

不同温度和应变速率下 TRIP 钢的流动应力

余海燕, 王友

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 对相变诱发塑性钢 TRIP780 进行了 298, 333, 363 K 温度下且应变速率为 10^{-4} , 10^{-2} , 10^0 , 10^2 , 10^3 s $^{-1}$ 时的单向拉伸试验. 分析了 TRIP780 钢的流动应力对温度和应变速率的敏感性, 并讨论了 Johnson-Cook(JC) 和 Khan-Huang-Liang(KHL) 流动应力模型对 TRIP780 钢的适用性. 结果表明: TRIP780 钢的流动应力呈现对应变速率的正向敏感性和对温度的负向敏感性, 且在高应变速率下流动应力对应变速率的敏感性降低; JC 模型对 TRIP780 钢流动应力拟合在小应变水平下比 KHL 模型更加准确, 而 KHL 模型在大应变水平下有更高的精度.

关键词: 相变诱发塑性钢; 流动应力; 温度; 应变速率

中图分类号: TG301

文献标志码: A

Flow Stress of TRIP Steel at Different Temperatures and Strain Rates

YU Haiyan, WANG You

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804)

Abstract: Uniaxial tension tests of transformation-induced plasticity (TRIP780) steel at temperatures 298, 333, 363 K and strain rates 10^{-4} , 10^{-2} , 10^0 , 10^2 , 10^3 s $^{-1}$ were performed. The sensitivity of the flow stress of TRIP780 steel to temperature and strain rate was analyzed. In addition, the suitability of Johnson-Cook (JC) and Khan-Huang-Liang (KHL) flow stress models to TRIP780 steel was discussed. The results indicate that the flow stress of TRIP780 steel shows positive sensitivity to the strain rate and negative sensitivity to the temperature, and the sensitivity of the flow stress of TRIP780 steel to strain rate decreases at high strain rate. At small strain, the JC model is more accurate for TRIP780 steel than KHL model in the flow stress prediction, while KHL model has higher precision at large strain.

Key words: transformation-induced plasticity steel; flow stress; temperature; strain rate

随着汽车轻量化要求的提高, 高强度钢的应用越来越广泛, 如双相钢、相变诱发塑性钢 (TRIP 钢)、马氏体钢等. 其中 TRIP 钢由于具有相变诱发塑性特性, 即塑性变形会诱发相变, 而相变又会增加材料的塑性, 因而这种材料不仅具有高的强度, 还具有与深冲钢相比拟的延伸率. 目前 TRIP 钢已被用于制造车身安全部件和重要结构件^[1-4]. 这些部件在高速碰撞下瞬时的应变速率可达 10^3 s $^{-1}$, 材料在这样高的应变速率下性能已与准静态下的性能发生很大差别; 车身覆盖件需要经过冲压成形, 应变速率和温度是冲压成形的关键参数, 尤其是冲压成形技术中近些年发展起来的高速成形. 因此, 研究 TRIP 钢在不同温度和不同应变速率下的力学性能非常必要.

流动应力是材料在某一瞬时进行塑性流动所需的真实应力. 它描述了材料的屈服、应变硬化、各向异性等重要力学性能. 流动应力方程、屈服方程与硬化准则共同组成了材料的本构模型, 选择合适的流动应力方程对材料性能的准确描述非常重要.

目前能同时考虑温度和应变速率的本构模型有两类: 第 1 类是纯唯象模型, 如 Johnson-Cook (JC) 模型^[5] 和 Khan-Huang-Liang (KHL) 模型^[6-8]; 第 2 类是基于微观结构的物理基模型, 如 Zerilli-Armstrong 模型^[9-10]、Mecking-Kocks 模型^[11] 以及在其基础上改进的 Nemat-Nasser 模型^[12-14]. 物理基模型主要从塑性变形的机理出发, 分析位错运动及其特性的改变对材料力学行为的作用, 因此这类模型中待定的材料参数较多, 如 Mecking-Kocks 的改进模型仍有 23 个待定材料参数, Nemat-Nasser 改进模型也有 8~12 个待定参数. 这些参数主要通过不同温度和应变速率下的单向拉伸试验数据拟合获得. 待定参数过多导致需要进行多次试验, 并且这些试验需要在不同温度和应变速率下进行, 而某些高温条件下的试验进行比较困难, 如寻找合适的润

滑油和精确的温度控制等,导致该类模型的实际应用受到限制. 相比而言,在宏观力学行为基础上建立的唯象模型应用更方便. 如 JC 模型中的待定参数为 5 个,且参数确定相对物理基模型简单很多,因此 JC 模型很快就得到了广泛应用. 但有研究表明,该模型在描述硬化速率随应变速率呈负增长的材料时误差较大,如铝合金. KHL 模型是在 JC 模型基础上改进而来,待定参数有 6 个. 该模型已成功预测包括钛合金、铜合金等在内的多种金属材料的流动应力.

TRIP 钢由于具有相变诱发塑性特性,塑性变形过程中相变和温度与应变速率相互影响最终决定了材料的流动应力^[15]. 由此,本文主要目的是通过不同温度和不同应变速率下的单向拉伸试验,分析 TRIP 钢流动应力对温度和应变速率的敏感性,并通过曲线拟合的方法选择适合于描述 TRIP 钢的流动应力模型,以期对 TRIP 钢性能的准确模拟提供参考.

1 考虑温度和应变速率的流动应力模型

1.1 Johnson-Cook 模型^[5]

1983 年 Johnson 和 Cook 提出了考虑大应变、应变速率和温度效应的流动应力经验模型,如下式所示:

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

式中: σ 是流动应力; ϵ 是等效应变; $\dot{\epsilon}^*$ 是相对等效塑性应变速率, $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$,其中 $\dot{\epsilon}_0$ 是参考应变速率,常取值 1 s^{-1} , $\dot{\epsilon}$ 是应变速率; T_m 是金属的熔点; T_r 是参考温度;参数 A, B, C, n, m 是待定的材料参数,由单向拉伸试验数据拟合的方法确定^[16]. 式(1)右侧第 1 项体现了流动应力对应变的依赖,第 2 项体现了流动应力对应变速率的相关,第 3 项则显示了温度对材料流动应力的影响. 在同一温度 T 下,不同应变速率水平 $\dot{\epsilon}_1$ 和 $\dot{\epsilon}_2$ 时的流动应力差值

$$\Delta\sigma = \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}_2, T) - \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}_1, T) = (A + B\epsilon^n) \left(C \ln \frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (2)$$

那么,在 ϵ_1 和 ϵ_2 两应变水平下的流动应力差值分别为

$$\Delta\sigma_1 = \sigma(\epsilon_1, \dot{\epsilon}_2, T) - \sigma(\epsilon_1, \dot{\epsilon}_1, T) = (A + B\epsilon_1^n) \left(C \ln \frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (3)$$

$$\Delta\sigma_2 = \sigma(\epsilon_2, \dot{\epsilon}_2, T) - \sigma(\epsilon_2, \dot{\epsilon}_1, T) =$$

$$(A + B\epsilon_2^n) \left(C \ln \frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (4)$$

如果 $\epsilon_1 < \epsilon_2$ 且 $\dot{\epsilon}_1 < \dot{\epsilon}_2$, 那么可得

$$\Delta\sigma_1 < \Delta\sigma_2 \quad (5)$$

为了更直观地表达上述关系,式(5)的示意图如图 1a 所示,图中标注 $\dot{\epsilon}_1$ 和 $\dot{\epsilon}_2$ 的两条曲线分别是同一材料在相同温度下应变速率为 $\dot{\epsilon}_1$ 和 $\dot{\epsilon}_2$ 的流动应力曲线. 要满足式(5),则应变速率为 $\dot{\epsilon}_2$ 的流动应力曲线应比应变速率为 $\dot{\epsilon}_1$ 的流动应力曲线更加陡,即在相同的应变区间内,流动应力增加幅度更大. 这说明 JC 模型描述的材料流动应力具有对应变速率的正向敏感性,即流动应力变化速率随着应变速率的增加而增加的特性.

另一方面,在同一应变速率 $\dot{\epsilon}$ 下,不同温度下的流动应力差值分别为

$$\Delta\sigma_1 = \sigma(\epsilon_1, \dot{\epsilon}, T_1) - \sigma(\epsilon_1, \dot{\epsilon}, T_2) = (A + B\epsilon_1^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \left[\left(\frac{T_2 - T_r}{T_m - T_r} \right)^m - \left(\frac{T_1 - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (6)$$

$$\Delta\sigma_2 = \sigma(\epsilon_2, \dot{\epsilon}, T_1) - \sigma(\epsilon_2, \dot{\epsilon}, T_2) = (A + B\epsilon_2^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \left[\left(\frac{T_2 - T_r}{T_m - T_r} \right)^m - \left(\frac{T_1 - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (7)$$

假设 $\epsilon_1 < \epsilon_2$ 且 $T_1 < T_2$, 可得

$$0 < \frac{T_1 - T_r}{T_m - T_r} < \frac{T_2 - T_r}{T_m - T_r} < 1 \quad (8)$$

对金属材料, $0 < m < 1$, 可得

$$\Delta\sigma_1 < \Delta\sigma_2 \quad (9)$$

式(9)的示意图如图 1b 所示,图中标注 T_1 和 T_2 的两条曲线分别是同一材料在相同应变速率 $\dot{\epsilon}$ 下温度为 T_1 和 T_2 的流动应力曲线. 可见 T_2 温度下的流动应力曲线要比 T_1 温度下的曲线更加平缓,这就意味着 JC 模型描述的材料流动应力具有温度的负向敏感性,即流动应力变化速率随着温度的升高而递减.

对模型加上相应的边界条件针对式(1)中的每一个模型参数进行分析. 在常温及应变速率为 1 s^{-1} 时,屈服应力 σ_s 就是 A 的值,用试验数据作出应力应变在对数坐标下的曲线可以得到 B 和 n 的值. 确定了 A, B 和 n 的值之后,利用常温下不同应变速率下的试验数据,作出不同应变速率的对数值对应的流动应力曲线,其斜率就是 C 值. 利用 10^{-4} s^{-1} 应变

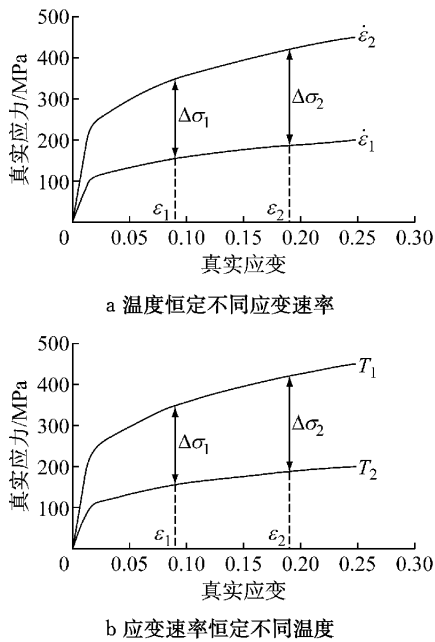


图 1 流动应力随应变速率和温度变化示意图

Fig.1 Schematic diagram of flow stress variation with strain rate and temperature

速率下不同温度对应的试验数据以及确定的 A, B, n 和 C 值计算得到 m 的初始值. 为了减少以上方法获得各参数过程中的误差, 采用 Matlab 对获得的各参数进行优化迭代, 收敛时的值为最终模型参数值: $A=566.3 \text{ MPa}, B=2\ 829.6 \text{ MPa}, C=0.018\ 8, n=0.671\ 5$ 和 $m=0.6$.

1.2 Khan-Huang-Liang 模型

1999 年 Khan 等^[6]在 JC 模型的基础上进行了改进, 提出了如下所示的 KHL 模型:

$$\sigma = \left\{ A + B \left[\left(1 - \frac{\ln \dot{\epsilon}}{\ln D} \right)^{n_1} \epsilon_p^{n_0} \right] \right\} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon^*} \right)^C \left(\frac{T_m - T}{T_m - T_r} \right)^m \quad (10)$$

式中: ϵ_p 是塑性应变; A 是在应变速率为 1 s^{-1} 时材料的屈服应力; B 是材料的强度系数; n_1 和 C 均是应变速率敏感系数; n_0 是应变硬化指数; m 是温度指数; D 是应变速率上限值, 常取 10^6 s^{-1} . 式(10)中有 6 个待定材料参数, A, B, C, n_1, n_0 及 m . 与式(1)相比, 式(10)的右侧同样有三项, 分别表示塑性应变、应变速率和温度对流动应力的贡献水平. 不同的是, KHL 模型在第 1 项中将塑性应变与应变速率进行了耦合, 而 JC 模型中的第 1 项仅用 1 个常数 B 来描述塑性应变对流动应力的贡献.

与式(3)同样的方法, 可获得在温度 T 恒定不同应变速率水平 $\dot{\epsilon}_1$ 和 $\dot{\epsilon}_2$ 时的 KHL 模型表达的流动应力差值分别为

$$\Delta\sigma_1 = \sigma(\epsilon_1, \dot{\epsilon}_2, T) - \sigma(\epsilon_1, \dot{\epsilon}_1, T) \quad (11)$$

$$\Delta\sigma_2 = \sigma(\epsilon_2, \dot{\epsilon}_2, T) - \sigma(\epsilon_2, \dot{\epsilon}_1, T) \quad (12)$$

综合式(10)~(12), 可得

$$\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2 = B \left(\frac{T_m - T}{T_m - T_r} \right)^m (\epsilon_1^{n_0} - \epsilon_2^{n_0}) \left\{ \left(\frac{\dot{\epsilon}_2}{\epsilon^*} \right)^C \left[\left(1 - \frac{\ln \dot{\epsilon}_2}{\ln D} \right)^{n_1} \right] - \left(\frac{\dot{\epsilon}_1}{\epsilon^*} \right)^C \left[\left(1 - \frac{\ln \dot{\epsilon}_1}{\ln D} \right)^{n_1} \right] \right\} \quad (13)$$

当 $\epsilon_1 < \epsilon_2$ 且 $\dot{\epsilon}_1 < \dot{\epsilon}_2$, 那么式(13)中第 3 项 $(\epsilon_1^{n_0} - \epsilon_2^{n_0})$ 为负值, 第 4 项 $\{\dots\}$ 可能为正也可能为负, 这表明式(10)不再是单调函数. 因此, KHL 模型不再具有随应变速率单调变化的特性. 这说明该模型可适用于描述对应变速率呈正向敏感以及负向敏感的材料, 即流动应力变化速率随应变速率增加或减小的材料都可以适用. 这一点相比 JC 模型有较大改进. 同样, 如果应变速率保持恒定, 在应变为 ϵ_1 和 ϵ_2 时温度由 T_1 变化到 T_2 , 可得

$$\Delta\sigma_1 = \sigma(\epsilon_1, \dot{\epsilon}, T_1) - \sigma(\epsilon_1, \dot{\epsilon}, T_2) \quad (14)$$

$$\Delta\sigma_2 = \sigma(\epsilon_2, \dot{\epsilon}, T_1) - \sigma(\epsilon_2, \dot{\epsilon}, T_2) \quad (15)$$

$$\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2 = B \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon^*} \right)^C \left(1 - \frac{\ln \dot{\epsilon}}{\ln D} \right)^{n_1} (\epsilon_1^{n_0} - \epsilon_2^{n_0}) \left\{ \left(\frac{T_m - T_1}{T_m - T_r} \right)^m - \left(\frac{T_m - T_2}{T_m - T_r} \right)^m \right\} \quad (16)$$

假设 $\epsilon_1 < \epsilon_2$ 且 $T_1 < T_2$, 可得

$$\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2 < 0$$

即

$$\Delta\sigma_1 < \Delta\sigma_2 \quad (17)$$

由式(17)可知, KHL 模型也只能描述硬化速率随温度升高而递减材料的流动特性, 这一点与 JC 模型相同, 原因在于这两个模型中描述温度对流动应力影响的表达式均是温度的单调函数. 不过这对绝大多数金属材料是适用的, 因为多数面心立方晶格的金属和体心立方晶格的金属, 其流动应力均随着温度的升高而减小.

由不同应变速率下的屈服应力值 σ_s , 可确定模型参数 A 和 C 的初始值; 依据常温和 1 s^{-1} 应变速率下的应力-应变曲线, 可确定参数 B 和 n_0 的初始值; 根据已经得到的 A, B, C 及 n_0 的值, 采用除应变速率为 1 s^{-1} 的其他应变速率下的任一流动应力曲线可以求得 n_1 的值, 然后对这些值取平均. 最后通过准静态高温应力-应变曲线可求得 m 的值. 采用 Matlab 对获得的各参数进行优化迭代得到最终模型参数值: $A=518 \text{ MPa}, B=1\ 600 \text{ MPa}, C=0.038, n_0=0.49, n_1=0.53$ 和 $m=3.08$.

2 试验

试验所用 TRIP780 钢为柱状哑铃试样, 如图 2

所示. 试样为实心圆柱, 全长 200 mm, 端部直径 25.4 mm, 中间直径 12.7 mm, 端部长 60 mm, 均匀变形部分长度 80 mm. TRIP780 钢为化学成分见表 1. 试样加工过程中严格控制加工速度和表面质量以减少加工对材料性能的影响. 试验过程中设置了五个应变速率水平, 分别是 10^{-4} , 10^{-2} , 10^0 , 10^2 , 10^3 s^{-1} ; 三个温度水平, 298 K (25°C), 333 K (60°C) 和 363 K (90°C).

表 1 TRIP780 钢化学成分

材料	w_C	w_{Mn}	w_P	w_S	w_{Si}
TRIP780	0.16	1.78	0.015	0.002	1.31



图 2 试样形状

Fig. 2 Specimen shape

应变速率为 10^{-4} , 10^{-2} , 10^0 s^{-1} 的拉伸试验均在 MTS809 万能拉伸机上进行. 试样通过夹头装夹在 MTS809 拉伸机上, 应变通过引伸计测量, 应力通过力传感器获得. 应变速率为 10^2 s^{-1} 和 10^3 s^{-1} 的动态拉伸试验在分离式 Hopkinson 拉伸试验机上进行. 拉伸试样通过夹头连接在输入杆和输出杆之间. 分别在输入杆和输出杆表面粘上应变片测量两杆的弹性应变, 然后根据一维弹性波理论可得到试样的应变和应力. 图 3 为正在进行动态拉伸的试验装置.

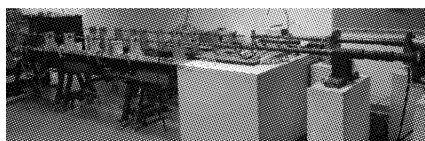


图 3 动态拉伸试验装置

Fig. 3 Dynamical tensile testing device

进行不同温度下的准静态拉伸试验时, 为了保证拉伸时试样的温度可控, 在 MTS809 拉伸机上安装了电阻温控加热装置. 为了确保试样各区域的温度分布均匀, 试样加热到指定温度后还需恒温 30 min 再进行拉伸.

3 试验结果及讨论

图 4 是 TRIP780 钢在温度 298, 333, 363 K 且应变速率为 10^{-4} s^{-1} 条件下的真实应力-应变曲线. 由图可得: ① TRIP780 钢在室温下 (298 K) 的屈服强度约为 480 MPa, 抗拉强度为 834 MPa, 均匀延伸

率高达 30%; 在 333 K 下, 屈服强度约为 440 MPa; 363 K 时屈服强度已经降到 400 MPa 以下. 从 298 K 升高到 333 K 过程中屈服强度降低了 40 MPa, 而从 333 K 升高到 363 K 时屈服强度下降超过了 40 MPa. 这说明随着温度的升高, TRIP 钢的屈服强度下降幅度在加大, 而且随着温度的增加流动应力逐渐下降, 说明流动应力呈现对温度的负向敏感性. ② 室温下的 TRIP780 钢具有显著的应变硬化性能, 尤其是在 0.05~0.15 应变范围内. 这个特性说明 TRIP 钢特别适合于制造车身碰撞安全部件, 如保险杠、B 柱、车门防撞杆等. ③ 随着温度升高, 应力-应变曲线逐渐平缓, 应力变化幅度减小, 说明 TRIP 钢具有随温度升高而硬化速率降低的特点.

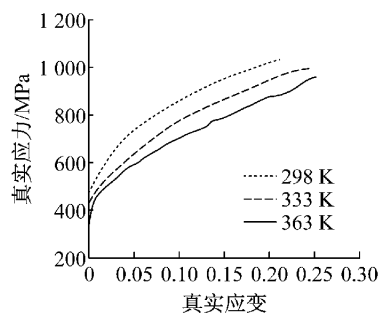


图 4 TRIP780 钢在不同温度下的真实应力-应变曲线 ($\dot{\epsilon} = 10^{-4} s^{-1}$)

Fig. 4 True stress-strain curve for TRIP780 steel at different temperatures ($\dot{\epsilon} = 10^{-4} s^{-1}$)

图 5 是 TRIP780 钢在室温以及不同应变速率下试验得到的真实应力-应变曲线. 由图可得: ① TRIP780 钢在应变速率为 10^{-4} , 10^{-2} , 10^0 , 10^2 , 10^3 s^{-1} 时的屈服强度分别为 480, 520, 558, 607, 653 MPa, 即随着应变速率的增加, TRIP780 钢的屈服强度逐渐增加, 这说明流动应力呈现对应变速率的正向敏感性. ② 在相同应变水平下流动应力曲线斜率随着应变速率的增加而增加, 这说明 TRIP780 钢的

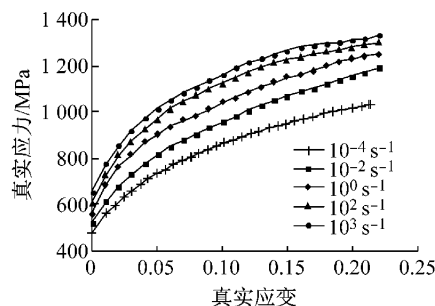


图 5 TRIP780 钢不同应变速率下的真实应力-应变曲线 ($T = 298$ K)

Fig. 5 True stress-strain curve for TRIP780 steel at different strain rates ($T = 298$ K)

应变硬化水平随着应变速率的增加而逐渐加大。③随着应变速率的增加,TRIP780 钢流动应力曲线的斜率变化呈现减少的趋势,这说明在小应变速率水平下随应变速率增加硬化速率增加的幅度,比在大应变速率水平下硬化速率随应变速率增加的幅度大,即硬化速率在大应变速率水平下对应变速率的敏感性降低。

根据所述 KHL 模型参数拟合方法获得试验 TRIP780 钢的各参数为: $A = 518 \text{ MPa}$, $B = 1\ 600 \text{ MPa}$, $C = 0.038$, $n_0 = 0.49$, $n_1 = 0.53$, $m = 3.08$ 。采用该模型预测的各应变速率和温度下的流动应力曲线如图 6 所示。图中用虚线箭头圈起来的 5 条曲线和相应点为 KHL 预测和实测 298 K 温度下,五个应变速率对应的流动应力曲线,图下方的 2 条曲线和相应点是在相同应变速率 $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 下不同温度对应的流动应力曲线。总体而言,预测值与试验值非常接近,最大偏差为 30 MPa。在 0.05~0.17 应变范围内预测值与试验值吻合最好,随后偏差增大。这也说明了 KHL 模型在预测高应变速率和高温下的 TRIP 钢流动应力还有待改进。

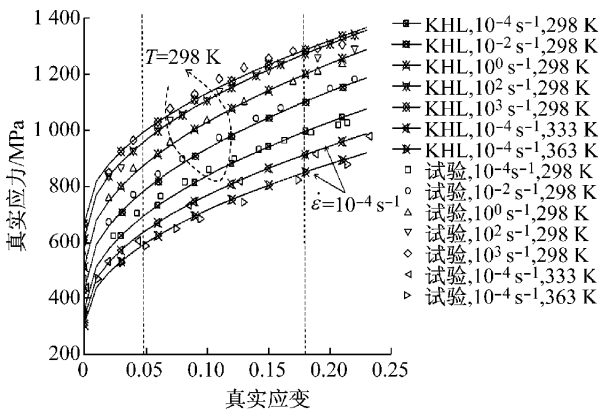


图 6 KHL 模型预测的流动应力曲线与试验值比较

Fig.6 Comparison of flow stress curves of KHL model prediction and test

根据 JC 模型参数拟合方法获得试验 TRIP780 钢的 JC 模型各参数为: $A = 566.3 \text{ MPa}$, $B = 2\ 829.6 \text{ MPa}$, $C = 0.018\ 8$, $n = 0.671\ 5$, $m = 0.6$ 。采用该模型预测的各应变速率和温度下的流动应力曲线如图 7 所示。可见,预测值与试验值也比较接近。JC 模型预测值在小应变水平下要比 KHL 模型预测值更接近试验值,在大应变水平下 KHL 模型更接近试验值。

4 结论

(1) TRIP780 流动应力呈现对应变速率的正向

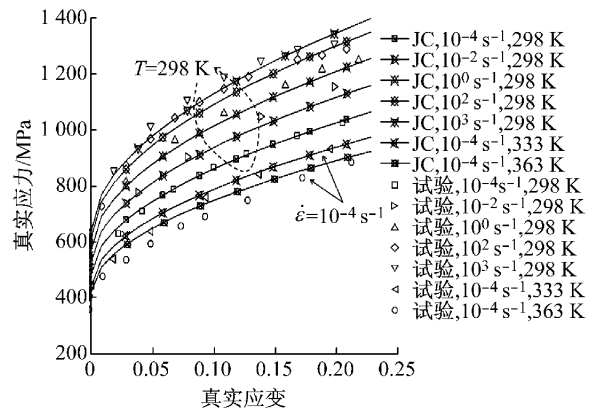


图 7 JC 模型预测的流动应力曲线与试验值比较

Fig.7 Comparison of flow stress curves of JC model prediction and test

敏感性,即随应变速率增加流动应力也增加;在高应变速率水平下具有硬化水平下降的趋势,且硬化对应变速率提高的敏感性比在小应变速率水平下的敏感性低。

(2) JC 模型只适用于硬化速率随着应变速率增加而增加,且随温度升高而递减的材料;而 KHL 模型不仅可用于硬化速率随应变速率增加而增加的材料,还可用于硬化速率随应变速率增加而降低的材料;JC 模型在小应变水平下比 KHL 模型能更准确地预测 TRIP780 的流动应力,而 KHL 在大应变水平下则有更高的精度。

参考文献:

- [1] Hecker S S, Stout M G, Staudhammer K P, *et al.* Effects of strain state and strain rate on deformation-induced transformation in 304 stainless steel. Part 1: magnetic measurements and mechanical behavior [J]. Metallurgical Transactions A, 1982, 13A: 619.
- [2] Murr L E, Staudhammer K P, Hecker S S. Effects of strain state and strain rate on deformation-induced transformation in 304 stainless steel. Part 2: microstructural study [J]. Metallurgical Transactions A, 1982, 13A: 627.
- [3] Nanga S, Pineau A, Tanguy B, *et al.* Plasticity and strain induced martensitic transformation in two austenitic stainless steels [C] //International Conference on Martensitic Transformations (ICOMAT) 2008. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013: 341-348.
- [4] Tsuchida N, Izaki Y, Tanaka T, *et al.* Effects of temperature and strain rate on stress-strain curves for dual-phase steels and their calculations by using the Kocks-Mecking model [J]. ISIJ International, 2012, 52(4): 729.
- [5] 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. Hague: International Ballistics

- Committee, 1983; 541-547.
- [6] Khan A S, Liang R Q. Behaviors of three BCC metal over a wide range of strain rates and temperatures experiments and modeling [J]. *International Journal of Plasticity*, 1999, 15(10): 1089.
- [7] Khan A S, Kazmi R, Farrokh B, *et al.* Effect of oxygen content and microstructure on the thermo-mechanical response of three Ti-6Al-4V alloys; experiments and modeling over a wide range of strain-rates and temperatures[J]. *International Journal of Plasticity*, 2007, 23(7): 1105.
- [8] Khan A S, Kazmi R, Farrokh B. Multiaxial and non-proportional loading responses, anisotropy and modeling of Ti-6Al-4V titanium alloy over wide ranges of strain rates and temperatures[J]. *International Journal of Plasticity*, 2007, 23(6): 931.
- [9] Zerilli F J, Armstrong R W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations[J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 61(5): 1816.
- [10] Zerilli F J, Armstrong R W. Description of tantalum deformation behavior by dislocation mechanics based constitutive relations [J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68(4): 1580.
- [11] Mecking H, Kocks U F. Kinetics of flow and strain-hardening [J]. *Acta Metallurgica*, 1981, 29(11): 1865.
- [12] Nemat-Nasser S, Guo W, Nesterenko V F, *et al.* Dynamic response of conventional and hot isostatically pressed Ti-6Al-4V alloys; experiments and modeling [J]. *Mechanics of Materials*, 2001, 33(8): 425.
- [13] Nemat-Nasser S, Li Y. Flow stress of F.C.C polycrystals with application to OFHC Cu[J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(2): 565.
- [14] Nemat-Nasser S, Okinaka T, Ni L. A physically-based constitutive model for bcc crystals with application to polycrystalline tantalum [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1998, 46(6): 1009.
- [15] Tian R, Li L, De Cooman B C, *et al.* Effect of temperature and strain rate on dynamic properties of low silicon TRIP steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2006, 13(3): 51.
- [16] 范亚夫, 段祝平. Johnson-Cook 材料模型参数的实验测定[J]. *力学与实践*, 2003, 25(5): 40.
FAN Yafu, DUAN Zhuping. Experimental measurement of Johnson-Cook material model parameters [J]. *Mechanics in Engineering*, 2003, 25(5): 40.

~~~~~

(上接第 231 页)

- [10] Dinges D F, Grace R. PERCLOS: a valid psychophysiological measure of alertness as assessed by psychomotor vigilance [R]. Washington DC, WA: Federal Highway Administration, 1998.
- [11] Papadelis C, Chen Z, Kourtidou-Papadeli C, *et al.* Monitoring sleepiness with on-board electrophysiological recordings for preventing sleep-deprived traffic accidents [J]. *Clinical Neurophysiology*, 2007, 118(9): 1906.
- [12] Krahn L E, Black J L, Silber M H. Narcolepsy; new understanding of irresistible sleep [J]. *Mayo Clinic Proceedings*, 2001, 76(2): 185.
- [13] Nishiyama J, Tanida K, Kusumi M, *et al.* The pupil as a possible premonitor of drowsiness [C]//*Engineering in Medicine and Biology Society*. Lyon; IEEE, 2007: 1586-1589.
- [14] Morad Y, Lemberg H, Yofe N, *et al.* Pupillography as an objective indicator of fatigue [J]. *Current Eye Research*, 2000, 21(1): 535.
- [15] Van Orden K F, Jung T P, Makeig S. Combined eye activity measures accurately estimate changes in sustained visual task performance [J]. *Biological Psychology*, 2000, 52(3): 221.
- [16] 潘晓东, 李君羨. 基于眼部行为的驾驶疲劳监测方法[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(2): 231.  
PAN Xiaodong, LI Junxian. Eye state-based fatigue drive monitoring approach [J]. *Journal of Tongji University; Natural Science*, 2011, 39(2): 231.
- [17] Hu S, Zheng G. Driver drowsiness detection with eyelid related parameters by Support Vector Machine [J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(4): 7651.
- [18] 胡淑燕, 郑钢铁. 应用支持向量机的眼睑参数疲劳预测[J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, 35(8): 929.  
HU Shuyan, ZHENG Gangtie. Driver fatigue prediction with eyelid related parameters by support vectormachine [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(8): 929.
- [19] Kurt M B, Sezgin N, Akin M, *et al.* The ANN-based computing of drowsy level [J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(2): 2534.
- [20] Thiffault P, Bergeron J. Monotony of road environment and driver fatigue: a simulator study [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2003, 35(3): 381.
- [21] 中华人民共和国交通部. JTG B01—2003 公路工程技术标准 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2003.  
Ministry of Communications of the People's Republic of China. JTG B01—2003 Technical standard of highway engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [22] Train K. Discrete choice methods with simulation [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.