

基于霍普金森拉杆试验的焊点焊核区动态本构关系确立

吴鑫¹, 钟原^{2*}, 宋力¹

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 中国汽车技术研究中心, 天津 300300)

摘要: 以 DC53DZ 为基板, 进行焊点结构的焊核区力学特性研究. 通过设计试验试件并利用 MTS 静态拉伸机及霍普金森拉杆(Split Hopkinson Tension Bar, SHTB)对其进行准静态拉伸及应变率 $600 \sim 1\,600\text{ S}^{-1}$ 之间的动态拉伸试验, 得到焊核区的力学特性, 并确立了其基于 Cowper-Symonds 本构方程参数. 利用数值仿真对焊核动态拉伸试验进行模拟, 验证了设计试件的长宽比能使试件满足试验要求的轴向应力应变均匀状态. 最后由模型中得到的焊核区应力-应变曲线与试验数据拟合, 再现了焊核区材料特性试验曲线. 验证了 DC53DZ 钢板的焊点焊核的本构方程参数的合理性.

关键词: 霍普金森拉杆; 车身焊点; 焊核; Cowper-Symonds 本构方程

中图分类号: O341

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2015) 04-0129-04

车身焊点结构作为车身连接中的主要连接方式, 其强度直接决定车身结构强度并且影响着汽车的安全性能, 这在汽车 CAE (Computer Aided Engineering) 设计分析中至关重要^[1]. 由于车身焊点在形成过程中的决定因素多且复杂, 可将其主要分为母材区、热影响区、焊核区等区域^[2-3]. 母材区的力学特性可通过传统方法测得; 热影响区的强度接近母材区强度, 在此暂时将其材料性能等同与母材; 而电阻点焊的焊核区一般为直径 4~6 mm 的圆柱体、体积小、微观结构复杂、不易测得、且其力学特性与母材有明显差异.

本文采用车用钢板 DC53DZ 为基板设计了焊核区力学特性研究的试件, 并进行了准静态拉伸试验和霍普金森拉杆(Split Hopkinson Tension Bar, SHTB)不同应变率下的动态拉伸试验, 直接测得了焊核区的材料特性. 且利用试验结果确定了焊核区 Cowper-Symonds 型本构关系. 随后通过 hypermesh 对整个焊核本构动态拉伸试验进行建模, LS-DYNA 软件计算再现了试验结果. 有限元计算表明设计的焊核区本构研究试件满足霍普金森拉杆试验要求, 且确定的 C-S 模型对焊核区的一维应力

拉伸情况适用. 而前人大部分研究采用的是间接方法得到焊核区力学特性, 如蒋小晴等^[4]利用母材与焊核区的硬度分布和屈服强度/抗拉强度关系间接得到焊核区的材料特性; Nielsen^[5]研究的焊核区强度是由焊核直径厚度与母材料特性关系得到. 因此直接测得焊核区的力学特性对焊点结构强度研究很有帮助.

1 基于钢板 DC53DZ 的焊点焊核本构研究试件

1.1 试件设计

为符合车身焊点条件, 采用板厚 1.2 mm 的车用钢板 DC53DZ 为母材, 设计了焊核本构拉伸的试验试件. 由于焊点焊核区一般为直径 6 mm 的圆柱体, 体积过小, 为测量其力学特性, 采用复合试件, 即将 2 片钢板重叠在中心位置焊接, 如图 1 所示.

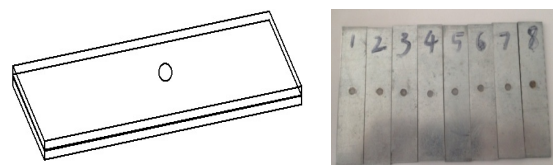


图 1 钢板重叠焊接

为了能使试件在霍普金森拉杆试验中满足应

收稿日期: 2014-09-29.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(60874083).

第一作者: 吴鑫(1990-), 男, 浙江衢州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: wulheart1@163.com

*通信作者: 钟原(1961-), 男, 江西南昌人, 博士, 主要研究方向: 汽车安全结构等. E-mail: zhongyuan@catarc.ac.cn

力应变均匀性假设,将焊核区的有效试验段设计成长宽比为1:1,均为3 mm的正方体段,如图2所示.均匀性假定在随后的数值仿真中给出证明.

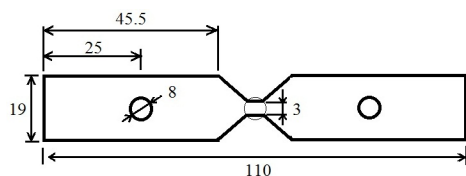


图2 焊核拉伸试件

1.2 试件制备

具体试件由2块厚1.2 mm,全长110 mm,宽19 mm的钢板叠加,在其中心位置利用直径6 mm焊钳枪头,对其焊接出直径约为6 mm的焊点.焊接过程中焊接电流为9 000 A,压力为300 kg·cm⁻²,焊接时间为260 ms,保压时间为200 ms,预压时间为400 ms.由于对钢板进行电阻点焊时,影响因素众多,可能会产生虚焊、焊核过小、焊核厚度不够等情况,为确保试验试件合格,在试件加工成型之前利用日本东芝的MatriexTM+超声波焊点质量检测仪对焊点进行检测,检测仪利用超声波反射技术测量得到焊核直径、厚度及压痕等参数,以此对焊核质量进行评定.

表1为部分试件的检测结果,由超声波焊点检测仪得到以下结果:用于试验的焊核试件压痕深度约为0.2 mm,焊核厚度约为2.2 mm,焊核平均直径约为6 mm,所有试件焊点质量均合格.检测完成后按图2设计尺寸,在离两边25 mm处各冲压出用于试件夹持时的2个直径为8 mm的销连接孔.随后在两边留出45.5 mm的试件夹持端后,利用线切割得到一个有效焊核试验段为3 mm,长宽比为1:1的焊核拉伸试件.

表1 部分焊核试件检测结果

样件 编号	检测 结果	焊点平 均直径	最长 轴	最短 轴	焊点压 痕深度	焊核 厚度
1号	GOOD	6.3	6.5	6.1	0.2	2.2
2号	GOOD	6.7	6.9	6.5	0.2	2.2

2 焊点焊核区 Cowper-Symonds 本构关系的确立

由于车身焊点由车身钢板进行电阻点焊形成,笔者采用车身钢板常用的Cowper-Symonds本构方程((1)式)对焊点焊核区本构进行拟合.

$$\sigma_y(\epsilon_{\text{eff}}^p, \dot{\epsilon}_{\text{eff}}^p) = \sigma_y^s(\epsilon_{\text{eff}}^p) [1 + (\dot{\epsilon}_{\text{eff}}^p / C)^{1/p}], \quad (1)$$

其中: ϵ_{eff}^p 为有效塑性应变; $\dot{\epsilon}_{\text{eff}}^p$ 为有效塑性应变率; σ_y 为对应应变率的应力值,为准静态应力值; C 、 p 为方程的应变率参数.

利用MTS静态拉伸机在10⁻³ S⁻¹应变率下进行准静态拉伸试验,可得到其屈服强度约为412.9 MPa,抗拉强度约为494.94 MPa.因为试件有效试验段过小,不宜利用引伸计测得试验应变,准静态拉伸试验以及后续的霍普金森拉杆试验均采用数字图像处理法DIC^[6]得到工程应变.其中C-S本构方程的第1项为静态相关项,如图3所示.利用二阶指数衰减方程:

$$y = y_0 + A_1 e^{-x/t_1} + A_2 e^{-x/t_2},$$

对焊核的准静态拉伸曲线进行拟合,得到参数 $y_0 = 489.17629$ MPa; $A_1 = -9.46296$ MPa; $t_1 = 0.00396$; $A_2 = -67.42028$ MPa; $t_2 = 0.01926$,有效塑性应变下的准静态应力拟合完成.

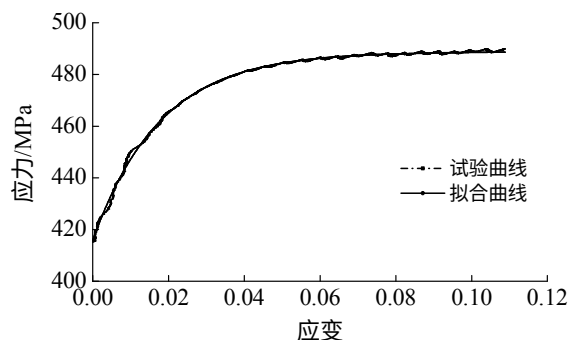


图3 准静态屈服应力试验及拟合曲线

焊核区的动态试验,采用霍普金森拉杆进行.图4为霍普金森拉杆简图,其中1为空心圆管型子弹;2为法兰盘;G1、G2为应变片,左端长杆为入射杆 inbar;右端短杆为输出杆 outbar.拉杆材料为18Ni高强度钢,直径为19 mm,入射杆和透射杆长

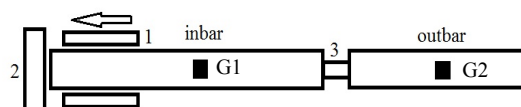


图4 霍普金森拉杆简图

度分别为 2 750、1 200 mm, 子弹长度为 400 mm. 入射杆与样品及透射杆与样品连接处均刻槽, 刻槽的长度为 45 mm, 槽宽度为 2.4 mm. 试件与杆的连接方式以销连接为主, 辅以胶粘接保证了试件与杆之间无空隙, 防止了试验过程中由于杆与销之间的空隙造成应力脉冲对结果产生影响. 然后依据一维线弹性应力波理论, 及假设试件满足应力应变均匀假定, 可由霍普金森拉杆的经典二波法公式^[7]得到试件中的平均应力、平均应变 $\varepsilon_s(t)$ 及应变率.

$$\sigma_s = (EA / A_s) \varepsilon_t(t), \quad (1)$$

$$\varepsilon_s(t) = (2C_0 / l_s) \int_0^t [\varepsilon_t(\tau) - \varepsilon_r(\tau)] d\tau, \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = (2C_0 / l_s) [\dot{\varepsilon}_t(t) - \dot{\varepsilon}_r(t)], \quad (3)$$

式中 E 为杆的弹性模量; A 和 A_s 分别为杆的截面积和试件有效试验段的截面积; C_0 为杆的弹性纵波波速; l_s 为试件有效长度. 由(1)式和(2)式可得试件的应力—应变曲线, (3)式可得应变率—时间曲线.

本研究进行了室温下 4 种平均应变率为 600、1 000、1 200、1 600 S^{-1} 的 SHTP 动态拉伸试验. 并根据试验结果利用最小二乘法拟合得到了焊核区 C-S 本构方程中的 C 、 P 值, 分别为 $C=9\,800.259\,S^{-1}$; $P=2.107$, 焊核区的动态本构关系为:

$$\sigma_y(\varepsilon_{eff}^p, \dot{\varepsilon}_{eff}^p) = (489.18 - 9.46e^{-\varepsilon_{eff}^p/0.00396} - 67.42 \cdot e^{-\dot{\varepsilon}_{eff}^p/0.01926}) [1 + (\dot{\varepsilon}_{eff}^p / 9800.26)^{1/2.107}]. \quad (4)$$

3 均匀性假定以及本构参数的数值模拟验证

在霍普金森拉杆结构中, 试件与两杆之间的连接以及各接触边界条件等因素影响试验结果, 为了对试验中试件的应力应变均匀状态进行验证, 利用 LS-DYNA 对试验全过程进行了数值模拟. 经验证试件与杆连接处采用模拟销连接和 rigidbody 连接计算方法和结果一样, 为减少计算时间采用后者作为连接方式. 模拟平均应变率为 1 200 S^{-1} 的拉伸试验, 子弹加载速度为 4 722 $mm \cdot s^{-1}$. 根据模型计算结果, 应力波在试件焊核区来回传播约 6 次, 经历 12 μs 后达到应力平衡状态, 即焊核中的应力分布趋于均匀化. 在试件上取不同截面的 5 个单元 S1、S2、S3、S4、S5, 在同一截面上选取 4 个单元 D1、D2、D3、D4, 每隔 12 μs 选取一时间点, 如图 5 和图 6 所示. 单元的轴向应力应变在首个 12 μs

达到均匀化后, 在 48 μs 范围内没有明显梯度变化, 超出 48 μs 后, 由于试件开始发生紧缩现象, 应变开始变的不均匀. 因此, 利用霍普金森拉杆原理推算焊核试件内的平均应力应变是可行的, 同样证明了本文设计的焊点焊核区的动态本构研究试件尺寸是合理的.

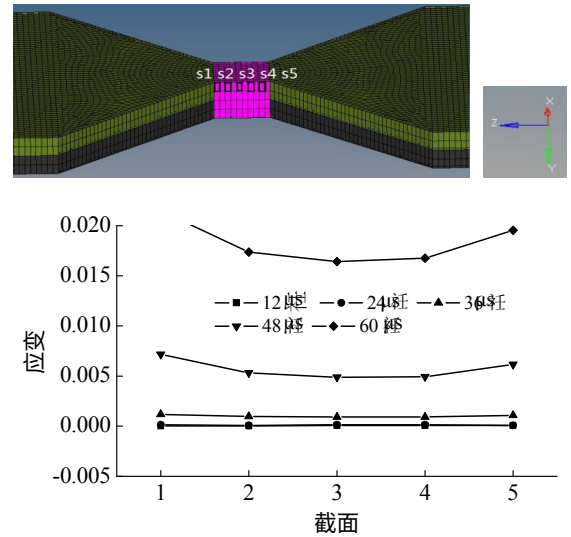


图5 试件不同截面的应变

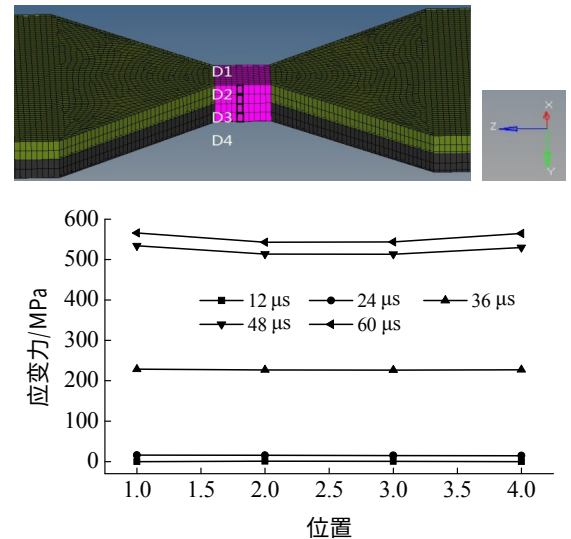


图6 同一截面不同位置的应力

平均应变率下的霍普金森拉杆动态拉伸试验结果拟合得到了焊核区的 Cowper-Symonds 本构方程参数. 试验过程中, 试件内的应变率是不断变化的, 因此拟合所得本构方程参数是否能代表焊核的动态拉伸特性需要经过验证. 在焊核区赋予 C-S 本构参数的模型中, 取得与试验杆上应变片所在的相同位置单元, 得到其时间应变曲线(图 7).

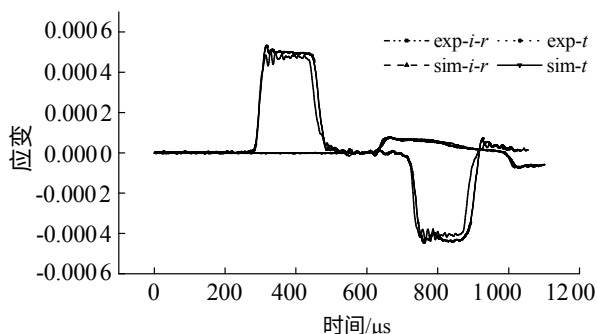


图7 试验仿真波形对比

本研究对拉伸试验进行了全过程模拟,再现了入射杆及透射杆上的 $\varepsilon_i(t)$, $\varepsilon_r(t)$, $\varepsilon_t(t)$ 应变脉冲波形。结果表明,采用 Cowper-Symonds 本构参数的仿真结果,入射、反射、透射 3 个应变脉冲波与试验拟合度较高,说明 C-S 本构方程的合理性,能代表 DC53DZ 钢板的焊点焊核区的动态拉伸特性。

4 结论

(1)设计可直接测量焊核区动态本构的试件,利用超声波焊点质量检测仪对焊接试件进行检测,得到试验试件焊核直径均在 6 mm 左右,且质量合格。对试件进行准静态及不同应变率下的霍普金森拉杆动态拉伸试验,并根据试验结果拟合得到了焊核区的 C-S 动态本构关系。

(2)通过对加载平均应变率为 $1\ 200\ \text{S}^{-1}$ 的霍普

金森拉杆试验全过程模拟,验证了设计试件在试验中的均匀性假设。并由杆上单元得到入射波、反射波、透射波,再现了试验结果,证明了拟合得到的焊核区 C-S 本构方程能代表其动态力学特性。

参考文献:

- [1] 吕毅宁, 吕振华. 焊点连接模型对结构刚度的有限元模拟精度的影响分析[J]. 工程力学, 2009, 26(10):171-176.
- [2] Dancette S, Fabregue D. Experimental and modeling investigation of the failure resistance of advanced high strength steels spot welds[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78:2259-2272.
- [3] Dancette S, Fabregue D. A finite element model for the prediction of advanced high strength steel spot welds fracture[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 87: 48-61.
- [4] 蒋小晴, 杨济匡. 前纵梁碰撞模拟中的含碘建模方法比较[J]. 汽车安全与节能学报, 2010, 1(4):327-331.
- [5] Nielsen K. 3D modeling of plug failure in resistance spot welded shear-lab specimens (DP600-steel)[M]. New York: Springer Science+Business Media, 2008:125-139.
- [6] 白晓红, 吴迪. 数字图像相关(DIC)测量方法在材料变形研究中的应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [7] 宋力, 胡时胜. SHPB 数据处理中的二波法与三波法[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4):368-373.

Dynamic Constitutive Relationship in Spot Welding Area Based on Hopkinson Bar Test

WU Xin¹, ZHONG Yuan^{2*}, SONG Li¹

(1. Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. China Automotive Technology & Research Center, Tianjin 300300, China)

Abstract: The mechanical characteristics of nugget zone of spot welding based on steel DC53DZ is investigated. The test using MTS quasi static tensile test is conducted. Dynamic tensile test with the strain rate between $600\text{--}1\ 600\ \text{S}^{-1}$ is carried out by applying Split Hopkinson Tension Bar (SHTP) to obtain the constitutive parameters of Cowper-Symonds model. Numerical simulation is carried out using LS-DYNA, and the result shows that both the stress and strain are uniformed within the specimen under the designed ratio of length-to-width. With the constitutive parameters obtained from the experiment, the simulated dynamic tensile test is in good agreement with the real-world test, indicating the validity of the dynamic tensile test in this paper.

key words: Hopkinson bar; vehicle spot welding; welding; Cowper-Symonds; constitutive equation

(责任编辑 史小丽)