

# 用自动冲击机研究 300M 钢韧脆转变

北京航空航天大学 唐振廷 温旭君

北京航空航天大学研制的自动冲击机,可以重演试样冲击破坏过程,绘制、显示及打印冲击力-时间、力-位移及能量-时间曲线。利用该设备对 300M 钢冲击功进行分解,自动快速地分析出材料受冲击后的屈服载荷、最大载荷、最大载荷之前消耗的冲击能量  $E_i$  (裂纹形成功) 及最大载荷后消耗的冲击能量  $E_p$  (裂纹扩展功),以此绘制出  $E_i$  和  $E_p$  随试验温度变化的曲线,研究 300M 钢韧脆转变过程,确定转变温度。与常用的韧脆转变判据相比较,用  $E_p$  或  $E_i$  作为韧脆转变判据,不仅方法简单、而且使韧脆转变温度的物理意义明确。

## 引言

近年来,高速冲击条件下的金属材料动态性能研究,在国际上广泛得到重视,许多国际会议都在探讨这一领域的最新进展及急待解决的问题。这是因为不论是航空、航天、核能及兵器,还是汽车和造船等工业,都涉及到高速冲击条件下材料的受力和变形的测量问题。例如,高速高载荷下的材料破坏、疲劳断裂以及材料的低温快速断裂等问题,都取决于材料动态性能的深入研究和解决,而动态性能研究的核心是测定材料在高速加载下的作用力和变形。目前,我国材料动态性能研究远不能适应这种发展需要,缺少先进的实验设备及测试手段<sup>[1,2]</sup>。为了开展这方面研究,北京航空航天大学研制出一台高速数据采集及数据处理装置,与冲击机相配合,改装成一台自动冲击试验机。它能够模拟真实情况,求出许多材料冲击性能,这些材料包括:金属材料、纤维材料、复合材料及陶瓷材料。与过去机械式冲击试验机相比,它不仅能够重演冲击试验过程——从落锤与试样接触至断裂的冲击全过程,而且能够自动地快速分析出材料的屈服载荷  $P_y$ 、最大载荷  $P_{max}$ 、最大载荷以前的冲击能量  $E_i$  (裂纹形成功)、最大载荷之后的冲击能量  $E_p$  (裂纹扩展功),同时还能显示、绘制及打印出力-时间、力-位移、位移-时间 & 能量-时间曲线。该机的核心部分是一台与冲击试验机相连接的高速数据采集和处理机,它从一个装在摆锤上的力传感器及位移传感器得到所需的输

出信号,然后进行放大, A/D 转换及数据存储,再经数据处理获得实验结果及实验曲线。

由于高速数据采集及数据处理装置的应用,使摆锤式冲击机的应用扩大了,它不仅弥补了过去冲击韧性和冲击功在分析材料韧脆性方面的不足,而且因为它能重演冲击过程,研究冲击力和变形随时间的变化,因此,还可以应用这套设备进行材料的动态断裂韧性研究。

本文应用该设备,进行了 300M 钢韧脆转变的测定,提出了利用裂纹扩展功或者裂纹形成功做为材料韧脆转变判据更为合理的观点。

## 试验条件及数据平滑<sup>[3]</sup>

试验材料选用 300M 钢,其化学成分见表 1。

表 1 300M 钢的化学成分

元素	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	S	P
含量, wt%	0.415	0.74	1.62	0.89	1.82	0.39	0.085	0.002	0.01

采用梅氏冲击试样,热处理规范为:

淬火:  $870 \pm 10^\circ\text{C}$ , 保温 1h、油冷。

回火:  $300 \pm 5^\circ\text{C}$ , 硝盐槽内保温 2h, 空冷、回火两次。

数据采集及数据处理硬件系统见图 1。

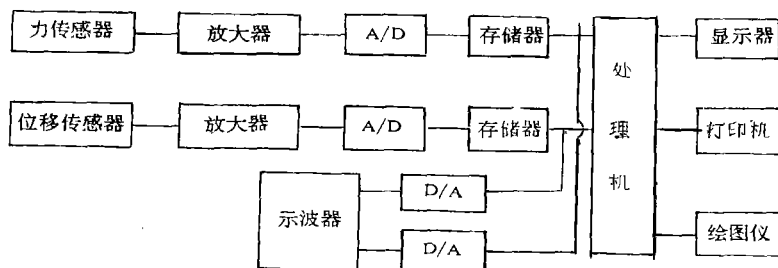


图 1 冲击试验数据采集及处理硬件系统

力和位移传感器分别安装在冲击机的锤头和摆臂上,载荷信号及位移信号放大器的频率特性要在 100kHz 以上。试验证明,该频率特性对试验是足够的。

载荷和位移(挠度)A/D 转换器的采样速度为  $2\mu\text{s}$  采集一点(可在  $2\mu\text{s}$  到 1s 之间任意选取)。载荷和位移每道存储器的容量为 64K,每道又分有 8 个页面,每个页面可以存 8K 数字,因此该存储器可以连续存储 8 个试样的数据。

由于摆锤冲击试验时, 会伴随着产生冲击信号的振荡, 波形为锯齿形 (见图 2), 这种锯齿波可以通过模拟滤波器使其减弱。本文采用移动平均值方法 (或称为数字平滑方法), 这种方法是求试样的  $n$  个载荷平均值, 并且通过所有数值的逐次轮换来完成该过程。对于取值  $X_n$ , 移动平均值  $Y_n$ , 有如下关系:

$$Y_n = \frac{1}{m} \sum_{i=n}^{n+m-1} X_k$$

式中:  $m$  为取样数目。

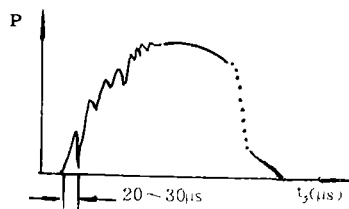


图 2 载荷振荡锯齿波

该仪器采样频率为  $f_s = 500 \text{ kHz}$  ( $2 \mu\text{s}$ ), 如果取样值被认为是一个连续函数, 那么这种方法可以作为低通数字滤波器, 其临界频率  $f_c$  用下式表示:

$$f_c = 0.443 f_s / m$$

若取  $m = 7$ ,  $f_c = 31.6 \text{ kHz}$ , 大的振荡被衰减, 结果如

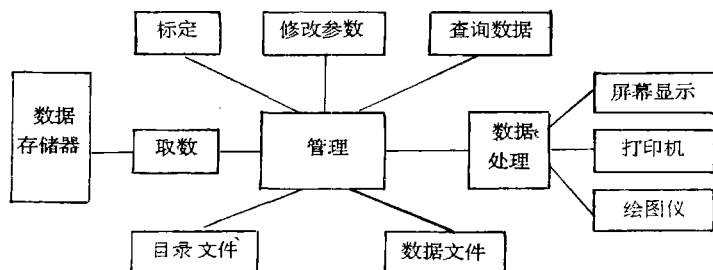


图 4 数据流程图

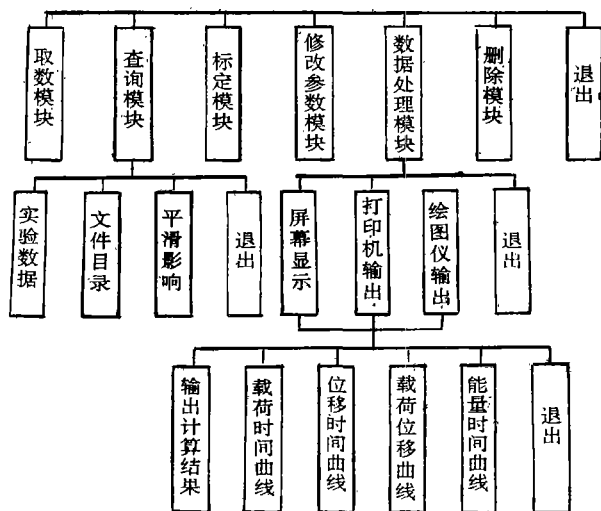


图 5 自动冲击机和系统分析软件框图

图 3a 所示。不管摆动是否被清除, 数据均被校对; 如果摆动被完全消除, 这个数据应存储起来。

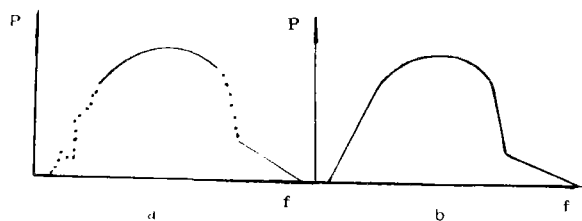


图 3 平滑曲线

当振荡仍存在时, 进一步用移动平均值法取  $m = 5$  ( $f_c = 44.3 \text{ kHz}$ )。假如平滑后还有振荡, 可取  $m = 3$  ( $f_c = 73.8 \text{ kHz}$ )。这个过程可重复多次, 直到振荡被消除, 最后将光滑曲线存储起来, 如图 3b 所示。由于移动平均值方法是在采集数值的基础上进行的, 因此所得到的相应数据与实际值非常接近。用光滑的数据曲线确定最大载荷  $P_m$  和屈服载荷  $P_y$ 。

## 系统软件框图及特征值的计算方法

根据软件设计要求, 首先绘制系统的数据流程图 (见图 4)。

软件设计采用 C 语言、模块化结构, 它具有很好的可读性及维护性, 便于修改和增补, 具有较高的实用价值。图 5 为自动冲击机系统分析软件框图。

为了准确求出计算结果, 有如下几个问题需要软件解决:

### 1. 吻合点的计算

试样安装在支座上, 有时接触不紧密, 支座平面与试验表面之间有间隙。在摆锤与试样的接触瞬间,

会产生振荡, 该振荡的存在会影响屈服载荷  $P_y$  的准确测定, 因此应该加以清除。

吻合点即计算冲击力或冲击功的起始点。

吻合点求法: 从计数的第一点起每隔 5 点求第一点与第五点连线的斜率 (在载荷-时间曲线上), 如图 6 所示。在振荡小峰上升阶段, 斜率  $> 0$ 。其下降沿斜率  $< 0$ ,

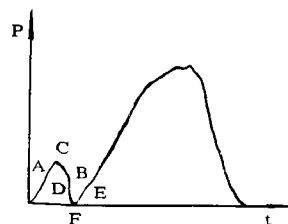


图 6 吻合点的求法示意图

如图 6 中 A 点的斜率  $>0$ , B 点斜率  $<0$ 。把 A、B 两点之间的 C 点定出后,再以 C 点为起点,同理可求出波谷点 F, F 点就是所要求的试样吻合点。

2. 屈服载荷的计算

金属材料在冲击载荷作用下,仍然表现为过量的弹性变形、塑性变形和断裂。弹性变形以声速在介质中传播。在金属中声速是相当大的,在钢中为 4982m/s。因此,可以把金属材料从弹性变形向塑性变形转变时的载荷定义为屈服载荷。参考金属拉伸试验的测试方法,取载荷-时间(或者载荷-位移)曲线起始上升段,载荷与时间轴夹角  $\alpha$  的正切值的绝对值增加 50% 时相对应的载荷为屈服载荷  $P_y$ , 即:  $|(tg\alpha_1 - tg\alpha) / tg\alpha| = 50\%$ 。如图 7 所示。

最大载荷  $P_m$  的计算方法比较简单,从第一点采集点到倒数第二点,逐点寻求曲线最大值。

3. 失稳点  $P_f$

失稳点是导致裂纹失稳扩展时的相应载荷  $P_f$ 。

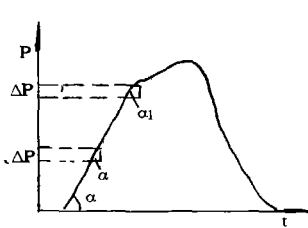


图 7 屈服载荷求法示意图

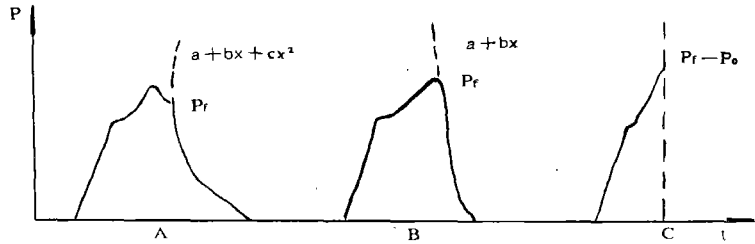


图 8  $P_f$  (失稳点) 的求法示意图

4. 分解冲击功  $A_k$

根据  $P_y$ 、 $P_m$  及  $P_f$  可以把冲击功  $A_k$  分解成弹性变形功  $E_e$ 、弹塑性变形功  $E_d$ 、裂纹稳定扩展功  $E_t$  和裂纹迅速扩展功  $E_{ts}$ 。如果以最大载荷为分界点,则裂纹在  $P_m$  之前形成:

$E_t = E_e + E_d$

$E_t$ : 裂纹形成功,  $P_m$  之后为裂纹扩展功;

$E_p = E_t + E_{ts}$

$E_p$ : 裂纹扩展功

载荷  $P$ -位移  $f$  (挠度) 曲线与分解冲击功示意图如图 9 所示。

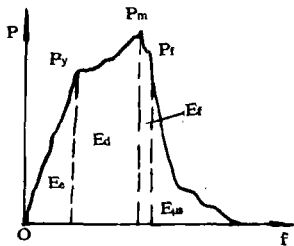


图 9  $P-f$  曲线与分解冲击功示意图

在最大载荷之后,裂纹开始扩展,扩展过程可分为稳定扩展和迅速扩展。根据材料的韧脆不同,可用 3 个函数拟合试验曲线最大载荷-时间曲线下降沿部分, 即:

$$Y = \begin{cases} a + bx + cx^2 & \dots\dots A: \text{抛物线} \\ a + bx & \dots\dots B: \text{直线} \\ a & \dots\dots C: \text{常数} \end{cases}$$

载荷-时间曲线下降沿与拟合方程曲线的开始分离点,即为失稳点  $P_f$ 。拟合曲线的取值范围为最大载荷下降沿的 30%~100%  $P_m$  之间各点。

由于载荷-时间曲线的形状不同,拟合曲线的适用方程也不同,程序设计采用抛物线方程拟合,如算出的  $X^2$  系数  $C$  趋于 0,则换用方程  $Y=a+bX$ ; 假若算出的拟合起点与拟合终点数值相等,则用方程  $Y=a$ ,求  $P_f$  过程见图 8。

试验结果

根据上面分析,本文把 300M 钢不同试验温度测出的冲击功  $A_k$  分解成裂纹形成功  $E_t$  和裂纹扩展功  $E_p$ ,并按照常规方法把  $A_k$  换算成  $a_k$ ,测出的数据列于表 2。并根据这些数据绘出 300M 钢的能量温度曲线(见图 10)。

表 2 300 钢系列冲击试验结果

数据 温度	项目	$A_k$ (J)	$a_k$ (J/cm <sup>2</sup> )	$E_t$ (J)	$E_p$ (J)
-196℃		20.50	25.63	14.91	5.59
-140℃		38.93	48.66	32.76	6.18
-100℃		47.96	59.95	39.03	8.92
-60℃		48.64	60.80	38.17	11.47
20℃		56.88	71.10	38.93	17.95
100℃		59.53	74.04	36.28	23.24
200℃		58.74	73.53	36.87	21.87

在研究钢材韧脆转变的标准中,能量法用得比较普遍,为了进行比较,本文采用了如下几种方法确定 300M 钢的韧脆温度:

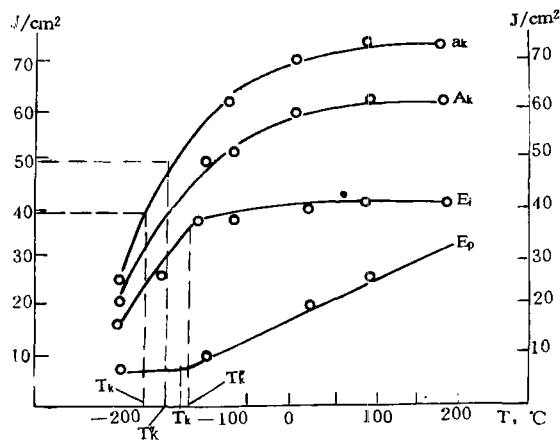


图 10 300M 钢冲击能量-温度曲线

1. 取  $\frac{1}{2}a_{kmax}$  冲击韧性值对应的温度为脆韧转变温度, 用  $T_k$  表示。

表 3 300M 钢不同韧脆判据下的  $T_k$

判 据 材 料	$\frac{1}{2}a_{kmax}$	4.9J/cm <sup>2</sup>	$E_i$	$E_p$
300M	$T'_k = -165 \pm 10$	$T_k = -132 \pm 10$	$T'_k = -120 \pm 10$	$T_k = -130 \pm 10$

从上述几种方法比较中不难看出, 用裂纹扩展功和裂形成功作为判据, 有其它方法不可比拟的优越性。众所周知, 用钢材技术条件规定值作为判据, 它是根据材料使用条件提出的, 它反映不出材料的韧脆转变过程。利用  $\frac{1}{2}a_{kmax}$  值作为韧脆转变判据, 由于  $a_k$  值本身物理意义不明确, 同样也不能反映材料的韧脆转变本质。相反裂纹扩展功及裂纹形成功代表材料的韧脆性, 有明确的物理意义。 $E_i$  主要消耗在被冲击试样弹性变形、塑性变形及裂纹形成中;  $E_p$  主要用于裂纹前沿微观塑性变形及裂纹扩展。显然, 用裂纹扩展功来描述材料的韧脆转变更合适。因为它的大小表示裂纹出现后扩展速度的快慢, 代表材料韧性的好坏<sup>[4]</sup>。

我们用上述方法曾对多种材料进行了同样研究, 结果证明用  $E_p$  或  $E_i$  作为韧脆转变的判据是可行的。

## 结 论

1. 高速数据采集及数据处理系统和冲击试验机结合组成的“自动冲击试验机”, 能重现试样冲击破断的全过程, 并能显示、打印及绘制力-时间、力-位移、位移-时间以及能量-时间曲线, 还能把冲击功分解成裂纹形成功  $E_i$  和裂纹扩展功  $E_p$ , 求出试样破断的最大载荷  $P_m$ , 屈服载荷  $P_y$  和失稳载荷  $P_t$ 。

2. 该系统软件经多年运行证明, 对冲击振荡过程采用数据平滑以及各特征点 ( $P_y$ 、 $P_m$  和  $P_t$ ) 的处理是成功的, 运算时间短、精确可靠。

材料工程

2. 采用 300M 钢技术条件规定值 (4.9J/cm<sup>2</sup>) 为标准, 其对应的温度用  $T_k$  表示。

3. 裂纹形成功  $E_i$ , 随试验温度降低在某一温度范围急剧下降, 取其  $E_i-T$  曲线转折点所对应的温度为韧脆转变温度, 用  $T'_k$  表示。

4. 裂纹扩展功  $E_p$ , 在韧脆转变温度 (用  $T_k$  表示) 以下时变化较小, 在  $T_k$  以上时则显著增加, 其转折点所对应的温度, 即为韧脆转变温度。

用以上 4 种判据确定的 300M 钢韧脆转变温度列入表 3。

从表 3 可见, 用裂纹形成功  $E_i$  及裂纹扩展功  $E_p$  做为判据确定的  $T'_k$  和  $T_k$  与以 300M 钢技术条件规定值为判据定出的韧脆转变温度  $T'_k$  基本吻合。以  $\frac{1}{2}a_{kmax}$  作判据确定的转变温度  $T'_k$  比上述 3 种方法测出的温度低 30° 左右。

3. 300M 钢韧脆转变的研究结果表明, 利用裂纹扩展功和裂纹形成功随试验温度降低的变化曲线的转折点作为韧脆转变温度的判据, 与其他方法比较, 有明显的优点: 物理意义明确, 变化明显, 易于分辨。因此, 它将会取代其它韧脆转变判据。

## 参考文献

1. 李茂山, 兵器材料科学与工程, 1990 年 1 月
2. 汪清泉、张滨如, 兵器材料科学与工程, 1990 年 1 月
3. Koyayashi, T., Engineering Fracture Mechanics, Vol. 19, No. 1, 1984, P48~65
4. Ebrahimi, F. Zin and Kaauss, C., Metallurgical Transactions, Vol. 14, No. 6, 1983

\* \* \* \* \*

## 高温镁合金 AE42X1

美国 DOW 镁公司研制了一种高温结构零件用的压铸镁合金 AE42X1, 其 218℃ 的屈服强度为 96.5MPa, 比 AZ91 合金高 10℃。该合金含有 3.5~4.5%Al、>0.27%Mn 和 2~3% 稀土元素。稀土元素主要是 Ce, 还有 La、Nd 和 Pr, 形成细小沉淀  $Mg_2RE$  (RE 为稀土元素), 作用是改善高温蠕变强度。该合金的室温拉伸屈服强度为 138MPa, 与其它的压铸镁合金相当, 抗腐蚀性能也相同。

(东华)