

# 超高强度钢形变与断裂规律研究\*

韩 富 义\*\*

(鞍钢钢铁研究所, 1980年11月12日收到)

## 摘 要

运用先进的物理方法, 测出了超高强度钢负荷-伸长曲线新的形状, 建立了一种由负荷-伸长全曲线计算真应力-真应变的方法, 计算结果指出: 在整个变形阶段中, 不论是在最大负荷前或最大负荷后都是分段幂乘硬化的, 最后研究硬化指数的计算方法, 供讨论。

## 一、引 言

早在1660年, 英国科学家虎克<sup>[1]</sup>在试验基础上提出了著名的虎克定理, 奠定了弹性理论的基础。关于塑性阶段的形变规律, 一直没有统一的理论, 只是提出了一些公式来拟合试验数据。在1945年, J. H. Hollomon提出<sup>[2]</sup>, 从屈服到最大负荷这一段, 服从幂乘硬化律, 从最大负荷至断裂这一段, 现有的理论则认为线性硬化的。

近年来, 一些学者发现<sup>[3]</sup>, 从屈服至最大负荷这一段, 不是简单的幂乘硬化的, 而是分段幂乘硬化的。我国学者陈篪发现<sup>[4]</sup>, 从最大负荷至断裂这一段, 也是幂乘硬化的, 并提出了大塑性变形硬化指数的新概念。也有些文献<sup>[5][6]</sup>指出从屈服到断裂整个阶段都是一段幂乘硬化的, 而且硬化指数等于最大负荷时的真应变值, 即 $n = \epsilon_0$ 。这样定义的硬化指数有着广泛的应用。1964年Krafft提出 $K_{1c} = nE\sqrt{2\pi d_1}$ 。这个计算断裂韧性 $K_{1c}$ 的公式尽管有明确的物理意义和一定的理论价值, 但是它却直接与当时出现的马氏体时效钢发生了矛盾。因为, 众所周知, 马氏体时效钢的 $K_{1c}$ 很大而 $n$ 却很小。理论需要发展, 试验研究也需发展。

目前研究形变规律的方法, 都是采用卡尺测量或照像法。这两种方法除了误差大以外, 主要缺点是不能连续的测量, 而只能纪录几个孤立的数据。我们采用连续精确地测出材料的负荷-伸长曲线, 然后建立计算真应力-真应变的方法, 具有可以详细研究拉伸全过程的优点。

## 二、负荷-伸长全曲线的测量

本文对两类超高强度钢进行试验研究, 一类是高合金18Ni马氏体时效钢, 一类是低合金

\* 钱伟长推荐。

\*\* 参加本文试验工作的有: 李长城, 孙长利, 罗颖为, 孙天元等。

中碳超高强度35Cr Mn Si A钢, 他们的化学成份和基本力学性能列于表1、2中。

表 1 化 学 成 份

钢 种	化 学 成 份 (重 量 %)										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Co	Al	Ti	Ni
18Ni Marage	0.025	0.08	0.09	0.008	0.006	—	5.0	9.0	0.10	0.45	18.0
35Cr Mn Si A	0.35	1.15	0.87	0.018	0.013	1.20	—	—	—	—	—

表 2 机 械 性 能

钢 种	$\sigma_s$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\delta_5$ (%)	$\psi$ (%)
18Ni Marage	185.0	12.0	55.0
35Cr Mn Si A	195.0	10.0	43.0

负荷测量使用半导体应力传感器, 应变测量使用夹式引伸计, 纪录使用光线示波器, 整个试验是在 Amsler 万能材料试验机上进行。光线示波器同时纪录出负荷-时间和伸长-时间曲线。消掉时间, 就可以得到负荷-伸长曲线, 见图1、2。

### 三、由负荷-伸长曲线计算真应力-真应变曲线

#### 1. 均匀伸长段的计算

均匀伸长段从形变开始直到产生颈缩为止。此段试样保持为圆柱体。体积不变原理为

$$l_0 \pi r_0^2 = l \pi r^2 \quad (3.1)$$

$$\text{依定义 真应力 } \sigma = \frac{p}{\pi r^2} = \frac{p}{\frac{l_0}{l} \pi r_0^2} = \frac{p}{\pi r_0^2} \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0}\right) \quad (3.2)$$

$$\text{真应变 } e = \ln \frac{\pi r_0^2}{\pi r^2} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0}\right) \quad (3.3)$$

#### 2. 局部伸长段的计算

局部伸长段是指从颈缩开始直到断裂这一段。试验研究指出, 颈缩开始后, 形变集中在颈缩区。试样表面的形状, 对于超高强度钢来说, 相当准确地符合双曲线。双曲线方程如下

$$\frac{x^2}{r^2} - \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (3.4)$$

式中  $b$  为一常数, 其他各量意义见图 3。

$b$  可以用拉伸过程中任一时刻肩点  $A$  的坐标来确定。设颈缩部分长度为  $2L$ , 两端半径为  $r_0$ ,

$$\frac{r_0^2}{r^2} - \frac{L^2}{b^2} = 1, \quad b^2 = \frac{L^2}{\frac{r_0^2}{r^2} - 1} = \frac{L^2 r^2}{r_0^2 - r^2} \quad (3.5)$$

体积不变原理可表达为

$$\pi r_i^2 L_b = \int_0^L S(x) dz = \int_0^L \pi x^2 dz = \int_0^L \pi r^2 \left( 1 + \frac{z^2}{b^2} \right) dz = \pi r^2 \left( L + \frac{L^3}{3b^2} \right)$$

由(3.5)式, 将  $b^2$  代入整理得:

$$\pi r_i^2 L_b = \frac{1}{3} \pi L (r_i^2 + 2r^2)$$

设断裂后试样中心半径为  $r_f$ , 两端半径  $r_D$

$$\text{则有} \quad \pi r_i^2 L_b = \frac{1}{3} \pi L (r_i^2 + 2r^2) = \frac{1}{3} \pi L_f (r_D^2 + 2r_i^2) \quad (3.5)$$

因为  $L_f = \frac{\Delta l_f - \Delta l_b}{2} + L_b$  代入(3.6)式

$$\pi r_i^2 L_b = \frac{\pi}{3} \left[ L_b + \frac{\Delta l_f - \Delta l_b}{2} \right] (r_D^2 + 2r_i^2)$$

$$L_b = \frac{1}{6} \frac{(r_D^2 + 2r_i^2)(\Delta l_f - \Delta l_b)}{r_i^2 - \frac{1}{3}(r_D^2 + 2r_i^2)}$$

$$\text{由(3.6)式} \quad r^2 = \frac{1}{2} \left[ (r_D^2 + 2r_i^2) \frac{L_f}{L} - r_i^2 \right]$$

$$\text{因为} \quad L = L_b + \frac{\Delta l - \Delta l_b}{2}, \quad L_f = L_b + \frac{\Delta l_f - \Delta l_b}{2}$$

$$\text{则有} \quad r^2 = \frac{1}{2} \left[ (r_D^2 + 2r_i^2) \frac{L_b + \frac{\Delta l_f - \Delta l_b}{2}}{L_b + \frac{\Delta l - \Delta l_b}{2}} - r_i^2 \right]$$

$$\text{真应力} \quad \sigma = \frac{p}{\pi r^2} = \frac{p}{\frac{\pi}{2} \left[ (r_D^2 + 2r_i^2) \frac{L_b + \frac{\Delta l_f - \Delta l_b}{2}}{L_b + \frac{\Delta l - \Delta l_b}{2}} - r_i^2 \right]} \quad (3.7)$$

$$\text{真应变} \quad \epsilon = \ln \frac{\pi r_0^2}{\pi r^2} = -\ln \frac{1}{2r_0^2} \left[ (r_D^2 + 2r_i^2) \frac{L_b + \frac{\Delta l_f - \Delta l_b}{2}}{L_b + \frac{\Delta l - \Delta l_b}{2}} - r_i^2 \right] \quad (3.8)$$

由负荷-伸长曲线取出  $p$ 、 $\Delta l$  值, 就可以计算出  $\sigma$  和  $\epsilon$  来。

#### 四、计算结果

将计算出的真应力、真应变和双对数真应力、真应变数值绘在图4、5中。从图4可以看

出,若不考虑断裂前真应力下降这一段,包括断裂点在内的其他所有点,从最大负荷到断裂这一段是近似满足线性硬化规律的.这说明原有的线性理论有一定可靠性,也说明我们这里建立的方法是有效的.在断裂前这个真应力下降段,显然是与负荷-伸长曲线上断裂时的负荷恒定段有关.也就是说,由于这个二次平台的出现,最大负荷至断裂这一段就不能再用线性硬化理论了,而这个平台用一般测试方法是不易测出的.从图5可以看出,从屈服至最大负荷和从最大负荷至断裂这二段,都是分二段幂乘硬化的.这样,从屈服至断裂的整个过程都可以统一看成分段幂乘硬化的了.

## 五、讨论与结论

### 1. 负荷-伸长曲线的新形状

我们测出的负荷-伸长曲线在断裂时出现的负荷恒定阶段,这在国内外文献上尚没有发现有所报导.我们认为这是一个全曲线,而一般文献书籍上的负荷-伸长曲线则是半曲线.断裂时的负荷恒定段说明断裂是一个过程,自己构成一个阶段.最近,文献[7]在评价陈麓的工作时认为大塑性形变硬化指数的提法是有问题的,其原因是断裂点的应力应变双对数值,往往不在双对数应力应变曲线上.我们的工作指出,若把负荷-伸长曲线看成圆滑的,的确断裂点不在曲线上.关键是断裂时负荷有一恒定阶段,考虑到这个二次平台,断裂点就在曲线上了.这个二次平台与杯状断口的 $45^\circ$ 剪切唇有关.我们对缺口拉伸作了试验,由于断面几乎没有收缩,在负荷-伸长曲线断裂段没有这个二次平台(见图6).

### 2. 硬化指数的计算方法

引言中已经提到 $n = \epsilon_b$ 这个简便的计算硬化指数的方法,但它有个重要假设,即在包括最大负荷在内的整个变形阶段或至少在一个邻域内是满足同一幂乘硬化定律的.由图4、5可知,这个假定不是总成立的,对35Cr Mn Si A钢来说,由于最大负荷处正好是分段幂乘的拐点,所以这种求硬化指数的方法是有问题的.对18Ni钢由于在最大负荷前后一段符合统一的硬化规律,所以 $n = \epsilon_b$ 是成立的,但它只是这一段的硬化指数.本文建立的计算硬化指数的方法,本质上是一种图解法.由于负荷-伸长曲线的连续性,所以可测出全部拉伸过程各阶段的硬化指数.可以根据实际问题的需要,分别求出形变各阶段的硬化指数来.

### 3. 局部形变长度的计算

人们在长期生产和试验过程中,多次发现在材料断裂后,断口附近有一个局部形变区,而这个局部形变区的尺寸不同材料是不一样的.对单轴拉伸来说,例如<sup>18)</sup>软钢的局部形变区长度较短,而这个材料经过一定的加工硬化后再拉伸,这个局部形变区就增加了.显然这个长度是与材料有关的重要力学参量.本文提出了一个计算局部形变区长度的方法.第三部分提到的 $L_0$ 就是在最大负荷时局部形变区的长度之半,试样形变前和断裂后局部形变区的长度 $2L_0$ 和 $2L_f$ 可用下式计算

$$2L_0 = 2L_b \frac{r_b^2}{r_0^2} = \frac{1}{3} \frac{r_b^2}{r_0^2} \frac{(r_b^2 + 2r_f^2)(\Delta l_f - \Delta l_b)}{r_f^2 - \frac{1}{3}(r_b^2 - 2r_f^2)}$$

$$= \frac{1}{3} \frac{l_0}{l_0 + \Delta l_b} \cdot \frac{(r_D^2 + 2r_i^2)(\Delta l_f - \Delta l_b)}{r_b^2 - \frac{1}{3}(r_D^2 - 2r_i^2)} \quad (5.1)$$

$$2L_f = 2L_b + (\Delta l_f - \Delta l_b) = \frac{1}{3} \frac{(r_D^2 + 2r_i^2)(\Delta l_f - \Delta l_b)}{r_b^2 - \frac{1}{3}(r_D^2 + 2r_i^2)} + (\Delta l_f - \Delta l_b) \quad (5.2)$$

作者对在试验及写作过程中肖纪美教授、赖祖涵教授和崔峰高级工程师兼所长的指导，并对钱伟长教授的关怀、鼓励深表谢意。

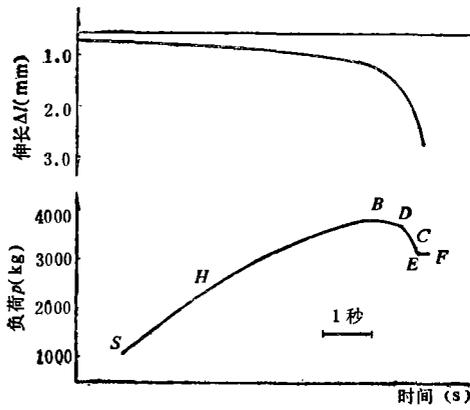


图1 负荷-时间, 伸长-时间曲线  
钢种: 35Cr Mn Si A, 光滑试棒拉伸

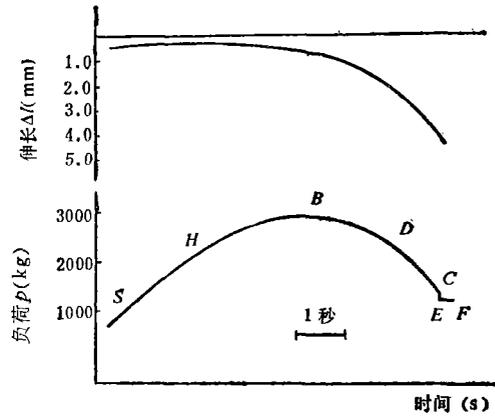


图2 负荷-时间, 伸长-时间曲线  
钢种: 18Ni时效钢, 光滑试样拉伸

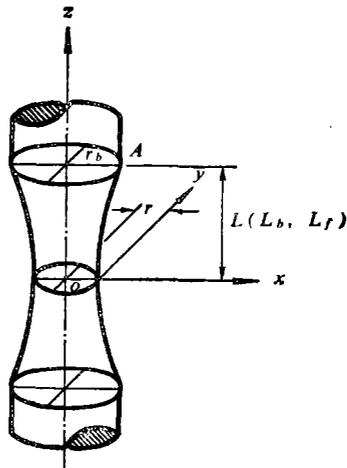


图3 颈缩区示意图

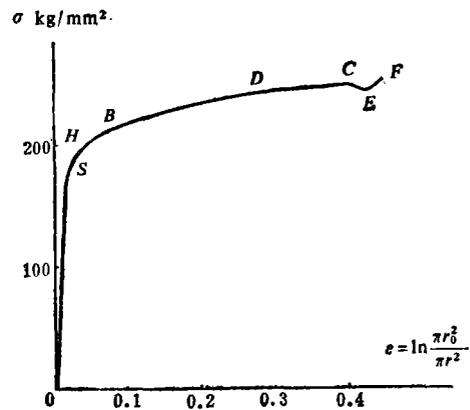


图4a 真应力-真应变曲线  
钢种: 35Cr Mn Si A, 光滑试棒拉伸

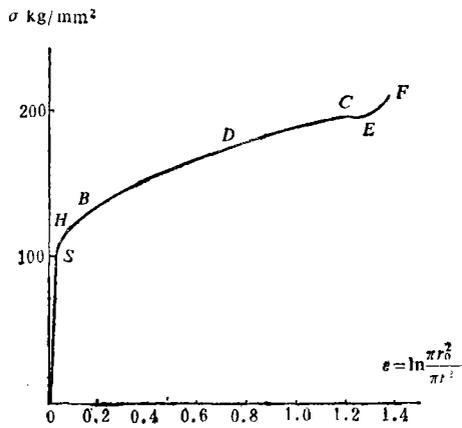


图4b 真应力-真应变曲线  
钢种: 18Ni, 光滑试棒拉伸

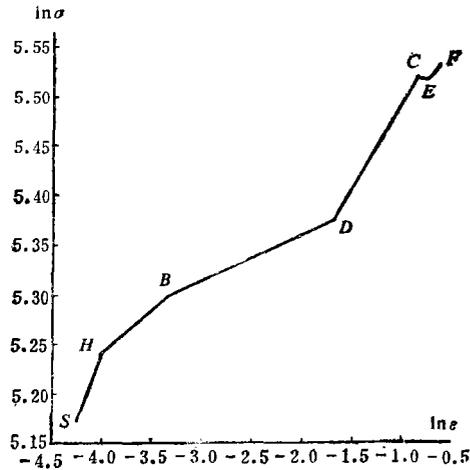


图5a 双对数真应力-真应变曲线  
钢种: 35Cr Mn SiA 光滑试棒拉伸

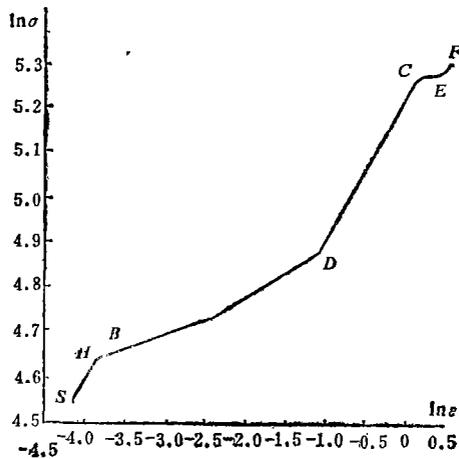


图5b 双对数真应力-真应变曲线  
钢种: 18Ni时效钢, 光滑试棒拉伸

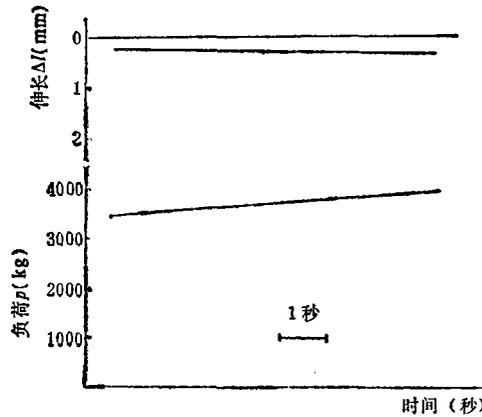


图6 负荷-时间, 伸长-时间曲线(断裂段)  
钢种: Cr-Ni-Mo 超高强度钢, 缺口拉伸

参 考 文 献

1. 金慈等编, 《材料力学简明教程》, (1959), 31.
2. Dahl, W. and Rees, H., *Die Spannungs-Dehnungs-Kurve von Stahl*, (1976), 91.
3. Fitzpatrick, J. M., Strain-hardening characteristic of four new steels and titanium alloy, *J. of Materials*, 3, 4, (1968), 977—982.
4. 陈麓, 论裂纹扩展的判据, *新金属材料*, 3, 4 (1977).3.
5. 抚钢和东工编, 断裂韧性几种测试方法的初步探讨, (1974), 11.
6. 肖纪美, 韧化原理和工艺, *新金属材料*, 2 (1977), 45.
7. 北京钢研院, 金属材料单轴拉伸规律研究, (1979), 16.
8. Tweeddale, J. G., *The Mechanical Properties of Metals*, (1964), 67.

# A Study on Deformation Characteristic of Ultra High Strength Steel and Its Fracture

Han Fu-yi

*(The Iron and Steel Research Institute of the  
Anshan Iron and Steel Company, Anshan)*

## Abstract

A new shape on the load and elongation curve of ultra high strength structural steel in tension is measured by means of the advanced physical methods. A method of calculating true stress-true strain is found in accordance with the whole load-elongation curve. The calculation results show that during the period of deformation, whether prior to or after the maximum load, all are staged power hardening. The method of calculating hardening index is finally studied for discussion.