

# 基于改进 J - C 模型的 42CrMo 钢动态本构关系研究

卢也森, 朱志武, 谢奇峻

(西南交通大学力学与工程学院, 成都 610031)

**摘 要:**42CrMo 钢作为高速列车车轴的主要原材料,在高速列车运营中承受复杂的载荷条件。其中除了正常的设计载荷之外,还将承受不同程度的冲击载荷作用。为研究车轴钢的动态力学性能及其应力 - 应变关系,对 42CrMo 钢进行准静态及动态压缩力学性能实验,得到 42CrMo 钢在  $10^{-3} \sim 5000$  区间内七个应变率下的应力 - 应变曲线,结果显示 42CrMo 钢在高应变率下无明显应变率相关性,存在热软化效应。热软化效应被认为是在高速冲击下,材料塑性变形产生的热量无法向外界快速扩散从而积累导致温度上升而造成。采用改进 J - C 模型,考虑绝热温升影响,对材料进行本构描述,结果显示改进 J - C 模型在描述及预测不同应变率下 42CrMo 钢的流动应力时表现很好。

**关键词:**42CrMo 钢;分离式霍普金森压杆;热软化效应;J - C 模型

**中图分类号:**O347.1

**文献标志码:**A

## 引 言

42CrMo 钢作为高速列车车轴等构件的主要原材料,具有高强度和韧性,调质处理后有较高的疲劳极限强度和抗多次冲击能力。车轴材料除了承受正常的设计载荷外,还需要承受不同程度的冲击载荷作用。因此,对于 42CrMo 钢的力学性能特别是冲击动态力学性能的研究得到越来越多的关注。

对于 42CrMo 钢的研究,在材料疲劳损伤及棘轮行为方面,国内外均进行了深入研究。Varvani - Farahani A<sup>[1]</sup>采用 VF 疲劳损伤模型和多轴棘轮损伤模型,定义了上下损伤曲线概念对 42CrMo 钢疲劳及棘轮实验进行了很好的模拟;刘宇杰等<sup>[2]</sup>通过单轴棘轮行为实验及棘轮 - 疲劳交互作用实验表明 42CrMo 钢为循环稳定材料,在非对称应力循环下会产生明显的棘轮变形;张继明等<sup>[3]</sup>利用超声疲劳实验方法研究了零夹杂 42CrMo 钢在不同热处理制度下的寿命疲劳性能。对材料高温下

的力学性能, Kim S I 等<sup>[4]</sup>采用 GLEEBLE3500C 设备对 AISI4140 钢进行了温度范围在 900 ~ 1100 °C,应变率范围在 0.05 ~ 5 s<sup>-1</sup> 的热压和热扭转实验,得到了考虑动态再结晶的本构模型;蔺永诚等<sup>[5]</sup>采用 GLEEBLE150 设备得到 42CrMo 钢在变形温度为 850 ~ 1150 °C 和应变率为 0.01 ~ 0.2 s<sup>-1</sup> 条件下的流变应力行为,确定了材料的形变表观激活能,得到材料热压缩流变应力本构模型。同时,国外研究方向已逐步深入到材料受载荷下的微观组织变化, Terres M A<sup>[6]</sup>对经过喷丸处理的 42CrMo4 钢进行抗弯疲劳性能的测试,并在微观尺度上做出机理解释; Hor A 等<sup>[7]</sup>对 42CrMo4 钢进行了高温及高应变率实验,对变形前后材料组织结构进行对比,通过耗散准则,从热不稳定性条件和微观组织的变化解释了材料的热变形机理。

由以上研究现状可知,对 42CrMo 钢疲劳断裂领域已有较为深入的研究,在热力学性质上主要关注冶炼及热成型工艺。但是在车轴钢受冲击载荷作用

收稿日期:2016-03-14

基金项目:国家自然科学基金项目(11172251);四川省青年科技创新团队(2013TD0004)

作者简介:卢也森(1991-),男,浙江临海人,硕士生,主要从事合金材料动态本构关系方面的研究,(E-mail)larysen0319@163.com;

朱志武(1974-),男,四川成都人,副教授,博士,主要从事材料动态本构关系方面的研究,(E-mail)zzw4455@163.com

的研究方面,仍然十分匮乏。Hor A 以及刘学文<sup>[8]</sup>所做的研究工作,但均未涉及到 42CrMo 钢动态本构关系来描述材料动态力学行为的研究。基于上述分析,车轴材料 42CrMo 钢在冲击载荷下的力学行为以及本构的描述是现阶段研究亟待解决的重点。

本文针对已有研究不足,对 42CrMo 钢的冲击动态力学性能进行了系统的研究,通过分离式霍普金森压杆设备完成四个不同应变率下的冲击压缩实验,得到 42CrMo 钢的动态应力-应变曲线,揭示 42CrMo 钢在冲击动态载荷作用下的变形行为特征,分析了动态加载条件与材料变形的相关性,并对经典 J-C 本构模型进行了合理改进,确定了 42CrMo 钢的 J-C 改进模型的材料参数,得到了很好的拟合结果,验证了模型改进的合理性。

## 1 42CrMo 钢动态力学性能研究

42CrMo 钢动态压缩实验采用分离式霍普金森压杆系统进行,采用圆柱形试样,尺寸为  $\phi 5 \times 4 \text{ mm}$ <sup>[9]</sup>,加载应变率分别为:671 s<sup>-1</sup>、2444 s<sup>-1</sup>、3453 s<sup>-1</sup>、4858 s<sup>-1</sup>,每个加载应变率进行两次重复实验,试其重复性决定是否做第三次实验。实验原理如图 1 所示。

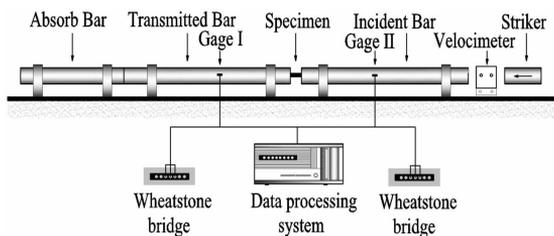


图 1 分离式霍普金森压杆实验设备示意图

分离式霍普金森压杆系统的组成主要有:炮管、子弹、入射杆、透射杆、吸收杆、超动态应变仪和测速仪等。其中,子弹、入射杆、透射杆直径均为 14.5 mm,入射杆长度为 400 mm,透射杆长度为 525 mm,弹速最高可达 60 m/s。超动态应变仪的采样频率为 1 MHz。

得到波形数据按照二波法处理<sup>[10]</sup>,该方法是基于一维假定及均匀性假定并由一维弹性波传播理论得到。分离式霍普金森压杆实验的测量传感器采用贴于金属压杆中部的应变片,输入杆上的入射应变波、反射应变波和输出杆上的透射应变波均由该测量传感器记录。实验过程中,由一维应力波理论可知:试件的平均应变率、试件的平均应变、试件两端面应力的平均值(有效平均应力或可测平均应力)分别为:

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}(t) = \frac{v_1 - v_2}{l_s} = \frac{C_0}{l_s}(\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) \\ \varepsilon(t) = \frac{C_0}{l_s} \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) dt \\ \sigma(t) = \frac{1}{2} \left[ \frac{A}{A_s} E (\varepsilon_i + \varepsilon_r) + \frac{A}{A_s} E \varepsilon_t \right] = \frac{A}{2A_s} E (\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $v_1$ 、 $v_2$  为试样两个端面的瞬时速度(m/s);  $l_s$ 、 $A_s$  为试样的长度(m)和横截面积(m<sup>2</sup>);  $A$ 、 $E$  为压杆的横截面积(m<sup>2</sup>)、弹性模量(GPa);  $\rho$  为压杆的密度(kg/m<sup>3</sup>);  $\varepsilon_i$  为入射波、 $\varepsilon_r$  为反射波、 $\varepsilon_t$  为透射波;为应力波在杆中的传播速度(m/s),其计算公式为:

$$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

若对试件引入均匀性假设,即,则式(1)简化为:

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}(t) = \frac{2C_0}{l_s} \varepsilon_r \\ \varepsilon(t) = \frac{2C_0}{l_s} \int_0^t \varepsilon_r dt \\ \sigma(t) = \frac{A}{A_s} E \varepsilon_r \end{cases} \quad (3)$$

式(3)即为经典的二波法实验数据处理公式。

通过对实验前后试样进行对比,发现 42CrMo 钢有良好的塑性,可以实现较大程度的变形。试样实验前后应变变化见表 1。

表 1 压缩前后试样应变

	原始试样	671 s <sup>-1</sup>	2444 s <sup>-1</sup>	3453 s <sup>-1</sup>	4858 s <sup>-1</sup>
试样纵向尺寸/mm	4	3.76	3.42	2.96	2.48
应变/%	0	6	14.5	26	38

结合工程应力-应变曲线转真实应力-应变曲线的公式得到各应变率下 42CrMo 钢冲击加载下的真实应力-应变曲线。为了更好地说明 42CrMo 钢的动态力学性能,采用 RPL100 材料试验机得到 42CrMo 钢在应变率为 0.1 s<sup>-1</sup>、0.01 s<sup>-1</sup>、0.001 s<sup>-1</sup> 下的准静态压缩实验结果,如图 2 所示。

将准静态压缩实验结果与动态应力-应变曲线进行比较,如图 3 所示。

从图 3 可知,冲击加载下 42CrMo 钢的屈服强度明显高于准静态屈服强度,屈服强度从 800 MPa 增加到 1280 MPa,增加幅度达到 60%。动态压缩与准静态压缩的应力-应变曲线相比,冲击加载下屈服强度高而应变硬化率低。在冲击加载情况下,42CrMo 钢可视为无应变率效应,排除动态实验曲线的震荡,不同冲击加载应变率下的曲线屈服强度基本一致。

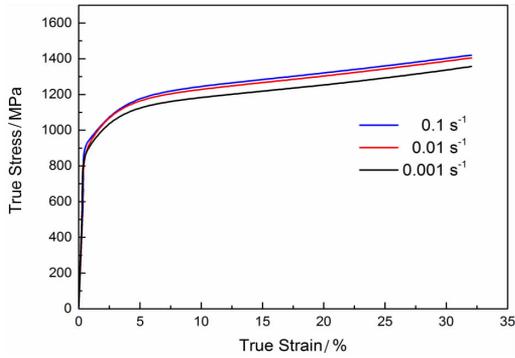


图 2 准静态压缩真实应力 - 应变关系图

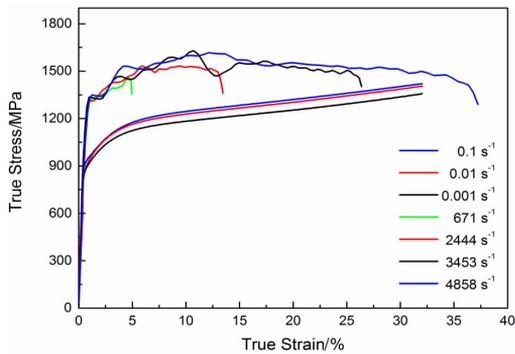


图 3 冲击压缩及准静态压缩真实应力 - 应变关系对比图

## 2 42CrMo 钢的动态本构模型研究

### 2.1 J-C 模型及其改进

考虑 42CrMo 钢所属的 BCC 金属特性<sup>[11]</sup>,及其准静态和动态实验反映的材料特性,选择经典 J-C 模型<sup>[12]</sup>进行材料本构描述,并对其进行改进,以适应材料的特性。

此外,无论是经典 J-C 模型或者是 Z-A 模型<sup>[13]</sup>,均没有考虑高应变率下,材料绝热温升的因素。在高速冲击条件下,材料塑性变形产生的热量无法向外界快速扩散进而积累导致温度上升。该温度的测量一直是研究的难点所在,主要在于瞬态温度精确测试技术达不到要求。Kapoor 和 Nemat-Nasser<sup>[14]</sup>在 1998 年根据 Noble 和 Harding<sup>[15]</sup>的研究工作得到高应变率下塑性变形产生的温升计算公式:

$$\eta \Delta W \approx \Delta Q \tag{4}$$

$$\eta \int_0^\epsilon \sigma_e d\epsilon = \rho C_v \Delta T \tag{5}$$

$$\Delta T(\epsilon) = \frac{\eta}{\rho C_v} \int_0^\epsilon \sigma_e d\epsilon \tag{6}$$

其中:  $\Delta W$  为所做的功(J),  $\Delta Q$  为产生的热量(J),  $\eta$  为塑性功热转换系数,  $\sigma_e$  为真实应力(MPa),  $\epsilon$  为真实应

变,  $C_v$  为温度依赖的室温比热,  $\rho$  为材料密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $\Delta T$  为绝热温升( $^\circ\text{C}$ )。

将 42CrMo 钢的密度  $7.85 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、塑性功热转换系数 0.9 代入式(6)并结合实验曲线计算得到加载应变率分别为  $671 \text{ s}^{-1}$ 、 $2444 \text{ s}^{-1}$ 、 $3453 \text{ s}^{-1}$ 、 $4858 \text{ s}^{-1}$  时的绝热温升,见表 2。

表 2 试样绝热温升

	$671 \text{ s}^{-1}$	$2444 \text{ s}^{-1}$	$3453 \text{ s}^{-1}$	$4858 \text{ s}^{-1}$
绝热温升/ $^\circ\text{C}$	16	49	100	143

由表 2 可知,四个加载应变率下绝热温升从  $16 \text{ }^\circ\text{C}$  上升到  $143 \text{ }^\circ\text{C}$ 。显然,在冲击动态加载特别是高应变率下,不考虑绝热温升产生的温度软化效应是不合理的。因此,在改进的 J-C 模型中加入绝热温升软化项。建立起如下改进的 J-C 本构模型方程:

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \epsilon^*) (1 - T^{*m}) \tag{7}$$

$$T^* = \frac{\Delta T(\epsilon)}{T_m - T_r} \tag{8}$$

$$\Delta T(\epsilon) = \frac{\eta}{\rho C_v} \int_0^\epsilon \sigma_e d\epsilon \tag{9}$$

在改进的 J-C 模型中,  $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$  为相对塑性应变率,参数  $m$  为表示材料软化的系数;为材料熔点( $^\circ\text{C}$ );为参考温度( $^\circ\text{C}$ ),此处取室温。其他参数均为材料参数。其在表达形式上与经典 J-C 模型相同,但其中  $T^*$  的具体含义发生改变,由  $\Delta T(\epsilon)$  绝热温升,替代了  $(T - T_r)$  实验温度与室温之差。这是因为常温下进行的实验,可忽略这一影响,但绝热温升独立存在,需单独考虑。

最后得出 42CrMo 钢在改进的 J-C 模型下的所有参数<sup>[16]</sup>,见表 3

表 3 改进 J-C 本构模型参数值

A	C	B	n	m
1059	0.008	528	0.211	1

### 2.2 改进后 J-C 模型的验证

采用考虑绝热温升改进后的 J-C 模型,对 42CrMo 钢计算所得应力 - 应变曲线,与冲击压缩实验所得曲线进行拟合,结果如图 4 所示。

由图 4 中四个不同加载应变率的拟合结果可以看出,考虑了绝热温升引起的温度软化效应,改进后的 J-C 模型,其模型计算结果与实验结果拟合很好。在所选取的四个不同高应变率情况下,加载应变率为  $671 \text{ s}^{-1}$  时的拟合效果最好,模拟曲线和实验曲线基本重合。验证了改进后的模型可以很好地表征 42CrMo 钢在冲击加载下的动态力学性能。

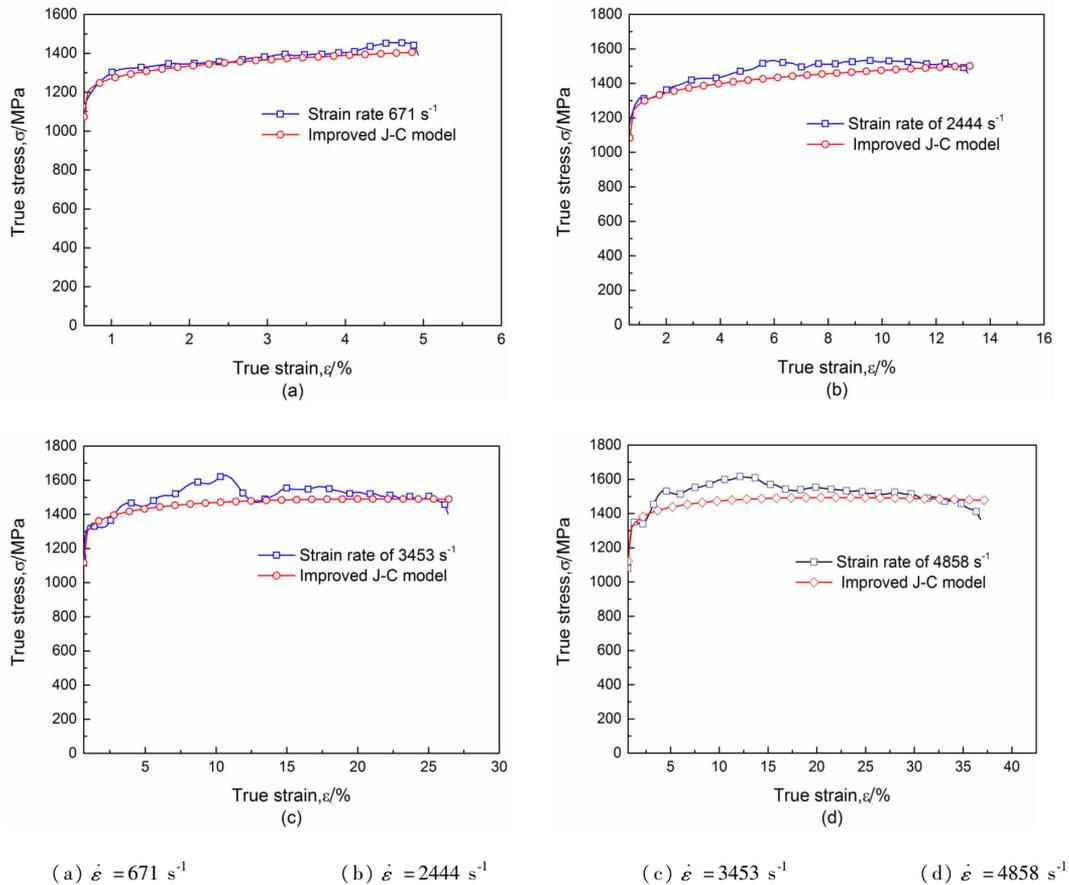


图4 动态压缩实验与改进 J-C 模型比较图

### 3 结论

本文对 42CrMo 钢进行了冲击动态加载实验,得到其不同应变率下的应力-应变曲线。通过对 J-C 模型进行合理的改进,得到了更加适用于 42CrMo 钢的冲击动态本构模型。相关的研究结论如下:

(1) 42CrMo 钢在准静态压缩下,有明显的应变硬化现象,即应变增加时流动应力明显上升;但在冲击压缩时,随着应变率的提高,应变硬化率下降,应变率超过  $3000 \text{ s}^{-1}$ ,流变应力出现下降段,这是由于存在绝热温升导致的温度软化效应。

(2) 热软化效应的产生是由于高应变率下,材料塑性变形生热无法向外界扩散,进行积累导致温升。对材料力学性能影响极大,且此效应与实验温度对材料力学性能的影响相互独立。计算结果显示室温条件下,绝热温升可以达到接近  $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,表明这一因素是材料力学性能变化的一个主导原因。

(3) 引入绝热温升导致材料软化项,对 J-C 模型进行了改进,改进后的模型可以很好地描述 42CrMo 钢的冲击动态力学性能,包括材料的应变硬化效应、温

度软化效应。通过和实验曲线的对比,验证了改进后模型的合理性和适用性,可以用来预测材料变形趋势。

### 参考文献:

- [1] VARVANI-FARAHANI A. Fatigue-ratcheting damage assessment of steel samples under asymmetric multi-axial stress cycles[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2014, 73: 152-160.
- [2] 刘宇杰,康国政,高庆,等.调质 42CrMo 钢的棘轮-疲劳交互作用及其耦合损伤粘塑性本构模型[J]. 固体力学学报, 2009, 30(2): 109-115.
- [3] 张继明,杨振国,张建锋,等.零夹杂 42CrMo 高强钢的超长寿命疲劳性能[J]. 金属学报, 2005, 41(2): 145-149.
- [4] KIM S I, LEE Y, BYON S M. Study on constitutive relation of AISI4140 steel subject to large strain at elevated temperatures [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 104(19): 84-89.
- [5] 蔺永诚,陈明松,钟振. 42CrMo 钢的热压缩流变应力

- 行为[J].中南大学学报:自然科学版,2008,39(3):549-553.
- [6] TERRES M A, LAALAI N, SIDHOM H. Effect of nitriding and shot-peening on the fatigue behavior of 42CrMo4 steel: Experimental analysis and predictive approach[J]. Materials and Design, 2012, 35: 741-748.
- [7] HOR A, MOREL F, LEBRUN J L, et al. An experimental investigation of the behavior of steels over large temperature and strain rate ranges [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 67 (1): 108-122.
- [8] 刘学文, 程育仁, 田越. 车轴钢在高应变率下动态力学性能的研究[J]. 铁道学报, 1993(2): 101-106.
- [9] GB/T7314-2005, 金属材料室温压缩试验方法[S].
- [10] KOLSKY H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading [J]. Proceedings of the Physical Society. Section B, 2002, 62(11): 676-700.
- [11] 郭伟国. BCC 金属的塑性流动行为及其本构关系研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [12] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rate and high temperatures[C]//Proceedings of Seventh International Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands, 1983: 541-547.
- [13] ZERILLI F J, ARMSTRONG R W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations[J]. Journal of Applied Physics, 1987, 61(5): 1816-1825.
- [14] KAPOOR R, NEMAT-NASSER S. Determination of temperature rise during high strain rate deformation [J]. Mechanics of Materials, 1998, 27(1): 1-12.
- [15] NOBLE J P, HARDING J. Temperature measurement in the tensile Hopkinson bar test [J]. Measure. Sci. Technol, 1998, 5(9): 1163-1171.
- [16] 彭建祥. 钽的本构关系研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2001.

## Study on Dynamic Constitutive Relation of 42CrMo Steel Based on Johnson-Cook Model

LU Yesen, ZHU Zhiwu, XIE Qijun

(School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** 42CrMo steel, as the main raw material of the high-speed train axles, withstands complex loading conditions in the high-speed train. Whereas axle is an essential component, in addition to considering the normal design loads, the effect of the impact load need to be considered more specifically. In order to study the dynamic mechanical properties and stress-strain relationship of steel axle, the quasi-static and dynamic compression of 42CrMo steel were tested. Seven experiments at strain rates ranging from  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  to  $5000 \text{ s}^{-1}$  show thermal softening exists without rate-dependent plastic behavior. Because of the high impact speed, the plastic deformation is carried out with no heat, then the temperature rises by accumulating. And a new constitutive model which includes thermal softening effect based on the J-C constitutive model has been proposed to describe the dynamic mechanical behavior of 42CrMo steel. They are in good agreement with the experimental data, which show that the new constitutive model can describe the mechanical behavior of 42CrMo steel at various strain rates very well.

**Key words:** 42CrMo steel; Split-Hopkinson pressure bar; thermal softening; Johnson-Cook model