



中国汽车工程学会标准

T/CSAE XX—20XX

金属板材在高应变速率下的力学 性能测试方法

Test method of mechanical properties for metallic sheets at high
strain rates

20XX-XX-XX发布

20XX-XX-XX实施

中国汽车工程学会 发布

目 录

前 言	I
引 言	II
1 范围	1
2 标准性引用文件	1
3 符号、名称及单位	1
4 原理	3
5 试验设备	3
6 试样	3
7 试验要求	5
8 试验报告	8
附录 A 试验设备	10
附录 B 原材料与经预应变后的动态力学性能对比	12
附录 C 试验样品尺寸	13
附录 D 工程应力-工程应变曲线示例	15
附录 E 材料动态力学性能本构模型	16
参考文献	17
表 1 符号和说明	1
图 1 试样的尺寸	4
图 A.1 高应变速率拉伸试验机结构示意图	10
图 A.2 高应变速率拉伸测试的不同种类别夹持系统、作动器加速和缓冲系统原理图	11
图 C.1 试样尺寸	13
图 C.2 试样尺寸	13
图 C.3 试样尺寸	14
图 C.4 试样尺寸	14
图 D.1 应变速率为 250s^{-1} 时的工程应力-工程应变曲线及相应的应变速率曲线示例图	15

前 言

按照现行国内外金属材料在高应变速率下的力学性能试验方案，试验设备可分为两类：一类是弹性杆型系统，另一类是液压伺服与其它试验系统。

本标准仅适用于液压伺服与其它伺服试验系统。

本标准使用准翻译法参考了 ISO 26203-2:2011《金属材料 高应变速率拉伸试验 第 2 部分：液压伺服与其他试验系统》及 SEP 1230《高速拉伸试验中金属板材在高应变速率条件下的力学性能确定》。

本标准与 ISO 26203-2:2011 及 SEP 1230 的技术性差异及其原因如下：

a) 关于范围，本标准要求同一规格的金属板材所选取的不同应变速率应在同一试验设备上进行，以确保试验数据的可比性（见第 1 章节）；

b) 关于标准性引用文件，用修改采用国际标准的 GB/T 228.1 代替了 ISO 6892-1，以适应我国的技术条件（见第 2 章节）。

c) 用“本标准”代替“本国际标准”；

d) 用小数点 ‘.’ 代替作为小数点的逗号 ‘,’ ；

e) 删除了国际标准的前言；

f) 为确保试验数据的可靠性，本标准约定了试验设备的校准；

g) 关于试样，作如下调整：

● 增加了试验设备的校准约定，以确保试验数据的可靠性（见第 6.1 章节）；

● 增加了材料经过工艺路径后试验样品的处理方法（见第 6.1 章节）；

● 增加了非板状材料或厚度大于 3mm 金属材料试验的说明（见第 6.2 章节）；

● 增加了取样方向的约定（见第 6.3 章节）；

● 增加了试验过程中样品的数量要求（见第 6.3 章节）；

h) 关于数据处理，由于试验设定的应变速率的有限性，本标准增加了材料本构模型确定，并给出本构模型的公示及验证方法（见第 7.5.5 章节）；

i) 关于试验报告，作如下调整（见第 8 章节）：

● 增加了对试样工艺处理条件及加工条件的注明要求；

● 增加了对取样位置及方向的注明要求；

● 增加了对载荷及应变测量方式的注明要求；

● 增加了对载荷及应变测量方式的注明要求；

● 增加了对有效数据的数量要求；

● 增加了对材料本构模型及参数的要求；

本部分由中国汽车工程学会材料分标委提出。

本部分由中国汽车工程学会归口。

本部分起草单位：中国汽车工程研究院股份有限公司。

本部分主要起草人：方刚，张钧萍，金庆生，马鸣图。

本标准为首次发布。

引 言

许多工程材料表现出与应变速率的依存关系即应变速率的敏感性。从某种程度上说，应变速率越高材料的屈服强度越高，材料的吸能效果越好。本试验方法对于评估汽车结构的碰撞评价非常重要。目前，汽车结构的抗撞性越来越多的由数值仿真分析的方法来评估，数值仿真可以以最小的成本和最短的时间消耗来代替传统的碰撞试验。数值仿真分析所要求的是材料在高应变速率下的应力应变曲线。准静态的值是依据GB/T 228.1得到的，也就是应变速率 $\leq 0.00025\text{s}^{-1}$ ，但这对于描述动载荷下的零件的材料形变是不适合的，动载荷下要求的应变速率一般来说应变速率 $\geq 10^{-2}\text{s}^{-1}$ 。

金属板材在高应变速率下的力学性能测试方法

——液压伺服控制系统及其它控制系统

1 范围

本标准规定了汽车用金属板材在高应变速率下拉伸试验的原理、符号和说明、试样和装置。

本标准适用厚度在3mm以内(包含3mm)的汽车用金属板材,试验要求的应变速率范围为 $10^{-2}\text{s}^{-1}\sim 10^3\text{s}^{-1}$,试验温度为 $10^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ (或由双方协商确定)。

本标准适用于液压伺服测试系统,除非另有说明,同一规格的金属板材所选取的不同应变速率应在同一试验设备上进行。

注1:当试验的应变速率小于 10^2s^{-1} 时,可使用适用于准静态拉伸试验机进行比对试验。

2 标准性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 228.1-2010 金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法;

ISO 26203-1 金属材料高应变率拉伸试验方法 第1部分:弹性杆类系统;

ISO 26203-2 金属材料高应变率拉伸试验方法 第2部分:液压伺服控制及其它控制系统;

SEP 1230 高速拉伸试验中金属板材在高应变速率条件下的力学性能的确定;

ASTM E 1012-2012 在拉伸和压缩轴向力作用下验证测试框架和试样比对的标准实施规程;

GB/T 2975 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备。

3 符号、名称及单位

本标准所用的符号、名称及单位见表1。

表1 符号和说明

符号	单位	说明
试样		
a_0	mm	试样的原始厚度
b_0	mm	试样标距内的原始宽度
b_k	mm	试样夹持部分的宽度
L_0	mm	试样原始标距长度
L_c	mm	试样平行段长度
L_e	mm	引伸计标距长度

表1 符号和说明（续）

r	mm	试样平行段与夹持段连接的过渡圆弧半径
S_0	mm ²	试样平行长度部分的原始横截面积
S_D	mm ²	测力计面积：试样固定端的面积，试验时仅弹性变形段需要
符号	单位	说明
		时间
t	s	时间
t_f	s	从试验开始到试样发生断裂所经历的时间
		伸长率
A	%	断后伸长率 注：非比例试样的符号 A 常有一个下标，如： A_{20mm} 表示试样原始标距 $L_0=20mm$ 的断裂后伸长率。
		延伸率
A_g	%	最大力 F_m 处塑性延伸率（最大力 F_m 处的塑性应变）
A_{gt}	%	最大力 F_m 处总延伸率（最大力 F_m 处的总的应变）
		应变
$e(t)$	%	即时工程应变
e_{pl}	%	塑性工程应变
e_t	%	总的工程应变
ε_{pl}	——	塑性真实应变
ε_t	——	总的真实应变
		速率
v_0	mms^{-1}	初始位移速度
\dot{e}_{nom}	s^{-1}	名义工程应变速率= v_0/L_0 （见 7.1 公式（1））
\dot{e}_{mean}	s^{-1}	平均工程应变速率= A/t_f （见 7.5.3 等式（4））
$\dot{e}(t)$	s^{-1}	瞬时工程应变速率= $de(t)/dt$ （见 7.5.3 等式（5））
\dot{e}_{pl}	s^{-1}	均匀塑性应变平均速率：开始屈服或 1%应变到最大力处应变范围内的 $de(t)/dt$ 的平均值（见 7.5.4 等式（6））
f_u	Hz	测试系统的上频率极限（力或位移）
		力
F_m	N	最大力
		应力
R	MPa	工程应力
σ	MPa	真实应力
		屈服强度-规定塑性延伸强度-抗拉强度
R_{el}	MPa	下屈服强度
R_p	MPa	规定塑性延伸强度
R_m	MPa	抗拉强度
		弹性模量-应力应变曲线斜率
E	MPa	弹性模量

表 1 符号和说明 (续)

m_E	MPa	应力-应变曲线弹性部分的斜率
注： 1、1MPa=1N/mm ² ； 2、在一定条件下（高分辨率，双向均匀引伸计，试样准确校直等），弹性部分的应力-应变曲线的斜率值与弹性模量值一致。		

4 原理

大部分材料在变形过程中表现出不同程度的应变速率敏感性。在比 GB/T228.1 中描述的更高的应变速率下，为获得可靠的应力-应变曲线，力和试样的原始标距 L_0 的伸长率的测量必须满足一些额外的条件。通过本标准的试验，可获得塑性变形时力平衡的应力和应变，试验的最大应变速率为 10^3s^{-1} 。

5 试验设备

试验设备应该满足试验要求，并在整个试验过程中保持恒定的应变速率。在应变速率小于 1s^{-1} 时，试验设备应采用闭环控制；在应变速率大于 1s^{-1} 时，试验设备的控制方式可采用开环控制，但应具备采取特殊的措施来使试验过程中的应变速率保持恒定并在可接受的极限范围内。对于本标准所推荐的试样，可以采用液压伺服驱动下落运动单元、飞轮冲击、落锤等系统。

本标准中所涉及到的试验设备构成依据于动能守恒的原理，试验所需动能是由试样的冲击载荷一侧产生和提供的(如附录 A 中图 A.1)，载荷传感元件位于试样固定夹具一侧(如附录 A 中图 A.1)。

为防止由于弯矩产生的试验误差，实验过程需保证轴对称的平行试样与加载杆的同轴度。加载杆的同轴度可参照 ASTM E 1012 确定。从力学观点来看，加载杆应紧固并容易控制，同时应尽可能使试验加载系统有较高的固有频率和能够实现较短的加速时间。

6 试样

6.1 试样尺寸

本标准中，应选取平整的金属板材进行动态拉伸试验，取样位置可参考 GB/T2975。除试验设备所能提供的加载速度外，试样尺寸对于实验所要求达到的应变速率非常重要，试样平行段长度越短，试验所能达到的应变速率越高。试样尺寸的要求应该满足图 1 要求，试样的平行段长度 L_c 应当满足使标距 L_0 范围内保持为单向拉伸状态，试样的平行段长度 L_c 、宽度 b_0 、厚度 a_0 以及过渡圆弧 r 应满足以下要求：

- $L_0/b_0 \geq 2$
- $L_c \geq L_0 + b_0/2$
- $b_0/a_0 \geq 2$
- $b_0/b_k \leq 0.5$
- $r \geq 10$

注： b_k 为试样夹持端宽度，试样的尺寸公差为 $\pm 0.2\text{mm}$ 。

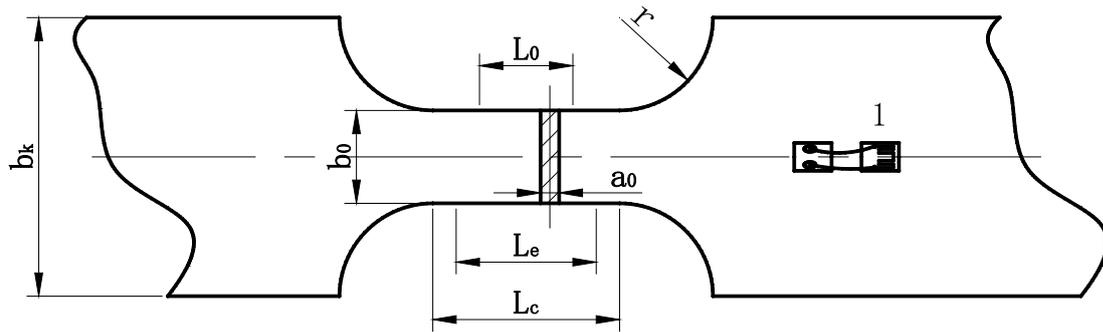


图1 试样的尺寸

注1：应变速率达到 10^3s^{-1} 时，为使在低应变处(试验最初时)获得力平衡，需要选择一个合适的试样长度。

注2：除图1及附录C中的试样尺寸外，试样形状及尺寸也可由双方协商确定，但应在试验报告中注明。

试样夹持部分的设计应根据设备夹持部分要求进行，但应满足试样夹持端在试验过程中无塑性变形发生。

如采用在试样上贴应变片的方式(如图1)来进行作用力的测试时，试样尺寸的设计应注意预留测力区域。测力区域应位于试样无加速端区域，且在试验过程中仅发生弹性变形。

高速拉伸试验的试样应进行准静态测试，并将其得到的材料性能与依照 GB/T228.1 使用标准试样和标准设备所获的材料性能进行比较。这些试验所获得应力-应变曲线应在 GB/T228.1 标准所允许的应变速率下进行。

由于汽车总成或零部件在服役过程中均经过不同程度的塑性变形即发生加工硬化，因此原材料的动态力学性能与实际零部件或经过塑性变形后的材料的动态力学性能存在差异(原材料与经预应变后的动态力学性能对比，见附录B)，若需考虑工艺路径或材料变形状态对材料高应变速率的力学性能的影响，可先加工合适尺寸的试样进行不同工艺路径处理或直接从零部件上取样，但无论选择那种取样方式，均应保证最终的试验试样为标准试样尺寸。

6.2 试样加工

试样的加工依据于 GB/T228.1 附录B 中的要求。试样的加工应特别注意防止加工硬化，推荐使用电火花腐蚀切割、水注切削等方式来减少试样边缘的加工硬化。

注1：如需对非板状金属材料或厚度大于 3mm 的金属板材进行高应变速率下的力学性能测试时，可由试验双方协商确定试验方案。

6.3 取样

除非另行约定，试样应该沿轧制方向进行取样。试验准备过程中，应该保证每个应变速率至少 3 片试样。试样的取样位置可参照 GB/T2975 进行。

7 试验要求

7.1 速率选取

在进行材料高应变速率下的力学性能测试前，需合理选取作动器的初始的位移速度 v_0 ，以保证试样进行试验时达到所需的应变速率。初始的位移速度 v_0 可通过公式（1）对试验要求达到的名义应变速率进行估算得到：

$$\dot{\epsilon} = v_0 / L_c \quad (1)$$

式（1）中 L_c 为试样平行段长度。试验过程中应变速率会由于作动器的同轴度产生偏差。

注：对于落锤结构试验系统，初始的位移速度 v_0 可根据试验要求达到的名义应变速率通过下落高度计算而得到。

试样平行段的应变速率对材料的力学行为有决定性的影响。因此，试验过程中应保证试样平行段的应变速率恒定而不是保证作动器恒定的加载速度。

7.2 力的测量

随着位移速度增加，高应变速率下的载荷会自发传递到试样上而引起试样和设备部件振动的增加。这些振动可以是轴向振动，也可以是弯曲振动。试验时叠加的振动信号被记录在力信号中，从而出现在应力-应变曲线上。另外，在变形过程中（吕德思应变）发生材料内在的振动也会与力信号发生叠加，也会出现“力震荡”现象。

当选择测力方式时，减少或防止力信号中的振动非常重要。一般而言，测力的部位离试验标距位置越远或设备作动器的速度越大，试验产生的振动就会越大。

当应变速率小于或等于 $50s^{-1}$ 时，设备压电式传感器的自然频率足够满足力测量的精度，可使用设备自带的压电式传感器进行载荷的测量；当应变速率大于 $50s^{-1}$ 时，推荐在试样纯弹性变形区使用应变片（测量的区域，见图 1）或通过局部测力计进行力的测量。

注 1：如因设备夹具造成的试样只发生弹性变形的区域无法使用应变片，可在夹具上贴应变片（[1]，[2]，[3]，[4]），但夹具的贴片位置应尽可能离试样标距位置小。

注 2：如需区分由弯扭而引起的振动部分，可在试样的两侧进行贴应变片，分别分析应变片的信号，从而识别信号中的由弯扭引起的部分，并通过应变片桥路搭接而消除弯扭引发的振荡。

注 3：试验过程中，应谨慎在加载杆上使用阻尼元件来减小振动作用，因为使用阻尼元件会减小试验初始的应变速率，从而影响试验材料屈服强度的准确性。

测力计的校准，可在准静态条件下对贴有应变片的试样进行。获得校准因数时，施加于试样的最大应力值应不大于材料的为 $2/3$ 屈服强度或规定塑形延伸强度。其它的力校准方式可参考文献[1]、[5]、[6]。

应变速率小于 $10s^{-1}$ 试验时，上频率极限 $f_u(-3dB)$ 至少应为 $1kHz$ 。对于更高的应变速率，应采用公式（2）确定力测量系统的上频率极限 f_u ：

$$f_u \geq 100 \times \dot{\epsilon} \quad (2)$$

上式中， f_u 为力测量系统的上频率极限， $\dot{\epsilon}$ 为应变速率。

7.3 变形的测量

为获得原始标距内可靠的位移测量结果，应使用不同的测量系统。当应变速率小于 $1s^{-1}$ 时，通常

T/GSAE XX-XXXX

可使用机械式夹持引伸计。当应变速率大于 1s^{-1} 时, 应使用无惯性的测量系统替代引伸计, 如应变片、光电测量仪、激光测量系统或者高速摄像。

注: 不推荐使用 LVDT (线性可变比变压器) 或其它在标距 L_0 外的间接方法测量应变。这些测量方式仅在准确考虑设备和加载杆部件的刚度时使用。

可采用一种测量技术对整个试验进行测量。若一种测量技术不能满足或者有更高的精度要求, 可以结合多种技术进行测量。若材料变形均匀性足够, 在均匀应变范围内的测量, 允许使用比原始标距 L_0 更小的测量标距 L_e , 或者使用适合的测量仪器直接记录真实应变。

应以适当的方式对位移/应变测量设备进行校准。

对于应变速率小于 10s^{-1} 的试验, 频率极限 f_u (-3dB) 至少应为 10kHz 。对于更高应变速率的试验, 使用公式 (3) 计算:

$$f_u \geq 100 \times \dot{\epsilon} \quad (3)$$

上式中, f_u 为力测量系统的上频率极限, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率。

推荐依照 GB/T228.1 通过对位于试样上的标记进行测量获取材料的断后伸长率, 但应注意标记不应影响材料的变形行为。

7.4 数据采集

载荷与位移/应变数据测量系统的采样频率应以不低于载荷测量系统上频率极限的四倍进行采集并记录。这些采集数据可作为试验结果的原始数据部分, 随后的分析可减少数据对。无论采用何种采集方式, 载荷与位移/应变的采集应保持同步。

7.5 数据处理

7.5.1 应力-应变曲线

采用与 GB/T228.1 准静态拉伸试验类似的方式进行力、延伸、应变和应力-应变曲线的处理。

材料的应力-应变曲线应由试验过程中的原始测量信号计算获得。试验过程中获取的单调递增的应变信号有利于试验数据的进一步分析, 若由于测量技术的原因 (如信号杂乱) 而不能获得单调递增的信号, 可通过不同程序处理获得 (如使用移动平均数程序处理, 多项式近似法处理, 多项式转换或滤波处理等)。若其它测量因素对信号也产生影响 (如速度降低等), 需要检查试验过程的应变速率变化。试验过程中的出现应力-应变曲线的震荡现象及处理方式应进行说明。

在材料关键参数及用于有限元计算的应力应变-曲线的确定中, 需对应力-应变曲线进行平滑处理。通常可采用移动平均数法, 多项式近似法, 多项式分段近似法或滤波等方法进行。平滑处理方式的选取取决于不同的前提条件, 如曲线的构成, 振动的幅度, 或者测量值的分布和数量。总之, 平滑处理会有信息遗失的危险或主观的影响, 试验报告中应指出数据是否经过平滑处理或以何种方式处理。

注: 在过滤和光滑等处理前, 需对设备参数如夹具、缓冲器、传动杆的同轴度等进行优化, 以得到更好的原始数据。

7.5.2 关键参数的确定

材料在高应变速率下拉伸试验中的关键参数由应力-应变曲线确定,可参照GB/T228.1的相关术语及定义进行,关键参数主要包括下屈服强度 R_{eL} 、规定塑性延伸强度 R_p 、抗拉强度 R_m 、最大力处塑性延伸率 A_g 和断裂后的伸长率 A 。

规定塑性延伸强度 R_p 可与在塑性应变为0.2%处的 $R_{p0.2}$ (与GB/T228.1中的一致)同样计算获得,另外对更高的塑性应变时的强度值应标上应变(如1%、2%、3%)。在不确定的情况下,如高的振动幅度(大于 R_m 的5%),应省略 $R_{p0.2}$ 的计算,而记录在较高应变速率下的规定塑性延伸强度,如 R_{p3} 的规定塑性延伸强度。测量规定塑性延伸强度的不确定度随振动幅度降低而降低。

在高速拉伸试验过程中,对应于上屈服强度的下屈服强度 R_{eL} 是一个关键的材料参数。依照GB/T228.1规定, R_{eL} 定义为加工硬化开始前塑性屈服过程中应力的平均值。当力信号振动不能保证 R_{eL} 的可靠性时,应采用高的塑性应变对应的强度来代替 R_{eL} 。

如7.5.1节,抗拉强度 R_m 表述为应力-应变曲线的最大值。最大力处的总的延伸率 A_{gt} 为与GB/T228.1准静态拉伸试验中的定义类似,为材料的抗拉强度对应的应变值。

与GB/T228.1中的规定一致,断裂后的伸长率是由测量试样上的标距获得,应优先采用在试样上预先打标测量断后伸长率。

除此之外,若用传统确定应变到断裂的方法测量标距 L_0 的延伸率,断后伸长率也可从应力-应变曲线上的断裂点读取。若断后伸长率小于5%,可通过应力-应变曲线上的数据获取材料的伸长率。

7.5.3 应变速率确定

除了按照等式(1)计算名义应变速率外,试验时的平均应变速率可通过断后伸长率 A 和发生断裂所需时间 t_f 按照如下公式进行计算:

$$\dot{\epsilon}_{\text{mean}} = A/t_f \quad (4)$$

不同于名义应变速率,该参数依赖于夹具的配合度或材料的变形能力。同时,该参数和材料在颈缩区的局部应变速率没有关联。

将应变信号与时间微分可获得及时应变速率信号 $\epsilon(t)$,在整个试验中,该参数提供更详实的应变速率变化信息。通过建立瞬时(或应变相关)应变速率曲线可判断在屈服点处的应变速率是否达到预定的应变速率(见附录D中的图D.1)。

$\dot{\epsilon}_{pl}$ 是表示在加工硬化阶段与时间相关应变速率的平均值的一个重要的物理参数。该参数可由屈服强度或1%应变处的时间 t (加工硬化开始)与最大力处的时间 $t_{(F_m)}$ (见图D.1)范围内的应变速率的平均值求得。

$$\dot{\epsilon}_{pl} = P \{ \dot{\epsilon}(t(\text{start of hardening})) \cdots \dot{\epsilon}(t(F_m)) \} \quad (5)$$

式中:

P 表示对函数 $\dot{\epsilon}(t)$ 求算术平均;

$\dot{\epsilon}(t)$ 工程应变速率,表示特定时刻工程应变对时间的导数;

$t(\text{start of hardening})$ 表示加工硬化的开始时刻;

$t(F_m)$ 最大力时刻;

试验报告中的应变速率是指“特征应变速率”,若名义工程应变速率与平均工程应变速率的偏差小于10%,可采用平均工程应变速率作为特征应变速率;若名义工程应变速率与平均工程应变速率的偏差大于10%,则应测定即时工程应变速率曲线 $\dot{\epsilon}(t)$ 并讨论。

对于可获得几乎恒定的应变速率的认证试验，从加工硬化开始到最大力（见附录D中图D.1）阶段，要求瞬时应变速率与特征应变速率之间的偏差不超过15%。

注：测量的应变曲线表明（见附录D中图C.1），高速拉伸试验中，尽管有一个几乎恒定的传动杆速度，但在整个试验或局部范围内不存在精确恒定的应变速率范围。相比之下，初始阶段内（弹性阶段）的真实应变速率通常比名义应变速率低；在规定塑形强度到抗拉强度范围内，由于设备和夹具的刚度，两种应变速率不同；均匀应变之后，在颈缩区发生集中应变，并导致局部应变速率显著增加，此时的应变速率可比名义应变速率大一个数量级，这种现象极大地取决于材料本身，如显著的上下屈服强度、加工硬化性能和变形能力。高速拉伸的应变速率曲线由振动信号叠加，因而很难获得清楚的结果。

若在最大力处的应变值很小，则修正屈服开始到最大力之间的应变速率没有意义。这种情况常发生于初始屈服阶段有动态作用力引发绝热应力软化效应的材料上。此时，可以设定一个应变范围（如3%-10%应变之间），在该范围内求应变速率的平均值。

7.5.4 流变曲线测定

公式（6）、（7）及（8）仅适用于各向同性材料。

根据材料在均匀变形阶段时的体积不变假设，可以计算材料的流变曲线。该假设只用于塑性应变，见式（6）或（7）或总应变（弹性和塑性），见式（8）。一些FEM软件所需的流变曲线以材料发生的总应变作为初始参数。

是否包括弹性变形部分，可获得不同定义的流变曲线。

如只测量塑性应变则可获得塑性应变的流变曲线，可由式（6）和（7）可获得材料均匀变形范围内的真实应力-真实塑性应变曲线或数据：

$$\varepsilon_{pl} = \ln(1 + e_t - R/E) \quad (6)$$

$$\sigma = R(1 + e_t) \quad (7)$$

$$\varepsilon_t = \ln(1 + e_t) \quad (8)$$

7.5.5 材料本构模型确定

材料高应变速率拉伸试验可获取材料在试验设定应变速率下的力学性能，考虑到试验设定的应变速率的有限性，试验数据的处理过程中可根据各应变速率下获取的力学性能数据采用合适的本构模型进行数据拟合。

推荐选用的本构模型（见附录E）如Johnson-Cook（JC）模型、修正后的Johnson-Cook（JC）模型、Cowper-Symonds（CS）模型、Zerilli—Armstrong（ZA）模型进行数据拟合，选取与试验数据残差最小的本构模型作为试验材料的推荐本构模型。

本构方程确认后，如有条件可选取一个未进行试验的应变速率进行试验并与本构模型预测的材料力学性能进行对比。

8 试验报告

试验报告应包括所有与试验程序和试样结果相关的信息：

- 1) 引用的标准及标准号；
- 2) 试样名称

- 3) 材料牌号、材料规格;
- 4) 试样工艺处理条件及加工条件;
- 5) 试样的几何形状及尺寸;
- 6) 试样的取样位置及方向;
- 7) 试验设备;
- 8) 载荷测量的方式;
- 9) 应变测量的方式;
- 10) 试验条件 (温度, 名义、平均和特征应变速率);
- 11) 原始数据, 可以附件的形式提供, 但每个应变速率下的有效数据应不少于3组;
- 12) 试验数据处理信息 (应注明采用何种方式处理, 如: 光滑、拟合等);
- 13) 试验结果 (强度和塑性相关的关键参数, 应力-应变曲线, 真实塑性应变-真应力数据及曲线, 材料本构模型及模型参数 (由试验双方协商))。

注:

- 1: 试验过程中, 应保证每个应变速率下获取三组有效曲线或数据。
- 2: 根据试验方要求, 可将试验结果整理成CAE分析所需的材料数据库或卡片。
- 3: 附录D中的图D.1为应变速率 250s^{-1} 时获取的材料工程应力-工程应变曲线, 见文献[7]; 试验过程中, 试验载荷是通过在试样测力区域粘贴应变片获取, 试验应变通过光学测量系统对试样的标距内的动态变化获取; 示例中, 由于载荷信号叠加的震荡信号在平均信号的 $\pm 5\%$ 内, 该示例采用二次多项式对屈服后曲线进行拟合; 示例另外给出由测试应变对时间的积分所获取的应变速率变化曲线及其平均值; 从材料发生屈服至材料出现缩颈的整个过程中, 试验设定的应变速率 250s^{-1} 所允许偏差范围在 $\pm 30\%$ 内。

推荐采用附录 D 中的图 D.1 作为材料高应变拉伸试验的图形记录结果。

附录 A

试验设备

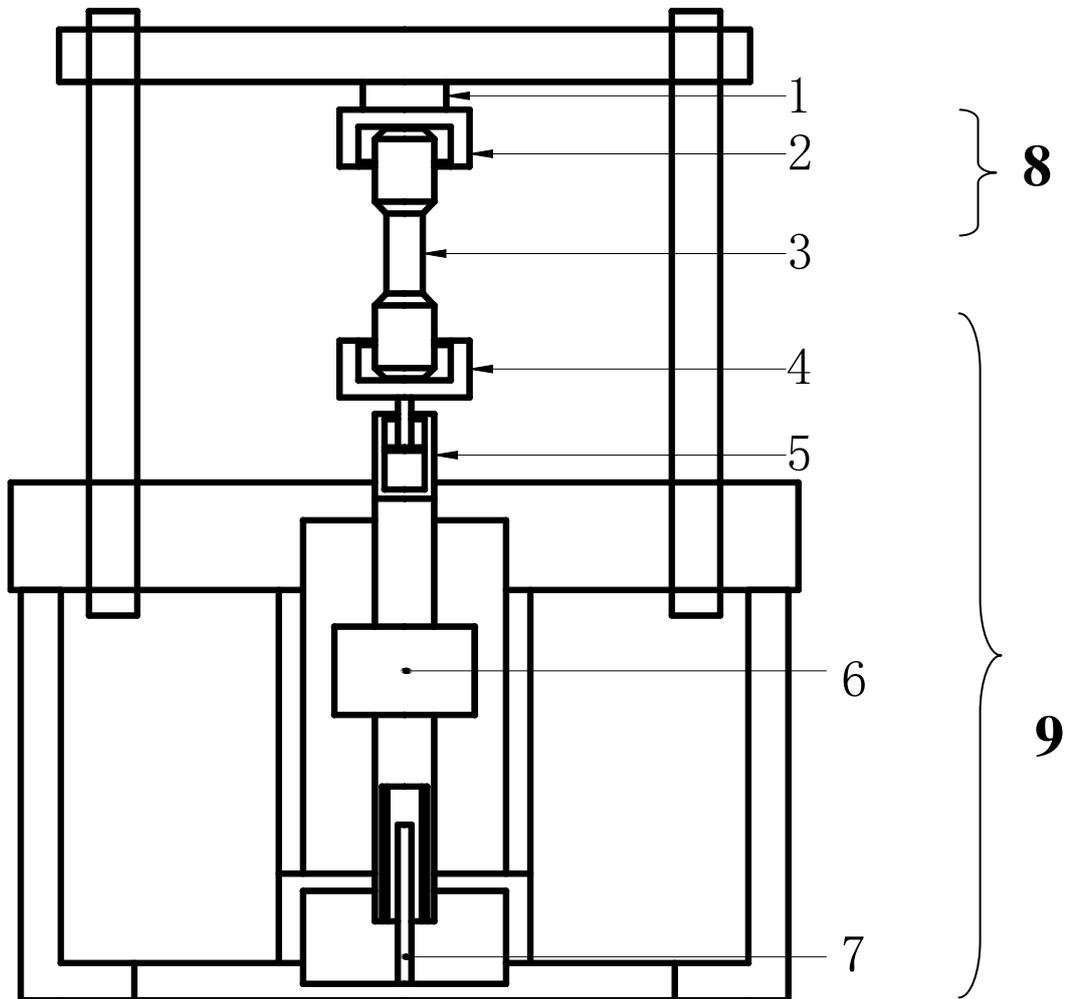


图 A. 1 高应变速率拉伸试验机结构示意图

- 注：1 载荷传感器
2 夹持端夹具
3 试验样品
4 加载杆
5 缓冲器
6 作动器
7 位移传感器

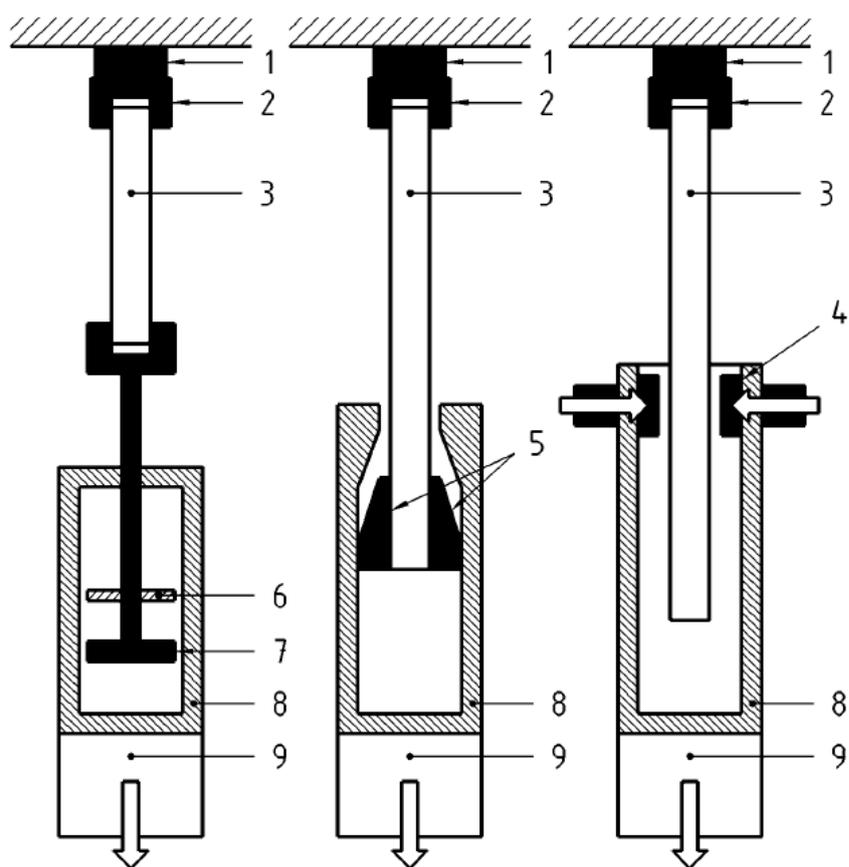


图 A. 2 高应变速率拉伸测试的不同类别夹持系统、作动器加速和缓冲系统原理图

- 注：1 载荷传感器
 2 夹持端夹具
 3 试验样品
 4 预加载元件
 5 螺纹状楔型夹口
 6 阻尼垫圈
 7 缓冲杆
 8 缓冲器
 9 作动器

附录 B

原材料与经预应变后的动态力学性能对比

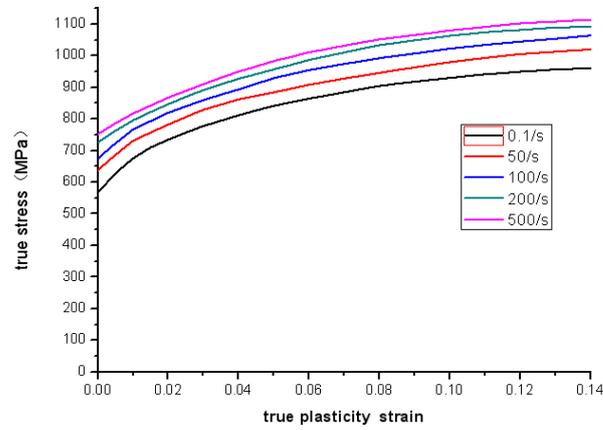


图 B.1 原材料高速拉伸性能

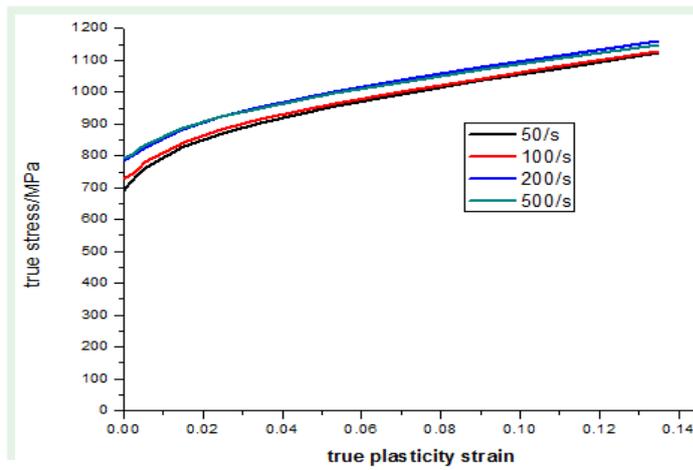


图 B.2 原材料经过 1% 预应变后的高速拉伸性能

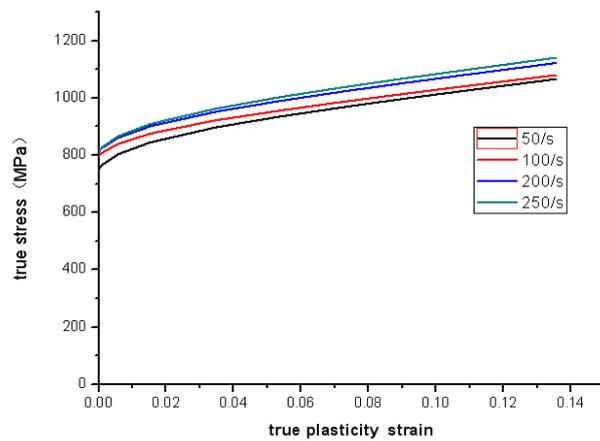


图 B.3 原材料经过 2% 预应变后的高速拉伸性能

单位：毫米（mm）

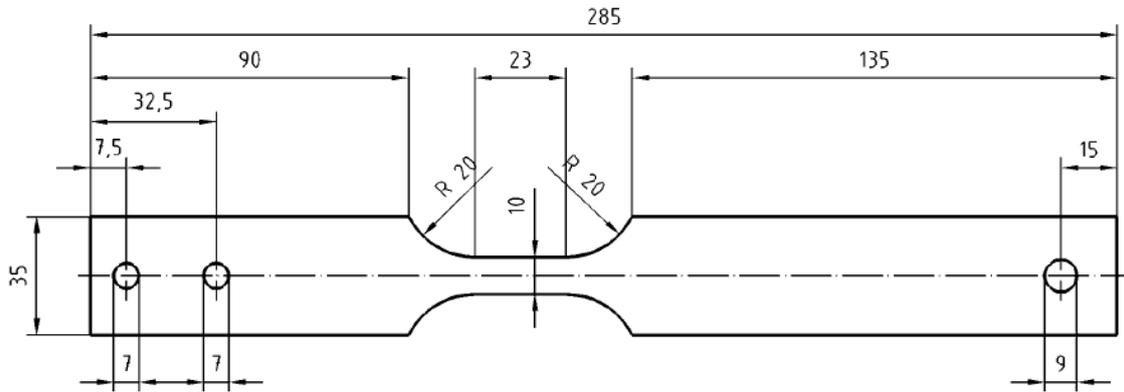


图 C. 3 试样尺寸

单位：毫米（mm）

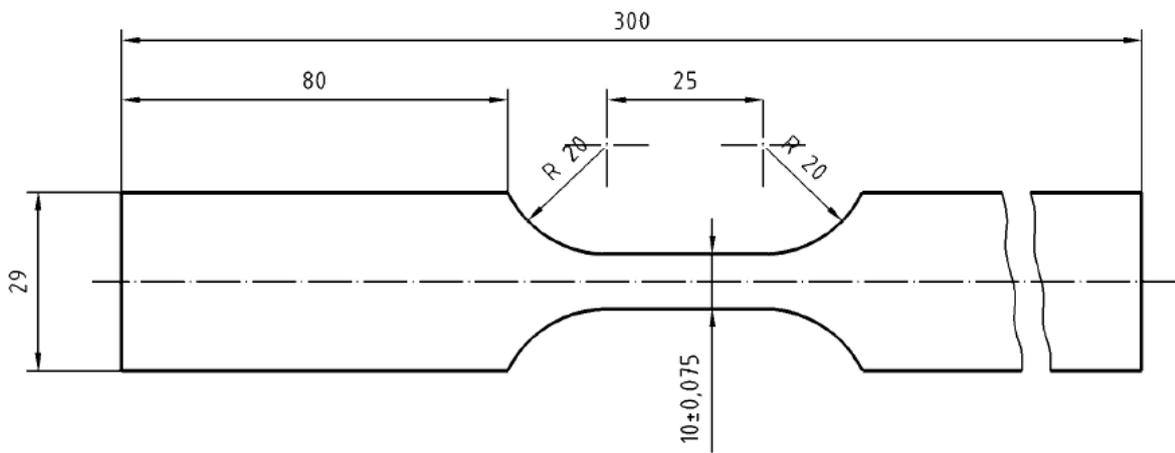


图 C. 4 试样尺寸

附录 D

工程应力-工程应变曲线示例

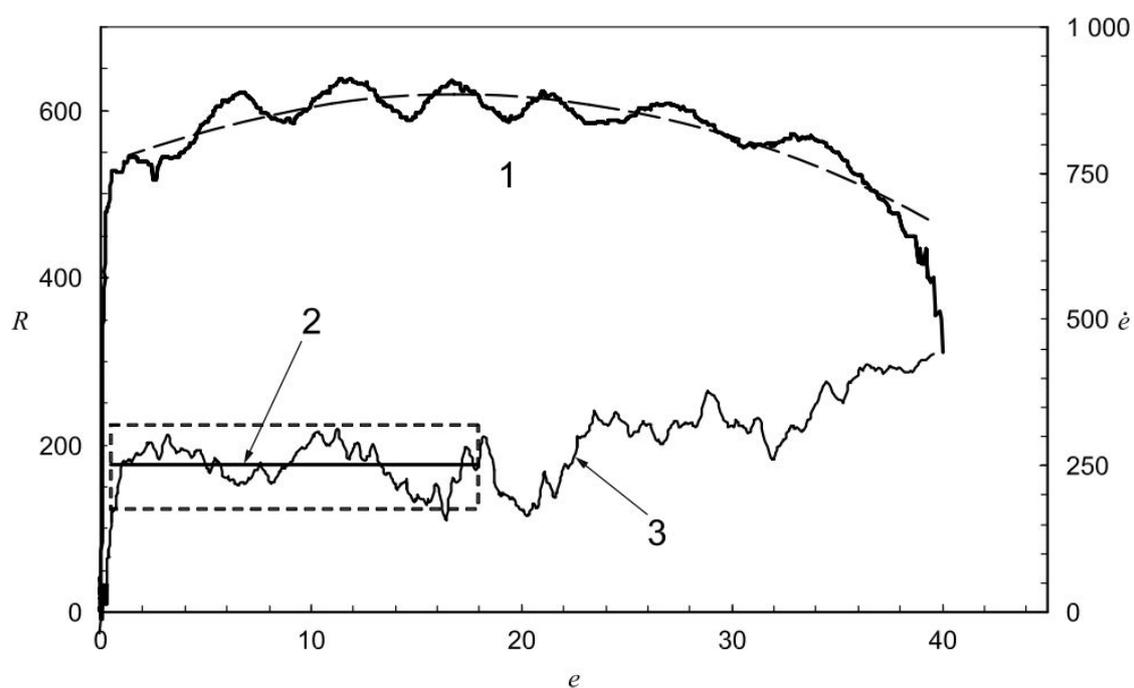


图 D.1 应变速率为 250s^{-1} 时的工程应力-工程应变曲线及相应的应变速率曲线示例图

注：e 工程应变（单位：%）；

R 工程应力（单位：MPa）；

$\dot{\epsilon}$ 应变速率（单位： s^{-1} ）；

1 工程应力-应变曲线（虚线符合多项式结构形式）；

2 特征应变速率= $250\text{s}^{-1}\pm 30\%$ （在 $R_{p0.2}$ 或者 R_{eL} 和 R_m 之间的平均值）；

3 试验过程中实时应变速率曲线；

材料动态力学性能本构模型

E.1 Johnson-Cook (JC) 模型

$$\sigma = (A + B\varepsilon^b) (1 + C \ln \dot{\varepsilon})$$

式中： σ 为流变应力，A、B、C为拟合常数，C为材料的应变速率敏感性，b为材料常数， $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率， ε 为应变。

如需考虑温度影响，Johnson-Cook (JC) 模型可表示为：

$$\sigma = (A + B\varepsilon^b)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}) (1 - T^{*m})$$

$$T^* = \frac{T - T_{\text{室}}}{T_{\text{熔}} - T_{\text{室}}}$$

式中：T为试验温度； $T_{\text{室}}$ 为室温； $T_{\text{熔}}$ 为材料的熔化温度。

E.2 修正Johnson-Cook模型

$$\sigma = B\varepsilon^b \left(1 + C\varepsilon^{b'} \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)$$

式中： σ 为流变应力，B为拟合常数，C为材料的应变速率敏感性，b、 b' 为材料常数， $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率， ε 为应变。

E.3 Zerilli and Armstrong (ZA) 模型

$$\sigma = C_0 + C_1(-C_3T + C_4 \ln \dot{\varepsilon}) + C_5\varepsilon^n$$

式中： C_0 、 C_1 、 C_3 、 C_4 、 C_5 和n为常数，T是绝对温度。本模型适用于BCC-体心立方金属。

E.4 Cowper-Symonds (CS) 模型

$$\dot{\varepsilon} = D \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} - 1 \right)^q$$

式中： σ_0 表示准静态应力；D和q为常数。

参考文献

- [1] Böhme, W: FAT-Richtlinie „Dynamische Werkstoffkennwerte für die Crashsimulation“, MP Materials Testing, Carl Hanser Verlag, München, Vol. 50 (4), p. 199 – 205 (2008)
- [2] Baer, W. und Häcker, R.: Werkstoffcharakterisierung von Gusseisenwerkstoffen mit Kugelgraphit – dynamische Zugversuche unter dem Aspekt der Bauteilsicherheitsbewertung, MP Materials Testing, Vol. 47(12), p. 34-44 (2005)
- [3] Roos, E. and Mayer, U.: Ermittlung von Fließkurven an Blechen bei hohen Dehnungsgeschwindigkeiten, MP Materials Testing, Vol. 44, p. 176-178 (2002)
- [4] Roos, E. and Mayer, U.: Progress in testing sheet material at high strain rates, J. Phys IV France, Vol.110, EDP Sciences, pp. 495-500 (2003)
- [5] Wood, P.K.C. and Schley, C.A.: Strain Rate Testing of Metallic Materials and their Modelling for use in CAE based Automotive Crash Simulation Tools (Recommendations & Procedures), c2009, pub.SmithersRapra, ISBN: 978-1-84735-374-0
- [6] Wood, P.K.C., Schley, C.A., Williams, M.A., Beaumont, R., Rusinek, A., Mayer, U., Pearce, A.: A method to calibrate a specimen with strain gauges to measure force over the full range of loading in high rate testing., Dymat 2009, September 7 -11, Brussels, Belgium (2009)
- [7] Roebuck, B., Loveday, M.S., Chastel, Y., Fiorucci, C. and Dal Negro, T.: Measurement of Flow Stress at High Temperature in Solid Torsion Tests (NPL Good Practice Guide No.58, May 2003) Materials at High Temperatures 23 (2), P. 119-144 (2006)
-