

连续球压痕法测试压力容器钢力学性能的研究*

汤杰^{1,2}, 王威强^{1,3,4}, 苏成功^{1,3,4}, 王鹏飞^{1,3,4}

(1. 山东大学机械工程学院 济南, 250061) (2. 浙江省特种设备检验研究院 杭州, 310020)

(3. 山东省特种设备安全工程技术研究中心 济南, 250061)

(4. 山东大学特种设备安全保障与评价研究中心 济南, 250061)

摘要 为探讨材料力学性能无损测试的新方法, 分析研究了连续球压痕试验测试材料力学性能的原理, 并以压力容器用钢 15CrMoR, Q245R, Q345R 等 3 种钢板为研究对象, 采用连续球压痕试验与常规拉伸试验相比较的方法, 测试了屈服强度、抗拉强度等力学性能, 深入开展了连续球压痕试验与常规拉伸试验所测试力学性能的比对分析工作。比对结果表明了连续球压痕试验在测试压力容器用钢力学性能方面的可行性、可靠性与准确性, 证明连续球压痕试验法可以应用于工程中部分材料力学性能的无损检测。

关键词 力学性能; 无损测试; 连续球压痕; 压力容器钢

中图分类号 TG115.5

引言

工业生产和设备服役的安全已经被提到了一个前所未有的高度, 而事实上, 影响工业设备安全评估的材料性能的获得却一直是瓶颈, 也是专家学者的研究重点。通常, 压力容器用钢加工制造成压力容器设备并服役后, 一般只能定期对其进行缺陷检测和日常维护, 而由于常规力学性能测试大都需要破坏性取样, 难以在线对其力学性能进行测试进而做出准确的分析评价。近年来虽然许多研究者提出了小冲杆法、压痕法、非线性超声法等微创或无损测试材料性能, 但目前仍没有被大家一致公认的材料力学性能无损或微损测试方法。

压痕法可以追溯到 1881 年, Hertz 提出利用压痕测试材料硬度, 而 20 世纪 80 年代初, 美国橡树岭国家实验室的 Haggag 等^[1-2] 提出利用连续球压痕试验测试材料多种力学性能, 且研发了连续球压痕试验机并进行商业化推广。连续球压痕试验被认为是一种非破坏性的微损测试技术, 无需取样, 现场和实验室均能使用^[1-6]。笔者旨在通过连续球压痕试验法和常规拉伸试验法的对比, 探讨一种能被大家公认的无损或微创的材料性能测试方法。

1 连续球压痕试验原理

1.1 连续球压痕试验

连续球压痕试验通过电机驱动载荷施加机构作用于球形压头, 垂直压入已抛光的被测材料表面, 在同一作用点上进行加载、部分卸载、再次加载、再次部分卸载的连续循环载荷施加和压入过程, 循环过程中通过位移传感器和载荷传感器即时测量加载与部分卸载全过程的位移与载荷, 进而获得整个连续球压痕试验过程的压痕曲线(即载荷-位移曲线), 并将此载荷-位移曲线关联转化为材料的真应力-真塑性应变曲线, 再和材料的各项性能关联, 其中包括屈服强度、抗拉强度、压痕变形能量、应变硬化指数和强度系数等^[2-7]。

1.2 真应力-真塑性应变曲线的关联

根据前人的研究和大量的试验分析, 在均匀塑性变形阶段, 真应力-真塑性应变曲线可由幂强化律方程(也称“Holloman 关系”)^[2] 来表征

$$\sigma_t = K \epsilon_p^n \quad (1)$$

其中: σ_t 为材料真应力; K 为材料强度系数; ϵ_p 为真

* 国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)资助项目(2011CB013401)

收稿日期: 2013-10-17; 修回日期: 2014-12-26

塑性应变; n 为材料应变硬化指数。

连续球压痕试验获得的直接数据是同步测量的载荷和位移值。连续球压痕法将这些一一对应的载荷和位移值关联为基于硬度/显微硬度思想衍生导出的 $\sigma_t - \epsilon_p$ 系列数据点,从而与基于常规拉伸试验测试的真应力-真塑性应变曲线数据相关联。

连续球压痕试验将传统测量压痕直径改为测量压痕深度,从而实现了在球压入全过程中对压痕深度的实时测量,并实现了将早期压痕试验所进行的一组准硬度试验集成为一次连续球压痕试验。经 Haggag^[2], Tabor^[8], Francis^[9], Au 等^[10] 的研究和总结,可得如下系列方程

$$\epsilon_p = \frac{0.2d_p}{D} \quad (2)$$

$$\sigma_t = \frac{4P}{\pi d_p^2 \delta} \quad (3)$$

其中: d_p 为残余压痕直径; D 为压头直径; P 为施加的载荷。

式(2)是由 Tabor 利用传统光学技术测试球压头接触边缘真应变的试验结果所确定的经验方程,式(3)则考虑了约束因子 δ 对球压痕试验真应力的影响, δ 是与球压头下塑性区发展相关的参数,对于卸载后的压痕残余直径,得到如下表达式

$$d_p = 2.22 \left[\frac{P}{2} \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1} \left(\frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right) \right]^{1/3} \quad (4)$$

其中: r_1 为卸载状态下压头半径; r_2 为卸载状态压痕剖面的半径; E_1, E_2 分别为压头的弹性模量和被测材料的弹性模量。

假定球压头是刚性的,则 r_1 即为 $D/2$, 而且 r_2 是残余压痕直径 d_p 和残余压痕深度 h_p 的函数,将卸载后的残余压痕直径与压痕深度代入后可得到如下方程

$$d_p = \sqrt[3]{\frac{0.5CD[h_p^2 + (d_p/2)^2]}{h_p^2 + (d_p/2)^2 - h_p D}} \quad (5)$$

$$C = 5.47P \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \quad (6)$$

考虑到约束因子 δ 是变形状态的函数,将压痕状态分成 3 个阶段,分别是具有可回复变形的弹性区、弹塑性变形的过渡区以及主要塑性变形的完全塑性区。根据不同材料的压入试验结果确定约束因子的经验公式,并考虑到 δ 也是应变速率和应变硬化的函数^[2],因此修正后得到如下经验公式

$$\delta = \begin{cases} 1.12 & (\varphi \leq 1) \\ 1.12 + \tau \ln \varphi & (1 < \varphi \leq 27) \\ \delta_{\max} & (\varphi > 27) \end{cases} \quad (7)$$

$$\varphi = \frac{\epsilon_p E_2}{0.43 \sigma_t} \quad (8)$$

$$\delta_{\max} = 2.87 \alpha_m \quad (9)$$

$$\tau = \frac{\delta_{\max} - 1.12}{\ln 27} \quad (10)$$

在上述方程中,约束因子指数 α_m 其值与材料应变速率敏感性成比例,并且对敏感材料低应变速率其值取为 1。因压痕所处状态阶段的不同,约束因子 δ 的位置函数如式(7)所示, φ 则是 Francis 根据试验研究提出的一个归一化变量。

联解式(2)~式(10),即可确定 $\sigma_t - \epsilon_p$ 系列数据点。软件自带的程序将这些数据点以及屈服应力-屈服应变 $\sigma_0 - \epsilon_0$ 数据点按照 Holloman 关系进行拟合。其中 $\sigma_0 - \epsilon_0$ 数据点是处在弹性阶段和均匀塑性变形阶段相交处,符合 Holloman 关系,而其他 $\sigma_t - \epsilon_p$ 数据点处于集中变形阶段,需要根据这些点进行 Holloman 关系拟合,这样可获得材料的均匀塑性变形流动曲线,即真应力-真塑性应变曲线。屈服应力 σ_0 的求解在下面将详细讲到,屈服应变满足

$$\sigma_0 = E \epsilon_0 \quad (11)$$

1.3 屈服强度及抗拉强度的关联

对于连续球压痕试验来讲,每一个加载-部分卸载周期都能测量到总压入深度 h_t , 然后将其转化为总压痕直径 d_t 。根据球形压头的几何结构,两者之间的转换关系^[11]为

$$d_t = 2\sqrt{h_t D - h_t^2} \quad (12)$$

此外,可用 Meyer 定律来描述压痕测试曲线,对于球形压头,施加载荷与压痕投影直径之间的关系可以表示为

$$\frac{P}{d_t^2} = A \left(\frac{d_t}{D} \right)^{m-2} \quad (13)$$

其中: m 为 Meyer 指数。

当 $d_t/D \leq 1.0$, 压痕试验每个加载部分卸载周期所获得的 P 和 d_t 均满足式(13)的关系。通过前人试验得到的屈服强度与压痕参数 A 的数值关系,可知被测材料的连续球压痕屈服强度 σ_y 可以用式(14)^[2,12]来经验地表征

$$\sigma_y = \beta_m A \quad (14)$$

其中:测试材料的压痕参数 A 与屈服强度和应变硬

化相关,且表现为球形压头压入时被测材料的阻碍情况,可由式(13)求出,其单位与屈服强度单位一致;材料屈服系数 β_m 可通过令连续球压痕屈服强度 σ_y 与常规拉伸试验屈服强度 R_{eL} 相等后除以 A 获得。

在研究过程中,考虑针对不同工况状态下的屈服强度偏移参数 B ,式(14)的连续球压痕屈服强度经验公式又可修正^[13]为

$$\sigma_y = \beta_m A + B \quad (15)$$

采用连续球压痕试验法测试材料的屈服强度,可以不用通过轮廓曲线法或光学干涉法确定压痕凹坑周边材料堆积的情况(除非是要测试材料的残余应力)。所以,文献[2]所述的应力应变显微探针系统采用连续球压痕试验方法测试材料屈服强度更加简单、方便和快捷。

Haggag 等^[12-15]研究表明,连续球压痕试验可以根据经验估算抗拉强度。拉伸加载时材料达到抗拉强度,应变硬化指数 n 与真均匀应变是近似等价的,由此根据真应力与工程应力之间的转换关系,可知真应力-真塑性应变曲线符合幂强化律关系的材料,其抗拉强度 σ_u 为

$$\sigma_u = K \left(\frac{n}{e} \right)^n \quad (16)$$

式(16)是试验研究确定的经验公式,通过连续球压痕试验估算的抗拉强度 σ_u 值近似等于常规拉伸测试获得的材料抗拉强度 R_m 。

1.4 数据处理流程

整个连续球压痕的数据处理流程如图 1 所示。其中输入的 P, h_i, h_p 是通过压痕试验获得的压痕曲线读取, h_i, h_p 的计算方法如图 2 所示。计算真应力的时候,采用迭代法求解,程序多次循环以后可以求得真应力 σ_i 。

2 试验过程

2.1 试验材料与状态

选取压力容器常用低合金钢板与优质低碳钢板 15CrMoR, Q245R, Q345R 为研究对象,它们均系未服役新板。15CrMoR 钢板为较常用的压力容器耐热钢板,实测厚度为 20 mm; Q245R 钢板为压力容器用惟一优质碳素钢板,实测厚度为 18.5 mm;

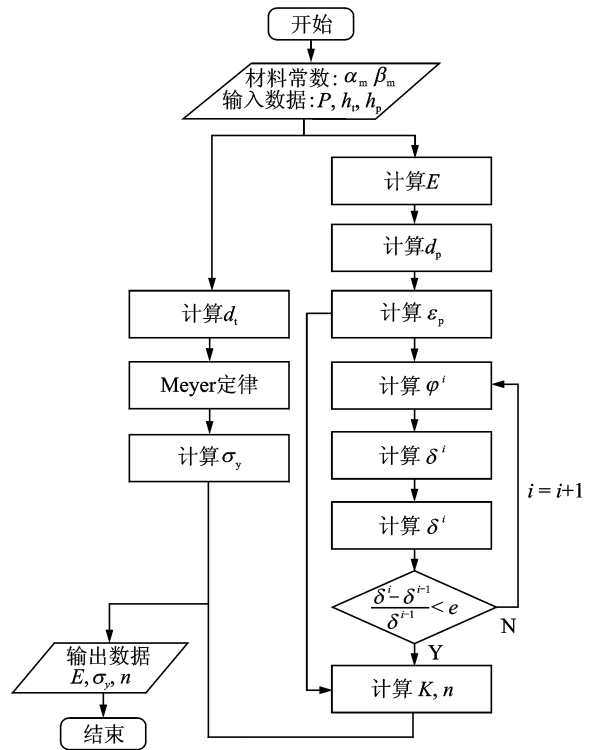


图 1 连续球压痕数据处理流程图

Fig. 1 Data processing flow chart of continuous ball indentation

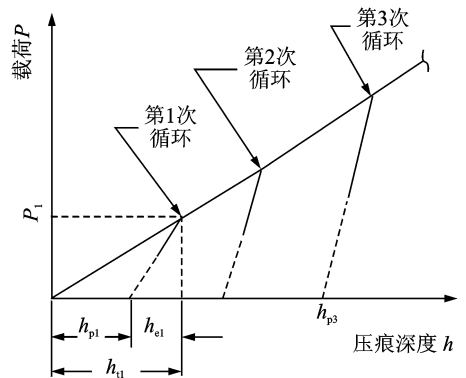


图 2 压痕深度示意图

Fig. 2 Schematic of indentation depth

Q345R 钢板为压力容器最常用低合金钢板,实测厚度为 14 mm。对三种钢板的化学成分进行了测试,测试仪器为德国 Bruker TASMANN Q4 型台式直读光谱仪。15CrMoR 钢板化学成分测试结果见表 1,表中同时列出 GB 713-2008《锅炉和压力容器用钢板》对 15CrMoR 钢板的化学成分要求。标准规定 Mo 含量为 0.45%~0.60%,虽然其中两次分析结果 Mo 含量略有不足,但根据 GB/T 222-2006《钢的成品化学成分允许偏差》规定 Mo 含量的上下偏差为 $\pm 0.02\%$,则符合标准要求。

Q245R 和 Q345R 钢板化学成分测试结果见表 2,表中同时也把 GB 713-2008《锅炉和压力容器

用钢板》对 Q245R 和 Q345R 的化学成分要求列入表中,通过对比,两种材料均符合标准要求。

表 1 15CrMoR 钢板的化学成分分析结果

Tab. 1 Chemical composition analysis results of 15CrMoR

元素含量	W_C	W_{Si}	W_{Mn}	W_P	W_S	W_{Cr}	W_{Mo}	W_{Ni}	W_{Cu}
第 1 次测含量	0.153	0.272	0.559	0.015	0.005	0.989	0.447	0.030	0.016
第 2 次测含量	0.159	0.277	0.553	0.015	0.005	1.005	0.455	0.032	0.017
第 3 次测含量	0.148	0.275	0.554	0.015	0.005	0.990	0.448	0.030	0.016
实测平均含量	0.153	0.275	0.555	0.015	0.005	0.995	0.450	0.031	0.016
GB713-2008 (15CrMoR)	0.12~0.18	0.15~0.40	0.40~0.70	≤0.025	≤0.01	0.80~1.20	0.45~0.60	≤0.30	≤0.30

表 2 Q245R 和 Q345R 钢板的化学成分分析结果

Tab. 2 Chemical composition analysis results of Q245R and Q345R

元素含量	W_C	W_{Si}	W_{Mn}	W_P	W_S	W_{Cr}	W_{Mo}	W_{Ni}	W_{Cu}
Q245R	0.148	0.191	0.556	0.018	0.010	0.020	<0.001	0.007	0.008
Q345R	0.167	0.313	1.472	0.021	0.004	0.021	0.001	0.008	0.023
GB713-2008(Q245R)	≤0.20	≤0.35	0.50~1.00	≤0.025	≤0.015	≤0.30	≤0.08	≤0.30	≤0.30
GB713-2008(Q345R)	≤0.20	≤0.55	1.20~1.60	≤0.025	≤0.015	≤0.30	≤0.08	≤0.30	≤0.30

此外,为了研究考察 15CrMoR 耐热钢超温后材料力学性能的变化情况,笔者对某公司两台编号为 R1401 和 R08-22 甲烷化炉制造商提供的同种全新未服役 15CrMoR 钢板进行超温工况模拟。超温工况模拟的依据为这两台甲烷化炉的超温操作记录,即图 3 和图 4 所示的超温模拟态 1 和超温模拟态 2。甲烷化炉正常工作温度 250 °C,设计温度 400 °C。试验测试分成原始交货态(D1)、超温模拟态 1(D2)和超温模拟态 2(D3),共 3 种状态。

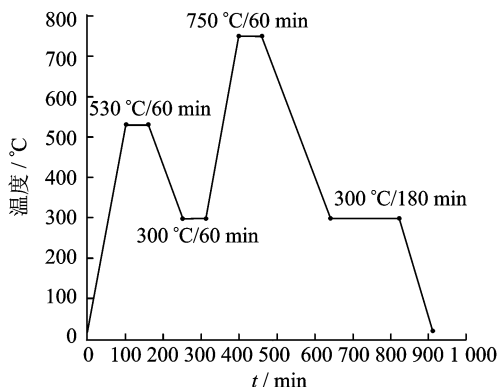


图 3 15CrMoR 钢板超温模拟态 1

Fig. 3 Over-temperature simulation state 1 of 15CrMoR steel

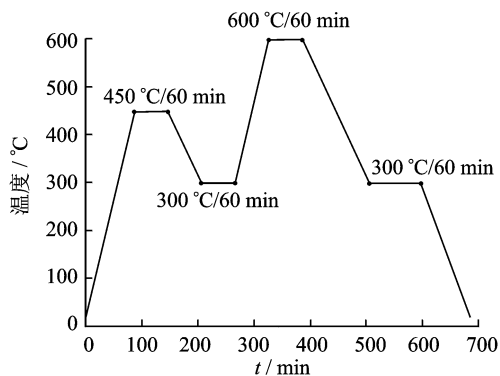


图 4 15CrMoR 钢板超温模拟态 2

Fig. 4 Over-temperature simulation state 2 of 15CrMoR steel

2975-1998《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》的要求,分别制备沿钢板轧制方向和垂直钢板轧制方向的两个拉伸试样;b. 利用 WDW-50 型微机控制电子万能试验机开展常规拉伸试验;c. 制备连续球压痕试样(依次以 320,400,600,800 目的碳化硅金相砂纸打磨试样上下表面),采用美国 Advanced Technology Corporation 生产的实验室用 SSM-B4000™ System 应力应变显微探针系统(见图 5)进行连续球压痕试验,每种试样测试 6 个点。

连续球压痕试验选用直径为 0.763 5 mm 的碳化钨硬质合金球形压头,以量程为 0~4 450 N、分辨率为 0.01% 的传感器测量载荷,位移测量则选用

2.2 试验步骤

整个试验过程主要分为 3 步:a. 根据 GB/T

量程为 0~1.016 mm、分辨率为 0.002 5% 的线性可变差动位移传感器。连续球压痕试验的环境温度控制在 25℃ 左右,当位移传感器接触到试样基准面时,压头行进速率保持 0.005 33 mm/s 左右缓慢向下运动。连续球压痕试验中加载与部分卸载的循环次数程序默认为 5~15 次,这里选取 8 次,每次部分卸载载荷设定为当前载荷值的 40%, 单次连续球压痕试验总计用时不到 2 min,测试的载荷-位移曲线如图 6 所示。

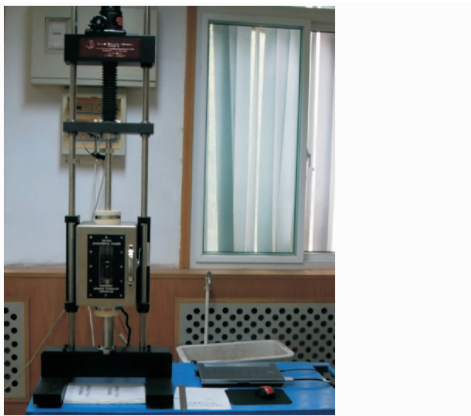


图 5 应力应变显微探针系统

Fig. 5 The stress-strain microprobe system

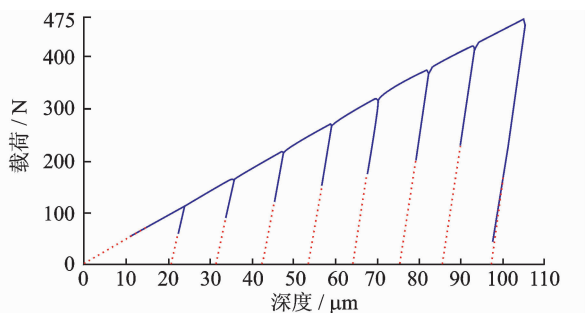


图 6 连续球压痕试验测试载荷-压痕深度曲线

Fig. 6 The load-indentation depth curve tested by continuous ball indentation

3 试验分析

3.1 真应力-真塑性应变曲线

为考察不同状态材料之间试验曲线的差异以及一种材料不同试验点之间的不同,利用 SSM-Suite™ 控制处理系统将同一状态材料同一试样或者不同状态材料各自试样上的不同试验点的曲线进行叠加,使得所选各试验曲线在同一叠加图中直观显示。图 7 为 15CrMoR 原始交货态、超温模拟态 1 及超温

模拟态 2 每种试样的两次(点)连续球压痕试验载荷-位移曲线叠加对比图。而原始交货态与超温模拟态 1 及超温模拟态 2 这 3 个状态的真应力-真塑性应变曲线对比见图 8 所示。

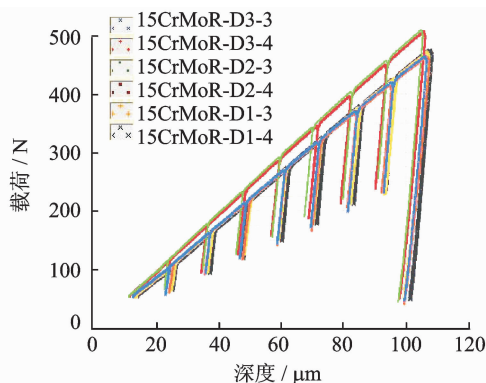


图 7 15CrMoR 载荷-位移曲线叠加对比图

Fig. 7 Comparison of load-displacement curves of 15CrMoR

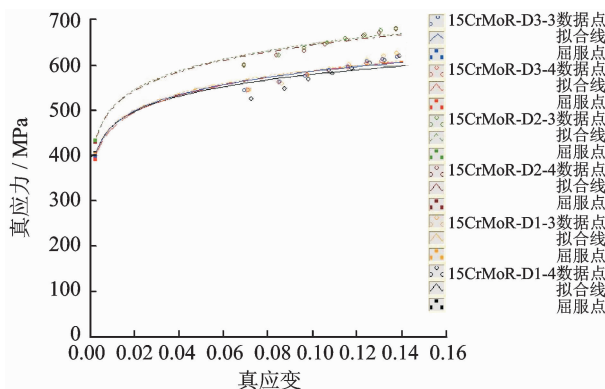


图 8 15CrMoR 真应力-真塑性应变曲线对比图

Fig. 8 Comparison of true stress-true plastic strain curve of 15CrMoR

从图 7 可以看到,超温模拟态 1 曲线明显独立位于最上方,超温模拟态 2 与原始交货态曲线的区分并不十分明显,超温模拟态 2 曲线位于最下方,反映出连续球压痕试验能够对不同状态材料显示出不同的特征曲线,以区别反映材料性能的变化。由图 8 可知,同一个状态材料同一试样上不同点连续球压痕试验测试的不同真应力-真塑性应变曲线的重合度较好,而不同状态材料的真应力-真塑性应变曲线能够很好区分,反映出连续球压痕试验测试不同材料真应力-真塑性应变曲线非常有效。

3.2 抗拉强度

连续球压痕试验估算的抗拉强度近似于常规拉伸试验测试的抗拉强度。通过比对连续球压痕试验

测试的抗拉强度 σ_u 值与常规拉伸试验测试的抗拉强度 R_m 值,说明能够可靠、准确地通过连续球压痕试验估算钢材的抗拉强度。

Q245R, Q345R 和 3 种状态的 15CrMoR 钢板,分别沿轧制方向和垂直轧制方向取样,并通过连续球压痕试验测试的抗拉强度 σ_u 值与常规拉伸试验测试的抗拉强度 R_m 的平均值比对结果,其值如表 3 所示,相对偏差小于 8%。以纵坐标表示常规拉伸试验测试的抗拉强度 R_m 值,以横坐标表示连续球压痕试验测试的抗拉强度 σ_u 值,将上述钢板两类试验的测试结果绘制在图 9 的 $R_m - \sigma_u$ 图上,图中黑实线表示抗拉强度 σ_u 值与抗拉强度 R_m 值相等,图中标出的每个点为同一材料同一状态同一方向的多次测试平均值,为此将每个点的抗拉强度最大值与最小值也一并标出。分析可知连续球压痕试验测试的抗拉强度 σ_u 值与常规拉伸试验测试的抗拉强度 R_m 值吻合均非常好,而且连续球压痕试验测试 σ_u 值的重复性很好。因此,用连续球压痕试验测试的抗拉强度 σ_u 值代替常规拉伸试验测试的抗拉强度 R_m 值是可行且可靠的。

表 3 两类试验测试钢板抗拉强度的平均值比对结果

Tab. 3 Comparison of average tensile strength of steel plates by two test methods

试验材料	取样方向	拉伸试验 抗拉强度/MPa	压痕试验 抗拉强度/MPa	相对 偏差/%
15CrMoR-D1	沿轧制向	568	534	-5.99
15CrMoR-D1	垂直轧制向	578	534	-7.61
15CrMoR-D2	沿轧制向	571	579	1.40
15CrMoR-D2	垂直轧制向	540	579	7.22
15CrMoR-D3	沿轧制向	515	528	2.52
15CrMoR-D3	垂直轧制向	538	528	-1.86
Q245R	沿轧制向	442	415	-6.11
Q245R	垂直轧制向	445	415	-6.74
Q345R	沿轧制向	563	522	-7.28
Q345R	垂直轧制向	557	522	-6.28

3.3 屈服强度

连续球压痕试验对真应力-真塑性应变曲线符合幂强化律方程的材料屈服强度的测试具有较高可靠度与准确性。笔者选取的试验材料 15CrMoR, Q245R, Q345R 等压力容器用钢,均不完全符合幂强化方程,尤其是 Q245R 和 Q345R 钢板有着非常显著的锯齿状屈服平台,使得连续球压痕试验与常规拉伸试验测试屈服强度值的关联性存在一定差

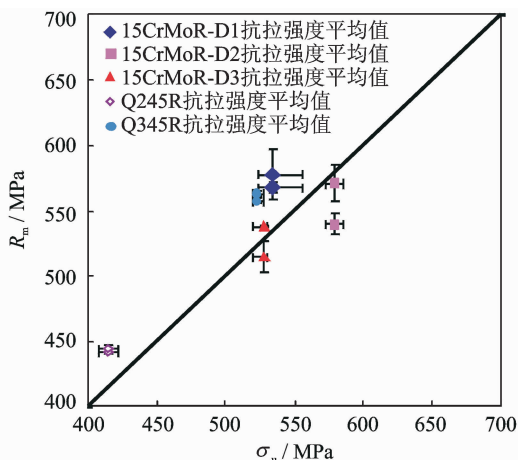


图 9 两类试验测试的抗拉强度对比图

Fig. 9 Comparison of tensile strength determined by two test method

距。通过试验比对分析可知,两种试验方法测试屈服强度存在相对偏差的主要原因有 3 个方面:a. 国产钢板材料组织及性能均匀性尚存在问题,导致材料微区间性能存在一定的差异;b. 常规拉伸试验与连续球压痕试验测试的数据自身存在一定的偏差,若将这两类试验方法测试的数据加以比对,将会使两者偏差进一步放大;c. 连续球压痕试验测试屈服强度时的屈服系数 β_m 和屈服强度偏移参数 B 的取值是一个非常重要的因素,若简单采用前人经过经验确定的,也是 SSM-Suite™ 控制处理系统默认的 ($\beta_m = 0.22$ 和 $B = 0$) 值,对于不同的材料必然带来误差,所以需要屈服系数 β_m 和屈服强度偏移参数 B 的取值进行适当调整。

因此,笔者以常规拉伸试验测试值为基准,针对具有非常明显屈服平台的 Q245R 和 Q345R 钢板,在式(15)的基础上,通过最小二乘法线性回归拟合(见图 10)得到连续球压痕试验测试屈服强度 σ_y 的修正关联式

$$\sigma_y = 0.234 9A - 71.012 6 \quad (17)$$

该拟合式的相关系数为 0.971 7,说明连续球压痕试验测试的压痕参数与材料的屈服强度之间有很高的相关性。可以采用式(17)来计算 Q245R, Q345R 钢的屈服强度。同理,以纵坐标表示常规拉伸试验测试的屈服强度 R_{eL} 值,以横坐标表示连续球压痕试验测试的屈服强度 σ_y 值,将两类试验对上述钢板的测试结果绘制在图 11 的 $R_{eL} - \sigma_y$ 图上,图中黑实线表示屈服强度 σ_y 值与屈服强度 R_{eL} 值相等,图中标出的每个点为同一材料同一状态同一方向取样的多次测试平均值,且每个点的屈服强度最

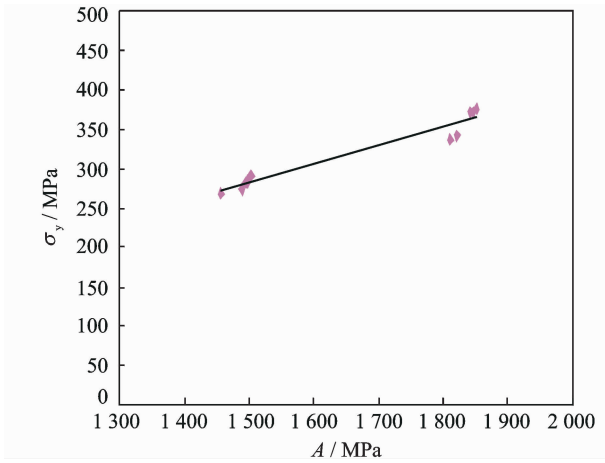


图 10 屈服强度与压痕参数 A 的关联图

Fig. 10 Correlation of yield strength with indentation parameter A

大值与最小值也一并标出。经过对连续球压痕试验屈服强度关联参数的修正后,分析可知两类试验测试的钢材屈服强度值吻合匹配程度比较好,而且连续球压痕试验测试屈服强度 σ_y 值的重复性很好。

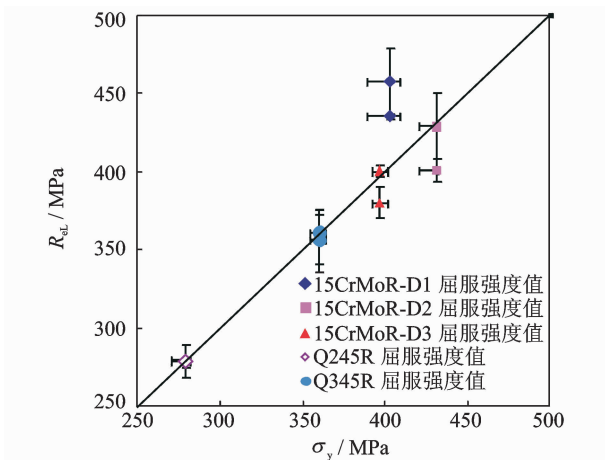


图 11 两类试验测试的屈服强度对比图

Fig. 11 Comparison of yield strength measured by two test methods

4 结 论

1) 连续球压痕试验能清晰区分不同状态下材料的真应力-真塑性应变曲线,以反映材料力学性能的差异。

2) 连续球压痕试验与常规拉伸试验测试的材料屈服强度值的关联吻合程度较好,通过屈服系数和屈服强度偏移参数的修正,关联精度得到很好的提高,其关联式为: $\sigma_y = 0.2349A - 71.0126$, 可以采用此计算 Q245R, Q345R 屈服强度;屈服平台不

明显的 15CrMoR 可以直接采用测试结果。

3) 连续球压痕试验与常规拉伸试验测试的抗拉强度也吻合得非常好。

通过两类试验结果的比对分析,表明连续球压痕试验可以代替常规试验测试压力容器用钢相关力学性能。

参 考 文 献

- [1] Haggag F M, Lucas G E. Determination of Lüders strains and flow properties in steels from hardness/microhardness tests [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1983, 14(8): 1607-1613.
- [2] Haggag F M. Field indentation microprobe for structural integrity evaluation; US, 4852397 [P]. 1989-08-01.
- [3] 汤杰. 自动球压痕试验测定结构钢及其应变时效后力学性能的研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [4] Tang Jie, Wang Weiqiang, Li Mengli, et al. The exploration of evaluation of strain aging embrittlement in metallic materials using indentation test [C]// Structural Integrity in Nuclear Engineering: Proceedings of 2011 International Symposium on Structural Integrity. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2011: 121-126.
- [5] Tang Jie, Wang Weiqiang, Li Mengli, et al. Research on the properties of 20G steel with strain aging embrittlement using indentation test [C]// From Failure to Better Design Manufacture and Construction; Proceedings of 2012 International Symposium on Structural Integrity. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2012: 183-188.
- [6] 汤杰, 王威强. 应力应变显微探针技术在管道安全与检测中的应用[C]// 第五届石油天然气管道安全国际会议暨第五届天然气管道技术研讨会论文集. 北京: 北京石油学会, 2012: 5-9.
- [7] Haggag F M, Nanstad, R K, Hutton, J T, et al. Use of automated ball indentation to measure flow properties and estimate fracture toughness in metallic materials [C]// Applications of Automation Technology to Fatigue and Fracture Testing. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1990: 188-208.
- [8] Tabor D. The hardness of metals [M]. Oxford: Clarendon Press, 1951: 1-9.
- [9] Francis H A. Phenomenological analysis of plastic spherical indentation[J]. Journal of Engineering Mate-

- rials and Technology, 1976, 98(3): 272-281.
- [10] Au P, Lucas G E, Sheckerd J W, et al. Flow property measurements from instrumented hardness tests[C]// Non-destructive Evaluation in the Nuclear Industry. Novelty: American Society for Metals, 1980: 597-610.
- [11] Haggag F M. In-situ measurements of mechanical properties using novel automated ball indentation system [C]// Small Specimen Test Techniques Applied to Nuclear Reactor Vessel Thermal Annealing and Plant Life Extension. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1993: 27-44.
- [12] Haggag F M, Murty K L. A novel stress-strain microprobe for nondestructive evaluation of mechanical properties of materials [C]// Nondestructive Evaluation and Materials Properties III. Boston: The Minerals, Metals & Materials Society, 1997: 101-106.
- [13] Haggag F M. Indentation technique provides pipeline integrity monitoring [J]. Oil & Gas Journal, 2006, 105(8):58-62.
- [14] Murty K L, Haggag F M. Characterization of strain-rate sensitivity of Sn-5% Sb solder using ABI testing [C] // Microstructures and Mechanical Properties of Aging Materials II. Boston: The Minerals, Metals & Materials Society, 1996: 37-44.
- [15] Venkateswarlu K, Das G, Pramanik A K, et al. Using ball-indentation to evaluate the properties of an ultrafine-grained Al-2% Si alloy processed by ECAP[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 427(1): 188-194.



第一作者简介:汤杰,男,1987年8月生,工程师。主要研究方向为承压设备安全保障与失效分析技术。曾发表《活塞式压缩机联轴器连接螺栓断裂原因分析》(《理化检验:物理分册》2012年第48卷第3期)等论文。

E-mail: tangjie667@163.com

通信作者简介:王威强,男,1959年8月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为承压设备安全保障与失效分析理论和技术。

E-mail: wqwang@sdu.edu.cn