

孔间厚度对双孔法测定材料局部强度的影响及方法改进

牟 遇¹, 张爱华¹, 王 平¹, 朱 亮², 祁 靖¹

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 兰州 730050)

摘要: 工程上对金属材料进行承载能力评定时, 需测定各区域的局部强度; 在双孔微剪切试验的基础上, 研制可稳定加载的双孔微剪切试验新装置, 构建荷载位移同步检测的 LabVIEW 系统, 并对 12Cr13、S31608 和 16 Mn 三种钢材材料进行多组双孔试验; 借助标准拉伸试验, 通过对试验数据的分析, 研究孔间厚度 t 对荷载位移试验曲线的影响, 并给出归一化参数 P_y/t 与屈服强度 σ_y , 归一化参数 $P_m/2t$ 与抗拉强度 σ_r 的相关关系, 实现由双孔试验曲线的特征值和孔间厚度一同求取局部强度参数; 试验结果表明, 孔间厚度的微小变化对荷载位移曲线具有明显可测的影响, 且应用改进的装置以及归一化参数来测定 12Cr13、S31608 和 16 Mn 局部强度的方法, 可以有效地减小孔间厚度对测定精度的影响。

关键词: 双孔微剪切; LabVIEW; 荷载位移曲线; 归一化参数; 屈服强度; 抗拉强度

Effect of Thickness Between Double Holes in Double-holes Micro-shear Method on Determination of Local Strength of Material and Method Improvement

MU Yu¹, ZHANG Aihua¹, WANG Ping¹, ZHU Liang², QI Jing¹

(1. College of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou University of Technology,

Lanzhou 730050, China

2. College of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The test for local strength of metallic materials is necessary for load capacity estimation of the metallic materials. A new test apparatus with stable loading has been developed, and a LabVIEW system for simultaneous detection of load and displacement has been established based on the double-hole micro-shear test method. Tensile and double-hole tests have been carried out on martensitic stainless steel, austenitic stainless steel and high-strength low-alloy steel at room temperature. The material thickness between double holes effect on the micro bend-shear test curves is discussed, and the method of applying the normalized parameters P_y/t and $P_m/2t$ related to the thickness t to obtain the local strength parameters has been proposed. The test results show that a slight change in thickness has an obvious measurable effect on the load-displacement curve. It has been validated that the use of improved apparatus and the correlation between standardized parameters and strength parameters to measure the local strength of materials can effectively reduce the influence of thickness on measurement accuracy.

Keywords: double-hole micro-shear; LabVIEW; load-displacement curve; normalized parameter; yield strength; tensile strength

0 引言

焊接接头的力学性能不均匀对接头承载能力有复杂的影响, 用有限元法对接头进行试验研究和分析时, 需要输入各个区域的强度, 其中最基本的参数为屈服强度和抗拉

强度^[1]。另外, 钢的本构性能会根据时效、服役载荷、脆化、辐照等因素而发生变化^[2], 工程上需定期测定现役设备危险部位的局部强度, 以便对其承载能力和安全可靠性进行评定。目前, 标准拉伸试验已经建立较为完善的理论与试验体系, 并已编纂成为标准^[3]。但该方法制备试样复

收稿日期: 2021-01-20; 修回日期: 2021-03-15。

基金项目: 国家自然科学基金(61866021, 62001198); 甘肃省国际科技合作专项(18YF1WA068); 流程工业综合自动化国家重点实验室开放课题(PAL-N201808)。

作者简介: 牟 遇(1995-), 女, 甘肃武都人, 硕士, 主要从事检测技术与智能信息处理方向的研究。

朱 亮(1964-), 男, 甘肃高台人, 博士生导师, 教授, 主要从事材料加工和性能检测方向的研究。

通讯作者: 张爱华(1964-), 女, 河北永年人, 博士生导师, 教授, 主要从事检测技术与自动化装置、模式识别与智能系统等方向的研究。

引用格式: 牟 遇, 张爱华, 王 平, 等. 孔间厚度对双孔法测定材料局部强度的影响及方法改进[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(9): 250-255.

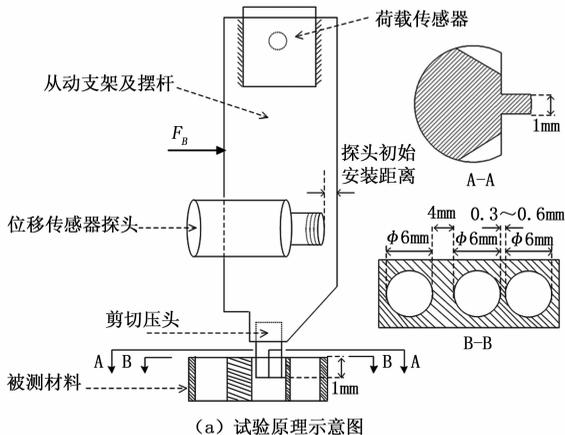
杂, 无法现场测试, 且成本较高, 不便推广^[4]。为了寻求能准确测定材料局部强度的现场试验方法, 本课题组已进行了许多研究, 并提出了双孔微剪切法^[5]。这种方法无需制备试样, 直接在被测材料区域打两盲孔, 进行剪切试验, 通过测试两孔间材料的荷载位移试验曲线来分析局部强度, 已验证可作为现场试验手段之一^[6]。但通过进一步试验与研究发现, 双孔微剪切试验装置刚性不足, 且稳定性较差, 增加了一定的试验误差。更重要的是, 测定局部强度的计算过程较为繁杂, 且因没有考虑双孔之间材料的厚度对试验曲线的影响, 使得测定误差较大。因此, 为减少试验误差, 重新研制可平稳加载的双孔装置, 并搭建 LabVIEW 控制采集系统。鉴于孔间厚度的微小变化对荷载位移曲线具有明显可测的影响这一实质, 建立涉及厚度值的归一化参数与局部强度参数的相关性, 提出直接根据双孔荷载位移试验曲线的特征值和孔间材料的厚度值一同求取 12Cr13、S31608 和 16 Mn 局部强度参数的方法, 实现金属材料的局部强度更简单、更准确地测定。

1 双孔试验原理和试验装置

1.1 双孔微剪切试验原理

双孔微剪切试验原理示意图如图 1 (a) 所示, 它是在被测材料上钻 3 个盲孔 ($\varphi 6$ mm, 深 5 mm), 且孔的中心线保持在同一平面。第一个孔是固定孔, 用于固定专用的试验装置。第二个孔和第三个孔为测试孔, 试验装置中的剪切压头利用杠杆原理对测试孔间材料施加荷载, 使测试孔之间的材料发生剪切变形直到断裂。荷载传感器和位移传感器记录整个剪切过程中的荷载、位移数据。

从动支架及摆杆的受力模型如图 1 (b) 所示, 从动支架及摆杆的设计尺寸已知, $L_{AB} = 115.9$ mm, $L_{AC} = 158.3$ mm。另外, F_A 的反作用力也已知, 为荷载传感器检测值。则根据力学平衡关系式:



(a) 试验原理示意图

(b) 从动支架及摆杆的力学模型

图 1 双孔微剪切试验方法

$$F_A + F_C = F_B \tag{1}$$

$$F_B * L_{AB} = F_C * L_{AC}$$

可以计算得到剪切压头施加在被测材料上的荷载 F_C , 而位移传感器的检测数据去除掉传感器探头的初始安装距离, 就为材料的变形位移。由此, 可以得到被测区域在荷载作用下的变形情况—荷载位移曲线。在加载过程中, 变形集中在压头下的区域, 对应的荷载位移曲线只反映被测区域的力学性能。分析微剪切过程中的荷载位移曲线, 可以得到屈服载荷和最大载荷, 由此实现金属材料局部强度的准确测定。

1.2 试验装置

双孔微剪切试验新装置的剖面图和实物图如图 2 所示, 刚性较好且加载过程稳定, 从而减少装置对试验结果的影响。相比较文献 [7] 中的装置, 它将支爪拆除, 加载方式由剪切加载改为弯曲剪切加载, 固定柱承载装置的所有部件。装置部件主要包括带减速的直流电机, 凸轮, 荷载传感器、电涡流位移传感器、从动轮和剪切压头。从图 2 可以看到, 剪切压头与从动支架及摆杆是一个整体, 所以非接触式测量从动支架及摆杆的移动距离也等同于检测剪切压头的移动距离, 且位移传感器探头与剪切压头的安装位置相距一定的距离, 若切屑时产生粉末, 也并不会影响位移传感器的检测精度。直流电机驱动凸轮旋转, 凸轮将旋转输出转换为平移输出, 凸轮进程设计为 1.5 mm。因荷载传感器连接部件与凸轮外壳上端配合而形成的铰链的存在, 再借助从动轮迫使从动支架及摆杆围绕荷载传感器的接触点向右摆动, 从而带动剪切压头对被测材料施加荷载, 实现加载。根据旋转角度小于 5° 可近似为直线运动的原则, 上述加载过程可近似为直线加载剪切, 因为由计算可知, 此处设计的旋转角度不超过 1° ($\tan\theta = 1.5/158.3$)。压头由碳化钨制成, 保证了低变形、高强度, 宽度为 1 mm。整个装置的尺寸为: 46 mm * 210 mm * 40 mm, 易于操作且便携。

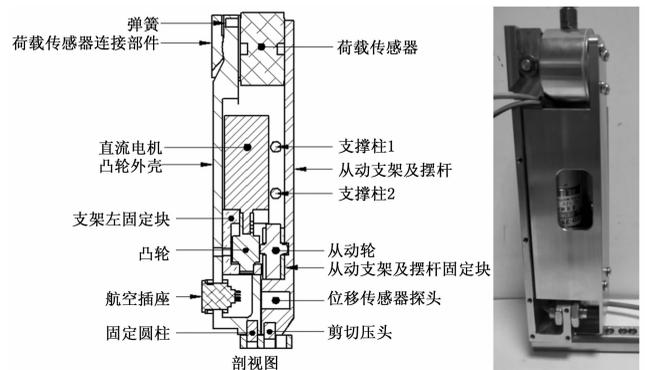


图 2 双孔微剪切试验的实验装置

1.3 试样制备和厚度测量

试验材料选用工程上常用的 3 种钢材料, 马氏体不锈钢 12Cr13、奥氏体不锈钢 S31608、高强度低合金钢 16 Mn。材料制备的试样如图 3 所示, 每种材料共有 12 组, 正反各 6 组, 每组 3 个孔。孔内表面进行统一打磨, 消除钻孔对被

测材料的影响,且保证摩擦系数统一为 $\mu = 0.8$ 。每组中测试孔间材料的厚度 t 均不相同,在 $0.3 \sim 0.6 \text{ mm}$ 之间。在试验前,使用分度值 0.001 的工具显微镜进行测量,分别选取 7 组,厚度值如表 1 所示。

表 1 试样孔间材料的厚度值

材料	厚度/mm						
12Cr13	0.300	0.331	0.356	0.394	0.470	0.490	0.581
S31608	0.300	0.311	0.341	0.413	0.435	0.460	0.490
16Mn	0.313	0.334	0.359	0.404	0.424	0.451	0.481



图 3 试样实物图

2 测控系统设计

2.1 硬件设计

整套系统以同步数据采集卡为数据采集和控制的核心,由采集卡负责两路传感器数据的同步采集,以及对直流减速电机运行或停止的控制。硬件主要包括:采集卡、荷载传感器、位移传感器、直流减速电机、直流电机驱动板模块、电源和薄膜开关等。硬件系统的接线原理图如图 4 所示。

其中,荷载传感器选用 DYZ-101 柱式称重压力传感器,测量精度为 0.05% ,输出信号经由荷载变送器后为 $\pm 5 \text{ V}$ 电压信号输出。它可以用来检测压力或拉力,压力为“+”,拉力为“-”,本文装置中用于检测拉力 (F_A 的反作用力)。位移传感器选用 SE990 分体式电涡流传感器,分为探头和分置器两部分,可实现压头位移的非接触精确测

量,灵敏度误差为 0.1% 。直流电机驱动板模块用于驱动电机,IN1、IN2 为电机运行或制动的控制端口,PWM 端口可外接 PWM,用于调速,也可直接置以高电平,实现全速运转。若 IN1、IN2、PWM 为“1、0、1”,则电机全速正转,若为“0、0、 \times ”,则制动。采集卡选用恒凯 USB6202,它具有 4 路 16 位模拟同步采集通道,软件选择 $\pm 10 \text{ V}/\pm 5 \text{ V}$ 两档量程。该系统使用 DA1 采集荷载信号,DA2 采集位移信号,数据由 USB 总线传送给便携电脑。同时,该采集卡也具备 16 路数字输入/输出,薄膜开关的启动/停止信号由采集卡的数字输入 DI4、DI6 输入,电机的控制信号由采集卡的数字输出口 DO6、DO7、DO8 输出,DO2、DO3 输出指示灯的控制信号。

2.2 LabVIEW 软件设计

随着测试技术不断发展,基于计算机的虚拟仪器技术普遍应用于测试领域。LabVIEW 是一种图形化的编程语言和开发环境,它的基本程序单位是 VI,其用户界面友好^[8],将其运用于双孔微剪切试验中,可方便实现数据的实时显示和记录。系统使用 LabVIEW 编程语言,多次调用 DLL 动态链接库,实现按键对装置运行的控制,以及对荷载、位移信号的同步采集、实时显示、数据存储,并生成动态曲线,便于直观了解数据的变化规律。测控流程图如图 5 所示。

LabVIEW 主要程序框图如图 6 所示,首先调用库函数“openUSB”,连接板卡。然后调用“Read_Port_In”函数,读入 16 位开关量输入,每隔 100 ms 检测采集卡的数字输入 DI4 是否有信号。若有信号,则启动条件结构中嵌套的三层顺序结构。“ad_continu_conf”函数主要参数有 num_ch (通道数)、ad_range (量程设置,设置为 $\pm 5 \text{ V}$)、

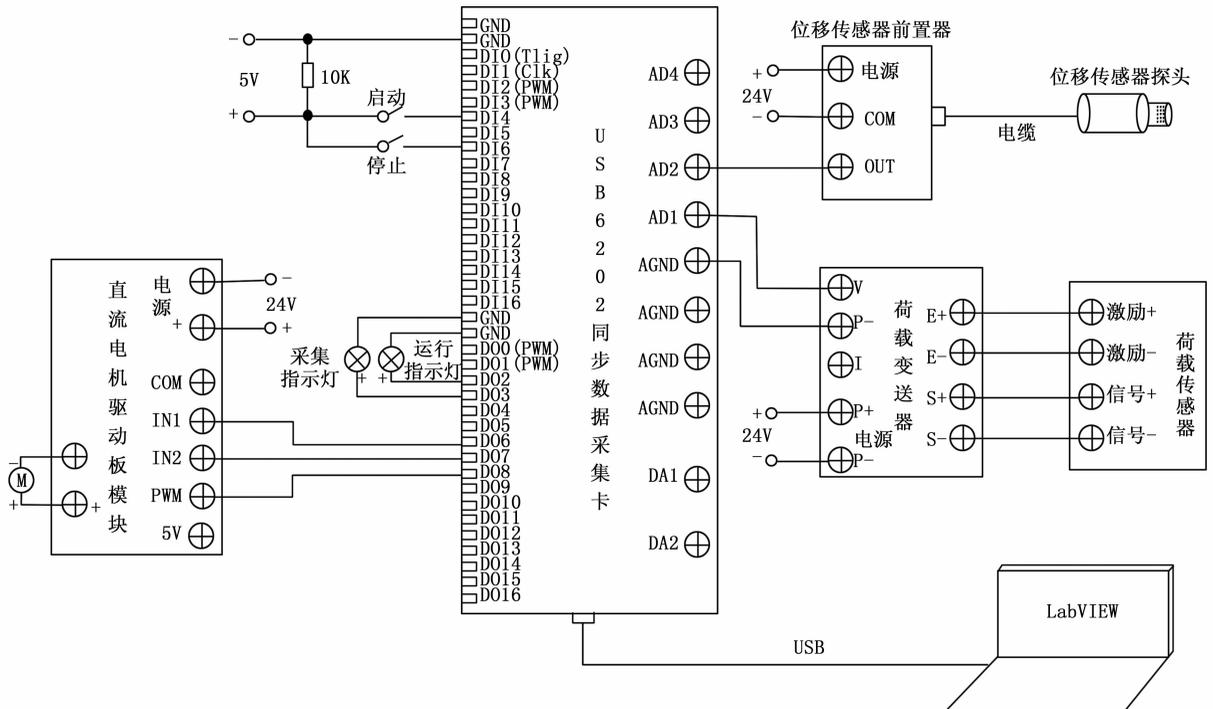


图 4 硬件系统的原理接线图

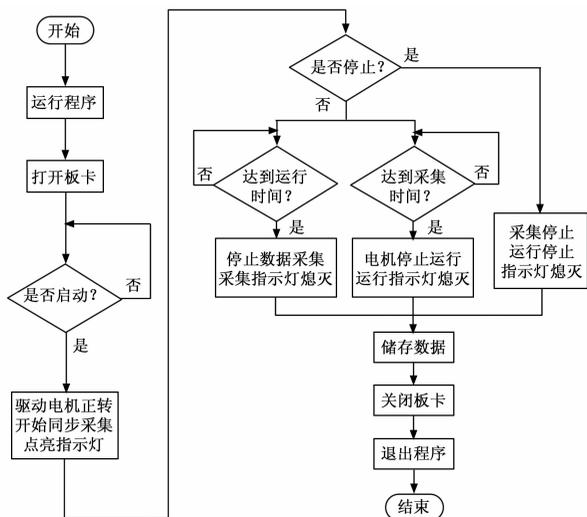


图 5 LabVIEW 程序流程图

Rate_Sample (采样频率) 等, 需要事先给定参数, 即可实现多通道数据连续采集。“Set_Port_Out”函数可使得 out_port 参数的 16 位数据中为“1”的位对应的输出口置高电平, 为“0”的位对应输出口不变化, 16 位数据分别对应 15~0 号 16 个输出口。同理, “Reset_Port_Out”函数使得为“1”的位对应的输出口置低电平, 为“0”的位对应输出口不变化。因此, 该 LabVIEW 程序中使用函数“Set_Port_Out”函数和“Reset_Port_Out”函数传达电机和指示灯控制信号指令。另外, 利用循环结构可设定电机运行和采集的时间, 使得一次双孔微剪切试验完成后, 试验机构与采集程序自动停止。其中, 也涉及到局部变量的建立和调用, 提高了运行效率。最后, 调用函数“Read_AdBuf”读取缓冲区内的数据, 通过创建数组、捆绑、波形图、写入电子表格等控件, 完成数据采集的实时显示和储存。

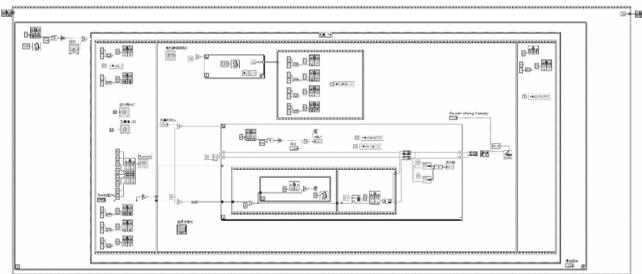


图 6 LabVIEW 主要程序框图

试验进行前, 需要进行相关参数预设, 采样频率 2 500 Hz, 采集时间 4 s, 电机运行时间 4 s, 给定数据存储位置。试验完成后, LabVIEW 前面板如图 7 所示, 显示荷载、位移两路数据。其中, 在 2.05 S 时, 被测材料被完全破坏, 位移达到最大, 材料处于卸载状态, 所以荷载值为 0。在图 7 中可以看到, 前面板设有虚拟启动/停止按钮和两个指示灯, 可直接在 LabVIEW 交互界面实现控制与显示, 其与实物按键和指示灯功能相同。

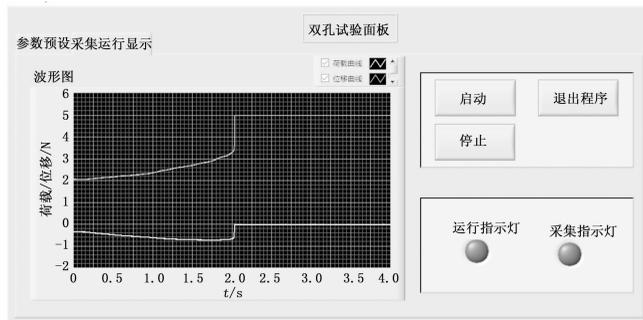


图 7 LabVIEW 前面板

3 试验结果分析

3.1 试验现象和试验曲线

试验进行前, 将图 2 的试验装置中的固定柱放入试样的固定孔内, 将剪切压头放在第二个孔中, 然后进行参数预设。试验进行时, 按下启动开关, 装置运行, 测试孔间的材料上被施加一定的荷载, 材料依次发生弯曲、剪切变形、断裂。在保证孔内摩擦系数、温度、压头切入深度等条件相同的情况下, 共进行 21 组试验, 每种材料各获取 7 组试验数据。双孔微剪切试验完成后的试验现象如图 8 所示。



图 8 双孔微剪切试验现象

对荷载传感器和位移传感器记录的整个剪切过程中的荷载、位移数据进行滤波、荷载、位移换算等处理, 可得到双孔微剪切试验的荷载位移曲线, 现以孔间厚度 0.395 mm 的 S31608 试验材料为例, 试验曲线如图 9 所示。对试样进行卸载观察, 可以发现, 在加载过程中, 被测量区域的材料要经历 4 个阶段的变形过程。第一阶段, 弹性弯曲和剪切变形, 只有压头附近的一小部分被测材料发生弹性变形; 第二阶段, 弹塑性弯曲和剪切变形, 被测材料的边缘发生少量的塑性变形; 第三阶段, 呈现非线性关系, 被测材料开始屈服, 塑性区不断扩大直到贯穿整个剪切面; 第四阶段, 荷载持续增加, 达到最大值 P_m 时, 压头切入被测材料。最大荷载值之后, 加载面积迅速减小, 导致承载能力迅速下降。裂纹首先出现在压头附近, 并继续扩展, 直到被测材料完全断裂。

3.2 孔间厚度对荷载位移曲线的影响

分别对马氏体不锈钢 12Cr13、奥氏体不锈钢 S31608、高强度低合金钢 16 Mn 三种材料的 7 组试验数据进行处理, 并去除最大荷载值以后的数据, 得到每种材料不同孔间厚度下的荷载位移试验曲线, 如图 10 所示, 以此说明孔间厚

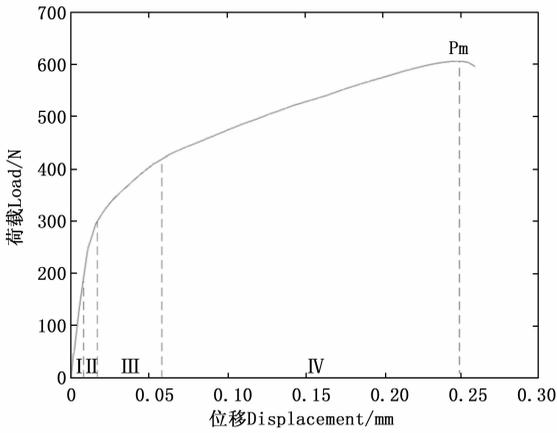


图 9 荷载—位移曲线

度对同一材料的双孔荷载位移曲线的影响。

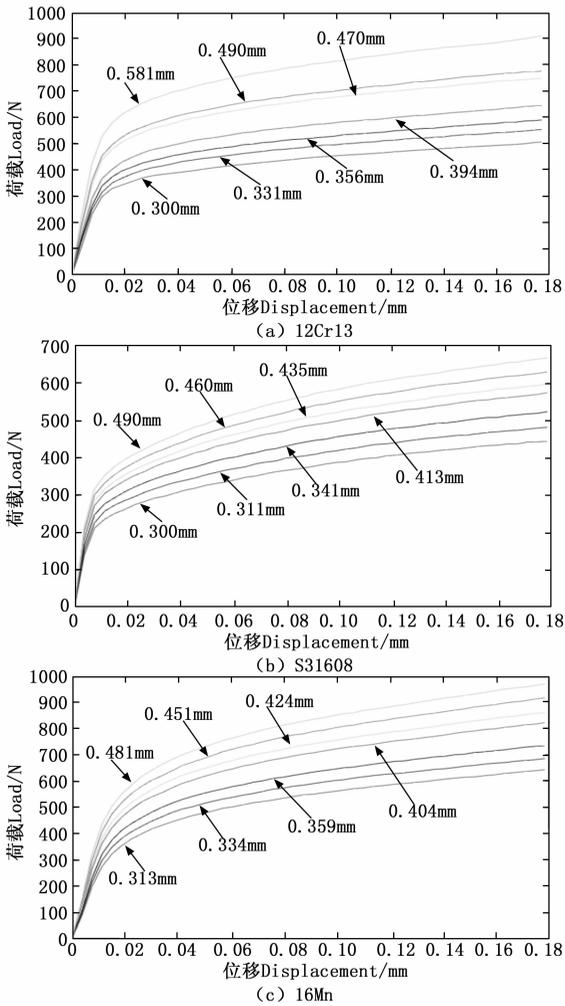


图 10 不同孔间厚度下的荷载—位移曲线

通过对比可以发现，孔间材料的厚度不同，则双孔微剪切的荷载位移曲线不同，其中也就包括双孔法里自定义的一些特征值大小的不同，比如，双孔试验曲线弹性阶段的斜率、塑性位移量等于孔间厚度的 0.2% 处的荷载为屈服

荷载 P_y 、最大荷载值为最大荷载 P_m [5]。试验结果说明，孔间材料厚度的微小变化对荷载位移曲线具有明显可测的影响，且随着孔间材料厚度的增大，材料同一相对错位值所对应的荷载也呈现增大趋势。因此，若不考虑孔间厚度 t 对双孔试验曲线或特征值的影响，则仅根据双孔屈服荷载、最大荷载求取屈服强度、抗拉强度的方法可能存在较大误差。

3.3 归一化参数与局部强度参数关系

按照文献 [5] 的方法，得到双孔试验曲线的特征值—屈服荷载 P_y 和最大荷载 P_m ，如表 2、表 3 所示。为了准确表述孔间厚度与屈服荷载、最大荷载的关系，将孔间厚度分别与屈服荷载、最大荷载进行拟合，结果如图 11 所示。可以发现，3 种材料的屈服荷载 P_y 、最大荷载 P_m 与孔间厚度 t 均成线性关系。

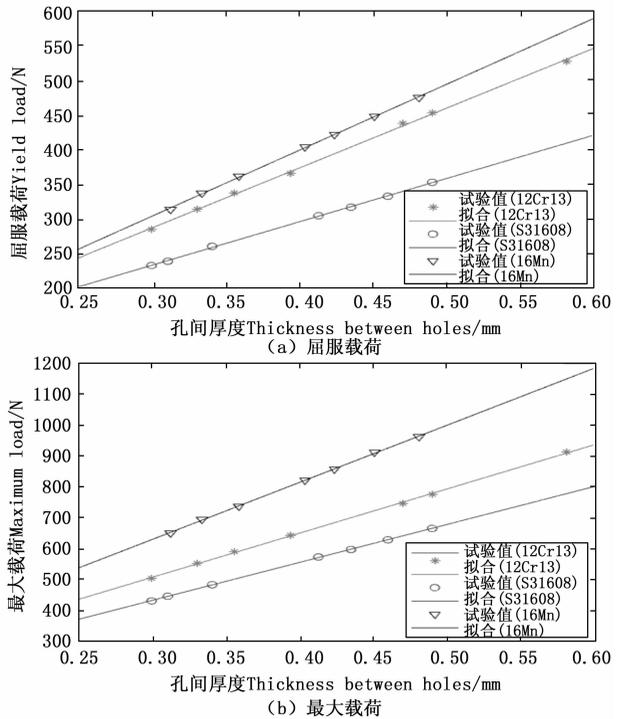


图 11 厚度与屈服荷载、最大荷载的关系—三种材料

从实验的角度看，每个试样孔间厚度的微小变化是可以预期和测量的。在图 10 中可以看到，厚度 $t \pm 0.02$ mm 的变化都会引起荷载位移曲线的明显变化。需要足够重视孔间厚度的影响，才能从试验曲线中获取尽可能多的性能信息。事实上，这个直接影响不可能由任何一个与 t 有关的参数实现整条曲线的规范化 [9]。但分析发现，归一化参数 P_y/t 可以合理地避免厚度 t 对屈服强度 σ_y 测定的影响，归一化参数 $P_m/2t$ 可以合理地避免厚度 t 对抗拉强度 σ_t 测定的影响。试验中的 P_y/t 参数值和 $P_m/2t$ 参数值分别如表 4 和表 5 所示，保留小数点后三位，其中 σ_y 、 σ_t 是标准拉伸试验测得的屈服强度和抗拉强度。

根据表 4，可以证实，3 种材料均存在 $\sigma_y = \alpha P_y/t$ ；根据表 5，可以证实，3 种材料均存在 $\sigma_t = \beta P_m/2t$ 。在文献 [10]

表2 不同孔间厚度下的屈服载荷

材料	P_y (N)						
12Cr13	285.176 0	314.032 2	337.838 9	366.170 9	437.643 1	452.786 9	526.653 9
S31608	233.701 0	239.785 7	261.216 7	305.136 9	317.329 7	333.083 2	353.059 0
16Mn	314.234 3	337.557 5	361.536 7	404.015 9	421.445 3	447.483 4	475.209 4

表3 不同孔间厚度下的最大载荷

材料	P_m (N)						
12Cr13	506.040 0	553.279 3	590.618 8	643.999 6	746.930 6	775.730 9	913.215 8
S31608	432.122 4	447.218 0	484.356 4	574.122 5	598.414 7	629.517 3	666.484 2
16Mn	652.302 0	694.653 2	738.463 0	822.382 4	857.497 6	912.192 6	962.922 3

表4 P_y/t 归一化参数

材料	σ_y (MPa)	P_y/t (kN/mm)							均值
12Cr13	520.1	0.951	0.949	0.949	0.929	0.931	0.924	0.907	0.934±0.027
S31608	415.8	0.779	0.771	0.766	0.739	0.730	0.724	0.721	0.747±0.032
16Mn	554.4	1.004	1.011	1.007	1.000	0.994	0.992	0.988	0.999±0.012

表5 $P_m/2t$ 归一化参数

材料	σ_m (MPa)	P_m/t (kN/mm)							均值
12Cr13	669.1	0.843	0.836	0.830	0.817	0.795	0.792	0.786	0.814±0.029
S31608	576.2	0.720	0.719	0.710	0.695	0.688	0.684	0.680	0.700±0.020
16Mn	819.9	1.042	1.040	1.029	1.018	1.011	1.011	1.001	1.022±0.021

中提到, 一种合金到另外一种合金的 α 系数不会有显著性变化。在本文研究中可以得到, 12Cr13、S31608、16Mn 三种材料的 α 系数分别为 556.9 MPa/(kN/mm)、556.6 MPa/(kN/mm)、555.0 MPa/(kN/mm); 12Cr13、S31608、16Mn 三种材料的 β 系数分别为 822.0 MPa/(kN/mm)、823.1 MPa/(kN/mm)、802.3 MPa/(kN/mm)。由此, 可以合理推测其他金属材料也存在类似的相关关系。即使不足以证明, 但至少可以按照上述关系式, 根据归一化参数 P_y/t 、 $P_m/2t$, 测定 12Cr13、S31608、16Mn 三种材料的局部强度, 无需求解较为复杂的屈服剪应力和最大剪应力, 且有效的解决了孔间厚度 t 对其局部强度测定的影响。

4 结束语

1) 研制双孔微剪切试验新装置, 开发基于 LabVIEW 的测控系统。

2) 通过试验设计, 分析孔间厚度对荷载位移曲线的影响。试验结果说明: 孔间厚度的微小变化对荷载位移曲线具有明显可测的影响, 且随着厚度的增大, 材料同一相对错位位移值所对应的荷载也呈现增大趋势。

3) 提出根据 P_y/t 参数和 $P_m/2t$ 参数确定金属材料局部强度的方法。引入由试验曲线和孔间厚度共同决定的归一化参数, 并给出 P_y/t 参数与屈服强度, $P_m/2t$ 参数与抗拉强度的相关关系, 有效地减小孔间厚度对测定结果的影响。

参考文献:

[1] 蔡淑娟, 朱 亮, 张忠发. 双孔微剪切评定焊接接头的局部强

度[J]. 焊接学报, 2016, 37(4): 43-46.

- [2] LUCON E. Material damage evaluation and residual life assessment of primary power plant components for long-term operation using specimens of non-standard dimensions [J]. Metallurgical Research & Technology, 2001, 98(12): 1079-1091.
- [3] 徐 云, 胡玉梅, 赵为民, 等. 7003 铝合金本构模型参数和力学性能研究 [J]. 机械强度, 2019, 41(6): 1321-1326.
- [4] D. A LAVAN. Microtensile properties of weld metal [J]. Experimental Techniques, 1999, 23(3): 31-34.
- [5] 朱 亮, 侯艳荣, 马忠新, 等. 双孔微剪切法测定材料的局部强度 [J]. 兰州理工大学学报, 2006(3): 25-28.
- [6] 石永久, 魏晨熙, 王元清, 等. 建筑结构用钢焊接接头力学性能非匀质性的研究方法 [J]. 建筑科学, 2013, 29(7): 85-90.
- [7] 朱 亮, 任国松, 姬孝斌. 双孔微剪切试验评定铝合金焊接接头局部变形特性 [J]. 机械强度, 2008(3): 493-497.
- [8] 高延超, 梁 克, 仪德英. 基于 LabVIEW 的高速多通道航天器通用测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(7): 59-62.
- [9] E. N. CAMPITELLI, P. SPATIG, R. BONADÉ, et al. Assessment of the constitutive properties from small ball punch test: experiment and modeling [J]. Journal of Nuclear Materials, 2004, 335(3): 366-378.
- [10] MAO XINYUAN, Takahashi Hideaki. Development of a further-miniaturized specimen of 3 mm diameter for tem disk (\bar{A} 3 mm) small punch tests [J]. Journal of Nuclear Materials, 1987, 150(1): 42-52.