

# 基于 ANSYS 的深孔帷幕灌浆钻孔弯曲机理研究

邱顺兵

(中国人民解放军西部战区空军勘察设计院, 四川 成都 610041)

**摘要:** 大岗山水电站深孔帷幕灌浆工程量大, 灌浆孔孔斜控制要求高, 防斜技术难度大。钻孔弯曲机理研究对指导钻进成孔, 防止钻进事故, 加快帷幕灌浆施工进度有重要意义。从工区地质条件入手, 对深孔帷幕钻孔弯曲原因、钻孔弯曲条件进行分析, 并利用 ANSYS 软件有针对性地建立了不同的钻孔弯曲分析数值模型, 很好地揭示了钻孔弯曲机理。根据研究结果采取针对性措施, 制定、调整、优化钻进工艺参数, 很好地将钻孔偏斜控制在设计范围内, 避免了发生钻进事故, 加快了帷幕灌浆施工进度, 产生了可观的经济效益。

**关键词:** 帷幕灌浆; 防斜技术; ANSYS; 钻孔弯曲

**中图分类号:** TU472.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-1144(2022)02-0158-05

## Drilling Bending Mechanism in Deep Hole Dykes of Curtain Grouting with ANSYS

QIU Shunbing

(The Survey Design Institute of Western War Zone Air Force PLA, Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract:** Because the curtain grouting quantities of the dyke is large, the borehole bending requirement of grouting hole is high, the deviation control technique is hard, the bending mechanism of hole is very important. The research of drilling bending mechanism has important engineering significance. It can prevent drilling accidents and accelerate the construction speed of curtain grouting. First, starting with the geological conditions, the reason and condition of the curtain grouting borehole drilling bending was analyzed. Then the different drilling bending numerical models with ANSYS was developed to reveal the drilling bending mechanism. After that, by taking targeted measures, formulating, adjusting and optimizing drilling process parameters, we control the borehole deflection within the design range to avoid the drilling accidents and accelerate the construction speed of curtain grouting and produce considerable economic benefits.

**Keywords:** curtain grouting; deviation control technique; ANSYS; Drilling bending

大岗山水电站位于四川省石棉县境内, 其深孔帷幕灌浆工程量大, 涉及大坝、二道坝、厂房等部分。该帷幕灌浆工程灌浆孔孔斜控制要求高(顶角变化 $\leq 0.5^\circ/100\text{ m}^{[1]}$ ), 大大超过常规地质钻孔孔斜要求(顶角变化 $\leq 2^\circ/100\text{ m}$ ), 防斜技术难度大。根据现场测斜资料, 工区地层各向异性明显, 使灌浆孔孔斜严重, 基本达不到设计要求, 现场被迫进行大量纠斜工作, 严重影响工程进度, 工作效率低下。为了把灌浆孔偏斜量控制在设计范围内, 进一步提高生产效率, 加快施工进度, 节约工程费用, 对造成钻孔弯

曲的原因进行分析、对弯曲机理进行研究显得尤为重要。

根据近年来国内外相关研究, 目前对于帷幕灌浆孔弯曲机理研究多为从宏观的地质条件(岩层各向异性、软硬互层、软弱夹层等)、技术条件、施工操作方法等方面进行分析, 鲜有成果从微观方面通过对底部钻具边界效应、粗径钻具孔底碎岩过程、钻孔底唇面应力状态等进行分析得出灌浆孔弯曲机理。文章从微观方面钻孔底唇面和有效影响深度范围内地应力入手, 利用 ANSYS 软件有针对性地建立了不

同的钻孔弯曲分析数值模型,很好地揭示了钻孔弯曲机理。根据研究结果采取针对性措施,制定、调整、优化钻进工艺参数,很好地将钻孔偏斜控制在设计范围内,避免了发生钻进事故,加快了帷幕灌浆施工速度,产生了可观的经济效益,用于指导该帷幕灌浆工程施工,并为类似工程提供相应工程实践经验。

## 1 深孔帷幕灌浆钻孔弯曲原因

造成深孔帷幕灌浆钻孔弯曲的原因主要有三方面因素:地质因素、操作技术因素和工艺技术因素<sup>[2-3]</sup>。对不同的工程而言,其特定的地质条件(地层岩性、岩石结构面产状、岩石的可钻性等)对灌浆孔弯曲影响极其重要。本工程帷幕灌浆孔钻孔弯曲原因的地质因素为:工程场地地质构造较为复杂,区域构造稳定性差。场地处峡谷为“Ω”型,其新构造运动呈剧烈的整体性抬升。山体内部应力高,工区地应力场较为复杂。帷幕灌浆范围内地层各向异性,加之地形地貌的特殊性和地应力场分布情况复杂性,导致地层软弱结构面增加,致使出现软硬岩体交替的情况。工区内岩层倾角一般 $\geq 30^\circ$ ,在钻进施工时钻孔底唇面易出现软硬不同情况,导致钻孔弯曲。其工艺技术因素和操作技术因素为:帷幕钻孔工程数量大,帷幕钻孔设计线长,灌浆范围广;存在多层平洞,各层平洞具体地层岩性不同,岩石各向异性明显,岩层产状有差异;由于水利帷幕灌浆的工程特殊性,平洞内净空有限,操作技术较普通地质钻孔技术难度大,钻孔操作技术要求严格,孔斜控制难度大。

## 2 深孔帷幕灌浆钻孔弯曲条件

在帷幕钻孔施工中,当粗径钻具发生偏转,未沿设计的顶角和方位角钻进时,就会产生灌浆孔弯曲。产生灌浆孔弯曲充分条件为<sup>[4]</sup>:灌浆孔直径大于钻具直径,存在灌浆孔弯曲的孔壁间隙;钻进过程中有使之产生灌浆孔弯曲的倾倒力,并且要求倾倒方向保持稳定<sup>[5]</sup>。

为了帷幕灌浆顺利钻孔、有效地冷却钻头、悬浮和排出岩屑,孔壁间隙是客观存在的。该工程帷幕灌浆钻孔采用小口径金刚石钻进工艺,因需施加轴向压力,故使其倾倒的力也是客观存在的。

在各向同性地层中钻进时,钻具倾倒方向不稳定<sup>[6]</sup>,不满足钻孔弯曲的充分条件,灌浆孔不会发生弯曲。在各向异性地层中钻进时,当底唇面遇到层理面和节理面,孔底会出现应力集中,呈椭圆形的非对称破碎,且由于弯曲力矩原因,使灌浆孔朝垂直

于结构面走向的方向倾斜和发展(见图 1)<sup>[7]</sup>。

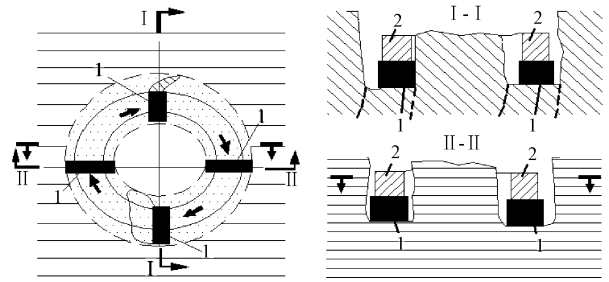


图 1 岩石各向异性对钻具倾斜面的影响

在岩性变化处钻进时,此时钻头底唇面部分为硬岩、部分为软岩,孔底各处岩石的抗压强度、黏聚力、内摩擦角等不同,会产生偏倒力,使灌浆孔朝垂直于结构面走向的方向倾斜和发展。由此,从粗径钻具的孔壁间隙、产生倾倒的力和倾倒力的方向等条件看,该工程的帷幕灌浆孔弯曲都满足弯曲条件。

## 3 深孔帷幕灌浆钻孔弯曲机理研究

在进行深孔帷幕灌浆钻孔施工时,宏观上是通过钻压把轴向压力施加给钻具,从而提供弯曲所需的偏倒力,故宏观上从钻具管柱方面入手进行钻孔弯曲数值模拟。微观上是由于孔底应力状态不同,非均匀破碎导致帷幕灌浆钻孔弯曲,故微观上从钻具底唇面岩石应力状态进行钻孔弯曲数值模拟。

### 3.1 ANSYS 简介

ANSYS 软件最初源自于美国,后经工程技术人员引入,在相关工程领域应用和实践。其核心思路是<sup>[8]</sup>:把待求量理解成是由许多个节点相互连接的子单元构成,然后设定相关边界条件,利用各种平衡方程和能量守恒条件,从而得出其求解域<sup>[9]</sup>。

### 3.2 深孔帷幕灌浆钻孔弯曲数值模拟

(1) 建立模型。先在 CAD 中绘制出钻具管柱的 DWG 图形,再将图形保存为软件可识别的文件类型,进而直接插入到 ANSYS 软件中。建立钻具管柱模型后,根据灌浆钻孔特定施工情况,设置管柱工作条件,结合钻具管柱受力特征施加相应的位移荷载,并导出钻具管柱的下部模型,见图 2。

微观上就钻具底唇面岩石应力状态,根据不同地层岩性条件建立针对性的数值分析模型。本文分别就完整硬岩、完整软岩、软硬岩界面处,软弱岩夹层建立不同的钻孔弯曲数值模型<sup>[10]</sup>。根据圣维南理论<sup>[11]</sup>,上部荷载对钻孔底部的应力作用仅在一定范围内有效,因此本文为消除模型边界效应,取模型

宽度  $B = 10 \times d$  (钻孔孔径), 并根据对称原则, 建立起 1/4 平面模型<sup>[12]</sup>, 其模型边界见图 3。其中以帷幕灌浆线为  $x$  轴, 垂直帷幕灌浆线下游为  $y$  轴, 从帷幕灌浆孔口向下为  $z$  轴, 边界箭头方向与对应方向反向, 且指向灌浆孔中心<sup>[13-14]</sup>。

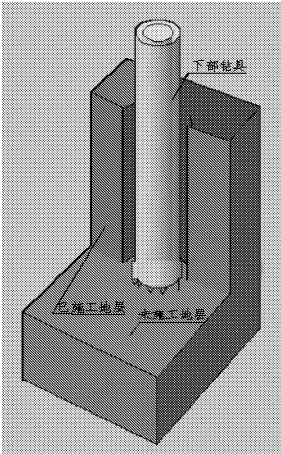


图 2 钻具管柱模型

(2) 定义数值材料特性。在完成前序步骤后, 定义相关材料的属性指标, 如各类岩石的密度  $\rho$ 、岩体泊松比  $\mu$ 、单轴抗压强度  $f_{cu}$  和岩体变形模量  $E_0$  等。工区地层主要为坚硬的花岗岩, 相对较软的辉绿岩, 根据前期研究成果, 不同岩性地层的参数指标见表 2 和表 3<sup>[15]</sup>。

表 3 横贯同性地层力学参数值

岩性	水平变形模量 /GPa	垂直变形模量 /GPa	水平剪切模量 /GPa	垂直剪切模量 /GPa	泊松比	密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
II	24.5	14.2	9.82	5.61	0.25	$2.64 \times 10^3$
III1	9.5	6.1	3.66	2.33	0.31	$2.63 \times 10^3$
IV2	2.5	2.3	0.93	0.72	0.34	$2.58 \times 10^3$
V	0.7	0.8	0.28	0.26	0.37	$2.46 \times 10^3$

(3) 划分网格。在完成前序步骤后, 定义材料特征<sup>[16]</sup>, 并直接利用 DESZE、SMARTSIZE 等辅助命令控制过程步骤, 进而生成分析模型的控制网格<sup>[17]</sup>。再根据具体模型情况进行网格修补, 从而建立起灌浆孔弯曲数值模型, 见图 4。

(4) 施加荷载、数据处理及结果导出。根据帷幕钻孔施工的钻进工艺参数进行加荷、数据处理后, 得出各模型的孔底应力见图 5—图 10。

### 3.3 数值模拟结果分析

(1) 由图 5—图 7 对比: 钻进完整的花岗岩、较坚硬辉绿岩 (左岸) 时, 孔底应力值约为  $5.2 \times 10^6$  MPa, 影响范围内深部应力值为  $3.1 \times 10^7$  MPa ~

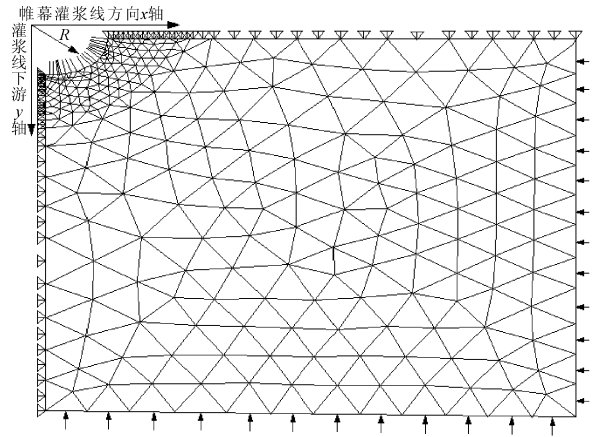


图 3 钻孔弯曲模型平面边界

表 1 分析模型钻柱物理力学参数

钻柱 外径 /mm	钻柱 内径 /mm	钻柱 弹模 /GPa	泊松 比	钻柱 密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	重力加 速度 /( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )
75	68	2.1	0.3	7.8	9.8

表 2 不同岩性材料力学参数

岩性	泊松比	变形模量 /GPa	密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
II	0.25	20.05	$2.64 \times 10^3$
III1	0.31	7.53	$2.62 \times 10^3$
IV2	0.35	3.05	$2.59 \times 10^3$
V	0.72	0.75	$2.47 \times 10^3$

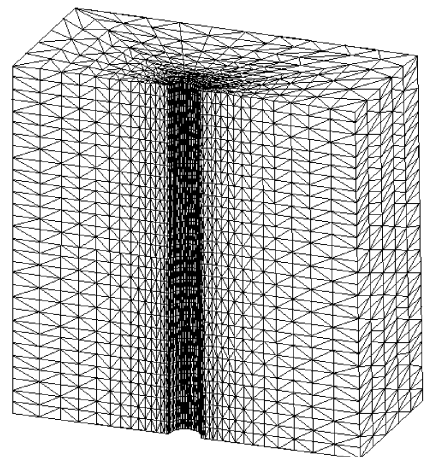


图 4 深孔帷幕灌浆孔弯曲立面模型

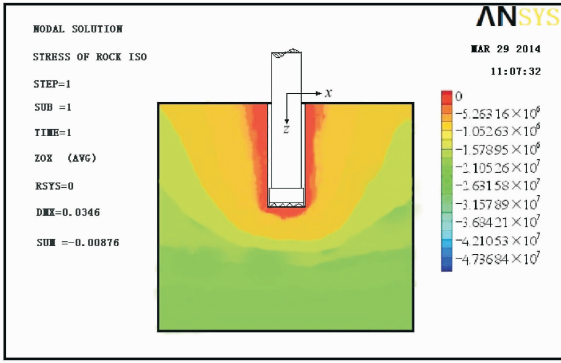


图 5 钻进花岗岩孔底应力等值线图

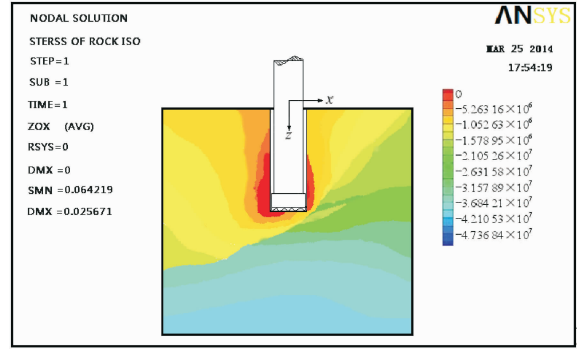


图 9 钻进辉绿岩 - 花岗岩交界处孔底应力等值线图

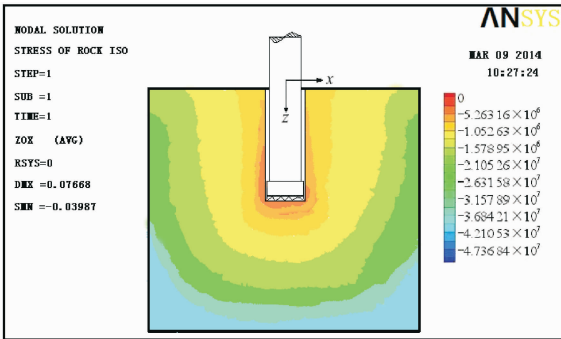


图 6 钻进坚硬辉绿岩(左岸)孔底应力等值线图

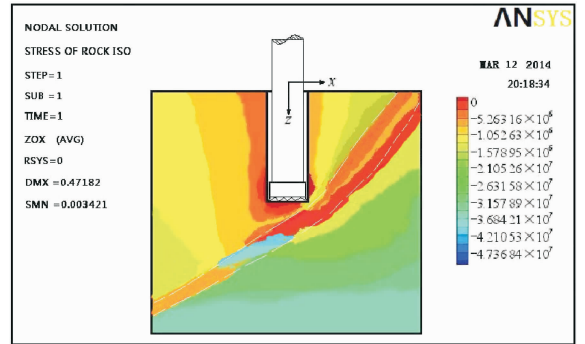


图 10 钻进辉绿岩脉夹层孔底应力等值线图

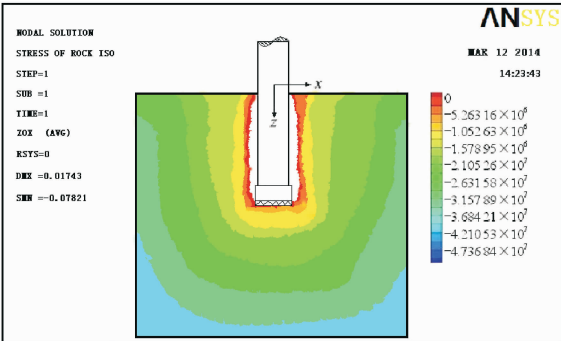


图 7 钻进软弱辉绿岩(右岸)孔底应力等值线图

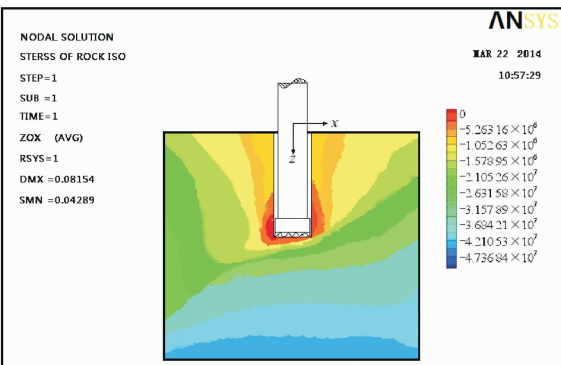


图 8 钻进花岗岩 - 辉绿岩交界处孔底应力等值线图

$4.2 \times 10^7$  MPa,孔底应力有规则的渐变,各向基本相同,即表现为底层面的各处反作用力数值相等,平稳钻进,不会发生钻孔弯曲。

(2) 由图 7 钻柱下部至孔底应力范围为  $0.0 \times 10^6$  MPa ~  $5.2 \times 10^6$  MPa,同一深度处应力基本相等,但不同深度处应力范围变化较大,甚至在钻具底部出现扩容现象,是因为当钻进辉绿岩时,其自身强度比花岗岩低,穿透后由于钻压、钻具等影响,孔壁被往复掏蚀、破坏,增大了孔壁间隙,造成钻孔弯曲,甚至导致钻孔施工中遇到突然卡钻、钻进负荷突然增大,钻杆折断的事故<sup>[18]</sup>。

(3) 据图 8—图 10 可知,钻进至两种岩性界面处和辉绿岩脉夹层处,孔底应力值约为  $1.0 \times 10^6$  MPa ~  $5.2 \times 10^6$  MPa,影响范围内深部应力值为  $4.2 \times 10^7$  MPa ~  $4.7 \times 10^7$  MPa,其孔底应力成非对称发散状,孔底各方向应力增减幅度不同,出现应力集中,呈现为各向异性,钻孔底面各处相应的反力大小不一,不同地层不同方向的孔底应力也大小不一,致使钻进在偏倒力作用下产生偏斜,从而出现钻进弯曲。

(4) 根据孔底应力图 5—图 10,利用数值模拟方法合理地揭示了不对称地应力下,导致孔底钻具倾倒、偏斜,进而产生钻孔弯曲的原因。

(5) 根据数值模拟成果,一般在地层岩性变化处、岩脉夹层处更易出现非均匀应力,故在现场施工钻至相应层面时,需对钻进规程参数进行及时调整,避免出现钻孔弯曲。

## 4 结 论

(1) 本文就大岗山深孔帷幕灌浆孔弯曲情况,从钻孔弯曲原因、钻孔弯曲条件进行了深入分析,并根据不同地层情况,利用 ANSYS 软件有针对性地建立了不同的钻孔弯曲数值模型,进行了相应的模拟、分析,很好的揭示了孔底非对称、不均匀应力导致帷幕灌浆钻孔弯曲的原因。

(2) 利用 ANSYS 软件进行深孔帷幕灌浆钻孔弯曲数值模拟,很好地满足了大岗山水电站深孔帷幕灌浆孔施工中孔斜分析要求,根据研究结果采取针对性措施对相关因素进行控制,并注重在地层岩性变化处调整钻进工艺参数,将钻孔偏斜控制在设计范围内,满足了灌浆孔孔斜要求。根据研究成果用于指导后续灌浆孔施工,并为类似水利水电工程提供相应工程实践经验。

### 参考文献:

- [1] 大渡河大岗山水电站帷幕灌浆工程投标文件[R]. 北京:北京振冲工程股份有限公司,2008.
- [2] 刘希圣主编. 钻井工艺原理[M]. 北京:石油工业出版社,1988.
- [3] 李世忠. 高等学校教材——钻探工艺学[M]. 北京:地质出版社,1992.
- [4] 肖圣泗. 钻孔弯曲测量[M]. 北京:地质出版社,1989.

- [5] 成卫军. 浅析岩溶地区深孔帷幕灌浆钻孔弯曲机理及预防措施[J]. 广西水利水电,2019(5):63-66.
- [6] 王成勇,刘培德,胡荣生. 花岗岩切削破碎过程研究[J]. 岩石力学与工程学报,1991,10(2):185-196.
- [7] 孙建军. 深孔帷幕灌浆孔斜成因与处理[J]. 中国农村水利水电,2009(8):106-108.
- [8] 王勛成. 有限元法[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [9] 章扬烈. 钻柱运动学与动力学[M]. 北京:石油工业出版社,2001.
- [10] 谢贻权,何福保. 弹性和塑性力学中的有限元单元法[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [11] 吕苗荣. 石油工程管柱力学[M]. 北京:中国石化出版社,2012.
- [12] 谢红强,何江达,肖明砾. 大型水电站厂区三维地应力场回归反演分析[J]. 岩土力学,2009,30(8):2471-2476.
- [13] 侯明勋,葛修润. 岩体初始地应力场分析方法研究[J]. 岩土力学,2007,28(8):1626-1630.
- [14] 张建国,张强勇,杨文东,等. 大岗山水电站坝区初始地应力场反演分析[J]. 岩土力学,2009(10):3071-3078.
- [15] 岳晓蕾. 大岗山地应力反演与工程应用研究[D]. 济南:山东大学,2006.
- [16] 张洪信,王怀敏,孟祥踪,等. ANSYS 基础与实例教程[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- [17] 邱顺兵. 大岗山水电站深孔帷幕灌浆孔钻柱力学分析与钻孔弯曲机理研究[D]. 成都:成都理工大学,2014.
- [18] 魏欣桃. 孔雀河流域水利工程深孔帷幕灌浆孔斜若干问题研究[J]. 中华建设,2020(6):112-113.

(上接第 157 页)

- [18] Riley C M. Relation of chemical properties to the bloating of clays[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1951,34:121-128.
- [19] 顾慰慈. 堤防工程设计计算简明手册[M]. 北京:中国水利水电出版社,2014.
- [20] 堤防工程设计规范:GB 50286—2013[S]. 北京:中国计划出版社,2013.
- [21] 沈小雄,王常民,连石水,等. 东洞庭湖最大熵法风浪谱估计[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2007,4(1):39-43.
- [22] 李建康. 粉煤灰再生混凝土护坡砌块的设计与应用研究[D]. 济南:山东大学,2020.
- [23] 水工混凝土试验规程:SL 352—2020[S]. 北京:中国水利水电出版社,2020.
- [24] 国家建筑材料工业局. 多孔陶瓷显气孔率、容重试验方法:GB/T 1966—1996[S]. 北京:中国标准出版社,1996.
- [25] 王小娟,刘 路,贾昆程,等. 陶粒泡沫混凝土的力学性能及吸能特性[J]. 建筑材料学报,2021,24(1):207-215.