第 43 卷第 12 期　　机 械 工 程 学 报　　Vol.43 No.12
2007 年 12 月　　CHINESE JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING　　Dec. 2007

材料局部力学性能测试方法*

乔及森[1]　周清林[1]　王志成[1]　朱　亮[1]　陈剑虹[1]　赵少俊[2]
(1．兰州理工大学有色金属国家重点实验室　兰州　730050；
2．兰州理工大学理学院　兰州　730050)

摘要：采用穿孔剪切试验和有限元模拟相结合的方法对材料的局部性能进行研究，通过将修正模拟阻力曲线与试验数据相匹配，在模拟分析中利用迭代修正的方法反向推导出材料的本构关系。由此提出利用穿孔剪切试验间接获得材料拉伸力学性能的基本方法。研究中以典型的车用铝合金材料(5052H34 和 6063T5)及紫铜作为测试对象，对该材料表征方法的精确性进行验证。分析表明，穿孔剪切试验结合有限元反求迭代技术获得材料拉伸应力－应变曲线关系与拉伸试验数据对比最大误差不超过 5%，结果较为准确。该方法适用于微区或局部材料的力学性能表征，可为后续接头梯度力学性能研究提供参考。

关键词：穿孔剪切测试　有限元模拟　局部力学性能
中图分类号：TG146

0　前言

在汽车制造中，为了提高汽车车架的刚度，在减轻汽车的重量同时提高汽车的碰撞性能，铝合金材料被大量使用。随着全铝车身汽车的使用，焊接结构的性能测试成为一个重要的研究内容。铝合金焊接接头的力学性能由焊缝、热影响区、母材组成，而且焊缝和热影响区还存在严重的不均匀性。史耀武等[1]对焊接接头的力学性能提出了微剪韧性的概念，为微接头的局部性能测定提供了很好的依据；MARK 等[2]也对焊接接头的力学性能进行了研究，提出了焊缝区与母材的拟合关系式；朱亮等[3]在前人的基础上对管线钢材料拉伸特征值进行了研究，得出管线钢焊缝的屈服点和最大载荷处真应力与真应变值。

本文采用穿孔剪切的方法对材料的局部力学性能进行了估算，并采用有限元模拟对估算的强度值做了进一步的修正，最后得到了局部材料拉伸性能曲线，为汽车部件碰撞模拟焊缝的表征提供有效的材料表征方法。

1　穿孔剪切试验

研究采用铝合金材料(Al5052 和 Al6063)和紫铜平板试样，试验装置如图 1a 所示，探针为ϕ1.5 mm 的钻头改装而成，夹具中的圆孔由ϕ1.5 mm 钻头加工而成，大小为ϕ1.572 mm。本文采用的试样尺寸 10 mm×10 mm，厚度为 0.8～2.0 mm，表面打磨，试样用 45＃钢的夹具夹紧，用装卡在万能试验机上的高速钢平头探针进行穿孔加载。试验在常温下进行，在试验过程中记录载荷 p 和位移 s，得出载荷位移曲线，如图 1b 所示。曲线 OA 为弹性部分，B 点为材料发生 0.2%厚度尺寸的塑性位移点，在这里定义为材料的屈服点，C 点为最大载荷点，用来计算材料的抗拉强度，D 点为完全断裂点。

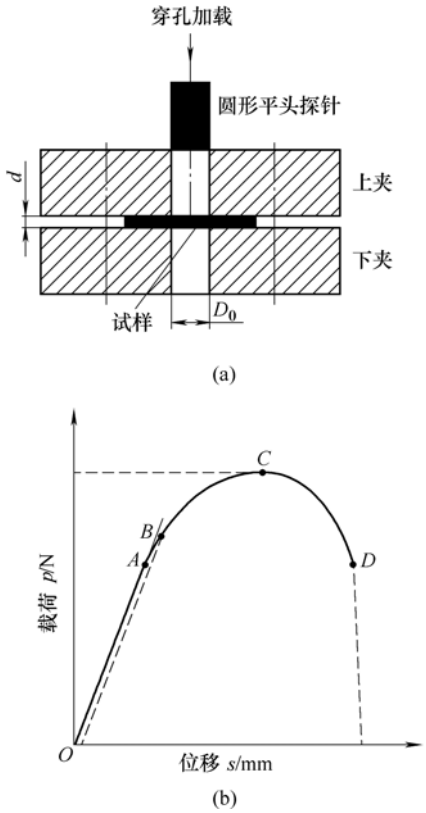

图 1　穿孔剪切试验装置和 p-s 曲线示意图

* 重大基础研究前期研究专项(2004CCA04900)和甘肃省自然科学基金(3ZS042-B25-008)资助项目。20061122 收到初稿，20070918 收到修改稿

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2　穿孔剪切试验分析与计算

2.1　试验分析

在试验中，钻头和模具的直径差为 0.072 mm，也就是模具的间隙为 0.036，铝合金冲裁模的合理间隙为试样厚度的 6%～10%[4]，当间隙大于 6%～10%时，材料的光亮带比例增大，断裂带比例减小，试样不能出现剪断，而取 6%～10%时，恰好是剪切面上光亮带和断裂带的边缘出现重合，成形美观，而间隙小于这个值时，试样的剪切断裂带增大，可以认为是纯剪。本文穿孔剪切试验试样厚度为 0.8～2.0 mm，而 0.036 mm ≤ 6%δ (δ 为厚度)，因此完全能够满足纯剪切的要求。这里纯剪的计算方法可得图 1b 所示剪切试验载荷位移曲线，大致分为弹性、弹塑性及裂纹延性扩展和断裂阶段，取三组误差比较小的数据求平均值，切变模量 G 由曲线中的角度、剪切面积以及试样厚度定义，把剪切屈服力定义为试样发生 0.2% δ 塑性位移的切应力 $p_{0.2}$。剪切强度可以用最大剪切载荷 $p_{\max}$ 定义

$$\tau_{\mathrm{y}} = \frac{p_{0.2}}{A_0} \tag{1}$$

$$\tau_{\mathrm{b}} = \frac{p_{\max}}{A_0} \tag{2}$$

$$A_0 = \pi D_0 \delta \tag{3}$$

$$G = \frac{p}{A_0} \bullet \frac{d}{s} \tag{4}$$

式中　A_0 ——剪切面积

D_0 ——夹具预留孔的直径

d——所测试样的厚度

p——曲线中弹性部分的载荷

s——对应点的位移

根据切变模量与弹性模量的关系和 Von-Mises 应力屈服准则可以得出弹性模量的近似解 E、剪切屈服强度 τ_{y} 和拉伸屈服强度 σ_{y} 的相互关系

$$E = 2G(1+\mu) \tag{5}$$

$$\sigma_{\mathrm{y}} = \sqrt{3}\tau_{\mathrm{y}} \tag{6}$$

式中　μ——泊松比

2.2　有限元计算

2.2.1　屈服点的应变计算

弹性模量和屈服点的应力直接通过式(5)得出，而屈服点应变 ε_{y} 可以由式(7)、(8)表示[5]

$$\varepsilon_{\mathrm{y}} = \varepsilon_{\mathrm{ey}} + \varepsilon_{\mathrm{py}} \tag{7}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{ey}} = \sigma_{\mathrm{y}} / E \tag{8}$$

式中　ε_{y} ——屈服应变

$\varepsilon_{\mathrm{ey}}$ ——屈服点的弹性应变

$\varepsilon_{\mathrm{py}}$ ——屈服点的塑性应变

本文中屈服点的塑性应变定为 0.002，弹性部分应变由式(8)得出，因此得出屈服点的真应力和真应变值作为所测材料局部区域的拉伸性能指标。

2.2.2　材料抗拉强度与所对应应变的计算与模拟

设材料弹塑性性能(真应力—应变曲线)在塑性阶段满足[6]

$$\sigma = ke^n \tag{9}$$

式中　σ——拉伸试验的真应力

k ——强化系数

n ——加工硬化指数

在颈缩以前即在达到强度极限之前(包括强度极限)，式(10)、(11)成立

$$\varepsilon' = \ln(1+\varepsilon) \tag{10}$$

$$S = \sigma\ (1+\varepsilon) \tag{11}$$

式中　σ ——名义应力

ε' ——名义应变

由式(4)可得材料满足幂指数关系，由布莱恩・匹克林[7]研究，处于加工硬化过程中的拉伸试样，最大载荷处的真应变等于材料的加工硬化指数即

$$\varepsilon_{\mathrm{b}} = n \tag{12}$$

通过式(11)，得最大载荷点的名义应变

$$\varepsilon'_{\mathrm{b}} = e^n - 1 \tag{13}$$

式中　$\varepsilon'_{\mathrm{b}}$——材料拉伸试验在最高点的名义应变

同样根据式(11)可以得出最大载荷处的真应力

$$\sigma'_{\mathrm{b}} = \sigma_{\mathrm{b}}(1+\varepsilon'_{\mathrm{b}}) \tag{14}$$

式中　σ_{b}——强度极限

由以上分析，从式(9)、(14)可以得出材料的加工硬化指数 n 和强化系数 k，从而代入式(10)中得到材料的从屈服点到最高点的真应力—应变曲线直至材料的塑性起始点，由于真塑性应变为 0，因此满足式(8)，设同样满足式(9)，由式(7)～(9)得出塑性起始的真应力和真应变值，把上面的所有点连接起来得出材料的真应力—应变曲线。

由于剪切试验的夹具和探针直径存在一定的差别，利用这点对材料的抗拉强度、加工硬化指数和强化系数进行修正，本研究采用 ABAQUS 有限元商业软件对各个指标进行修正，以下是具体的修正方案。本文采用 $\sqrt{3}\tau_{\mathrm{b}}$ 的值作为 σ_{b} 的计算初始值，通过上面的计算得出材料的近似的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线，计算以后转化成材料的真应力塑性应变曲线的塑性指标，作为有限元模拟的材料塑性输入值，对材料的抗拉强度、加工硬化指数和强化系数做进一步的修正，其有限元模型如图 2a 所示。

通过有限元模拟计算得出载荷—位移曲线与试验的载荷—位移曲线作对比，如图 2b 所示，主要对最大载荷的最大值进行比较，设

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

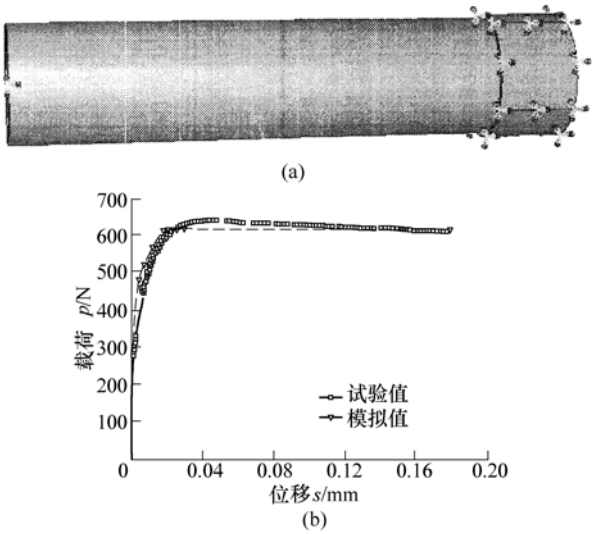

图 2 材料抗拉强度特征值修正的有限元模型和载荷—位移曲线示意图

$$\theta=\left|\frac{p_{\mathrm{Sim-max}}-p_{\mathrm{Exp-max}}}{p_{\mathrm{Exp-max}}}\right|\times 100\%\leq 3\% \tag{15}$$

式中 $p_{\mathrm{Sim-max}}$ ——模拟的最大载荷

$p_{\mathrm{Exp-max}}$ ——试验的最大载荷

当式(15)成立时，所输入的材料属性能够表征材料的拉伸力学性能，输入的应力－应变曲线为材料的拉伸真应力－应变曲线，不满足时对材料性能的真应力最大值作回归调整，当 $p_{\mathrm{Sim-max}}>p_{\mathrm{Exp-max}}$ 时，对材料的最大真应力降低，代入式(9)、(14)计算出抗拉强度、加工硬化指数和强化系数，并且通过计算得出真应力－真应变曲线，重新输入模型计算。当 $p_{\mathrm{Sim-max}}<p_{\mathrm{Exp-max}}$ 时，材料的最大真应力增大，代入式(9)～(14)计算出抗拉强度、加工硬化指数和强化系数，并且通过计算得出真应力－真应变曲线，重新输入模型计算。通过多次调整，当最终模拟的载荷位移曲线与试验的载荷位移曲线最大载荷满足式(15)时，最后一次计算的材料本构关系可以被认为是材料的本构关系。

本文对铝合金材料(Al-6063 和 Al-5052)和紫铜平板试样进行了试验，并且采用上面的方法做了进一步的分析得出了材料的真应力－应变曲线，并与拉伸试验得出的真应力－应变曲线作了对比如图 3

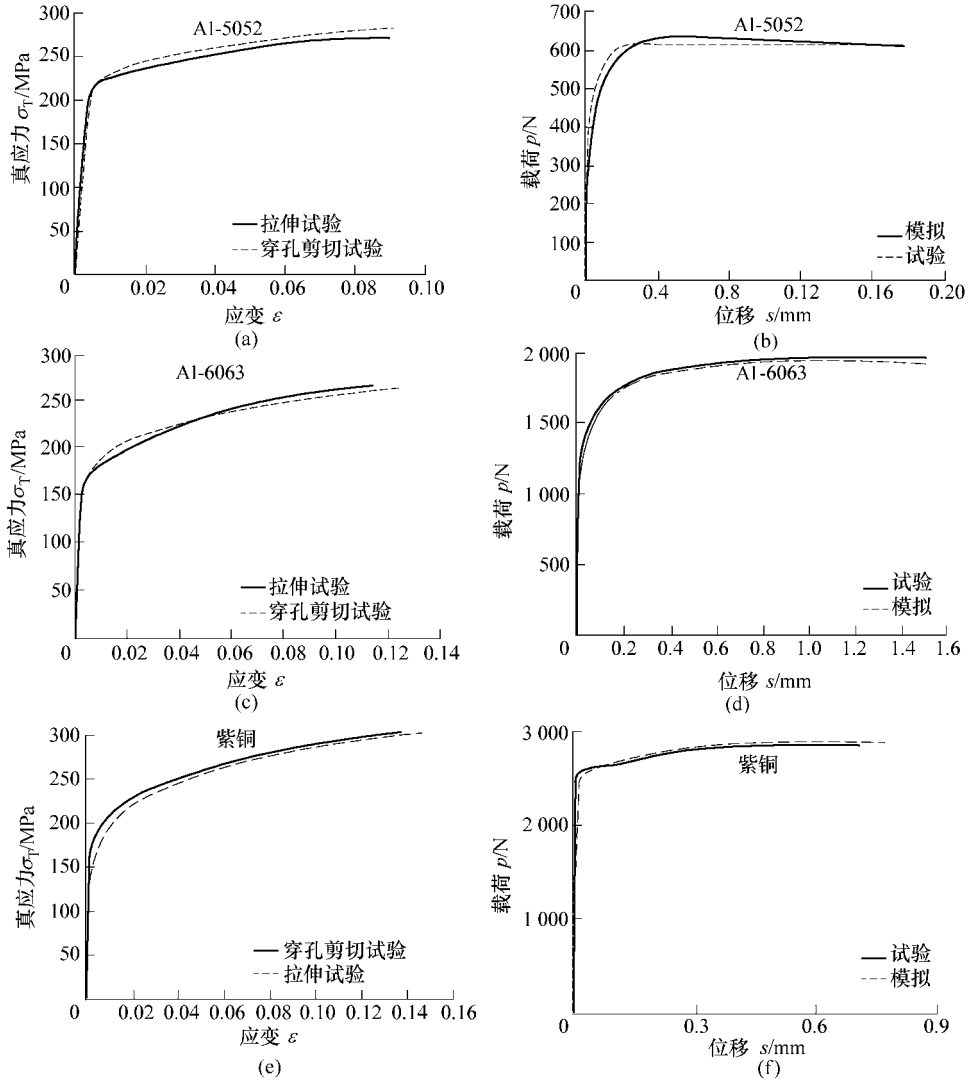

图 3 试验结果与模拟结果的对比图

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

所示。图 3a、3c、3e 分别为 Al-5052、Al-6063、紫铜由穿孔剪切得出的真应力－应变曲线与拉伸试验得出的曲线对比图，图 3b、3d、3f 分别为相对应的三种材料的剪切试验和模拟结果对比图。从图 3a 可以看出，Al-5052 由穿孔剪切计算出来的真应力－应变曲线的弹性到屈服点的曲线基本上重合，而屈服以后存在一定的差别，最大的差别出现在应力最大点达到 12 MPa 处，载荷－位移曲线在中间出现交叉，在转折点出现最大偏差，但是在 5%的误差范围里都能满足试验要求。Al-6063 测试载荷－位移曲线在每个位移点的载荷不超过 0.5%，但是应力－应变曲线出现交叉，而且穿孔剪切测试的加工硬化指数要比拉伸试验测定的要大，分别是 0.125 77 和 0.117 91；而紫铜载荷－位移曲线和应力－应变曲线都拟合比较好，应力－应变曲线在每个应变的应力误差不超过 2%，同时载荷－位移曲线不超过 1%，总体看来从穿孔剪切试验得到的应力－应变曲线能够很好地表征材料的本构关系，准确表征材料的力学性能，对于测试材料局部的力学性能有一定的准确性和可行性。

3　结论

(1) 对 Al-5052、Al-6063 和紫铜做穿孔剪切试验得出的应力－应变曲线表明，穿孔剪切能够表征材料的局部力学性能，特别是弹性阶段到材料的屈服，在最大点的应变存在一定的偏差，达到近 5%，而其余点也存在不同程度的偏差，但是总体来说有一定的可行性。

(2) 由剪切模具间隙的讨论表明，对于厚度较大的试样，穿孔剪切试验更能够满足剪切要求。

本文的试验没有对超过强度极限的力学性能进行研究，因此存在一定局限性。

参　考　文　献

[1] 史耀武，周宁宁，张新平，等. 微剪切试验及对焊接接头力学性能的评价[J]. 焊接学报，1994，15(4)：235-240.

[2] MARK C S, ROBERT H W. Forming of tailor-welded aluminum blanks aluminum and magnesium for automotive application[J]. The Materials Metals & Materials Society, 1996.

[3] 朱亮，陈剑虹. 力学性能不均匀焊接接头的强度预测[J]. 焊接学报，2005，26(5)：13-16.

[4] 李硕本. 冲压工艺学[M]. 北京：机械工业出版社，1982.

[5] 黄克智，黄永刚. 固体本构关系[M]. 第一版. 北京：清华大学出版社，1999.

[6] 孙贸才. 金属力学性能[M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2003.

[7] 布赖恩・皮克林. 钢的组织和性能[M]. 北京：科学技术出版社，1999，278-281.

METHOD IN TESTING OF MECHANICS PERFORMANCE OF MATERIALS LOCAL MECHANICAL BEHAVIOR

QIAO Jisen[1]　*ZHOU Qinglin*[1]　*WANG Zhicheng*[1]
ZHU Liang[1]　*CHEN Jianhong*[1]　*ZHAO Shaojun*[2]

(*1. State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials*, *Lanzhou University of Technology*, *Lanzhou 730050*;
2. Institute of Science, *Lanzhou University of Technology*, *Lanzhou 730050*)

Abstract：Local mechanical behavior of materials was analyzed by means of punch-shearing test combined with a revised finite element simulation algorithm. For the numerical model, a special revised iterative process was put forward to work out the strain-stress curves for an unknown material by matching the simulated reaction force curves with those of test results. Therefore, an indirect method for material characterization was presented based on the punch-shearing test. In addition, the process accuracy was validated by using aluminium alloy 5052H34 and 6063T5 for automobile and red copper as test materials. The results show that maximum error between indirect and direct way is less than 5%, which can be accepted on the whole. This indirect material characterization method can be used for local or micro-zone material modeling, which will be a useful tool for material characterization of inhomogeneous welded joints.

Key words：Punch-shearing test　Finite element simulation　Local mechanical behavior

作者简介：乔及森，男，1973 年生，博士研究生。主要从事焊接结构及接头力学性能方面的研究。

E-mail：qiaojisen@lut.cn

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net