



中华人民共和国国家标准

GB/T 36805.1—2018/ISO 18872:2007

塑料 高应变速率下的拉伸性能测定 第 1 部分:方程拟合法

Plastics—Determination of tensile properties at high strain rates—
Part 1: Equation fitting method

(ISO 18872:2007, Plastics—Determination of tensile
properties at high strain rates, IDT)

2018-09-17 发布

2019-04-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
中国国家标准化管理委员会

前 言

GB/T 36805《塑料 高应变速率下的拉伸性能测定》分为2个部分：

——第1部分：方程拟合法；

——第2部分：直接测试法。

本部分为GB/T 36805的第1部分。

本部分按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本部分使用翻译法等同采用ISO 18872:2007《塑料 高应变速率下的拉伸性能测定》。

与本部分中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

——GB/T 1040.2—2006 塑料 拉伸性能的测定 第2部分：模塑和挤塑塑料的试验条件 (ISO 527-2:1993, IDT)。

本部分做了下列编辑性修改：

——修改了标准名称。

本部分由中国石油和化学工业联合会提出。

本部分由全国塑料标准化技术委员会通用方法和产品分技术委员会(SAC/TC 15/SC 4)归口。

本部分起草单位：金发科技股份有限公司、中蓝晨光化工有限公司、中国石油化工股份有限公司北京化工研究院、上海金发科技发展有限公司、上海延锋金桥汽车饰件系统有限公司、泛亚汽车技术中心有限公司、中蓝晨光成都检测技术有限公司、国家塑料制品质量监督检验中心(福州)。

本部分主要起草人：黄险波、吴博、朱天戈、叶南飏、宋翠翠、刘力荣、梁克俭、袁绍彦、者东梅、庞承焕、周俊龙、蒋丽、田报、郑雯、黄正安。

引 言

塑料材料在不同应变速率下的拉伸性能数据可用于塑料制品、塑料制件的变形和破坏行为的 CAE 模拟分析。而塑料材料对应变速率是敏感的,在高应变速率下的性能与低应变速率下的性能通常呈现不同的规律。

为了规范塑料材料高应变速率下的拉伸性能测定,特制定本标准。本标准对样品类型、测试设备和测试方法都提出了明确的要求。

塑料 高应变速率下的拉伸性能测定

第 1 部分:方程拟合法

1 范围

GB/T 36805 的本部分规定了模塑和挤塑塑料在宽应变速率范围内拉伸性能的测定方法,该宽应变速率范围包含速率近似于冲击加载情况下的高应变速率。通过结合以下方法进行性能测定:测试中低应变速率下的性能,使用数学函数对测试结果进行拟合,通过方程外推得出依赖速率的参数。然后通过计算外推得出高应变速率下的拉伸性能。通过这种方法可以消除高应变速率下性能测定的试验问题及测量的相关误差。中低应变速率下的性能按照 ISO 527-2 的规定进行测定,其规定了适用于本部分的塑料材料类型。

2 规范性引用文件

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 1040.1—2006 塑料 拉伸性能的测定 第 1 部分:总则(ISO 527-1:1993, IDT)

ISO 527-2 塑料 拉伸性能的测定 第 2 部分:模塑和挤塑塑料的试验条件(Plastics—Determination of tensile properties—Part 2: Test condition for moulding and extrusion plastics)

ISO 2818 塑料 试样的机加工制备(Plastics—Preparation of test specimens by machining)

3 原理

拉伸应力-应变曲线是在 0.1 mm/s~100 mm/s 的范围内的选定速率下按照 ISO 527-2 测试获得。为获得更高速率下最高精度的测试结果,需注意第 5 章中描述的测试装置的设计特点。同时,测量泊松比随应变的变化。根据这些结果,可计算出各应变速率下的真实应力和真实塑性应变值。通过数学函数方程可对各应力/塑性应变曲线进行准确模拟。同时,也可以建模分析此函数中的参数随应变速率的变化,从而外推得出更高应变速率下的参数值。通过计算可获得更高应变速率下的应力/应变曲线。

4 术语和定义

GB/T 1040.1—2006 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

4.1

真实应力 true stress

σ_T

同一时刻下,测量力与试样标距间横截面积之比。

4.2

真实应变 true strain

ϵ_T

同一时刻下,标距间伸长量与标距长度之比。

4.3

真实塑性应变 true plastic strain

ϵ_{Tp}

在某真实应力 σ_T 下的真实应变与该应力下真实弹性应变 ϵ_{Te} 之差。

5 设备

5.1 测试装置

对设备的一般要求见 GB/T 1040.1—2006。当测试速率达到 10 mm/s 以上时,通常要使用液压伺服式测试设备。测试速率在 10 mm/s 以上时,力值的测量误差会增大。这些测量误差与力传感器共振模式、测试样品以及测试装置中的部件有关。为在更宽的测试速率范围内达到令人满意的测试精度,测试装置的设计是非常重要的,推荐使用高刚度的测力传感器(如压电式的)和轻质高刚度的部件。

5.2 引伸计

使用轻质引伸计或非接触式引伸计,可在保证测量精度的前提下使测试速率的上限最大化。对于试样大应变的测试,应使用小标距(例如 4 mm)的装置(见 6.2)。

5.3 数据记录设备

为准确记录所有测试速率下的力-形变曲线,用于记录力传感器和引伸计信号的设备应具有足够高的数据采集频率。

6 试样

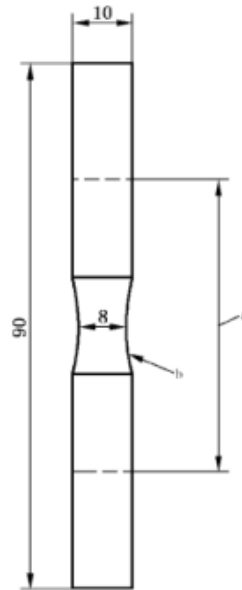
6.1 低应变测量

对于在屈服应变以下的性能测试(见 GB/T 1040.1—2006 的 4.7),可使用标准中的 1A、1B 或 1BA 试样。试样可按照 ISO 2818 由板材或模塑样品经机加工制备。

6.2 高应变测量

6.2.1 达到屈服应变之后,应力达到最大值或随应变增加应力缓慢增加,标准试样标距间的应变呈现非均匀变化。在极端情况下会出现明显颈缩,因此可通过测量夹具间距的改变作为标称应变(见 GB/T 1040.1—2006 的 4.10)。这种方法下获得的应变会存在未知的误差,并且对于某些材料误差会很大。为得到更高的测量精度,应使用如图 1 所示的替代试样。这种试样具有相同的厚度,在试样长度方向的中间位置通过弧形切割将宽度从 10 mm 降低到 8 mm。试样厚度是非关键性参数,可通过 1A 或 1B 型样条、片材或模塑件(见 ISO 2818)中间区域加工得到。此时应变产生的位置在试样中间,并且纵向和横向的应变都可测量。长度为 $4\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ 的引伸计可用于测量纵向应变(见 6.2.2),用于计算真实应力的横向应变通过加载在试样宽度或厚度方向的横向引伸计测量获得。

6.2.2 由于屈服之后会发生应变局域化,因此采用小的标距可获得相对均匀的应变。但是在低应变下这类小标距会导致应变测量准确度显著下降。因此,在低于屈服应变时的应变性能测定应采用标准试样(见 6.1);当应变超过屈服应变后,采用图 1 所述的小标距试样测量应变会获得满意的准确度。



^a 夹具距离=50 mm。

^b 开槽曲率半径=35 mm。

图 1 用于高应变速率下拉伸行为测定的新拉伸试样

7 状态调节

见 GB/T 1040.1—2006 的第 8 章。

8 测试步骤

8.1 通则

见 GB/T 1040.1—2006 的 9.1~9.5。

8.2 试验速率

试样应在 0.1 mm/s、1 mm/s、10 mm/s 和 100 mm/s 速率下进行测试。若最高速率下的测试结果不可信,或对结果分析有更高要求时,可额外在 0.3 mm/s、3 mm/s 和 30 mm/s 中选择测试速率。

8.3 数据记录

在测试过程中采用合适的时间间隔记录力和标距段试样宽度或厚度的变化。

9 结果计算及表示

9.1 低应变测试

9.1.1 工程应力 σ 、工程应变 ε 、拉伸模量 E 和泊松比 μ 的确定

应用 1A、1B 或 1BA 试样在各测试速率下进行拉伸测试,得出达到屈服应变前的应力应变测试结

果(参照 GB/T 1040.1—2006 的 10.1 和 10.2)。每一个应变速率下的拉伸模量按 GB/T 1040.1—2006 中 10.3 所述的方法进行计算。在此应变范围内计算每一测试速率下泊松比的平均值(见下面的注与 GB/T 1040.1—2006 的 10.4)。

注:达到屈服应变之前时,拉伸模量和应力/应变曲线会随测试速率而变化,泊松比本质上不随测试速率和应变变化。

9.1.2 真实应力 σ_T 的确定

根据式(1)计算各应变下的真实应力:

$$\sigma_T = \frac{\sigma}{(1 - \mu\epsilon)^2} \dots\dots\dots(1)$$

式中:

- σ ——工程应力,单位为兆帕(MPa);
- μ ——由工程应变计算的泊松比;
- ϵ ——工程应变。

9.1.3 真实应变 ϵ_T 的确定

根据式(2)计算真实应变:

$$\epsilon_T = \log_e(1 + \epsilon) \dots\dots\dots(2)$$

9.1.4 真实塑性应变 ϵ_{Tp} 的确定

根据式(3)计算各真实应变下的真实塑性应变:

$$\epsilon_{Tp} = \epsilon_T - \epsilon_e = \epsilon_T - \frac{\sigma}{E} \dots\dots\dots(3)$$

式中, ϵ_e 为弹性部分的应变,考虑到 $\epsilon_e \ll 1$ 时不用再计算真实弹性应变,因此式(3)做了这样的近似处理。

注:对于高应变速率下的性能计算,建议拟合测试的应力应变曲线,外推高应变速率下的参数。为达到这一目的,需要区分弹性变形产生的应变(弹性应变)与塑性变形产生的应变(塑性应变或有效塑性应变)的影响,才能实现应用一个函数方程描述宽应变范围的曲线的功能,尽管在方程中只有一个参数随着应变速率的变化而变化。这种弹性和塑性行为的分离获得的数据可用于韧性材料变形的有限元分析。

9.1.5 塑性应变速率 $\dot{\epsilon}_{Tp}$ 的确定

对于单次测试中有效塑性应变速率的计算,可以通过测试峰值应力下的塑性应变对应时间的斜度确定,如没有峰值应力则采用屈服应力(见下面的注)。

注:在整个测试中,塑性应变速率会不断变化,一般在峰值应力或屈服应力附近会达到最大值。

9.1.6 弹性应变速率 $\dot{\epsilon}_e$ 的确定

通过计算低应变下的线性范围内应变随时间的变化速率得到弹性应变速率。

9.2 高应变测试

9.2.1 应力 σ 、应变 ϵ 、泊松比 μ 与应变 ϵ 关系的确定

采用符合图 1 所示尺寸的样品,测试每一速率下的应力、应变值(参照 GB/T 1040.1—2006 的 10.1 和 10.2)。同时,确定泊松比随应变的变化曲线。每个测试速率下选择一典型的泊松比-应变曲线(详见下面的注)。

注：泊松比很难准确定量，而且多个测试间也存在较大差异。通过泊松比的重复测试可以得到各应变速率下泊松比随应变的变化关系。

9.2.2 真实应力 σ_T 的确定

根据 9.1.2 中的式(1)计算每一个应变 ϵ 下的真实应力 σ_T ，此时 μ 指应变为 ϵ 时的泊松比值。

9.2.3 真实应变 ϵ_T 的确定

根据 9.1.3 中的式(2)计算真实应变。

9.2.4 真实塑性应变和塑性应变速率的确定

分别根据 9.1.4 和 9.1.5 计算在每一个真实应变 ϵ_T 下的真实塑性应变和每次测试的有效塑性应变速率。

10 应力塑性应变曲线建模分析

见 9.1.4 中的注。

10.1 低应变测量

拟合模型衍生出的参数 σ_0 、 σ_f 、 ϵ_{op} 、 β 的数值，从而使每一测试速率下的真实应力 σ_T 与 9.1 计算的塑性应变 ϵ_{Tp} (参见附录 A 和下面的注)很好地契合。

$$\sigma_T = \sigma_0 + (\sigma_f - \sigma_0) [1 - e^{-(\epsilon_{Tp}/\epsilon_{op})^\beta}] \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

σ_0 ——无塑性应变时的应力，其值取决于代表应力应变曲线的线性段的斜率 E [见式(3)]；

σ_f ——高塑性应变时的极限应力。

参数 ϵ_{op} 和 β 决定平均塑性应变及应变范围，在这个范围内，真实应力随着真实塑性应变的增加而增加。

注：式(4)中的参数具有重要的物理意义。对于大部分塑料而言， σ_f 是随着应变速率的变化而呈现显著变化的唯一参数。 σ_0 随着应变速率的变化呈现较小程度的变化，在近似度很好的情况下， σ_0/σ_f 假定为一个常量。同样的，在试验误差范围内， ϵ_{op} 和 β 也将保持一个恒定值。对于某些材料，随着应变速率的变化， ϵ_{op} 的改变会使曲线形状发生微小的变化。

10.2 高应变测量

通过式(4)可对 9.2 描述的宽应变速率范围内的真实应力和真实塑性应变的数值进行最佳拟合。如果在高应变速率下不能很好地拟合试验数据时，可对式(4)稍作修正以提高拟合度(参见附录 B)。

11 宽应变速率范围内的性能确定

11.1 拉伸模量

对于塑料材料而言，拉伸模量在一个较大的温度范围内，其相对应应变速率的变化很小。在高应变速率条件下，当需要很精确的拉伸模量数据时，可根据 9.1.1 测得的 E 的数据值外推得出。为此， E 与弹性应变速率 $\dot{\epsilon}$ (见 9.1.6) 的变化关系可用式(5)模型化：

$$E = E_0 (1 - k / \dot{\epsilon}^n) \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中，参数 E_0 、 k 和 n 由式(5)与试验数据之间最佳拟合获得。

11.2 应力/塑性应变曲线

11.2.1 通则

在高应变速率下的应力塑性应变曲线通过代入每一个应变速率下 σ_f 、 σ_0 、 ϵ_{sp} 和 β 适当的数值,利用 10.1 中式(4)或附录 B 中式(B.1)、式(B.2)计算得出。曲线的计算涉及这些参数在高应变速率下的值。这些参数在高应变速率下的值可以按照 11.2.2 或 11.2.3 通过外推法计算。研究结果表明这里描述的外推方法在最大测试速率以上两个数量级的应变速率下仍然可以给出精确度符合要求的数据。尽管有些武断,这个界限应用到了接下来的分析中。但对于某些材料而言,有效数据的获得并不受限。

11.2.2 参数 σ_f 的确定

将参数 σ_f (由 10.1 或 10.2 计算)与塑性应变速率(由 9.1.5 或 9.2.4 计算)的对数作图。将数据进行最佳的线性拟合,并将直线外推至最大测试速率以上两个数量级的应变速率。在此范围内可通过图形或式(6)得出任一应变速率下的 σ_f 值:

$$\sigma_f = \sigma_{f0} + a \log \dot{\epsilon}_{Tp} \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中:

σ_{f0} —— 应力轴上的截距;

a —— 曲线斜率。

11.2.3 参数 σ_0/σ_f 、 ϵ_{sp} 和 β 的确定

根据在不同应变速率下的试验数据拟合式(4)的参数值(见下面的注),获得每一个参数的平均值,从而得出这些参数的单一数值。

注:如 10.1 的注所述,某些材料的参数 ϵ_{sp} 可能随应变速率的变化显示出很小的变化,但这种情况确实存在。这可以通过 ϵ_{sp} 和应变速率的对数呈近似线性的关系进行模拟。那么在任意的应变速率下, ϵ_{sp} 的数值可通过类似 σ_f 描述的内插或外推的方法计算得出。

12 精密度

按本部分测试得到的各参数的精密度尚不能确定。该精密度不仅部分取决于试验数据的准确度,同时也与利用式(1)~式(6)对数据进行分析 and 建模的优劣有关。高应变速率下结果的准确度跟利用式(5)和式(6)外推获得的数据值的正确性有关。尽管本部分的方法是基于正确的物理学原理,但对于多种塑料材料在宽应变速率范围内的数据准确度尚未可知,然而这可以通过在低于环境温度的条件下进行探究。因此,本部分规定,外推法仅限应用于最大测试应变速率之上的两个数量级。该限制是建立在可获得的试验数据基础上的,在以后的标准版本变更中应再次审定。

附录 A
(资料性附录)

低应变测量下的真实应力-真实塑性应变曲线建模示例

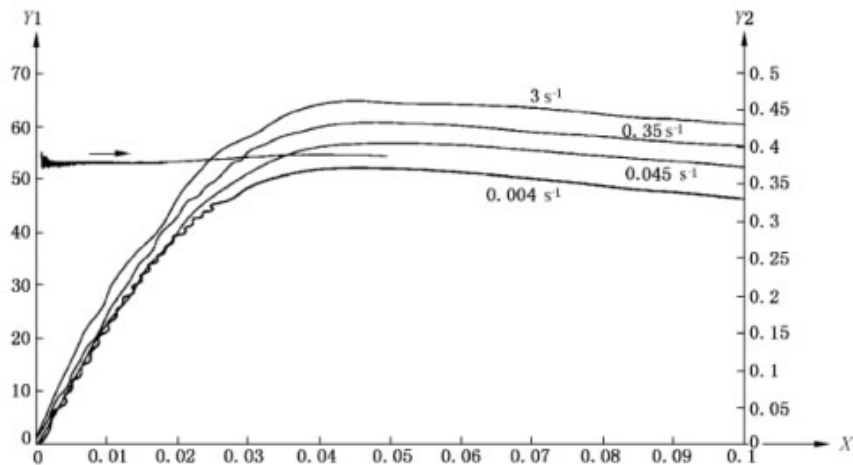
图 A.1 表示一种韧性的聚合物材料在从 0.1 mm/s 到 100 mm/s 的测试速率范围内的工程应力/应变曲线,采用的样条类型是 1BA 型样条。曲线中的速率是根据 9.1.5 计算得到的塑性应变速率。泊松比是在试验速率为 0.1 mm/s 时测得的。

图 A.2 显示了根据式(1)、式(2)和式(3)以图 A.1 的数据计算得出的真实应力和真实塑性应变曲线。式(3)中参数 E 的数值是由低应变速率下的线性段的斜率计算得出的。

图 A.2 同时也显示了试验数据如何运用式(4)模型化。表 A.1 中给出式(4)中在每一测试速率下的参数数值,可以看出只有应力峰值这个参数随着应变速率的变化呈现明显的变化。

表 A.1 用于获得图 A.2 中拟合拉伸数据的式(4)中的各参数值

测试速度 mm/s	应变速率 s^{-1}	σ_t MPa	σ_c MPa	ϵ_{op}	β
0.1	0.004	54.5	25	0.004	0.8
1	0.045	59.5	25	0.004	0.8
10	0.350	64.0	25	0.004	0.8
100	3.000	67.5	25	0.004	0.8



说明:

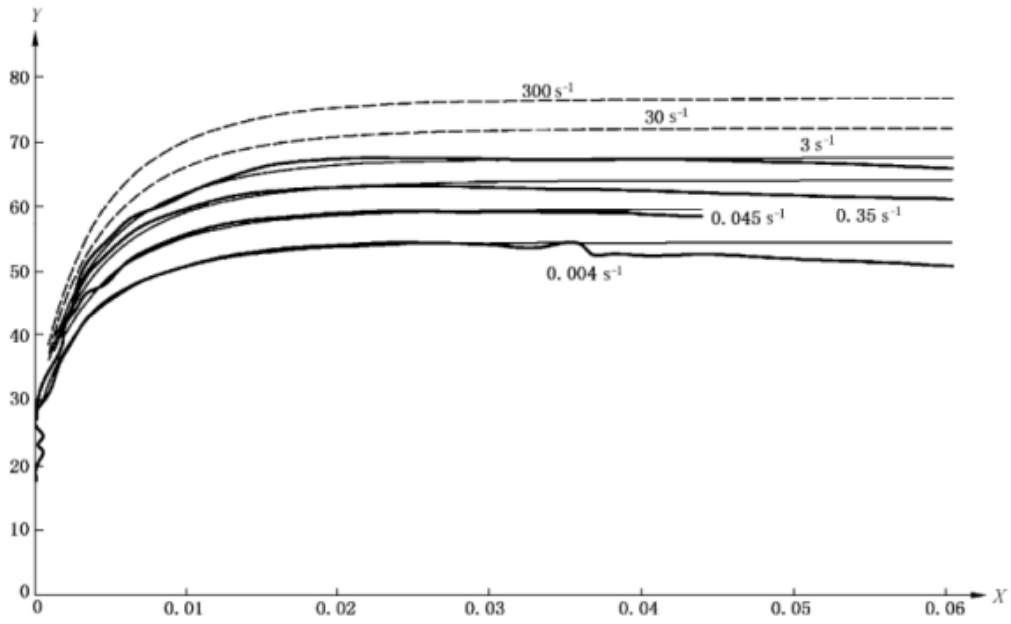
X ——工程应变;

Y1 ——工程应力,MPa;

Y2 ——泊松比。

注:测试泊松比时采用 0.1 mm/s 的速率。

图 A.1 采用 1BA 样条在速率为 0.1 mm/s、1 mm/s、10 mm/s、100 mm/s 时测试的应力/应变曲线



说明：

X —— 真实塑性应变；

Y —— 真实应力，MPa；

—— 测量值；

—— 由式(4)模拟得出；

—— 通过式(4)与式(6)得出的预估值。

注：两条最高应变速率下的曲线由式(4)与式(6)算出。

图 A.2 由模拟式(1)、式(2)和式(3)得出的图 A.1 所对应的真实应力-真实塑性应变曲线

附录 B
(资料性附录)

高应变下真实应力-真实塑性应变曲线的建模示例

在全应变约为 0.06(塑性应变约为 0.04)以下时式(4)能够较好地给出应力-塑性应变的关系曲线。当随着塑性应变增加而真实应力 σ_T 变化较小或者其他因素对真实应力 σ_T 的影响可忽略不计时,式(4)能够在较宽的应变速率范围内较好地满足应用。当需要更准确地描述曲线时只需要将式(4)做一个很小的改变。在较高应变下,应力-塑性应变曲线是近似线性的,即随着塑性应变的增加,应力增加或降低。这可以通过在 σ_T 的公式上增加一个线性函数来实现,即:

$$\sigma_T = \sigma_0 + (\sigma_i^* - \sigma_0)[1 - e^{-(\epsilon_{Tp}/\epsilon_{sp})^\beta}] + f\epsilon_{Tp} \dots\dots\dots (B.1)$$

由于额外增加了一项,且如果随着 ϵ_{Tp} 的变化而应力降低时参数 f 将是负值,因此用参数 σ_i^* 代替式(4)中的参数 σ_i 。另外需要注意,当增加最后一项时,参数 σ_i^* 的值将与式(4)中获得的 σ_i 的值完全不同。

对于大多数的高分子材料而言,在应力峰值出现后会随着塑性应变的增加应力降低。这往往是在较高应变下应力增加之后出现的。主要是因为受到材料分子排布的刚性影响。满足这种关系的曲线可以由式(4)增加一个类抛物线的参数项得到,即:

$$\sigma_T = \sigma_0 + (\sigma_i^* - \sigma_0)[1 - e^{-(\epsilon_{Tp}/\epsilon_{sp})^\beta}] - 2 \frac{\delta}{\epsilon_{sp}} \epsilon_{Tp} + \frac{\delta}{\epsilon_{sp}^2} \epsilon_{Tp}^2 \dots\dots\dots (B.2)$$

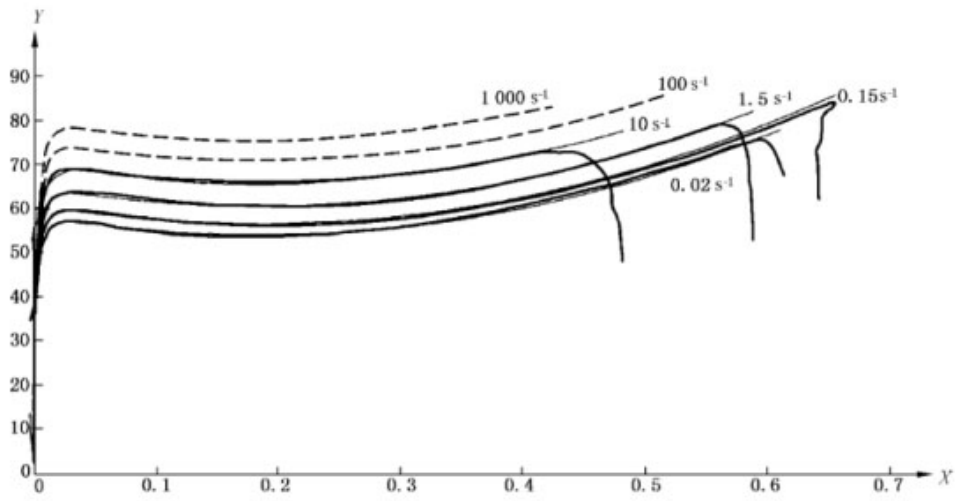
参数 δ 与 ϵ_{sp} 为: δ 用来描述在应力出现峰值之后的应力下降, ϵ_{sp} 为应力最小时的塑性应变。式(B.2)中的参数 σ_i^* 仍然比式(4)中的 σ_i 稍大一些,因为要弥补由加入类抛物线参数项而引起地峰值之后的应力值降低。

将式(B.2)用于拟合 9.2 中的较高应变下的结果。图 B.1 为应用表 B.1 中的参数进行模拟计算得到与试验结果相近的曲线。

表 B.1 用于获得图 B.1 中拟合拉伸数据的式(B.2)中的各参数值

测试速度 mm/s	应变速率 s ⁻¹	σ_i^* MPa	σ MPa	ϵ_{sp}	β	ϵ_{sp}	δ MPa
0.1	0.02	58.5	25	0.004	0.8	0.185	4.5
2	0.15	61.0	25	0.004	0.8	0.185	4.5
10	1.50	65.0	25	0.004	0.8	0.185	4.5
100	10.00	70.5	25	0.004	0.8	0.185	4.5

两条最高应变速率下的曲线是由式(B.2)采用表 B.1 中的参数 ϵ_{op} 、 ϵ_{sp} 与 β 值拟合得到的。在每个应变速率下的 σ_i^* 值由式(6)外推得到。随着 σ_i 被 σ_i^* 取代, σ_i^* 也将采用应变速率的对数值来表示。



说明:

X——真实塑性应变;

Y——真实应力,MPa;

——测量值;

——由式(B.2)模拟得出;

-----通过外推式(6)与计算式(B.2)得到的计算值。

注: 两条最高应变速率下的曲线由式(6)与式(B.2)算出。

图 B.1 采用图 1 所示新型样条测试得出的真实应力-真实塑性应变曲线与采用式(B.2)模拟得出的真实应力-真实塑性应变曲线

