

熔盐罐基础陶粒层颗粒应力与沉降规律分析

黄尧^{1,2}, 刘源洞^{1,2}, 李远兵^{3,4}, 胡亮⁵

1. 武汉科技大学 冶金装备及其控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430081;
2. 武汉科技大学 机械传动与制造工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081;
3. 武汉科技大学 先进耐火材料全国重点实验室, 湖北 武汉 430081;
4. 武汉科技大学 钢铁工业耐火材料新技术国际合作联合实验室, 湖北 武汉 430081;
5. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 成都 611000)

摘要: 在熔盐罐储能发电过程中, 熔盐罐罐底的陶粒层起着承载、隔热的重要作用. 在循环载荷作用下, 陶粒层颗粒受到挤压流动及颗粒自身接触应力等因素对整体沉降的影响分析是重要的设计依据. 本文针对熔盐罐罐底陶粒层采用离散元软件 EDEM 中的 Hertz-Mindlin 接触模型建立离散元颗粒仿真模型, 对陶粒层压实回填工艺及满罐工况模拟, 对比分析预压实工艺、陶粒粒径分布对陶粒挤压沉降和最大等效应力的影响规律, 以及离散元分析结果的随机性影响. 结果表明, 陶粒层高度 1.6 m, 陶粒粒径范围 5~20 mm, 采用分段压实回填工艺, 重罐 5 万吨加载, 其陶粒内部最大应力 18.1~21.8 MPa, 总体沉降量 20.44~29.6 mm. 随着陶粒粒径的增大, 其最大应力降低, 粒径 15~20 mm 时, 陶粒最大应力为 12 MPa, 但沉降量显著增大, 达到 184 mm, 因此宽粒径分布范围有助于减小沉降量. 综合考虑, 陶粒为 5~20 mm 粒径时, 分段多次预压实工艺最优, 考虑颗粒随机性波动影响, 陶粒层最大应力为 23.16 MPa, 最大沉降量为 23.5 mm, 满足设计要求.

关键词: 离散元; 熔盐罐储能发电; 陶粒层; 沉降量; EDEM

中图分类号: X125; X126

文献标志码: A

文章编号: 0254-0053(2025)03-0749-12

Analysis of Particle Stress and Settlement Patterns in the Ceramsite Layer of Molten Salt Tank Foundations

HUANG Yao^{1,2}, LIU Yuanjiong^{1,2}, LI Yuanbing^{3,4}, HU Liang⁵

1. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China;
2. Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering (Wuhan University of Science and Technology), Wuhan 430081, Hubei, China;
3. National Key Laboratory of Advanced Refractory Materials, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China;
4. Joint Laboratory of New Refractory Technology for Iron and Steel Industry, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China;
5. Dongfang Boiler Co. Ltd., Dongfang Electric Group, Chengdu 611000, Sichuan, China)

Abstract: In the process of energy storage and power generation in molten salt tanks, the ceramic particle layer at the bottom of the tank plays a critical role in load-bearing and thermal insulation. Under cyclic loading, analyzing the effects of particle

收稿日期: 2025-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(52372290), 湖北省科技计划(2024CSA075).

作者简介: 黄尧, 硕士生. 研究方向: 计算机仿真技术. E-mail: huangyaosi@foxmail.com

通信作者: 刘源洞, 副教授, 博士. 研究方向: 计算机仿真及智能制造. E-mail: 18971222636@189.cn

compression, flow, and contact stress on the overall settlement of the ceramic particle layer provides an important basis for design. In this study, the Hertz-Mindlin contact model in EDEM software was employed to establish a discrete element particle simulation model for the ceramic particle layer at the bottom of the molten salt tank. Simulations were conducted for the compaction backfill process and full-tank working conditions, and a comparative analysis was performed to investigate the effects of pre-compaction processes and particle size distribution on the compression settlement and maximum equivalent stress of the ceramic particles, as well as the influence of randomness in discrete element analysis results. The results indicate that for a ceramic particle layer height of 1.6 m and a particle size range of 5~20 mm, adopting a segmented compaction backfill process under a 50 000-ton tank load results in a maximum internal particle stress of 18.1~21.8 MPa and an overall settlement of 20.44~29.6 mm. As the particle size increases, the maximum stress decreases, with a maximum stress of 12 MPa observed for particle sizes of 15~20 mm. However, the settlement increases significantly, reaching 184 mm. Therefore, a wide particle size distribution range is beneficial for reducing settlement. Considering these factors comprehensively, the optimal configuration is a particle size range of 5~20 mm with a segmented and repeated pre-compaction process. Accounting for the influence of particle randomness, the maximum stress of the ceramic particle layer is 23.16 MPa, and the maximum settlement is 23.5 mm, meeting the design requirements.

Key words: discrete element; molten salt tank energy storage power generation; ceramic layer; settlement amount; EDEM

光热发电因其高效、稳定和环保的特点,逐渐成为新能源发展重点之一。其中熔盐储能技术作为光热发电系统的重要组成部分,具有显著的技术优势和发展潜力。为优化熔盐罐系统的设计与运行性能,通常采用有限元法对其热力学特性进行仿真分析,用于评估熔盐储罐系统整体力学特性^[1-11]。但有限元法(Finite Element Method, FEM)在对多粒径分布及复杂几何形态的颗粒进行分析时,通常将研究对象整体作为多孔材质对颗粒形状进行简化,一定程度上忽略了颗粒形状、流动性等因素影响,并且在颗粒层次流动位移、摩擦及碰撞行为的精确建模与分析上存在局限性,结果准确性有待提高^[12]。

随着计算机技术的快速发展,离散元法因其对颗粒体系高效、灵活的模拟能力,正被越来越多的研究者应用于涉及颗粒行为的研究领域。Ghasemi等^[13]采用离散元法(Discrete Element Method, DEM)将陶瓷涂层和粘结层(Bond-Coat)部分模型化为离散颗粒,并行DEM-FEM(Finite Element Method, FEM)耦合的模型系统分析了机械和热机械载荷下陶瓷涂层的裂纹生成与界面分层机制。结果表明,与传统FEM模型的结果对比显示,DEM-FEM耦合模型在模拟裂纹生成和扩展过程中的结果具有较高的精确度,尤其是在描述裂纹的分叉和多裂纹模式方面表现出色。Wang等^[14]通过FEM-DEM耦合方法对颗粒材料的力学行为开展了深入分析,其中DEM模块专门用于模拟高应力区域的颗粒破碎行为。研究显示,DEM方法在表征破碎过程中的能量耗散和碎片迁移行为方面具有独特优势,能够直接反映颗粒尺度的物理机制,而FEM方法则受限于连续介质假设,只能通过经验参数进行近似模拟。孙思齐等^[15]针对高频振动条件下岩土颗粒材料动力响应放大的现象,采用离散元法开展了一系列动双轴数值试验,分析了不同荷载频率下岩土颗粒材料的动力行为及其微观特征。郭兴文等^[16]采用宏观试验和离散元微观模拟相结合的方法,研究了胶结砂砾石层面在剪切过程中的破坏行为。林彤等^[17]采用离散元软件对不同宽度填土进行单侧挡墙平动模式下的被动土压力试验模拟。

目前利用离散元法对熔盐罐罐底陶粒地基层颗粒特性进行分析较少,因此本文基于微观颗粒视角,采用离散元软件EDEM对熔盐罐罐底陶粒层进行分析,建立颗粒接触模型,实现随机性颗粒下相互作用的理论模拟,并基于颗粒位移场、接触角分布、粒径特征、几何形态及孔隙比等关键微观参数综合影响下的宏观力学规律,为陶粒层力学行为精细化表征与机理研究提供理论设计依据。

1 熔盐罐工况及离散元模型

1.1 陶粒层离散元模型建立

以某光热机组配套的熔盐热罐为例,其结构如图1所示,热罐直径为30 m,罐内满载时达5万吨左右高温熔盐。热罐地基从上到下由热罐、陶粒层和混凝土层3部分组成。

离散元分析中,颗粒数量受计算量和结果准确性双向制约,考虑到颗粒粒径分布随机性影响,取颗

粒数量为 10^4 个左右, 并根据罐底结构特点, 取沉降量影响最大的罐底中心处圆柱形陶粒体($\Phi 145 \text{ mm} \times 1\ 600 \text{ mm}$ 高)建立离散元模型, 如图2所示, 陶粒体位于罐底(200 mm厚)和混凝土底座之间, 装于钢制环壁容器内。

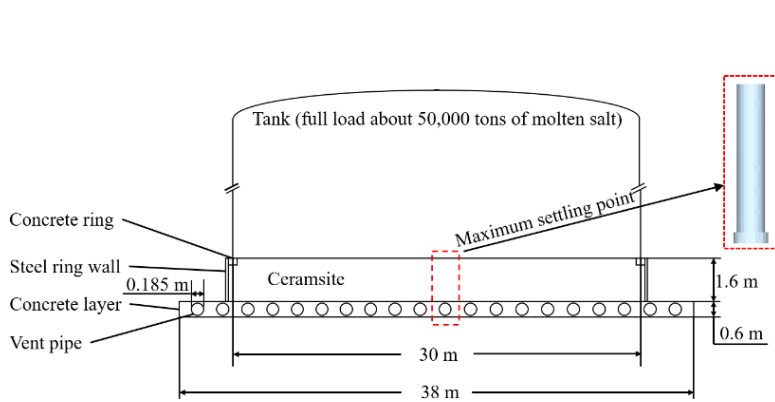


图1 熔盐热罐结构示意图

Fig.1 Simplified diagram of molten salt tank foundation

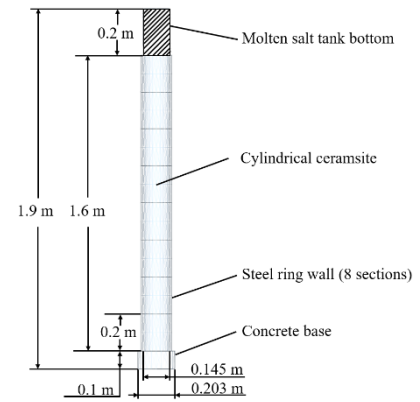


图2 熔盐罐基础模型图

Fig.2 Molten salt tank basic model diagram

考虑到实际施工时, 陶粒层一般采用多次回填工艺^[18], 等效到离散元模型内, 可将陶粒体分为8段, 对应的外部钢制环壁分为8段, 每段钢制环尺寸为 $\Phi 145 \text{ mm}$ (内径) $\times 200 \text{ mm}$ (高) $\times 10 \text{ mm}$ (厚), 整体钢制环壁用于约束颗粒. 以型号3 t压路机为例, 其尺寸为2 420 mm(长) $\times 1\ 280 \text{ mm}$ (宽) $\times 1\ 600 \text{ mm}$ (高); 陶粒回填时, 首先在摊铺平整好的陶粒土表面铺满光面钢板, 单块钢板尺寸为2 440 mm(长) $\times 1\ 220 \text{ mm}$ (宽) $\times 5 \text{ mm}$ (厚)^[18], 如图3所示. 即每段刚环内生成颗粒后, 应用 $3\ 000 \times$ 和 $9.81 \div 2.44 \div 1.22 = 9\ 886.46 \text{ Pa}$ 压强进行预压实. 将该段颗粒压实到200 mm高度后, 再进行下一段颗粒回填和压实, 一共进行8次, 总高度1.6 m^[18]. 钢、陶粒和混凝土的泊松比、剪切模量和屈服强度等参数见表1^[2, 19-22].

表1 材料参数

Tab.1 Material parameters

Materials	Steel	Ceramite	Concrete
Density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 850	540	2 500
Poisson's ratio	0.3	0.25	0.2
Shear modulus/MPa	79 000	3 300	14 000
Thermal conductivity/($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)	58.15	0.28	2.94
Compressive strength/MPa	295	35	19.1

1.2 颗粒模型参数设置

本研究所用陶粒颗粒呈类球形, 如图4所示的是直径分别为5 mm、10 mm和16 mm的陶粒. 鉴于其近似球形的几何特性, 采用单球模型进行离散元模拟. 采用于庆旭等^[23]结合标定试验与仿真结果测量三七种子物料的方法, 通过回归曲线计算得到颗粒间、颗粒与高温熔盐罐、颗粒与混凝土壁之间的碰撞恢复系数、静摩擦系数和动摩擦系数, 如表2所示. 按一般陶粒层粒径^[18]在0~20 mm, 将EDEM中颗粒生成设置为粒径5~20 mm($12.5 \pm 7.5 \text{ mm}$)的正态分布. 当颗粒数量较多且瑞利时间步较大时, 容易导致颗粒间作用力过大, 模拟中产生“爆炸”现象, 为了避免这一问题, 将时间步设为最大时间步的40%.



图3 陶粒压实^[18]

Fig.3 Compaction of ceramsite^[18]



图4 陶土颗粒

Fig.4 Clay particle

表2 EDEM中颗粒作用参数
Tab.2 EDEM parameter settings

Interaction	Collision recovery coefficient	Coefficient of static friction	Coefficient of dynamic friction
Ceramisite and steel	0.47	0.46	0.024
Ceramisite and cement	0.37	0.92	0.066
Ceramisite and ceramisite	0.18	0.78	0.19

2 陶粒层不同预压实工艺对比分析

取圆柱颗粒体模型高度1.6 m, 颗粒堆积方式分别为自然堆积、一次预压实和八次分段预压实, 对应三种陶粒压实工艺. 以EDEM2023版为分析软件平台, 在圆柱几何体模型上表面施加指向Z轴负方向(竖直向下)的压强0.69 MPa(对应重罐5万吨负载), 分析时间200 s, 对比分析沉降量.

2.1 预压实工艺对沉降量影响分析

如图5(a)~(c)所示, 分别为自然堆积、一次预压实和八次分段预压实的颗粒体初始高度和重罐加载后的高度变化对比; 其中左侧为颗粒体初始高度, 右侧为颗粒体重罐压实后的高度. 表3数据显示, 三组试验颗粒堆的孔隙率基本一致, 表明孔隙率差异对试验结果的影响可忽略不计. 预压实处理显著降低了陶粒层的沉降量, 其中一次预压实工况效果最优, 总沉降量为18.88 mm; 分段预压实工况次之, 沉降量为20.44 mm.

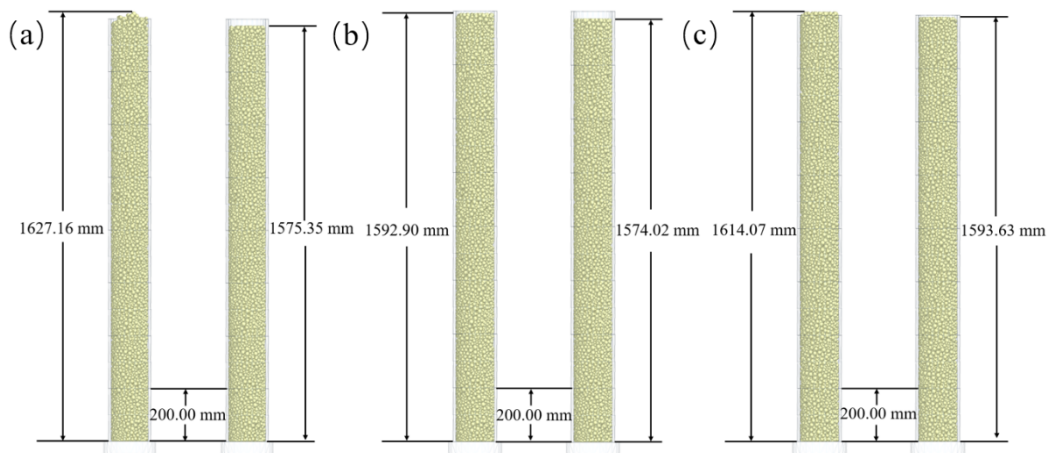


图5 不同初始状态和重罐压实后的陶粒层高度图

Fig.5 Map of the height of the ceramic layer in different initial states and after compaction of the heavy tank

表3 三种预压实颗粒模型的重罐加载后高度对比

Tab.3 Three precompacted particle models were compared in height after loading

Compaction process	Natural deposit	A pre-compaction	Eight precompacts
Initial altitude/mm	1 627.16	1 592.90	1 614.07
Particle number	10 672	10 672	10 672
Height of heavy tank after loading/mm	1 575.35	1 574.02	1 593.63
Total settlement/mm	51.81	18.88	20.44
Porosity	0.451 9	0.452 1	0.456 7

沉降量-时间曲线分析结果(图6)表明, 三种工况下颗粒体模型的压缩过程呈现典型的双阶段特征: 快速压缩阶段(0~10 s)和缓慢压缩阶段(10~200 s). 在初始快速压缩阶段, 沉降量随时间呈非线性快速增长; 而在后续缓慢压缩阶段, 沉降速率显著降低并逐渐趋于稳定. 且快速压缩阶段沉降量明显大于

缓慢压缩阶段, 三种工况在快速压缩阶段内分别沉降了 46.88 mm、13.65 mm 和 11.65 mm, 在缓慢压缩阶段内分别沉降了 4.73 mm、5.23 mm 和 8.79 mm. 其后时间段内沉降量不明显, 认为达到稳态.

产生快速压缩阶段可能是因为颗粒堆在预处理后仍具有较大的孔隙率, 颗粒之间的接触仍较为松散, 颗粒在受到重罐挤压时发生快速的重新排列和填充; 同时, 颗粒间的摩擦力和接触力较小, 能够较容易地克服颗粒间的阻力, 使其迅速靠近并形成更为紧密的堆积结构. 此外, 自然堆积状态下的颗粒堆由于未经过预压实处理, 其内部孔隙率更高, 颗粒排列更加松散, 因此在快速压缩阶段的压缩量显著大于其余两种预压实状态下的陶粒堆.

随着重罐不断地挤压, 颗粒堆的压缩过程进入第二个阶段, 即缓慢压缩阶段. 产生这一阶段的可能原因是: 经过快速压缩阶段后, 颗粒堆的孔隙率已显著降低, 颗粒间的接触更加紧密, 颗粒间的摩擦力和接触力显著增加, 使得颗粒的进一步压缩变得更加困难; 此时, 压缩主要来源于颗粒间接触点的微小调整和颗粒堆整体结构的缓慢重组. 此外, 自然堆积状态下的颗粒堆由于初始压实程度较低, 颗粒间的接触点较少, 颗粒堆的结构较为松散, 在快速压缩阶段已经完成了较大程度的压缩, 剩余的可调整空间较小, 因此在缓慢压缩阶段的压缩量更小; 而两种预压实状态下的颗粒堆由于初始压实程度较高, 颗粒间接触点更多, 颗粒堆内部仍存在一定的微调空间, 因此在缓慢压缩阶段的压缩量相对更大.

2.2 预压实工艺对颗粒内部最大等效应力的影响

以 10 s 为统计步长, 三种不同预压实颗粒体模型内部最大等效应力随时间变化曲线如图 7 所示, 一次预压实工况下颗粒最大应力达 25.9 MPa, 波动范围为 25.9-11.2 = 14.7 MPa; 自然堆积和分段预压实工况对应的最大应力分别为 18.6 MPa、14.4 MPa; 波动范围分别为 10.4 MPa、6.37 MPa. 比较可知, 自然堆积沉降最大、一次压实应力最大, 而分段预压实工况最大应力最小, 且均匀性最好.

这种现象的原因在于, 一次预压实颗粒堆在预压实过程中, 颗粒堆的上层被压缩变密实, 但中下层颗粒由于未受到足够的压实作用, 仍然保持较松散状态, 如图 8(a)所示. 重罐加载后, 如图 8(b)所示, 红色、绿色、蓝色表示的力依次减小; 颗粒堆上层颗粒之间的挤压作用进一步加剧, 导致最大应力继续增大, 且下层颗粒反而影响较小, 导致应力变化范围最大. 随着时间推移, 重罐交变加载, 下层颗粒的疏松结构必将进一步变化, 呈现不稳定状态. 相比之下, 自然堆积状态的颗粒堆由于未经过预压实处理, 在重罐加载时, 颗粒堆中存在的孔隙空间利于颗粒流动和重新排列, 从而形成更为稳定的颗粒

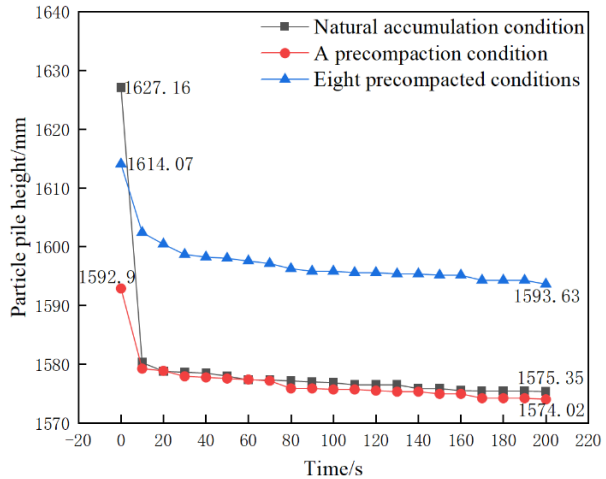


图6 不同初始状态下颗粒体模型高度随时间变化图
Fig.6 Height of the particle model changes with time under different initial states

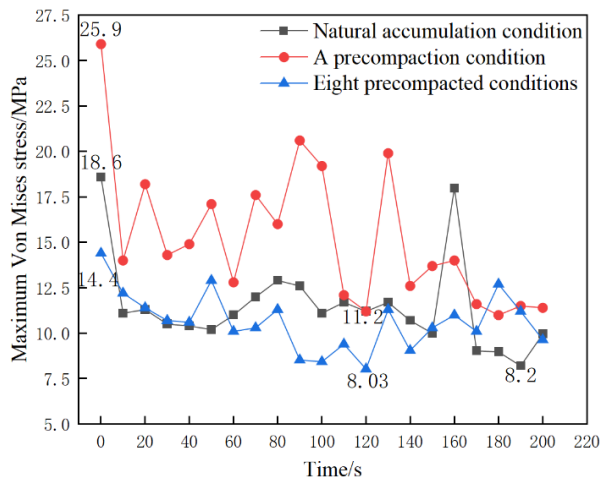


图7 不同预处理工艺颗粒最大应力随时间变化图
Fig.7 Maximum stress of particles under different pretreatment processes varies with time

堆结构. 从而使颗粒堆受力均匀分布, 最大等效应力较低, 但沉降量最大. 分段预压实状态的颗粒堆由于经过多次压实处理, 颗粒堆的整体密实度增大且颗粒间的力链分布更加均匀, 加载后能够有效分散外部载荷, 从而使最大等效应力保持在较低水平.

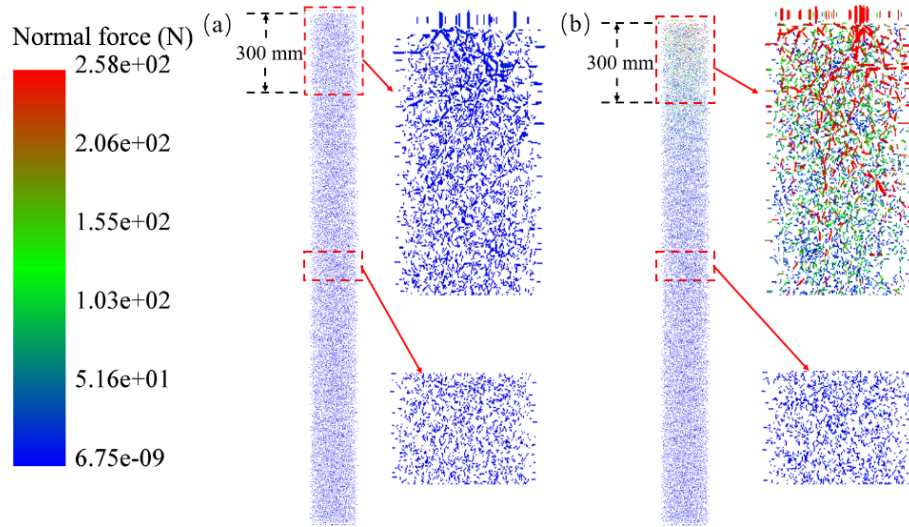


图8 一次压实状态颗粒接触力图

Fig.8 Contact diagram of particles in a single compacted state

3 陶粒不同粒径分布影响规律分析

基于分段压实工艺, 分别对粒径 5~10 mm (7.5 ± 2.5 mm)、10~15 mm (12.5 ± 2.5 mm)和 15~20 mm (17.5 ± 2.5 mm)的颗粒堆进行8次分段压实处理. 粒径分布设置为正态分布, 按 1.6 m 初始高度, 实际生成后的颗粒数量分别为 55 200 个、13 680 个和 2 190 个.

3.1 不同粒径对沉降量影响分析

如图 9(a)~(c)所示, 分别为 5~10 mm、10~15 mm 和 15~20 mm 三种颗粒堆模型八次分段压实下, 重罐加载压实后的高度图.

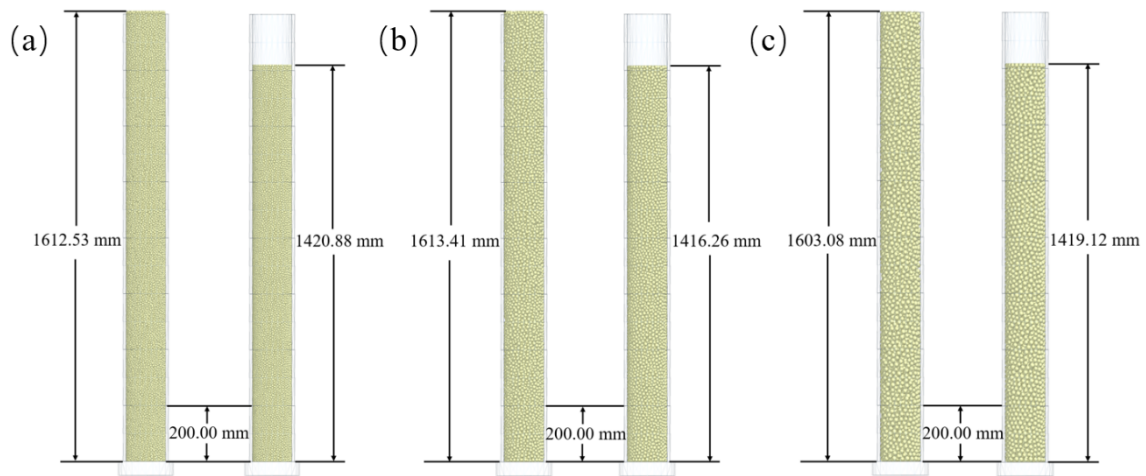


图9 不同粒径颗粒堆高度图

Fig.9 Stack height diagram of different particle sizes

三种不同粒径颗粒堆沉降量随时间变化趋势如图 10 所示, 三种颗粒堆在快速压缩阶段分别沉降了 182.2 mm、189.23 mm 和 183.27 mm, 在缓慢压缩阶段分别沉降了 9.45 mm、7.92 mm 和 0.66 mm, 总体

沉降规律相似, 且总沉降量相近. 说明在粒径变化范围固定时(± 2.5 mm), 基础粒径的增大或减小(7.5 mm、12.5 mm、17.5 mm)对沉降量的影响不明显. 由表3和表4可得到图5(c)所示的颗粒堆比图9(b)所示颗粒堆的孔隙率更大; 但对比图9(b)、图5(c)可知, 10~15 mm (12.5 \pm 2.5 mm)的沉降量(197.15 mm)是5~20 mm (12.5 \pm 7.5 mm)的沉降量(20.44 mm)的9.65倍. 这说明基础粒径一样时, 即使窄粒径分布的颗粒堆孔隙率更小, 实际粒径分布越均匀, 反而沉降量越大.

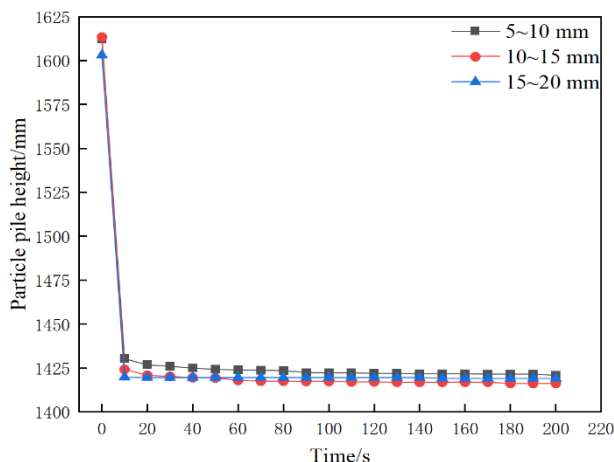


图10 不同粒径颗粒体模型高度随时间变化图

Fig.10 Height change of different particle sizes over time

表4 三种不同粒径颗粒体重罐加载后高度对比

Tab.4 Comparison of the height of the particle weight tank with three different particle size distribution ranges after loading

Compaction process/mm	5~10	10~15	15~20
Initial altitude/mm	1 612.53	1 613.41	1 603.08
Particle number	55 200	13 680	2 190
Height of heavy tank after loading/mm	1 420.88	1 416.26	1 419.12
Total settlement/mm	191.65	197.15	183.96
Total particle mass/kg	8.16	7.84	7.66
Porosity	0.356 0	0.379 2	0.394 7

这可能是由于5~20 mm颗粒堆的粒径分布更宽, 颗粒间的填充效果更好, 大颗粒能够形成稳定的骨架结构, 而小颗粒则填充在大颗粒之间的孔隙中, 从而提高了颗粒堆的抗压能力. 此外, 粒径分布较宽的颗粒堆在受力时能够更均匀地分散应力, 减少局部应力集中现象, 从而进一步增强了整体的抗压性能. 相比之下, 10~15 mm颗粒堆由于粒径分布较窄, 颗粒的大小相近, 整体结构形成的支撑能力不足, 使得其内部结构在受力时更容易发生调整和塌陷, 从而导致其抗压性能较弱. 这种颗粒堆的均匀性虽然在某些方面有助于提供更一致的承载能力, 但在承受外部压力时, 缺乏适应性和变形能力, 最终使其在抗压方面显得更加脆弱. 这说明宽粒径分布可以有效减少陶粒层的沉降量.

结果表明: (1) 分段预压实虽然使颗粒体内部处于一个相对密实状态, 但重罐加载后, 巨大的载荷必定会使颗粒会进一步流动, 朝着颗粒密实方向进一步重排内部结构, 引起沉降. (2) 从微观看, 颗粒堆整体的沉降主要由颗粒间的重新排列和孔隙程度决定, 大的粒径变化范围, 会使颗粒实际直径更多样化, 空隙充满程度更大, 总体的沉降量减小. 因此, 实际粒径分布范围越大, 对减小沉降量有好处.

3.2 实际工况对比验证分析

以东方锅炉股份有限公司某光热发电站项目为例, 其高温储罐建设完成后, 采用灌水实验对沉降量进行检测, 具体测量方法为

- (1) 热罐直径为30 m, 高度为13 m, 热罐地基中陶粒层的高度约1.6 m, 陶粒层下方为混凝土层, 内部埋有通风管.
- (2) 测点针对熔盐罐基础承台进行布置, 共8组测点.
- (3) 向高温罐内注水模拟实际工况, 每次向热储罐中注入2 m高的水, 静置48 h后测量测点沉降量.
- (4) 重复此过程共6次, 当水位达到12 m (此时热储罐对陶粒层产生的压强为 1.2×10^5 Pa) 时, 记录

陶粒层稳定后的沉降量。

多次测量后，获得陶粒层沉降量的相关数据，如表5所示。

表5 熔盐罐沉降量实测值

Tab.5 Measured value of sedimentation in the molten salt tank

Monitoring point	Compressive stress/Pa	Total settlement/mm
1	1.2×10^5	3.13
2	1.2×10^5	2.48
3	1.2×10^5	2.88
4	1.2×10^5	2.74
5	1.2×10^5	3.22
6	1.2×10^5	2.71
7	1.2×10^5	2.61
8	1.2×10^5	3.21

现场测量结果表明，注水达满罐后，陶粒层受 1.2×10^5 Pa 负载时，最大沉降量为 3.22 mm，表明陶粒级配、分层分段压实工艺方法对沉降量效果良好。假设压实陶粒层的承受载荷与沉降量为线性关系，粗略推测承受 5 万吨重罐载荷时，其沉降量约为： $3.22 \text{ mm} \times (6.94 \times 10^5 \text{ Pa} / 1.2 \times 10^5 \text{ Pa}) = 18.62 \text{ mm}$ 。

对比 3.1 节仿真分析结果，储罐施加压强 6.94×10^5 Pa 时，陶粒层最大沉降量为 20.44 mm，与现场测量推测沉降量误差为 1.82 mm。相对于整个熔盐罐 30 m 直径尺寸，该误差在允许范围内，表明本文仿真分析结果的正确性，并得到现场项目设计人员的认可。

3.3 不同粒径对最大应力的影响

由图 11 可以看出，三种不同粒径范围的颗粒最大应力随着颗粒粒径的增大而减小；颗粒内部最大应力平均值分别为 22.6 MPa、11.39 MPa 和 9.36 MPa。这是因为随着粒径变小，其颗粒接触点的综合曲率半径变大，导致接触应力显著增大。同时，由于分段预压实处理，颗粒堆内部结构变得更加稳定，限制了颗粒的流动，从而导致局部接触应力随粒径减小而增大。

如图 12 所示，5~10 mm 颗粒堆重罐加载挤压时，最大应力出现在 130 s，颗粒模型中上层位置。该颗粒所受应力达 33.7 MPa，接近其抗压强度 35 MPa，考虑随机性影响和热机械应力等因素，该颗粒被压碎可能性较大。而随着粒径的增大，接触应力显著减小，粒径 10~15 mm (12.5 ± 2.5 mm) 时，其最大应力分布范围降至 9.7~18.8 MPa；粒径 15~20 mm (17.5 ± 2.5 mm) 时，其最大应力分布范围降至 7.8~13.3 MPa。

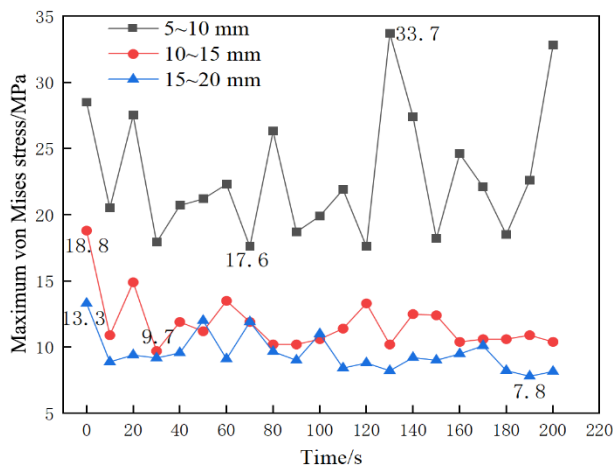


图 11 不同粒径颗粒堆最大 von Mises 应力随时间变化图
Fig.11 Variation of maximum von Mises stress with time in piles of different particle sizes

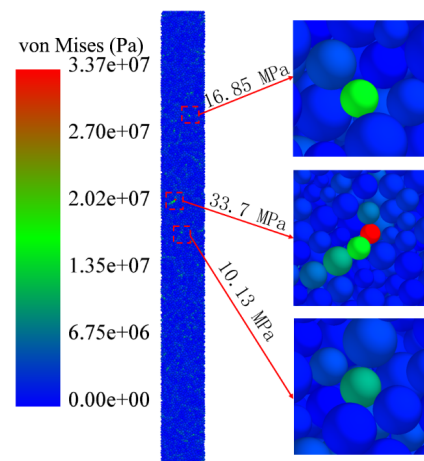


图 12 5~10 mm 陶粒层最大 von Mises 应力剖面图
Fig.12 Profile of the maximum von Mises stress in the 5~10 mm ceramic layer

4 颗粒生成和流动随机性影响分析

EDEM 仿真中, 由于颗粒生成的随机性、颗粒流动的复杂性以及颗粒间相互作用的非线性等因素, 单次仿真分析的结果不一定准确. 因此进一步对 5~20 mm (12.5±7.5 mm) 粒径分布、分段预压实颗粒模型, 5 万吨重罐加载工况进行重复仿真, 以分析随机性影响, 提高仿真结果的准确度.

4.1 颗粒随机性对沉降量的影响

如图 5(c)、图 13 所示, 为相同工况的三次分析结果, 其模型初始颗粒生成数量分别为 10 672、10 672 和 10 642, 重罐加载后的沉降量对比如表 6. 此外, 三组试验颗粒堆的孔隙率相近, 故可排除不同孔隙率对试验结果造成的影响. 快速压缩和缓慢压缩随时间变化曲线如图 14, 颗粒体模型总沉降量分别为 20.44 mm、29.6 mm 和 21.4 mm, 平均总体沉降量为 23.81 mm.

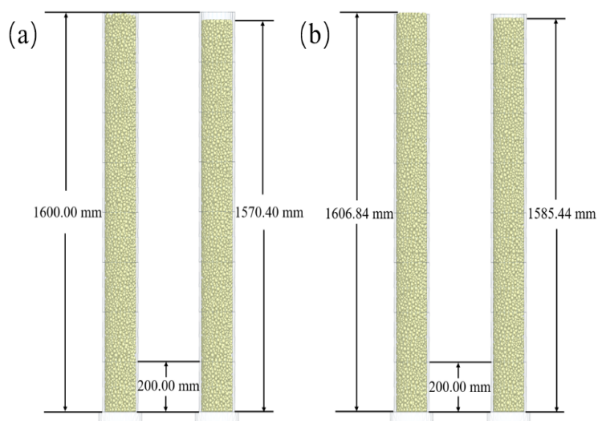


图 13 重复 2 次分析的颗粒模型
Fig.13 Particle model repeated twice

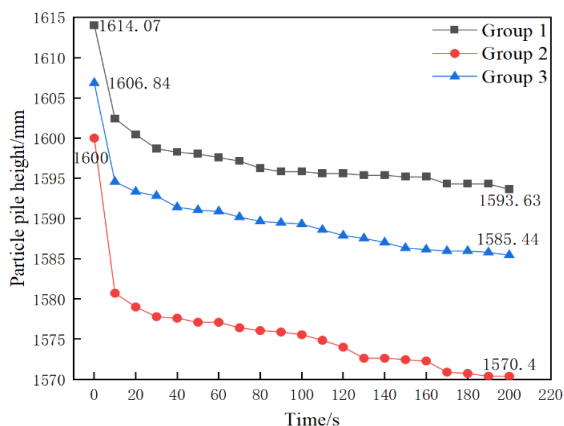


图 14 三次分析颗粒堆高度随时间变化图
Fig.14 Height of particle pile versus time analyzed three times

表 6 三次分析颗粒体重罐加载后高度对比

Tab.6 Weight of the particles analyzed three times and comparison of the height after tank loading

Frequency of analysis	1	2	3
Initial altitude/mm	1 614.07	1 600.00	1 606.84
Height of heavy tank after loading/mm	1 593.63	1 570.40	1 585.44
Total settlement/mm	20.44	29.60	21.40
Porosity	0.456 7	0.454 4	0.456 1

为定量表征颗粒生成及流动随机性对颗粒堆沉降量与最大应力的影响规律, 本研究引入相对标准偏差(Relative Square Deviation, RSD)作为评价指标式(1), 用以系统地评估上述随机因素引起的沉降量与最大应力的波动特性.

将表 5 中的 3 次分析总沉降量结果代入式(1), 可得沉降量的变动系数 RSD-C 为 14.95%

$$RSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \times \frac{1}{\bar{x}} \times 100\% \tag{1}$$

式中, RSD 为变动系数 (RSD-C 为沉降量变动系数、RSD-Y 为最大应力变动系数), x_i 为样本参数, \bar{x} 为样本参数平均值.

4.2 颗粒生成和流动随机性对最大应力的影响

由图 15 可知, 三次分析的最大等效应力随时间变化在 7.83~21.8 MPa 波动, 每次分析的最大等效应

力平均值分别为 10.46 MPa、15.31 MPa 和 14.17 MPa；但三个最大应力峰值相差较大，反映出最大应力峰值受随机性的影响。这是由于颗粒堆积结构的随机性使接触网络、接触点数量及接触角度不同，从而影响应力传递路径和局部应力集中现象。此外，应力传递路径的复杂性使得应力集中区域的位置和大小在不同分析中有所变化，进一步导致最大应力峰值的差异。

将图 15 中各次分析的最大应力峰值代入式(1)，可得最大应力的变动系数 RSD-Y 为 7.7%。

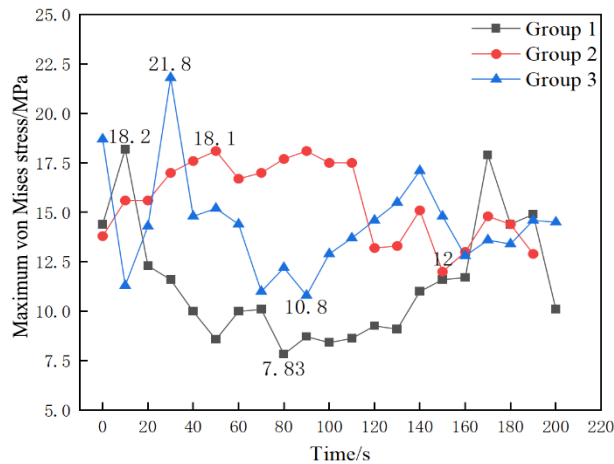


图 15 三次分析颗粒最大 von Mises 应力随时间变化图

Fig.15 Maximum von Mises stress of particles versus time analyzed three times

5 结论

本文针对熔盐罐罐底陶粒层建立离散元仿真颗粒模型，按颗粒模型高 1.6 m，重罐负载为 5 万吨，进行仿真模拟，对比分析压实工艺、粒径分布对沉降量、颗粒最大应力的影响规律，并进一步分析了随机性的影响。结果表明

(1) 陶粒自然堆积不压实，沉降量最大；一次压实和分段压实沉降量相近且较小，但一次压实对应的最大应力较大，达 25.3 MPa，其内部应力分布不均，变化剧烈；分段压实三次模拟对应的最大应力 18.1~21.8 MPa，且颗粒应力分布较均匀。

(2) 粒径变化范围一定时，最大应力随粒径的增大而降低。基础粒径一定时，粒径变化范围越大，沉降量越小。因此宽粒径分布有助于减小沉降量。

(3) 三次重复分析后，颗粒体模型沉降量及最大应力的变动系数分别达 14.95% 和 7.7%。

(4) 综合考虑陶粒随机性波动影响，陶粒层采用 5~20 mm 粒径，分段多次预压实工艺最优，对应的沉降量 23.5 mm，其最大应力约为 23.16 MPa，满足安全要求。

参考文献：

- [1] 时华. 熔盐储热系统热性能和熔盐泄漏与渗流特性的研究[D]. 杭州：浙江大学，2021.
Shi H. Investigation on the thermal performance of molten salt thermal energy storage system and the characteristics of molten salt leakage and migration[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021(in Chinese).
- [2] 梁甜, 糜又晚, 李清元, 等. 多场耦合作用下某槽式光热电站熔盐储罐基础温度分布与沉降变形[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(5):120-126.
Liang T, Mi Y W, Li Q Y, et al. Temperature distribution and settlement deformation of molten salt storage tank in a trough photothermal power station under multi-field coupling[J]. Building Technology Development, 2022, 49(5):120-126(in Chinese).
- [3] 易自砚, 李红星, 何邵华, 等. 太阳能热发电站高温熔盐罐基础设计关键参数研究[J]. 太阳能学报,

- 2025, 46(2):464-469.
- Yi Z Y, Li H X, He S H, et al. Study on key parameter of high temperature molten salt tank foundation design in solar power station[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2025, 46(2):464-469(in Chinese).
- [4] 王翌文, 周昊, 罗佳伟, 等. 储罐地基材料在熔盐泄露后的导热系数研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2022, 56(1):137-143.
- Wang Z W, Zhou H, Luo J W, et al. Research on thermal conductivity of storage tank foundation materials after molten salt leakage[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2022, 56(1):137-143(in Chinese).
- [5] Li H, Wang Z, Song Q, et al. Design and stress analysis of a new distributed single tank molten salt heat storage system with internal heat source[J]. *Sustainability*, 2025, 17(2):758.
- [6] Xue X, Li H, Chen C, et al. Thermal performance assessment and optimization simulation of large-scale molten salt storage tanks and foundation[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 109:115127.
- [7] Fishedick J, Tamme R, Hermann U. CFD analysis of the cool down behaviour of molten salt thermal storage systems[J]. *Es2008: Proceedings of the 2nd International Conference on Energy Sustainability*, 2009, 2:515-524.
- [8] Torras S, Pérez-Segarra C, Rodríguez I, et al. Param-etric study of two-tank TES systems for CSP plants[J]. *Energy Procedia*, 2015, 69(C):1049-1058.
- [9] Guo H, Zang C, Wang Z, et al. Analysis of thermal and mechanical properties with inventory level of the molten salt storage tank in central receiver concentrating solar power plants[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 260:124984.
- [10] Zhu S, Li X, Li Y, et al. Thermo-mechanically coupled settlement and temperature response of a composite foundation in complex geological conditions for molten salt tank in tower solar plants[J]. *Processes*, 2024, 12(11):2602.
- [11] Ren B, Zhu C, Li B, et al. Thermal-mechanical coupling characteristics of large-scale molten salt storage tanks under stable operating conditions with varying liquid levels[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 100(PB):113697.
- [12] 张颖男, 张静, 郑德聪, 等. 油松林木废弃物热压成型颗粒介质传热、传力特性研究[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(12):453-463.
- Zhang Y N, Zhang J, Zheng D C, et al. Study on heat transfer and stress-passing characteristics of solid granules medium in hot briquetting process of pinus tabulaeformis waste[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(12):453-463(in Chinese).
- [13] Ghasemi M A, Falahatgar S R, Mostofi T M. Mechanical and thermomechanical mesoscale analysis of multiple surface cracks in ceramic coatings based on the DEM-FEM coupling method[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2022, 236:111336.
- [14] Wang Y, Nie J Y, Zhao S, et al. A coupled FEM-DEM study on mechanical behaviors of granular soils considering particle breakage[J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 160:105529.
- [15] 孙思齐, 肖军华, 刘志勇, 等. 高频振动下岩土颗粒材料动力行为及细观机理[J]. *力学季刊*, 2023, 44(4):835-844.
- Sun S Q, Xiao J H, Liu Z Y, et al. Dynamic behavior of granular materials under high frequency loading and the meso-mechanism[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2023, 44(4):835-844(in Chinese).
- [16] 郭兴文, 张小川, 钱龙, 等. 胶结砂砾石层面直剪试验及破坏行为细观研究[J]. *力学季刊*, 2022, 43(1):46-55.
- Guo X W, Zhang X C, Qian L, et al. Direct shear test of CSG interface and meso study on failure behavior[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2022, 43(1):46-55(in Chinese).
- [17] 林彤, 李明广, 陈锦剑. 基于对数螺旋滑裂面的有限宽度土体被动土压力计算方法[J]. *力学季刊*, 2022, 43(1):64-74.

- Lin D, Li M G, Chen J J. Calculation method of passive earth pressure of confined soil based on logarithmic spiral sliding surface[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2022, 43(1):64-74(in Chinese).
- [18] 胡卫兵, 张锋凌, 缪勇, 等. 光热电站熔盐罐基础陶粒土回填施工技术[J]. 施工技术, 2021, 50(18):99-103.
- Hu W B, Zhang F L, Miu Y, et al. Construction technology of expanded clay backfilling in salt tank foundation for the CSP plant[J]. Construction Technology, 2021, 50(18):99-103(in Chinese).
- [19] 杨红霞, 戴天兴, 崔保龙, 等. 陶粒湿屋面传热过程的有限元解法[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(4):284-287.
- Yang H X, Dai T X, Cui B L, et al. Finite element method for heat transfer process of ceramic wet roof[J]. Sichuan Building Science Research, 2010, 36(4):284-287(in Chinese).
- [20] 赵基达, 徐有邻, 黄小坤, 等. 混凝土结构设计规范(GB 50010-2010)[J]. 建设科技, 2015, 10:28-30.
- Zhao J D, Xu Y L, Huang X K, et al. Code for design of concrete structures (GB 50010-2010)[J]. Construction Technology, 2015, 10:28-30(in Chinese).
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑钢结构防火技术规范: GB 51249-2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for fire safety of steel structures in buildings: GB 51249-2017[S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2017(in Chinese).
- [22] 王甲, 肖圣哲, 邱欣, 等. 陶粒混凝土冲击损伤演化的三维数值模拟[J]. 宁波大学学报(理工版), 2017, 30(6):59-65.
- Wang J, Xiao S Z, Qiu X, et al. Three-dimensional numerical simulation of impact damage evolution of ceramsite concrete[J]. Journal of Ningbo University (Science and Technology), 2017, 30(6):59-65(in Chinese).
- [23] 于庆旭, 刘燕, 陈小兵, 等. 基于离散元的三七种子仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2):123-132.
- Yu Q X, Liu Y, Chen X B, et al. Calibration and experiment of simulation parameters for panax notoginseng seeds based on DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2):123-132(in Chinese).