

基于正交设计的高压脉冲放电破碎混凝土 裂缝深度损失研究

车龙¹, 闫海敏², 郭策安¹, 潘琳琳¹, 顾晓辉³

(1. 沈阳理工大学 装备工程学院, 沈阳 110159; 2. 哈一室, 沈阳 110000; 3. 南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为更加深入研究混凝土在高压脉冲放电作用下的破坏特性, 综合考虑施加电压、脉冲数和放电电极间距三个因素, 基于正交设计方法开展一系列高压脉冲放电破碎混凝土裂缝深度损失检测试验, 通过方差分析方法得出不同因素对混凝土裂缝深度损失的影响程度。结果表明: 三个因素对混凝土裂缝深度损失影响由大到小依次为施加电压、脉冲数和放电电极间距; 通过分别改变施加电压和脉冲数, 混凝土裂缝深度损失分别增加了121.5%和74.8%; 当施加电压为324 kV、脉冲数为5次时, 高压脉冲放电破碎混凝土裂缝深度损失最大。该研究结果可为高压脉冲破碎技术的工程应用提供数据支撑。

关键词: 高压脉冲放电破碎; 裂缝深度损失; 混凝土; 防护工事

中图分类号: TM89 文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1003-1251.2025.02.015

Research on Crack Depth Loss of Concrete Broken by High Voltage Pulse Discharge Based on Orthogonal Design

CHE Long¹, YAN Haimin², GUO Cean¹, PAN Linlin¹, GU Xiaohui³

(1. Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China; 2. Ha one room, Shenyang 110000, China;
3. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To investigate the damage characteristics of concrete during high-voltage pulse discharge fragmentation, three factors were taken into account: applied voltage, pulse number, and discharge electrode spacing, a series of tests were done using the orthogonal design approach to detect the crack depth loss in high-voltage pulse discharge fractured concrete. The influence degree of various parameters on the cracks depth loss in concrete was determined using variance analysis method. The experimental results show that the three factors affecting the crack depth loss of concrete, in descending order, are applied voltage, pulse number, and discharge electrode gap. By changing the applied voltage and pulse number individually, the crack depth loss of concrete increases by 121.5% and 74.8%, respectively; When the applied voltage is 324 kV and the pulse number is 5, the crack depth loss of concrete caused by high-voltage pulse discharge is the largest. The research findings can provide data support for the engineering application of high-voltage pulse crushing technology.

Key words: high voltage pulse discharge fragmentation; crack depth loss; concrete; fortification

收稿日期: 2024-09-13

基金项目: 辽宁省教育厅高等学校基本科研项目(LJKMZ20220607); “一带一路”创新人才交流外国专家项目(DL2023006001L); 沈阳理工大学引进高层次人才科研支持计划项目(1010147001246)

作者简介: 车龙(1989—), 男, 副教授, 博士; 郭策安(1979—), 通信作者, 男, 教授, 博士, 博士生导师。

混凝土作为我国军事主要防御工事材料,目前其主要破碎方式有机械破碎、高压水射流破碎、弹射冲击波破碎等^[1-4]。随着科学技术的快速发展及对破碎可控和环境友好的要求,近些年发展了高压脉冲放电破碎混凝土技术,该技术利用脉冲放电产生的冲击波、射流或等离子体通道的力学效应对混凝土进行破碎^[5-6]。由于高压脉冲放电破碎混凝土的过程比较复杂,影响其破碎效果的因素较多,因此其破碎机理尚不明确。

目前国内外许多学者对高压脉冲放电破碎技术进行了相关研究。张岩^[7]研究了不同电极间距下高压脉冲放电破碎混凝土后的骨料吸水率、失水率和粒度分布等,发现随着电极间距的增大,混凝土破碎后大粒组的吸水率较小,失水率增加,同粒组下混凝土压碎值基本不变,破碎产物总体粗糙度先增大后降低。Wang 等^[8-11]进行了高压脉冲放电破碎实验和仿真研究,发现随孔径的增大和孔间距的减小,混凝土梁段的破坏效应增大;100 kV 放电产生的混凝土板裂缝宽度是 40 kV 的两倍以上,40 MPa 强度产生的混凝土裂缝宽度是 20 MPa 的 3/4,同时,随着放电电压的增加,裂缝宽度随着放电铜丝数的增加而减小;混凝土柱的破碎效果随着放电电压和铜丝数量的增加而明显增加,随着混凝土强度的降低而略有增加。Murakami 等^[12]利用高压脉冲放电技术对水下混凝土进行了拆除实验,发现混凝土结构(有钢筋和无钢筋)以及浸水对混凝土的破碎均有影响。Lin 等^[13]利用 ABAQUS 软件建立了钢筋混凝土板的有限元模型,采用爆炸荷载等效方法模拟了高压脉冲放电产生的冲击波对周围混凝土的影响以及裂缝的发展过程,发现增大钢筋直径和减小钢筋间距对限制裂缝的发展有重要作用,并且钢筋间距和直径对边缘裂缝和中心孔间裂缝宽度的影响最为明显。以上研究均采用实验或仿真的方法从放电电压、脉冲数、放电电极间距或混凝土强度等角度分析了混凝土的破坏效果和裂缝宽度,但综合多个因素进行研究的较少。裂缝深度损失作为检验混凝土材料损伤程度的一个关键指标,能够间接地体现整个混凝土强度变化,即裂缝深度损失越大,混凝土强度降低越快。刘学增等^[14]采用激光超声技术对不同尺寸的混凝土试块裂缝深度进行了检测,发现其测量精度可达 90%。林维正等^[15]利用理论和试验研究了混凝土裂缝深度超声波检测方法,结果发现双接收换能器的冲击回波时域分析方法可以有效地检测混凝土裂缝深

度。Seher 等^[16]为了分析钢筋混凝土裂缝深度,利用超声脉冲速度法对 15 cm × 15 cm × 60 cm 混凝土梁进行了实验研究,发现钢筋和距离传感器对超声脉冲速度法测试结果的准确性有一定的影响。陈振富^[17]通过理论分析提出了在超声波检测钢筋混凝土构件裂缝深度时钢筋影响的判别方法,利用时距关系和相关公式定性及定量分析了钢筋对超声检测裂缝测试数据的影响,并对钢筋位置作出判断。李慧乐等^[18]为评估钢筋混凝土梁的刚度性能,分析了不同裂缝深度和裂缝位置等条件下的钢筋混凝土裂缝梁响应,发现裂缝深度和位置会影响混凝土梁的力学性能。

综上所述,高压脉冲放电破碎混凝土的机理研究取得了一定进展,但仍有许多基础性的问题需要解决。由于裂缝深度损失是检验混凝土材料破坏情况的一个重要指标,本文基于正交试验设计方法,通过室内模型试验,分析不同的施加电压、脉冲数和放电电极间距等因素对高压脉冲放电破碎混凝土裂缝深度损失的影响,并通过数学建模的检验方法确定不同因素对混凝土裂缝深度损失影响的显著性,以期完善高压脉冲放电破碎机理研究,为混凝土破碎工程提供参考。

1 混凝土破碎和裂缝深度检测试验

高压脉冲放电破碎混凝土试验系统原理如图 1 所示。该系统主要由高压充电电源(由变压器 T、二极管 D 和电阻 R₁ 组成)、Marx 发生器(由电容器 C、放电开关 K、电感 L、电阻 R 和杂散电容 C_s 组成)、击穿腔、放电电极、水、混凝土靶块和示波器等部分组成。放电电极采用针-针电极结构,并安装在高压脉冲放电破碎装置的击穿腔内,正、负电极距离 1 ~ 10 cm 可调。电容器的容量为 5 μF。高压脉冲放电发生器系统的最大输出电压可达 450 kV,单次电脉冲的最大能量输出为 100 J。击穿腔采用聚乙烯材料,腔内的水保证完全淹没混凝土靶块。混凝土靶块为自制的 27 个方形混凝土样品,每个尺寸为 20 cm × 20 cm × 20 cm。

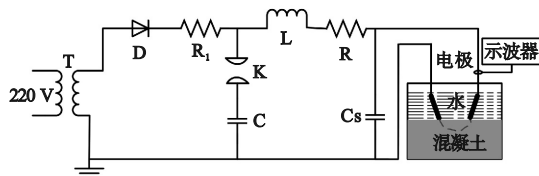


图 1 高压脉冲放电破碎混凝土试验系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system for high voltage pulse discharge crushing concrete

混凝土裂缝深度检测试验系统原理如图2所示,该系统主要由混凝土裂缝深度检测仪(HC-CS201型,河北广惠试验仪器有限公司)和混凝土靶块两部分组成。裂缝深度检测仪由检测仪主机、平面换能器、信号连接线、数字显示屏和裂缝测深仪标尺等组成。高压脉冲放电破碎混凝土裂缝深度损失为破碎后所测得裂缝深度值与破碎前所测得裂缝深度值之差。

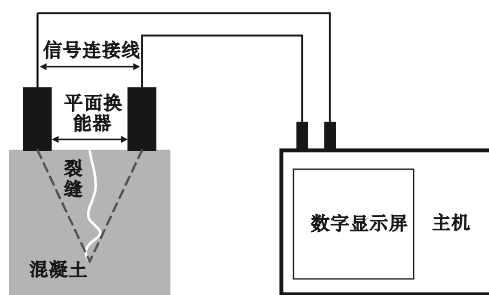


图2 混凝土裂缝深度检测试验系统示意图

Fig. 2 Diagrammatic sketch of crack depth detection experiment system of concrete

影响高压脉冲放电破碎混凝土裂缝深度损失的因素及选取的工况如下。

- 1) 施加电压分别为 324、360 和 415 kV。
- 2) 脉冲数分别为 1 个、5 个和 9 个。
- 3) 放电电极间距分别为 3、5 和 7 cm。

本文选择 $L_9(3^4)$ 正交表进行高压脉冲放电破碎混凝土裂缝深度损失试验分析,对各因素不同水平组合重复做 3 次试验。高压脉冲放电破碎混凝土裂缝深度损失试验因素水平见表 1。

表1 高压脉冲放电破碎混凝土裂缝深度损失试验因素水平表

Table 1 Experiment factor-level table for crack depth loss of concrete broken by high voltage pulse discharge

水平	因素		
	施加电压/kV	脉冲数/个	放电电极间距/cm
1	324	1	3
2	360	5	5
3	415	9	7

2 试验结果及分析

对混凝土进行高压脉冲放电破碎试验和裂缝深度损失试验,得到破碎混凝土裂缝深度损失结果见表 2,表中 A、B、C 分别代表施加电压、脉冲数和放电电极间距。

表2 $L_9(3^4)$ 破碎混凝土裂缝深度损失正交试验表及试验结果

Table 2 Orthogonal experiment table and results of crack depth loss of $L_9(3^4)$ crushed concrete

试验号	各因素的水平			裂缝深度损失/mm	裂缝深度损失均值/mm
	A/kV	B/个	C/cm		
1	324	1	3	11.013	
2	324	1	3	11.476	11.250
3	324	1	3	11.261	
4	324	5	5	49.879	
5	324	5	5	50.314	50.583
6	324	5	5	51.556	
7	324	9	7	6.724	
8	324	9	7	6.362	26.583
9	324	9	7	6.663	
10	360	1	5	1.624	
11	360	1	5	1.478	1.500
12	360	1	5	1.398	
13	360	5	7	4.967	
14	360	5	7	5.145	5.083
15	360	5	7	5.137	
16	360	9	3	33.217	
17	360	9	3	33.104	33.333
18	360	9	3	33.678	
19	415	1	7	32.574	
20	415	1	7	32.758	32.917
21	415	1	7	33.419	
22	415	5	3	3.940	
23	415	5	3	4.112	24.168
24	415	5	3	4.452	
25	415	9	5	3.137	
26	415	9	5	2.912	3.167
27	415	9	5	3.452	

2.1 极差分析

极差为各因素混凝土裂缝深度损失平均值的最大值和最小值之差,表明各因素对混凝土裂缝深度损失的影响大小。对表 2 的结果进行极差分析,首先计算各因素在各水平下混凝土裂缝深度损失之和,结果如表 3 所示;再计算各因素在各水平下混凝土裂缝深度损失平均值,结果见表 4。

表3 不同水平下混凝土裂缝深度损失之和

Table 3 Sum of crack depth loss of concrete at different levels

因素	不同水平下裂缝深度损失之和		
	1	2	3
A	88.416	39.916	60.252
B	45.667	79.834	63.083
C	68.751	55.250	64.583

表4 不同水平下混凝土裂缝深度损失的平均值和极差

Table 4 Average and range of crack depth loss of concrete at different levels mm				
因素	不同水平下裂缝深度损失的平均值			极差
	1	2	3	
A	29.472	13.305	20.084	16.167
B	15.222	26.614	21.028	11.392
C	22.917	18.417	21.528	4.500

由表4可知,三个因素中施加电压对高压脉冲放电破碎混凝土裂缝深度损失的影响最大,其次是脉冲数,最后是放电电极间距。根据表4数据绘制各因素不同水平下的高压脉冲放电破碎混凝土裂缝深度损失,结果如图3所示。由图3(a)~3(c)可知,当施加电压为324 kV(A1)、脉冲数为5个(B2)、放电电极间距为3 cm(C1)时,破碎混凝土裂缝深度损失最大。单独实施组合条件A1B2C1下的试验,测得该组合条件下破碎混凝土裂缝深度损失为37.07 mm,比正交试验中的混凝土最大裂缝深度损失增大了25.78%。

混凝土裂缝深度损失差值在图3中反映为各因素对应裂缝深度损失点的分布分散程度。图3(a)中各点最为分散,因此施加电压为影响破碎混凝土裂缝深度损失的主要因素;图3(b)中各点比较分散,故脉冲数为影响破碎混凝土裂缝深度损失的次要因素;放电电极间距对高压脉冲放电破碎混凝土裂缝深度损失影响最小。鉴于此,可以通过调节敏感因素来增大混凝土的裂缝深度损失。

由于实际应用中高压脉冲放电电极间隙很难改变,可视为固定值,因此在防护工事(混凝土)拆除设计时,可以通过调节施加电压和脉冲数控制高压脉冲放电破碎混凝土裂缝深度损失。

固定脉冲数为5个,放电电极间距分别为3、5和7 cm,高压脉冲放电破碎混凝土裂缝深度损失随不同施加电压的变化曲线如图4所示。

由图4可知,随着施加电压的增加,混凝土裂缝深度损失先减小后增大。施加电压为324 kV时,混凝土裂缝深度损失值最大,与施加电压360 kV条件下相比,当电极间距为3 mm时,高压脉冲放电破碎混凝土裂缝深度损失值增大为121.5%。

施加电压为360 kV,放电电极间距为3、5和7 cm,高压脉冲放电破碎混凝土裂缝深度损失随不同脉冲数的变化曲线如图5所示。

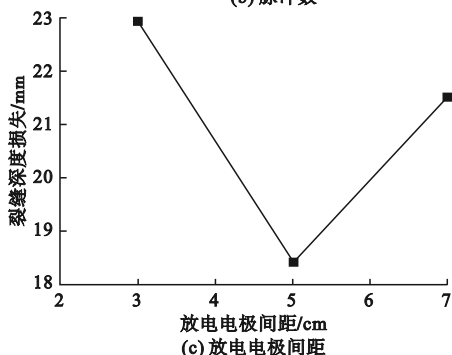
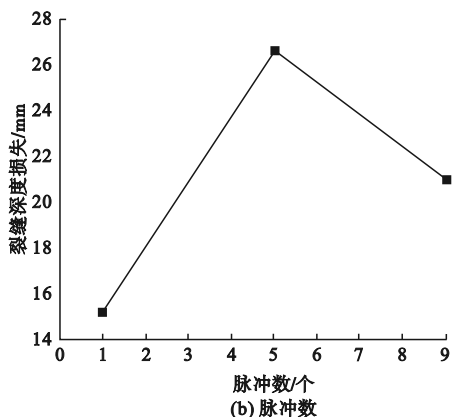
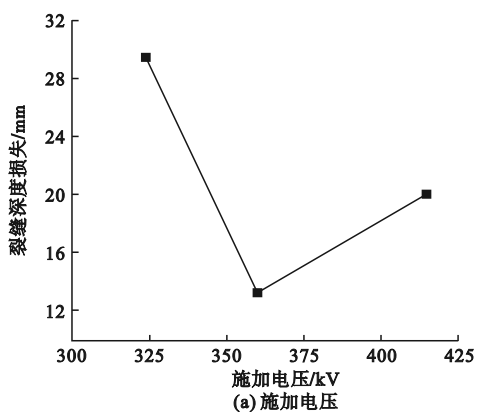


图3 各因素不同水平下的混凝土裂缝深度损失
Fig. 3 Crack depth loss of concrete under different levels of factors

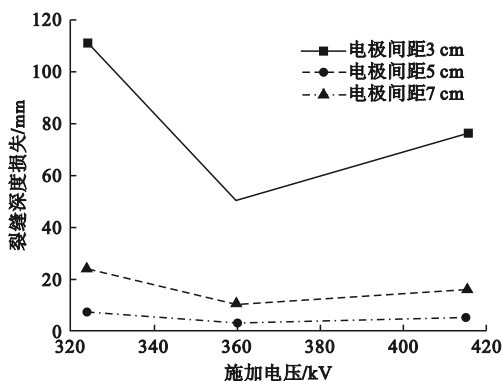


图4 不同施加电压下混凝土裂缝深度损失变化曲线
Fig. 4 Variation curves of crack depth loss of concrete under different applied voltages

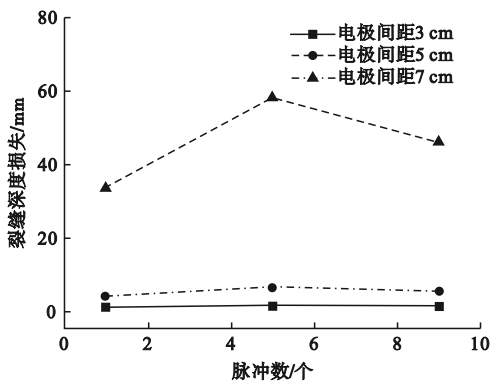


图5 不同脉冲数下混凝土裂缝深度损失变化曲线

Fig. 5 Variation curves of crack depth loss of concrete under different pulse numbers

由图5可知,随着脉冲数的增加,混凝土裂缝深度损失先增大后减小,脉冲数为5时,混凝土裂缝深度损失最大。

2.2 显著性分析

为精确评估高压脉冲放电破碎混凝土裂缝深度损失试验结果误差的大小,正确区分试验条件的改变和试验误差引起的数据波动,对高压脉冲放电破碎混凝土裂缝深度损失影响的三个因素进行显著性分析,结果见表5。表中:自由度等于因素水平数减去1; $f_{0.1}$ 为显著水平取0.1时的 F 检验临界值; F 为检验统计量,其值为组间方差和组内方差的比值。

表5 显著性分析

Table 5 Significance analysis

因素	自由度	$f_{0.1}$	F 值	显著性
A	2	9	10.8	显著
B	2	9	5.4	不显著
C	2	9	0.9	不显著

组间方差计算式为

$$S_{\text{组间}} = \sum_{i=1}^a n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (1)$$

式中: a 为考虑的因素数量; n_i 为第 i 个因素下的试验数据个数; y_i 为第 i 个因素下的试验值; \bar{y}_i 为第 i 个因素下的试验数据的平均值; \bar{y} 为整个试验结果的平均值。

组内方差计算式为

$$S_{\text{组内}} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{n_i} n_i (y_{ij} - \bar{y})^2 \quad (2)$$

式中 y_{ij} 为第 i 个因素下的第 j 个试验的试验值。

检验统计量 F 计算式为

$$F = S_{\text{组间}} / S_{\text{组内}} \quad (3)$$

当 F 值大于 $f_{0.1}$ 时,表示该因素对试验结果影响显著,反之,则表示影响不显著。由表5可知,施加电压对高压脉冲放电破碎混凝土裂缝深度损失的影响比较明显;其次是脉冲数;而放电电极间距对破碎混凝土裂缝深度损失的影响较弱。

3 结论

1)提出了以裂缝深度损失衡量高压脉冲放电破碎混凝土破坏情况,正交试验结果表明,影响混凝土裂缝深度损失的因素按主次排序依次为施加电压、脉冲数、放电电极间距。

2)当放电电极间距为3 cm时,改变施加电压和脉冲数,裂缝深度损失在高压脉冲放电破碎混凝土过程中分别增加约121.5%和74.8%。

3)基于数理统计 F 检验的显著性分析表明,施加电压对高压脉冲破碎混凝土裂缝深度损失的影响最为显著, F 值为10.8。

参考文献 (References):

- [1] 岳玮琦,顾展飞,苏伟林.盾构滚刀作用下混凝土材料破碎形能与能耗[J].材料科学与工程学报,2023,41(6):995-1000,1010.
YUE W Q, GU Z F, SU W L. Fractal and energy consumption of concrete crushed by shield disc cutters[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2023, 41(6): 995-1000, 1010. (in Chinese)
- [2] 耿志晨,崔云鹏,邓玉姣,等.低温玄武岩纤维混凝土抗冲击性能研究[J].沈阳理工大学学报,2023,42(3):75-81.
GENG Z C, CUI Y P, DENG Y J, et al. Study on impact resistance of low temperature basalt fiber concrete[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2023, 42(3): 75-81. (in Chinese)
- [3] WANG Z F, PAN C, JIANG Y T, et al. Impact crushing of waste concrete for coarse aggregate liberation by water jet[J]. Powder Technology, 2024, 436: 119513.
- [4] 丁羽波,王猛.K&C和HJC混凝土模型在高速侵彻作用下的适用性研究[J].沈阳理工大学学报,2022,41(3):84-89,94.
DING Y B, WANG M. Study on the applicability of K&C and HJC constitutive model under high speed penetration[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2022, 41(3): 84-89, 94. (in Chinese)
- [5] CHE L, GU X H, LI H D. Numerical analysis and experimental research on hard rock fragmentation by high voltage pulse discharge[J]. Minerals Engineering, 2021, 168: 106942.
- [6] WANG X D, LI N J, DU J X, et al. Concrete crushing based on the high-voltage pulse discharge technology[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 41: 102366.
- [7] 张岩.高压脉冲电极间距对破碎后混凝土物理性能影响研究[J].混凝土,2020(12):21-25.
ZHANG Y. Study on effect of high voltage pulse electrode spacing on broken concrete physical performance[J]. Concrete, 2020(12): 21-25. (in Chinese)

- [8] WANG X D, DU J X, LI N J. Research on crushing concrete members by high-voltage pulse discharge technology[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021(1) : 5511959.
- [9] WANG X D, LI N J, WANG W Q. Experimental study on crushing of concrete slabs by high-voltage pulse discharge [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 401 : 132951.
- [10] 王晓东, 李宁静, 李强. 高压脉冲放电破碎混凝土梁试验 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2023, 53(2) : 496 - 504.
- WANG X D, LI N J, LI Q. Experimental on crushing of concrete beams by high-voltage pulse discharge[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2023, 53(2) : 496 - 504. (in Chinese)
- [11] WANG X D, DU J X, LI Q. Experimental study on crushing of concrete columns by high voltage pulse discharge[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 16 : e01090.
- [12] MURAKAMI K, DOSHO Y, UEMURA K, et al. Concrete demolition and surface scraping using high voltage pulse discharge[J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2018, 16(8) : 358 - 367.
- [13] LIN X X, YANG F, LIU Y W, et al. Research on the crushing of reinforced concrete two-way slabs by pulse power discharge technology[J]. *Buildings*, 2024, 14(5) : 1222.
- [14] 刘学增, 段俊铭, 桑运龙, 等. 混凝土裂缝深度的激光超声探测方法[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(3) : 839 - 847.
- LIU X Z, DUAN J M, SANG Y L, et al. Laser ultrasonic detection method for concrete crack depth[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(3) : 839 - 847. (in Chinese)
- [15] 林维正, 苏勇, 洪有根. 混凝土裂缝深度超声波检测方法 [J]. *无损检测*, 2001, 23(8) : 323 - 326.
- LIN W Z, SU Y, HONG Y G. Ultrasonic testing methods for the depth of concrete crack [J]. *Nonde Structive Testing*, 2001, 23(8) : 323 - 326. (in Chinese)
- [16] SEHER M, IN C W, KIM J Y, et al. Numerical and experimental study of crack depth measurement in concrete using diffuse ultrasound[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2013, 32(1) : 81 - 92.
- [17] 陈振富. 混凝土构件裂缝深度超声波检测中钢筋影响的判别[J]. *无损检测*, 2004, 26(2) : 72 - 73, 76.
- CHEN Z F. Identification of the influence of reinforcing bar for ultrasonic detection of the crack depth in concrete [J]. *Nondestructive Testing Technologing*, 2004, 26(2) : 72 - 73, 76. (in Chinese)
- [18] 李慧乐, 严欢, 吴刚. 移动荷载下考虑钢筋作用的混凝土裂缝梁动力响应分析[J]. *振动与冲击*, 2024, 43(12) : 140 - 147.
- LI H L, YAN H, WU G. Dynamic response analysis of cracked concrete beams subjected to moving load considering the effect of reinforcement [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(12) : 140 - 147. (in Chinese)

(责任编辑:徐淑姣)

(上接第90页)

- [2] 张杰, 黄敏, 党晓玲, 等. 碲化物超晶格红外探测器研究进展与发展趋势[J/OL]. *红外与激光工程*, 2024, 53(3) : 20230153 [2024-04-20]. <http://www.irla.cn/cn/article/doi/10.3788/IRLA20230153>.
- ZHANG J, HUANG M, DANG X L, et al. Research progress and development trends of antimonide-based superlattice infrared photodetectors [J/OL]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(3) : 20230153 [2024-04-20]. <http://www.irla.cn/cn/article/doi/10.3788/IRLA20230153>. (in Chinese)
- [3] MEISENHEIMER S K, FÜRST J U, BUSE K, et al. Continuous-wave optical parametric oscillation tunable up to an 8 μm wavelength[J]. *Optica*, 2017, 4(2) : 189 - 192.
- [4] LI L, YIN A H. Research on the nonlinear pulse propagation by numerical analysis [J]. *Optik*, 2011, 122(13) : 1195 - 1200.
- [5] LILJESTRAND C, ZUKAUSKAS A, PASISKEVICIUS V, et al. Highly efficient mirrorless optical parametric oscillator pumped by nanosecond pulses [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(13) : 2435 - 2438.
- [6] BRUNETEAU B, FAURE B, DEBRAY J, et al. Widely tunable near-infrared optical parametric oscillator based on a 5% MgO:PPLN partial cylinder pumped at 1 064 nm by a 1-kHz sub-nanosecond microchip laser [J]. *Optics Letters*, 2023, 48(14) : 3669 - 3672.
- [7] YANG Z Q, LIU G Y, MENG J, et al. Widely tunable NCPM-KTA OPO based on non-collinear phase-matching in a four-mirror ring cavity [J]. *Optics Express*, 2023, 31(22) : 37241.
- [8] SACKS Z, GAYER O, TAL E, et al. Improving the efficiency of an optical parametric oscillator by tailoring the pump pulse shape[J]. *Optics Express*, 2010, 18(12) : 12669 - 12674.
- [9] XU L W, LI Y Y, JU Y L. 91.1 kW, 5.3 ns compact mid-infrared optical parametric amplification based on PPMgLN [J]. *Results in Physics*, 2019, 15 : 102783.
- [10] AGRAWAL G P. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 第2版. 贾东方, 余震虹, 译. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [11] 刘航, 于永吉, 王宇恒, 等. 基于含时分步积分算法反演单体 MgO: APLN 多光参量振荡能量场[J]. *物理学报*, 2019, 68(24) : 170 - 177.
- LIU H, YU Y J, WANG Y H, et al. Energy conversion of multi-optical parametric oscillation based on time-dependent split-step integration methods in MgO: APLN [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(24) : 170 - 177. (in Chinese)
- [12] 王睿, 汪水兰, 蒋星晨, 等. MgO:PPLN 光参量振荡特性及参量优化[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(13) : 276 - 281.
- WANG R, WANG S L, JIANG X C, et al. MgO:PPLN optical parametric oscillation characteristics and parameter optimization [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(13) : 276 - 281. (in Chinese)
- [13] 赵家群. 基于 MgO:PPLN 的中红外连续波光学参量振荡器技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [14] 汪水兰, 王睿, 蒋星晨, 等. 用于 PPLN 泵浦源的大能量百纳秒级脉冲固体激光器[J]. *沈阳理工大学学报*, 2023, 42(6) : 83 - 88, 94.
- WANG S L, WANG R, JIANG X C, et al. High-power hundred-nanosecond pulse solid-state laser for PPLN pump source [J]. *Journal of Shenyang Ligong University*, 2023, 42(6) : 83 - 88, 94. (in Chinese)

(责任编辑:宋颖韬)