钢与钢摩擦时正压力与声发射参数关系研究

高 宏，张守茁，席 镇，魏盛春，贾 园
(内蒙古工业大学材料学院，呼和浩特 010051)

摘要：为了提高声发射技术在监测动态摩擦过程中的应用水平，研究摩擦过程中的受力状态与声发射特征参数之间的关系是必要的。论文研究了 45 钢与 45 钢摩擦时产生的声发射信号的特点，实验研究结果表明：在 45 钢与 45 钢的摩擦过程中，相对运动速度对于正压力与声发射信号之间的关系有较大的影响；低速时，正压力与声发射信号之间无规律可言；随着速度的提高，正压力与声发射信号之间的规律变得清晰起来；高速时，随着正压力的增加声发射信号各参数是降低的。论文对出现这一规律的原因进行了解释。

关键词：钢与钢摩擦；声发射信号；正压力；相对运动速度；关系
中图分类号：TB556 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2009)-06-0714-05
DOI 编码：10.3969/j.issn1000-3630.2009.06.007

Study of the relationship between pressure and acoustic emission parameters due to steel-steel surface rubbing

GAO Hong, ZHANG Shou-zhuo, XI Zhen, WEI Sheng-chun, JIA Yuan
(*School of Material science & Engineering, Inner Mongolia University of technology, Hohhot*, 010051, *China*)

Abstract: It is necessary to study the relationship between acoustic emission parameters and pressure during the process of dynamic friction for improving the application of the acoustic emission technology to monitoring the dynamic friction. This paper studies the characteristics of acoustic emission produced during the process of dynamic friction between the 45 steel and the 45 steel. The result indicate that relative movement speed has a great effect on the relationship between pressure and acoustic emission signal as follows: (1) No regulation is found out when it is in low speed. (2) Some regulations become clear with speed accelerated. (3) The parameter value of acoustic emission is declining with the strengthening of the pressure. At last, some analyses are given to explain the result of this study.

Key words: the dynamic friction between 45steel and 45 steel; the signal of AE; press; the relative movement speed; relationship

1 引 言

随着汽车工业的发展和世界能源的紧缺，汽车工业对高强度钢和轻合金越来越感兴趣，高强度钢是首选材料之一[1]。无论是汽车壳体的成形，还是轴与轴承都不可避免地产生摩擦，摩擦造成损失是巨大的，所以研究钢和钢之间的摩擦是非常必要的。声发射技术对于研究摩擦过程是一个很有用的工具[2]。它可以全程实时监测摩擦的全部过程，及时发现问题、做出处理，并且可以确定出现问题的位置[3,4]。但是声发射技术也有许多缺点，首先引起声发射源的原因很多，其次影响声发射信号的因素也很多[5-7]。摩擦过程中声发射信号很多，看起来似乎杂乱无章。只有从众多的杂乱无章的声发射信号中将有用的信号提取出来，将其放大，并找出其中的规律，才能提高声发射的应用水平。为此应用声发射技术研究不同压力下钢与钢之间的摩擦。

2 实验过程

2.1 实验原理

实验原理图如图 1 所示。钢丝绳通过滑轮将滑动块与电子拉伸试验机连在一起，电子拉伸试验机匀速拉动滑动块，并由计算机记录拉力。滑动块的自重提供正压力。为了改变正压力，在滑动块上加不同的砝码，计算机记录的拉力即是摩擦力。滑动块在底板上匀速运动，产生的摩擦振动信号通过固定在滑动块上的声发射传感器接收，并传给声发射仪，由计算机记录。

收稿日期: 2008-11-03; **修回日期**: 2009-02-28
基金项目: 国家自然科学基金项目(50565002)
作者简介: 高宏(1984-)，男，内蒙古乌兰察布市人，硕士研究生，研究方向为声发射技术在金属塑性成形中的应用研究。
通讯作者: 高宏, E-mail: qingfeng1984@yahoo.com.cn

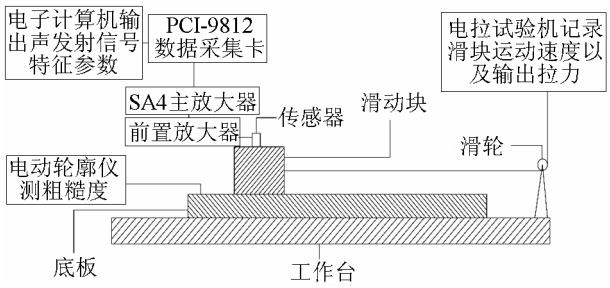

图 1　实验原理框图
Fig.1　Experimental layout

2.2　实验材料与试件

如图 1 所示，滑动块所用材料与底板所用材料均为 45 钢。

底板尺寸为(长×宽×高)：748×195×14(mm)^3；滑块尺寸为：167×147×34(mm)^3，重量为 7.5kg。

底板与滑块的接触面经过磨削加工，整个表面的粗糙度基本达到一致。

经电动轮廓仪测量，底板表面粗糙度为 0.5~0.9μm，滑块粗糙度为 0.1~0.3μm。

2.3　设备、仪器以及参数设置

(1) 由深圳新三思材料检测有限公司生产的微机控制电子万能(拉力)试验机提供动力，该电子万能拉力试验机最大试验力为 5kN，功率为 0.4kW，精度等级为一级。

(2) 声发射检测仪采用北京声华兴业科技有限公司生产的 SWAES 数字化全波形声发射检测仪。其中各个部件型号以及尺寸如下：

数据采集卡为 ADLINK 公司的 PCI-9812 卡，最高采样速度为 20MHz；采样精度为 12 位，量程误差±1.5%(25℃)。

传感器为 SR50A 系列谐振式传感器，频率范围：22~260kHz；谐振频率：50kHz；灵敏度峰值：>–65dB。

前置放大器为 PAI 型；带宽 10kHz~2MHz；增益 40dB±1dB；噪音<20μV；动态范围>80dB；不失真最大输出 Vpp>13V。

SA4 主放大器，宽带频率范围：2~1000kHz；带通滤波频率范围：100~400kHz；低通滤波频率范围：2~100kHz；高通滤波频率范围：400~1000kHz；动态范围＞105dB。

本次实验只选用一个通道采集信号，主放的门限电压设为 237mV，放大倍数为 1 倍，同时选择高通滤波。单次采样时间为 4000μs，触发门限为 40dB，前放增益为 40dB，主放增益 0dB。

(3) 粗糙度测量采用哈尔滨量具刃具厂生产的 25-1000106 型号电动轮廓仪。量程为 1μm，采样长度选择 0.8mm。

3　实验结果与分析

图 2 是相对运动速度为 100mm/min 时不同正压力下的 45 钢与 45 钢摩擦声发射振铃计数率曲线。每个压力的摩擦实验都重复三次，这样就连成如图 2 所示的每一条曲线。图中各点是每一次摩擦过程中产生的声发射振铃计数的平均值。因此，图中曲线是正压力分别为 24.1kg、17.6kg 和 7.5kg 的振铃计数平均值曲线。从图 2 可以看出，7.5kg 折线在上，17.6kg 折线居中，24.1kg 折线在下。有随着正压力的增加声发射振铃计数降低的趋势，但是这一规律不是太明显。

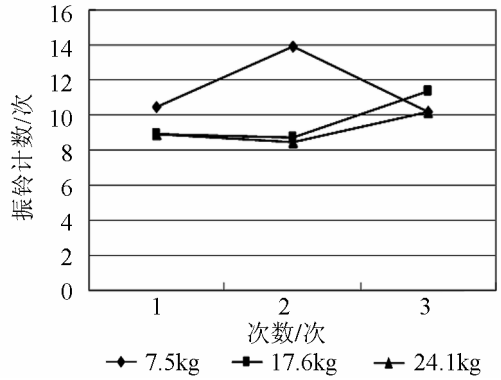

图 2　45 钢 100mm/min 不同压力下的声发射振铃计数
Fig.2　AE count rate of different pressure at 100mm/min of relative movement between 45 steel and 45 steel

图 3 是相对运动速度为 300mm/min 时不同正压力下的 45 钢与 45 钢摩擦声发射振铃计数率曲线。同图 2 相似，每个压力的摩擦实验都重复三次，这样也就连成如图所示的每一条曲线。其中每一点都是每一次摩擦过程中产生的声发射振铃计数的平均值。图 3 中，7.5kg 折线在上，17.6kg 折线居中，21.4kg 折线在下。基本上可以说明随着正压力的增

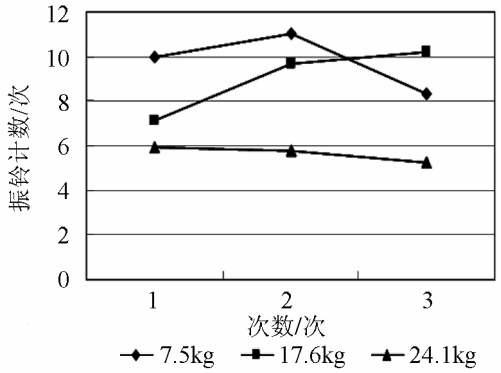

图 3　45 钢 300mm/min 不同压力下的声发射振铃计数
Fig.3　AE count rate of different pressure at 300mm/min of relative movement between 45 steel and 45 steel

加，声发射振铃计数是降低的。

图 4 是相对运动速度为 500mm/min 时不同正压力下的 45 钢与 45 钢摩擦声发射振铃计数率曲线。图中曲线分别是正压力为 7.5kg、17.6kg、24.1kg 声发射振铃计数率曲线。从图 4 可以看到，7.5kg 折线在上，17.6kg 折线居中，24.1kg 折线在下。此图上的曲线完全可以说明随着正压力的增加，声发射振铃计数是降低的。

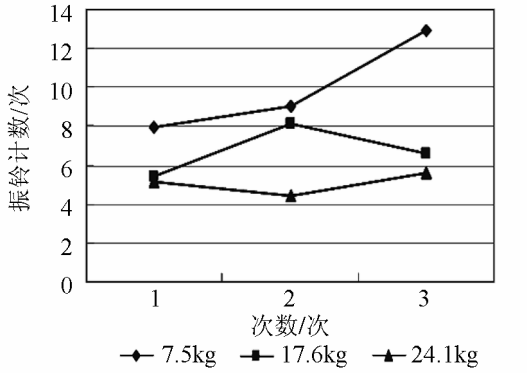

图 4 45 钢 500mm/min 不同压力下的声发射振铃计数

Fig.4 AE count rate of different pressure at 500mm/min of relative movement between 45 steel and 45 steel

将图 2、图 3、图 4 进行比较。在图 2 中：17.6kg 折线居中，与 24.1kg 折线非常接近，且与 7.5kg 折线相交，正压力与声发射信号之间的规律不明显。在图 3 中：7.5kg 折线在上，17.6kg 折线居中，24.1kg 折线在下，但是 7.5kg 折线与 17.6kg 折线相交，正压力与声发射振铃计数率之间的规律还不太明显。在图 4 中：7.5kg 折线在上，17.6kg 折线居中，24.1kg 折线在下，且三条曲线之间无交点，正压力与声发射振铃计数率之间的规律很明显。通过图 2、图 3、图 4 的比较，可以看出，这种规律是随着相对运动速度的增加变得清晰起来的。

图 5 是相对运动速度为 100mm/min 时不同正压力下的 45 钢与 45 钢摩擦声发射能量曲线。图 6 是相对运动速度为 300mm/min 时不同正压力下的 45 钢与 45 钢摩擦声发射能量曲线。图 7 是相对运动速度为 500mm/min 时不同正压力下的 45 钢与 45 钢摩擦声发射能量曲线。从图 7 中可以明显看出，7.5kg 折线在上，17.6kg 折线居中，24.1kg 折线在下，正压力与声发射能量之间存在随着正压力的增加声发射能量是降低的规律。

同样对图 5、图 6、图 7 进行比较，在图 5 中：24.1kg 折线居中，17.6kg 折线在下，7.5kg 折线在上；正压力与声发射能量之间无规律可言。在图 6 中：7.5kg 折线在上，17.6kg 折线居中，24.1kg 折线在下；正压力与声发射能量之间基本上是有规律

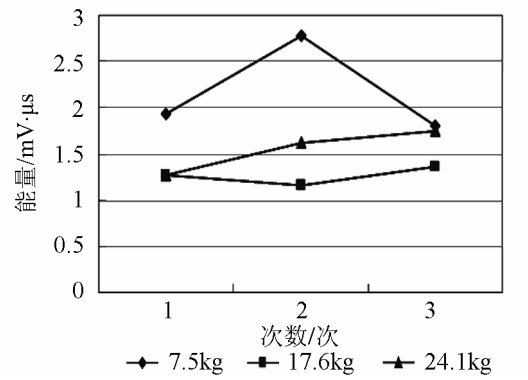

图 5 45 钢 100mm/min 不同压力下的声发射能量

Fig.5 AE energy of different pressure at 100mm/min of relative movement between 45 steel and 45steel

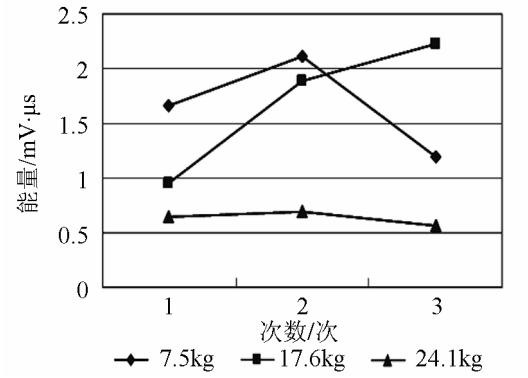

图 6 45 钢 300mm/min 不同压力下的声发射能量

Fig.6 AE energy of different pressure at 300mm/min of relative movement between 45 steel and 45 steel

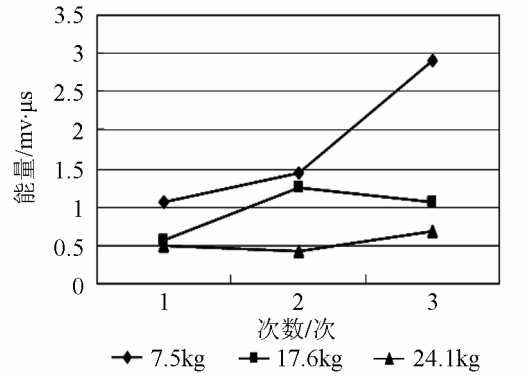

图 7 45 钢 500mm/min 不同压力下的声发射能量

Fig.7 AE energy of different pressure at 500mm/min of relative movement between 45 steel and 45 steel

的，但是有瑕疵，17.6kg 折线和 7.5kg 折线之间有交点。在图 7 中：7.5kg 折线在上，17.6kg 折线居中，24.1kg 折线在下；三条曲线是完全分离的，且三条曲线之间有一定距离，完全符合随着正压力的增加声发射能量是降低的这一规律。通过对图 5、图 6、图 7 的比较，可以看出，正压力与声发射信号之间的规律是随着相对运动速度的增加逐渐变得清晰起来的。

图 8 是相对运动速度为 100mm/min 时不同正压力下的 45 钢与 45 钢摩擦声发射幅度曲线。图 9 是

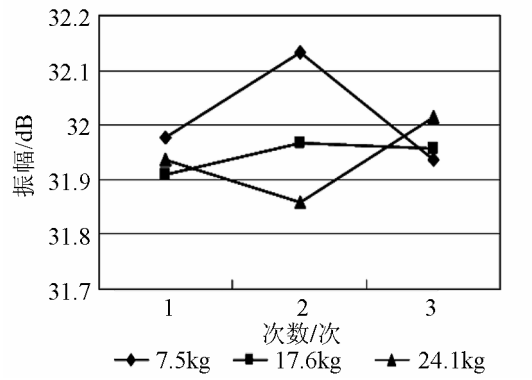

图 8　45 钢 100mm/min 不同压力下的声发射振幅

Fig.8　AE amplitude of different pressure at 3.937in/min of relative movement between 45 and 45 steel

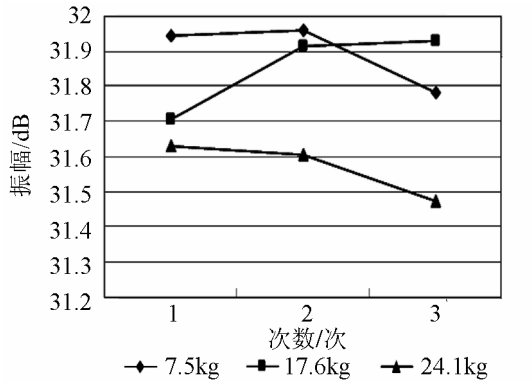

图 9　45 钢 300mm/min 不同压力下的声发射振幅

Fig.9　AE amplitude of different pressure at 300mm/min of relative movement between 45 steel and 45 steel

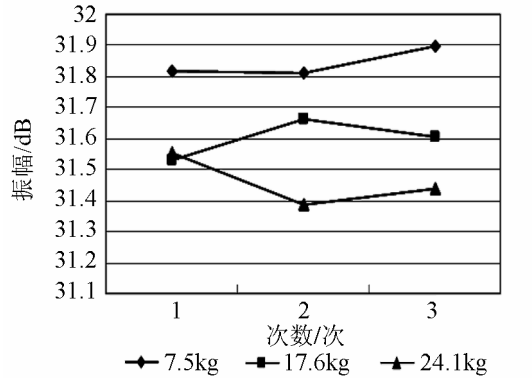

图 10　45 钢 500mm/min 不同压力下的声发射振幅

Fig.10　AE amplitude of different pressure at 500mm/min of relative movement between 45 steel and 45steel

相对运动速度为 300mm/min 时不同正压力下的 45 钢与 45 钢摩擦声发射幅度曲线。图 10 是相对运动速度为 500mm/min 时不同正压力下的 45 钢与 45 钢摩擦声发射幅度曲线。从图 10 中可以明显看出：7.5kg 折线在上，17.6kg 折线居中，24.1kg 折线在下。由此可见，正压力与声发射幅度之间存在规律：随着正压力的增加，声发射幅度是降低的。同样比较图 8、图 9、图 10 可以看出，随着相对运动速度的增加，正压力与声发射信号之间的规律变得清晰起来。

得出这些结论的前提条件是表面粗糙度在已定的范围，也即底板表面粗糙度为 0.5~0.8μm，滑块粗糙度为 0.2~0.3μm。至于粗糙度对于不同压力下摩擦的声发射信号的影响正在研究中，具体内容会在后续文章中解释、说明。对于这些现象，究其原因有以下几点：

(1) 这与上下表面的硬度差有关[8]，由于 45 钢与 45 钢的硬度相同，因而摩擦表面是弹性固定的，所以两摩擦表面上有凸峰都不能深深地插入对方的机体，只能是上表面的凸峰镶入下表面的凹坑，或者，下表面的凸峰镶入上表面的凹坑，也可能是上下表面的凸峰被压焊在一起。随着相对运动速度的增加，上下表面凸峰和凹谷相互镶入的机会越少。高速下，压力越大，上下表面被抬起、落下的几率越少，上下表面之间的相对运动越加平稳，凸峰与凸峰、凸峰与凹谷之间的撞击次数减少，撞击产生的能量减少，声发射信号各参数值随之减少。

(2) 摩擦过程中的跃动现象的影响[9,10]。干摩擦运动并非连续平稳的滑动，而是一物体相对另一物体断续的滑动。尤其是随着速度的增加跃动现象变得相当明显。在速度较低的情况下(100mm/min)跃动现象并不是很明显，所以随着正压力增加，声发射信号各特征参数并不是很有规律。但是速度增加较大速度时候(500mm/min)，此时跃动现象变得十分明显。随着载荷增加干摩擦运行更加平稳，上下表面在运行过程中互相撞击机会变少，声发射信号衰弱很多，各声发射参数值也就小很多。

4　结 论

当底板表面粗糙度为 0.5~0.8μm，滑块粗糙度为 0.2~0.3μm 的时候，干摩擦过程产生的声发射信号可以得到如下规律：

(1) 对于 45 钢与 45 钢之间的摩擦，相对运动速度的影响很大；低速时，声发射和正压力之间无规律可言；随着相对运动速度变大，声发射各参数与正压力之间的规律逐渐变得清晰起来。

(2) 当相对运动速度达到一定值时，声发射和正压力之间出现明显的规律，声发射各参数值随着正压力增加而降低。

(3) 45 钢与 45 钢摩擦时声发射各参数值随着正压力增加而降低的原因与钢与钢的硬度和强度等有一定的联系。

参　考　文　献

[1]　Skåre T, Krantz F. Wear and frictional behavior of high strength

steel in stamping sonitored by acoustic emission technique[J]. Wear (S0043-1648), 2003, (255): 1471-1479.

[2] JUN Suna. Wear monitoring of bearing steel using electrostatic and acoustic Emission techniques[J]. Wear (S0043-1648), 2005, (259): 1482-1489.

[3] 刘贵杰, 巩亚东, 王宛山. 基于摩擦声发射信号的磨削表面粗糙度在线检测方法研究[J]. 摩擦学学报, 2003, **23**(3): 236-239.
LIU Guijie, GONG Yadong, WANG Wanshan. On-line measuring of ground surface roughness based on friction-induced acoustic emission[J]. Tribology, 2003, **23**(3): 236-239.

[4] 刘贵杰, 赵雷, 梅宁. 磨削粗糙度在线检测方法的实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, **28**(1): 168-171.
LIU Guijie, ZHAO Lei, MEI Ning. Experimental study on on-line detecting method of grinding roughness[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, **28**(1): 168-171.

[5] THOMAS Skare. Monitoring of friction processes by the means of acoustic emission measurements-deep drawing of sheet metal[J]. Journal of Materials Processing Technology (S0924-0136), 1998, (80): 263-272.

[6] Hao S. Acoustic emission monitoring of sheet metal forming: characterization of the transducer, the work material and the process[J]. Journal of Materials Processing Technology (S0924-0136), 2000, (101): 124-136.

[7] Douglas R M. A study of the tribological behavior of piston ring/cylinder liner interaction in diesel engines using acoustic emission[J]. Tribology International (S0301-679X). 2006, (39): 1634-1642.

[8] 张守茁, 席镇, 贾园, 高宏. 摩擦过程中相对速度对声发射能量信号的影响[J]. 润滑与密封, 2008, **33**(5): 11-14.
ZHANG Shouzhuo, XI Zhen, JIA Yuan, GAO Hong. The influence of relative movement speed to the amplitude signal of the acoustic emission in the friction[J]. Lubrication Engineering, 2008, **33**(5): 11-14.

[9] 石建武, 赵松龄. 球磨机衬板的磨损机制与低噪声设计[J]. 声学技术, 1996, **15**(1): 35.
SHI Jianwu, ZHAO Songling. The wear mechanism of ball grinder's lining board and low noise design[J]. Technical Acoustics, 1996, **15**(1): 35.

[10] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002, 202-272.
WEN Shizhu, HUANG Ping. Tribology Fundamentals[M]. Beijing: The University of Tsinghua Press, 2002. 202-272.