

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.02.016

不锈钢-混凝土层叠复合材料力学特性试验研究

金煜龙¹, 张博¹, 吴守军¹, 张庆宇², 马越¹

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 为改善混凝土的脆性并增强其韧性, 通过将开孔(孔径分别为6、8、10 mm)不锈钢薄片以层叠形式引入混凝土, 制备了不锈钢-混凝土层叠复合材料, 并系统开展了抗压、抗折与落锤冲击试验, 探究了不锈钢薄片开孔孔径和层数对其抗压、抗折与抗冲击性能的影响规律。结果表明: 不锈钢薄片的掺入显著提升了复合材料的综合性能, 其性能提升效果随孔径与层数的不同而呈现规律性变化, 其中抗压强度、抗折强度最大增幅分别达18.8%和42.3%, 能量吸收值最大提升至素混凝土的3.64倍; 荷载-位移曲线表明, 复合材料断裂韧性优异, 冲击试验显示其能有效抑制裂缝扩展。孔径10 mm、4层不锈钢薄片的复合材料在抗压与抗折强度、韧性及抗冲击性能之间实现了最佳平衡, 为最优参数组合。

关键词: 不锈钢薄片; 混凝土; 层叠复合材料; 抗压强度; 抗折强度; 抗冲击性能

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)02-0111-08

Experimental Study on Mechanical Characteristics of Stainless Steel-concrete Laminated Composites

JIN Yulong¹, ZHANG Bo¹, WU Shoujun¹, ZHANG Qingyu², MA Yue¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: To improve the brittleness and enhance the toughness of concrete, perforated stainless steel sheets (with aperture diameters of 6, 8, 10 mm) were introduced into concrete in a laminated configuration to fabricate stainless steel-concrete laminated composites. Systematic compression, flexural, and drop hammer impact tests were conducted to investigate the effects of aperture size and number of stainless steel sheet layers on the compressive strength, flexural strength, and impact resistance of the composites. The results show that the incorporation of stainless steel sheets significantly improves the overall performance of the composites, with the enhancement effects exhibiting regular variations with aperture size and layer count. The maximum increases in compressive strength and flexural strength reached 18.8% and 42.3% respectively, and the energy absorption value was increased up to 3.64 times that of plain concrete. The load-displacement curves indicate excellent fracture toughness of the composites, and the impact tests demonstrate their effective ability to inhibit crack propagation. Comprehensive analysis reveals that the composite with an aperture of 10 mm and four layers of stainless steel sheets achieves the best balance among compressive strength, flexural strength, toughness, and impact resistance, representing the optimal parameter combination.

Keywords: stainless steel sheets; concrete; laminated composites; compressive strength; flexural strength; impact resistance performance

收稿日期: 2026-01-11

修稿日期: 2026-02-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52179079)

作者简介: 金煜龙(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为混凝土耐久性。E-mail: 861036870@qq.com

通讯作者: 张博(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事再生混凝土、超高性能混凝土强度、变形及其耐久性研究工作。

E-mail: zbjllg732@163.com

混凝土是目前各类工程建设中应用最为广泛的建筑材料之一。随着建筑技术的不断进步,混凝土面临着日趋复杂的服役环境,人们对其性能的要求越来越高。此外,普通混凝土也存在着脆性大、韧性不足、抗折强度小等缺点,使其在工程应用中受到了一定的限制^[1-2]。

层叠材料的概念源于自然界中许多生物材料的结构,如木材的纤维排列、贝壳的层状构造等,这些天然材料以其质轻、高强度和优异的韧性而著称^[3]。层叠复合材料由物理、化学性能不同的材料层叠而成,这种特殊的复合能极大地改善材料的断裂韧性、冲击韧性、磨损、腐蚀等许多性能,对某些脆性材料还能通过与塑性材料的复合来克服其变形能力差的缺点^[4]。例如,Chen 等^[5]制备了一系列由聚丙烯(PP)和填充了膨胀型阻燃剂(IFR)的 PP(PP-IFR)组成的交替多层复合材料,研究了 IFR 的多层分布对 PP 基体燃烧性能和力学性能的影响。结果表明,随着层数的增加,断裂伸长率明显增强,产生于 PPFR 层的裂纹被相邻 PP 层在层界面处抑制,这为具有优良力学性能的阻燃复合材料的设计提供了一条有效的途径。Xia 等^[6]采用多层共挤法制备了云母呈多层分布的低密度聚乙烯(LDPE)/云母复合材料,研究了层数对多层复合材料力学性能的影响。研究发现,随着层数的增加,大部分云母粉料分层成薄片,并与流动方向平行,增强云母在流动方向上的取向,提高材料的刚度。目前工业上对材料性能的要求越来越高,因而促使人们不断完善工艺以创造出适应工业需要的新加工技术来获得更高性能的层叠复合材料。上述研究启示,通过精巧的叠层结构设计可有效调控复合材料的破坏模式与性能。本文将这一理念引入混凝土增强领域。

在土木工程中,为改善混凝土韧性,掺入钢纤维是广泛应用的技术,但其增强效果受纤维分散均匀性及纤维-基体界面粘结强度的制约,且在冲击荷载下易被拔出^[7]。另一方面,多孔金属(如泡沫金属)与混凝土的复合研究,多着眼于利用其整体多孔结构实现轻量化或吸能,但混凝土往往仅作为填充体,其力学性能的主动提升有限^[8]。与上述两种途径相比,本研究提出一条本质不同的新思路:将预开孔的不锈钢薄片作为设计性增强相,以可控的层叠形式置入混凝土。其核心创新在于:①结构创新:摒弃了随机分布的短纤维或整体多孔块体,采用平面二维薄片的多层有序排列,从而实现对裂缝扩展路径的“面内”连续约束。②界面创新:通过在薄片上设计特定孔径(6、8、10 mm)与“W”形错位布局,

主动构造与混凝土骨料间的优化机械咬合界面,而非依赖单一的水化粘结或物理附着。这旨在协同提升应力传递效率和界面耗能能力。

不锈钢材料具有耐腐蚀性、易于维护、力学性能良好等优点,受到国内外诸多学者的关注,在建筑结构中得到广泛应用^[9-10],尤其是不锈钢的自愈性钝化膜为其在受损后提供了自我修复的能力,进一步增强了材料的长期稳定性^[11-13]。多孔金属材料具备孔隙结构,优化其孔结构可使多孔金属材料具备优异的力学性能和物理性能^[14-17]。本研究创新性地将“多孔”与“层叠”概念结合于不锈钢薄片,旨在同时利用不锈钢的高强度、高韧性以及孔结构的界面锚固优势,通过薄片层叠实现跨尺度的协同增强,以期突破传统混凝土增强方法在兼顾强度、韧性与抗冲击性能方面面临的瓶颈。

为改善混凝土的脆性,增强其韧性,并验证上述“开孔薄片层叠”设计理念的有效性,本文通过改变不锈钢薄片的层数(3层、4层)和孔径(6、8、10 mm),制备了一系列不锈钢-混凝土层叠复合材料试件,并对其进行了抗压、抗折及抗冲击性能测试。通过对比不同试件的荷载-位移曲线和裂纹扩展特性,系统探究不锈钢薄片开孔孔径和层数对其宏观力学行为的影响规律,并从界面咬合与约束机制角度阐释其增强增韧机理,最终确定综合性能最优的参数组合,以期为发展新一代高韧性、高抗冲击混凝土复合材料提供新的设计策略与依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用水泥为冀东牌 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥,相关性能指标见表 1,筛去粒径大于 5 mm 以上的颗粒,其级配曲线如图 1 所示,所用细骨料为天然河砂,其相关性能见表 2。

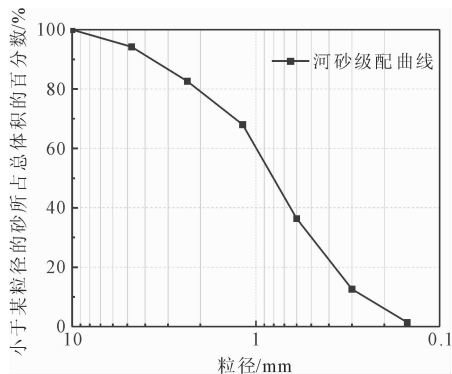


图 1 细骨料级配曲线

表 1 水泥的特征参数

密度 /(g· cm ⁻³)	比表面积 /(m ² · kg ⁻¹)	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
3.1	340	160	220	31.35	48.67	5.6	8.7

表 2 细骨料性能指标

吸水率 /%	表观密度 /(kg·m ⁻³)	堆积密度 /(kg·m ⁻³)	含泥量 /%	细度 模数
5.3	2640	1570	1.1	2.83

试验所用不锈钢薄片为 316L 不锈钢,材料的化学成分见表 3,力学性能见表 4。

表 3 316L 不锈钢的化学成分(质量分数%)

C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	P	S	N	Fe
0.015	18	11	2	0.74	2	0.029	0.027	0.04	余量

表 4 316L 不锈钢的力学性能

屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	伸长率 δ /%
205	520	40

1.2 试件制备

1.2.1 配合比设计

试验经过适配后设计的水灰比为 0.39,减水剂含量占胶凝材料的 1%(质量分数),具体用量见表 5。

表 5 试件配合比设计

配料	水	水泥	砂子	减水剂
用量/(kg·m ⁻³)	220	563	1530	5.63

1.2.2 不锈钢薄片制备

试验所用不锈钢薄片(厚度 0.1 mm)尺寸为 35 mm × 150 mm,并根据试验设计要求用不同孔径的打孔器在薄片上以“W”形错位打孔,错位打孔的设计有助于提高不锈钢薄片与混凝土基体之间的粘结力。这种设计可以增加接触面积,从而提高粘结效果。此外,“W”形错位能够提供更好的应力分布,减少集中应力,从而提高材料的抗裂性和耐久性。孔径分别为 6、8、10 mm,每种孔径的薄片均打有 10 个孔(图 2)。孔的设计和布局旨在优化不锈钢与混凝土之间的粘结性能。

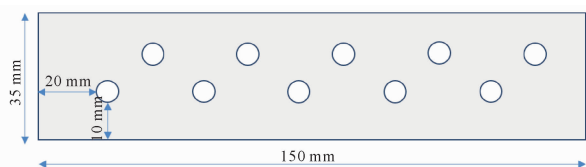
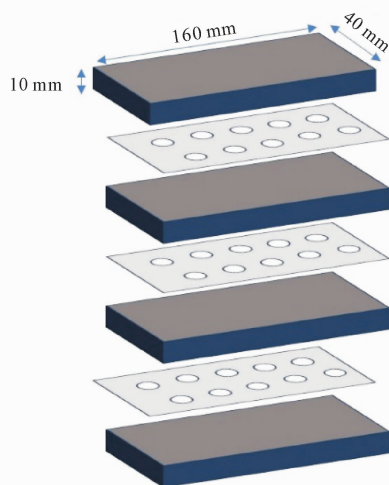


图 2 不锈钢薄片示意图

1.2.3 层叠复合材料制备

层叠复合材料样品按照表 1 中的配合比利用混凝土搅拌机在试验室制备。首先将水泥和细骨料在搅拌机混合搅拌 30 s,随后缓慢加入计量好的水和减水剂,持续搅拌 8~10 min 以确保均匀混合。在浇筑过程中,将不锈钢薄片按照预定的层数和方式均匀分布在混凝土中,以实现最佳的力学性能。浇筑完成后,使用振动台进行 1 min 的振动密实,如图 3 所示。随后覆盖保鲜膜以防止水分蒸发,并在 20℃ 的室内静置 24 h,之后拆模、标号并进行标准养护。共制作尺寸为 40 mm × 40 mm × 160 mm 的试件 14 组,其中 3 层、4 层对应的三个不同孔径以及素混凝土各两组,试件编号如表 6 所示。



(a) 三层不锈钢薄片层叠示意图



(b) 不锈钢薄片铺设



(c) 不锈钢薄片层叠实物

图 3 层叠复合材料制备示意图

表 6 试件编号

层数	不同孔径的试件编号		
	6 mm	8 mm	10 mm
3	6-3	8-3	10-3
4	6-4	8-4	10-4

1.3 力学特性试验

标准养护至规定龄期后(28 d)进行抗压强度、抗折强度和抗冲击性能测试。抗压强度测试在 30 t 液压伺服试验机下进行,采用 2.4 kN/s 的加载速率进行连续、均匀加载。抗折强度测试使用 MTS 微机控制电子万能试验机进行跨中加载,加载速率为 0.2 mm/min,跨距为 100 mm。抗冲击性能测试采用落锤冲击仪进行试验,落锤重量为 2.5 kg,冲击能量为 12.25 J;将落锤高度调整到 50 cm 后保持落锤静止,松开绳子后使落锤垂直落下冲击试件。

2 试验结果与分析

2.1 抗压强度

不同不锈钢孔径和层数的层叠复合材料的抗压强度如图 4 所示。不锈钢-混凝土层叠复合材料的抗压强度显著优于素混凝土。不锈钢薄片孔径为 6、8、10 mm 时,含 3 层和 4 层不锈钢薄片的层叠复合材料的抗压强度比素混凝土分别提高了 17.4%、6.7%;18.8%、12.4%;16.7%、12.1%。试验条件下,孔径为 8 mm、层数为 3 层的复合材料的抗压强度最高,为 83.4 MPa。

在层数方面,层叠复合材料抗压强度的提升并非随层数的增加而线性增长,含有 4 层不锈钢薄片混凝土的抗压强度明显低于含有 3 层不锈钢薄片的混凝土。不锈钢薄片的引入增加了混凝土的面内整体性,通过不锈钢与混凝土基体之间的粘结作用,提高了复合材料的整体承载能力。

在孔径方面,随着孔径的提升,层叠复合材料的抗压强度呈先上升后下降的趋势,在孔径为 6 mm 的情况下,较小的孔径可能导致不锈钢薄片在混凝土基体中的分布过于密集,从而在局部区域形成应力集中,降低了复合材料的整体均匀性和延展性。但当孔径增大到 10 mm 时,不锈钢薄片的支撑作用减弱,使得复合材料在受力时更容易发生局部破坏,从而降低了整体的抗压强度。相比之下,孔径为 8 mm 的不锈钢薄片在混凝土基体中的分布更为均匀,应力分布也更为合理,减少了应力集中的可能性,从而提高了复合材料的整体抗压强度。

研究表明,不锈钢的层数相比于孔径对层叠复合材料的抗压强度有更大的影响,不锈钢层数对混凝土强度的增加效应是孔径增加效应的 1.5~2.0 倍。总体而言,不锈钢的引入显著增强了混凝土的抗压强度,显示了其优良的面内整体性和高强度特性。

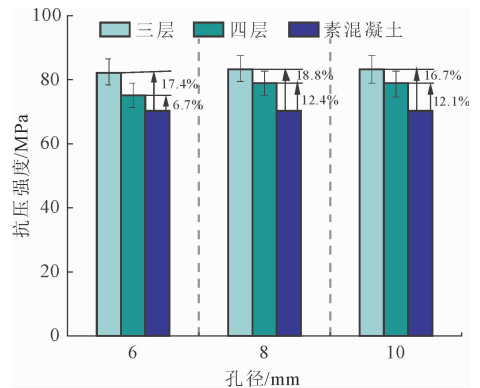


图 4 抗压试验中孔径与层数的影响

2.2 抗折强度

2.2.1 抗折强度现象及分析

不同不锈钢孔径和层数的层叠复合材料的抗折强度如图 5 所示。所有含不锈钢薄片的层叠复合材料的抗折强度都明显优于素混凝土。不锈钢薄片孔径为 6、8、10 mm 时,含 3 层和 4 层不锈钢薄片的层叠复合材料的抗折强度比素混凝土分别提高了 27.2%、39.7%;16.6%、27.7%;30.4%、42.3%。特别是孔径为 6 mm、层数为 4 层和孔径为 10 mm、层数为 4 层的层叠复合材料的抗折强度相较于素混凝土均提升超过了 39%,表现出优异的抗折性能。

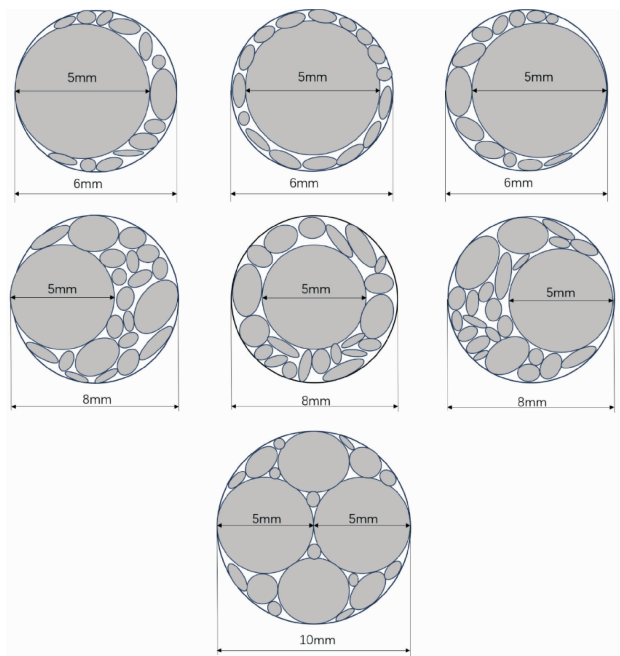


图 5 骨料架桥现象诱发界面缺陷示意图

在层数方面,含有 4 层不锈钢薄片混凝土的抗折强度明显高于 3 层不锈钢薄片的混凝土抗折强度,层数的增加增强了混凝土的粘合,降低滑移风险,带来更高的强度和稳定性。

在孔径方面,随着孔径的提升,层叠复合材料的抗折强度呈先下降后上升的趋势。试验所用细骨料最大粒径为 5 mm。如图 6 所示,在孔径为 6 mm 的情况下,因孔径较小,有效粘结面积增大,显著增强摩擦粘结,但易引发骨料架桥现象^[18],导致局部应力集中。在孔径为 8 mm 的情况下,层叠复合材料抗折强度出现谷值,骨料既不能有效填充,也无法形成嵌固,削弱机械咬合作用,导致粘结应力下降^[19-20],界面薄弱区比例升高。在孔径为 10 mm 的情况下,实现双骨料协同嵌固,混凝土在孔内形成连续受力骨架^[21],最大化提升荷载传递效率。

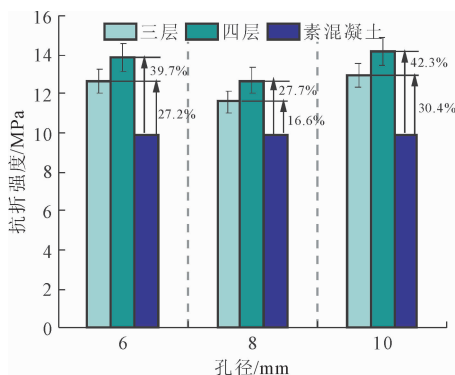


图 6 抗折试验中孔径与层数的影响

不锈钢层数对混凝土强度的增加效应大于孔径的增加效应。不锈钢-混凝土层叠复合材料强度的提升是受不锈钢薄片及其孔径的相互影响。方差分析结果表明,不锈钢层数和孔径对层叠复合材料强度的影响分别为: $F_{(层数)} = 3.72, P_{(层数)} < 0.001$; $F_{(孔径)} = 1.60, P_{(孔径)} < 0.01$ 。这些结果表明,不锈钢层数对抗折强度有显著的正向影响,其影响程度大于孔径的影响;二者交互作用对其强度的影响为: $F_{(交互)} = 1.32, P_{(交互)} = 0.05$,层数和孔径的交互作用对抗折强度的影响也显著。

2.2.2 荷载-位移曲线分析

不同不锈钢孔径和层数的层叠复合材料及素混凝土的荷载-位移曲线如图 7 所示。素混凝土曲线在达到峰值荷载后急剧跌落,呈现出典型的脆性断裂特征^[22]。反之,所有层叠复合材料曲线均表现出显著的延性变形特征,其力学响应可分为三个阶段:(I)线弹性阶段:混凝土基体与不锈钢薄片协同承

力;(II)塑性强化阶段:混凝土微裂纹萌生并扩展,不锈钢薄片通过连续约束效应^[23]与界面摩擦黏结抑制裂纹快速发展。薄片作为整体增强层,通过应力重分布延缓裂缝贯通,曲线斜率减缓并升至更高峰值;(III)下降段:不锈钢薄片通过持续摩擦拔出、变形等方式吸收能量,曲线缓慢下降,表明材料在破坏后仍能维持部分承载力。

对比不同参数曲线可知,孔径与层数显著影响层叠复合材料的强化机制与失效模式。在承载能力方面,10-4 组表现出最高峰值荷载,其抗折强度较素混凝土提升 42.3%,这主要得益于 10 mm 大孔径为粗骨料提供了充分的嵌固空间,形成了高效的连续受力骨架^[21]。然而,在表征韧性^[24](即曲线下面积)方面,6-4 组表现最优,其能量吸收能力为素混凝土的 6.7 倍,且下降段最为平缓。这是因为 6 mm 小孔径提供了更大的界面接触面积和更强的机械咬合力,使不锈钢薄片在混凝土开裂后经历了一个更稳定、持续的“逐步拔出”过程,从而耗散了更多能量。该对比表明,大孔径(10 mm)主要通过骨料嵌固优化强度,而小孔径(6 mm)则通过增强界面相互作用最大化增强韧性。

2.2.3 弯曲韧性分析

为定量评价层叠复合材料在极限承载力前的能量吸收能力,本研究采用文献^[25]所述方法,计算荷载-位移曲线从原点至峰值荷载点所围成的面积作为能量吸收值。选取该计算终点的主要原因是:素混凝土在达到峰值荷载后发生脆性断裂,其荷载骤降,峰值后能量吸收可忽略不计;为建立所有试件间统一的对比基准,故分析中均统一截取至峰值位移处^[26]。本方法所定义的能量吸收值,主要用于评价材料在达到最大承载能力之前的韧性与能量耗散能力,尤其适用于比较脆性材料与延性增强材料在破坏模式上的根本差异。其计算结果反映了材料在开裂、损伤演化直至峰值荷载过程中通过内部界面摩擦、增强体变形与基体微开裂所耗散的总能量。然而,该方法未直接反映峰值荷载后的残余承载力与变形能力,因此与传统弯曲韧性指数^[27]在物理含义与评价侧重点上有所不同。弯曲韧性指数更侧重于评价材料在开裂后维持一定承载能力的“延展性”,而本研究所采用的峰值前能量吸收值则更侧重于表征材料在完全破坏前的损伤容限^[28]与整体能量吸收潜力。两者均从不同角度反映了材料的韧性特征,在实际工程选用时可互为补充。

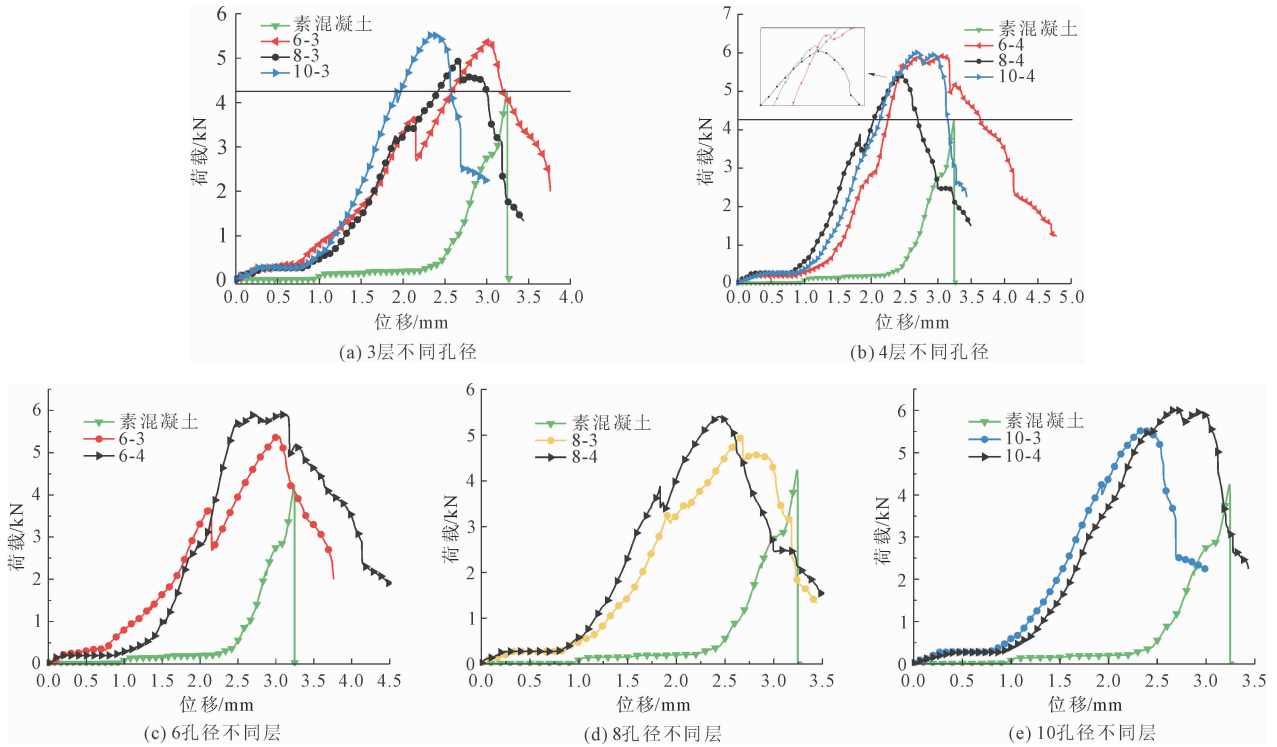


图 7 试件荷载-位移曲线

各组试件的能量吸收值如图 8 所示,具体数值及相对于素混凝土的增益比列于表 7。计算结果表明,所有掺入不锈钢薄片的层叠复合材料,其能量吸收值均显著高于素混凝土,说明不锈钢薄片的引入极大地提升了材料的整体耗能能力与韧性。其中,6-4 组表现最优,达 6.89 J,为素混凝土的 3.64 倍。在相同层数下,6 mm 孔径试件的能量吸收值普遍最高,这是因为较小孔径提供了更大的有效粘结面积和更强的机械咬合力,使不锈钢薄片在混凝土开裂后经历更稳定、持续的摩擦拔出过程,从而耗散更多能量。对于同一孔径,4 层结构的能量吸收值均高于 3 层结构,增加层数相当于增加了能量耗散的界面与约束,从而提升了层叠复合材料的整体延性与抗断裂性能。值得指出的是,6-4 组虽在能量吸收(韧性)上表现最优,但结合前文抗压与抗冲击性能数据,其综合性能并非最佳。10-4 组的能量吸收值为 5.47 J,虽略低于 6-4 组,但仍达到素混凝土的 2.89 倍,且其抗压、抗折及抗冲击性能更为均衡。这进一步印证了“小孔径(6 mm)主要最大化界面耗能,而优化孔径(10 mm)在保证优异强度的同时,仍能提供可观的韧性”的结论。

综上,能量吸收值的定量分析从能量耗散角度清晰揭示了层叠复合材料的增韧机理:不锈钢薄片通过界面摩擦、自身变形及约束裂纹扩展等多重机

制,将材料的破坏模式从素混凝土的脆性断裂转变为显著的延性破坏,从而大幅提升了韧性。

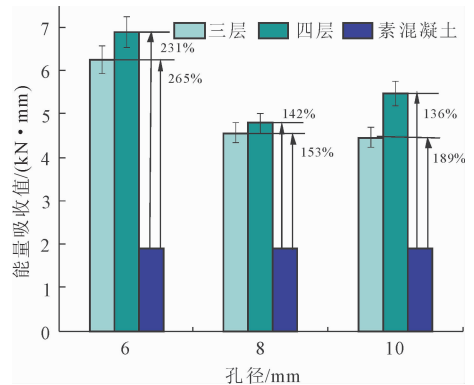


图 8 试件能量吸收值

表 7 试件能量吸收具体值与增益比

试件编号	能量吸收值/(kN·mm)	增益比
素混凝土	1.89	1.00
6-3	6.26	3.31
6-4	6.89	3.64
8-3	4.57	2.42
8-4	4.79	2.53
10-3	4.46	2.36
10-4	5.47	2.89

2.3 抗冲击性能

不同不锈钢孔径和层数的层叠复合材料受落锤

冲击破坏后的形态如图 9 所示,并与养护 28 d 的抗压强度为 120 MPa,抗折强度为 21 MPa 的超高性能混凝土(UHPC)做了比较。结果显示,素混凝土完全破碎,这表明在没有增强材料的情况下,混凝土的抗冲击性能有限,在受力后快速发生脆性断裂。6-3 组在破坏后,第一层不锈钢薄片断裂,混凝土部分受损。这说明在较小层数的情况下,不锈钢薄片虽然提供了一定的增强作用,但在冲击荷载下仍会发生局部破坏;6-4 组虽不锈钢薄片无损,但混凝土损坏严重,层数的增加未能有效控制裂缝的发展。这表明在较小孔径下,单纯依靠增加层数可能不足以提高层叠复合材料的抗冲击性能。其他层叠复合材料则产生不同程度的裂缝。

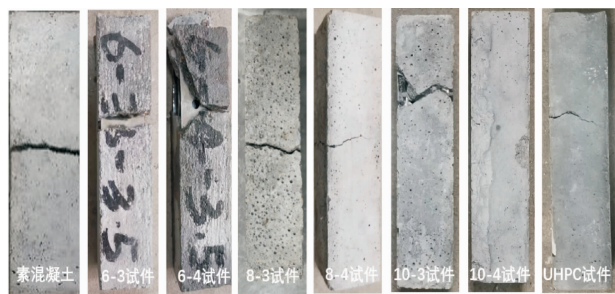


图 9 冲击破坏后的裂缝形态

不同不锈钢孔径和层数的层叠复合材料冲击后的裂缝深度和宽度如图 10 所示。所有层叠复合材料均比素混凝土有更好的抗冲击性能,尤其是孔径为 10 mm,层数为 4 的层叠复合材料,其抗冲击能力和裂缝控制均优于其他试件。不锈钢薄片的加入普遍提升了混凝土的抗冲击能力,尤其当层数由 3 层增加到 4 层时。通过叠加金属薄片,特别是使用高强度、高韧性的不锈钢,层叠复合材料的抗冲击能力得以显著增强。不锈钢薄片的存在有助于限制破坏范围,分散冲击力量,降低应力集中,从而保护层叠复合材料免受重大损害。

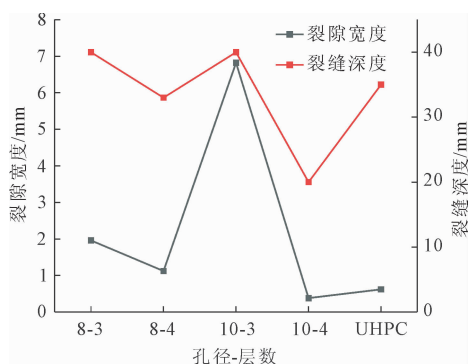


图 10 冲击试验中孔径、层数的影响

结合抗压、抗折、抗冲击试验,10-4 层叠复合材料在强度与抗冲击性能方面均表现优异,相比之下,6-4 层叠复合材料虽有更强的韧性,但其抗压强度与抗冲击性能均表现较差,因此,综合来看,孔径为 10 mm,层数为 4 的层叠复合材料为最优组合。

2.4 讨论

本研究观察到,在抗压试验中,3 层不锈钢薄片增强的层叠复合材料性能普遍优于 4 层结构(见图 4);而在抗折试验中,4 层结构则表现出比 3 层结构更高的抗折强度(见图 6)。该差异源于混凝土与不锈钢在抵抗不同性质荷载时所发挥的作用机理存在本质区别。具体而言,这反映了复合材料在不同受力模式下,“基体主导”与“增强相主导”两种承载机制的转换。

值得注意的是,本研究所采用的落锤冲击试验方法(锤重 2.5 kg,冲击能量 12.25 J)主要服务于材料层次的性能对比与机理揭示。其试验条件(低频、单次低能量冲击)可对应于实际工程中诸如小型工具坠落、低速碎屑撞击等局部冲击工况。结果表明,不锈钢层叠复合材料在此类冲击下能有效控制裂缝发展、提升损伤容限^[30],这为其在需要局部抗冲击的构件(如防护板、桥面铺装层、设备基础等)中的应用提供了依据。然而,对于更高能量、更复杂的冲击荷载(如车辆碰撞、爆炸冲击波),其动态响应与防护效能仍需通过更接近真实场景的足尺试验或精细化数值模拟进行进一步评估与验证。本研究的结果为后续面向特定工程场景的抗冲击设计与材料优化奠定了重要的基础。

3 结论

本文通过试验研究了不锈钢薄片孔径和层数对混凝土层叠复合材料力学性能的影响,主要得出以下结论:

(1) 不锈钢薄片的引入显著提升了混凝土的抗压、抗折强度与抗冲击性能,其孔径大小和层数对混凝土性能的提升均具有显著影响。其中抗压强度最大提升 18.8%,抗折强度最大提升 42.3%,能量吸收值最大提升至素混凝土的 3.64 倍。

(2) 荷载-位移曲线分析表明,层叠复合材料表现出优异的延性和能量吸收能力,破坏模式由素混凝土的脆性断裂转变为明显的塑性变形。

(3) 抗压与抗折试验揭示了性能优化目标的差异,其中抗压强度受益于更厚的混凝土层(3 层),而抗折强度与韧性则随不锈钢层数增加(4 层)而增

强。冲击试验表明,4 层结构普遍优于 3 层。

(4) 综合所有性能,孔径 10 mm、层数 4 层的试件(10-4)在强度、韧性和抗冲击性能之间取得了最佳平衡,被视为最优参数组合。为发展高韧性混凝土层叠复合材料提供了新思路。

参考文献:

- [1] 李宗方,张涪民,陈亮. 镀镍碳纤维改性混凝土的力学性能及改性机理研究[J]. 功能材料,2025,56(3):3143-3149.
- [2] 沈才华,钱晋,陈晓峰,等. 纤维掺量对 PVA 纤维混凝土力学参数的影响及压缩韧性指标的计算方法[J]. 硅酸盐通报,2020,39(10):3152-3160.
- [3] 黄志强,石行波,陈商涛,等. 中空容器专用 HDPE (HD5502GA)/nano-MMT 复合材料力学性能分析[J]. 橡塑技术与装备,2020,46(10):41-44.
- [4] 黎帮高,陈商涛,石行波,等. 微纳层叠复合材料力学性能的增强机理[J]. 工程科学学报,2023,45(3):380-388.
- [5] Chen B S, Gao W L, Shen J B, et al. The multilayered distribution of intumescent flame retardants and its influence on the fire and mechanical properties of polypropylene[J]. Compos Sci Technol, 2014,93:54-60.
- [6] Xia L C, Wu H, Guo S Y, et al. Enhanced sound insulation and mechanical properties of LDPE/mica composites through multilayered distribution and orientation of the mica[J]. Compos A Appl Sci Manuf, 2016,81:225-233.
- [7] 陈猛,冯珺,张通. 超高性能混凝土高温后动态劈裂抗拉性能[J]. 建筑材料学报,2025,28(2):118-126.
- [8] 熊云龙. 多孔金属-混凝土组合试件基础力学性能试验分析[D]. 湘潭:湖南科技大学,2020.
- [9] 张浩,袁森,苏明周,等. 拉剪复合作用下不锈钢槽式预埋组件力学性能[J]. 工程力学,2025,42(8):169-186.
- [10] 班慧勇,梅懿潇,石永久. 不锈钢复合钢材钢结构研究进展[J]. 工程力学,2021,38(6):1-23.
- [11] Xiao Ying, Lin Bing, Tang Junli, et al. Effect of elastic tensile stress on the pitting corrosion mechanism and passive film of 2205 duplex stainless steel[J]. Electrochimica Acta, 2024,477:143765.
- [12] 闫星宇,邹德宁,李苗苗,等. 含铜 430 不锈钢在模拟生理盐水环境下的耐蚀性能研究[J]. 材料保护,2023,56(11):45-52.
- [13] 先科龙,肖莹,张海龙,等. 316L 不锈钢表面耐蚀硫化物原位制备与在不同含氯介质中腐蚀防护作用研究[J]. 表面技术,2025,54(14):79-91.
- [14] 贾桥瑞,王晓花,刘杰,等. 多孔 CoCrNi 中熵合金的力学性能和吸能特性分析[J]. 稀有金属材料与工程,2024,53(4):1149-1154.
- [15] 张凯,吴引江,刘高建,等. 高孔隙率金属多孔材料的制备技术与应用[J]. 中国材料进展,2023,42(10):814-825.
- [16] 由宝栋,朱明伟,杨鹏举,等. 合金相分离制备多孔金属材料的研究进展[J]. 材料研究学报,2023,37(8):561-570.
- [17] 郑敏,杨瑾,张华. 多孔金属材料的制备及应用研究进展[J]. 材料导报,2022,36(18):78-93.
- [18] 张海虎,吴润华,钱劲松. 蓄盐材料、蓄盐沥青混合料性能的研究进展[J]. 材料导报,2025,39(16):76-89.
- [19] 邓明科,范洪侃,马福栋,等. 高延性混凝土与带肋钢筋黏结性能试验研究[J]. 工程力学,2023,40(3):78-87.
- [20] 王博,白国良,李坚,等. 钢筋与再生混凝土粘结应力分布的试验研究及理论分析[J]. 工业建筑,2012,42(4):10-14.
- [21] Sami Y, Elrab R M G, Elshaer Y. Modeling of mechanical behavior of notched composite laminates[J]. International Journal of Computer Applications, 2013,71(8):15-20.
- [22] 慕儒,王晶晶,卿龙邦,等. 定向钢纤维增强水泥基复合材料脆性断裂分析[J]. 东南大学学报(自然科学版),2024,54(2):294-302.
- [23] 徐传昶,马乃轩,朱经纬,等. 高强聚氨酯复合材料加固混凝土梁抗弯性能研究[J]. 工业建筑,2024,54(3):227-235.
- [24] 邓宗才,李华春,黄松. 混杂纤维超高性能混凝土弯曲韧性与抗冲击性能[J]. 哈尔滨工程大学学报,2025(12):1-9.
- [25] 雷文杰,李庶林,周爱民,等. 关于素混凝土与钢纤维混凝土受压韧性的试验研究[J]. 矿业研究与开发,2003(1):52-54.
- [26] 王意,黄俊. 玄武岩纤维混凝土受压变形性能与韧性试验研究[J]. 四川建筑,2018,38(6):265-268.
- [27] 冯玲. 微细钢纤维高强混凝土[D]. 郑州:郑州大学,2011.
- [28] 陈全胜,侯圣均,蒋晨晨,等. 钢-混凝土-ECC 组合梁受弯性能试验研究与有限元分析[J]. 建筑结构学报,2022,43(S1):136-146.
- [29] 朱利帅,谢群,惠婧,等. PVA-铁尾矿砂混凝土抗折性能研究[J]. 硅酸盐通报,2024,43(2):593-602.
- [30] 雷平. 多尺度纤维增强水泥基复合材料静动态力学性能研究[D]. 昆明:云南农业大学,2024.