

# 激光诱导变形条件下 $10^{\#}$ 钢 本构方程的建立\*

黄晨光 段祝平

(中国科学院力学研究所,北京,100030)

**摘 要** 针对靶材在激光诱导下变形的热力学特点,设计了一套宏观力学性能实验方案,考虑温升率、温度、应变率及其历史效应对  $10^{\#}$  钢力学性能的影响.在此基础上,提出和发展了一组新的一维本构方程.它能描述文中实验所反映出的各种宏观力学规律.

**关键词** 激光,本构方程,应变率,温升率

## 1 引言

在研究激光诱导下材料与结构的变形和破坏机理中,靶材的本构关系与本构参数的确定,是基础性的环节.它是建立激光与靶目标相互作用的模型及进行理论分析和数值模拟的前提条件.强激光在靶材中引起的热力学响应特点,突出表现在相对较高的温升率和较宽的温度与应变率变化范围.并且上述参量往往会随激光光斑参数(功率密度、时空分布等)及靶材的热力学参数(热传导系数、热膨胀系数、热容、模量与强度等)的改变而变化.对于一般所采用的激光与靶材而言,有  $10^3 \text{ K/s} < \dot{T} < 10^7 \text{ K/s}$ ,  $T_{\text{room}} < T < T_{\text{melt}}$ ,  $10^{-1} \text{ s}^{-1} < \dot{\epsilon} < 10^3 \text{ s}^{-1}$ , 此处  $\dot{T}$ ,  $T$ ,  $\dot{\epsilon}$  分别表示温升率、温度和应变率.因此,文中所发展的本构方程必须能够计及高温升率的影响,在前述的温度与应变率范围内涵盖温度和应变率的各种效应(包括现实敏感性与历史效应),并且具备一定的物理基础和合理、简洁的数学表达形式.

本文选用  $10^{\#}$  钢作为研究用材料是由具体的任务需求所决定的.

一般地,要发展一套新型的、符合实际需要的本构方程,首先须进行系统的宏观力学性能实验和微观变形机理研究.由于多种原因,材料在高温升率条件下的力学性能实验及结果的公开报道并不多见,而同时在较宽的温度和应变率范围内开展此项研究的就更少.当然,作者在实验方案的选定,特别在材料微观变形机理及本构形式的提出上,还是参考了一些文献,如 Frost, Ashby<sup>[1]</sup> 在有关变形机理图的研究中,系统地总结了不同温度和应变率条件下,材料不可逆变形的控制机理与数学方程. Anand 等人<sup>[2]</sup> 在较低的温升率 ( $10^{0-1} \text{ K/s}$ ) 下进行了一定温度与应变率范围内的 ( $T_{\text{room}} < T < 2/3 T_{\text{melt}}$ ,  $10^{-4} \text{ s}^{-1} < \dot{\epsilon} < 10^1 \text{ s}^{-1}$ ) 力学性能实验,并提出了相应的本构方程. Chan 等人<sup>[3]</sup> 对类似条件下的大量实验与理论分析工作了系统而翔实的总结和评述.在材料高应变率 ( $> 10^3 \text{ s}^{-1}$ ) 力学性能的研究中, Johnson<sup>[4]</sup>, Perzyna<sup>[5]</sup>, Armstrong<sup>[6]</sup>, Klepaczko<sup>[7]</sup> 和 Bodner<sup>[8]</sup> 等人丰富的实验数据和理论模型都对文中本构方程的发

\* 863 计划强激光技术领域和国家自然科学基金(19891180)资助.  
1999-08-03 收到第 1 稿,2000-04-18 收到修改稿.

展起了重要作用。

文中首先针对具体的“工况”提出了一套力学性能实验方案,并得出了 10<sup>#</sup> 钢在相应条件下的宏观应力应变关系曲线,接着,结合对 10<sup>#</sup> 钢变形微观机理的认识,参照并发展了经典的本构模型。最后,对新发展的本构方程的正确性与预言能力进行了初步的检查。

## 2 实验方案与装置

文中实验方案与装置的选择原则,是尽可能使 10<sup>#</sup> 钢在接受性能测试时的条件,与强激光在靶材中诱导发生的热力学条件相接近。

实验用 10<sup>#</sup> 钢为热轧状态,其元素组成为

表 1 10<sup>#</sup> 钢的元素组成表(除 Fe 外)

元 素	C	Mn	Si	Cr	S
含量 (%)	0.09	0.47	0.25	0.10	0.04

对变形前试样的光镜和 SEM 观察,发现其主要由珠光体和铁素体组成。有微量的夹杂物和孔洞型损伤。

10<sup>#</sup> 钢低应变率时的性能测试,采用的设备为 Geeble 1500,冲击载荷所使用的加载装置为改进后的 Split Hopkinson 拉杆(带有电阻加热炉和大电流升温装置)。这两种设备所能提供的温度、应变率和温升率见表 2。

表 2 主要实验装置所提供的温度、应变率和温升率范围

设 备	应变率/s <sup>-1</sup>	温度/K	温升率/K·s <sup>-1</sup>
Geeble 1500	10 <sup>-4</sup> ~ 10 <sup>0</sup>	T <sub>room</sub> - T <sub>melt</sub>	10 <sup>-1</sup> ~ 10 <sup>5</sup>
SHTB + 电阻炉	10 <sup>2</sup> ~ 10 <sup>3</sup>	800	10 <sup>-1</sup> ~ 10 <sup>0</sup>
SHTB + 大电流加热	10 <sup>2</sup> ~ 10 <sup>3</sup>	1300	10 <sup>1</sup> ~ 10 <sup>3</sup>

在 Geeble 1500 上实验时,采用的试件为该设备所要求的标准试样。改进后 Split Hopkinson 拉杆的装置图及试样的工艺尺寸图可见文献[9],其中亦介绍了各装置的加载、加温和测量的原理。

为了确定可适用于激光破坏机理分析的 10<sup>#</sup> 钢本构方程,设计并进行了如下几组实验,以便从宏观上获取影响 10<sup>#</sup> 钢性能的各因素的作用。

### 2.1 预先温升率影响实验

(1) 在 Geeble 1500 装置上,让试样分别以  $7.3 \times 10^{-2}$ ,  $2.3 \times 10^{-1}$ , 1, 10, 100, 1000 K/s 的温升率加热到目标温度 623 K,接着以  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  的应变率拉伸试样直至破坏,测量并记录拉伸过程中试样的应力应变关系。并将目标温度改为 873 K,重复上述实验。

(2) 在改进后的 Hopkinson 拉杆上,分别用电阻加热炉( $\dot{T} = 0.5 \text{ K/s}$ )和工频大电流加热

装置( $\dot{T} = 100 \text{ K/s}$ )加热试件至 623 K,然后进行冲击拉伸实验,记录输入、输出杆上的应力波波形,分析出试件在冲击条件下的应力应变曲线.

### 2.2 温度和应变率的影响

(1) 在 Gleeble 1500 装置上,固定温升率和目标温度为  $\dot{T} = 1000 \text{ K/s}$ ,  $T = 623 \text{ K}$ ,让试样以  $0.5, 0.05, 0.005 \text{ s}^{-1}$ 的应变率拉伸变形至破坏,然后在  $T = 300 \text{ K}, 873 \text{ K}, 1072 \text{ K}$ 和  $1273 \text{ K}$ 时重复上述的实验过程.

(2) 在改进后的 Hopkinson 拉杆上,固定  $\dot{T} = 0.5 \text{ K/s}$ ,在  $T = 300 \text{ K}, 532 \text{ K}, 623 \text{ K}, 673 \text{ K}$ 时以应变率  $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 冲击拉伸试样至破坏.

### 2.3 温度和应变率的历史效应

(1) 固定  $\dot{T} = 1000 \text{ K/s}$ ,  $T = 873 \text{ K}, 1073 \text{ K}$ ,将试样拉伸至一定的应变时,应变率从  $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 突变至  $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,继续拉伸试样至破坏.

(2) 固定  $\dot{T} = 1000 \text{ K/s}$ ,  $\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,当试样拉伸至一定的应变时,环境温度突然升高( $873 \text{ K} \sim 1273 \text{ K}, 300 \text{ K} \sim 623 \text{ K}, 1073 \text{ K} \sim 1273 \text{ K}$ ),继续拉伸试样至破坏.

## 3 实验结果

根据上节所述的实验方案,作者对影响  $10^{\#}$  钢力学响应的温升率、温度和应变率及其历史效应进行了实验研究,其结果可以总结如下:

### 3.1 预先温升率的影响

从图 1 中可以发现,在相同的温度(623 K、823 K)和应变率( $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ )下,预先温升率的大小能影响  $10^{\#}$  钢的流动应力. 应该注意的是,在温升率为  $10^{-1} \text{ K/s}$  左右时,流动应力与温升率的关系存在转折. 当试样的温升率高于  $10^{-1} \text{ K/s}$  时,材料的流动应力对温升率的依赖较弱,而当试件承受低于  $10^{-1} \text{ K/s}$  的温升率时,材料的性能在更大的程度上依赖于预加温升率的大小.

另外,在温升率一定时,材料在开始变形时的温度(即加热的目标温度)越高,流动应力与预先温升率的关系就越明显. 并发现预先温升率对材料力学性能的影响具有一定的普遍性<sup>[9]</sup>. 这正是我们强调激光诱导靶材破坏高温升率特点的原因.

### 3.2 温度和应变率的影响

图 2 和图 3 表示了为准静态加载和冲击载荷条件下,环境温度对  $10^{\#}$  钢应力应变关系的影响. 图 4 和图 5 分别描述了在不同温度下,  $10^{\#}$  钢宏观应力应变关系对拉伸变形速率的依赖. 其中值得注意的是,在 623 K 时,材料在准静态拉伸条件下( $\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ )表现出了一种特殊的效应: 此时的流动应力和强度反而高于室温下的值. 在其它的温度或冲击载荷作用时,  $10^{\#}$  钢所表现出的性能则符合一般的热软化规律: 即随着温度的升高,材料的硬化模量、强度及流动应力值降低. 另外,在 623 K 时,也观察到了反常的应变率效应,(在低应变率,材料性能的率无关以及冲击与准静态相比的负应变率效应),当然,在测试所涉及到的绝

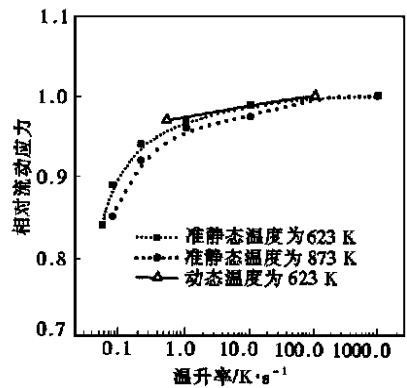


图 1 温升率对  $10^{\#}$  钢流动应力 ( $\dot{\epsilon} = 0.1$ ) 的影响

大部分条件下,10# 钢仍然遵循一般的流动应力与硬化模量的应变率硬化效应.

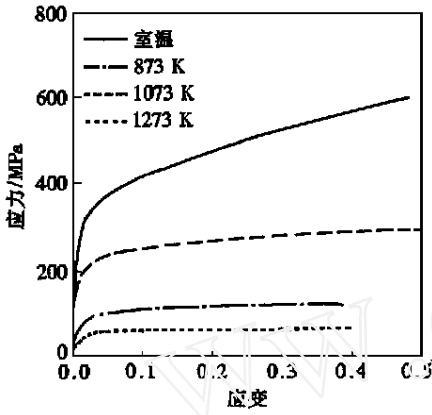


图 2 准静态时 10# 钢在不同环境温度下的应力应变曲线

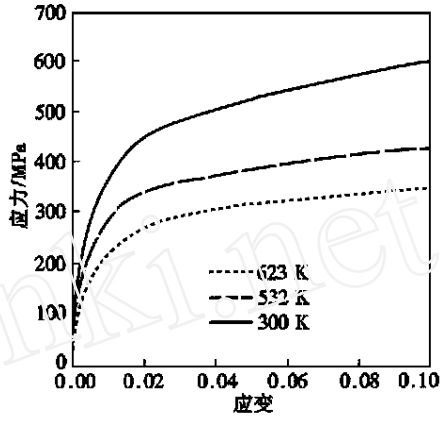
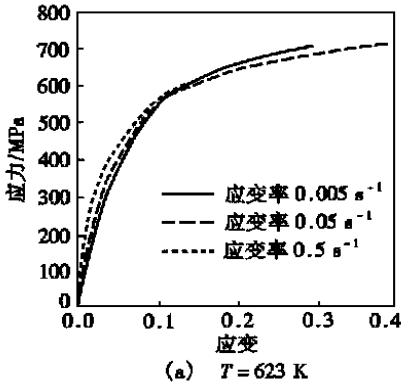
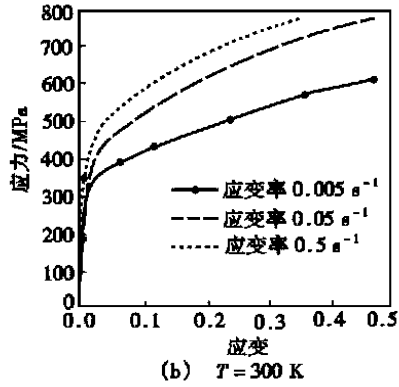


图 3 不同环境温度下 10# 钢冲击拉伸的应力应变关系曲线



(a) T = 623 K



(b) T = 300 K

图 4 低应变率区间 10# 钢力学性能对应变率的依赖关系

另外图 6 描述了材料在不同的环境温度下,其流动应力值随应变率的对数变化关系,从中可以发现,温度越高材料的应变率敏感性越低,而应变率较高时,材料的应变率敏感性较强.这里,应变率的敏感性用  $m$  来描述

$$m = \frac{\theta}{\lg(\dot{\epsilon})} \tag{1}$$

### 3.3 温度和应变率的历史效应

类似 Anand 等<sup>[2]</sup>、Duffy 等人<sup>[10]</sup>工作,此处采用了如 2 节所述的温度和应变率跳跃实验方案,来表现和探求温度和应变率的历史效应.应指出的是,此处的温度历史并不是指单纯的加热和降温过程,而是和变形过程中的力与变形耦合在一起的.

图 7 和图 8 记录的是,进行温度和应变率跳跃实验时,10# 钢的应力应变关系曲线.从图 7 与图 2 的比较可以发现,10# 钢变形的温度历史效应较弱.比较图 8 和图 3 则可表明 10# 钢应变率历史效应的复杂性,873 K 时发生了一定的“过冲”现象(overshoot),而在 1073 K 时,则

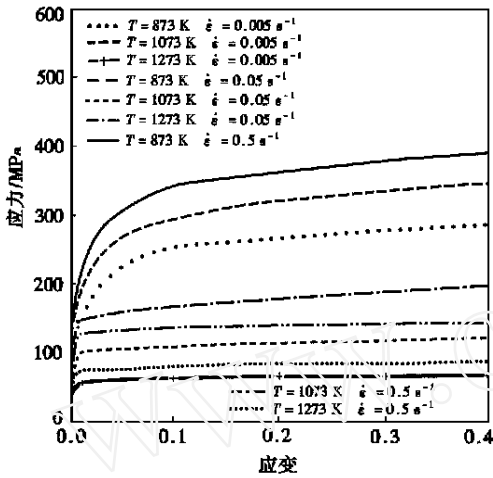


图 5 较高温度和较低应变率下 10# 钢的应力应变关系曲线

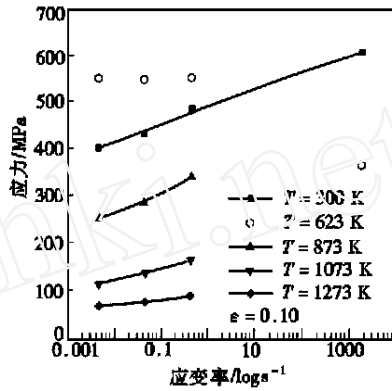


图 6 10# 钢流动应力与应变率对数间的关系

符合一般的规律,即材料在经历一段较低应变率  $\dot{\epsilon}_1$  的变形后,在较高的应变率  $\dot{\epsilon}_2$  继续变形时,其流动应力值要低于一直以  $\dot{\epsilon}_2$  变形的试样的流动应力.总之,10# 钢存在着应变率和温度的历史效应,但当历史效应与应变率的现实敏感性相比时则小得多.

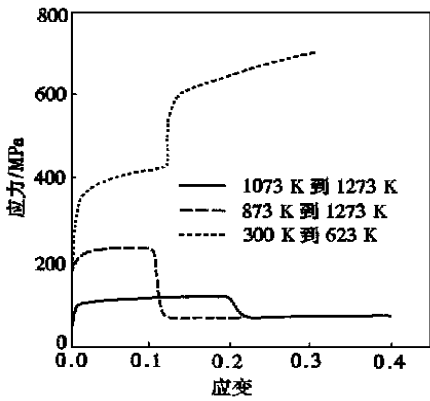


图 7 10# 钢温度跳跃实验结果

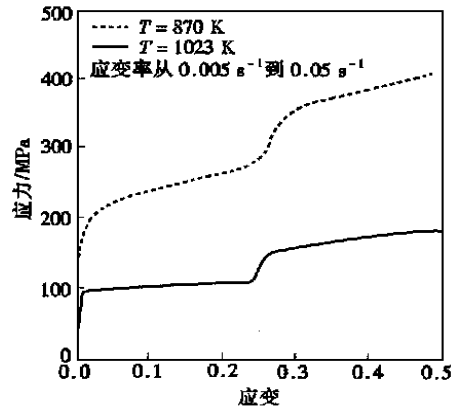


图 8 10# 钢在应变率跳跃实验中获得的应力应变关系曲线

### 4 10# 钢本构方程的建立

如前言所述,文中本构方程必须适用于激光破坏机理分析的特点——高温升率、较宽的温度和应变率变化区间,其建立过程中的困难主要表现在,一是变形机理的复杂,10# 钢在变形中位错运动的控制机理,在不同的温度和应变率区间,有着较大的差异;二是描述变形

控制机理及其它因素的数学方程十分复杂,甚至难以得到。

作者从已有的 10<sup>#</sup> 钢宏观力学性能数据和规律出发,提出作为能适用的本构模型所描述的现象应该包括:

- (a) 预加温升率对后继应力应变关系的影响;
- (b) 应变率敏感性和温度软化效应;
- (c) 应变硬化、应变率硬化的温度相关性;
- (d) 应变率的历史敏感性。

此处,10<sup>#</sup> 钢在温度为 623 K 的特殊热软化、应变率敏感性现象被忽略。

参考 Frost, Ashby<sup>[1]</sup> 关于不同应变率和温度条件下的变形机理和本构描述形式的总结,在 Anand 等人<sup>[2]</sup> 工作的基础上,提出一种新的一维本构方程,

$$\dot{\sigma} = \dot{\sigma}_0 \left\{ \sinh \frac{\sigma - \sigma_0 - K l^{-1/2} - K_1 m - s}{C} \right\} \quad (2)$$

$$\dot{\sigma}_0 = A \exp \left[ - \frac{Q}{RT} \right] \quad (3)$$

$$\dot{s} = [(C_1 + C_2 \ln z)^p + C_r^{-1}] s \quad (4)$$

$$z = \dot{\sigma} \int \left[ A \exp \left[ - \frac{Q}{RT} \right] \right] \quad (5)$$

其中  $\sigma$  为流动应力,  $s$  为应变量,  $\dot{\sigma}$  为塑性应变率,  $T$  为绝对温度,  $R$  为 Boltzmann 常数,  $Q$  为障碍体强弱表征量,  $T_m$  为熔点温度,  $T_r$  为室温,  $T^*$  为相对温度,  $K, l$  为 Hall-Petch 公式中的材料常数及晶粒尺度,  $z$  为 Zener 参数。另外,还有 10 个材料本构参数:  $C, A, Q, \sigma_0, K_1, m, n_1, C_1, C_2, C_r$ 。

方程 (2) 采用双曲正弦函数来描述应变率与应力间的关系,主要是因为,从数学上讲,它在高应变率条件下可以退回到一般高应变率本构经常采用的指数形式,从而描述滑移位错在外应力场和热激活共同作用下跨越位错运动障碍体的控制机理。并且在较低应变率和较高温度下,双曲正弦函数也可以回到应变率与流动应力间的幂指数关系。此时,流动应力的降低联系着位错的割阶运动。

方程中,  $s$  是内变量,它的引入从宏观上讲是用来包含应变率历史、预先温升率和应变硬化的温度相关性等效应;从材料学角度而言,该内变量描述材料在变形过程中组织结构的变化。一般认为,用一个标量内变量来描写这些复杂的效应是不充分的,但是,在简单的热力加载条件下,它是一种可以接受的折衷方法<sup>[3]</sup>。另外,借用了 Hall-Petch 关系式来描述多晶体材料的流动应力与平均晶粒尺度间的关系。

为了工程应用的方便,在方程 (2) ~ (5) 的基础上,我们发展了一套更简单的本构方程

$$\dot{\sigma} = (\sigma_0 + K_1 m) (1 - T^*) + K l^{-1/2} + C \sinh^{-1} [(z)^{1/n_1}] \quad (6)$$

其中 
$$z = \dot{\sigma} \int \left[ A \exp \left[ - \frac{Q}{RT} \right] \right] \quad (7)$$

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (8)$$

另外,还有 7 个材料本构参数:  $C, A, Q, \sigma_0, K_1, m, n_1$ 。

此处取消了内变量的演化方程,因为含内变量本构往往给数值模拟和理论分析工作带

来一定的困扰. 在简化的过程中,作了如下处理:

温升率效应不计入本构. 这并不是因为温升率效应不重要,而是因为激光诱导的变形与破坏研究中,靶材所涉及的温升率为  $10^3 \text{ K/s} \sim 10^7 \text{ K/s}$ ,远大于图 1 中  $10^{-1} \text{ K/s} \sim 10^0 \text{ K/s}$  这个转折点. 此处应特别强调的是,温升率效应虽然不计入本构方程,但仍不可以用传统的低温升率实验来获取确定文中本构方程所需的数据. 这一点,从图 1 中可以发现,合适的力学性能实验必须在尽可能贴近靶材在激光诱导下的热力学条件下进行.

忽略应变率和温度历史效应. 其原因在前一节已说明,主要是因为就  $10^{\#}$  钢而言,温度和应变率的历史效应远不及其应变率的现实敏感性的作用大. 这一点对 b. c. c. 结构的金属来说有一定的代表性.

对应变硬化的温度相关关系,作了近似的假设,如方程 (6) 所示.

对于本构方程 (2~5) 和 (6~8),利用实验获得的宏观力学性能数据,采用 Marquardt 非线性曲线拟合方法,来拟合本构方程中的参数,如果如表 3 所示.

表 3 本构方程的参数

类别	C/MPa	A/s <sup>-1</sup>	Q/J mole <sup>-1</sup>	o/MPa	K <sub>1</sub> /MPa	m	n <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
2~5	18	0.27 ×10 <sup>13</sup>	0.22 ×10 <sup>6</sup>	60	110	0.27	4.8	- 1.29	- 0.23
6~8	18	0.27 ×10 <sup>13</sup>	0.22 ×10 <sup>6</sup>	60	410	0.25	4.8	/	/

另外,由 SEM 观察和文献可以得出,  $K = 22.4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ ,  $l^{-1/2} = 7 \text{ mm}^{-1/2}$ .

在拟合过程中,所用到的原始数据包括 40 组 ( $\dot{\epsilon}$ ,  $\dot{\epsilon}_1$ ,  $T_1$ ,  $\dot{\epsilon}_2$ ,  $T_2$ ), 分别源于  $10^{\#}$  钢动态拉伸应力应变曲线 ( $T = 623 \text{ K}$ ), 和温度为  $873 \text{ K}$ ,  $1273 \text{ K}$  时的准静态 ( $\dot{\epsilon} = 0.05 \text{ s}^{-1}$ ,  $0.5 \text{ s}^{-1}$ ) 应力应变关系曲线以及温度和应变率的跳跃数据,在拟合中首先拟合方程 (6~8) 中的参数.

在本构方程和本构参数确定后,为了检查拟合过程的正确性及本构形式本身的合理性,用已获得的本构方程及其参数计算了实验条件下的应力应变曲线,如图 9~11 所示. 可以发现,在较宽的温度和应变率范围内,本构方程的计算值与实验测量值吻合良好,这一方面表明了我们发展的本构形式是可以接受的. 另外也表明了拟合过程所用的算法及程序是正确的. 同时,图 9 到图 11 中,在一些实验条件下 ( $\dot{\epsilon} = 10^3 \text{ s}^{-1}$ ,  $T = 300 \text{ K}$ ,  $523 \text{ K}$ ;  $\dot{\epsilon} = 0.05 \text{ s}^{-1}$ ,  $0.5 \text{ s}^{-1}$ ,  $T = 1073 \text{ K}$ ;  $\dot{\epsilon} = 0.005 \text{ s}^{-1}$ ) 的 - 曲线并未参与本构参数的拟合过程,这表明了文中所发展的本构有一定的预言能力.

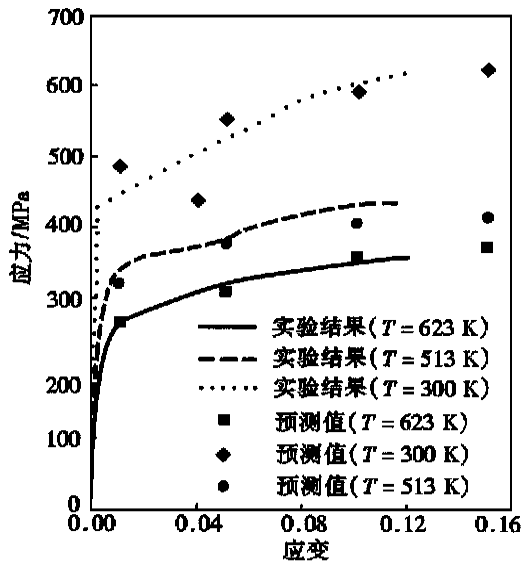


图 9  $10^{\#}$  钢冲击拉伸应力应变关系 (实验与本构预测的比较)

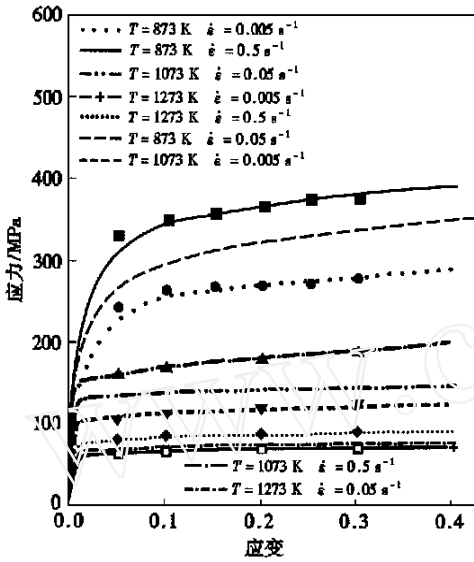


图 10 准静态下 10# 钢应力应变关系 (实验与本构预测的比较)

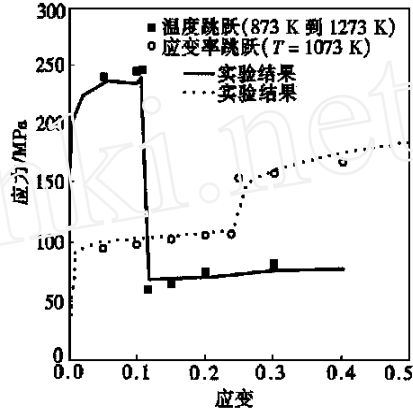


图 11 10# 钢应变率和温度跳跃 实验结果与预测值的比较

### 5 结论

本文的主旨是为激光诱导靶目标变形破坏分析提供材料的本构方程及参数. 针对靶材承受的温升率、温度、变形速度等具体条件, 我们设计了一套实验方案, 并对 10# 钢进行了宏观力学性能测试. 在此基础上, 结合对不同条件下材料变形机理的认识及前人所提本构形式的改进, 发展了一套新的本构方程并确定了其中的本构参数.

和 Anand 等人的工作相比, 本文中提出的本构方程具有如下的优势: (1) 它可以描述高温升率和晶粒尺寸对于材料流动应力的影响, 这是激光破坏机理研究中的两个重要方面; (2) 新的本构方程可以较好地展示材料的温度历史效应; (3) 本文提出的本构模型可以应用于高应变率条件, 而 Anand 等人的模型只在  $10^1 \text{ s}^{-1}$  应变率以下适用, 这种优势源于我们对方程 2 中双曲正旋函数一项作出了改进.

文中, 作者发现在 623 K 时, 10# 钢表现出了反常的“热硬化”, 应变率不敏感甚至是负效应等现象, 这在我们的本构中并没有得到体现, 还需要今后进一步的认识和研究. 另外, 我们已利用这一本构方程在激光诱导的 10# 钢承载圆薄板大变形及破坏的数值模拟中取得了较为理想的结果.

致谢 作者感谢中国科学院力学研究所郑哲敏研究员、谈庆明研究员对本文部分工作给予的指导和批评; 感谢北京机电研究所白秉哲博士、杨鲁义高级工程师在实验中给予的帮助.



## 参 考 文 献

- 1 Frost H J , Ashby M F. Deformation Mechanism Maps. Oxford Press , 1982
- 2 Brown S B , Kim K H , Anand L. An internal variable model for hot working of metals. *Int J of Plasticity* , 1989 , 1 : 95 ~ 130
- 3 Chan L. Unified equation for creep and plasticity , Miller A K (eds.) , Elsemer , New York , 1987 , 273 ~ 363
- 4 Johnson G R , Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains. In *Proc 7th Int Symp on Ballistics* , The Hague , 1983 , 541 ~ 547
- 5 Perzyna P. Advance in visco-plastic constitutive law. *Adv in Appl Mech* , 1966 , 9 : 243 ~ 377.
- 6 Zerilli F J , Armstrong R W. Dislocation mechanics based constitutive relations for materials dynamics calculation. *J Appl Phys* , 1987 , 61(5) : 1816 ~ 1825
- 7 Klepaczko J R. Discussion of microstructural effects and its modeling at high rate of strain. *Proc Int Conf Mech Prop of Mater at High Rate of Strain* , 1989 , 283 ~ 298
- 8 Bodner S R , Partom Y. Constitutive equation for elastic-viscoplastic analysis strain-hardening materials. *J Appl Mech* , 1975 , 42(2) : 385 ~ 389
- 9 黄晨光. 激光辐照下几种金属材料的动态力学性质和结构热-力耦合的变形与破坏. 中国科学院力学研究所博士论文, 1996
- 10 Klepaczko J R , Duffy J. History effects in polycrystalline FCC metals subjected to rapid changes in strain rate and temperature. *Arch Mech* , 1982 , 34 : 419 ~ 427

## DETERMINATIONS OF THE CONSTITUTIVE LAW AND PARAMETERS OF $10^{\#}$ STEEL IN THE CONDITION OF LASER-INDUCED DEFORMATION

Huang Chenguang      Duan Zhuping

( *Institute of Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Beijing , 100080* )

**Abstract** Under the condition of high temperature rate , the mechanical properties of  $10^{\#}$  steel are determined experimentally with a very wide range of temperature and strain rate . A new constitutive relationship is developed which can describe various phenomena observed in this experiment . Meanwhile , some interesting characteristics about the temperature rate , strain and strain rate hardening and temperature softening are also shown . Finally , the reliability of the constitutive law and the righteous of the selection of the constitutive parameters are checked by comparing the calculation values with the experimental results .

**Key words** laser , constitutive law , strain rate , temperature rising rate