DOI: 10.11883/1001-1455(2017)05-0813-09

砂岩球体法向恢复系数实验研究*

叶 阳,曾亚武,金 磊,夏 磊
(武汉大学土木建筑工程学院,湖北 武汉 430072)

摘要:法向恢复系数是岩崩块石运动分析的关键参数,其取值直接决定了块石的运动轨迹。本文中采用自行设计的碰撞实验装置和声频采样技术,测定了砂岩球体碰撞的法向恢复系数,研究了粒径、碰撞速度、含水状态和板的弹性特性 4 个因素对恢复系数的影响。结果表明:砂岩球体法向恢复系数存在复杂的尺寸效应,恢复系数随粒径的增大先增大后减小;碰撞过程中存在的黏弹性耗能机理和弹塑性损伤耗能机理共同作用产生了复杂的尺寸效应;受砂岩非均质特性的作用,粒径较小时,恢复系数的速度效应较明显(随速度增大而增大),粒径较大时速度对恢复系数的影响消失;砂岩饱和使黏弹性耗能和弹塑性损伤耗能增加,使恢复系数比风干时低;等效弹性模量对恢复系数的影响较大,等效弹性模量越大,法向恢复系数越小。

关键词:砂岩球体;法向恢复系数;尺寸效应;速度效应
中图分类号:O389;TU45 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

岩质边坡崩塌是自然界中常见的地质灾害之一,对山区的公路、桥梁、铁路、房屋建筑等构成了严重威胁[1-3]。对于易发生岩崩的地区来说,崩塌的块石体积以及块石在边坡上的运动轨迹直接决定了岩崩是否对基础设施构成威胁,以及威胁的大小。影响岩块运动轨迹的关键在于岩块与边坡碰撞过程中的耗能规律,而该耗能规律主要由岩石的碰撞恢复系数来表征。

碰撞恢复系数为碰后速度与碰前速度之比。根据速度与碰撞面之间的关系,又可以分为法向恢复系数和切向恢复系数。岩石块体与边坡的碰撞属于动力接触问题,因此影响恢复系数的因素较多[4]。针对岩石碰撞恢复系数,国内外学者开展了大量研究。实验研究方面,章广成等[5]采用高速摄像机系统开展了原位岩块碰撞实验,求得法向和切向恢复系数,并对实验数据进行了数值模拟分析;H. K. Dong 等[6]也开展了原位岩块碰撞实验,并基于 3D 扫描摄影技术建立真实边坡模型,反分析了接触碰撞的恢复系数;叶四桥等[7]使用 C30 混凝土浇注不同形状的块体试样,研究了坡度、下落高度、块体质量及形状对恢复系数的影响;P. Asteriou 等[8]通过立方体岩块研究了岩块质量、碰撞角度和碰撞速度对恢复系数的影响,并分析了回弹硬度与恢复系数的关系。数值及理论研究方面,A. M. Ritchie[9]在 1963 年提出集中质量点法模拟块体运动轨迹。该方法基于球体动力学方程将碰撞耗能简化为经验恢复系数,并忽略了岩块大小及形状对恢复系数的影响;集中质量点法经过发展和完善,在二维和三维的岩块运动轨迹模拟中得到广泛应用[10-12];P. A. Cundall 等[13]在 1979 年提出颗粒离散元计算方法,采用接触模型计算颗粒接触力,使用牛顿第二定律计算颗粒运动,并引入了接触阻尼来考虑颗粒碰撞的能量耗散。何思明等[14]对块石碰撞恢复系数进行了详细的理论分析,基于 Hertz 法向接触理论和 Mindlin 切向接触理论推导了法向恢复系数和切向恢复系数的理论计算公式。

然而由于动力接触问题的复杂性,且恢复系数的影响因素较多,室内实验及原位实验大多旨在获得恢复系数的经验值,以满足工程应用为主,因而严格地实验测量及接触耗能机理的研究不足;数值模拟方面,基于离散单元法的块体模拟,提供了模拟真实岩块碰撞的有效途径,但是对接触耗能模型进行了大量的简化,无法考虑岩块粒径、碰撞速度等复杂因素对恢复系数的影响。因此,本文中采用自行设计的球板碰撞实验装置和声频采样技术,精确测定砂岩球体碰撞的法向恢复系数,研究粒径、碰撞速度、含

* **收稿日期**:2016-03-24;**修回日期**:2016-07-11
基金项目:国家自然科学基金项目(41272342);国家自然科学基金面上项目(41772308)
第一作者:叶 阳(1991—),男,博士研究生;**通信作者**:曾亚武,zengyw@whu.edu.cn。

水状态和板的弹性特性 4 个因素对恢复系数的影响，分析碰撞过程中恢复系数的尺寸效应和速度效应，并探讨岩石球体接触损伤及耗能机理。

1 实验方案及过程

1.1 试样的制备

实验所用砂岩来自山东莱阳采石场。实验共使用 5 种直径规格的砂岩球体(2、3、4、5、6 cm)，一块 40 cm×40 cm×20 cm(厚)的石板，同时加工一组岩石标准试样(∅5 cm×10 cm)用于测试岩石的基本力学指标。实验用的砂岩球体、碰撞石板和标准岩样均取自同一块砂岩荒料。为了实现较高的球度，对于不同直径的砂岩球体采用相同粗糙度规格的磨珠机进行打磨抛光，同时对实验石板表面进行打磨抛光，从而保证各种规格的砂岩球体及石板表面粗糙度相同，排除粗糙度对实验结果的影响。加工完成后的砂岩球体如图 1 所示。从 3 个垂直方向测量砂岩球体的直径，并采用克鲁宾球度计算公式估算砂岩球体的球度：

$$\rho = d_n / d_s \tag{1}$$

式中：d_n表示颗粒在 3 个垂直方向的平均直径，d_s表示颗粒在 3 个垂直方向最长直径。各组砂岩球体的平均直径及球度估算结果见表 1。可见本实验的制样方法能够保证较高的球度精度，满足精度要求。

表 1 砂岩球体几何尺寸

Table 1 Geometry of sandstone particle

砂岩球体编组	直径/cm	球度
s-2	2.092±0.063	0.999 1
s-3	2.786±0.048	1.000 0
s-4	4.017±0.055	1.000 0
s-5	4.788±0.131	0.998 0
s-6	5.832±0.062	1.000 0



图 1 砂岩球体试样

Fig. 1 Granular sample of sandstone

1.2 实验装置及方案

实验分为砂岩基本力学特性实验和砂岩球体法向碰撞恢复系数实验。基本力学特性实验在 RMT-301 岩石与混凝土力学实验系统上完成，如图 2 所示，实验所得砂岩的密度为 2 434 kg/m^3，弹性模量 21.4 GPa，泊松比 0.24，峰值强度 101.5 MPa。砂岩球体法向恢复系数实验采用自行设计的实验装置完成。装置示意图如图 3 所示。实验时，先用紧固螺夹将砂岩球体固定在预定高度，目标碰撞钢板或石板经过水平仪调平，实现颗粒与板的垂直碰撞。实验中颗粒在与板碰撞若干次后没有发生明显水平偏转，最终静止在目标板的中部，保证了实验精度。



图 2 RMT-301 岩石与混凝土力学实验系统

Fig. 2 RMT-301 mechanical test system

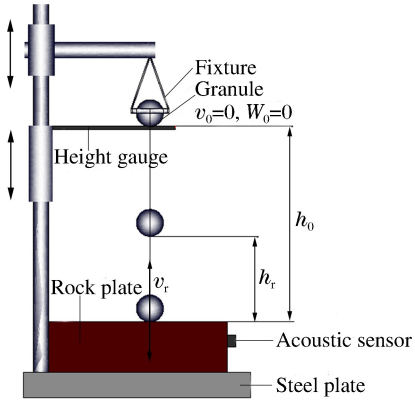

图 3 颗粒材料法向碰撞实验装置

Fig. 3 Test device of granular material for normal collision

1.3　声频信号采样及分析系统

采用声频采样技术对砂岩球体的下落和碰撞过程进行测量。实验过程在封闭安静的实验室中进行,以消除环境噪音的影响。图 4 是一次实验记录的多次碰撞声频信号波形图。每次碰撞开始时激发一个较强的峰值信号,清晰记录了碰撞发生的时刻。在开始 2 s 内记录的环境噪音强度远远低于碰撞产生的信号强度,对碰撞时间的计算没有影响。本文中采用基于 MATLAB 的信号分析系统对声频信号进行处理。

两次碰撞的时间间隔Δt 可以直接在声频波形图中获取,这给实验数据的分析及整理带来极大的便利。由于砂岩球体密度远大于空气,并且运动速度相对较小,空气阻力对速度的影响可以忽略。碰撞速度可以由下式直接计算得到:

$$v=\frac{g\Delta t}{2} \tag{2}$$

式中:g 为重力加速度。

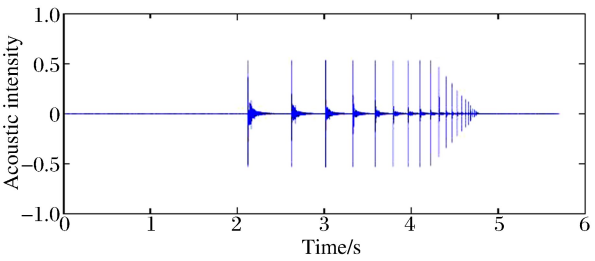

图 4　碰撞过程声频波形图

Fig. 4　Typical sonic graphics of collision

恢复系数可以表示为碰撞后动能($W_{\mathrm{kin,r}}$)与碰撞前初始动能(W_{kin})之比的平方根,或者碰撞后速度(v_{r})与碰撞前速度之比(v_{a}):

$$e=\sqrt{\frac{W_{\mathrm{kin,r}}}{W_{\mathrm{kin}}}}=\sqrt{1-\frac{W_{\mathrm{diss}}}{W_{\mathrm{kin}}}}=\frac{v_{\mathrm{r}}}{v_{\mathrm{a}}} \tag{3}$$

式中:W_{diss} 为碰撞中耗散动能。

根据公式(2)~(3)得第 n 次碰撞的法向恢复系数:

$$e=\frac{\Delta t_{n+1}}{\Delta t_n} \tag{4}$$

式中:Δt_n 为第 n 次碰撞时间间隔,Δt_{n+1} 为第 $n+1$ 次碰撞时间间隔。

1.4　实验内容

本实验研究了碰撞速度、砂岩球体粒径、砂岩球体含水状态和碰撞目标板的弹性参数 4 个因素对法向碰撞特性的影响。实验初始下落高度 $h_0=0.5$ m。砂岩球体的直径分别为 2、3、4、5、6 cm。实验对比了 2 种含水状态对法向恢复系数的影响(天然风干状态和饱和状态)。砂岩球体的饱和采用煮沸法。为了消除实验中的随机误差,1 组相同直径砂岩球体有 5 个试样,每个试样重复实验 5 次。然后对这 25 个实验数据进行统计平均,获得最终的实验结果。实验对比分析了钢板和砂岩板对碰撞特性的影响。钢板尺寸为 40 cm×40 cm×5 cm,砂岩板尺寸为 40 cm×40 cm×20 cm。为了消除应力波传播对实验结果的影响,实验中将板与实验场地紧密贴合,并用水泥砂浆将实验板四周与地面粘结,以尽可能逼近弹性半空间。

2　弹性接触理论

在接触力学的基本理论中,Hertz 在 1882 年推导了经典的赫兹弹性接触本构模型,奠定了接触力学的基础。赫兹接触理论假设条件为:认为材料是均匀的、各向同性的、完全弹性的;接触表面的摩擦可以忽略不计;接触面尺寸远比物体尺寸和表面的相对曲率半径小;接触面的压应力分布为半椭球体。

赫兹接触本构模型的基本解答为

$$F_{\mathrm{el}}=\frac{4}{3}E^{*}\sqrt{R^{*}s^{3}} \tag{5}$$

$$a=\sqrt{sR^{*}} \tag{6}$$

$$P_0=\frac{3F_{\mathrm{el}}}{2\pi a^{2}} \tag{7}$$

式中：F_{el}为接触力，s 为接触变形量，a 为接触半径，P_0为接触中心接触应力；式(5)中等效弹性模量 E^* 和等效半径 R^* 的表达式如下：

$$\frac{1}{E^*}=\frac{1-\mu_1^2}{E_1}+\frac{1-\mu_2^2}{E_2} \tag{8}$$

$$\frac{1}{R^*}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2} \tag{9}$$

结合公式(5)～(7)得：

$$P_0=\frac{3}{2\pi}\left(\frac{4E^*}{3R^*}\right)^{2/3}F_{el}^{1/3} \tag{10}$$

对公式(5)进行积分得弹性变形能公式：

$$W_{el}=\int_0^s F_{el}\mathrm{d}s=\frac{8}{15}E^*\sqrt{R^*s^5} \tag{11}$$

弹性碰撞过程中能量守恒，得能量守恒方程：

$$\frac{1}{2}m^*\left(\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}\right)^2+\frac{8}{15}E^*\sqrt{R^*s^5}=\frac{1}{2}m^*v_a^2 \tag{12}$$

式中：$\frac{1}{m^*}=\frac{1}{m_1}+\frac{1}{m_2}$，当 m_2 为弹性板时，则 $m^*\approx m_1$。方程(12)的初始条件为：

$$\begin{aligned}&s(t=0)=0\\&\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}(t=0)=v_a\end{aligned} \tag{13}$$

根据方程(12)和初始条件能够得出最大接触力，最大相对位移和接触时间[15]：

$$s_{max}=\left(\frac{225}{256}\frac{m^{*2}v_a^4}{E^{*2}R^*}\right)^{\frac{1}{5}} \tag{14}$$

$$F_{el,max}=\left(\frac{125m^{*3}E^{*2}R^*v_a^6}{36}\right)^{\frac{1}{5}} \tag{15}$$

$$t_{el}=2.86\left(\frac{m^{*2}}{E^{*2}R^*v_a}\right)^{\frac{1}{5}} \tag{16}$$

联合公式(10)和公式(15)得碰撞过程中最大接触应力 $P_{0,max}$：

$$P_{0,max}=\frac{3}{2\pi}\left(\frac{4E^*}{3R^*}\right)^{\frac{2}{3}}\left(\frac{125m^{*3}E^{*2}R^*v_a^6}{36}\right)^{\frac{1}{15}} \tag{17}$$

本实验为颗粒与板的碰撞实验，因此公式(17)简化为：

$$P_{0,max}=0.84\,(E^{*4}\rho_1v_a^2)^{\frac{1}{5}} \tag{18}$$

式中：ρ_1 为球体密度。

3 实验结果及分析

3.1 恢复系数的速度效应分析

为了便于实验结果的表达分析，对实验类别进行了编号，编号规则为：

s(或 t)-g(或 b)s-2 表示：砂岩板(或钢板)- 干燥(或饱和)- 砂岩颗粒直径为 2 cm

图 5 是风干砂岩球体与钢板碰撞的实验结果，图中横坐标表示碰前速度。从图中误差棒可知，法向恢复系数的相对误差随着碰前速度的增加逐渐减小，测得的相对误差在 1.2%～4.1%范围内。砂岩本身是由胶结物和碎屑颗粒构成的非均质材料，并且碰撞接触面积相对较小，其结构的非均质性必然导致测得恢复系数的离散性。该非均质性的作用在碰撞接触面积较小时，表现得更加明显。本实验通过严格控制实验条件和制样过程，将法向恢复系数相对误差控制在 5%以内，实现了较精确的测量。

实验测得的风干砂岩球体与钢板碰撞的法向恢复系数为 0.74～0.83，也就意味着在一次碰撞中有 31.1%～45.2%的动能被耗散。当颗粒尺寸较小时(图 5 中 t-gs-2 和 t-gs-3)，恢复系数随碰撞速度的

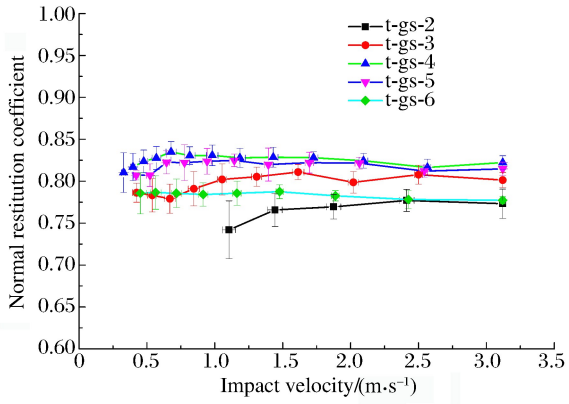

图 5　砂岩球体碰撞速度与恢复系数曲线

Fig. 5　Velocity-restitution coefficient curves

增大而增大 0.03 左右，但随着粒径的增大这种影响越来越小。当直径达到 6 cm 时，恢复系数接近定值 0.78，几乎不受碰撞速度的影响。

一般来说，对于不存在黏着力的固体颗粒，如铁球、铜球、三氧化二铝颗粒、沸石颗粒、冰球颗粒等[4,16-17]，其恢复系数一般随碰撞速度的增大而减小，或者保持不变。对于具有黏着力的颗粒，其恢复系数可能随碰撞速度的增大而增大[18]。在本文中风干砂岩球体与钢板的碰撞实验中，当砂岩球体粒径较小时，恢复系数随碰撞速度的增大而增大，类似于有黏着力颗粒的情形；当砂岩球体粒径较大时，在本文实验速度范围内，恢复系数几乎不受碰撞速度的影响，和无黏着力颗粒较一致。

M. Higa 等[19]实验研究了碰撞速度对冰球颗粒法向恢复系数的影响，将碰撞过程分为 3 种模式：无宏观裂纹扩展模式、有宏观裂纹扩展模式和劈裂破碎模式。无裂纹扩展模式仅在接触变形区内有局部的微裂纹网络形成；有裂纹扩展模式是在接触变形区周边出现宏观张拉裂纹；随着速度增大，宏观拉裂纹竖向贯通，颗粒发生劈裂破坏，形成劈裂破碎模式。冰球实验结果表明在无宏观裂纹扩展阶段，法向恢复系数几乎不随碰撞速度发生变化。图 6 为直径 5 cm 砂岩球体第 1 次碰撞后的局部损伤图，可见在球体表面碰撞接触区形成了一个明显的损伤斑块。由于碰撞时接触区域的接触应力较高，促使接触位置微裂纹萌发扩展，构成局部损伤的微裂纹网络。而接触区周围无宏观张拉裂纹，因此在本文速度范围内，砂岩球体碰撞同样属于无宏观裂纹扩展模式。并且本实验测得的砂岩球体法向恢复系数随碰撞速度变化不大，也与冰球的实验结论基本一致。

然而与冰球颗粒不同的是，砂岩球体在粒径较小时法向恢复系数随速度增大而有所增大，其主要原因在于砂岩特殊的细观结构。砂岩是由较坚硬的石英颗粒和胶结基质构成的，在细观上呈现明显的非均质，而碰撞的接触区域较小（见图 6），导致接触区应力分布发生异化，不满足经典的半球体分布[20]，使得接触面上的合力不通过球心，产生了力矩。该力矩使颗粒发生旋转，占据了一部分动能，从而使测量的恢复系数降低。砂岩球体粒径越小，速度越小，碰撞接触面积越小，则细观上的非均质影响越大，即恢复系数受碰撞速度的影响也越大。



图 6　砂岩球体碰撞局部接触（损伤）区域

Fig. 6　Damage diagram of sandstone particle

3.2　恢复系数的尺寸效应分析

对比图 5 中不同直径砂岩球体的实验结果可知，当砂岩球体粒径较小（2～4 cm）时，随着粒径的增大，相同速度下恢复系数逐渐增大，最大增幅达到 0.09；当砂岩球体粒径较大（4～6 cm）时，随着粒径的增大，相同速度下的恢复系数逐渐减小，其中当颗粒粒径从 4 cm 增大到 5 cm 时，恢复系数略有下降，当颗粒粒径从 5 cm 增至 6 cm 时，恢复系数发生明显的降低，平均降低 0.04 左右。

对于黏弹性材料，理论计算表明，颗粒粒径越大恢复系数越大[21]。而对于弹塑性材料而言，实验表明随着颗粒粒径的增大恢复系数逐渐降低[16]。而砂岩球体与钢板碰撞的恢复系数随粒径增大先增大后减小，当粒径约为 4 cm 时，恢复系数达到最大值，约为 0.83。严格来说，砂岩等岩石材料属于黏弹塑

性材料，其动力学行为宏观上同时表现出黏性滞后和塑性耗能。砂岩球体恢复系数的尺寸效应难以用一般的黏弹性接触模型和弹塑性接触模型表示[17,22-23]。

根据 Griffith 模型，砂岩这种以内部缺陷控制强度的材料，随球体粒径的减小强度逐渐增大。并且根据第 2 节中推导的公式(18)可知，速度相同时，不同直径的风干砂岩球体与钢板碰撞的最大接触应力相同。然而此时 2、3 cm 砂岩球体粒径相对较小，强度较高，接触区几乎没有形成微裂纹损伤网络，此时碰撞耗能应以黏弹性耗能为主，法向恢复系数的尺寸效应与黏弹性材料较一致，因此在 2～4 cm 范围内，随粒径的增大，法向恢复系数增大。直径为 5、6 cm 的砂岩球体强度相对较低，且碰撞接触区形成明显的微裂纹损伤网络，碰撞耗能以弹塑性损伤耗能为主，宏观上表现为塑性耗散特性，此时法向恢复系数的尺寸效应与弹塑性材料较一致，因此在 4～6 cm 范围内，随粒径的增大，法向恢复系数降低。直径 4 cm 左右的砂岩球体处于两种耗能机制的过渡位置。

3.3 含水状态对恢复系数的影响分析

砂岩是一种多孔隙介质，孔隙率较高。本文中对砂岩球体进行了风干和饱和两种含水状态的对比实验。对比两种含水状态的砂岩球体与钢板碰撞的实验结果可知，当颗粒粒径较小(2、3 cm，图 7(a)～

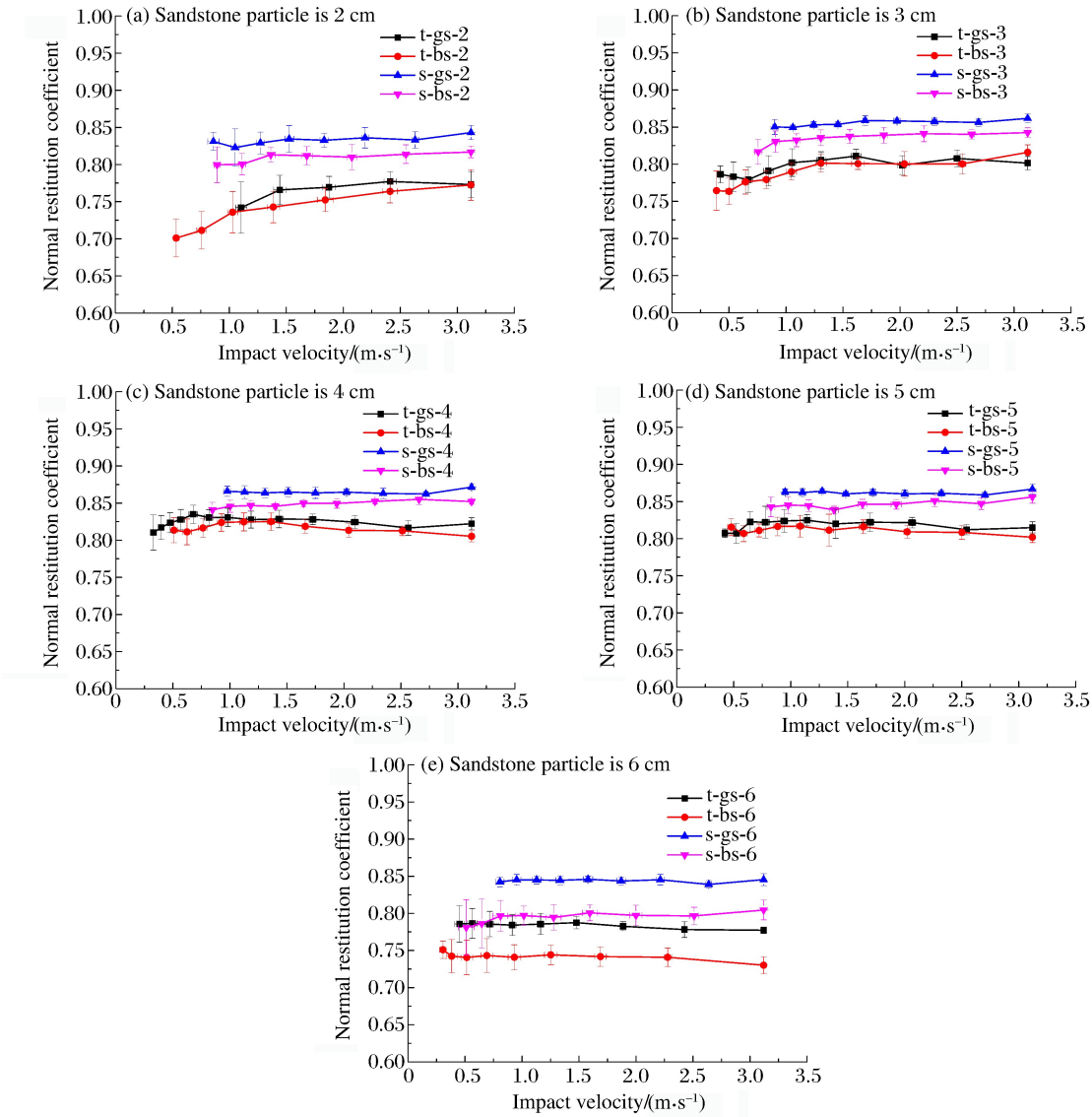

图 7 砂岩球体恢复系数速度曲线

Fig. 7 Velocity-restitution coefficient curves of sandstone particle

(b))时,饱和状态下的颗粒球板碰撞恢复系数比风干时低 0.02 左右;当颗粒粒径为 4、5 cm 时,饱和状态下的恢复系数比风干状态下略小,且几乎不受碰撞速度的影响(见图 7(c)～(d));当颗粒粒径达到 6 cm时,饱和状态下的恢复系数明显小于风干时的恢复系数,差值达到 0.05 左右,此时含水状态影响最明显,如图 7(e)所示。对比不同含水状态下砂岩球体与砂岩石板碰撞实验结果,球体直径分别为 2、3、4、5 cm 时,饱和时的恢复系数均比风干时略小,直径为 6 cm 时,饱和时的恢复系数显著低于风干时的恢复系数,差值同样为 0.05 左右,与钢板上的实验结果基本一致。

饱和颗粒在碰撞过程中由于局部接触变形区的毛细作用和液体的黏性流动形成液桥,液桥力的形成将消耗碰撞过程中的能量[18,24]。虽然在饱和砂岩球体进行实验之前,已把颗粒表面的水分拭干,但是在碰撞接触变形区,孔隙中的水受挤压溢出依然可以形成液桥。因此对于直径为 2、3、4、5 cm 的砂岩球体,液桥力的形成及孔隙水的黏滞特性增加了碰撞过程中的黏弹性耗能,使饱和条件下的恢复系数降低。然而对于直径为 6 cm 的砂岩球体,经上文恢复系数的尺寸效应分析可知,此时碰撞耗能以接触区形成的弹塑性损伤为主。此时孔隙水的存在不仅增加了黏弹性耗能,同时降低了砂岩球体的强度,促进了碰撞接触区微裂纹的形成及发展,使弹塑性损伤耗能增加,因此直径 6 cm 的砂岩球体饱和时的恢复系数显著低于风干时的恢复系数。

3.4　等效弹性模量对恢复系数的影响分析

对比图 7(a)～(e)中的实验结果可知,砂岩球体与钢板碰撞时的恢复系数明显低于砂岩球体与砂岩石板碰撞时的恢复系数(差值达 0.04～0.08),说明砂岩球体与钢板碰撞时耗能更大。实验用的钢板为 Q235 钢板,其屈服强度比砂岩的峰值抗压强度高得多,因此,碰撞过程中钢板处在弹性阶段,不会产生塑性耗能,且前文已分析,本实验用钢板的厚度较大,碰撞产生的应力波耗散的能量也可以忽略不计。根据公式(18)可知,速度相同时,等效弹性模量 E^* 越大,接触区产生的最大接触应力越大。本实验中砂岩球体与钢板碰撞的等效弹性模量 $E^*=20.6$ GPa,与砂岩石板碰撞的等效弹性模量 $E^*=11.4$ GPa。相同速度下,与钢板碰撞的最大接触应力是砂岩板的 1.6 倍。因此对于直径相同强度相同的砂岩球体,速度相同时,接触应力越大,接触区微裂纹越发育,碰撞弹塑性损伤耗能越多,从而使恢复系数降低。

4　结　论

采用自行设计的球板碰撞试验装置和声频采样技术,精确测定了砂岩球体的法向恢复系数,研究了粒径、碰撞速度、含水状态和目标板的弹性特性 4 个因素对恢复系数的影响,分析了碰撞过程中恢复系数的尺寸效应和速度效应,并对接触损伤及耗能机理进行探讨,主要结论如下:

(1)实验结果表明本文采用的制样方法和实验装置能够有效完成实验目标,并且采用的声频采样技术能够保证较高的测量精度。

(2)砂岩球体与板碰撞恢复系数表现出明显的尺寸效应,其法向恢复系数随颗粒粒径的增大先增大后减小,当颗粒粒径为 4 cm 左右时达到最大值。

(3)砂岩球体碰撞存在两种耗能机理:黏弹性耗能和弹塑性损伤耗能。经分析,由于砂岩球体粒径越小强度越大,使得粒径较小时,黏弹性耗能为主,恢复系数随粒径增大而增大;粒径较大时,弹塑性损伤耗能为主,恢复系数随粒径增大而减小。

(4)砂岩球体粒径较小时,法向恢复系数存在较明显的速度效应,但随颗粒粒径增大,碰撞速度对恢复系数的影响逐渐消失。该速度效应是由砂岩球体的细观非均质导致的。

(5)砂岩球体饱和时,碰撞形成液桥及孔隙水的黏性流动增加了黏弹性耗能,使得恢复系数低于风干时的恢复系数。并且对于粒径 6 cm 的砂岩球体,孔隙水同时降低了球体强度,促进了弹塑性损伤耗能,使得恢复系数显著低于风干时的恢复系数。

(6)相同速度和粒径条件下,砂岩球体与钢板碰撞时的法向恢复系数明显小于砂岩球体与砂岩石板碰撞时的恢复系数。经分析,这是由于等效弹性模量不同造成的。

参考文献:

[1] Macciotta R, Martin C D, Cruden D M. Probabilistic estimation of rockfall height and kinetic energy based on a three-dimensional trajectory model and Monte Carlo simulation[J]. Landslides, 2015,12(4):1-16.

[2] Lu Y E, Zhang L M. Analysis of failure of a bridge foundation under rock impact[J]. Acta Geotechnica, 2012,7(1):57-68.

[3] Chai B, Tang Z, Zhang A, et al. An uncertainty method for probabilistic analysis of buildings impacted by rockfall in a limestone quarry in Fengshan, Southwestern China[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2015,48(5):1981-1996.

[4] Antonyuk S, Heinrich S, Tomas J, et al. Energy absorption during compression and impact of dry elastic-plastic spherical granules[J]. Granular Matter, 2010,12(1):15-47.

[5] 章广成,向欣,唐辉明. 落石碰撞恢复系数的现场试验与数值计算[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(6):1266-1273.
Zhang Guangcheng, Xiang Xin, Tang Huiming. Field test and numerical calculation of restitution coefficient of rockfall collision[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,30(6):1266-1273.

[6] Dong H K, Gratchev I, Berends J, et al. Calibration of restitution coefficients using rockfall simulations based on 3D photogrammetry model: a case study[J]. Natural Hazards, 2015,78(3):1-16.

[7] 叶四桥,巩尚卿. 落石碰撞法向恢复系数的模型试验研究[J]. 中国铁道科学,2015,36(4):13-19.
Ye Siqiao, Gong Shangqing. Research on normal restitution coefficient of rockfall collision by model tests[J]. China Railway Science, 2015,36(4):13-19.

[8] Asteriou P, Saroglou H, Tsiambaos G. Geotechnical and kinematic parameters affecting the coefficients of restitution for rock fall analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2012,54(3):103-113.

[9] Ritchie A M. Evaluation of rockfall and its control[J]. Highway Research Record, 1963,17:13-28.

[10] Gigli G, Morelli S, Fornera S, et al. Terrestrial laser scanner and geomechanical surveys for the rapid evaluation of rock fall susceptibility scenarios[J]. Landslides, 2014,11(1):1-14.

[11] Harp E L, Dart R L, Reichenbach P. Rock fall simulation at timpanogos cave national monument, American Fork Canyon, Utah, USA[J]. Landslides, 2011,8(3):373-379.

[12] Wang X, Frattini P, Crosta G B, et al. Uncertainty assessment in quantitative rockfall risk assessment[J]. Landslides, 2014,11(4):711-722.

[13] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Géotechnique, 1979,29(1):331-336.

[14] 何思明,吴永,李新坡. 滚石冲击碰撞恢复系数研究[J]. 岩土力学,2009,30(3):623-627.
He Siming, Wu Yong, Li Xinpo. Research on restitution coefficient of rock fall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(3):623-627.

[15] Landau L D, Lifschitz E M. Theoretische physik. Band VII: Elastizitä tstheorie[M]. Moskau: Fizmatlit Press, 2001.

[16] Alizadeh E, Bertrand F, Chaouki J. Development of a granular normal contact force model based on a non-Newtonian liquid filled dashpot[J]. Powder Technology, 2013,237(3):202-212.

[17] Brilliantov N V, Spahn F, Hertzsch J M, et al. Model for collisions in granular gases[J]. Physical Review E, 1996,53(5):5382-5392.

[18] Fu J, Adams M J, Reynolds G K, et al. Impact deformation and rebound of wet granules[J]. Powder Technology, 2004,140(3):248-257.

[19] Higa M, Arakawa M, Maeno N. Size dependence of restitution coefficients of ice in relation to collision strength [J]. Icarus, 1998,133(2):310-320.

[20] Johnson K L. 接触力学[M]. 徐秉业,罗学富,刘信声,等译. 北京:高等教育出版社,1992.

[21] Dmytro A, Elliott J A, Hancock B C. Effect of particle size on energy dissipation in viscoelastic granular collisions [J]. Physical Review E, 2011,84(2):1713-1724.

[22] Wu C Y, Li L Y, Thornton C. Rebound behaviour of spheres for plastic impacts[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,28(9):929-946.

[23] Thornton C. Coefficient of restitution for collinear collisions of elastic-perfectly plastic spheres[J]. Journal of Applied Mechanics, 1997,64(2):383-386.

[24] Fu J S, Cheong Y S, Reynolds G K, et al. An experimental study of the variability in the properties and quality of wet granules[J]. Powder Technology, 2004,140(3):209-216.

Normal restitution coefficient of sandstone spheres

Ye Yang, Zeng Yawu, Jin Lei, Xia Lei

(*School of Civil Engineering*, *Wuhan University*, *Wuhan* 430072, *Hubei*, *China*)

Abstract: The normal restitution coefficient (NRC) is a key parameter that determines the trajectory of the stone during a rockfall. In this study, using a test equipment and a sound-sampling technique developed by ourselves, we first measured the NRC of sandstone spheres and analyzed its influencing factors, i. e. the particle size, the impact velocity, the hydrous state and the elastic properties of the plate, and then we examined the size effect, the rate effect and the energy dissipation mechanism of the NRC. The results show that the NRC of sandstone spheres has a complex size effect which, with the increase of the size of sandstone spheres, at first increases and then decreases. The analysis shows that there exists two energy dissipation mechanisms, i. e. the viscoelastic dissipation and the elastoplastic damage dissipation, interacting with each other, which result in the complex size effect; that, due to the heterogeneity of sandstones, the velocity effect of the NRC is obvious when the diameter of the sandstone particle is small, while this effect is unobservable when the diameter is over 5 cm; that, compared with the NRC of air-drying sandstones, the saturation can cause the viscoelastic dissipation and elastoplastic damage dissipation to increase; and that the equivalent elastic modulus has a great impact on the NRC, i. e. the greater the equivalent elastic modulus, the smaller the NRC.

Keywords: sandstone spheres; normal restitution coefficient; size effect; velocity effect

(责任编辑　曾月蓉)