



悬臂双排抗滑桩边坡治理综述

吴阿龙, 董晨辉, 邓友生, 庄子颖, 陈 茁

(西安科技大学 桩承结构研究中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 双排抗滑桩是大型滑坡治理常用措施之一, 工程应用和相关研究成果较多。然而, 其承载机理还有待深入研究, 且相关设计标准并未形成, 这些因素限制了悬臂双排抗滑桩的发展。鉴于此, 本文对悬臂双排抗滑桩边坡治理机理研究成果进行归纳总结, 重点综述了双排抗滑桩加固机理和影响抗滑桩承载特性的因素; 双排抗滑桩加固边坡研究常用的理论计算、试验研究和数值模拟3种研究方法及相关成果, 并对对比分析了其优缺点; 当前双排抗滑桩加固边坡研究现状, 在此基础上凝练指出亟待解决的前沿科学问题和未来研究的重点, 为双排抗滑桩边坡治理的理论和工程技术的发展与完善提供理论依据, 对相关规范的编制和实际工程具有一定的指导意义。

关键词: 边坡治理; 悬臂双排抗滑桩; 承载影响因素; 承载机理

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)01-0001-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.01.001

A review on slope treatment of cantilever double-row anti-slide piles

WU Along, DONG Chenhui, DENG Yousheng, ZHUANG Ziyang, CHEN Zhuo

(Pie-supported Structures Research & Test Center, Xi'an University of

Science and Technology, Xi'an 710054, Shanxi, China)

Abstract: Double-row anti-slide piles are one of the common measures for large-scale landslide control, and there are many engineering applications and related research results. However, its bearing mechanism still needs to be further studied, and the relevant design standards have not been formed, which limited the development of cantilever double-row anti-slide piles. In view of this, the research results of the slope treatment mechanism of cantilever double-row anti-slide piles are summarized, the reinforcement mechanism of double-row anti-slide piles and the factors affecting the bearing characteristics of anti-slide piles are reviewed. Three research methods, including theoretical calculation, experimental research and numerical simulation that are commonly used in the study of double-row anti-slide piles reinforced slope and related results, and their advantages and disadvantages are compared and analyzed. Based on the current research status of double-row anti-slide pile reinforced slope, the cutting-edge scientific problems that need to be solved urgently and the focus of future research are concisely pointed out, providing a theoretical basis for the development and improvement of the theory and engineering technology of double-row anti-slide piles slope treatment, and a certain guiding significance for the compilation of relevant specifications and practical engineering.

Key words: slope treatment; cantilever double-row anti-slide piles; bearing influencing factors; bearing mechanism

近年来, 随着西部大开发和“一带一路”建设不断向复杂艰险的山区推进, 出现了许多体积

大、推力大的滑坡, 而传统的挡土墙、单排抗滑桩等不能提供足够的抗力。双排抗滑桩具有加固效果

收稿日期: 2023-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878554)

作者简介: 吴阿龙(1999—), 男, 硕士研究生, 从事基础工程与工程结构防灾减灾研究。

好、安全性能高等优点,适用于大型滑坡治理,实际工程中也有所应用,例如杭金衢高速公路 K103 滑坡、成兰高铁高陡边坡、三峡库区巴东县红石包滑坡和东深供水改造工程 K13 滑坡等。双排抗滑桩具有多种结构类型,如悬臂双排抗滑桩、门式双排抗滑桩、h 型抗滑桩和槲型双排抗滑桩等,其中悬臂双排抗滑桩由于施工便利,应用最为广泛。国内外众多学者在双排抗滑桩加固边坡方面也做了大量研究。如:路立龙等^[1]结合四川某高速公路路基开挖边坡治理工程,对比研究不同处治方案,发现采用双排圆形抗滑桩效果较好;汪源等^[2]依托实际工程建立有限元模型,分析不同布桩条件下的边坡安全系数及滑坡推力在前后排抗滑桩上的分配情况,发现双排桩布桩方式对边坡安全影响较大;刘强等^[3]通过模型试验研究,发现双排桩对二维结构边坡支护效果更好;杨帆等^[4]通过理论计算和数值模拟研究发现,悬臂排桩桩后水平土拱影响范围主要在桩后两倍桩径内。虽然相关研究成果很多,但缺少对研究成果的归纳总结,限制了双排抗滑桩设计理论的创新与发展。本文通过搜集前人大量的研究成果,从加固机理、承载性能影响因素、研究方法等方面,对悬臂双排抗滑桩加固边坡相关研究进行归纳分析总结,探讨悬臂双排抗滑桩加固边坡机理,并指出当前研究存在的问题,对今后相关研究进行展望,以期可为双排抗滑桩研究、设计规范的编制和实际工程应用提供参考。

1 双排抗滑桩作用机理

1.1 加固机理

为便于理解,定义靠山侧第一排桩为后排桩,第二排桩为前排桩。双排抗滑桩加固边坡时,会形成多层土拱效应。通过土拱效应将滑坡推力传递到后排桩,使其受到桩间土体作用,同时桩间土体抗力也会分担到前排桩上,剩余推力通过前排桩桩前土拱传递到前排桩,工作机制模型如图 1 所示^[5]。桩体挤压成孔时,桩周围土体被侧向挤压,双排抗滑桩桩前土也被挤压,一定范围内的土体密实度提高,土体承载性能得到改善,后排桩荷载通过排间土向前排桩传递效果提升,同时桩体还起到加筋效果,土体整体抗剪强度提高,土体抗滑能力增强。在相同荷载

条件下,双排桩每列两桩的截面与单排桩截面一致时,单排桩截面惯性矩与桩体抗弯刚度大幅增加,单排桩身土压力和弯矩远大于双排桩,单排抗滑桩弯矩、滑坡推力以及桩前土抗力增速均大于双排桩,而双排抗滑桩受力合理性和抗滑性能更好^[2]。

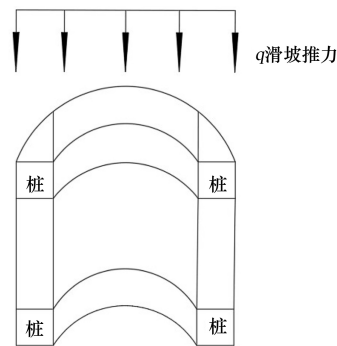


图 1 双排抗滑桩工作机制示意

1.2 影响因素

当双排抗滑桩排距较小时,前排桩受后排桩遮蔽效应,几乎不承担推力,推力主要由后排桩承担^[3];随着排距的增加,前排桩承担推力不断增加,前后桩水平位移先减后增,前排桩剪力先减后增,后排桩剪力变化较小,边坡稳定系数先增后减^[4-5];当排距增大到一定值时,前后排桩独立工作,共同分担滑坡推力。

前排抗滑桩锚固深度较大的双排抗滑桩抗力更大。当边界位移超过一定值时,后排抗滑桩锚固深度较大的双排抗滑桩抗力更大^[10]。桩径的变化对桩的位移、内力、前后排桩承担滑坡推力的比例等均有影响,尤其对桩身位移的影响^[11]。随着桩间距的增大,土拱效应减弱,双排抗滑桩荷载分担比与桩间距大致承负相关,双排桩桩间距与桩径比为 46 时,前后排桩发挥作用效果较好^[12-13]。交错布置的双排桩的前排桩可以当做后排桩“溢出”荷载的拱脚,支挡性能更好^[9]。双排桩桩顶连接抗滑效果更好,且相较于同排桩连接,前后排连接桩体受力更加合理^[14]。

1.3 承载特性

双排抗滑桩后排桩承担大部分推力,分担推力比例达到了 70% 左右;前排桩承担比例相对较低,抗滑桩在滑面处和嵌固段中部受到剪力最大^[11]。抗滑桩发挥作用时,桩体以拉弯破坏为主,滑动面以上土压力沿桩身梯形分布,滑动面

(1) 滑面达到极限状态时的推力计算公式如下。

$$E_1 = W_1 \sin a_1 - W_1 \cos a_1 \tan \varphi_1 - c_1 l_1 + \Delta E \cos a_1 + \Delta E \sin a_1 \tan \varphi_1 \quad (7)$$

$$E_i = W_i \sin a_i - W_i \cos a_i \tan \varphi_i - c_i l_i + \Psi_i E_{i-1} \quad (i > 1) \quad (8)$$

式中: φ_i 为第 i 条块的滑面内摩擦角, ($^\circ$); c_i 为第 i 条块的滑面黏聚力, kN/m^2 ; ΔE 为后排桩桩前侧抗力水平方向合力, kN/m ; Ψ_i 为第 i 条块向前传递滑坡推力传递系数。

(2) 滑体超载法设计推力计算公式:

$$E_1 = F_s W_1 \sin a_1 - W_1 \cos a_1 \tan \varphi_1 - c_1 l_1 + \Delta E \cos a_1 + \Delta E \sin a_1 \tan \varphi_1 \quad (9)$$

$$E_i = F_s W_i \sin a_i - W_i \cos a_i \tan \varphi_i - c_i l_i + \Psi_i E_{i-1}, \quad (i > 1) \quad (10)$$

式中: F_s 为设计安全系数; Ψ_i 为传递系数, 计算公式如下。

$$\Psi_i = \cos(a_{i-1} - a_i) - \sin(a_{i-1} - a_i) \tan \varphi_1 \quad (11)$$

(3) 滑面强度折减法设计推力计算公式:

$$E_1 = W_1 \sin a_1 - W_1 \cos a_1 \tan \varphi_1 / F_s - c_1 l_1 / F_s + \Delta E \cos a_1 + \Delta E \sin a_1 \tan \varphi_1 / F_s \quad (12)$$

$$E_i = W_i \sin a_i - W_i \cos a_i \tan \varphi_i / F_s - c_i l_i / F_s + \Psi'_i E_{i-1}, \quad (i > 1) \quad (13)$$

式中: Ψ'_i 为传递系数, 计算公式如下。

$$\Psi'_i = \cos(a_{i-1} - a_i) - \sin(a_{i-1} - a_i) \tan \varphi_1 / F_s \quad (14)$$

以上主要针对悬臂双排桩推力进行理论研究。

除了排桩推力计算, 关于双排抗滑桩理论研究也有很多。刘鸿^[25]分别对悬臂式和桩顶前、后排相连的双排桩滑坡推力的分配进行了研究, 并推导了分配系数的计算公式; 韦秀东等^[26]提出了一种考虑桩前土体剩余下滑力的设计计算方法; 于洋等^[27]通过假设桩周土体位移沿滑坡体深度均匀分布, 建立了双排抗滑桩内力计算模型。理论计算为了简化计算过程, 假定条件理想化、极限化, 往往忽略一些条件, 与现实情况存在差异, 应用范围有限, 且其所计算结果还需要结合试验进行进一步的验证, 同时计算要求解大量公式, 时间较长。

2.2 试验研究

试验研究法主要是由室内物理相似模型试验或现场监测获得试验数据, 并对数据进行处理分析, 得到桩周土压力分布、桩身弯矩分布规律、

滑坡推力分布规律、剪力分布和桩体破坏形式等, 分析双排抗滑桩边坡加固效果。

2.2.1 模型试验

(1) 静力作用下双排抗滑桩加固边坡模型试验研究方面: 李阳等^[28]通过设计不同连梁形式双排抗滑桩加固边坡对比试验, 研究了多种布桩形式下双排抗滑桩的受力、变形、破坏过程; 闫玉平等^[29]通过注水渗入滑带模拟强降雨条件对滑带的软化效应, 测得不同工况下双排桩后侧滑坡推力分布特征; 叶金铨等^[30]通过改变前后排桩间距来调整排桩刚度, 并进行水平推桩模型试验, 发现调整排距可有效提高前排桩推力分担比。

(2) 地震作用下双排抗滑桩加固边坡模型试验研究方面: 赖杰等^[31]为探讨双排抗滑桩支护下边坡的地震响应及破坏机理, 进行振动台模型试验, 发现坡体裂缝首先出现在靠近坡顶的坡面与滑面相交处, 临近破坏时滑坡推力主要由靠近滑体桩体上部承担; 吴红刚等^[32-33]结合滑坡实例, 建立双排桩治理大型多滑动面滑坡的振动台试验, 研究双排抗滑桩动力响应和坡体变形破坏特征; FAN 等^[34]通过室内振动台试验发现, 地震作用下坡脚桩比坡中桩承受更大地震荷载; WU 等^[35]通过大型振动台试验, 研究预应力锚杆和双排抗滑桩联合作用下动力响应, 发现联合结构能够有效控制边坡侧向位移, 提高边坡稳定性。

室内模型试验研究主要采用静力加载方式模拟滑坡推力, 对于双排抗滑桩在动荷载作用下的动力响应研究较少。模型试验能够较为真实地反映桩体作用规律, 可以很好地考虑桩与土的作用, 且具有时效性, 但模型试验容易忽略一些无法模拟的条件, 而且传感器采集系统可能会产生一些误差, 同时还要考虑尺寸效应的影响, 研究结果会有一定误差, 因此需要进一步完善。

2.2.2 现场监测

现场试验成本要高于室内模型试验, 而且试验难度也远高于模型试验, 但其试验数据真实性更高, 能较准确地反映双排抗滑桩加固边坡实际工作的性状。因此, 不少研究人员选择现场试验方法, 如: 程爱平等^[36]结合工程实际, 通过现场监测和数值模拟综合分析双排抗滑桩的加固效果; 向远华^[37]以工程

实例为背景, 对埋在抗滑桩、锚杆和框架梁中的测试元件进行现场监测, 进行锚杆框架梁-双排抗滑桩支护膨胀土边坡工作特性分析; ZHANG 等^[38]在室内试验结果的基础上, 对目标边坡进行了现场监测试验, 发现双排抗滑桩在潜在失稳边坡中的加固效果良好。

2.3 数值模拟

数值模拟分析法是随着科学技术不断发展而兴起的一种研究方法, 应用领域十分广泛。常用的数值模拟软件主要有 ABAQUS、FLAC^{3D} 和 ANSYS 等。学者们主要利用计算机建立有限元或离散元数学模型, 分析双排抗滑桩加固边坡的受力与形变等。

(1) 静力作用下双排抗滑桩承载性能研究方面: 任德斌等^[39]分别建立单排与双排抗滑桩加固边坡三维模型, 分析其作用机理; 邹盛堂等^[40]采用有限元软件建立了双排抗滑桩和门架抗滑桩治理顺层滑坡的三维数值分析模型, 探讨其受力情况; 杨敏^[41]建立有限元模型, 研究斜坡积土滑坡双排抗滑桩的受力特性; 刘鸣等^[42]通过有限元程序 Mar 建立数值计算模型, 研究双排抗滑桩的机理。

(2) 地震作用下双排抗滑桩承载性能研究方面: 董必昌等^[43]运用有限元数值软件建立数学模型, 研究了水平向和竖向向地震共同作用下双排桩边坡的破坏形态和受力性状; 王壮等^[44]利用二维有限差分程序, 模拟双排抗滑桩、锚索抗滑桩和锚索及连续桩键结构下的加固效果; 赖杰等^[31]为探讨双排抗滑桩支护下边坡的地震响应及破坏机理, 将数值模拟与模型试验相结合, 进一步验证抗滑桩地震作用下的受力特征。

与试验研究法相比, 数值分析法将岩土体与桩应力、应变、位移和滑动面形成发展过程等情况更直观地展示出来, 节约了试验成本与时间, 但该方法不能很好地模拟桩与土之间的相互作用。同时, 建模时还需设立不同的边界条件和假定条件, 学者们根据各自研究目的, 采用不同的软件、本构模型、假定条件和边界条件, 而大多学者并未考虑到数值计算结果可能因此而有所差异, 对此, 后续可以开展相关研究。

3 结论与展望

3.1 结论

(1) 悬臂双排桩加固边坡性能良好, 当前针对

悬臂双排抗滑桩研究主要集中在桩体受力特性以及承载性能影响因素等方面, 多采用试验加数值模拟进行研究, 对其承载性能研究较为全面, 但并未给出具体设计意见, 限制了双排桩的推广与应用。

(2) 理论研究中, 众多理论推导基于桩土系统处于极限状态下的计算, 但稳定的桩土系统属于非极限状态, 可能会导致理论值与实际值存在较大误差, 建议结合数值模拟和模型试验, 验证其准确性。

(3) 数值模拟很难完全模拟桩体与土体之间的相互作用, 不同地质条件下的双排桩加固边坡效果还需进一步深入研究, 部分数值模拟由于受试验条件限制无法结合其他研究方法进行验证, 但不同模拟软件假定条件和计算方法等存在差异, 模拟出的结果也有差异, 建议数值模拟采用不同软件对比验证结果。

3.2 展望

(1) 稳定的桩土系统为非极限状态, 结合试验探究极限状态和非极限状态下相关理论计算方法及计算结果差异性十分必要。

(2) 在地震作用下, 边坡破坏效应显著, 边坡稳定性降低。而地震波类型众多, 不同地震作用下的双排抗滑桩加固边坡动力响应研究较少, 开展相关研究具有重大意义。

(3) 在实际工程中, 边坡形状各异, 地质条件复杂, 滑坡推力分布形式多样, 双排抗滑桩结构形式、桩位布置也有很多, 相关适用性研究较少, 可开展相关研究, 同时给出具体设计建议, 为悬臂双排桩设计规范的编制提供一定参考。

参考文献:

- [1] 路立龙, 黄志豪. 双排圆形抗滑桩在某高速公路滑坡治理中的应用[J]. 公路, 2023, 68(4): 58-62.
- [2] 汪源, 谢强, 张建华. 双排抗滑桩布设方式对推力分配的影响[J]. 重庆大学学报, 2023, 46(8): 78-87.
- [3] 刘强, 吴能森, 黄志波, 等. 抗滑桩加固二元结构边坡可视化模型试验[J]. 林业工程学报, 2023, 8(2): 172-179.
- [4] 杨帆, 时仓艳. 悬臂排桩支护结构的水平土拱效应及桩间距研究[J]. 工程建设, 2020, 52(11): 29-33.
- [5] 姬同旭, 樊广辉. 桩端锚固与桩截面变化对双排抗滑桩内力的影响[J]. 水利科技与经济, 2015, 21(2): 7-9.
- [6] 李俊. 滑坡防治双排与单排桩受力特性的对比研究

- [D]. 西安:长安大学,2020.
- [7] 唐芬. 抗滑桩的优化分析[J]. 四川建筑科学研究, 2011,37(2):137-142.
- [8] 李建斌. 排间距对双排抗滑桩加固土质边坡稳定性影响分析[J]. 公路交通科技(应用技术版),2019, 15(12):95-97;127.
- [9] 赵波,王羽. 基于土拱效应双排桩不同布置方式对支挡性能的影响[J]. 中外公路,2016,36(2):11-15.
- [10] 于洋,孙红月,尚岳全. 锚固深度对双排抗滑桩力学性能影响[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(10): 1999-2007.
- [11] 温祥虎,叶四桥,毛晓光. 桩径对双排式钻孔抗滑桩的影响研究[J]. 路基工程,2014(6):21-26.
- [12] 赵波,王运生,李贞,等. 双排抗滑桩土拱效应影响因素的数值分析[J]. 中外公路,2017,37(2):1-8.
- [13] XIE Q, CAO Z, SHI X, et al. Model test of interaction between load-caused landslide and double-row anti-slide piles by transparent soil material[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 5(46):1-16.
- [14] 申永江,孙红月,尚岳全,等. 双排抗滑桩桩顶连接方式的优化设计[J]. 岩石力学与工程学报,2010, 29(S1):3034-3038.
- [15] 李绵绵,赵法锁,宋飞,等. 双排抗滑桩的受力特性研究——以柳家坡2号滑坡治理工程为例[J]. 西北地质,2019,52(2):181-189.
- [16] 吴红刚,张乾翼,周张博,等. 双排抗滑桩工作性能的模型试验研究[J]. 铁道工程学报,2015,32(9): 49-54;78.
- [17] 黄小艳,徐年丰,王汉辉,等. 双排抗滑桩受力规律的数值研究[J]. 人民长江,2012,43(1):4-8.
- [18] 董捷,许鹏飞,仲帅,等. 沉埋式双排抗滑桩加固滑坡承载机理研究[J]. 铁道标准设计,2019,63(7):7-12.
- [19] 申永江,杨明,项正良. 双排长短组合桩与常见双排桩的对比研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(S2):96-100.
- [20] SHEN Y, WU Z, XIANG Z, et al. Physical test study on double-row long-short composite anti-sliding piles[J]. Geomechanics and Engineering, 2017, 13(4):621-640.
- [21] XIAO S, ZENG J, YAN Y. A rational layout of double-row stabilizing piles for large-scale landslide control[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017, 76(1):309-321.
- [22] 祁斌,常波,吴益平. 双排抗滑桩滑坡推力分配影响因素分析[J]. 工程地质学报,2011,19(3):359-363.
- [23] 申永江,孙红月,尚岳全,等. 滑坡推力在悬臂式双排抗滑桩上的分配[J]. 岩石力学与工程学报,2012, 31(S1):2668-2673.
- [24] 肖世国,何洪. 双排抗滑桩上滑坡推力近似解析方法[J]. 岩土力学,2015,36(2):376-380;494.
- [25] 刘鸿. 双排抗滑桩计算方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2007.
- [26] 韦秀东,卢继忠,李泽江,等. 抗滑桩滑坡推力及桩前抗力设计计算[J]. 水利水电技术,2020,51(1):23-31.
- [27] 于洋,孙红月,尚岳全. 基于桩周土体位移的双排抗滑桩计算模型[J]. 岩石力学与工程学报,2014, 33(1):172-178.
- [28] 李阳,南亚林,贺海超,等. 黄土双排抗滑桩模型试验[J]. 安全与环境学报,2022,22(3):1315-1322.
- [29] 闫玉平,肖世国. 双排抗滑桩后侧推力分布物理模型试验[J]. 中国地质灾害与防治学报,2022,33(2):79-87.
- [30] 叶金铨,俞缙,林植超,等. 变刚度悬臂式双排抗滑桩水平推桩模型试验研究[J]. 土木工程学报,2019, 52(S1):193-201.
- [31] 赖杰,郑颖人,刘云,等. 双排抗滑桩抗震性能振动台试验研究及数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(11):4307-4315.
- [32] 吴红刚,冯文强. 双排桩治理大型多滑动面滑坡的振动台试验[J]. 铁道工程学报,2015,32(11):30-36.
- [33] GANG H W, FANG L P. Shaking table test for reinforcement of soil slope with multiple sliding surfaces by reinforced double-row anti-slide piles[J]. Journal of Mountain Science, 2022, 19(5):1419-1436.
- [34] GANG F, JING J Z, CHAO S Q, et al. Dynamic response of a slope reinforced by double-row anti-sliding piles and pre-stressed anchor cables[J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(1):226-241.
- [35] JU Z W, JIA Z W, WEI J B, et al. Shaking Table Test on the Seismic Responses of a Slope Reinforced by Prestressed Anchor Cables and Double-Row Antisliding Piles[J]. Shock and Vibration, 2021(2021):1-13.
- [36] 程爱平,燕彦君,李健,等. 成兰铁路高陡边坡稳定性分析及加固措施[J]. 武汉大学学报(工学版),2021, 54(6):515-523;578.
- [37] 向远华. 锚杆框架梁-双排抗滑桩支护膨胀土边坡工作特性分析[J]. 铁道科学与工程学报,2013, 10(3):62-67.
- [38] ZHANG Q, HU J, DU Y L, et al. A laboratory and field-monitoring experiment on the ability of anti-slide piles to

3 结 论

(1) 原料氢氧化铍中 Be 元素质量分数为 13.40%, 主要杂质元素 S 质量分数为 2.46%, 其他杂质元素质量分数极低。原料物相单一, 除氢氧化铍外不含其他杂质相, 颗粒呈球状且表面粗糙, 粒度较细, 集中分布在 15 ~ 35 μm 。热重结果表明: 原料中约含有 24% 的吸附水和 27.86% 的结晶水, 分别在 0 ~ 200 $^{\circ}\text{C}$ 和 200 ~ 400 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内迅速挥发; $\text{Be}(\text{OH})_2$ 在 600 ~ 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内匀速分解; 当温度为 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 时, $\text{Be}(\text{OH})_2$ 完全分解为 BeO。

(2) 预热环节主要发生吸附水和结晶水的挥发, 预热时间越长, 温度越高、水分挥发越多, $\text{Be}(\text{OH})_2$ 颗粒表面越光滑, 但物相不发生变化。焙烧环节主要发生 $\text{Be}(\text{OH})_2$ 分解生成 BeO, 焙烧时间越长, 温度越高、分解程度越大, 物相 $\text{Be}(\text{OH})_2$ 转变为 BeO 的程度越大, 颗粒破碎越严重。预热时间越长, 温度越高, 焙烧环节 $\text{Be}(\text{OH})_2$ 分解为 BeO、 $\text{Be}(\text{OH})_2$ 物相转变为 BeO 物相及颗粒由球状变为破碎状态的速率越快。当预热温度为 500 $^{\circ}\text{C}$ 、预热时间为 3 h 与焙烧温度为 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 、焙烧时间为 3 h 进行匹配可以实现最优的 $\text{Be}(\text{OH})_2$ 分解结果。

参考文献:

[1] MIN K S, KANG S H, KIM J K, et al. Atomic layer etch-

ing of BeO using BCl_3/Ar for the interface passivation layer of III - V MOS devices[J]. Microelectronic engineering, 2014(114): 121 - 125.

[2] AHN Y, SEO J, WATHANAKUL P, et al. Effects of electron-beam irradiation, a thin-Ti layer, and a BeO additive on the diffusion of titanium in synthetic sapphire[J]. Ceramics International, 2013, 39(3): 2259 - 2265.

[3] CHUNG J K, KIM W J, KIM S S, et al. Structural and optical properties of Be-doped ZnO nanocrystalline films by pulsed laser deposition[J]. Thin Solid Films, 2008, 516(12): 4190 - 4193.

[4] SEPULVEDA J L, SIGLIANO R. BeO packages house high-powder components[J]. Microwave & RF, 1998, 37(4): 107 - 110.

[5] 张树人, 张远骏. 高纯纳米氧化铍陶瓷粉体的研制[J]. 电子元件与材料, 1999, 18(6): 1 - 2.

[6] 李晓英. 氧化铍陶瓷材料及制品标准化研究[J]. 真空电子技术, 2008(1): 58 - 62.

[7] 刘世友. 日本铍工业生产、应用与展望[J]. 有色矿冶, 1999, 15(2): 60 - 62.

[8] 李卫, 叶红齐, 刘振国. 含氟铍矿石冶炼过程中氟的分离工艺研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2004(2): 23 - 25.

[9] 李振军. 金属铍冶炼进展[J]. 中国有色冶金, 2006, 35(6): 18 - 23.

[10] 刘世友. 美国铍工业概况[J]. 上海有色金属, 1999, 20(1): 30 - 35.

(上接第 6 页)

prevent buckling failures in bedding slopes[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(2): 1 - 13.

[39] 任德斌, 常思萌, 涂俊胤, 等. 排桩加固支护边坡作用机理的有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(4): 671 - 679.

[40] 邹盛堂, 戴自航. 双排抗滑桩与门架抗滑桩的有限元分析对比[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2012, 37(4): 769 - 774.

[41] 梅敏. 斜坡积土双排抗滑桩受力特性及优化设计研

究[J]. 公路工程, 2015, 40(3): 181 - 184; 191.

[42] 刘鸣, 黄华, 韩冰, 等. 延安地区某边坡双排抗滑桩支护分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011, 31(2): 63 - 67.

[43] 董必昌, 张哲, 付绍卿. 双向地震作用下的双排桩边坡力学性状研究[J]. 公路, 2017, 62(12): 90 - 95.

[44] 王壮, 苏雷, 时伟, 等. 地震作用下不同支护结构对滑坡加固效果研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(1): 176 - 187.