

# 破碎筛分厂房振动性态测试与评估

朱丽华<sup>1,2</sup>, 白国良<sup>1</sup>, 李晓文<sup>2</sup>, 姜孔毅<sup>3</sup>, 曾金盛<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055;  
3. 鞍钢集团矿业公司, 辽宁 鞍山 114001)

**摘 要:**某铁矿石破碎筛分车间布置了9台破碎机,且破碎机基础平台与主厂房结构没有脱开。破碎机的工作扰力导致基础平台与主厂房结构振动严重。为了分析破碎筛分厂房的振动性态,并评估其振动安全性,用自由振动法和脉动法现场测试了结构动力特性参数,并测试了破碎机不同开启工况下的结构和基础平台的振动位移。建立了有限元模型,并进行模态分析和谐响应分析,有限元计算结果与现场动测结果基本一致。研究表明,破碎机引起的破碎筛分厂房振动超限;随着开启破碎机的增多,结构的振动位移相应增大,但局部振动和破碎机的开启工况有关。

**关键词:**破碎筛分厂房;振动测试;动力机器基础;谐响应分析

**中图分类号:** TU311.3 TU317

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2012)05-0689-06

动力机器通常有独立的基础,但某些情况下,动力机器基础也可能没有与主厂房脱开,则设备的工作扰力可能对与之相连的主厂房结构产生较大影响。动力机器引起的结构振动问题一直是工程振动领域的研究热点<sup>[1]</sup>。对于动力设备引起的结构振动分析与设计,我国工程技术人员目前基本上是按照《动力机器基础设计规范》<sup>[2]</sup>等规范、标准的要求进行,其设计目标是限制动力机器基础的运动幅值以保证机器运行安全,同时不能影响附近结构的安全和工作人员的正常工作<sup>[3]</sup>。若动力机器基础或支承平台振动超限,则会影响结构的安全使用。本文对鞍钢集团矿业公司齐大山铁矿破碎筛分车间由破碎机引起的结构振动超限问题进行研究。通过现场实测厂房结构的动力特性参数和振动反应物理量,结合有限元分析,深入分析其振动性态,并评估其振动安全性。

## 1 工程概况

鞍钢集团矿业公司齐大山铁矿破碎筛分车间厂房为钢-混凝土混合结构,如图1所示。该厂房中布置有九台旋回式破碎机,包括六台 HP700 系列细破(HP601~HP606)和三台 HP800 系列中破(HP301~HP303)。破碎机设备基础为框架式基础。最初设计时,破碎机基础与主体结构未脱开。在破碎筛分厂房中还有筛分机、皮带传输机和电动机等振源,但是破碎机是最主要的振源激励。



图1 破碎筛分厂房

Fig. 1 A crushing and screening plant

破碎筛分厂房平面如图2所示,厂房①~④轴线为钢结构,采用焊接工字型柱;⑤~⑮轴线为钢筋混凝土构件与钢构件组成的混合结构;A、B、C列柱下柱采用钢筋混凝土矩形柱,上柱采用焊接工字型钢柱;钢屋架,屋面板为1.5m×6.0m预应力大型屋面板。

破碎机位于厂房99.000 m标高平台上,破碎机内偏心套筒以约300 r/min的转速旋转,在破碎铁

收稿日期:2012-03-02 修改稿日期:2012-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(50908186);长江学者和创新团队发展计划资助;陕西省教育厅自然科学专项(12JK0921)

作者简介:朱丽华(1979-),男,江苏常州人,副教授,博士,主要从事工程结构抗震与振动控制研究。

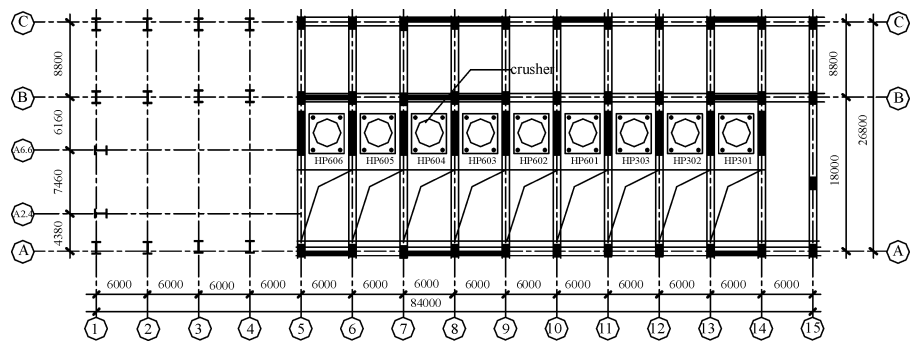


图 2 厂房平面图

Fig. 2 Plane drawing of the factory building

矿石的同时也产生较大的激振力,这对厂房结构产生了严重的振害.部分屋架的端节点焊缝撕裂,某些屋架腹杆断裂,围护墙体大面积开裂,钢窗玻璃震碎.

2 动力特性与振动反应测试

2.1 测试仪器与测点布置

现场动测采用 891~II 型测振仪器,五个水平向拾振器,频响范围 0.5~100 Hz 的放大器,INV306 型智能信号采集处理分析系统,数据处理采用 DASP 程序.

拾振器分别布置在 A-4、B-4、A-13、C-5 柱的不同标高处,如图 3 所示.测点尽量避开扭转和杆件的局部振动,保证所测试的数据能够代表整体结构的振动性态<sup>[4]</sup>.

2.2 动力特性测试

破碎筛分厂房动力特性测试包括横向和纵向的振动频率、振型、阻尼比.采用脉动法和自由振动法进行测试,分为地脉动、吊车大车刹车(纵向)和吊车小车刹车(横向)三种工况<sup>[5]</sup>.

根据振动测试采集的数据,采用 DASP 程序进行频谱分析,得到厂房结构振动的动力特性参数,见表 1 所示.现场实测结果表明,破碎筛分厂房结构的横向一阶频率为 2.48~2.83 Hz,纵向一阶频率为 2.35~2.45 Hz.

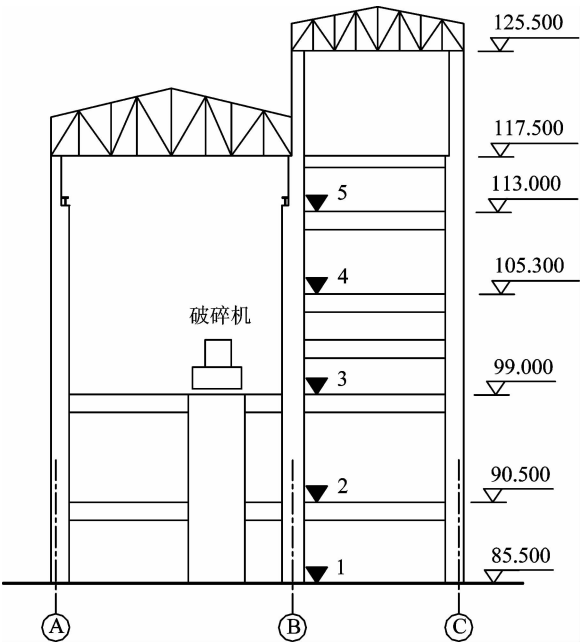


图 3 测点布置(单位:mm)  
(图中标高是绝对标高,▼表示测点位置)

Fig. 3 Arrangement of test points

表 1 AB 跨厂房 A-4 钢柱测试结果

Tab. 1 Test results of A-4 steel column in AB span of the factory building

Number	Direction	Working condition	Frequency /Hz	Fundamental vibration mode					图示	
				Vibration pickup number	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>		5 <sup>#</sup>
					Elevation	86.0	90.5	99.0		105.9
1	Transverse	Earth pulsation	2.53	Modal coordinate	0.010	0.057	0.208	0.561	1.000	
2	Transverse	Crane brake	2.53	Modal coordinate	0.009	0.053	0.206	0.553	1.000	
3	Longitudinal	Earth pulsation	2.39	Modal coordinate	0.028	0.037	0.092	0.637	1.000	
4	Longitudinal	Crane brake	2.35	Modal coordinate	0.010	0.020	0.071	0.554	1.000	

采用选定频带阻尼计算法和半功率带宽法计算结构阻尼比<sup>[6]</sup>. 测试结果表明, 破碎车间厂房结构横向阻尼比为 1.629%~2.512%, 纵向阻尼比为 0.490%~0.807%. 该厂房为钢与混凝土的混合结构, 阻尼比实测值比相关规范规定值小, 本文综合考虑各规范的推荐值, 建议对于这种钢—混凝土混合结构厂房, 其阻尼比取 3.5%.

2.3 振动线位移测试

结构振动线位移测试分工况进行, 包括破碎机满载和空载、单台工作和若干台破碎机组合工作等不同工况. 对于此类多台设备引起的结构振动, 测试时需要多次开机与停机. 某些生产企业, 由于工艺连续性要求, 不一定能够做到这点, 这时需要综合分析, 找出最不利的工况进行测试. 测试结构振动幅值时, 测点尽量布置在结构振动最大处. A-13 柱和 99.000 m 平台振动的线位移最大值如表 2、3 所示.

表 2 AB 跨厂房 A-13 柱振动线位移最大值

Tab. 2 Maximum value of vibration linear displacement for A-13 column in AB span of the factory building /mm

Direction	Vibration source	Test point1	Test point2	Test point3	Test point4	Test point5
Longitudinal	Seven crushers running,604 free running	0.011 20	0.028 86	0.061 09	0.178 75	0.312 25
	Six crushers running,302 stopping	0.014 01	0.039 83	0.118 80	0.205 17	0.289 15
	Six crushers running,601 stopping	0.011 60	0.033 14	0.119 33	0.193 81	0.261 58
	Five crushers running,601 and 303stopping	0.011 29	0.066 32	0.214 43	0.234 32	0.436 18
Transverse	301 and 302 running,604 free running	0.023 16	0.066 51	0.242 44	0.249 65	0.500 14
	Five crushers running,303 and 602 stopping	0.022 68	0.068 39	0.261 29	0.286 70	0.482 01

表 3 99.000 m 平台振动线位移最大值

Tab. 3 Maximum value of vibration linear displacement for the 99.000 platform /mm

Direction	Vibration source	Test point1	Test point2	Test point3	Test point4	Test point5	Test point6
Longitudinal	604 free running, 602 stopping	0.063 00	0.088 00	0.095 00	0.099 00	0.074 00	0.094 00
	Seven crushers running,604 free running	0.083 30	0.089 90	0.096 00	0.119 00	0.095 20	0.111 10
Transverse	Five crushers running,602 and 603 stopping	0.123 00	0.126 00	0.200 00	0.195 00	0.178 00	0.210 00
	Seven crushers running,604 free running	0.192 00	0.167 00	0.255 00	0.252 50	0.184 00	0.191 00
Vertical	Seven crushers running,604 free running	0.104 20	0.117 60	—	—	—	—

测试结果表明, 一般而言, 随着破碎机开启数量的增加, 柱上部纵向位移增大, 但对柱下部的位移影响不大, 柱最大纵向位移为 0.323 61 mm, 发生在 A-13 柱处, 此时工况为满载; 横向位移在各种工况下均较大, 最大值为 0.500 14 mm, 发生在 A-13 柱处, 此时的工况为 301、302 工作, 604 空转. 对于平台的横向位移, 开启破碎机越多, 上部平台(105.300 m、109.300 m)横向位移越大, 下部平台则不明显, 最大值为 0.430 51 mm, 发生在 109.300 m 平台 A-13 轴线处, 此时工况为 303 停、604 空转, 其他满载. 平台的纵向位移总体而言, 开启设备越多, 各平台位移越大, 但由于各平台设备振动不同步且各平台纵向刚度较小, 进行开启设备的组合时, 效应叠加可能导致出现局部振动被放大的情况, 例如在 301、302、602 工作, 604 空转时 102.300 m 平台纵向水平位移达 0.505 74 mm.

3 结构振动有限元分析

3.1 建模

采用 ANSYS® 软件进行建模分析. 使用的单元有 Link8、Mass21、Beam44、Shell63、Shell181 和 Beam188 单元. 结构中的破碎机、筛分机、漏斗储矿、皮带层等以质量单元 MASS21 形式添加. 采用合理的简化和边界条件后, 建立的结构三维有限元模型如图 4 所示.

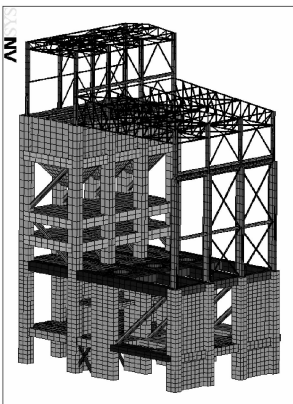


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

3.2 模态分析

建立有限元模型后,首先进行模态分析,并与现场实测结果对比,以判定有限元建模的有效性.采用子空间模态提取方法进行模态计算,得到结构前六阶振型和振动频率,见表 4 所示.由表 4 可知,有限元分析所得结构第一、二阶振型及相应频率值与现场实测值比较接近,表明模型简化合理,可以用于进一步计算分析.该有限元模型整体刚度大,构件多,模态分析过程中可能出现较多的局部杆件振动,此时需要通过质量参与系数识别结构的主体振型<sup>[7]</sup>.

3.3 谐响应分析

为了分析结构在破碎机不同开启工况下的振动性能和规律,进行了不同工况下的谐响应分析,并与现场测试结果进行对比.破碎机工作扰力见表 5 所示.破碎机工作频率为 4.35~5.90Hz.谐响应分析计算频率段取 0~8Hz,这能够涵盖破碎机的工作频率.

谐响应分析计算了 20 种破碎机开启组合工况,不考虑相位差.图 5 所示为 HP301+HP302+HP303+HP601+HP602+HP603+HP604 同时开启时,A-4 柱在不同标高处的振动响应幅频曲线.

幅频曲线上对应于 4.35~5.90Hz 之间的振动幅值为破碎机工作转速对应的振动包络值<sup>[8]</sup>.提取各种工况下幅频曲线上的振动线位移最大值,见表 6 所示.

表 4 结构振动频率

Tab.4 Vibration frequencies of the structure

Order	Frequency/Hz	Vibration modal	Measured frequency/Hz
1	2.63	Longitudinal translation	2.35~2.45
2	2.90	Transverse translation	2.48~2.83
3	3.50	Torsion	—
4	7.11	Transverse translation and torsion	—
5	7.31	Longitudinal translation and torsion	—
6	7.39	Longitudinal translation and torsion	—

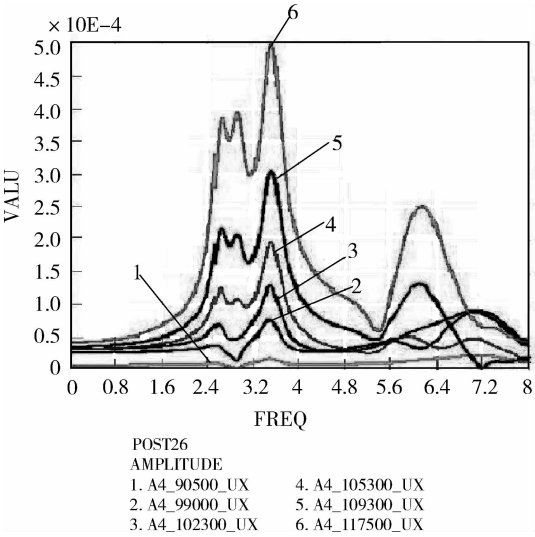


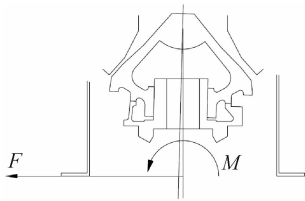
图 5 典型幅频曲线

Fig.5 Typical amplitude—frequency curves

表 5 破碎机扰力

Table 5 Disturbing force of the crushers

Item	Crusher	
	HP700	HP800
Mass of crusher/kg	61 970	64 100
Maximum unbalanced force $F/N$	-84 750	-111 120
Maximum unbalanced moment $M/N \cdot m$	302 400	319 576
Operating speed/ $r \cdot \min^{-1}$	261~354	261~354



振动线位移的数值计算结果与现场实测结果基本一致.现场实测混凝土平台纵向最大位移为 0.119 mm,横向最大位移为 0.235 mm,竖向最大位移为 0.118 mm;有限元分析结果为,纵向最大位移为 0.131 mm,横向最大位移为 0.236 mm,竖向最大位移为 0.034 mm.

4 厂房结构振动安全性评估

我国《动力机器基础设计规范》规定破碎机基础顶面水平向最大振动位移允许值为:当转速  $n \leq 300$  r/min 时,为 0.25 mm;当  $300 \text{ r/min} < n \leq 750 \text{ r/min}$  时,为 0.20 mm;日本学者烟中元弘提出的建筑物

表 6 柱最大振动线位移值(mm)  
Tab. 6 Maximum value of vibration linear displacement for the columns/mm

Elevation	Position											
	A-4 column		B-4 column		C-5 column		A-14 column		B-14 column		C-13 column	
	UX	UY	UX	UY	UX	UY	UX	UY	UX	UY	UX	UY
90.500	0.010	0.015	0.031	0.017	0.021	0.030	0.012	0.015	0.031	0.014	0.024	0.035
99.000	0.027	0.055	0.114	0.066	0.074	0.114	0.044	0.048	0.120	0.044	0.089	0.128
102.300	0.037	0.034	0.141	0.059	0.088	0.104	0.060	0.112	0.126	0.075	0.104	0.109
105.300	0.040	0.108	0.124	0.039	0.078	0.077	0.071	0.187	0.101	0.131	0.083	0.066
109.300	0.100	0.128	0.110	0.060	0.070	0.066	0.101	0.281	0.046	0.208	0.049	0.030
117.500	0.136	0.142	0.093	0.096	0.073	0.059	0.129	0.394	0.081	0.335	0.050	0.177

振动允许界限为:普通建筑物 0.067 mm,强度特别好的建筑物 0.135 mm,设备和基础结构 0.406 mm. 各国在振动位移限值指标上的规定并不统一.我国动规规定的最大振动位移允许值指的是设备基础顶面的位移,而本破碎筛分厂房中的破碎机放在 99.000 m 标高基础平台上,且支承平台没有与厂房主体结构脱开.对于这种情况,本文建议将 99.000 m 平台的振动位移作为评估结构振动安全性的重要指标,同时需要参考与基础平台相连的主厂房结构的最大振动位移.本破碎筛分厂房 99.000 m 平台的最大振动位移为 0.255 00 mm,超过了我国动规的规定;主厂房结构横向水平最大振动位移达到 0.505 74 mm,纵向水平振动位移达到 0.323 61 mm,都已超出建筑物振动允许界限,因此综合判定本厂房不满足振动安全性的要求.

引起该破碎筛分厂房振动的主要振源是铁矿石破碎机,由于破碎机没有独立的基础,因此破碎机引起的振动主要由主厂房结构直接承受.由于破碎机老化,工作扰力增大,再加上破碎筛分厂房性能退化,导致该破碎筛分厂房振动超限.为了减轻破碎机扰力对破碎筛分厂房的振动影响,必须进行振动治理,治理的方法包括结构加固补强和给破碎机加设减震垫.

5 结 论

本文通过现场实测与有限元分析相结合的手段,对铁矿石破碎筛分厂房进行了振动性态分析和安全性评估.本文的振动测试和分析方法可以为类似工业建筑振动超限问题提供参考.

- (1)本破碎筛分厂房振动超限,影响安全使用,必须进行振动治理.
- (2)评估动力机器基础与主体结构没有脱开的结构振动安全性时,主要判断指标是设备基础顶面的振动线位移,同时要考虑主体结构的振动线位移.
- (3)多台设备引起的结构振动问题,固然存在不利开启工况,但一般而言随着开启设备的增多,结构的振动位移相应增大,但局部振动和设备开启工况有较大关系.
- (4)对于类似本文所研究的钢-混凝土混合结构厂房,建议动力计算时阻尼比取为 0.035.

参考文献 References

[1] 侯兴民,马小燕,吴汉生,等. 动力机器基础振动与设计若干问题的讨论[J]. 地震工程与工程振动,2008,28(3): 131-137.  
HOU Xing-min, MA Xiao-yan, WU Han-sheng, et al. Some problems about vibration and design of dynamic machine foundation[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008,28(3):131-137.

[2] GB50040—96 动力机器基础设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,1997.  
GB50040—96 Code for design of dynamic machine foundation[S]. Beijing: China planning press, 1997.

[3] GEORGE G. Analysis of machine foundation vibration;state of the art[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,1983,2(1): 2-42.

[4] 王振宇,刘晶波,裴欲晓,等. 大型动力机器基础防微振计算理论与实测研究[J]. 岩土工程学报,2002,24(3):363-

- 366.
- WANG Zhen-yu, LIU Jing-bo, PEI Yu-xiao, et al. Theoretical and experimental study on micro-vibration reduction of large dynamic machine foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 363-366.
- [5] 李忠献. 工程结构试验理论与技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2003.
- LI Zhong-xian. Theory and technique of engineering structure experiment[M]. Tianjin: Tianjin university press, 2003.
- [6] JIANG Ping. Modal analysis for steam turbine/generator machine table-top foundation[C]// Structures Congress, Orlando, Florida, USA, 2010: 2684-2691.
- [7] 丁阳, 沈斌. 长期设备振动对已建钢结构厂房承载力影响的分析[J]. 建筑结构, 2007, 37(3): 60-62.
- DING Yang, SHEN Bin. Analysis of long-time equipment vibration influence on the bearing capacity of steel structural factory building[J]. Building Structure, 2007, 37(3): 60-62.
- [8] 刘志钦, 白国良, 李红星, 等. 火电厂主厂房型钢混凝土框排架结构动力特性实验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2010, 42(4): 538-544.
- LIU Zhi-qin, BAI Guo-liang, LI Hong-xing, et al. Test study on dynamic characteristic of SRC frame-bent structure for main building of a thermal power plant[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2010, 42(4): 538-544.

## Test and evaluation on vibration performance of a crushing and screening plant

ZHU Li-hua<sup>1,2</sup>, BAI Guo-liang<sup>1</sup>, LI Xiao-wen<sup>1</sup>, JIANG Kong-yi<sup>3</sup>, ZENG Jin-sheng<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China(XAUAT), Xi'an 710055, China;

3. Anshan Iron and Steel Group Company, Anshan 114001, China)

**Abstract:** There are nine crushers in a crushing and screening iron ore plant, and the foundation platform of the crushers is not separated from the main plant structure. The disturbing force of crushers leads to serious vibration of foundation platform and main plant structure. In order to analyze the vibration performance of the crushing and screening plant and evaluate its vibration safety, the structural dynamic characteristic parameters are tested in site with free vibration method and pulsation method, and then the vibration displacement of the structure and foundation platform under different working condition of crushers are measured. A finite element model is established, and then modal analysis and harmonic response analysis are done. The calculation results are basically in accordance with the test results. The study shows that the vibration of crushing and screening plant induced by crushers are overrunning. The structural vibration displacement increases with the increase of opening crushers, but the local vibration is related to the working condition of crushers.

**Key words:** *crushing and screening plant; vibration test; dynamic machine foundation; harmonic response analysis*