

45 号钢的动态力学性能研究^{*}

胡昌明^{1,2}, 贺红亮², 胡时胜¹

(1. 中国科学技术大学材料力学行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230027;

2. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆炸物理实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要: 对 45 号钢在不同环境温度(25-300 °C)和不同应变率($10^{-4} \sim 10^3 \text{s}^{-1}$)的 $\sigma - \epsilon$ 关系进行了研究。修正了 Johnson-Cook 模型中的应变率强化系数 C , 确定了 45 号钢的本构关系。金相观察表明, 与应变率强化相比, 较高的环境温度使硬化速率降低, 且占主要因素, 其结果使材料的强度降低。透射电镜分析表明, 高应变率在使位错运动的能量提高的同时, 增加了位错在晶界处的阻力, 而较高的环境温度则为位错提供了较多的滑移面和滑移方向, 其结果是使材料更容易压缩。

关键词: 固体力学; 本构关系; 实验数据拟合; 45 号钢; 微观机理; 金相分析和电镜分析; 应变率效应; 温度效应

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 130°1515

文献标志码: A

1 引言

45 号钢是应用很广的一种材料, 在交通运输, 机械制造, 国防工业都得到了普遍的应用。为了充分挖掘 45 号钢在受到动态载荷下的工作潜力, 了解它的动态力学性能显得尤为重要。许云华等^[1]对受到不同角度冲击的 45 号钢的亚表层组织结构进行了观察和研究。董玉斌等^[2]测量过 45 号钢的动态屈服强度。何雪宏等^[3]和王时越等^[4]对 45 号钢的低周疲劳进行过研究。钟俐苹等^[5]通过化验和金相分析方法, 对 45 号钢的冲击性能进行了分析。郑坚等^[6]测量过它的层裂强度。

这些研究表明, 人们的工作大多集中在 45 号钢的动态强度上, 有关 45 号钢的冲击载荷响应特性, 应变率在 $10^2 \sim 10^3 \text{s}^{-1}$ 情况下的实验数据很欠缺。在这一应变率范围内金属材料的冲击加载响应是一个非常复杂的过程, 其宏观的力学特性不仅表现为应变率相关, 而且伴随绝热过程, 力学效应与热学效应藕合在一起。

本文中, 对 45 号钢在不同温度(25 ~ 300 °C)、不同应变率下($10^2 \sim 10^3 \text{s}^{-1}$)的 $\sigma - \epsilon$ 关系进行了研究, 并得到一种适当的本构模型。还利用金相观察和透射电镜(TEM)进行微观方面的分析, 对 45 号钢在动态下表现的应变率效应和温度效应进行了机理分析。

2 SHPB 实验

2.1 实验结果和分析

为了确定 45 号钢的动态力学性能, 利用 SHPB 实验技术测定了在不同温度(25 ~ 300 °C)、不同应变率($10^{-4} \sim 10^3 \text{s}^{-1}$)下的 $\sigma - \epsilon$ 关系, 如图 1 ~ 2。

(1) 在同一温度(25 °C)、不同应变率下, 测得该材料的应力-应变关系如图 1 所示。从图 1 可以看出, 45 号钢表现出明显的应变率强化效应: 在准静态下, 其屈服应力在 420 MPa 左右, 而在应变率为 4500s^{-1} 时, 其屈服应力升高到 900 MPa 左右。可见, 45 号钢是一种应变率非常敏感的材料。

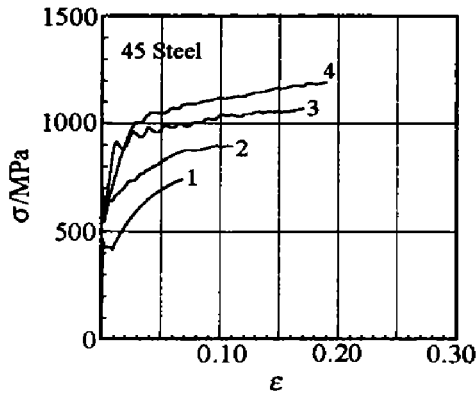
(2) 在不同的环境温度、同一应变率($2.3 \times 10^3 \text{s}^{-1}$)下, 测得该材料的应力-应变关系如图 2 所示。

* 收稿日期: 2001-04-10; 修回日期: 2001-08-05

基金项目: 中国工程物理研究院重大基金项目(2000Z037)

作者简介: 胡昌明(1975—), 男, 硕士研究生。

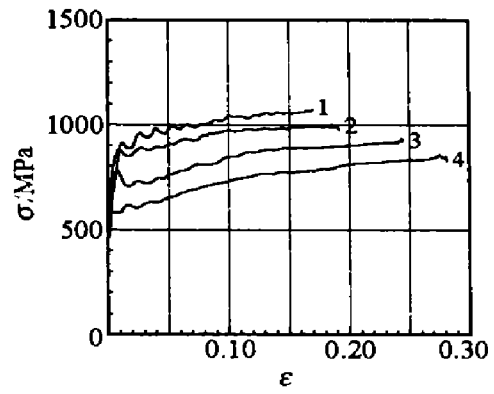
从图 2 可以看出, 45 号钢表现出温度软化效应。



1. $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=2\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$; 2. $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=600\text{ s}^{-1}$;
3. $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=2100\text{ s}^{-1}$; 4. $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=4500\text{ s}^{-1}$

图 1 45 号钢的应变率效应实验结果

Fig.1 Results of effect of strain rate of steel 45



1. $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=2100\text{ s}^{-1}$; 2. $T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=2300\text{ s}^{-1}$;
3. $T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=2300\text{ s}^{-1}$; 4. $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=2400\text{ s}^{-1}$

图 2 45 号钢的温度效应实验结果

Fig.2 Results of effect of temperature of steel 45

2.2 本构关系的拟合

选择一个合适的本构模型来描述材料的力学性能, 是工程应用所必须的。Johnson-Cook 模型^[7]是一种经验型的粘塑性本构模型, 这种模型能较好地描述金属材料的加工硬化效应, 应变率效应和温度软化效应。由于其形式简单, 使用方便, 使这一模型在工程中得到了广泛的应用。因此, 我们也采用 Johnson-Cook 模型来描述 45 号钢在一维应力状态下的本构关系。Johnson-Cook 本构关系的形式为

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

式中: σ 表示应力; ϵ 表示塑性应变; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$ 是无量纲塑性应变率, 取 $\dot{\epsilon}_0$ 为准静态实验的应变率 ($\dot{\epsilon}_0 = 2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$); $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$, T 是样品环境温度, T_r 是室温, T_m 是材料的熔点。

式中的 $(A + B\epsilon^n)$ 、 $(1 + C \ln \dot{\epsilon})$ 和 $(1 - (T^*)^m)$ 分别描述了材料的加工硬化效应、应变率效应和温度软化效应。本构关系中有 5 个待定系数, 需要根据不同的应变率和不同温度条件下的应力-应变关系实验曲线来拟合, 拟合步骤如下。

(1) 确定 A, B, n

在样品处于室温 (即 $T = T_r$) 及 $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0$ 的条件下, (1) 式简化为

$$\sigma = (A + B \epsilon^n) \tag{2}$$

根据应变率 $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 = 2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 静态实验测得的 $\sigma - \epsilon$ 曲线, 就可以确定 A, B, n 。

(2) 确定 C

Johnson-Cook 模型中, 参数 C 取的是常数。在本文中, 为了更好地描述 45 号钢的应变率强化效应, 我们对该参数 C 进行修正, 取 C 为 $\dot{\epsilon}$ 的函数, 即 $C = f(\dot{\epsilon})$ 。

(3) 确定 m

选取一个固定应变 ϵ_i 和应变率 $\dot{\epsilon}_i$, 令 $\bar{\sigma} = \sigma_T(\epsilon_i, \dot{\epsilon}_i) / (\sigma_{rT}(\epsilon_i, \dot{\epsilon}_i))$, $\sigma_{rT}(\epsilon_i, \dot{\epsilon}_i) = (A + B\epsilon_i^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}_i^*)$ 表示室温条件下的应力, σ_T 表示环境温度下的应力。作出 $\ln(1 - \bar{\sigma}) - \ln T^*$ 的关系曲线, 斜率就为 m 。

2.3 本构关系拟合结果

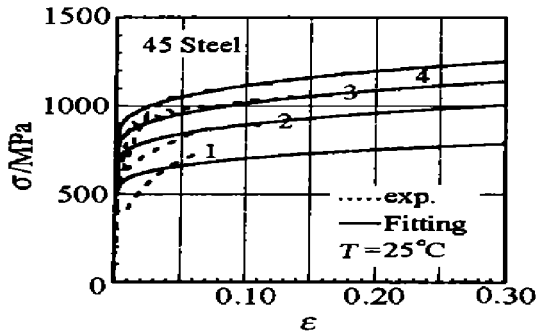
利用上述方法, 我们的拟合结果为: $A = 496 \text{ MPa}$; $B = 434 \text{ MPa}$; $C(\dot{\epsilon}) = 8.4 \times 10^{-3} \dot{\epsilon}^{0.25}$; $n = 0.307$; $m = 0.804$ 。

修正后的 45 号钢的 Johnson-Cook 本构关系为

$$\sigma = (496 + 434 \epsilon^{0.307})(1 + 8.4 \times 10^{-3} \dot{\epsilon}^{0.25} \ln \dot{\epsilon}^*) [1 - (T^*)^{0.804}] \tag{3}$$

式中: T^* 中的 T_r 和 T_m 分别为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1492\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

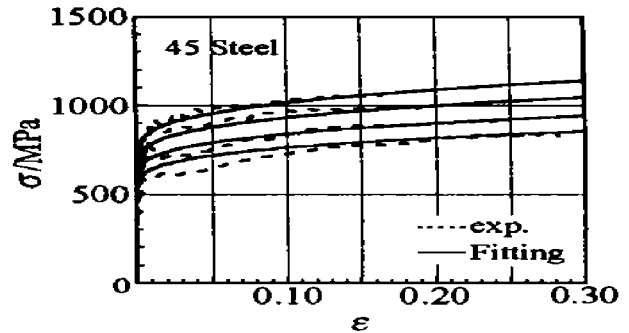
将上述的拟合结果和实验结果进行对比,如图 3 和图 4 所示。可以看出,用修正后的 Johnson-Cook 本构模型来描述 45 号钢的本构关系是比较合适的。



1. $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=2\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$; 2. $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=600\text{ s}^{-1}$;
 3. $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=2100\text{ s}^{-1}$; 4. $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=4500\text{ s}^{-1}$

图 3 45 号钢的应变率效应的 J-C 拟合结果与实验结果

Fig.3 Compare the results of steel 45 J-C fit to the experimental results of effect of strain rate



1. $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=2100\text{ s}^{-1}$; 2. $T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=2300\text{ s}^{-1}$;
 3. $T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=2300\text{ s}^{-1}$; 4. $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=2400\text{ s}^{-1}$

图 4 45 号钢的温度效应的 J-C 拟合结果与实验结果

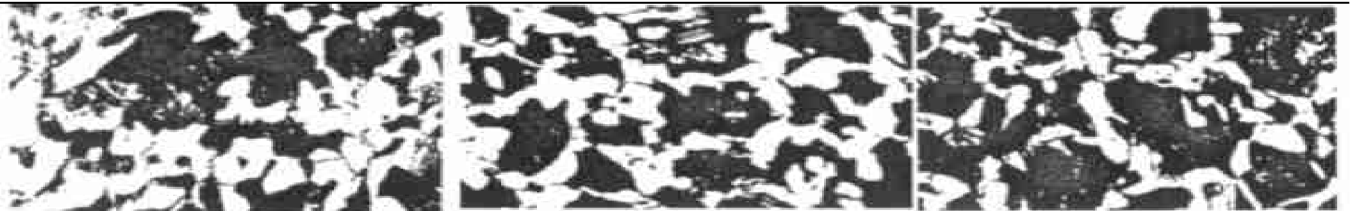
Fig.4 Compare the results of steel 45 J-C fit to experimental results of effect of temperature

3 材料的微观分析

材料的宏观力学性能不仅与外部因素(温度、应变率、应力状态)有关,还与材料的内部因素(成分、组织)有密切的关系。我们已从宏观上看到了 45 号钢的应变率效应和温度效应,为了更进一步解释 45 号钢表现出来的应变率效应和温度效应,对变形前后的试样进行线切割、取样、研磨,通过金相观察和透射电镜 TEM (Transmission electron microscope)来探讨晶粒尺寸和位错等材料力学性能的影响。

3.1 金相分析

在光学显微镜下,可以观察到 45 号钢的组织均为块状铁素体和细片状珠光体,我们分析了温度在 25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的原始材料和应变率为 600, 2300 s^{-1} ,应变为 15%试件材料的金相照片。图 5~图 7 是放大 500 倍的金相照片,图中黑色为铁素体,白色为珠光体,黑色长条是渗碳体。可以发现,珠光体和渗碳体均发生了较大的变形。不同的是,随着应变率的增加,块状的珠光体逐渐细化,这种细化过程,导致晶界的交界面增多,因此,各晶界之间的相互阻碍作用增大,材料在塑性范围内,其强度也得到了提高。



$T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, Original materials

图 5 45 号钢的金相照片

$T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=600\text{ s}^{-1}$, $\epsilon=15\%$

图 6 45 号钢的金相照片

$T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=2300\text{ s}^{-1}$, $\epsilon=15\%$

图 7 45 号钢的金相照片

在材料较高的环境温度和高应变率条件下,材料表现为应变率硬化和热软化相互交错的现象。一方面,应变率硬化使材料的强度提高,而另一方面,较高的环境温度会减少这种硬化速率,而且占主要因素,从而使材料的强度大大的降低。从图 8、图 9(放大 500 倍的金相照片,图中黑色为铁素体,白色为珠光体)可以看出,在较高的初始温度和高应变率下,虽然珠光体颗粒变得细小了,但由于较高的初始温度作用,使 45 号钢的热软化作用占主要因素,从宏观上表现为流动应力随着温度的升高而减小,使材料更容易变形,塑性应变增大,从而使得材料的强度降低。

从以上金相分析结果可以很清楚地看到,45 号钢微观上的一些变化表现在一些宏观的力学现象上,因而,我们在 SHPB 实验结果上看到了它的应变率强化效应和温度软化效应。

3.2 透射电镜分析

为了更进一步了解材料微观结构的变化,我们还通过透射电镜,分析了晶粒内部位错对材料力学性能的影响,对 45 号钢的应变率效应和温度效应作了更深层次的分析。

比较图 10 和图 11(图 10 和图 11 是放大 15000 倍的透射电镜照片,图中黑色为铁素体,白色为珠光体,黑色长条是渗碳体),发现珠光体中都有少量的位错,其中,图 10 中的渗碳体没有发现有脆断现象,图 11 中的渗碳体则发现有脆断现象。说明在高应变率下,提供位错运动的能量越多,在局部区域内,位错就会穿越晶界,导致渗碳体有脆断现象;而另一方面,位错的运动在晶界处会受阻,从而表现为流动应力增加,即材料的强度提高。

比较图 12 和图 13,在同一应变率($\dot{\epsilon}=2300 \text{ s}^{-1}$)下,随着温度的升高,珠光体中的渗碳体(黑色长条)有局部发生片状断裂。这是由于基体变软和热激活机制作用,提供了较多的位错滑移面和滑移方向,使其更容易发生塑性变形,从而使材料的强度随着温度的升高而降低,表现为材料更容易压缩。

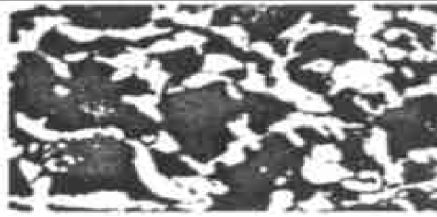
通过以上的微观分析,并结合 SHPB 的实验结果,可以更清晰地了解 45 号钢在动态载荷下的宏观力学现象。

4 结 论

利用 SHPB 和 MTS 的实验结果,分析了 45 号钢的应变率效应和温度效应。拟合出了 45 号钢的 Johnson-Cook 本构关系,对其中的参数 C 进行了修正,充分考虑了 45 号钢的应变率效应,使所用的本构模型与实验结果更好地相吻合。并通过金相观察和透射电镜较全面地分析了它的微观机理,对其宏观力学现象进行了解释。

参考文献:

- [1] 许云华,王发展,武红,等.冲击接触载荷下 45 号钢亚表层组织结构[J].热加工工艺,1999,(4):10-12.
XU Yun-hua, WANG Fa-zhan, WU Hong et al. Subsurface structure of 45 steel under impact contact Load[J]. The Technology of Hot Working, 1999, (4):10-12.



$T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=2300\text{ s}^{-1}$, $\epsilon=15\%$

图 8 45 号钢的金相照片

Fig.8 Metallograph of 45 steel



$T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=2400\text{ s}^{-1}$, $\epsilon=15\%$

图 9 45 号钢的金相照片

Fig.9 Metallograph of 45 steel



$T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=600\text{ s}^{-1}$, $\epsilon=15\%$

图 10 45 号钢的透射电镜照片

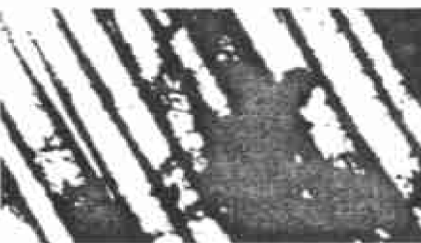
Fig.10 TEM photograph of 45 steel



$T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=2100\text{ s}^{-1}$, $\epsilon=15\%$

图 11 45 号钢的透射电镜照片

Fig.11 TEM photograph of 45 steel



$T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=2300\text{ s}^{-1}$, $\epsilon=15\%$

图 12 45 号钢的透射电镜照片

Fig.12 TEM photograph of 45 steel



$T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\epsilon}=2300\text{ s}^{-1}$, $\epsilon=15\%$

图 13 45 号钢的透射电镜照片

Fig.13 TEM photograph of 45 steel

- [2] 董玉斌,张万甲,经福谦.动态断裂过程的数值分析及 LY-12 铝的层裂[J].高压物理学报,1988,2(4):305—318.
DONG Yu-bin, ZHANG Wan-jia, JING FU-Qian. Numerical analysis of the dynamical fracture process and spalling of LY-12 aluminum alloy[J]. Chinese Journal Of High Pressure Physics, 1988, 2(4):305—318.
- [3] 何雪宏,郭成壁.45 号钢复杂应力状态下低周疲劳损伤准则[J].大连理工大学学报,1996,36(2):203—207.
HE Xue-hong, GUO Cheng-bi. The law of fatigue damage of steel 45 under the complex stress on low cycle[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1996, 36(2):203—207.
- [4] 王时越,林荣君,邵剑飞,等.扭转预应变对 45 钢低周疲劳性能的影响[J].机械强度,1998,20(4):300—302.
WANG Shi-yue, LIN Mo-jun, SHAO Jian-fei, et al. Effect of torsional prestrain on low cycle fatigue behaviour of steel 45 [J]. Journal of Mechanical Strength, 1998, 20(4):300—302.
- [5] 钟俐苹.45 钢性能异常原因分析[J].钢铁研究,1997,(1):31—33.
ZHONG Li-ping. Aanalysis on reasons of abnormal performance of steel 45[J]. Journal of Research on Iron & Steel, 1997, (1):31—33.
- [6] 郑坚,孙成友,黄风雷,等.45 钢层裂研究[J].爆炸与冲击,1995,15(2):136—140.
ZHENG Jian, SUN Cheng-you, HUANG Feng-lei, et al. Spalling research of steel 45[J]. Explosion and Shock waves, 1995, 15(2):136—140.
- [7] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[A]. Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics[C]. Hague Z. The Hague, The Netherlands: [s. n.], 1983:541—547.

A study on dynamic mechanical behaviors of 45 steel

HU Chang-ming^{1,2}, HE Hong-liang², HU Shi-sheng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China;

2. Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: In this paper the σ - ϵ relation of 45 steel under different initial temperatures (25 ~ 300 °C) and strain rates ($10^{-4} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$) has been studied with the split Hopkinson press bar (SHPB) and the MTS (Materials test system), its constitutive relation is determined then. The metallography observation show that the reduction of hardening under higher ambient temperatures prevails over the strain rate hardening, and results in a reduction in material strength. Meanwhile the TEM analysis indicates that the high strain rate raises both the energy of dislocations and the resistance to them at crystal boundaries. The higher ambient temperatures allow more slip surfaces and directions for dislocations and result in a higher compression of the material.

Key words: solid mechanics; constitutive relation; experimental data fitting; 45 steel; micro-mechanism; metal-lographical and TEM analysis; strain-rate effect; temperature effect