

应用研究·非煤矿山·

微波热效应对充填体力学性能影响实验研究

Experimental study of microwave heating on mechanical properties of backfill

王洋¹, 吴迪², 唐志新¹, 李志勇¹, 肖明³, 董京浩¹, 杨建文¹, 刘鹏飞¹(1. 哈密红石矿业有限公司, 新疆哈密 839000; 2. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083;
3. 沈阳长丰建设评价有限公司新疆分公司, 新疆乌鲁木齐 830000)

摘要: 充填体的强度是充填采矿技术研究的核心问题之一, 直接关系到矿山的安全生产和经济效益的提高。本文对微波热效应下充填体力学性能的演化规律进行了研究, 为如何提高充填体早期强度提供了新的思路。通过正交实验, 研究了各影响因素对充填体强度的影响规律, 并且得到各影响因素的影响能力, 由大到小排列为灰砂比、浓度、功率、加热时间、微波介入时间。充填体强度随微波功率和微波加热时间的增加呈现出先上升后下降的趋势, 随微波介入时间的增加而下降。微波加热对充填体强度发展的促进作用在较高灰砂比和料浆浓度的充填体中体现的更加明显。

关键词: 充填体; 微波加热; 正交实验; 力学特性

中图分类号: TD853 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2021)06-0046-04

Abstract: The strength of backfill is one of the key factors in the research of cut-and-fill mining technology, which directly affects the safety production and improvement of economic benefits of a mine. The evolution of mechanical properties of backfill under microwave heating is studied herein, which provides a new idea on improving the early strength of backfill. By orthogonal experiment, the influence pattern of each factor on backfill strength is studied and the influence level of each such factor is obtained, based on which the factors are arranged in a descending order as cement-sand ratio, density, power, heating time and microwave intervention time. With the increase of microwave power and microwave heating time, the strength of backfill shows a trend of raise followed by fall, and it decreases with the increase of microwave intervention time. The effect of microwave heating on strength improvement of backfill is more obvious in the backfill with higher cement-sand ratio and pulp density.

Key words: backfill; microwave heating; orthogonal experiment; mechanical property

1 前言

近年来,在我国实施无废、绿色开采的资源开发战略格局下,充填采矿法得到了广泛的应用和发展。在充填采矿法的研究中,充填体的强度问题是充填采矿技术的核心问题之一。Thomas E G 的研究发现温度对充填体的强度具有较大影响,尤其是当养护温度低于 10℃ 时。在此温度条件下,水泥水化反应十分缓慢,对充填体强度影响较大^[1]。微波加热技术作为一种前沿技术,与传统加热相比,微波加热具有过程可控、选择性加热、升温速度快、穿透力强

的优点^[2]。微波技术应用在水泥基材料(如混凝土、砂浆)的热固化中,可以为这些材料提供均匀、快速的加热环境^[3-11],成为快速提高水泥基材料早期强度的有效手段。然而,充填体与混凝土和砂浆有所不同,主要表现在充填体所使用骨料以及充填骨料的性能、配合比和应用条件上。因此,微波技术在混凝土领域的研究结果并不直接适用于充填体。本文通过正交实验的方式,探究了充填体内部因素(充填体的灰砂比、料浆浓度)和主要外部因素(微波加热功率、微波加热时间以及微波介入时间)对全尾砂胶结充填体力学特性的影响。根据实验结果,总结归纳微波热效应对充填体的力学性能的影响规律,并且得到各影响因素对充填体强度的影响能力大小。

2 实验设计

2.1 实验流程

此次实验具体步骤如下:首先进行实验设计,然

[作者简介] 王洋(1990-),男,地质工程师,从事地质勘查、矿山开采工作。

[基金项目] 新疆维吾尔自治区高层次人才引进工程;北京科技大学中央高校基本科研业务费项目。

[引用格式] 王洋,吴迪,唐志新,等.微波热效应对充填体力学性能影响实验研究[J].中国矿山工程,2021,50(6):46-49+53.

后进行试样制备和力学性能测试。在微波加热环节中,将试样(带模具)加热完成从微波炉中取出后,用红外测温仪测量试样表面温度,并做好记录;在试样养护环节中,利用直尺对脱膜后的充填体进行尺寸测量,做好记录。然后对试样进行力学性能测试,测试过程中做好相应记录。最后,完成测试后及时关闭电脑和单轴压力机,并清洗所有相应设备。每组实验做3次,最后取平均值来保证实验数据的准确性,具体实验流程如图1所示。

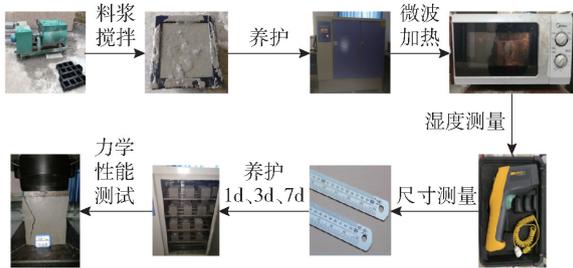


图1 实验流程图

2.2 正交实验设计

本实验确定了影响充填体力学性能的5个因素,分别为微波功率、微波加热时间、微波介入时间、充填料浆浓度以及灰砂比。对每个影响因素设计4个水平,研究各影响因素对充填体力学性能的影响规律,各因素水平见表1。

表1 正交实验因素水平表

水平	影响因素				
	料浆浓度/%	灰砂比	微波功率/W	加热时间/min	介入时间/h
1	68	1:4	70	3	0
2	70	1:6	210	5	3
3	72	1:8	350	7	6
4	74	1:10	490	10	12

利用“正交设计助手”设计实验,选择 $L_{16}(4^5)$ 为正交表^[12-13],以充填体养护7天龄期的抗压强度为评价指标,开展5因素4水平正交实验,共计16组实验。实验方案见表2。通过对实验数据进行极差以及方差分析,确定各影响因素对充填体力学性能的影响规律。

3 实验内容

3.1 实验材料及设备

实验原材料:本次实验尾砂全部来自新疆红石矿业梅岭铜矿,水泥为425号普通硅酸盐水泥。

表2 充填体力学性能影响因素正交实验设计

实验号	影响因素				
	微波功率/W	加热时间/min	介入时间/h	灰砂比	料浆浓度/%
1	70	3	0	1:4	68
2	70	5	3	1:6	70
3	70	7	6	1:8	72
4	70	10	12	1:10	74
5	210	3	3	1:8	74
6	210	5	0	1:10	72
7	210	7	12	1:4	70
8	210	10	6	1:6	68
9	350	3	6	1:10	70
10	350	5	12	1:8	68
11	350	7	0	1:6	74
12	350	10	3	1:4	72
13	490	3	12	1:6	72
14	490	5	6	1:4	74
15	490	7	3	1:10	68
16	490	10	0	1:8	70

实验设备及仪器:电子秤(精度0.001 g)、量筒(1 000 mL)、搅拌机、模具(10 cm × 10 cm × 10 cm)、微波炉(Midea M1-221A)、红外测温仪(FLUKE-561)、标准恒温恒湿养护箱(YH-60B型)、微机控制电液伺服岩石三轴试验机(TAW-2000)、打气筒、直尺等。

3.2 试样制备

胶结充填体试样制备包括四个部分,分别为砂浆搅拌、装模成型、微波加热、试样养护。

(1) 砂浆搅拌。先通过电子秤按一定比例精确称量相应质量的尾砂与水泥,倒入搅拌机中,启动搅拌机,搅拌半分钟,让尾砂与水泥干料充分混合;然后用量筒量取对应质量的自来水,作为拌合水加入到搅拌机中,详细配合比见上述实验设计。启动该动搅拌机,先低速搅拌2 min,使充填材料充分混合,暂停1 min,将筒壁上料浆刮入筒中,然后再高速搅拌2 min,使料浆呈现均质状态。

(2) 装模成型。模具形状为立方体,尺寸为10 cm × 10 cm × 10 cm,将上述搅拌均匀的充填料浆迅速灌入模具中,第一次灌入量大约为模具的2/3,然后用捣棒沿着模具边缘插捣料浆,此后手动震动模具,目的是赶走充填料浆灌入过程中的气泡,其中插

捣料浆 20 次,手动震动约为 10 次;然后进行第二次灌注将模具填满,轻微震动模具,然后用刮刀将模具表面抹平,同时用保鲜膜将模具包裹密封,防止水分流失,同一测试项目的试样必须使用同一次的料浆。

(3)微波加热。将制备好的充填体连带模具一起放入微波炉中加热,加热条件和微波功率如表 2 实验设计中所示,微波介入时间是指充填料浆装入模具到进行微波加热之间的时间。

(4)试样养护。所有试样除进行微波加热步骤外,均置入养护箱中进行恒温恒湿养护,养护条件为养护温度为 20 ℃(±1 ℃)、相对湿度为 99%。所有试样养护 24 h 后脱膜,通过模具底部的小口,利用高压空气将充填体吹出。在养护箱中养护至 7 d 龄期后进行单轴抗压强度测试。

3.3 力学性能测试

充填体的力学特性指标主要指充填体的抗压强度以及弹性模量两个指标,均可通过试样的应力-应变过程曲线获得。抗压强度测试前,先将压力机调试好,然后从养护箱中取出需要测试的试样放置在压力台上,将软件里应力、应变数值清零,然后进行应力-应变测试,测试过程中,压力加载速率为 100 N/s,直至试样安全破坏。测试完成后,将对应的应力-应变曲线保存好,通过应力-应变曲线,求出充填体的最大应力值(即最大抗压强度)及弹性模量。

4 实验结果及其分析

4.1 正交实验结果

试样制备完成后按实验方案设计进行微波加热与养护,养护 7 d 后对充填体试样进行单轴压缩实验,得到各影响因素下充填体的单轴抗压强度,测试结果见表 3。

4.2 正交实验结果规律分析

对正交实验的结果进行分析可以找出各影响因素对充填体力学性能的影响规律,并对其影响程度的大小进行排序,故对此次正交实验结果进行极差分析和方差分析。

1)极差分析

极差分析操作简单,结果直观,缺点是不能估计实验的误差。通过对实验数据进行极差计算,得出此次正交实验的极差分析结果,分析结果见表 4。其中, k_n ($n = 1, 2, 3, 4$) 表示影响因素各水平的均值, R 表示各影响因素的极值,极值越大,对充填体单轴

抗压强度的影响就越大。

表 3 充填体力学性能影响因素正交实验结果

实验号	影响因素					单轴抗压强度/ MPa
	微波功率/W	加热时间/min	介入时间/h	灰砂比	料浆浓度/%	
1	70	3	0	1:4	68	1.472
2	70	5	3	1:6	70	1.18
3	70	7	6	1:8	72	0.863
4	70	10	12	1:10	74	0.513
5	210	3	3	1:8	74	0.871
6	210	5	0	1:10	72	0.463
7	210	7	12	1:4	70	1.85
8	210	10	6	1:6	68	0.983
9	350	3	6	1:10	70	0.37
10	350	5	12	1:8	68	0.53
11	350	7	0	1:6	74	2.224
12	350	10	3	1:4	72	2.241
13	490	3	12	1:6	72	1.385
14	490	5	6	1:4	74	2.357
15	490	7	3	1:10	68	0.331
16	490	10	0	1:8	70	0.694

表 4 充填体单轴抗压强度极差分析

因素	微波功率/W	加热时间/h	介入时间/h	灰砂比	料浆浓度/%
k_1	1.007	1.204	1.213	1.980	0.829
k_2	1.042	1.133	1.156	1.443	1.024
k_3	1.341	1.317	1.143	0.740	1.238
k_4	1.192	1.108	1.069	0.419	1.491
R	0.334	0.293	0.144	1.561	0.662

通过极值分析表 4 可以看出,各影响因素对充填体单轴抗压强度影响的顺序由大到小排列为充填料浆灰砂比、充填料浆浓度、微波功率、微波加热时间、微波介入时间。相比而言,充填体内部因素对充填体单轴抗压强度的影响效果要大于外部因素的影响,同时充填料浆灰砂比的影响程度较充填料浆浓度的影响大。

为了更加直观的看出各影响因素对充填体单轴抗压强度性能的影响,以各影响因素为横坐标,实验结果为纵坐标,具体如图 2 所示。

从图 2 可以看出,充填体的单轴抗压强度随着微波功率和加热时间的增加呈现先增加再降低的趋势;随灰砂比和料浆浓度的降低而降低;微波加热介

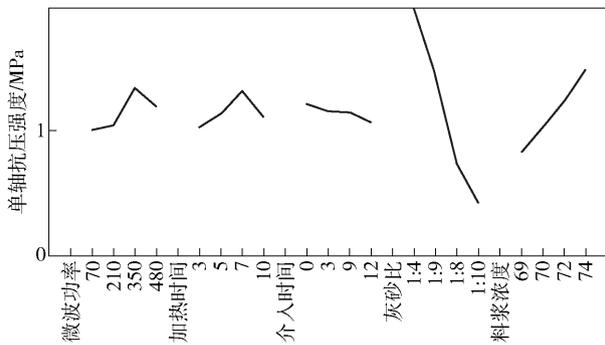


图2 极差分析趋势图

入时间越早,对充填体的单轴抗压强度提升越明显。

2) 方差分析

方差分析相比于极差分析,优点在于方差分析能够估计实验误差,分析实验组内和组间误差大小,避免实验误差对实验数据带来的干扰,确保数据的可靠性和真实性。

通过此次实验结果进行方法分析计算,得出充填体力学性能影响因素的方差分析结果,方差分析结果见表5。

表5 正交实验方差分析表

因素	偏差平方和	自由度	F比	F临界值	显著性
微波功率/W	0.282	3	6.714	9.280	
加热时间/min	0.183	3	4.357	9.280	
介入时间/min	0.042	3	1.000	9.280	
灰砂比	5.909	3	140.690	9.280	*
料浆浓度/%	0.973	3	23.167	9.280	*
误差	0.04	3			

通过表5可以得知,在各影响因素中,充填料浆灰砂比与充填料浆浓度对充填体的单轴抗压强度具有显著影响,而微波加热时间、微波功率以及微波介入时间对充填体单轴抗压强度的影响不显著。

5 结论

本文通过正交实验论证了微波在充填体固化中的作用,其主要结论如下:

(1)微波加热可以提升充填体温度,早期的微波加热有助于提高充填体的力学性能,适当地增加微波加热时间有助于充填体单轴抗压强度的发展。但是,如果微波加热时间过长,则会对充填体内部结构造成破坏,从而对充填体的力学性能产生不利影响。

(2)对充填体施加微波影响的时机非常重要,要充分考虑到充填体静置养护与微波加热之间的时间。微波加热的介入时间越短,充填体早期的单轴

抗压强度越高。微波加热在充填体固化早期可以显著的提高充填体的单轴抗压强度。

(3)微波加热功率对充填体强度发展的影响也是非常重要的,充填体的单轴抗压强度随着微波加热功率的升高呈现出先升高后降低的趋势,在一定的微波加热功率范围内,施加微波影响可以显著的提升充填体的单轴抗压强度,但微波加热功率一旦过大,就会对充填体的强度发展产生不利影响,降低充填体强度,甚至低于正常养护条件下的充填体。

(4)充填体的抗压强度受到充填料浆浓度的强烈影响,随着充填料浆浓度的提升,充填体抗压强度不断增加,微波加热对充填体强度发展具有积极作用,对7d龄期的充填体强度提升明显,且随着充填料浆浓度的增加,微波加热对充填体抗压强度的提升越明显。

(5)充填体的抗压强度受到充填料浆灰砂比的强烈影响,随着充填料浆灰砂比的提升,充填体抗压强度不断增加,提升幅度呈现较好的一致性,微波加热在充填料浆灰砂比较小的充填体中起消极作用,在充填料浆灰砂比较大的充填体中起积极作用,且充填料浆灰砂比越大,提升效果越明显。

(6)充填体内部因素对充填体单轴抗压强度的影响效果要大于外部因素的影响;同时,在各影响因素中,充填料浆灰砂比与充填料浆浓度对充填体的单轴抗压强度具有显著影响。

[参考文献]

[1] Thomas E G. Characteristics and behaviour of hydraulic fill material [Ph. D. Thesis] [D]. Queensland: University of Queensland, 1969.

[2] 阎润卿.微波技术基础[M].北京:北京理工大学出版社,1988.

[3] L. E. Lagos, W. Li, M. A. Ebadian. Heat transfer within a concrete slab with a finite microwave heating source [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, 38(5):28-32.

[4] R. H Haddad, I. L Al-Qadi. Characterization of portland cement concrete using electromagnetic waves over the microwave frequencies [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(10).

[5] Kunihiro Fukui, Kazuhiro Arai, Keiji Kanayama, et al. Phillipsite synthesis from fly ash prepared by hydrothermal treatment with microwave heating [J]. Advanced Powder Technology, 2006, 17(4).