

# 青砂岩破碎过程中冲击高度与时间关系的数值模拟分析

乔鑫<sup>1,2</sup> 潘永泰<sup>1,2</sup> 赵环帅<sup>1,2</sup> 姚皓轩<sup>1,2</sup> 张乐<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院, 北京 100083;

2. 中国矿业大学(北京) 矿山与城市固废资源化工程研究中心, 北京 100083)

**[摘要]** 冲击速度及时间是破碎机设计过程中的重要参数。为优化破碎机的工作参数,降低能耗及提高效率,以青砂岩为研究对象,运用工程仿真软件 ANSYS - Workbench 对青砂岩的冲击过程进行瞬态分析,研究不同下落高度下的岩石冲击时间。结果表明,青砂岩冲击过程的加速度变化可分接触前不变、迅速增大、缓慢减小及接触后不变共4个阶段;青砂岩的冲击时间较短,一般为毫秒等级,且随下落高度的增大而增长。该结果对破碎机设计优化具有理论指导意义。

**[关键词]** 破碎机; 青砂岩; 瞬态分析; 冲击时间; 冲击高度

**[中图分类号]** TU452 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2024)04-0008-05

**DOI:**10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.04.002

## 0 前言

破碎作业是矿物加工行业中的关键环节,其目的是将原矿粉碎成所需的颗粒大小,以便于达到后续选矿、浮选和冶炼等工艺的要求。随着工业经济的快速发展,岩石破碎的工作量日益增加,而岩石破碎过程能量消耗巨大,且能量利用效率较低。我国自20世纪60年代开始,机械发展制造兴起,研发了冲击式破碎机、锤式破碎机、反击式破碎机、齿辊式破碎机等多种破碎设备<sup>[1-2]</sup>。然而冲击破碎理论研究进展缓慢,滞后于当时的社会发展需要,影响了破

碎设备的设计优化。为优化破碎设备工作参数,对冲击破碎理论的研究至关重要。

冲击速度和冲击时间是破碎机设计的重要工作参数。冲击速度是物料接触时的瞬时速度,而影响冲击速度的主要因素为下落高度。物料的冲击时间是指从冲击接触开始到接触分离的持续时间<sup>[3]</sup>。二者对破碎机的破碎效率、破碎比及性能影响很大。以齿辊式破碎机为例,物料在入料口处以一定高度下落至两齿辊间,因受到挤压作用被破碎。若物料的冲击时间长于物料被卷入齿辊间挤压破碎的时间,物料将经过反弹后再次下落至两齿辊被破碎,此过程增加了物料在破碎机中的破碎时间,增大了能量消耗,降低了破碎效率。因此,研究岩石下落高度与冲击时间的关系,有助于调整入料口与两齿辊间的距离,为破碎机的设计优化提供理论指导。

近些年,国内外学者对于岩石冲击时间进行了大量研究,取得了卓有成效的成果。目前应用较为广泛的是前苏联的B·Π 玛洛金<sup>[4]</sup>利用“钢球-钢板”冲击碰撞模型推导出的冲击速度和冲击时间计算式(1)~(2)。

$$v = (1 - \mu^2)^{\frac{1}{3}} \frac{\sigma^{\frac{5}{2}}}{\sqrt{\gamma E^{\frac{1}{3}}}} \quad (1)$$

$$t = \frac{2.48R}{v} \quad (2)$$

式中: $v$ 为锤头的冲击速度,m/s; $\mu$ 为物料泊松比; $\gamma$

**[收稿日期]** 2024-06-12

**[基金项目]** 中国矿业大学(北京)大学生创新训练项目资助(202303024)。

**[作者简介]** 乔鑫(2003—),女,河北沧州人,中国矿业大学(北京)矿物加工工程专业2021级学生。

**[通信作者]** 潘永泰(1972—),河北雄县人,博士,研究员,博士生导师,主要从事煤炭和城市固废破碎解离科学、技术与装备研究与工程化研究工作。

**[引用格式]** 乔鑫,潘永泰,赵环帅,等. 青砂岩破碎过程中冲击高度与时间关系的数值模拟分析[J]. 绿色矿冶, 2024,40(4):8-12.

QIAO Xin, PAN Yongtai, ZHAO Huanshuai, et al. Numerical simulation of the relationship between impact height and impact time of green sandstone crushing process[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024,40(4):8-12.

为物料密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\sigma$  为物料抗压强度,  $\text{Pa}$ ;  $E$  为物料弹性模量,  $\text{Pa}$ ;  $t$  为冲击时间,  $\text{s}$ ;  $R$  为物料半径,  $\text{m}$ 。

上述公式仅适用于固定的冲击模型, 无法适用于变化的真实工况。因此, 越来越多的学者采用数值模拟的方法对岩石的冲击破碎理论进行研究。数值模拟具有可重复性强、成本低等优点, 是研究冲击过程的有效方法<sup>[5]</sup>。且数值模拟技术具有极强的灵活性, 可分析得到实验中无法获取的信息, 能够处理更复杂的问题, 适用于进行冲击过程的研究。郭思博等<sup>[6]</sup>运用 ABAQUS 软件对弹丸冲击过程开展了研究, 研究结果表明最大残余应力位置的深度与弹丸撞击速度呈正相关, 在弹丸速度一定的情况下, 随着入射角的增大, 最大残余应力也不断增加; 谢国海等<sup>[7]</sup>运用 ANSYS/LS-DY-AN 软件对落石碰撞过程开展了研究, 研究结果表明冲击力与入射角、落石等效半径均呈正相关, 其中冲击力与入射角呈正线性相关, 与落石尺寸的关系为一条正相关的曲线。

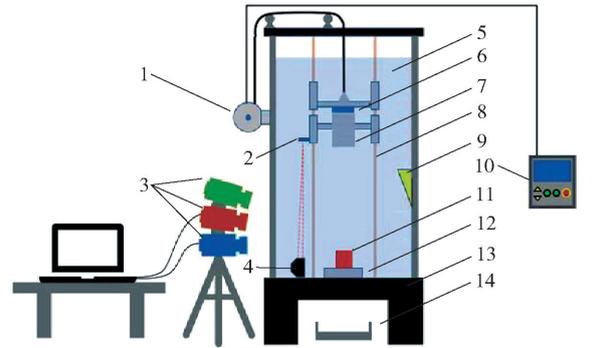
在数值模拟方面, 有限元法具有网格剖分灵活、便于处理复杂边界条件的优势, 并且能提供较高的求解精度<sup>[8]</sup>。ANSYS 作为大型的有限元分析软件, 已经被越来越多地运用在过程研究中。解宏智<sup>[9]</sup>利用 ANSYS 对锤式破碎机进行仿真分析, 优化了其设计方案; 杨琴等<sup>[10]</sup>利用 ANSYS 建立了圆锥破碎机动锥的参数化模型并进行数值模拟, 解释了某型圆锥破碎机结构设计的合理性, 并为后续设计提供了参考依据。

纵观国内外学者对于冲击理论的研究, 目前形成体系的研究主要为理论公式, 其应用范围较窄且无法适用于不断变化的真实工况。而目前数值模拟技术发展较为成熟, 已在多个领域中有所使用, 且利用该方法研究冲击理论的学者较少。基于此, 本文采用有限元分析软件 ANSYS-Workbench 对岩石的冲击过程进行模拟分析, 并进行岩石下落高度与冲击时间关系的定量化研究, 以期丰富岩石冲击理论, 同时对破碎机的机械设计优化提供参考。

## 1 模型的建立与设置

### 1.1 模型的工况

矿物解离冲击试验机结构示意图如图 1 所示。为达到矿物解离破碎的要求, 该试验机将落重上升到一定高度, 其具体高度可通过测距仪显示。启动装置后, 落重在自身重力作用下向岩石试样进行冲击, 在冲击力的作用下, 岩石被破碎达到解离的要求。



1 - 卷扬机; 2 - 挡光板; 3 - 图像记录系统; 4 - 测距仪; 5 - 有机玻璃挡板; 6 - 电磁铁; 7 - 落重; 8 - 导轨; 9 - 补光灯; 10 - 控制面板; 11 - 试样; 12 - 砧板; 13 - 基座; 14 - 集料槽

图 1 矿物解离冲击试验机

### 1.2 有限元模型建立

对齿辊式破碎机中岩石的冲击过程进行动态特征分析, 由于岩石向齿辊冲击的过程难以进行直接模拟, 因此在瞬态分析前要对其冲击过程进行适当的简化。参考 B·Π 玛洛金<sup>[4]</sup>研究中的“钢球与钢板碰撞”的模型, 将冲击过程简化为“岩石球体与钢板碰撞”的模型(图 2)。

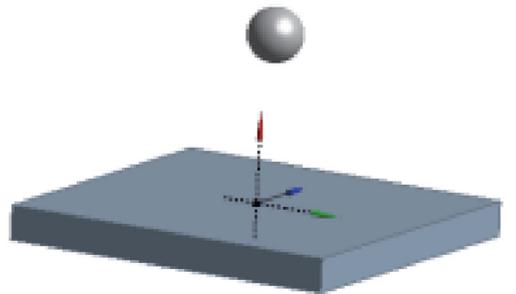


图 2 简化后的冲击模型

综上所述, 本次数值模拟分析的假定条件如下:

- 1) 假定岩石外形为规则球体。
- 2) 被冲击物体为钢板, 材料采用结构钢。

在破碎作业中, 青砂岩是较为常见的准脆性物料, 因此, 采用青砂岩作为研究对象。该岩石属于陆相沉积岩, 由各种砂粒胶接而成, 主要含硅、钙、黏土和氧化铁, 是一种典型的脆性材料。其材料力学参数<sup>[11]</sup>见表 1, 钢板采用 ANSYS 材料库中的结构钢材料。

表 1 青砂岩的力学参数

岩石类型	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量/GPa	泊松比
青砂岩	2 294. 216	13. 536	0. 352

根据实际工况, 取青砂岩球体直径为 40 mm, 冲击钢板尺寸为 500 mm × 500 mm × 50 mm。

### 1.3 有限元网格划分

为了准确反映青砂岩冲击过程的真实情况,同时简便计算,对冲击模型选择 Hex dominant 网络划分(图3),共划分了819个单元、3242个节点。

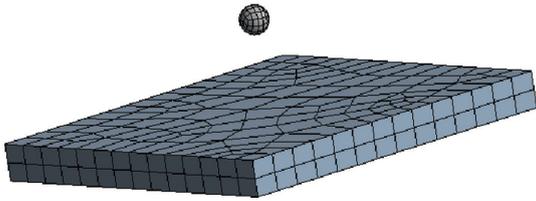


图3 网格划分后的冲击模型

### 1.4 边界条件的确定

根据实际工况,在岩石冲击到破碎机齿辊的瞬间,由于齿辊边缘的线速度远小于岩石的冲击速度,因此可将简化后的齿辊(即钢板)视为固定态,在其四周添加固定全约束,将接触类型设置为碰撞接触(图4)。

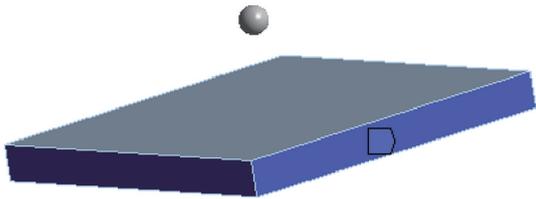


图4 添加边界条件后的冲击模型

### 1.5 分析设置的确定

根据实际工况,为模型添加标准地球重力载荷,岩石小球的初始速度为0 m/s。分析设置正常载荷步数为40000步,最小载荷步数为1000步,最大载荷步数为 $1.5 \times 10^6$ 步。由于冲击过程的能量变化较大,因此在数值模拟过程,设置为大变形控制。初次模拟的冲击高度 $H$ 为0.1 m,设置求解时间为0.3 s,随着冲击高度的不断增加,设置的求解时间也应相应增加。由于青砂岩小球的初始速度为0 m/s,且方向竖直向下,即在冲击过程中不产生除 $Z$ 轴之外的加速度分量,因此在求解设置中可仅添加青砂岩球体 $Z$ 轴加速度,并求解生成不同时间节点下对应的青砂岩加速度数据。

根据牛顿第二定律,在加速度变化的时间段内岩石球体受到钢板的作用力,即二者相互接触。由此可知,加速度变化的时间即岩石的冲击时间。

## 2 结果与分析

### 2.1 加速度变化分析

通过求解不同时刻下的青砂岩加速度,得出多次冲击过程的时间-加速度曲线,结果如图5所示。

由图5可知,其加速度的变化可分为4个阶段。

1)接触前不变阶段:此阶段青砂岩球体以初速度0 m/s正常下落,其加速度为重力加速度 $9.806 \text{ m/s}^2$ ,速度由0 m/s增大到冲击速度。

2)迅速增大阶段:此阶段为青砂岩球体与钢板碰撞后的前期,即冲击前期,青砂岩球体加速度由 $9.806 \text{ m/s}^2$ 迅速增加直至最大,速度由最大冲击速度减小到0 m/s,同时青砂岩球体到达最低点,二者之间的接触应力由0 N迅速增大直至最大。

3)缓慢减小阶段:此阶段为青砂岩球体与钢板碰撞后的后期,即冲击后期,青砂岩球体加速度由最大缓慢减小直至 $9.806 \text{ m/s}^2$ ,速度由0 m/s缓慢反向增大,青砂岩球体逐渐反弹脱离钢板,二者之间的接触应力由最大缓慢减小直至0 N。

4)接触后不变阶段:此阶段青砂岩球体完成冲击过程,完全脱离钢板并向上运动,其加速度为重力加速度 $9.806 \text{ m/s}^2$ 。由于速度与加速度反向,在最高点时速度减为0 m/s并开始下落,准备第二次冲击。

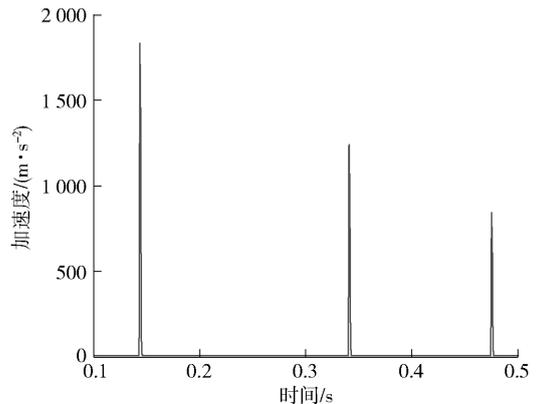


图5 下落高度0.1 m时青砂岩多次冲击的时间-加速度曲线

由此可知,青砂岩加速度变化的时间,即阶段(2)与阶段(3)所消耗的时间为青砂岩的冲击时间。

### 2.2 时间分析

通过数值模拟的方法,可得出不同下落高度对应的青砂岩冲击时间具体数据。根据模拟数据,绘制青砂岩冲击过程中的典型“冲击时间-下落高度”曲线(“ $t-H$ ”曲线),如图6所示。

由图6可知,青砂岩的冲击时间较短,一般为毫秒级别。

1)在相同的重力加速度以及初速度均为0 m/s的条件下,随着下落高度 $H$ 的增大,青砂岩的冲击时间呈增大的趋势。

2)对青砂岩的下落高度与冲击时间数据进行

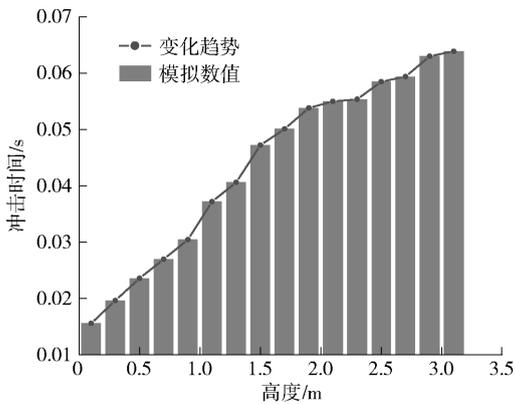


图6 青砂岩冲击过程中的典型“冲击时间-下落高度”曲线

多项式拟合(图7),其拟合曲线的方程式为:

$$t = -0.004H^2 + 0.028H + 0.011 \quad (3)$$

其相关系数  $R^2 = 0.991$ ,说明该拟合曲线与模拟结果具有强相关性。

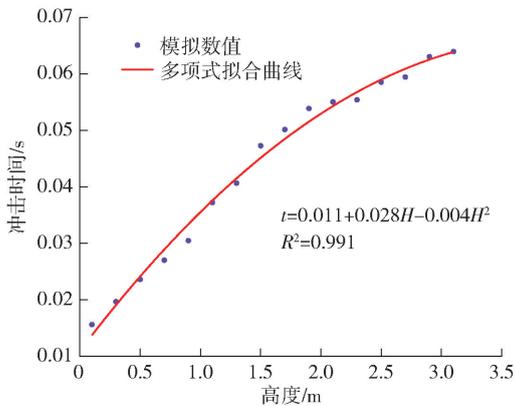


图7 模拟结果的拟合曲线

### 2.3 应力分析

在模拟设置中添加应力分析并求解结果,得到不同冲击时刻下的青砂岩所受应力具体数据。根据模拟数据,绘制青砂岩冲击过程中的典型“应力/加速度-时间”曲线(下落高度为0.1 m),结果如图8所示。

上文所述加速度变化的4个阶段末期青砂岩的应力分布图如图9所示。

由图8及图9可知:

1)在冲击过程中加速度的接触前不变阶段,青砂岩球体未与钢板接触,二者之间的应力为0 N。

2)在冲击过程中加速度的迅速增大阶段,青砂岩球体逐渐与钢板发生接触,二者之间的应力逐渐增大,并在此阶段末达到最大,此时青砂岩球体完全接触钢板。

3)在冲击过程中加速度缓慢减小阶段,青砂岩

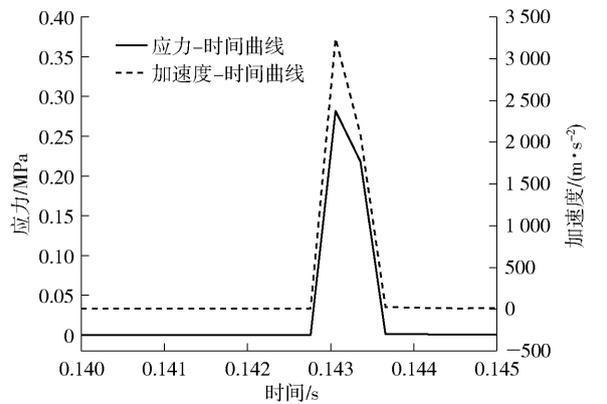


图8 青砂岩冲击过程中的典型“应力/加速度-时间”曲线

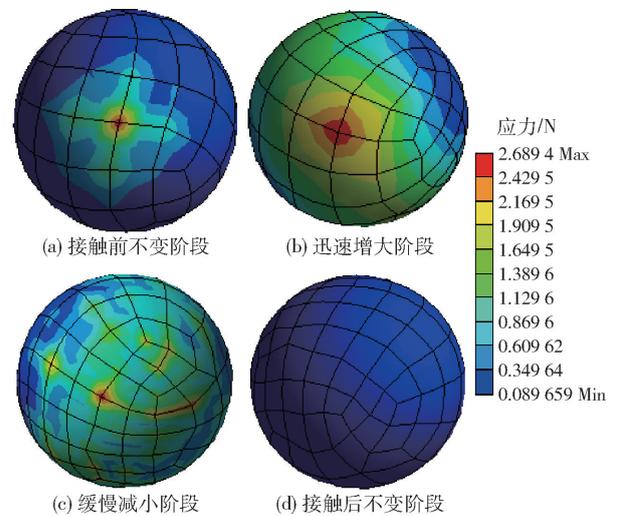


图9 加速度变化的4个阶段末期的不同应力分布

球体逐渐离开钢板,二者之间的应力逐渐减小,并在阶段末减为0 N,此时青砂岩球体完全离开钢板。

4)在冲击过程中加速度的接触后不变阶段,青砂岩球体已完全离开钢板,二者之间应力为0 N。

## 3 结论与建议

冲击时间是机械设计过程中十分重要的工作参数。本文通过简化青砂岩冲击模型,运用大型有限元分析软件 ANSYS-Workbench 对不同下落高度下的青砂岩球体冲击过程进行模拟,分析其加速度变化特征,根据加速度变化的时间即为冲击时间,得出不同下落高度下的岩石冲击时间数值,主要结论如下。

1)青砂岩冲击过程中加速度的变化可分为接触前不变、迅速增大、缓慢减小、接触后不变共4个阶段。实际冲击过程将不断重复此4个阶段,直至青砂岩的重力势能完全被冲击过程所消耗。加速度变化的两个阶段,即速度增大阶段与缓慢减小阶段

所用时间为岩石的冲击时间。

2) 青砂岩的冲击时间较短,一般为毫秒级别。在相同的重力加速度以及初速度均为  $0 \text{ m/s}$  的条件下,随着下落高度  $H$  的增大,冲击时间呈增大的趋势。

3) 通过拟合数据,青砂岩下落高度与冲击时间大致符合曲线  $t = -0.004H^2 + 0.028H + 0.011$  的方程式。并对上述加速度变化的 4 个阶段末进行应力分析,得出冲击过程中青砂岩与钢板间的应力变化规律。

此外,岩石的真实冲击破碎情况较为复杂,相较于公式计算仅能适用于特定的模型,ANSYS 的模拟可以更加灵活地适用于不同的工况条件。本文将青砂岩简化为规则球体,但真实工况下,球形岩石仅为一小部分,更多是不规则的岩石形状,因此,在今后的研究中,建议将岩石简化为正方体或不规则形状再次进行模拟,以求建立更为仿真的模型,完善冲击破碎理论。

#### [参考文献]

- [1] 郭明训. 齿辊破碎机的结构优化与改进措施[J]. 有色冶金节能,2005,21(2):46-47,11.  
[2] 周栋梁. PLC 变频调速控制系统在矿石破碎筛分系统

- 的应用[J]. 有色冶金节能,2015,31(4):41-43.  
[3] 房琳,王武龙,于领军. 反击式破碎机冲击时间的仿真研究[J]. 有色设备,2007(5):14-16.  
[4] B·II 玛洛金. 制粉设备(上册)[M]. 北京:机械工业出版社,1957.  
[5] 陈宇,沈位刚,宋忠友,等. 土垫层缓冲落石冲击力特性离散元数值模拟分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2024,35(2):90-97.  
[6] 郭思博,马贵春,张化斌,等. 基于有限元模型的不同入射角弹丸冲击残余应力模拟[J]. 机械设计与制造工程,2024,53(3):11-14.  
[7] 谢国海,王鹏. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的落石冲击力研究[J]. 路基工程,2017(3):69-72,82.  
[8] 张云琦,张旭辉,黄新武,等. 含裂缝岩石油水两相渗流的有限元模拟[J/OL]. 计算物理:1-18 [2024-05-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2011.04.20240516.2111.002.html>.  
[9] 解宏智. 基于 ANSYS 的锤式破碎机关键参数及仿真应用研究[J]. 机械管理开发,2024,39(3):58-59,62.  
[10] 杨琴,刘道修,赵小涛. 基于 ANSYS 的圆锥破碎机动锥模态分析[J]. 机电工程技术,2023,52(9):105-109.  
[11] 赵环帅,潘永泰,余超,等. 锤式破碎机冲击速率对青砂岩破碎效果及断裂能利用效率的影响[J]. 煤炭科学技术,2024,52(5):289-300.

## Numerical Simulation of the Relationship between Impact Height and Impact Time of Green Sandstone Crushing Process

QIAO Xin<sup>1,2</sup>, PAN Yongtai<sup>1,2</sup>, ZHAO Huanshuai<sup>1,2</sup>, YAO Haoxuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Le<sup>1,2</sup>

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Engineering Research Center for Mining and Urban Solid Waste Recycling, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** Impact velocity and time are important parameters for the crusher. In order to optimize the working parameters of the crusher, reduce energy consumption and improve efficiency, this paper took the green sandstone as the research object, simplified the simulation of the impact model, and used the engineering simulation software ANSYS-Workbench based on finite element analysis to carry out the transient analysis of the impact process of the green sandstone, and studied the rock impact time under different falling heights. The results show that the change of acceleration during the impact process of green sandstone can be divided into four stages of the unchanged stage before contact, the rapid increase stage, the slow decrease stage, and the unchanged stage after contact; the impact time of green sandstone is short, generally millisecond, and increases with the increase of falling height. The results have certain theoretical guiding significance for the design optimization of crusher and other machinery.

**Key words:** crusher; green sandstone; transient analysis; impact time; impact height