Improvement of flexural and cyclic performance of bridge deck slabs by utilizing steel fiber reinforced concrete (SFRC)[J]. Construction and Building Materials, 2022(329): 127184.
- [13] 张明,张庆伟,景嘉骅.疲劳荷载作用下钢纤维高强混凝土梁刚度退化规律研究[J].混凝土,2018(3):32-34;39.
- [14] EN 14651-2005, CEN - European Committee for Standardization: Test method for metallic fibre concrete - measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual) [S].
- [15] Naaman A E. Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites[J]. Journal of advanced concrete technology, 2003, 1(3): 241-252.
- [16] Zhao M, Zhao M, Chen M, *et al.* An experimental study on strength and toughness of steel fiber reinforced expanded-shale lightweight concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018(183):493-501.
- [17] Fib Bulletin, Fib Model Code 2010 - final draft [S].