

微波照射下钢筋混凝土黏结强度损伤演化

戴俊,杨凡,李栋烁,薛贵堂,负菲菲

(西安科技大学 建筑与土木工程学院,陕西 西安 710000)

摘要:为了寻求一种在钢筋混凝土结构中无噪、无尘的钢筋回收方法,将钢筋混凝土试件经不同功率微波照射后,通过钢筋拉拔试验测试微波对钢筋与混凝土界面黏结强度的影响,并绘制黏结应力-钢筋滑移量(τ - s)曲线。结合理论分析,推导出微波作用下钢筋与混凝土黏结界面损伤演化方程,绘制出损伤演化特征曲线。研究表明:5 000 W 微波照射后,黏结强度仅为 0 W 微波照射后的 1/3。在微波照射下黏结强度显著降低,且黏结强度对 1 500~3 500 W 的微波变化较敏感。随微波功率提高,拉拔破坏形式由拉拔劈裂逐渐转变为拉拔滑移,高功率微波照射后,混凝土在不发生拉拔劈裂的情况下能直接将钢筋拔出。通过有限元软件对试验过程进行模拟,模拟结果与试验结果相符。

关键词:微波;钢筋;黏结界面;损伤;数值模拟

中图分类号:TU528

文献标志码:A

0 引言

随着建筑行业不断发展,大量旧钢筋混凝土结构面临拆除,为避免大量可用建材浪费,有学者提出了钢筋混凝土回收再利用的观点^[1]。以往钢筋混凝土回收过程都是采用切割机或破岩机等将混凝土进行破碎^[2-3],然后筛选出钢筋和骨料等具有二次利用价值的材料,从而实现废弃资源再利用。钢筋混凝土结构拆除问题主要出现在城市,且传统机械法存在噪音和粉尘污染的缺陷,不符合现代城市绿色发展理念,机械破碎后块度较大,极不利于运输。因此,有必要探寻一种环保、经济和高效的钢筋混凝土回收新方法。

近年来,微波技术逐渐兴起,由于微波具有独特性质^[4],诸多国内外学者将微波用于辅助破岩,并进行了大量研究。文献[5-7]通过对比微波辅助机械研磨矿物和纯机械研磨矿物总电力消耗量,得出微波辅助下研磨消耗的电力仅为纯机械研磨达到同样粉碎程度所消耗电力的 50%,证明了微波的高效性和节能性。文献[8-9]通过有限元建立二相模型来研究微波破岩机理,证明微波是利用不同矿物吸波性能和热力学性能的差异,使矿物产生不均匀膨胀从而使岩石破裂。文献[10-14]通过微波照射岩石,分析不同种类岩石在微波照射下升温特性及破损现象,证明不同岩石具有不同的吸波性质,得出微波加热具有选择性和穿透性,且进一步论证了微波破岩机理。综上所述,微波可穿透岩石使其发生整体微观损伤,且在破岩过程中具有无噪、无尘的特点,有望改进传统钢筋混凝土回收方法。目前,已有学者对混凝土结构中微波辅助剔选骨料进行了大量研究^[15-18],利用微波选择性加热的特点成功将骨料与混凝土分离,但钢筋的回收过程存在的效率低、污染严重等问题仍没有得到有效解决。基于此,本文对微波照射下钢筋与混凝土界面黏结强度损伤演化过程进行试验,以寻找环保、经济、高效的钢筋回收方法。

1 试验内容

1.1 试验设计

试验参考 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[19],采用 42.5 级普通硅酸盐水

基金项目:国家自然科学基金项目(51174159);陕西省教育厅专项科学研究基金项目(15JK1471)

作者简介:戴俊(1964-),男,陕西西安人,教授,博士,主要研究方向为岩土工程。

收稿日期:2019-09-06

泥和长度为 250 mm、直径为 16 mm 的 HRB400 级钢筋制作钢筋混凝土试件,试件示意图如图 1 所示。

将钢筋嵌入尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm 的混凝土中,黏结长度为钢筋与混凝土中心 40 mm。为避免拉拔试验中黏结段端部出现应力集中而造成提前退出工作的现象,在黏结段两端各设置 55 mm 长的聚氯乙烯 (poly vinyl chlorid, PVC) 管,用来传递拉拔应力,并在钢筋与 PVC 管间用泡沫填充,防止混凝土浆液流入,形成对称的未黏结段。

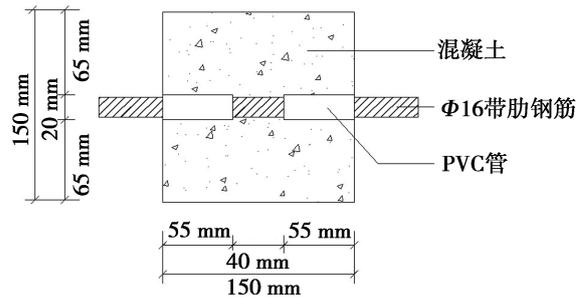


图 1 钢筋混凝土试件示意图

采用高功率微波炉对标准养护试件进行 10 组不同功率的微波照射试验,照射时长均为 5 min,功率参数分别设定为 0 W、700 W、1 000 W、1 500 W、2 000 W、2 500 W、3 000 W、3 500 W、4 000 W 和 5 000 W。待自然冷却至室温后,采用 RFP-09 型智能测力仪进行拉拔试验,加载速率为 0.2 kN/s。采集拉拔试验过程中拉拔力 (黏结应力) 与钢筋滑移量散点值,对散点数据进行整理,用 Origin 软件绘制曲线,并进行曲线方程拟合。将拉拔试验后的试件沿钢筋轴向劈裂,拍照并记录其黏结界面破坏形式。试验所用的微波炉和智能测力仪分别如图 2 和图 3 所示。



图 2 试验所用的微波炉



图 3 智能测力仪

1.2 试验结果及分析

对 10 组拉拔试验过程中采集的试验数值进行四段式拟合,拟合后所得的黏结应力-钢筋滑移量 (τ - s) 曲线如图 4 所示,仅展示 0 W (不进行微波照射)、3 000 W 和 5 000 W 这 3 组的拟合曲线。图 4 中,RC 代表钢筋混凝土试件,RC 后的 4 位数字中,末尾 2 位代表同条件下试件编号 (如 01 表示 01 号试件),前 2 位数字代表微波功率 (如 30 表示微波功率为 3 000 W,00 表示无微波照射)。

图 4a 为无微波照射的试件在拉拔力作用下的 τ - s 曲线,曲线前两阶段黏结应力增长迅速,黏结应力峰值将近 15 MPa,对应钢筋滑移量仅为 2 mm。图 4b 为 3 000 W 微波照射后的试件在拉拔力作用下的 τ - s 曲线,该功率下曲线前两阶段增长速率较 0 W 微波照射时明显降低,应力峰值也降低到约 9 MPa。图 4c 为 5 000 W 微波照射后的试件在拉拔力作用下的 τ - s 曲线,曲线前两阶段的增长速率非常小,且黏结应力峰值仅为 5 MPa,对应钢筋滑移量增大到 13 mm,相比于无微波照射的试件,黏结应力峰值 (黏结强度) 仅为 0 W 微波照射后的 1/3。

图 4 中 3 条曲线整体变化趋势比较类似。分别对 4 个阶段进行分析:第 1 阶段称为初始滑移段,该阶段黏结应力随钢筋滑移量增大而线性增长,可认为钢筋与混凝土未发生相对滑动,仅产生弹性变形,此时黏结应力全由化学胶着力提供。第 2 阶段称为滑移段,黏结应力仍随钢筋滑移量增大而增长,但曲线斜率逐渐降低,最终达到钢筋混凝土黏结强度,该阶段部分黏结界面处产生相对滑动,相对滑动部位化学胶着力逐渐退出工作,随即产生了机械咬合力,代替化学胶着力继续承担黏结作用,当达到峰值时,化学胶着力基本完全退出了工作。第 3 阶段称为下降段,随钢筋滑移量继续增大,黏结应力减小,由于

部分黏结界面处咬合齿破碎,随之机械咬合力逐渐退出工作,咬合齿破碎部位滑动摩擦力代替退出工作的机械咬合力继续承担黏结作用。第 4 阶段称为残余段,黏结应力随钢筋滑移量增大而减小,最后趋于稳定。在此阶段,随滑移量增大,钢筋机械咬合力逐渐消失,钢筋与混凝土完全分离,钢筋拔出的过程中只剩滑动摩擦力起黏结作用,从而黏结应力趋于平缓但不为零。

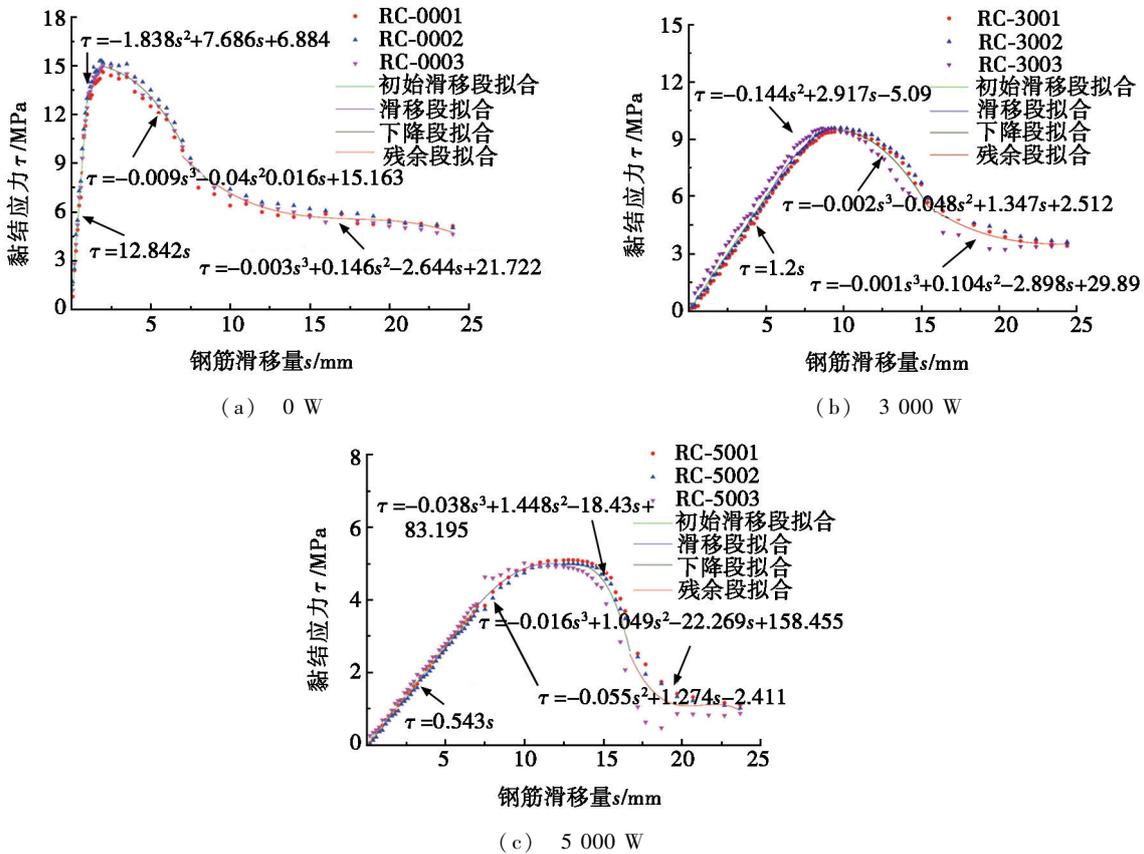


图 4 不同功率微波照射下 τ - s 曲线

不同功率微波照射下 τ - s 曲线,虽然整体趋势相似,但仍存在差别,为便于对比,将 10 组不同微波功率照射下 τ - s 曲线的 4 个阶段用平滑曲线连接后绘入同一坐标系,见图 5。

从图 5 中可看出:黏结应力峰值(黏结强度)随微波功率增大而迅速降低,表明微波照射确实可达到降低钢筋与混凝土黏结强度的目的。当微波功率小于 1 500 W 或大于 3 500 W 时,相邻曲线峰值相差较小;当微波功率为 1 500~3 500 W 时,相邻曲线峰值相差较大,由此得出在该功率范围内黏结强度对功率参数较为敏感;当微波功率大于 3 500 W 后,随着微波功率继续增大,黏结强度依然有所降低,但降低幅度逐渐变小,即能效比逐渐降低。因此,可通过改变微波功率来控制微波作用的能效比,实现更经济高效的工艺。对比第 4 阶段趋于稳定后的残余强度可知:随微波功率的提高,稳定后的残余强度变得越来越低。分析其原因是由于微波功率越高,黏结界面的混凝土损伤越严重,随着钢筋和混凝土相对滑动,机械咬合齿破碎越严重,黏结界面变得更加平滑,故摩擦力降低,可以体现黏结

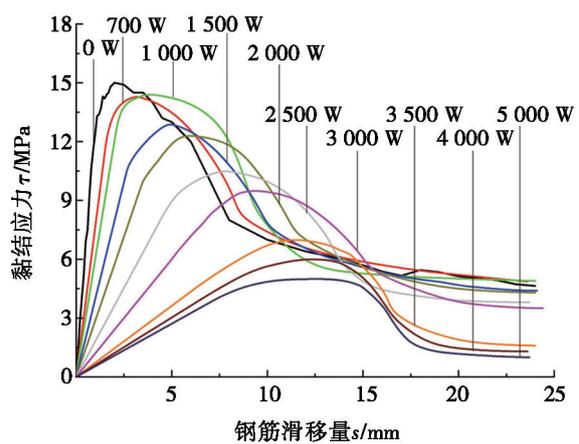


图 5 τ - s 曲线汇总图

强度降低,但降低幅度逐渐变小,即能效比逐渐降低。因此,可通过改变微波功率来控制微波作用的能效比,实现更经济高效的工艺。对比第 4 阶段趋于稳定后的残余强度可知:随微波功率的提高,稳定后的残余强度变得越来越低。分析其原因是由于微波功率越高,黏结界面的混凝土损伤越严重,随着钢筋和混凝土相对滑动,机械咬合齿破碎越严重,黏结界面变得更加平滑,故摩擦力降低,可以体现黏结

强度经微波照射后显著降低。

2 界面损伤演化特性

2.1 定义损伤变量

为更加清晰地分析黏结界面损伤演化特性,将钢筋混凝土试件看作三元结构模型,分别为混凝土单元、钢筋单元和钢筋混凝土黏结单元。将黏结单元视为一种独立的新材料,并定义黏结单元强度参数在无损状态下为 A ,损伤状态下为 A' ,则拉拔损伤变量 D 可表示为:

$$D = \frac{A - A'}{A} \quad (1)$$

由式(1)可知:当 $A'=A$ 时, $D=0$,即黏结单元没有损伤;当 $A'=0$ 时, $D=1$,即黏结单元完全损伤。

2.2 界面损伤机理分析

通过分析 $\tau-s$ 曲线,为避免损伤演化分析过程中受正负符号变化的影响,采用割线斜率作为黏结强度指标。定义 A' 为抵抗钢筋单位滑移量的黏结力,则有:

$$\tau = sA' \quad (2)$$

其中: τ 为钢筋混凝土界面黏结应力; s 为钢筋滑移量。

结合 $\tau-s$ 曲线可知:在初始滑移段,割线斜率 A' 不变,故该阶段损伤变量 D 没有发生变化,即不发生拉拔损伤。在初始滑移段结束后, A' 开始逐渐减小,直至残余段后期随钢筋滑移量增大继续增大,黏结应力趋于稳定, A' 越来越小,基本趋于稳定,此时 A' 减小的主要原因是滑动摩擦过程中界面磨损造成的极小损伤。

参考应变等价原理^[20],可得:在无损状态下的黏结应力作用于有损界面时产生的钢筋滑移量,与损伤状态下的有效黏结应力作用于无损界面时产生的钢筋滑移量相等。即有:

$$s = \frac{\tau'}{A} = \frac{\tau}{A'} \quad (3)$$

其中: τ' 为受损状态下有效黏结应力。

由式(1)可知 $A'=(1-D)A$,代入式(3)得:

$$s = \frac{\tau}{A(1-D)} \quad (4)$$

结合 $\tau-s$ 曲线,将式(4)进行分段整理可得:

$$\tau = \begin{cases} sA, & 0 \leq s < s' \\ sA(1-D), & s' \leq s, \end{cases} \quad (5)$$

其中: s' 为初始滑移段末尾钢筋滑移量。

由式(5)整理得到黏结界面损伤演化方程:

$$D = \begin{cases} 0, & 0 \leq s < s' \\ 1 - \frac{\tau}{sA}, & s' \leq s. \end{cases} \quad (6)$$

2.3 界面损伤演化分析

将0 W、3 000 W和5 000 W微波功率照射下试件拉拔试验所采集的散点数据整理后代入式(6),可得到损伤变量 D 的特征曲线,如图6所示。由图6可以看出:各曲线大致可分为3个阶段,即初始水平阶段、上升阶段和稳定阶段。假定黏结界面损伤总量为微波损伤与拉拔损伤的总和,即对应钢筋总滑移量也为微波损伤滑移量与拉拔损伤滑移量的总和,但在没有拉力作用的情况下,微波损伤对应的钢筋滑移量并不会表现出来,随着拉拔力的增大,该部分对应的钢筋滑移量才逐步体现。

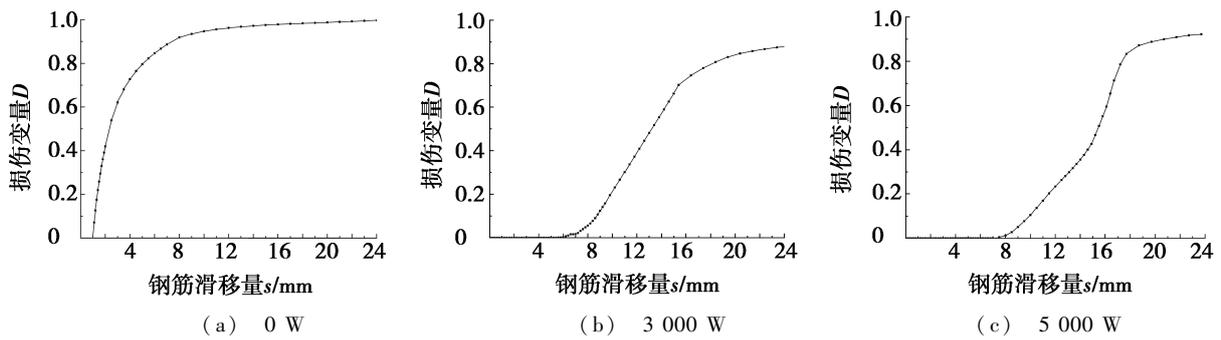


图6 不同功率微波照射下损伤变量特征曲线

对图6a中各曲线 $D=0$ 时所对应的初始水平阶段进行分析,在该阶段拉拔损伤产生的钢筋滑移量为 0 mm ,即当微波功率为 0 W 时,微波损伤钢筋滑移量也为 0 mm ,而图6a中显示该条件下该阶段对应的最大钢筋滑移量为 1 mm ,意味着黏结界面处的允许最大弹性滑移量为 1 mm 。随着微波功率增大到 3 000 W ,如图6b所示,第1阶段最大钢筋滑移量增大至 6 mm 。当微波功率达到 5 000 W 时,如图6c所示,第1阶段最大钢筋滑移量已经达到 8 mm 。在 3 000 W 和 5 000 W 微波照射条件的第1阶段滑移量中, 1 mm 为弹性滑移量,其余均为微波损伤应有滑移量,该现象与 $\tau-s$ 曲线中第1阶段相吻合。在上升阶段,随微波功率增加,曲线由上凸逐渐变为下凹,斜率明显低于无微波条件,在该阶段拉拔损伤出现,即产生了拉拔损伤滑移量,曲线斜率下降是由于微波损伤应有滑移量在第1阶段还未完全体现,而在该阶段逐步体现。在即将进入第3阶段的某点处,斜率与 0 W 条件下斜率相等时才意味着微波损伤滑移量完全体现,此后滑移量均为拉拔损伤产生的滑移量。该上升阶段斜率先增大后减小,该现象与 $\tau-s$ 曲线中滑移段和下降段相吻合。当进入稳定阶段后,损伤变量不再发生变化,意味着基本不再进一步损伤,黏结界面已完全破坏,钢筋与混凝土完全分离,该现象与 $\tau-s$ 曲线中残余段相吻合。从而可证明损伤变量的合理性以及损伤机理分析的正确性。

由图6可以看出:在 0 W 条件下, D 为 $0\sim 1$;随微波功率增大, D 的范围有所下降。为解释此现象,对拉拔试验后采集的试件劈裂图片进行分析,拉拔试验中受损试件如图7所示,试件轴向劈裂图如图8所示。

由图7a可知:在 0 W 条件下,由于界面黏结强度大于混凝土抗拉强度,试件在界面处被拉裂,并发展成贯通裂纹。当微波功率增加到 3 000 W 时,应力传递范围明显减小,故出现贯通裂纹扩展范围明显减小的现象,如图7b所示。当微波功率达到 5 000 W 时,试件外表基本没有产生裂纹,意味着拉拔损伤范围进一步变小,如图7c所示。

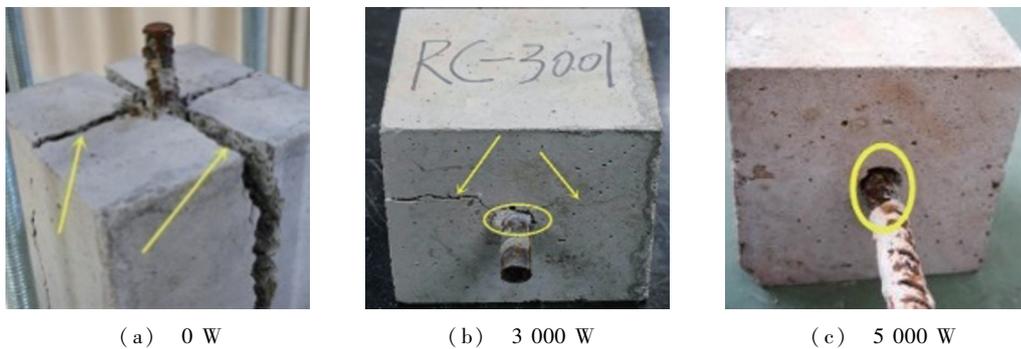


图7 拉拔试验中受损试件

无微波照射时,可清晰看出钢筋肋痕,如图8a所示。随微波功率的增加,钢筋肋痕已变得相当模糊,如图8b所示。当微波功率为 5 000 W 时,劈裂后黏结界面处基本看不到钢筋肋痕,如图8c所示。低微波功率下,拉拔破坏主要使混凝土产生劈裂破坏,拉拔损伤范围较大,但黏结界面损伤较小。而高微波功率下,钢筋混凝土黏结界面强度明显降低,拉拔作用仅在交界面微小损伤范围内产生破坏,使试件产生拔出破坏,从而表现出图6中拉拔损伤变量 D 不能达到 1 。同样,从图7和图8中可以看出:在

微波照射作用下,可有效避免钢筋拉拔过程中混凝土崩裂伴随的能量突然释放,降低噪音和粉尘污染。

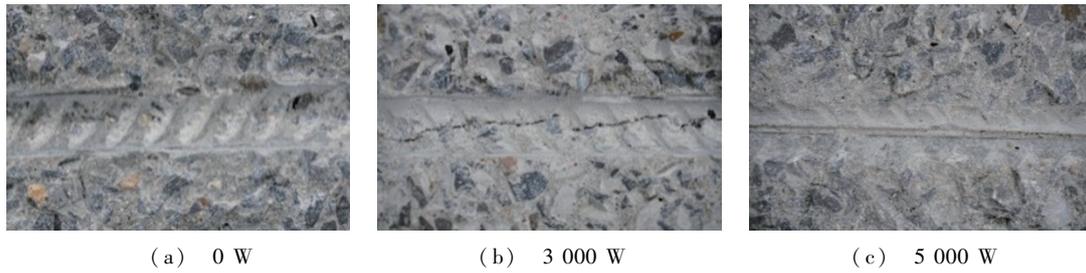


图 8 试件轴向劈裂图

3 ANSYS 数值模拟

3.1 模型建立及参数设定

采用 ANSYS16.0 有限元软件对 0 W、1 500 W、3 000 W 和 5 000 W 功率微波照射后模型进行拉拔模拟,采用前文假设,将模型定义为三元模型,即混凝土单元、钢筋单元和钢筋混凝土黏结单元。定义 3 种单元类型分别为 Solid-concret 65 单元、Pipe-2-node 288 单元和 Combination-Nonlin spring 39 单元,该黏结单元可定义为无厚度的面单元,故直接定义钢筋混凝土黏结界面。由于该黏结单元可自定义其应力-应变曲线,从而可将前文对应的微波功率下 $\tau-s$ 曲线各阶段方程作为其应力-应变曲线。

采用与试验试件 1 : 1 的数值模型,如图 9 所示,为体现试验试件中 PVC 管的作用,模型在对应位置空隙中施加径向约束,只允许产生钢筋轴向的自由滑动。钢筋单元参数以钢筋出厂参数为准,屈服强度为 400 MPa,弹性模量为 200 000 MPa,泊松比为 0.3。混凝土参数由预试验所得,Solid-concret 65 单元钢筋与混凝土主要参数见表 1。为将试验与模拟结果对比,模拟荷载按各 $\tau-s$ 曲线 4 个阶段末值施加于外漏钢筋端部,数值模拟荷载方案如表 2 所示。

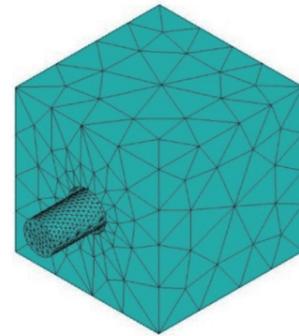


图 9 数值模型

表 1 Solid-concret 65 单元钢筋与混凝土

功率/W	主要参数		
	抗压强度/ MPa	弹性模量/ MPa	泊松比
0	21.9	31 529.7	0.11
1 500	18.7	18 613.3	0.19
3 000	17.6	14 369.3	0.21
5 000	15.4	5 933.8	0.23

表 2 数值模拟荷载方案

微波功率/W	0	1 500	3 000	5 000
初始滑移段末强度值/N	24 932	21 513	13 069	7 640
滑移段末强度值/N	30 159	25 937	19 101	10 053
下降段末强度值/N	20 106	15 281	11 058	5 228
残余段末强度值/N	9 329	8 847	7 037	2 011

3.2 模拟结果及分析

在 0 W、1 500 W、3 000 W 和 5 000 W 微波照射下,分别采用滑移段末强度值为拉拔力荷载(黏结应力峰值),荷载峰值模拟结果如图 10 所示。

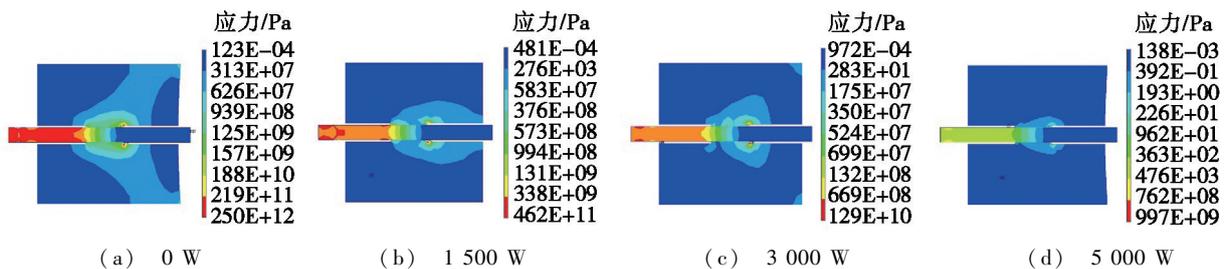


图 10 不同微波功率下对应荷载峰值模拟结果

由图 10a 可明显看出:当微波功率为 0 W 时,混凝土受力范围相当大,拉拔应力已传递到模型边缘,当拉拔应力大于混凝土抗拉强度,产生如图 7a 所示的贯通劈裂裂纹。当微波功率逐渐增大,如图 10b 所示,在 1 500 W 微波照射下,拉拔应力传递范围明显减小,试件表面仅中心处受到拉拔力影响。如图 10c 所示,当微波功率达到 3 000 W 时,拉拔应力传递范围仅为黏结段附近。当微波功率达到 5 000 W 时,如图 10d 所示,拉拔力传递范围已经缩到很小,只有接触面小范围内受拉拔影响。且钢筋所受最大拉拔力也随微波功率增大而明显降低,证明微波对黏结强度的影响非常显著,可有效降低钢筋与混凝土黏结强度。模拟结果和试验现象与 2.3 节所得结论相符。

不同微波功率下模型按表 2 中的荷载方案进行模拟,将相同微波条件下的试验和数值模拟所对应的数值,用 Origin 软件绘入同一坐标中进行对比,3 000 W 微波功率照射下的试验与模拟结果对比曲线如图 11 所示。试验中产生的钢筋滑移量与同条件下模拟所得的钢筋滑移量基本重合,其他功率下也具有同样的规律,经计算得平均误差仅为 0.937 5 mm,完全在可接受试验误差范围内,且模拟受力现象与试验破裂现象相符,从而证明了 τ - s 曲线的准确性以及损伤变量演化方程的准确性。

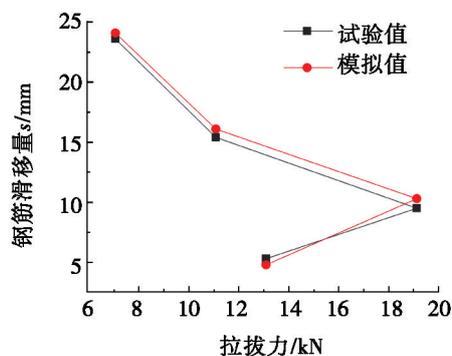


图 11 3 000 W 微波功率照射下的试验与模拟结果对比

4 结束语

(1) 混凝土黏结强度随微波功率的提高而显著降低,且微波功率为 1 500~3 500 W 时,黏结强度对功率变化较为敏感,从而可通过调节微波功率来实现高效、节能的工艺。

(2) 随微波功率增加,钢筋拉拔过程中混凝土破裂范围逐渐减小。低微波功率下,钢筋拔出过程中混凝土发生崩裂;高微波功率下,钢筋可由很小拉力直接拔出,混凝土试件不发生劈裂。

(3) 试验过程中,低功率微波照射后,拔出钢筋的过程中混凝土发生崩裂,伴随噪音和粉尘的产生。高功率微波照射后,钢筋在拉拔力作用下直接被拔出,未产生噪音和粉尘。微波照射法可有效降低钢筋回收过程中的噪音和粉尘污染。

参考文献:

- [1] 邓寿昌,张学兵,罗迎社. 废弃混凝土再生利用的现状分析与研究展望[J]. 混凝土,2006(11):20-24.
- [2] 肖建庄,孙振平,李佳彬,等. 废弃混凝土破碎及再生工艺研究[J]. 建筑技术,2005,36(2):141-144.
- [3] 李法胜,修岩. 金刚石绳锯切割技术在钢筋砼结构拆除中的应用[J]. 铁道建筑技术,2009(7):70-73.
- [4] 卢高明,李元辉,HASSANI F,等. 微波辅助机械破岩试验和理论研究进展[J]. 岩土工程学报,2016,38(8):1497-1506.
- [5] KINGMAN S W,JACKSON K,CUMBANE A,et al. Recent developments in microwave-assisted comminution[J]. International journal of mineral processing,2004,74(1/4):71-83.
- [6] KINGMAN S W,VORSTER W,ROWSON N A. The influence of mineralogy on microwave assisted grinding[J]. Minerals engineering,2000,13(3):313-327.
- [7] KINGMAN S W. Recent developments in microwave processing of minerals[J]. International materials reviews,2006,51(1):1-12.
- [8] MEISELS R,TOIFL M,HARTLIEB P,et al. Microwave propagation and absorption and its thermo-mechanical consequences in heterogeneous rocks[J]. International journal of mineral processing,2015,135(3):40-51.
- [9] 戴俊,秦立科. 微波照射下岩石损伤微观模拟分析[J]. 西安科技大学学报,2014,34(6):652-655.
- [10] HASSANI F,NEKOOVAGHT P M,RADZISZEWSKI P,et al. Microwave assisted mechanical rock breaking [C]// Beijing:Proceedings of 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics. 2011:2075-2080.
- [11] HASSANI F,NEKOOVAGHT P M,GHARIB N. The influence of microwave irradiation on rocks for microwave-assisted underground excavation[J]. Journal of rock mechanics and geotechnical engineering,2016,8(1):1-15.

- [11] LU X L, HUANG M S, WANG H R. Face stability analysis of plane strain tunnel in limit theorem [C]//Proceeding of the 4th Sino-Japan Geotechnical Symposium on Recent Developments of Geotechnical Engineering. Okinawa: JGS, 2010: 188-193.
- [12] JANCSEKZ S, STEINER W. Face support for a large mix-shield in heterogeneous ground conditiona [C]// Symposium Tunnelling 94. London: Chapman and Hall Limited, 1994: 531-550.
- [13] 程诚, 赵文, 程超楠, 等. 干砂盾构隧道开挖面主动极限支护压力计算 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(9): 1348-1352.
- [14] 魏纲, 贺峰. 砂性土中顶管开挖面最小支护压力的计算 [J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(5): 903-908.
- [15] 吕玺琳, 周运才, 李冯缔. 粉砂地层盾构隧道开挖面稳定性离心试验及数值模拟 [J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3324-3328, 3335.
- [16] 吕玺琳, 李冯缔, 黄茂松, 等. 三维盾构隧道开挖面极限支护压力数值及理论解 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(10): 1469-1473.
- [17] 刘文洁, 王同华, 肖建勋. 各向异性地基中盾构隧道开挖面稳定性分析 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(7): 14-19.
- [18] 秦建设. 盾构施工开挖面变形与破坏机理研究 [D]. 南京: 河海大学, 2005.

本文引用格式:

张露露, 钟小春. 考虑刀盘厚度隧道开挖面极限支护压力的计算 [J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2020, 41(3): 59-65.

ZHANG L L, ZHONG X C. Solution of ultimate support pressure on tunnel excavation surface considering cutter plate thickness [J]. Journal of Henan university of science and technology (natural science), 2020, 41(3): 59-65.

(上接第 58 页)

- [12] 戴俊, 师百垒, 吴涛. 微波照射对岩石冲击性能的影响 [J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2016, 37(1): 64-67.
- [13] 戴俊, 潘艳宾, 孟振. 微波照射下岩石强度弱化影响因素的试验研究 [J]. 西安科技大学学报, 2016, 36(3): 364-368.
- [14] 胡亮. 岩石含水率对微波穿透深度的影响 [J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(4): 71-75.
- [15] NICHOLAS L, FLORENT B. Investigation of microwave-assisted concrete recycling using single-particle testing [J]. France minerals engineering, 2012, 31: 71-81.
- [16] AKBARNEZHAD A, ONG K C G, ZHANG M H, et al. Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates [J]. Construction and building materials, 2011, 25(8): 3469-3479.
- [17] 杜文平, 戴俊. 微波辅助机械剔选废弃混凝土块试验研究 [J]. 混凝土, 2018(7): 149-152.
- [18] 陈新年, 戴俊, 孟振. 微波辅助机械剔选再生混凝土骨料技术 [J]. 西安科技大学学报, 2013, 33(5): 604-608.
- [19] 中国建筑科学研究院. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [20] LEMAITRE J. How to use damage mechanics [J]. Nuclear engineering and design, 1984, 80(2): 233-245.

本文引用格式:

戴俊, 杨凡, 李栋烁, 等. 微波照射下钢筋混凝土黏结强度损伤演化 [J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2020, 41(3): 52-58, 65.

DAI J, YANG F, LI D S, et al. Damage evolution of bond strength between reinforcement and concrete under microwave irradiation [J]. Journal of Henan university of science and technology (natural science), 2020, 41(3): 52-58, 65.