

冲击加载下 42CrMo 钢的动态力学性能及其本构关系^{*}

李定远¹, 朱志武^{1,2}, 卢也森¹

(1. 西南交通大学力学与工程学院, 四川成都 610031;

2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 四川成都 610031)

摘要: 车轴作为高速列车走行部中的重要部件, 不可避免地需承受冲击载荷作用。为研究车轴用 42CrMo 钢的冲击动态力学性能, 对其进行了应变率 $0.001 \sim 4163 \text{ s}^{-1}$ 范围内的压缩实验, 结果显示 42CrMo 钢在高应变率下表现出明显的应变率效应, 存在应变硬化以及一定的热软化效应。根据实验结果对 Johnson-Cook 模型中应变项和应变率项解耦, 并引入绝热温升, 得到改进的 Johnson-Cook 模型, 改进 Johnson-Cook 模型能够较好地描述 42CrMo 钢的动态力学特性, 为实际工程结构力学分析提供了参考。

关键词: 42CrMo 钢; 应变率效应; 绝热温升; 本构模型

中图分类号: O347.1

文献标志码: A

doi: 10.11858/gywlxb.2017.06.011

1 引言

车轴是高速列车走行部中的重要部件, 在高速列车正常工作状态下, 车轴除承受复杂的设计载荷外, 不可避免地会受到车体及轮轨对其的冲击作用。因此, 车轴钢各方面力学性能的研究得到了越来越多的关注。

目前国内外车轴制备中使用较成熟的车轴钢材料包括 LZ50 钢、EA4T 钢和 42CrMo 钢等^[1], 对于各类车轴钢的力学性能研究主要集中在疲劳性能、热变形性能以及低应变率加载响应等方面。针对国内广泛使用的 LZ50 钢, 赵永翔等^[2]完成了 LZ50 车轴钢的随机循环本构关系实验研究, 提出了合理的统计模型及模型参量。Yang 等^[3]通过观察疲劳实验中 LZ50 车轴钢的微观结构, 揭示了其裂纹萌生和发展的特性, 并提出了一种新的裂纹扩展模型来描述微观结构对裂纹扩展的周期性障碍。欧洲是高速列车发展起步较早的地区, 其车轴用钢主要有 EA4T 钢、42CrMo 钢等, 目前对其已有较深入的研究。Quan 等^[4]基于一个韧性损伤积累准则研究了 42CrMo 钢在不同温度和应变率下的压缩韧性断裂行为。Kunc 等^[5]通过对比 42CrMo 钢低周循环加载破坏实验结果及数值模拟结果, 验证了考虑各向同性和随动强化或软化损伤的宏观本构模型的适用性。孟扬等^[6]利用光学显微镜观察 EA4T 车轴钢的显微组织, 研究了不同成分 EA4T 车轴钢的高周疲劳性能, 总结了提高其疲劳强度的因素。Varfolomeev 等^[7]对 EA4T 车轴钢的疲劳裂纹扩展进行了研究, 并提供了其工作状态下残余寿命的评估标准。Linhart 等^[8]对 EA4T 钢进行了高周疲劳测试实验, 研究了微裂纹的萌生及生长对其疲劳极限的影响。综上可

^{*} 收稿日期: 2017-01-11; 修回日期: 2017-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(11672253); 四川省应用基础研究项目(2017JY0221)

作者简介: 李定远(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事合金材料动态本构研究. E-mail: scldy105@163.com

通讯作者: 朱志武(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事材料动态本构研究. E-mail: zzw4455@163.com

知,目前对各类型车轴钢的性能研究主要集中在循环加载工况,且疲劳寿命方面的研究已较为全面,而对于车轴钢的冲击动态力学性能研究却比较匮乏。基于研究现状以及现实需求,十分有必要对车轴钢在冲击动态载荷下的力学性能进行研究。

本工作针对车轴用 42CrMo 钢进行准静态压缩和冲击动态压缩实验,通过分析实验结果,研究 42CrMo 钢的冲击动态力学性能;再基于 Johnson-Cook 模型对 42CrMo 钢的冲击动态本构进行研究及改进,并确定合适的模型参数,以期更加贴近实际。

2 42CrMo 钢动态力学性能实验及变形机理

2.1 42CrMo 钢实验

实验分为准静态压缩和动态压缩两部分,采用圆柱体试样,试件尺寸为 $\varnothing 5 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。准静态压缩实验在 RPL100 材料试验机上进行,加载应变率分别为 0.001 、 0.01 和 0.1 s^{-1} ,每个应变率下进行两次实验,分析两次应力-应变曲线的一致性,从而补充实验至实验结果表现出一致性,最终得到的准静态压缩应力-应变结果如图 1 所示。

利用分离式霍普金森压杆(SHPB)装置进行动态压缩实验。实验所采用的 SHPB 入、反射杆的材料均为 35CrMnSi 钢,弹性模量为 210 GPa ,密度为 7900 kg/m^3 ,长度分别为 400 和 525 mm ,子弹长 200 mm ,入、反射杆及子弹截面直径均为 14.5 mm ,实验时在子弹与入射杆接触面粘贴薄铜片,以起到波形整形作用并增加加载应变率的恒定性。实验中,通过调节驱动子弹发射的气压大小控制加载应变率,加载应变率分别为 1704 、 2525 、 3105 和 4163 s^{-1} ,每个应变率下进行两次实验,分析两次应力-应变曲线的一致性,从而补充实验至实验结果表现出一致性。实验得到的典型波形如图 2 所示,动态压缩实验后试样尺寸变化如表 1 所示。

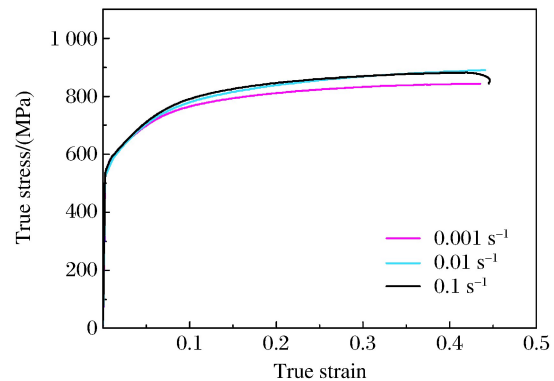


图 1 42CrMo 准静态压缩真实应力-应变曲线

Fig. 1 True stress-strain curves of quasi-static compression experiments of 42CrMo steel

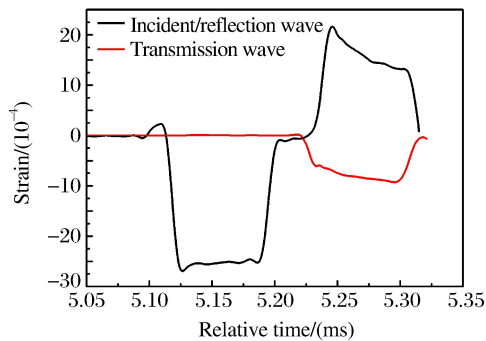


图 2 SHPB 实验典型波形

Fig. 2 Wave figure of SHPB experiments

表 1 动态压缩实验后试样尺寸变化

Table 1 Longitudinal size and strain variations of specimens after dynamic compression experiments

Strain rate/ (s^{-1})	Longitudinal size/(mm)	Longitudinal strain/(%)
0	4.00	0
1704	3.64	9
2525	3.12	22
3105	2.72	32
4163	2.36	41

利用 SHPB 装置测得反射波和透射波的应变信号,结合二波法处理公式

$$\begin{cases} \epsilon_s = -(2C_0/l_s) \int_0^t \epsilon_r d\tau \\ \dot{\epsilon}_s = -(2C_0/l_s) \epsilon_r \\ \sigma_s = (A_b/A_s) E_b \epsilon_t \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\bar{\epsilon}_s$ 、 $\dot{\bar{\epsilon}}_s$ 和 $\bar{\sigma}_s$ 分别为试件的平均应变、平均应变率和平均应力, ϵ_r 和 ϵ_t 分别为反射应变和透射应变, C_0 为波导杆中弹性纵波速度, E_b 为波导杆弹性模量, A_b 为波导杆横截面积, l_s 为试件长度, A_s 为试件横截面积。

在计算加载应变率时,取反射波上升沿和下降沿之间的平台段数据的平均值作为 ϵ_r ,最终得到动态压缩实验应力-应变结果,与静态实验结果一起绘制于图 3 中。

2.2 42CrMo 钢实验结果分析

由表 1 发现,42CrMo 钢在冲击动态加载下表现出良好的塑性,即 42CrMo 钢可产生较大变形。对比 42CrMo 钢的准静态压缩和动态压缩实验结果(见图 3)可知:42CrMo 钢在准静态压缩和动态压缩下均表现出应变硬化效应。准静态加载下,42CrMo 钢在各应变率下的屈服强度均为 560 MPa 左右,可认为在准静态加载下 42CrMo 钢无应变率效应。冲击动态加载下,42CrMo 钢的屈服强度较准静态下有明显提高,且随着应变率的升高,屈服强度由 750 MPa 升高至 1000 MPa,表现出明显的应变率效应。同时发现,排除冲击动态实验数据的震荡,42CrMo 钢在高应变率时(尤其应变率为 4163 s^{-1} 时)表现出一定的软化行为。

2.3 42CrMo 钢塑性变形机理

通常金属中的位错运动主要受到两种障碍的阻力,分别为短程障碍和长程障碍^[9]。短程障碍包括 Peierls-Nabarro 应力^[10]、空位和自间隙原子等点缺陷、与滑移面交叉的位错、合金元素和溶质原子。

42CrMo 钢属于典型的体心立方(BCC)金属,其流动应力对温度依赖性的率控制机理主要是克服由 Peierls-Nabarro 应力控制的 Peierls-Nabarro 势垒,因此认为塑性流动实际上是位错越过 Peierls-Nabarro 势垒障碍的热激活滑移过程。

根据统计力学的基本假设、位错的热力学关系^[11]和 Orowan 方程:一方面,Peierls-Nabarro 势垒随应变率的升高而升高;另一方面,由于高应变率加载的瞬时性,由材料塑性功转化成的热量没有足够时间向外部耗散,由此产生的绝热温升导致位错必须克服的激活自由能降低,从而位错更容易越过障碍。因此,宏观上流动应力表现出应变率效应和高应变率下的热软化效应。

3 42CrMo 钢动态本构模型研究

3.1 Johnson-Cook 模型简介及分析

Johnson-Cook 模型^[12]是一种常用的金属材料本构模型,它主要考虑了应变率效应和温度效应,对于大量金属材料的变形描述都是相当吻合的^[13]。Johnson-Cook 模型的具体形式为

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) (1 - T^{*m}) \quad (2)$$

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (3)$$

式中: σ 为流动应力; ϵ 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}$ 为加载应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率; T 、 T_m 和 T_r 分别为实验温度、材料熔化温度和环境温度; A 、 B 、 C 、 m 和 n 为材料参数,可由实验确定。

本实验在室温条件下进行,实验温度和环境温度均为室温 300 K,故(2)式可退化为

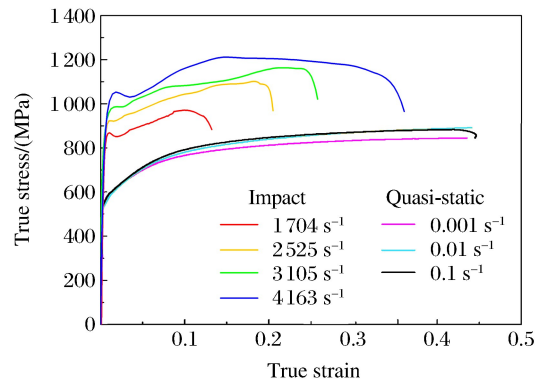


图3 42CrMo 钢冲击动态及准静态压缩
真实应力-应变曲线

Fig. 3 Impact and quasi-static compression
stress-strain curves of 42CrMo steel

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \quad (4)$$

取参考应变率 $\dot{\epsilon}_0 = 0.001 \text{ s}^{-1}$, 得到车轴钢的 Johnson-Cook 模型参数, 如表 2 所示^[14]。

表 2 Johnson-Cook 模型参数

Table 2 Parameters' value of Johnson-Cook model

$A/(\text{MPa})$	$B/(\text{MPa})$	n	C
538.09	424.70	0.303 57	0.027 86

图 4 给出了采用 Johnson-Cook 模型计算的应力-应变曲线与实验结果的对比。由图 4 可发现, Johnson-Cook 模型对 42CrMo 钢在冲击动态加载下屈服强度的应变率效应描述效果不理想, 并且没有描述 42CrMo 钢在冲击动态加载下应变硬化率下降的现象, 因此需要对 Johnson-Cook 模型进行改进。

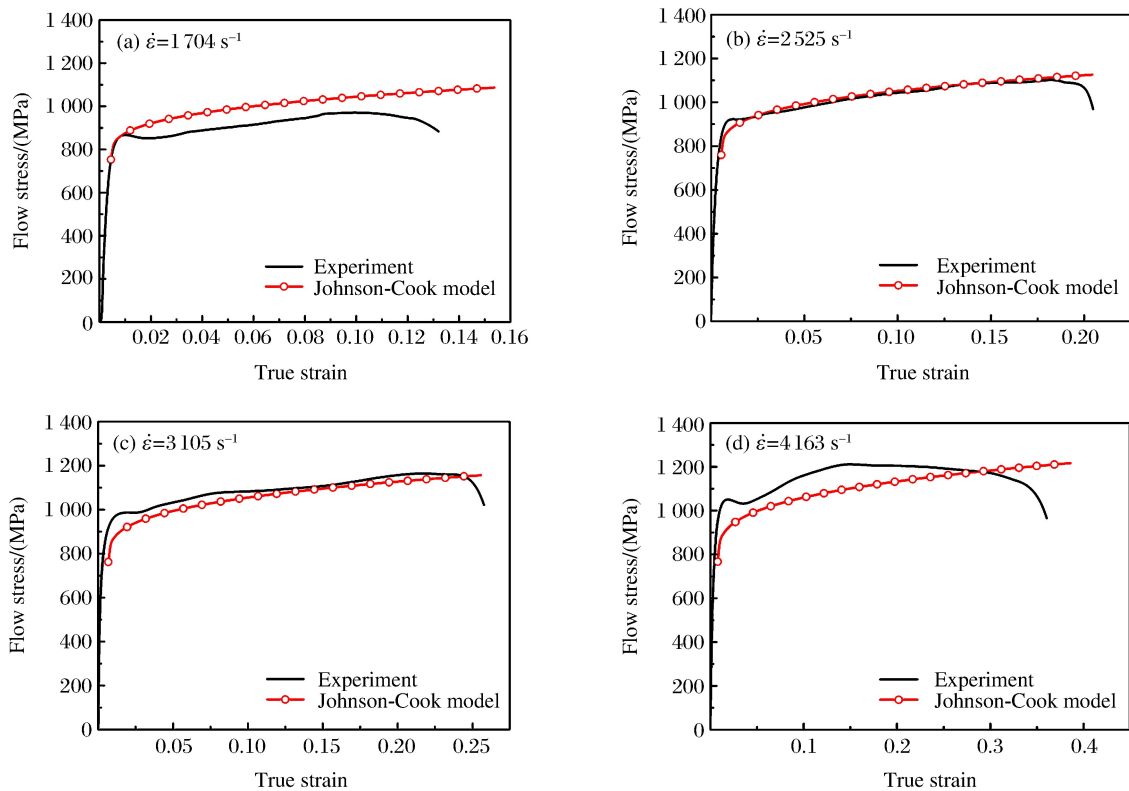


图 4 实验与 Johnson-Cook 模型结果对比

Fig. 4 Experimental stress-strain curves and stress-strain curves calculated by Johnson-Cook model

3.2 改进 Johnson-Cook 模型

由实验结果可得, 42CrMo 钢在冲击动态加载下表现出明显的应变率效应。以应变率敏感系数 λ ($\lambda = \partial\sigma/\partial\dot{\epsilon}$) 表征流动应力随应变率的变化趋势, 图 5 给出了 42CrMo 钢塑性应变分别为 0.4%、7% 和 10% 时流动应力随应变率的变化。

通过分析图 5 发现, 应变率敏感系数 λ 对应变不敏感。因此定义

$$\frac{\partial\sigma}{\partial\dot{\epsilon}} = \lambda(\dot{\epsilon})\sigma(T) \quad (5)$$

则

$$\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}) = \int \lambda(\dot{\epsilon})\sigma(T) d\dot{\epsilon} = [\sigma(\epsilon) + \sigma(\dot{\epsilon})]\sigma(T) \quad (6)$$

式中: $\sigma(\epsilon)$ 为应变相关项, $\sigma(\dot{\epsilon})$ 为应变率相关项, $\sigma(T)$ 为温度相关项。

参考 Johnson-Cook 模型中幂律应变硬化形式,令

$$\sigma(\epsilon) = A + B\epsilon^n \quad (7)$$

参考 Rule 和 Jones^[15] 提出的指数形式应变率项并结合图 5 中流动应力随应变率的变化规律,令

$$\sigma(\dot{\epsilon}) = C\dot{\epsilon}^* \quad (8)$$

$$\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0 \quad (9)$$

冲击动态加载是一个瞬态过程,在此过程中金属材料产生的塑性功转化成热量,但热量没有足够时间向外部耗散,由此产生的绝热温升效应导致材料软化。Kapoor 和 Nemat-Nasser^[16] 在研究钛合金高应变率变形的绝热温升时,提出金属材料塑性变形功转化为温升的计算公式

$$\eta\Delta W \approx \Delta Q \quad (10)$$

$$\eta \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon = \rho c_v \Delta T \quad (11)$$

$$\Delta T = \eta (\rho c_v)^{-1} \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon \quad (12)$$

式中: η 为功热转化系数, ΔW 为塑性功, ΔQ 为转化热量, ρ 为材料密度, c_v 为材料定容比热容, ΔT 为温升。

将 42CrMo 钢的材料参数 $\eta=0.9$ 、 $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$ 和 $c_v=460 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 代入(12)式,得到不同加载应变率下 42CrMo 钢的绝热温升与应变的关系,如图 6 所示。由图 6 可得,绝热温升与应变近似呈线性关系,且 $\partial(\Delta T)/\partial\epsilon$ 与应变率有关,如图 7 所示。根据以上分析可得

$$\partial(\Delta T)/\partial\epsilon = D\dot{\epsilon}^* + E \quad (13)$$

$$\Delta T = \int [\partial(\Delta T)/\partial\epsilon] d\epsilon = (D\dot{\epsilon}^* + E)\epsilon + F \quad (14)$$

式中: D 、 E 和 F 为系数,并且由图 6 可得 $F=0$ 。

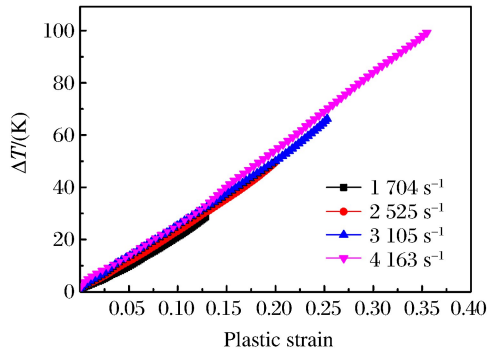


图 6 不同应变率下绝热温升与应变的关系

Fig. 6 Relation of temperature rise and plastic strain at different strain rates

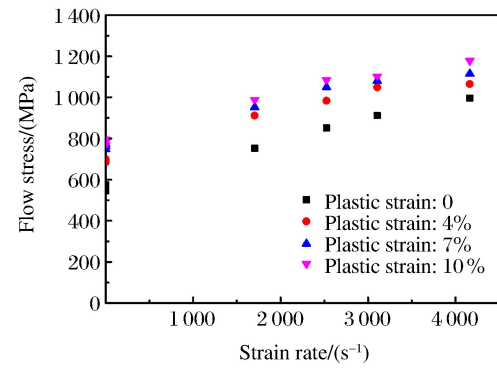


图 5 流动应力随应变率的变化

Fig. 5 Relation of flow stress and strain rate

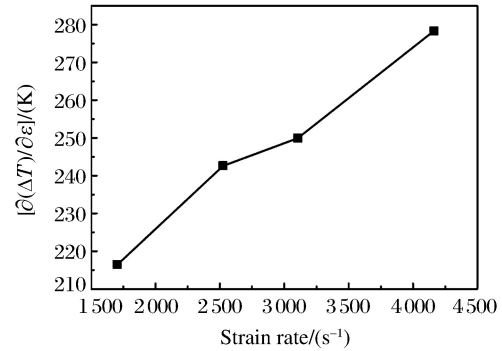


图 7 $\partial(\Delta T)/\partial\epsilon$ 与应变率的关系

Fig. 7 Relation of $\partial(\Delta T)/\partial\epsilon$ and strain rate

用绝热温升 ΔT 替代 Johnson-Cook 模型中 $T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r)$ 的温升 $(T - T_r)$, 可得

$$\sigma(T) = 1 - \left(\frac{\Delta T}{T_m - T_r} \right)^m \quad (15)$$

将(7)式、(8)式、(14)式和(15)式代入(6)式可得 42CrMo 钢的改进 Johnson-Cook 本构模型,即

$$\sigma = (A + B\epsilon^n + C\dot{\epsilon}^*) \left\{ 1 - \left[\frac{(D\dot{\epsilon}^* + E)\epsilon}{T_m - T_r} \right]^m \right\} \quad (16)$$

式中各项参数意义与 Johnson-Cook 模型相同, $T_m=1333 \text{ K}$, $T_r=298 \text{ K}$ 。

3.3 改进 Johnson-Cook 模型的验证

取参考应变率 $\dot{\epsilon}_0=0.001\text{ s}^{-1}$,利用图 6 数据对(14)式进行线性拟合可得到参数 D 、 E ,再利用各应变率下的实验数据可以确定其他参数,最终确定的各项参数如表 3 所示^[11]。

表 3 改进 Johnson-Cook 模型参数
Table 3 Parameters' value of improved Johnson-Cook model

$A/(\text{MPa})$	$B/(\text{MPa})$	$C/(\text{Pa})$	$D/(\text{K})$	$E/(\text{K})$	n	m
607.226	1 235.781	92.89	0.244×10^{-4}	176.6	0.494	0.489

图 8 给出了实验应力-应变曲线与改进 Johnson-Cook 模型计算出的应力-应变关系的对比。由图 8 可见,改进 Johnson-Cook 模型的计算结果与实验结果吻合较好,反映了应变硬化和绝热温升软化效应对 42CrMo 钢动态压缩流变应力的共同作用,改进 Johnson-Cook 模型可较好地描述 42CrMo 钢的动态

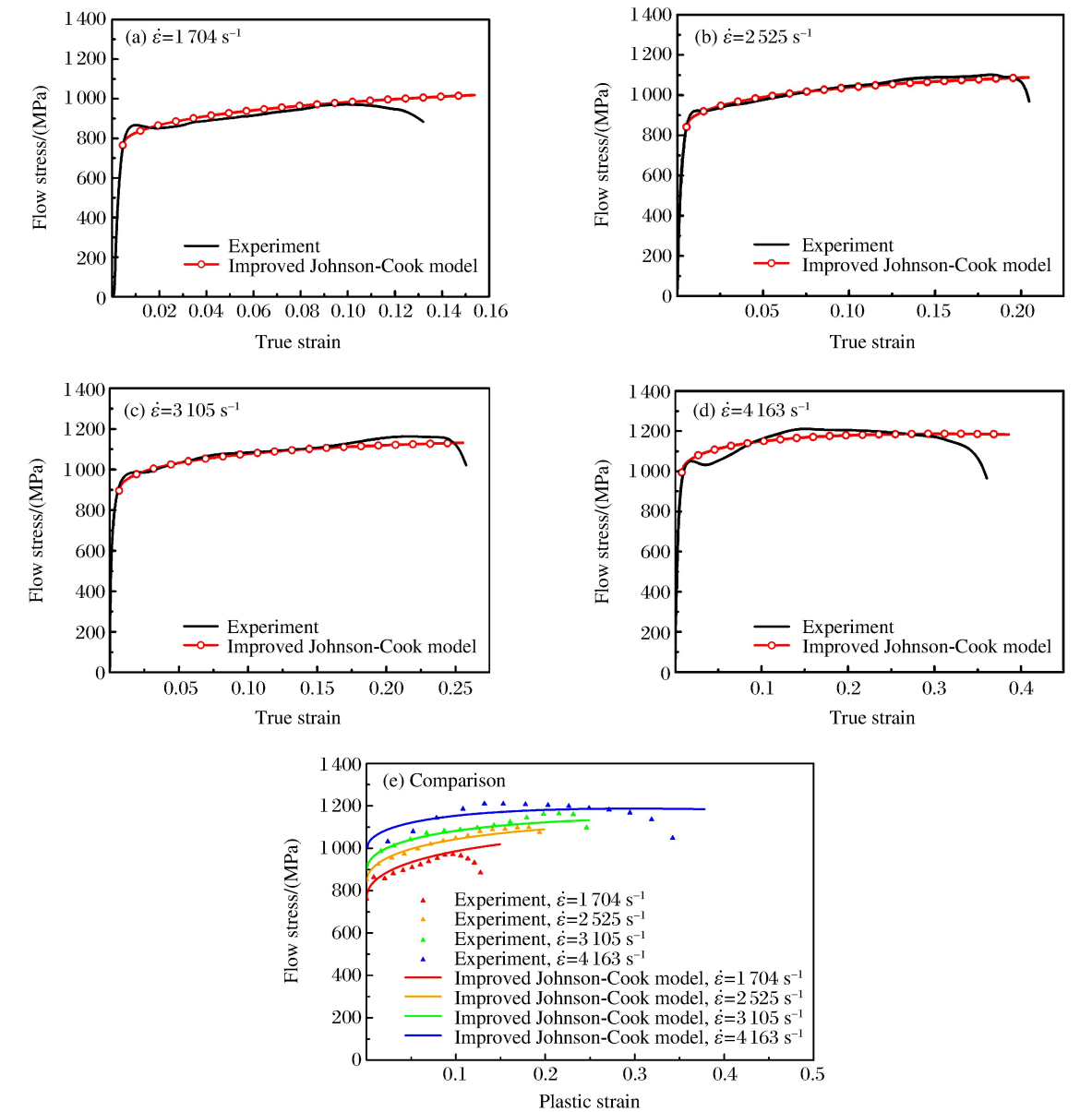


图 8 改进 Johnson-Cook 模型计算所得应力-应变曲线与实验结果的对比
Fig. 8 Comparison of stress-strain curves calculated by improved Johnson-Cook model with experimental results

压缩力学性能。图 8(e)将 4 个应变率下计算的应力-应变曲线与实验应力-应变曲线做了对比,可见,随着应变率的升高,应力-应变曲线的斜率减小,即改进后的 Johnson-Cook 模型能够描述随着应变率的升高,绝热温升软化效应对流变应力的影响增大这一现象。

4 结 论

对车轴用 42CrMo 钢进行了准静态压缩和冲击动态压缩实验,得到了不同应变率下 42CrMo 钢的应力-应变曲线,通过对实验结果的研究分析,得到如下结论。

(1) 42CrMo 钢具有良好的塑性,在准静态和冲击动态压缩下均表现出明显的应变硬化效应;且从准静态到动态加载,屈服应力有明显提升,但在准静态加载下不存在应变率效应。

(2) 42CrMo 钢在冲击动态加载下表现出明显的应变率效应,应变率敏感系数 λ 与应变无关;随着应变率的升高,42CrMo 钢的应变硬化率呈下降趋势,是由冲击动态加载过程中材料的绝热温升所导致的。

(3) 以 Johnson-Cook 模型为基础,针对 42CrMo 钢的两个特征——应变率敏感系数 λ 与应变无关以及绝热温升导致材料应变硬化率下降——提出了改进 Johnson-Cook 模型,它能较好地描述 42CrMo 钢在冲击动态加载下的力学性能。

References:

- [1] 刘鑫贵,吴毅,项彬,等. 动车组车轴标准研究及其技术发展展望 [J]. 铁道机车车辆,2014,34(6):18-22.
LIU X G, WU Y, XIANG B, et al. Standard study and technical development prospect of emu axle [J]. Railway Locomotive & Car, 2014, 34(6): 18-22.
- [2] 赵永翔,杨冰,孙亚芳,等. LZ50 车轴钢的概率循环本构模型 [J]. 机械工程学报,2004,40(9):48-53.
ZHAO Y X, YANG B, SUN Y F, et al. Probability-based cyclic constitution models for LZ50 axle steel [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(9): 48-53.
- [3] YANG B, ZHAO Y X. Experimental research on dominant effective short fatigue crack behavior for railway LZ50 axle steel [J]. Int J Fatigue, 2012, 35(1): 71-78.
- [4] QUAN G, LUO G, MAO A, et al. Evaluation of varying ductile fracture criteria for 42CrMo steel by compressions at different temperatures and strain rates [J]. Sci World J, 2014: 579328.
- [5] KUNC R, PREBIL I. Low-cycle fatigue properties of steel 42CrMo4 [J]. Mater Sci Eng A, 2003, 345(1): 278-285.
- [6] 孟扬,梁益龙. 不同成分 EA4T 车轴钢的高周疲劳性能 [J]. 机械工程材料, 2010, 34(4): 55-57.
MENG Y, LIANG Y L. High cycle fatigue property of EA4T axle steel with different components [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2010, 34(4): 55-57.
- [7] VARFOLOMEEV I, LUKE M, BURDACK M. Effect of specimen geometry on fatigue crack growth rates for the railway axle material EA4T [J]. Eng Fract Mech, 2011, 78(5): 742-753.
- [8] LINHART V, ČERNÝ I. An effect of strength of railway axle steels on fatigue resistance under press fit [J]. Eng Fract Mech, 2011, 78(6): 731-741.
- [9] WEERTMAN J, WEERTMAN J R. Elementary dislocation theory [M]. Oxford: Oxford University Press, 1992: 72-79.
- [10] GUO W G, NEMAT-NASSER S. Flow stress of Nitronic-50 stainless steel over a wide range of strain rates and temperatures [J]. Mech Mater, 2006, 38(11): 1090-1103.
- [11] SHI D Q, YANG X G, WANG Y R. Constitutive modeling of hardening and creep response of a nickel-based superalloy udimet 720Li [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2003, 16(3): 187-192.
- [12] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, 1983: 541-547.

- [13] 刘旭红,黄西成,陈裕泽,等. 强动载荷下金属材料塑性变形本构模型评述 [J]. 力学进展,2007,37(3):361-374.
LIU X H, HUANG X C, CHEN Y Z, et al. A review on constitutive models for plastic deformation of metal materials under dynamic loading [J]. Advances in Mechanics,2007,37(3):361-374.
- [14] 彭建祥. 钽的本构关系研究 [D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2001.
- [15] RULE W K, JONES S E. A revised form for the Johnson-Cook strength model [J]. Int J Impact Eng,1998,21(8):609-624.
- [16] KAPOOR R, NEMAT-NASSER S. Determination of temperature rise during high strain rate deformation [J]. Mech Mater,1998,27(1):1-12.

Mechanical Properties and Constitutive Relation for 42CrMo Steel under Impact Load

LI Ding-Yuan¹, ZHU Zhi-Wu^{1,2}, LU Ye-Sen¹

(1. School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University,
Chengdu 610031, China;

2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University,
Chengdu 610031, China)

Abstract: As an important part of high-speed trains, the axle has to withstand complex loads, especially the shock load in the train's operating conditions. To study the dynamic mechanical properties of the 42CrMo steel used in axle production, quasi-static and dynamic compression experiments of 42CrMo steel were conducted at strain rates from 0.001 s^{-1} to 4163 s^{-1} . The results of these experiments show that the 42CrMo steel has an effect of strain rate, strain hardening and thermal softening at high strain rate. Based on the experimental results, we improved the Johnson-Cook model by decoupling the terms of the strain and the strain rate, and also by considering the adiabatic temperature rise. The improved Johnson-Cook model has proved to be capable of describing the dynamic mechanical properties of the 42CrMo steel well and providing reference for practical engineering structural mechanics analysis.

Key words: 42CrMo steel; strain rate effect; adiabatic temperature rise; constitutive relation