

汽车车架用 B610 钢的力学性能与数值模拟研究

牛晓燕, 耿旭琛, 安明磊, 李深圳, 陈 聪

(河北大学 建筑工程学院, 河北 保定 071002)

摘 要: 随着汽车数量的增加和广泛使用, 现代汽车工业对材料的力学性能提出了更高的要求。本工作对汽车车架用 B610 钢进行了不同温度下的准静态及动态压缩试验, 发现 B610 钢承受准静态荷载时高温区域 (400~600 °C) 内材料的温度软化效应最为明显, 而当承受动态荷载时在低温区域 (-80~25 °C) 内材料的应变率硬化效应最为明显。同时利用试验数据拟合得到了 B610 钢考虑温度及应变率的 Johnson-Cook 本构模型, 对 B610 钢材质的车架进行了正面碰撞的数值模拟, 结果表明 Johnson-Cook 模型计算得到的内能转化率达到 92.8%, 而线弹性情形仅有 21.4%, 等效应力峰值也降低了 47%, 充分说明了在汽车被动安全性研究中考虑材料温度软化效应及应变率硬化效应的重要性。

关键词: B610 钢; 温度软化效应; 应变率硬化效应; 汽车被动安全性; 车架正面碰撞

中图分类号: TG142.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)12-4215-07

随着人类科学技术的发展, 汽车的使用范围越来越广泛, 往往在较为恶劣的环境中进行服役, 这对汽车及其零部件所使用的材料提出了更高的力学性能要求。一方面, 汽车的碰撞性能一直是人们生活及汽车工业领域关注的重点, 汽车的被动安全性以及材料和各零部件对汽车碰撞性能的影响也一直是学者们近年来关注的热点。Ragab 等^[1]构建了一种汽车悬架控制臂疲劳特性参数的应变硬化模型。Gao 等^[2]建立了一种 90 度撞击车轮有限元模型, 对轮胎的抗冲击性能进行了评价。另一方面, 汽车作为由多个系统构成的整体, 各个部分所使用的不同种类的材料往往对汽车整体性能产生较大的影响。学者们对此进行了大量的实验研究。复合材料和胶结工艺的联合使用可以改善汽车的强度及质量, 为此 Araújo 等^[3]对胶结点进行了准静态和动态的加载试验。对于汽车整体使用最多的材料, Tisza 及 Czinege^[4]指出, 铝合金满足现代汽车行业轻量化的设计要求, 但其成本远超过了钢的成本。同时在淬火工艺较为成熟的基础上, 钢材能够完全满足强度的使用要求, 所以目前钢材仍为汽车整体所使用最多的材料。汽车用钢对强度、硬化性和耐磨性等要求较高, Cha 等^[5]发现通过添加 0.2% V (质量分数) 可以显著增加轴承钢的强度。除此之外还有许多学者对汽车用钢的延性断裂抗性^[6-8]、疲劳特性^[9]以及微观力学性能^[10,11]进行了研究。

汽车用钢在使用过程中由应力状态和环境温度引

起的力学性能的变化是复杂的。Palma-Elvira 等^[12]对 Mn 含量 9% 的钢材进行高温处理, 发现高温下奥氏体粗化, 铁素体层状断裂, 降低了材料的硬度和延展性。Belov 和 Begletsov^[13]为钢板回火过程中表面组织的形成提供了一种模拟算法。另外冲击过程中应变硬化对材料的强度和韧性的影响是非常关键的, 通过应变过程中孪晶和马氏体相变来完成位错硬化^[14], 可以在一定程度上提高钢材的强度。Noh^[15]等考虑了应变率的影响, 利用有限元研究了 TRIP980 和 GMW2 基板的动态破坏行为。同时, 对 TRIP980 和 GMW2 材料进行动态加载试验, 发现基板的应变率敏感性与应变和应变率呈反比关系。这说明在研究汽车用钢的力学行为时, 考虑应变率的影响是非常重要的。

B610 钢^[16]属于低合金高强钢, 因其具有良好的韧性和塑性, 除被用于球罐结构^[17]的建造外还常作为汽车车架用钢进行服役。目前国外针对 B610 钢在不同温度和应变率下的力学行为特征研究还鲜有报道。国内多针对其焊接性能进行研究^[18], 以对焊接工艺及参数进行优化^[19]。其中闫沛军^[20]和薛彬^[21]等人发现随着热输入的增大, 焊缝区贝氏体含量下降, 晶粒变粗大, 导致材料韧性明显下降。值得注意的是, 上述国外学者针对汽车用低碳钢和国内学者针对 B610 钢的研究中, 关于温度和应变率对汽车用钢宏观力学性能影响的研究鲜有报道, 而这对于汽车的被动安全性研究来说至关重要。综上所述, 本研究针对汽车车架用 B610

收稿日期: 2020-06-03

基金项目: 河北省自然科学基金 (A2019201338); 国家自然科学基金 (11502065)

作者简介: 牛晓燕, 女, 1979 年生, 博士, 教授, 河北大学建筑工程学院, 河北 保定 071002, E-mail: niu-xiaoyan2002@163.com

钢同时考虑温度及应变率效应的动态力学性能进行实验研究, 利用带温控系统的电子万能试验机和分离式霍普金森压杆 (SHPB) 对材料进行不同温度下的静/动态压缩试验, 通过试验数据获得材料考虑温度及应变率的本构关系。同时结合数值模拟, 验证了在汽车被动安全性研究中考虑材料温度及应变率效应的重要性。

1 实验

1.1 准静态实验

利用带温控系统的电子万能试验机对 B610 试件进行准静态压缩试验, 加载应变率为 1×10^{-3} , $2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, 试验温度分别为 -80 , 25 , 200 , 400 , $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。B610 钢板经过线切割工艺加工为尺寸 $\Phi 6 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的圆柱体作为试件。试验过程中将 B610 试件置于试验机夹具正中, 待环境箱内达到预定温度后保温 5 min , 立即进行应变率恒定的准静态压缩试验。在不同应变率及不同温度下产生应变过程中可由试验机直接输出材料的应力-应变曲线。本研究在每种温度和应变率组合的加载条件下对 3 个试件进行测试, 最终取平均实验结果进行数据分析以消除系统误差。

1.2 动态实验

利用带环境箱的 SHPB 实验装置对 B610 试件进行动态压缩试验, 实验装置的原理如图 1 所示。通过驱动装置调节撞击杆的初始速度从而控制加载应变率在 1000 到 8000 s^{-1} 之间, 温度设置为与准静态加载相同的试验条件。B610 钢板经过线切割工艺加工为尺寸 $\Phi 6 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的圆柱体作为试件。试验过程中将 B610 试件置于入射杆与透射杆之间, 待环境箱内达到预定温度后保温 5 min , 然后立即进行动态压缩试验。同样的, 在每种温度和应变率组合的加载条件下对 3 个试件进行测试, 最终取平均实验结果进行数据分析以消

除系统误差。图 2 给出了室温时应变率 1100 s^{-1} 下前后 3 次的测试结果。可以看出应变硬化阶段基本吻合, 仅在弹性与塑性过渡段有所误差, 可归结为系统误差, 不会对材料硬化特征的分析产生影响。

试验过程中通过入射杆与透射杆正中粘贴的应变片采集到入射波 ε_i , 反射波 ε_r 和透射波 ε_t , 利用一维应力波理论与试件两端受力平衡的假设可以得到材料在动态压缩过程中的应力 σ_t 和应变 ε_t 为:

$$\sigma_t = \frac{EA}{2A_0} (\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \quad (1)$$

$$\varepsilon_t = \frac{C_0}{L_0} \int_0^t (\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) dt \quad (2)$$

其中: E , A , C_0 分别为杆弹性模量, 横截面积和弹性波波速; A_0 , L_0 分别是试件的横截面积和原始长度。

2 数据分析与动态本构关系拟合

2.1 微观结构的表征

图 3 给出了 B610 母材与不同温度下静/动态测试后的金相组织图像, 其中图 3a 和 3b 为母材组织, 图 3c 和 3d 分别为 $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下应变率 0.02 和 4000 s^{-1} 测试后的组织, 图 3e 和 3f 分别为应变率 0.001 s^{-1} 下 $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和应变率 0.02 s^{-1} 下 $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的金相组织。可以看出母材为分布均匀的球状珠光体并弥散分布着细小的渗碳体, 晶粒细小, 因此材料具有较高的强度和韧性。对比图 3c 和 3d 可以看出, 相同温度下不同应变率测试后的组织变化不大。对比图 3b, 3c, 3e 和 3f 可以看出, 当温度升高至 200 , 400 和 $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 后有大量的贝氏体析出, 温度的升高会导致晶粒的尺寸增大, 从而导致了强度的降低。

2.2 准静态测试结果

图 4 和图 5 为准静态加载下 B610 钢在不同应变

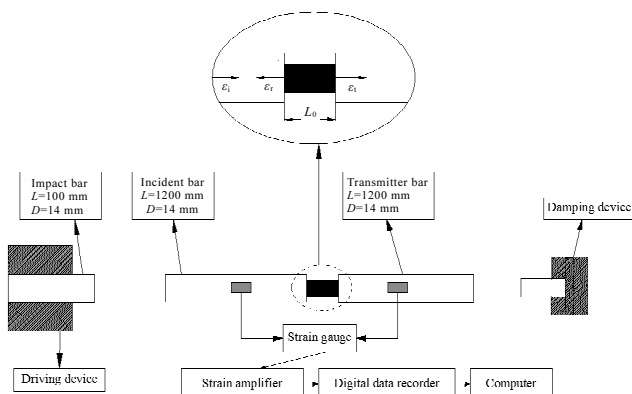


图 1 霍普金森压杆设备原理

Fig.1 Principles of split Hopkinson press bars device

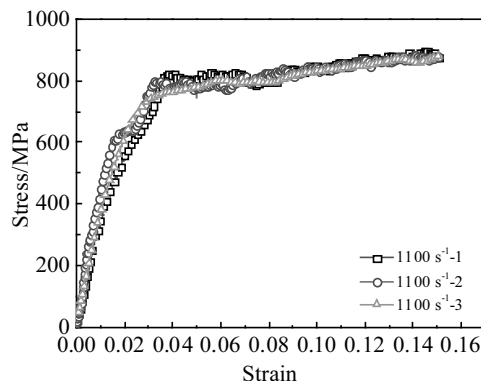


图 2 相同应变率下应力-应变曲线的离散情况

Fig.2 Dispersion of stress-strain curves at the same strain rate

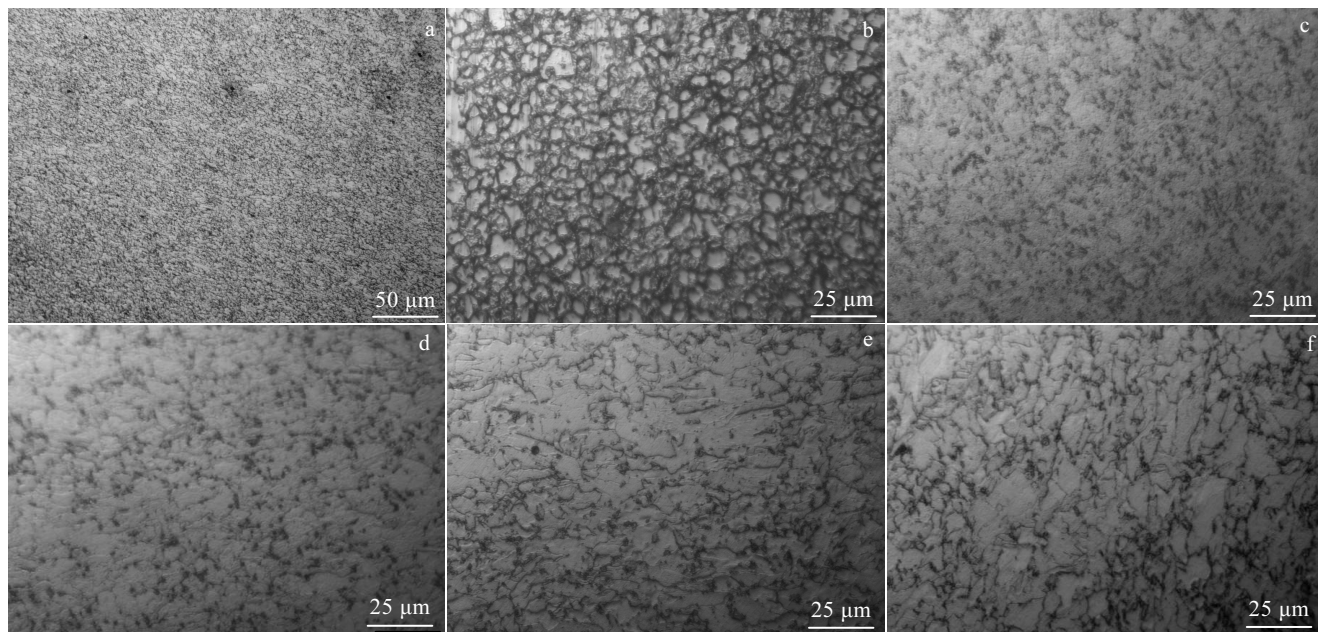


图 3 不同温度和应变率下 B610 钢的金相组织照片

Fig.3 OM images of B610 steel under different temperatures and strain rates: (a, b) parent metal; (c) 200 °C, 0.02 s⁻¹; (d) 200 °C, 4000 s⁻¹; (e) 400 °C, 0.001 s⁻¹; (f) 600 °C, 0.02 s⁻¹

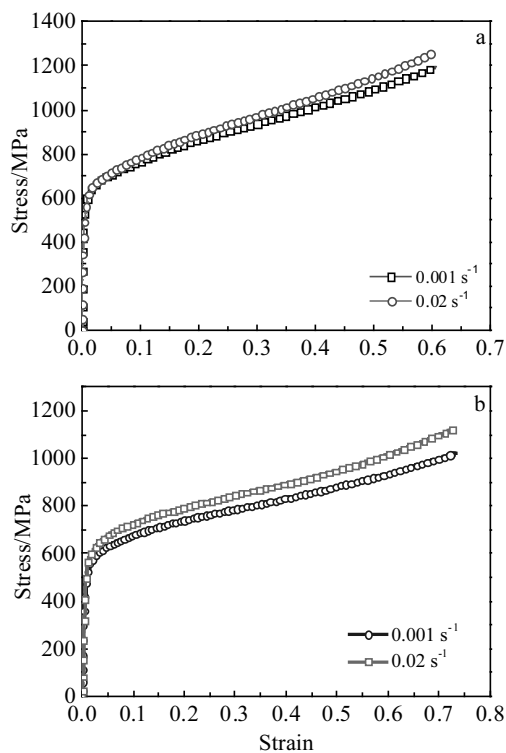


图 4 不同应变率下准静态应力-应变曲线

Fig.4 Quasi-static stress-strain curves at different strain rates and temperature of 25 °C (a) and 400 °C (b)

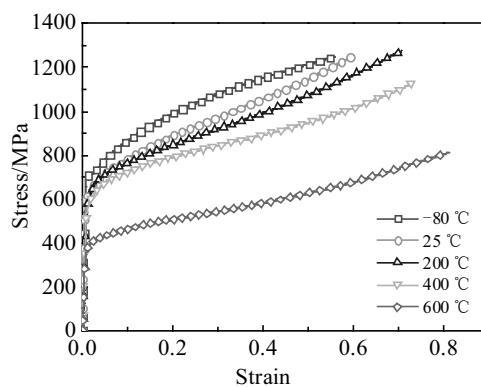
图 5 应变率 0.02 s⁻¹ 时不同温度下准静态应力-应变曲线

Fig.5 Quasi-static stress-strain curves at different temperatures and strain rate of 0.02 s⁻¹

率和不同温度下的应力-应变曲线。从图中可以看出, 曲线由弹性段平滑地向塑性段过渡。由图 4a 可知, 25 °C 下应变率 0.001 和 0.02 s⁻¹ 得到的应力-应变曲线较为接近, 屈服强度约为 610 MPa。如图 4b 所示, 当试验温度达到 400 °C 时, 随着应变率的增加, B610 钢的屈服强度和流动应力均有明显提高, 表现出应变率敏感性。此外, 对比图 4a 和 4b 可以看出, B610 钢的屈服强度和流动应力随着温度的增加而降低, 材料表现

出明显的温度软化效应。

由图 5 可知, 当应变率为 0.02 s^{-1} , 温度由 $-80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高到 $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 随着温度的升高, 材料屈服强度和流动应力均降低。当温度分别为 $-80, 25, 200, 400$ 和 $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 其相应的屈服强度分别为 $710, 629, 595, 572$ 和 411 MPa , 当温度从 $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高到 $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 材料的屈服强度和流变应力下降最为明显。

2.3 动态测试结果

如图 6 所示, 利用 1.2 节的原理可以得到 B610 钢在 25 和 $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的动态应力-应变曲线。与图 4 相比可以看出, 在室温条件下, 动态压缩试验中 B610 钢的屈服强度和流动应力明显高于准静态条件, 弹性变形阶段比准静态条件更加明显。动态载荷作用下的应力应变曲线存在明显的屈服平台, 屈服后, 材料继续表现出应变强化的特征。当应变率达到 $1300\sim 8000 \text{ s}^{-1}$ 时, 材料的屈服强度为 $759\sim 991 \text{ MPa}$, 约为准静态屈服强度的 1.5 倍。当应变率达到 $4000\sim 8000 \text{ s}^{-1}$ 时, 流动应力的增加最为明显, 说明在 $4000\sim 8000 \text{ s}^{-1}$ 应变率的范围内, B610 钢的应变率敏感性最强。

2.4 Johnson-Cook 模型的参数确定

Johnson-Cook 模型^[22]是一种理想的刚塑性强化模型, 能够反映应变率强化效应和温升软化效应, 其表

达式如下:

$$\sigma_e = \left[A + B(\epsilon_e^p)^n \right] \left[1 + C \ln \dot{\epsilon}^* \right] \left[1 - (T^*)^m \right] \quad (3)$$

其中, σ_e 是 Mises 流动应力, ϵ_e^p 是等效塑性应变, $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}_e^p / \dot{\epsilon}_0$ 是无量纲等效塑性应变率, $\dot{\epsilon}_e^p$ 是等效塑性应变率, $\dot{\epsilon}_0$ 是准静态实验的应变率, T^* 为无量纲温度 ($T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$), T, T_r, T_m 分别为试样环境温度, 参考温度和材料的熔点。式中的未知参数 A (初始屈服应力), B (硬化模量), n (硬化指数), C (应变率敏感系数), m (温度软化系数) 需要进行确定。

根据参考文献[23]中的参数拟合方法, A 取 B610 钢在准静态下的屈服强度, 选择合适的参考应变率 $\dot{\epsilon}_0$ 和参考温度 T_r 代入方程(3)简化方程, 对简化的方程取对数求解硬化模量 B 和硬化指数 n 。用同样的方法, 选择另一个固定应变 ϵ_i 和温度 T_i , 可以得到应变率敏感系数 C 和温度软化系数 m 。最后, B610 钢的 Johnson-Cook 模型参数 A, B, n, C, m 如式(4)所示:

$$\sigma_e = \left[610 + 642.84(\epsilon_e^p)^{0.3807} \right] \left[1 + 0.001 \ln \dot{\epsilon}^* \right] \left[1 - (T^*)^{0.85} \right] \quad (4)$$

从图 7 可以看出, Johnson-Cook 模型可以有效预测 B610 钢在不同应变率不同温度作用下塑性流动应力的变化。但需要注意的是, Johnson-Cook 模型多用于材料在高温下大范围应变率内应变硬化阶段流动应力的描述^[24-26]。从图 7 中可以看出, 25 和 $-80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的硬化特征不如高温下明显, 尤其 $-80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 B610 钢会表现出明显的屈服, 故 25 和 $-80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 Johnson-Cook 模型的预测有所误差。

与准静态荷载时类似, B610 钢的流动应力随着温度的升高而降低, 表现出温度软化效应。如图 7 所示,

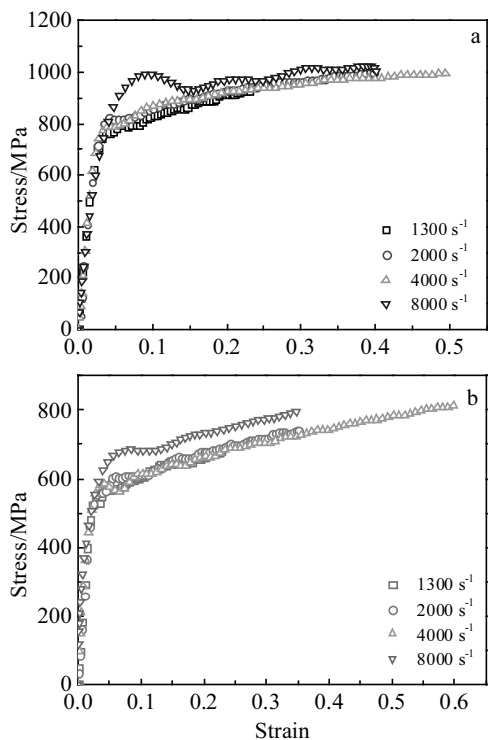


图 6 不同应变率下动态应力-应变曲线

Fig.6 Dynamic stress-strain curves at different strain rates and temperature of $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (a) and $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (b)

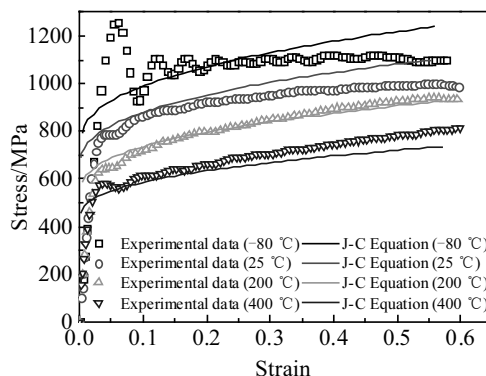


图 7 应变率 4000 s^{-1} 时不同温度下实验结果与 Johnson-Cook 模型对比

Fig.7 Comparison between experimental results and Johnson-Cook model at different temperatures and strain rate of 4000 s^{-1}

应变率 4000 s^{-1} 下环境温度高于室温时, 材料软化, 强度减弱。其中 -80 与 25°C 之间的流动应力相差较多, 对比图 5 可以得出结论, B610 钢承受准静态荷载时高温区域 ($400\sim 600^\circ\text{C}$) 内材料的温度软化效应较为明显, 而当承受动态荷载时在低温区域 ($-80\sim 25^\circ\text{C}$) 内材料的应变率硬化效应较为明显。同时, 比较图 6 和图 7 可以得到, 在动态荷载下温度对 B610 钢的流动应力的影响较应变率对流动应力的影响更为显著。

3 汽车车架的有限元模拟

3.1 有限元模型

车架是车辆被动安全中最重要的部件, 在碰撞过程中, 超过 50% 的碰撞能量被车架吸收。本研究采用有限元法研究了 B610 钢汽车车架碰撞特性的异同。首先将几何模型导入到 Hypermesh 中进行中性面提取, 然后利用壳单元对结构进行离散。在考虑计算精度和成本后, 保留原模型中直径大于 5 mm 的工艺孔, 删除无法使用壳单元进行计算的实体部分。原定使用铆钉连接的分别位于相邻组件上的 2 个工艺孔之间, 通过添加 6 个刚性单元来代替铆钉的作用 (图 8c 所示)。6 个刚性单元为一组, 本工作车架模型中共建立了 291 组刚性连接。有限元模型如图 8 所示, 模型由 5 个横梁和 2 个纵梁组成, 所有板的长度和厚度均按实际尺寸计算, 数值计算过程中所有参数均采用国际单位制。

为了减少计算时间, 在第 1 根横梁附近紧靠纵梁的位置设置了刚性墙, 同时在模型所有节点上施加了沿 X 轴负方向 13.88 m/s (时速 50 km/h) 的初始速度。材料模型选用考虑温度及应变率的 Johnson-Cook 本构模型, 模型参数由 2.4 节中的式(4)提供。另外为了对

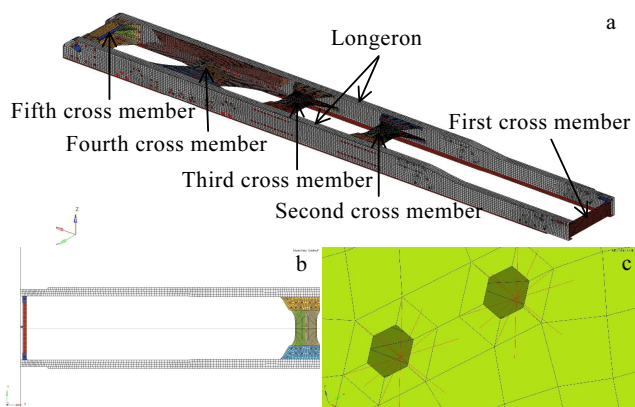


图 8 汽车车架有限元模型

Fig.8 FE model of automobile frame: (a) integral model, (b) position of the rigid wall, and (c) rigid connection

比分析, 本研究采用线弹性模型对车架高速正面碰撞进行了数值计算, 材料弹性模量取 210 GPa , 泊松比取 0.25 , 计算结果如下文所示。

3.2 Mises 应力分析

图 9a、9b 分别为采用线弹性模型及 Johnson-Cook 模型的车架在撞击刚性墙后第 1 个时间步 $t=0.001 \text{ s}$ 时刻的等效应力云图, 从图中可以看出, 2 种本构模型的计算结果有较大差异。采用线弹性模型的车架在碰撞后, 其纵梁上应力分布约为 950 MPa , 最大等效应力出现在第 1 根横梁及其边角处, 数值为 1584 MPa ; 采用 Johnson-Cook 模型的车架在碰撞发生后, 在靠近第 1 根横梁的纵梁处等效应力数值约为 753 MPa , 靠近第 2、第 3 根横梁附近的纵梁处应力数值逐层减小, 分别约为 502 及 251 MPa , 等效应力较为有层次性的分布在车架主要吸能元件纵梁上。另外采用 Johnson-Cook 模型的车架等效应力峰值为 836.5 MPa , 分布在纵梁上与刚性墙接触处。在碰撞冲击荷载下, 采用 2 种本构模型的车架等效应力分布, 等效应力峰值以及变形特征具有较大差异, 采用 Johnson-Cook 模型计算得到的等效应力峰值比采用线弹性模型计算得到的降低了 47% , 因此, 在数值模拟时材料的温度及应变率效应是不能被忽略的, 如果按线弹性模型模拟 B610 钢的力学性能, 将使车架太硬而高估了应力值。

3.3 能量分析

图 10 给出了采用 2 种本构模型的车架整体动能变化曲线。可以从图中看出在碰撞发生前, 采用线弹性模型及采用 Johnson-Cook 模型的车架动能均为 70 kJ , 碰撞发生后动能开始转化为内能, 2 种车架的动能均

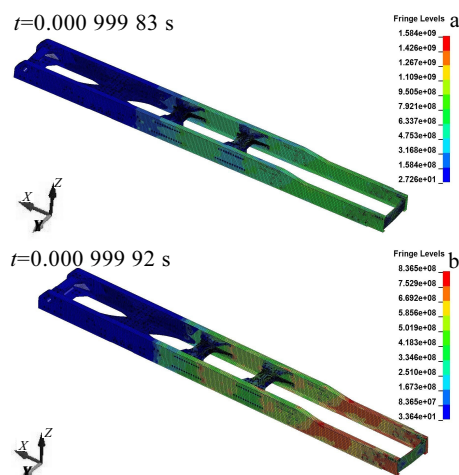


图 9 时间 $t=0.001 \text{ s}$ 时 Mises 应力云图

Fig.9 Mises stress nephogram at time $t=0.001 \text{ s}$ of linear elastic mode result (a) and Johnson-Cook model result (b)

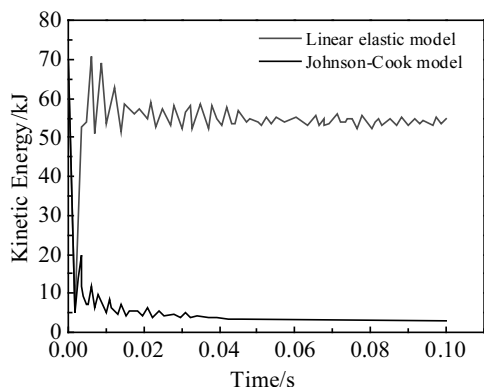


图 10 不同本构模型的动能曲线比较

Fig.10 Comparison of kinetic energy curves with different constitutive models

急剧降低。在 0.0003 s 时刻后采用线弹性模型的车架动能急剧上升, 在 0.04 s 之后稳定在 55 kJ 左右, 而同时采用 Johnson-Cook 模型的车架在 0.0003 s 时动能上升幅度不大, 在 0.04 s 之后稳定在 5 kJ 以下, 同比线弹性情形降低 10 倍以上。结果表明相较于线弹性模型, 由于同时考虑了应变率及温度效应, 采用 Johnson-Cook 模型的车架发生碰撞之后动能大部分转化为内能被车架吸收, 车架吸能能力大幅上升, 更符合实际车架碰撞情况。

图 11 给出了采用 2 种本构模型的车架整体内能变化曲线。碰撞发生后车架内能由动能转化而来, 2 种车架的内能均急剧上升, 在 0.0003 s 时刻 2 种车架内能均达到峰值, 其值为 90 kJ。在 0.02 s 之后采用线弹性模型的车架内能稳定在 5 kJ 左右, 采用 Johnson-

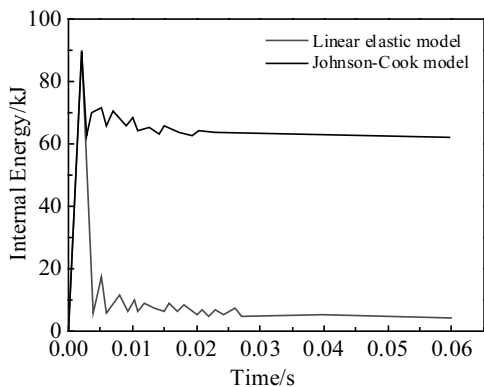


图 11 不同本构模型的内能曲线比较

Fig.11 Comparison of internal energy curves with different constitutive models

Cook 模型的车架内能稳定在 62 kJ 以上, 同比线弹性情形上升 10 倍以上。结果表明相较于线弹性模型, 采用 Johnson-Cook 模型的车架发生碰撞之后动能更多的转化为内能。Johnson-Cook 模型的车架内能转化率达到 92.8%, 而线弹性情形仅有 21.4%, 这再次说明了在车架正面碰撞特性分析中考虑材料温度及应变率效应的重要性, 以及 Johnson-Cook 模型更符合车架实际碰撞情况。

4 结 论

1) 本工作研究了汽车车架用 B610 钢在温度及应变率耦合作用下的力学行为, 发现在准静态和动态荷载下 B610 钢均表现出明显的温度软化效应以及应变率硬化效应。其中, 当 B610 钢承受准静态荷载时高温区域 (400~600 °C) 内材料的温度软化效应最为明显, 当承受动态荷载时在低温区域 (-80~25 °C) 内材料的应变率硬化效应较为明显。对比室温时准静态及动态荷载下的应力应变曲线, 发现在室温条件下动态的屈服强度和流动应力均大于准静态情况。

2) 通过实验数据分析拟合得出了 B610 材料的 Johnson-Cook 动态本构关系, 能够准确地描述材料在塑性平台区的变形行为, 但在 -80、25 °C 时会有所误差。

3) 采用 2 种不同的本构模型对 B610 钢材质的车架进行了正面碰撞的数值模拟, 结果表明 Johnson-Cook 模型计算得到的内能转化率达到 92.8%, 线弹性模型仅有 21.4%, 采用 Johnson-Cook 模型计算得到的等效应力峰值比采用线弹性模型计算得到的降低了 47%, 对比两者的等效应力分布及碰撞后车架的变性特征发现采用 Johnson-Cook 模型更符合车架实际碰撞情况。

参考文献 References

- [1] Ragab K A, Bouaicha A, Bouazara M. *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*[J], 2018, 28(6): 1226
- [2] Gao Qian, Shan Yingchun, Wan Xiaofei et al. *Engineering Failure Analysis*[J], 2019, 105: 143
- [3] Araújo H A M, Machado J J M, Marques E A S et al. *Composite Structures*[J], 2017, 171: 549
- [4] Tisza M, Czinege I. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*[J], 2018, 1(4): 229
- [5] Cha S C, Hong S H, Kim I et al. *Calphad*[J], 2016, 54: 165
- [6] Sarkar R, Chandra S K, De P S et al. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*[J], 2019, 103: 102 278
- [7] Bárány T, Czigány T, Karger-Kocsis J. *Progress in Polymer Science*[J], 2010, 35(10): 1257
- [8] Rink M, Andena L, Marano C. *Engineering Fracture Mechanics*

- [J], 2014, 127: 46
- [9] Chang Ying, Han Shuo, Li Xiaodong *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2018, 259: 216
- [10] Mihaliková M, Lišková A, Kovalčíková A *et al.* *Materials Today: Proceedings*[J], 2016, 3(4): 1064
- [11] Mihaliková M, Németh M. *Metallurgija*[J], 2012, 51(4): 449
- [12] Palma-Elvira E D, Garnica-Gonzalez P, Pacheco-Cedeno J S *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 798: 45
- [13] Belov V K, Begletsov D O. *Applied Mathematical Modelling* [J], 2015, 39(23-24): 7326
- [14] Schmitt J, Iung T. *Comptes Rendus Physique*[J], 2018, 19(8): 641
- [15] Noh W, Koh Y, Chung K *et al.* *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2018, 144: 407
- [16] Zhang Aimei(张爱梅), Wu Ta(吾塔), Zhao Liang(赵亮). *Xinjiang Iron and Steel*(新疆钢铁)[J], 2015(2): 4
- [17] Yuan Hao(袁浩), Zhang Shaohua(张绍华), Fang Wunong(房务农). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2011, 40(17): 164
- [18] Zhou Keheng(周科衡), Huang Wei(黄伟), Chen Min(陈敏) *et al.* *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2013, 42(15): 201
- [19] Chen Zhigao(陈志高). *Metallurgical Collections*(冶金丛刊)[J], 2016(4): 19
- [20] Yan Peijun(闫沛军), Zhang Tianhui(张天会). *Welding Technology*(焊接技术)[J], 2015, 44(10): 5
- [21] Xue Bin(薛彬), Fu Hongcai(付宏才), Zhang Tianhui(张天会) *et al.* *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2012, 41(21): 174
- [22] Johnson G R, Cook W H. *Engineering Fracture Mechanics*[J], 1983, 21: 541
- [23] Zhao Yanhua, Sun Jie, Li Jianfeng *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 723: 179
- [24] Jia Cuiling(贾翠玲), Chen Furong(陈芙蓉). *Ordnance Material Science and Engineering*(兵器材料科学与工程)[J], 2018, 41(1): 30
- [25] Qin Jianfeng(秦建峰), Ma Yong(马永), Yao Xiaohong(姚晓红) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(2): 618
- [26] Chen Xingrui, Liao Qiyu, Niu Yanxia *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2019, 8(2): 1859

Dynamic Mechanical Properties and Numerical Simulation of B610 Steel for Automotive Frame

Niu Xiaoyan, Geng Xuchen, An Minglei, Li Shenzen, Chen Cong

(College of Civil Engineering and Architecture, Hebei University, Baoding 071002, China)

Abstract: With the increase of the number of automobiles and their widespread use, the modern automobile industry has put forward higher requirements for the mechanical properties of materials. In the present paper, quasi-static and dynamic compression tests of B610 steel used in truck frame have been carried out at different temperatures. It is found that the temperature softening effect of B610 steel is the most obvious in the high temperature region (400~600 °C) under quasi-static loadings, and the strain rate hardening effect is the most obvious in the low temperature region (-80~25 °C) under dynamic loadings. The Johnson-Cook constitutive model of B610 steel considering temperature and strain rate was obtained by fitting the test data. The numerical simulation of front collision of B610 steel truck frame was carried out. It is found that the internal energy conversion calculated by Johnson-Cook model is 92.8%, while that of linear elasticity is only 21.4%, and the peak value of equivalent stress is also reduced by 47%. These fully explain the importance of considering the temperature softening effect and strain rate hardening effect of materials in the study of vehicle passive safety.

Key words: B610 steel; temperature softening effect; strain rate hardening effect; vehicle passive safety; front collision of truck frame

Corresponding author: Chen Cong, Master, College of Civil Engineering and Architecture, Hebei University, Baoding 071002, P. R. China, E-mail: chuck.xy@foxmail.com