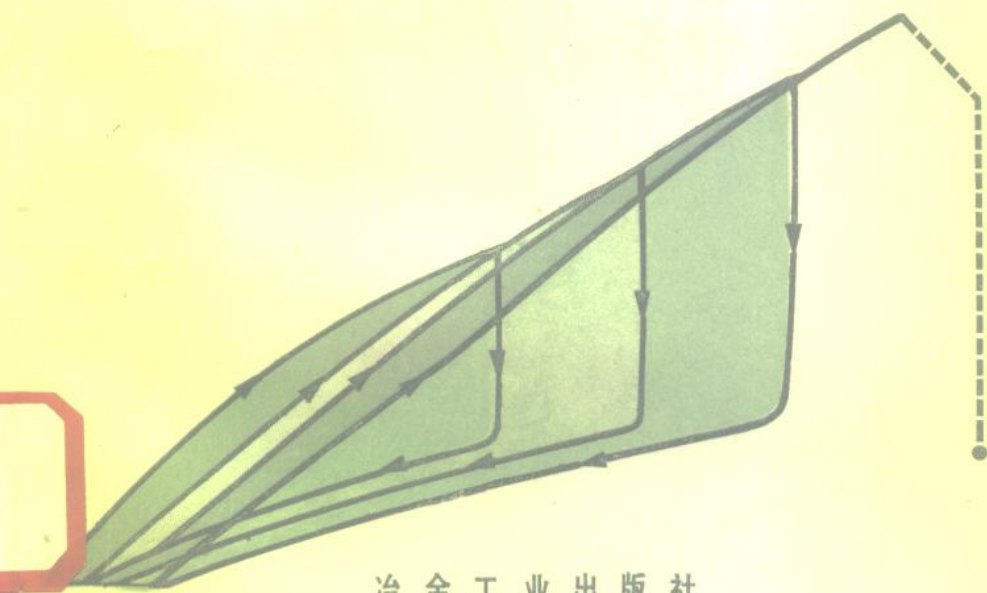


钢的动态力学 性能及应用

史巨元 编著



冶金工业出版社

(京)新登字036号

内 容 简 介

本书就工程动态加载下钢的力学性能判据的基本规律、测试原理、影响因素和工程应用方面进行了综合讨论。全书共十一章：第1章讨论了一般的动载效应；第2、3章讨论了动态断裂韧度和止裂韧度；4至10章讨论了不同受载状态下，以能量或温度为判据的动态断裂韧性；第11章讨论了钢的多次冲击行为，包括多次机械冲击和多次热冲击。

本书可供冶金、机械、化工、建筑、军工等工业部门从事钢结构设计、金属材料研究和应用的工程技术人员阅读，也可作为高等院校有关专业师生的教学参考书。

钢的动态力学性能及应用

史巨元 编著

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所经销

河北阜城县印刷厂印刷

850×1168 $1/32$ 印张10.25 字数268千字

1993年12月第一版 1993年12月第一次印刷

印数00,001~1,300册

ISBN 7-5024-1210-7

TG·160 定价12.00元

前 言

现代工业中，工程构件的服役条件日趋复杂，传统的材料力学性能判据不能反映服役特性，因而在世界范围内出现过多起严重的断裂事故，如舰船、压力容器、输送管线等的断裂与破裂。分析表明，这些断裂构件的标称应力一般都低于材料的屈服点，断裂一般是从裂纹、缺口或构件的变截面处开始，并且低温和高应变速率有助于引起铁素体结构韧脆断，这些事实动摇了传统的强度（许用应力）设计思想，因此需要对强度、韧性进行综合考虑。为寻求科学的“韧性”指标，促使人们对金属材料力学性能的认识进行更新，应提出新判据，研究新的测试方法等。从50年代以来，所提出的性能判据的特点是，把苛刻的力学条件（裂纹或缺口）、高应变速率（动态加载）和复杂的服役环境（高、低温，腐蚀介质等）结合起来，除定量的、可直接用于设计计算的断裂韧性判据外，还有以能量、温度、断口特征等量值表征的断裂韧性判据。因此，近年来大型钢结构构件的断裂事故明显减少，这是与采用新的力学性能判据并将其运用于设计分不开的。

为反映工程构件复杂的服役条件，金属材料工作者和力学工作者做了大量深入的试验研究工作，形成了一门综合性的技术学科——金属材料强度学。但是，目前有关钢在动态加载下的力学性能的论述只见于许多文章和文集，而综合性的著作很少见到。鉴于上述情况，1988年冶金物理情报网拟举办“金属材料力学性能新概念学习班”，推荐由作者编写《钢的动态（高速加载）力学性能》讲义。初稿写成后在一些同志中进行了传阅，并请上海核工程研究设计院的桂运平高级工程师和天津大学的霍立兴教授进行审阅，提出了许多宝贵的意见和建议，随后做了相应的修改，最后由霍教授审核定稿。本书能够出版是与他们的帮助分不

开的，作者在此表示衷心感谢。

此外，因作者水平有限，仓促成书，书中难免存在不妥之处，欢迎读者批评指正。

史巨元

1992年7月

目 录

1 动态加载效应	1
1.1 性能评价中的速率概念	1
1.2 动载性能的一般规律	4
1.2.1 加载(或变形)速度对材料性能的影响	5
1.2.2 加载速度对变形和断裂条件的影响	6
1.3 非高速时的速度影响	8
1.3.1 变形速度和加载速度的运用	8
1.3.2 不同材料的速度效应	9
1.3.3 加载速率对断裂韧度的影响	14
1.4 波动过程	16
1.5 惯性力的影响	18
1.6 高应变速率下材料塑变的显微组织特点	20
参考文献	23
2 动态断裂韧度	24
2.1 断裂力学基础	24
2.1.1 应力分析	24
2.1.2 平面应力和平面应变	28
2.1.3 裂纹顶端的应力应变场和应力强度因子	31
2.1.4 裂纹顶端的塑性区	34
2.1.5 裂纹扩展的能量率 G	35
2.1.6 弹塑性断裂力学概念	36
2.2 动态断裂韧度	42
2.2.1 动态扩展和动能	42
2.2.2 K_{Ia} 的测试与计算	44
2.2.3 动态 J 积分 J_{Ia}	46
2.2.4 动态COD	50

2.3	动态试验机	53
2.3.1	机械系统	53
2.3.2	记录系统	56
2.3.3	图形分析	59
附录	动态几何因子 $Y(a/W)_d$ 的确定	62
	参考文献	65
3	止裂原理及应用	67
3.1	裂纹止裂研究的发展	67
3.2	止裂原理	69
3.2.1	止裂理论概述	69
3.2.2	静态分析	72
3.3	K_{Ia} 测试方法	75
3.3.1	静加载的 K_{Ia} 测试	75
3.3.2	动载测定 K_{Ia}	82
3.3.3	钢的止裂韧度影响因素	83
3.4	止裂的工程应用	86
3.4.1	在工程设计和安全监督方面的应用	86
3.4.2	止裂组件——止裂应用实例	87
	参考文献	91
4	冲击韧性	93
4.1	一般概念	93
4.1.1	韧度和韧性	93
4.1.2	试验方法及原理	94
4.1.3	试样类型及试验结果比较	95
4.2	A_K 的意义及存在的问题	97
4.2.1	A_K 的应用	97
4.2.2	A_K 值存在的问题	103
4.3	影响 A_K 值的因素	106
4.3.1	材料内在因素的影响	106
4.3.2	外部因素的影响	108
	参考文献	118

5 夏比冲击试验的发展	119
5.1 能量分析	119
5.1.1 A_K 值的分解	119
5.1.2 缺口韧性 J_{PCI} 和 K_{PCI}	120
5.1.3 LME和LMC	121
5.2 用 A_{KV}值预测 K_{Ic}	122
5.2.1 夏比上平台范围	122
5.2.2 钢在转变温度范围内的关系	124
5.2.3 钛合金和铝合金 A_{KV} 和 K_{Ic} 的关系	127
5.3 用仪器化的标准 C_V试验预测 K_{Id}和 K_{Ic}	128
5.4 预裂纹夏比试样 W/A与 K_{Ic}及 K_{Id}的关系	132
5.4.1 研究的结果	132
5.4.2 W/A 与 K_{Ic} (或 K_{Id}) 间关系的分析	135
5.5 用预裂纹夏比试验的 $P-\Delta$图预测 K_{Ic}或 K_{Id}	135
5.5.1 整体屈服之前起裂	136
5.5.2 整体屈服后断裂起裂的结果	137
5.6 K_{Ic}与强度比的关系	138
5.6.1 强度比概念	138
5.6.2 K_{Ic} 与 R_{beq} 的关系	138
参考文献	141
6 断口剪切百分比 ($S_A\%$)	144
6.1 试验方法	144
6.1.1 试验原理	144
6.1.2 断口剪切百分比 ($S_A\%$) 的测量	145
6.1.3 试验程序及设备	148
6.2 影响 $S_A\%$ 的因素	150
6.2.1 不同材料的 $S_A\%-T$ 曲线	150
6.2.2 缺口形式对断裂特征的影响	152
6.2.3 试样厚度对 $S_A\%$ 转变温度的影响	159
6.2.4 边槽试样的影响	162
6.2.5 塑性变形对FATT的影响	162
6.2.6 关于实际导管的取样	165

6.3	对DWTT结果的研究及应用	166
6.3.1	对DWTT结果的研究	166
6.3.2	DWTT结果的工程应用	170
	参考文献	175
7	铁素体钢的NDTT	176
7.1	NDTT测定	176
7.1.1	落锤试验的发展	176
7.1.2	落锤试验程序	177
7.2	NDTT的工程应用	181
7.2.1	在材料研究和断裂分析中的应用	181
7.2.2	关于断裂分析图FAD	183
7.3	影响NDTT的因素	186
7.3.1	锻轧取向的影响	186
7.3.2	冷变形量的影响	186
7.3.3	显微组织和成分的影响	188
7.3.4	试验条件和试样制备的影响	188
7.3.5	堆焊焊条对NDTT的影响	190
7.3.6	厚度约束效应	190
7.4	对NDTT的进一步认识	195
7.4.1	对NDTT的剖析	196
7.4.2	关于原板厚(非标准试样)的NDTT	198
7.4.3	落锤判据的局限性	200
	参考文献	201
8	金属动态撕裂(DT)能	202
8.1	一般概念	202
8.1.1	试验原理	202
8.1.2	动态撕裂试验的发展	203
8.2	试验仪器	204
8.2.1	落锤式试验机	204
8.2.2	摆锤式试验机	206
8.3	试样制备	207
8.3.1	中低强度钢及有色金属合金试样缺口的制备	207

8.3.2	高强度和超高强度钢试样缺口的制备	209
8.4	试验程序及数据处理	211
8.4.1	试验程序	211
8.4.2	试验结果的处理	212
8.5	DT断裂特征	215
8.6	DT试验的工程应用	219
	参考文献	233
9	焊缝质量判据——残余COD	234
9.1	问题的指出	234
9.2	试验原理及程序	236
9.2.1	试验原理	236
9.2.2	试验程序	237
9.3	试样制备和残余COD测量	238
9.4	试验特点	240
9.5	尼伯林克试验的评价	241
9.6	试验结果与分析	245
	附录 由缺口嘴张开位移计算残余COD	249
	参考文献	250
10	爆破膨胀和爆炸撕裂	251
10.1	爆破膨胀试验	251
10.1.1	试验目的及原理	251
10.1.2	试验结果评定	255
10.2	爆炸撕裂试验	257
10.2.1	问题的提出	257
10.2.2	试验方法	259
10.2.3	几种钢的爆炸撕裂特征	261
	参考文献	267
11	多次机械冲击和热冲击	268
11.1	多次机械冲击	269
11.1.1	多次冲击的分类	269
11.1.2	一次冲击与多次冲击能量的差异	275

11.1.3	多冲抗力的变化规律	276
11.1.4	多次冲击的影响因素	282
11.1.5	多冲载荷下裂纹的萌生、扩展及断口分析	293
11.2	多次热冲击	298
11.2.1	多次热冲击的试验方法及指标	298
11.2.2	多次热冲击抗力的影响因素	305
附录	多次机械冲击能量计算式	314
参考文献		316

1 动态加载效应

金属材料常规力学性能都是由慢加载方法测定的,这称为静态力学性能。显然这种性能测定的加载条件和许多实际构件承受的动载条件不同,因此材料表现的特性也不同,在高速加载下,金属材料的力学性能将出现一些特殊现象。

1.1 性能评价中的速率概念^[1]

动载荷和静载荷的主要不同,在于加载速度的差异。所谓加载速度是指载荷施加到机件(或试样)上的速度,用单位时间内应力的增量 $\dot{p}_s$ 表示:

$$\dot{p}_s = \frac{d\sigma}{dt}, \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \quad (1-1)$$

由于没有绝对刚体,所以加载速度增加,变形速度也随之增加。因此,变形速度的增加也反映着加载速度的增加。变形速度即单位时间内的变形量,常以下列两种方法表示:

(1) 绝对变形速度,它表示单位时间内机件(或试样)的绝对变形量,单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 或 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$:

$$v = \frac{dl}{dt} \quad (1-2)$$

式中 l ——机件或试样的标距长度;

t ——产生变形的时间。

(2) 相对变形速度,它是单位时间内试样的真实相对伸长量,以 $\dot{\epsilon}$ 表示:

$$\dot{\epsilon} = \frac{de}{dt} \quad (1-3)$$

式中 e ——真实相对变形。

把 $v = dl/dt$ 、 $de = dl/l$ 代入式1-3有：

$$\dot{\varepsilon} = v \frac{1}{l} \quad (1-4)$$

在断裂韧性测试中，由于加载速率不同而产生了动、静态的区别，这里的加载速率是指应力强度因子速率 $\dot{K}$ ，由下式确定：

$$\dot{K} = \frac{\dot{P}}{B\sqrt{w}} Y \left(\frac{a}{w} \right) \quad (1-5)$$

式中 $\dot{P} = dP/dt$ 。

由式1-5可定义出断裂韧度的加载状态^[2,3]：

$$\left. \begin{aligned} \dot{K} &= (0.55 \sim 2.75) \text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1} && \text{静态} \\ 10^{-3} \text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1} &\leq \dot{K} \leq 10^3 \text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1} && \text{准静态} \\ 10^3 \text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1} &\leq \dot{K} \leq 10^5 \text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1} && \text{动态} \\ 10^6 \text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1} &\leq \dot{K} \leq 10^9 \text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1} && \text{高速加载} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

一般在准静态时可按静态处理，但在动态加载情况下，由于波动效应，使得裂纹顶端的应力场和应变场复杂化。

加载状态也可以用样品的断裂时间 t_f 和被冲击样品的振动周期 τ 之比来定义^[4]，即：

$$\left. \begin{aligned} t_f &\geq 3\tau && \text{准静态} \\ t_f &< 3\tau && \text{动态} \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

τ 由下式计算：

$$\tau = 1.68 [SWBCE]^{\frac{1}{2}} / C_L, \mu\text{s} \quad (1-8)$$

式中 S ——支撑跨距，mm；

B ——试样厚度，mm；

W ——试样宽度，mm；

C ——试样柔度；

E ——试样材料的弹性模量；

C_L ——纵波波速（见本章表1-4）， $10^6 \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

对一定几何尺寸的试样， τ 是常数。 K 高，则 t_1 必小，所以两种定义方法是一致的。

电液伺服试验机一般只能达到准静态，动态加载要采用摆锤式或落锤式冲击机及高压充气拉伸机。

由于加载速度的变化，材料的变形类型和动态特性随之发生变化。相对变形速度 $\dot{\epsilon}$ 变化时引起的各种变形类型列于表1-1^[5]。

表 1-1 $\dot{\epsilon}$ 与变形类型

$\dot{\epsilon}$	$10^{-8} \quad 10^{-6} \quad 10^{-4} \quad 10^{-2} \quad 10^0 \quad 10^2 \quad 10^4 \quad 10^6, \text{ s}^{-1}$				
形变类型	蠕变	准静态	中等 $\dot{\epsilon}$	冲击	高速冲击
一般加载方法	恒载或恒应力	液压或机械加载	气压或机械传动加载	机械或爆破冲击	轻气枪或爆破冲击
试验的动态特征	恒 $\dot{\epsilon}$ 蠕变	恒 $\dot{\epsilon}$ 试验	试样与试验机共振	弹塑性波传播	激波传播
← 忽略惯性力 → ← 恒温过程 → ← 平面应力 → ← 惯性力影响大 → ← 绝热过程 → ← 平面应变 → → 应力增加					

在现代机械中，构件的相对变形速度范围大约在 $10^{-6} \sim 10^6 \text{ s}^{-1}$ 之间。实践表明，相对变形速度在 $10^{-4} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 的范围时，金属的力学性能没有明显的变化，可以按照传统的静载荷处理；当变形速度大于 10^{-1} s^{-1} 时，金属的力学性能将发生显著的变化。

工程中的不同机构的实用速率范围列于表1-2^[6]。

由于在实际工程中，不同服役的机件承受不同的加载速率（或变形速率），因此，人们希望得到动载下的强度指标和塑性指标，因为这些数据对设计计算和评价金属材料的特征更具有实际意义。但是，目前工程材料的动载特性尚未被工程界普遍接受，其主要原因是受技术条件的限制，如记录动态断裂过程是近

表 1-2 服役特征和有关速率的关系

结 构	$\dot{\epsilon}, s^{-1}$	$v, mm \cdot s^{-1}$	$\dot{K}, N \cdot mm^{-3/2} \cdot s^{-1}$
贮 藏 柜	$<10^{-6}$	—	<10
压力容器和管线的水压试验	$<10^{-5}$	—	$<10^2$
施工中的建筑物、桥梁、起重机	$<10^{-3}$	—	$<10^4$
飞机起落架	—	10^4	$<10^5$
运土设备和机械装卸设备	—	10^3	$<10^6$
模锻压机	—	10^4	$<10^7$
碰撞中的舰船	—	10^5	$<10^7$
公路和铁路运输	—	10^5	$<10^7$
受炸药或子弹攻击的军用设备	—	10^7	$<10^{12}$

年来才完善起来的技术，对动载荷下材料的特性研究较少，测试方法尚未标准化等，这是应引起重视的问题

应该看到，近来在工程上，人们根据实际载荷情况，模拟机件的实际受力状态，提出了许多动载特性指标和相应的试验方法。这些方法用于评定工程材料特性已收到实际效果，如近年来大型钢构件的脆断事故的预防逐见成效，这与用新的试验方法得到的参数来直接指导设计和施工有关。

1.2 动载性能的一般规律^[1]

在工程实践中，变形和断裂所持续的时间间隔范围（即变形和断裂的速度范围）是很宽的。变形和断裂持续的时间可以很长（如即使要求时间较短的蠕变变形，也需上百小时），也可能很短，如常以微秒级度量的脆性材料的断裂和韧性材料由爆炸引起的断裂等。

大多数金属材料的力学性能试验（除持久、蠕变和疲劳试验外）都是在几秒或几分钟内完成的，就是说常规的力学性能试验速度是很慢的，而且范围很宽。

直到现在，一般工程材料都是用常规的所谓短时试验方法来测定其静态力学指标 ($\sigma_{0.2}$ HB、 K_{Ic} COD等) 的。在加载试验的条件下，试样中虽然都产生波动过程，但是，如果在加载结束之前，弹性波能够通过试样传播，则认为该过程仍属于静力学的范畴，即速度对性能无显著影响。静力加载过程可以被看作在 $10^{-3} \sim 10^{-11}$ s 的速度下所产生的一组平衡状态^[1]。

在静态力学性能试验的标准中，对加载速度都有规定。因为，在很多情况下，试验速度的变化可导致材料的力学性能发生不同程度的变化。现代工程中要求在苛刻的力学条件下考核材料的性能，此时往往把加载速度、低温（或高温）和尖锐缺口（或裂纹）三者综合起来考虑。

1.2.1 加载（或变形）速度对材料性能的影响

加载（或变形）速度对材料性能的影响是由下述因素引起的：

（1）速度可使材料从一种力学状态过渡到另一种力学状态。它可导致金属材料从延性过渡到脆性断裂状态；

（2）材料从某些局部区域的破坏过渡到整体的突然破坏；

（3）对需要持续一定时间的物理过程或物理化学过程影响因素的加强或减弱，如扩散，腐蚀等；

（4）变形体的尺寸和外形的变化。

通常，变形状态的不均匀性随速度的增加而增加，因此在很高的速度下，变形区（首先是非弹性区）的变形体积减小，并且可能产生某些局部现象，如熔化、蒸发等。在速度很高时，由于散热时间不够，可能产生冲击加热，因局部产生高温、高压可能引起多晶转变。

在加载过程中，尽管外载状态实际上并未改变，速度的变化往往是使变形体内的过程发生变化（通常为局部过程的变化）。例如，由于材料的强化，使材料的强度提高。这使变形和断裂过程的持续时间大大缩短（所谓非扩展的裂纹）。反之，由于缩颈或裂纹的扩展，材料承载截面减小而使加载过程的速度增加。

在非常高的速度下，材料的力学行为会出现一些新现象。如波动过程、惯性力、高速冲击下的炸裂等，这些现象是低速下所没有的。

在很高的速度下，应当考虑可压缩性，因为材料的密度显著增加，并且撞击着的物体其内能也显著地增加。

给冲击下一个精确而无争议的定义是困难的，有时把高速加载当作是冲击的特征，有时把惯性力的出现或波动过程的影响作为冲击的特征。由此看来，必须认为冲击是输入能（外界的）与吸收能（内能）之间和相应的外力之间显著不平衡关系的表现。也就是说，冲击是随位移的变化而发生的能量变化。这种不平衡度，可由各种原因引起，典型的原因是由于外载显著增加而引起的冲击。

1.2.2 加载速度对变形和断裂条件的影响

加载速度对变形和断裂条件的影响可分为以下三种基本情况来研究。

1.2.2.1 较低的加载速度

加载速度较低时，波动过程及惯性力的影响非常小，以致可以忽略。但是，认为低速加载对变形和断裂的影响总是不显著的，这种看法是不正确的。因为当加载速度与扩散过程及物理化学过程的速度大小相当时，则加载速度往往在很大程度上能决定强化（如加工硬化或弥散硬化）与软化（如聚集、再结晶、回复等）过程发展的程度，从而可改变其变形和断裂的特点。

1.2.2.2 较高的加载速度

在高速情况下，惯性抗力的影响非常显著，微观和宏观的应力、应变状态非常不均匀。同时，较高的加载速度使材料的强度提高，可使动载强度高于静拉伸强度的10倍。例如，当半无限体材料压入刚性体时，若以高速进行，则抗力的增加值 σ 可由下式决定。

$$\sigma = \sigma_0 \varepsilon + K \rho v^2 \quad \text{或} \quad (1-9)$$

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{v}{v_0} \right)^n + K \rho v^2 \quad (1-10)$$

式中 $\dot{\varepsilon}$ ——变形速度；

K ——与压入体形状有关的系数（当 ρv^2 与10倍的硬度值相当时， K 值与形状无关）；

ρ ——半无限体材料的密度；

v ——非变形体的速度；

σ_0 ——在较小速度 v_0 时的抗力；

n ——表征半无限体材料的变形抗力对变形速度的敏感性系数（通常 $n \ll 1$ ）。

由式1-10可知，在高速下，变形抗力由静强度和惯性强度（ $K\rho v^2$ ）两部分组成。因此，高低速度的划分应与这两部分的比例有关。

如果 ρv^2 比较小，则物体的强度主要取决于静强度。例如，对高强度镁合金（ $\rho=1.8$ ）来说，若想让其惯性强度在总强度中起显著作用，它的加速度就应当比较钢（ $\rho=7.8$ ）大得多。因此，凡是承受很高加速度的机器零件，以采用 ρ 较小的镁或铝合金为宜，这就是其原因之一。

相反，如果 ρv^2 较大，在速度为每秒几千米时，材料本身的力学性能对其动强度完全没有影响，此时的动强度主要取决于材料的密度。因此，高速下的液体铅流（ $\rho \approx 11$ ）或水银流（ $\rho \approx 13$ ）比坚硬的钢制子弹穿透能力还强。

此外，速度较高的加载过程其波动过程的影响与波在物体中的传播路径有关，如果变形或断裂区域的尺寸不大，即应力、应变波的传播路径很短，即使速度很高，波动过程的影响也不大。

1.2.2.3 超高的加载速度

在超高速度的情况下，强度增加很明显，有时可达到或超过材料的弹性模量，在进一步增加撞击速度时，压缩能可以增加很多，以致于在卸载时将从压应力变为数值很大的拉应力，即使5~10m/s的撞击速度也可以产生这种现象，如冲击断裂过程曲线出现的“负冲”现象，即是这种情况。

在金属材料的压力加工过程中，都认为材料是不可压缩的