

大型自移式破碎站钢结构落料冲击系数研究

杨晓静, 凌静秀, 银光球

(福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 基于虚拟样机技术及有限元法,提出了破碎站钢结构的力学模型等效及落料冲击系数的数值模拟方法,采用理论公式对单块物料冲击钢结构的动载系数进行计算,并将其与数值模拟分析结果对比。分析表明,1 m³大小的正方体煤岩物料从5 m高度下落直接冲击钢结构,其冲击系数的理论计算及刚体动力学分析结果均为123,而柔体动力学分析结果为125,三者误差约1.6%,表明提出的数值模拟方法及钢结构等效模型有效,分析方法可为破碎站的性能评估及结构优化提供基础。

关键词: 自移式破碎站; 落料冲击系数; 刚体动力学; 柔体动力学

中图分类号: TD402

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2017)01-0030-05

Research on blanking impact coefficient of steel structure in large self-mobile crushing station

Yang Xiaojing, Ling Jingxiu, Yin Guangqiu

(College of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Based on the virtual prototype technology and finite element method, a mechanical model of the steel structure of crushing station and a numerical simulation method of blanking impact coefficient were proposed. Then the dynamic load coefficient of a single material was calculated by theoretical formula, and it was compared with the numerical simulation result. When a cubic coal rock of 1 m³ hit the steel structure directly from a height of 5m, the theoretical impact coefficients and rigid body dynamic results were 123, while the flexible body dynamic analysis result was 125, the error of which being about 1.6%. It is indicated that the numerical simulation method and the equivalent model of the steel structure are effective, and the analysis method can provide a basis for the performance evaluation and structure optimization of the crushing station.

Keywords: self-mobile crushing station; blanking impact coefficient; rigid body dynamics; flexible body dynamics

自移式破碎站主要用于露天矿,用来破碎物料,如煤、矿石等,是露天矿开采工艺中的关键设备,相当于一个复杂的大型破碎车间,整机结构主要由破碎机、给料机、卸料臂、主体框架钢结构、履带行走及回转机构等组成。

目前,大型自移式破碎站的破碎能力高达

4 000 t/h,需采用重型板式给料机输送物料,现有的规范及标准已无法指导相关结构的设计。为满足整机的高效破碎能力,需要大型挖掘机配合运输物料,其单次电铲物料的重量高达30~40 t。据工程统计,电铲物料一般从2.5~5 m的高度下落,冲击给料机钢结构,引起卸料臂等结构的剧烈

收稿日期: 2016-12-03

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2016J01722); 福建工程学院校科研启动基金(GY-Z160048)

通讯作者: 杨晓静(1985-),女,山西朔州人,硕士,助理实验师,主要研究方向:机械系统动力学。

振动、噪声以及关键部件的疲劳破坏,影响整机的振动特性及可靠性等性能指标。因此,确定装料冲击载荷是进行整机振动分析的关键,精确分析与计算落料冲击载荷系数是进行破碎站钢结构动态设计的前提。

关于破碎站及落料冲击载荷,学者们已开展了大量的研究工作。王保强、安晓卫及宋波等^[1-4]采用有限元法对破碎站钢结构进行静力学和模态分析,校核了结构的强度、刚度及稳定性。Rusiński 等^[5]结合有限元及测试手段对破碎机支撑结构应力进行计算,并对局部结构进行了改进。吕廷^[6]、孙聪^[7]基于牛顿力学和有限元法建立破碎站主体钢结构的动力学模型,对系统动态特性进行了分析。Huo 等^[8]对破碎站中的重型板式给料机钢结构进行了静动特性分析,为结构参数设计提供理论参考。而在落料冲击载荷方面,张守云及李春亭^[9]推导了结构碰撞过程中的弹性冲击系数,并用刚体动力学及有限元法进行了验证。叶四桥等^[10]对不同落石冲击力计算方法进行了对比,导出适用于工程的落石最大冲击力算法,并用工程实例验证了该算法。叶龙等^[11]采用试验方法对散状物料冲击载荷进行了分析。

综上,相关学者已对破碎站主体钢结构静动力学特性及落料冲击载荷开展研究,但鲜有文献对大型破碎站给料冲击载荷进行分析,且落料冲击载荷大部分是基于理论推导及实验手段得到的经验公式,很少将结构、物料等具体参数考虑进去。为此,本文以某露天矿的自移式破碎站主体钢结构为研究对象,结合单颗粒物料理论冲击系数及数值模拟手段,对电铲落料冲击载荷系数进行分析,为设备的强度校核及振动特性分析奠定理论基础。

1 破碎站钢结构冲击系数理论分析

1.1 破碎站钢结构等效刚度及等效质量

对于实际工程的破碎站钢结构而言,其结构是由不同厚度的钢板焊接而成,模型结构复杂,且为三维实体,数值模拟的计算量过大。为此,需要在符合结构力学特性的前提下,对结构进行合理的等效,以便后继的仿真分析能顺利进行。而钢结构的等效刚度及等效质量是影响落料冲击系数的关键参数,结合有限元法确定这两个参数。

1.1.1 破碎站主体钢结构模型等效

为便于数值模拟分析,采用 SpaceClaim 软件对破碎站整机结构进行等效,去除模型中电气室、司机室、走台、履带行走机构等辅助装置,保留整机的主体钢结构,并抽取各钢板的中性面,创建其钢板等效面模型如图 1。

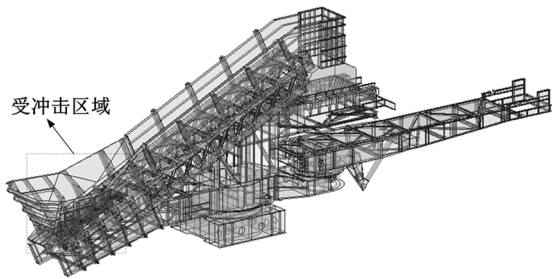


图 1 破碎站主体钢结构等效模型

Fig.1 Main steel structure equivalent model of crushing station

破碎站钢结构等效模型较为复杂,而与受料冲击载荷关系最大的参数则是受冲击区域的等效支撑刚度和等效质量。

1.1.2 破碎站钢结构等效刚度

基于 Workbench 软件的静力学分析平台,对破碎站钢结构定义材料参数、施加载荷约束及接触对等,并采用二维壳单元代替实体单元对模型进行网格划分,建立钢结构有限元模型如图 2。

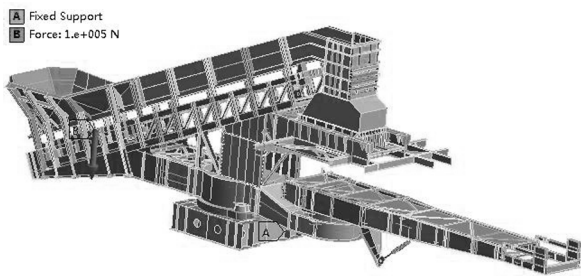


图 2 破碎站主体钢结构有限元模型

Fig.2 Main steel structure finite element model of crushing station

在受冲击区域施加载荷 $F = 100 \text{ kN}$, 得到结构竖向方向位移为 0.917 mm 。由此确定破碎站受料斗冲击区域的钢结构等效刚度^[9]:

$$K_{eq} = 100 / 0.917 \approx 109.05 \text{ kN/mm}$$

1.1.3 破碎站钢结构等效质量

同理,采用静力学模块分析得到破碎站钢结构在自重作用下的竖向方向位移。由此可确定破

碎站冲击区域等效质量^[9]。

$$m_{eq} = K_{eq} h_{eq} / g \quad (1)$$

式中, h_{eq} 为受冲击区域的等效变形。

将得到的冲击区域竖向变形结果 $h_{eq} = 2.536$ 代入式(1), 计算得到破碎站钢结构等效质量 m_{eq} 为 27 655.4 kg。

1.2 单颗粒物料冲击系数理论计算

单块物料冲击系数利用李春亭等学者推导的方法计算^[9]。假设 1 m³ 大小的正方体煤岩(密度取 1 150 kg/m³, 质量为 m_1) 从极限高度 h 为 5 m 的位置下落冲击破碎站钢结构, 相应的载荷冲击系数:

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{m_{eq}}{m_1}\right)^2 + \frac{8K_{eq}m_{eq}h}{(m_1 + m_{eq})^2g}} \approx 123 \quad (2)$$

2 单颗粒物料冲击系数数值模拟及对比

确定破碎站主体钢结构等效刚度和质量后, 建立等效冲击模型, 分别从刚体动力学和柔体动力学进行仿真分析。其中刚体动力学采用 ADAMS 软件分析, 柔体动力学采用 ANSYS/LS-DYNA 软件分析。

2.1 刚体动力学分析

2.1.1 刚体等效模型

在 ADAMS 中建立的动力学模型如图 3, 其中弹簧质量模型的等效质量和刚度数值与破碎站钢结构一致, 物料材料参数按实际煤岩赋予, 尺寸为 1 m³ 大小的正方体, 下落高度 5 m。



图 3 等效刚体动力学模型

Fig.3 Equivalent rigid body dynamic model

以上模型中, 易得钢结构的动载冲击系数:

$$\gamma_1 = \frac{F_{max} - m_{eq}g}{m_1g} \quad (3)$$

式中, F_{max} 为最大弹簧力。

2.1.2 分析结果

通过上述模型的碰撞冲击仿真, 提取碰撞过程中弹簧受到的作用力如图 4。

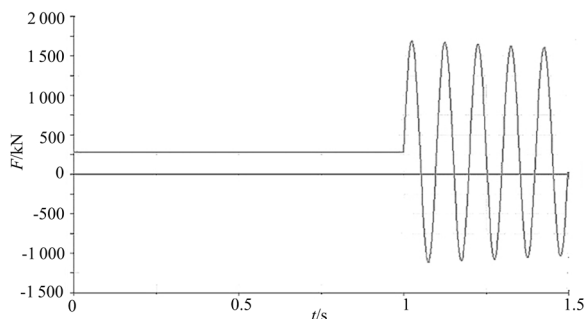


图 4 弹簧力

Fig.4 Spring force

由图 4 可知物料与钢结构碰撞过程中最大冲击力 F_{max} 大小, 将此力、钢结构自重及物料自重代入公式(3), 可得结构的动载冲击系数:

$$\gamma_1 = \frac{F_{max} - m_{eq}g}{m_1g} = \frac{1\ 685\ 700 - 276\ 554}{11\ 500} \approx 123$$

2.2 柔体动力学分析

由于破碎站钢结构等效模型的复杂性, 直接计算效率低下, 且结果受模型网格影响较大。考虑到钢结构的承载约束特点, 采用悬臂梁模型对其进行等效, 前提是等效的悬臂梁结构要保证其等效刚度和质量与破碎站钢结构参数保持一致。假定悬臂梁的宽度和给料机链板宽度一致, 均为 2 400 mm。通过静力学分析可确定悬臂梁长度为 5 820 mm, 保证其自由端等效刚度与破碎站钢结构一致; 基于公式(1)等效质量的计算方法, 可确定悬臂梁厚度为 480 mm, 其等效质量和破碎站钢结构能保持一致。同样取大小为 1 m³ 的正方体煤岩从 5 m 高下落, 冲击悬臂梁自由端, 提取结构约束端的等效应力时变曲线, 由此获得结构的动载冲击系数。

2.2.1 柔体等效模型

基于 Workbench 的显示动力学模块建立悬臂梁及物料冲击有限元模型, 输出 K 文件, 应用 LS-DYNA 进行求解和后处理。

选用自动单面接触算法定义物料和悬臂梁的接触, 该方法对接触表面类型限制少, 能自动识别碰撞过程中的接触。约束悬臂梁一端, 施加重力加速度。因物料与悬臂梁碰撞前处于自由落体运动状态, 为节约仿真时间, 将下落过程忽略, 直接

赋予物料一定的初始速度。物料从 5 m 高度下落,下落到碰撞前的初始速度为 10 m/s,方向竖直向下。

定义钢结构材料参数,设置仿真分析时间为 0.02 s,其余参数采用默认的设置和算法。输出可以用 LS-DYNA 求解的关键字文件,即 ASCII 格式的 K 文件。在 K 文件中定义物料材料本构。

本文选用 LS-DYNA 软件材料库中的 193 号材料 (MAT_DRUCKER_PRAGER) 模拟煤岩,各参数按煤岩力学参数设定。该本构模型能反映岩体的基本特性,用于模拟煤岩等岩土类材料,可得到较为精确的结果。钢与煤岩材料参数如表 1。

表 1 材料参数							
Tab.1 Material parameter							
材料	密度/ (kg · m ⁻³)	弹性 模量/ MPa	泊松 比	分形 维数	内摩 擦角/ rad	粘着 力/ MPa	膨胀 系数
煤岩	1 150	500	0.36	2.8	0.52	0.2	1.6
钢	7 850	2×10 ⁵	0.3				

2.2.2 分析结果

利用 LS-DYNA 对导出的 K 文件进行求解,采用专门的后处理程序 LS-PREPOST 提取结果。得到钢结构冲击过程中节点等效应力如图 5。

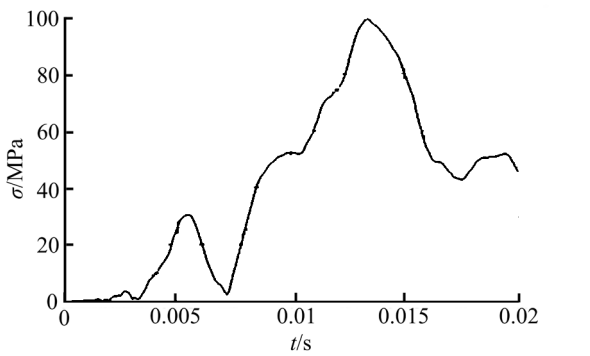


图 5 节点最大等效应力变化曲线

同时,在 Workbench 静力学模块下分析得到悬臂梁在物料自重作用下的等效应力如图 6,悬臂梁自重作用下的等效应力如图 7。

假设悬臂梁在冲击过程中结点最大等效应力为 σ_{\max} ,在物料自重作用下结点最大等效应力为

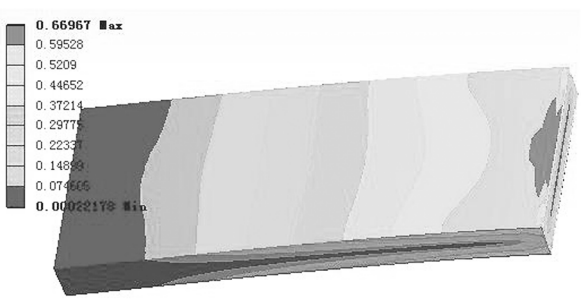


图 6 物料自重作用下等效应力

Fig.6 Equivalent stress under the weight of coal material

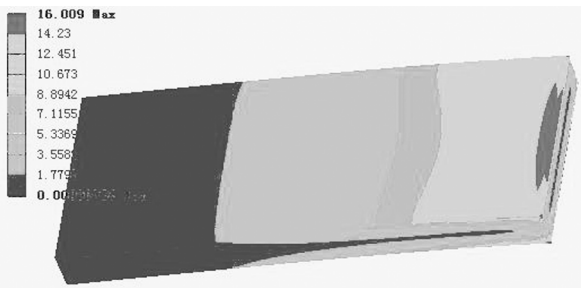


图 7 悬臂梁自重作用下等效应力

Fig.7 Equivalent stress under the weight of cantilever beam

σ_{m_1} ,在悬臂梁自重作用下结点最大等效应力为 σ_{meq} ,则可得到钢结构的动载冲击系数:

$$\gamma_2 = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{meq}}{\sigma_{m_1}}$$

(4)

将上述分析结果代入公式(4),得到考虑钢结构柔性的动载冲击系数计算结果如下:

$$\gamma_2 = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{meq}}{\sigma_{m_1}} = \frac{100 - 16.009}{0.669\ 67} \approx 125$$

2.3 冲击系数理论及仿真结果对比

将上述冲击系数的理论与仿真计算结果汇总如表 2。

表 2 冲击系数分析结果对比
Tab.2 Analysis results comparison of impact coefficient

计算方法	冲击系数大小
理论公式	123
刚体动力学仿真	123
柔体动力学仿真	125

由以上结果可知,单块物料冲击系数理论计算结果与刚体动力学分析结果一致,略小于柔体动力学分析结果。主要是因为柔体动力学计算时,应力与外载不是线性关系,结构的变形反过来亦会影响应力。但 3 种方法计算结果误差只有约 1.6%,在工程许可范围内,同时也说明本文建立的简化模型在一定程度上和破碎站钢结构模型可以等效。

3 结语

1) 基于有限元法确定破碎站主体钢结构的等效质量及等效刚度,为动载冲击系数的理论计算及数值模拟仿真提供了有效结构参数数据。

2) 鉴于破碎站主体钢结构承载约束特点,提

出高效可行的落料冲击系数数值模拟方法,并分别采用单块物料冲击系数理论计算公式、刚体动力学及柔体动力学进行求解,得到的冲击系数分别为 123、123 及 125。

3) 单块物料的冲击系数理论计算结果与刚体动力学分析结果一致,略小于柔体动力学分析结果,但三者计算误差只有约 1.6%,说明本文提出的数值模拟方法及建立的破碎站钢结构等效模型有效,方法可推广到其他工程装备的落料冲击领域。

下一步将开展散体落料冲击系数的研究,同时进行落料冲击实验,验证全文的数值模型及方法。

参考文献:

- [1] 王保强.全移动破碎站主结构模态分析[J].矿山机械,2016(1):63-66.
- [2] 安晓卫,赵满平,张庆民.半固定式破碎站钢结构的有限元分析[J].沈阳理工大学学报,2007,26(5):1-5.
- [3] 宋波,刘畅,孙晓光.大型露天矿半移动式破碎站破碎部钢结构力学分析研究[J].矿山机械,2013(12):77-81.
- [4] 胡昊.半移动式破碎站钢结构分析及受力计算[J].煤矿机械,2012,33(4):46-48.
- [5] Rusiński E, Moczko P, Pietrusiak D, et al. Experimental and numerical studies of jaw crusher supporting structure fatigue failure[J]. Strojnicki Vestnik, 2013, 59(9): 556-563.
- [6] 吕廷.破碎工作站机架及给料系统动态特性分析[D].无锡:江南大学,2008.
- [7] 孙聪.质量慢变自移式破碎机动力学及稳定性分析[D].沈阳:东北大学,2014.
- [8] Huo Junzhou, Yu Shiqiang, Yang Jing, et al. Static and dynamic characteristics of the chain drive system of a heavy duty apron feeder[J]. Open Mechanical Engineering Journal, 2013, 7(1): 121-128.
- [9] 张守云,李春亭.动载弹性冲击系数的理论推导及仿真验证[J]. CAD/CAM 与制造业信息化, 2011(2): 66-68.
- [10] 叶四桥,陈洪凯,唐红梅.落石冲击力计算方法[J].中国铁道科学, 2010, 31(6): 56-62.
- [11] 叶龙,陈希红,卢崇劭,等.煤岩散料冲击系数试验研究[J].煤矿机械, 2015, 36(12): 103-105.

(责任编辑:陈雯)