

基于连续球压痕法的 45 钢强度与韧性测试研究

窦磊^{1,2}, 翟建明², 王晶¹, 孙永辉², 商学欣²

(1.北京工业大学 材料与制造学部,北京 100124;2.中国特种设备检测研究院,北京 100029)

摘要:为研究在役设备的材料强度与韧性测试评价问题,针对工程中常用材料 45 钢,采用连续球压痕方法,获取了材料的屈服强度、抗拉强度与断裂韧性,通过与常规力学性能试验结果比较,对该方法的可靠性进行了验证。通过研究球压头下压产生的塑性功,与冲击启裂能及断裂韧性之间的关联关系,建立基于仪器化球压痕测试技术的冲击韧性估算评估方法。试验结果表明,利用连续球压痕方法获取的屈服强度、抗拉强度与实际结果的偏差均小于 10%,断裂韧性值与试验结果的偏差为 12.3%,计算结果在试验值偏差数据范围内。利用连续球压痕技术,建立的断裂韧性与冲击韧性之间的关联公式,所预测的冲击韧性结果与仪器化冲击试验值具有较好的一致性,为在役设备材料的韧性快速评价提供了有效的测试方法。

关键词:45 钢;连续球压痕;力学性能;断裂韧性;冲击韧性

中图分类号:0346.4 **文献标识码:**A

Study on Strength and Toughness Testing of 45 Steel Based on Continuous Ball Indentation Method

DOU Lei^{1,2}, ZHAI Jianming², WANG Jing¹, SUN Yonghui², SHANG Xuexin²

(1. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. China Special Equipment Inspection & Research Institute, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to study the testing and evaluation of material strength and toughness of in-service equipment, the continuous ball indentation method is used to obtain the yield strength, tensile strength and fracture toughness of 45 steel, which is commonly used in engineering. The reliability of the method was verified by comparing the results with those of the conventional mechanical property test. By studying the relationship between the plastic work produced by the downward pressure of the ball head and the impact crack initiation energy and fracture toughness, the impact toughness estimation method based on instrumented ball indentation test technology is established. The results show that the deviations between the yield strength and tensile strength obtained by the continuous ball indentation method and the actual results are less than 10%, and the deviation between the fracture toughness value and the experimental result is 12.3%. The calculated results are all within the acceptable deviations of experimental values. Based on the correlation formula between fracture toughness and impact toughness established by continuous ball indentation technique, the predicted impact toughness results are in good agreement with the values from the instrumented impact test. This provides an effective method for rapid evaluation of toughness of in-service equipment materials.

Keywords: 45 steel; continuous ball indentation; mechanical property; fracture toughness; impact toughness

随着中国工业化程度不断提高,大量的在役设备面临性能精确检测及安全评估等技术挑战,

如何保证在役设备安全稳定运行一直是检验检测技术研究的热点。传统在役设备的性能检测

收稿日期:2022-07-27

基金项目:国家重点研发计划“科技冬奥”重点专项项目(2019YFF0302201)

作者简介:窦磊,男,1996 年生,硕士研究生,主要研究方向为工程断裂力学与失效分析。

通讯作者:翟建明,男,1985 年生,高级工程师,主要研究方向为材料疲劳断裂及环境氢脆、失效分析。E-mail:jmzhai@163.com

通过现场无损探伤^[1]或取样试验^[2-3]进行。无损探伤可以找出在役设备构件中的危险部位,探测出缺陷的宏观尺寸,但尚无法准确评价材料的力学性能。取样试验可以获得材料较为全面的性能参数,但该方法具有破坏性,对在役设备造成的损伤较大,特别是某些工况条件并不适合取样测试。随着检测技术的不断发展,研究学者开始寻求能够准确测量与表征在役设备力学性能的微损测试方法。连续球压痕法凭借其检测过程中无需取样的特性,可直接在工程现场对设备材料性能进行评价。

在利用连续球压痕法获取材料力学性能方面,国内外学者做了大量研究。通过该方法可以获取材料的拉伸性能^[4-6]以及断裂韧性^[7-8],并已经在工程应用中得到了验证。目前对于材料韧性的研究多集中于利用连续球压痕法获取断裂性能,材料冲击韧性的测试研究还较少。

本研究通过连续球压痕法对常用轴类材料 45 钢的拉伸性能及断裂韧性进行分析计算,通过与实际试验结果进行对比,验证了连续球压痕法的可靠性。随后根据能量守恒方法建立了材料断裂韧性与冲击韧性之间的对应关系,实现了利用连续球压痕方法对材料冲击韧性的计算,该方法为解决工程现场的在役设备材料冲击性能测试提供了新的途径。

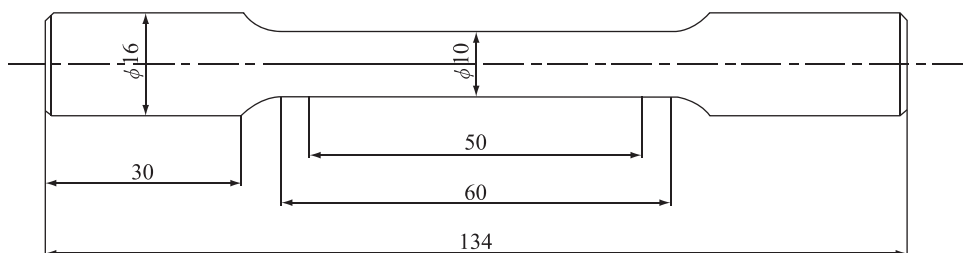
1 试验

1.1 试验设计

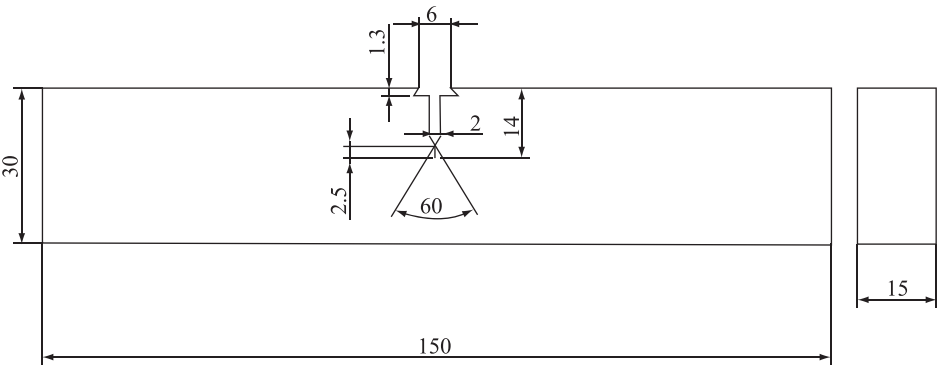
本试验研究对象为工程中常用材料 45 钢,

分别加工了拉伸试样、三点弯曲试样、夏比冲击试样及圆柱形硬度试样。其中拉伸试样用于获取材料的屈服强度、抗拉强度等性能参数,三点弯曲试样用于获取材料的断裂韧性,夏比冲击试样用于材料的仪器化冲击性能测试,圆柱形硬度试样用于开展材料的连续球压痕测试。拉伸试样与三点弯曲试样的取样及试样尺寸分别参考 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》^[9]和 GB/T 21143—2014《金属材料准静态断裂韧度的统一试验方法》^[10]执行。试样具体尺寸如图 1 所示。试验均在室温(25 ℃)条件下进行,对于拉伸试验屈服阶段之前加载速率为 0.9 mm/min,材料发生屈服后加载速率为 24.12 mm/min,所选用的设备型号为 AG-IC 材料万能试验机。试样两端被夹持之前需要设定力测量系统的零点,以避免力在测试过程中产生误差;对于断裂韧性试验,加载速率设定为 0.005 mm/s,设备选用 MTS landmark 材料疲劳试验机,为保证试样裂纹在扩展过程中足够尖锐,需要根据国标要求预制 1.3 mm 疲劳裂纹。在试验过程中利用引伸计与力传感器记录加载过程中裂纹尖端张口位移与所施加载荷的变化关系,即 $P-V$ 曲线。

45 钢主要化学成分见表 1,基本力学性能参数见表 2,试验方案见表 3。夏比冲击试样尺寸参考 GB/T 229—2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》^[11]执行,为 55 mm × 10 mm × 10 mm,并按照标准预制 2 mm 的 V 型缺口。连续球压痕试验选用直径 $\phi 40$ mm,高度 15 mm 的圆柱形硬度块。



(a) 拉伸试样



(b) 三点弯曲试样

图 1 试样尺寸 (mm)

Fig. 1 Specimen size (mm)

表 1 45 钢化学成分

Table 1 Chemical composition of 45 steel(<i>w</i>) %							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni
0.442	0.201	0.627	0.010	7 0.006	6 ≤0.25	≤0.25	≤0.35

表 2 45 钢力学性能

Table 2 Mechanical properties of 45 steel			
<i>R_m</i> /MPa	<i>R_{el}</i> /MPa	<i>E</i> /GPa	<i>A</i> /%
657	339	207	25.0

表 3 45 钢试件详情

Table 3 Specimen details of 45 steel		
试样类型	试样用途	数量/个
拉伸试样	拉伸试验	2
三点弯曲试样	断裂韧性试验	3
夏比冲击试样	仪器化冲击试验	30
圆柱型硬度块试样	连续球压痕试验	3

1.2 试验方法

目前利用连续球压痕法检测材料性能正获得广泛使用,本研究选用的试验仪器为韩国 FRONTICS 公司 AIS3000 仪器化压痕试验机。设备最大下压深度为 150 μm,最大载荷 1 kN,试验测试环境为室温(25 ℃)。

试验首先利用连续球压痕法进行材料拉伸性能、断裂性能测试,试样如图 2(a)所示。通过与实际拉伸、断裂性能数据进行对比,验证了连续球压痕法测试结果的准确性,随后基于连续球压痕法进行材料冲击韧性的模型推导并进行试验验证。

将拉伸试样两端磨平后进行连续球压痕试

验,随后在材料万能试验机上将试样拉断以获取其屈服强度、抗拉强度,最后对两种方法所获取的材料强度性能指标差异进行对比,试验完毕后的拉伸试样见图 2(b)。材料的断裂韧性测试利用连续球压痕法与断裂力学试验开展,其中断裂力学试验参考 GB/T 21143—2014^[10] 执行,试验完毕后的断裂韧性试样如图 2(c)所示。材料的仪器化冲击性能试验参考 GB/T 19748—2019《金属材料夏比 V 型缺口摆锤冲击试验仪器化试验方法》^[12] 执行,并结合连续球压痕数据,从能量角度进行冲击韧性的估算,冲击后的试样如图 2(d)所示。

1.3 试验原理

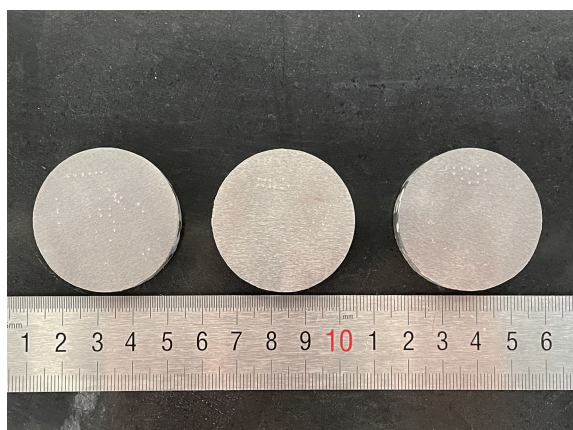
目前连续球压痕法已被广泛应用于材料拉伸性能的测定,该方法的原理是通过压痕试验获得的载荷-深度曲线转化为一系列表征应力-应变点,并基于 Holloman 方程^[13]获取真应力-真应变曲线。

$$\sigma_t = K \varepsilon_p^n \tag{1}$$

式中: σ_t 为表示材料真应力, K 为材料强度系数, ε_p 为材料真应变, n 为材料的加工硬化指数。

材料的屈服强度利用产生 0.2% 塑性应变对应的应力来表征。在材料拉伸失稳时真应变与材料加工硬化指数相等^[14],抗拉强度通过式(2)计算:

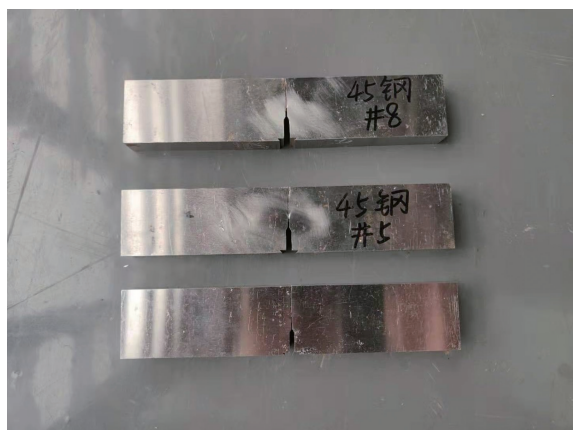
$$R_m = K \left(\frac{n}{e} \right)^n \tag{2}$$



(a) 连续球压痕



(b) 拉伸试样



(c) 三点弯曲试样



(d) 冲击试样

图 2 试验后试样

Fig. 2 Specimens after test

标准断裂韧性试验参考 GB/T 21143—2014^[10] 进行。试验所需试样需要达到一定厚度方能满足试验结果的有效性判定,但由于该试验用试样尺寸限制,因此其试验结果不满足有效性判定条件。当结果不满足 K_{IC} 有效性判定时,可采用英国 R/H/R6-ReV1《有缺陷结构完整性的评定》标准,进行非有效试样 K_{IC} 的确定。即利用改进的等效能量法确定 K_{IC} 估算值。其计算公式为:

$$K_{IC} = P_E \cdot \frac{C_3 \left(\frac{a}{W} \right)}{B \cdot \sqrt{W} \sqrt{\frac{U_m}{U_E}}} \quad (3)$$

式中: $C_3 \left(\frac{a}{W} \right) = 30.96 \left(\frac{a}{W} \right) - 195.8 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 730.6 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 1186.3 \left(\frac{a}{W} \right)^4 + 754.6 \left(\frac{a}{W} \right)^5$, U_m ,

UE 为最大载荷点 M 和线性段点 E 所对应的载荷位移曲线下的面积, PE 为线性段载荷, B 为试件厚度, W 为试件宽度, a 为最终裂纹长度。

利用连续球压痕试验进行断裂韧性估算与球形压头下压过程中消耗的能量建立对应关系,其计算模型^[15]见式(4)。

$$K_{JC} = \sqrt{\frac{J_{IC} \cdot E}{(1 - \nu^2)}} \quad (4)$$

式中: J_{IC} 表示裂纹扩展所需的能量,与压痕法测试的等效断裂能量密切相关。确定临界压痕点所具有的断裂能是计算 J_{IC} 的关键,假设当压头下压过程中的平均压力达到临界平均压力时,压头下的材料发生完全塑性变形,此时认为形成等效断裂能。其计算公式如下:

$$J_{IC} = 2r_c \sigma_R e_f \tag{5}$$

式中: r_c 为表示塑性区尺寸, e_f 为断裂应变, σ_R 为根据抗拉强度与屈服强度确定。

将 J_{IC} 计算模型代入式(4)可得到式(6),实现由连续球压痕法进行材料断裂韧性的估算。

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{2r_c \sigma_R e_f E}{(1 - \nu^2)}} \tag{6}$$

式中: E 为弹性模量, ν 为泊松比。

2 基于连续球压痕法的材料拉伸性能、断裂性能测试验证

2.1 拉伸试验结果验证

在拉伸试样夹持端进行连续球压痕性能测试,每个拉伸试样上取 3 个有效的压痕数据点,随后进行拉伸性能测试,两种方法所得到的屈服强度、抗拉强度试验结果见表 4。

表 4 拉伸试验结果验证

Table 4 Verification of tensile test results

试样编号	拉伸试验		连续球压痕试验			
	R_{el}/MPa	R_m/MPa	R_{el}/MPa	误差/%	R_m/MPa	误差/%
L1	339	657	357.8	5.5	644.4	1.9
			355.1	4.7	641.6	2.3
			363.1	7.1	651.4	0.9
L2	334	647	358.8	7.4	658.4	1.8
			356.9	6.8	648.7	0.3
			362.6	8.6	658.4	1.8

对 2 组试验结果进行比较,利用连续球压痕法与拉伸试验方法获取的 45 钢常温条件下的屈服强度偏差均小于 10%,抗拉强度偏差均小于 5%。试验结果表明通过连续球压痕试验来进行材料屈服强度、抗拉强度性能估算有较高准确性。

2.2 断裂韧性试验结果验证

在 45 钢 3 个不同硬度块上进行连续球压痕试验,试验曲线如图 3 所示。利用图 2 所示三点弯曲试样开展断裂韧性测试,每组 3 个平行试样,材料所加载荷与裂纹尖端张口位移曲线如图 4 所示。

利用图 4 中曲线进行分析计算得到材料的断裂韧性估算值 K_{IC} ,并与断裂韧性试验按非有效试样估算式(3)计算得到的断裂韧性值 K_{IC} 进行对比,结果见表 5。

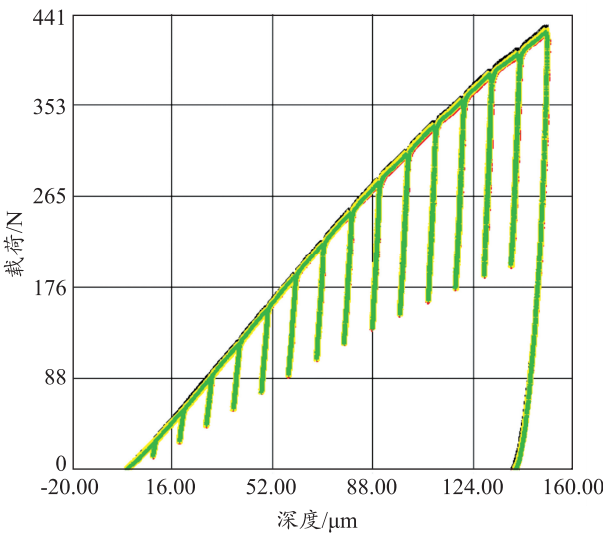


图 3 45 钢连续球压痕曲线

Fig. 3 Continuous ball indentation curve of 45 steel

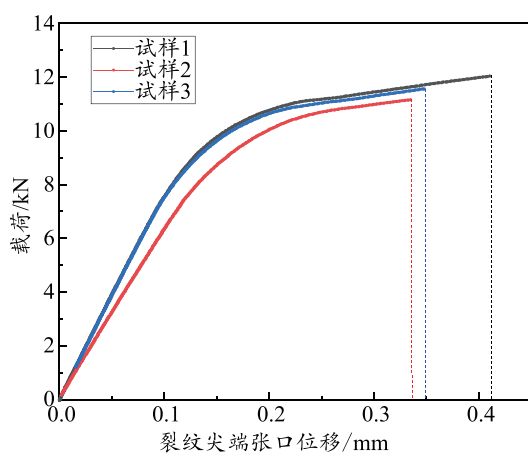
图4 断裂韧性试验 $P-V$ 曲线Fig. 4 $P-V$ of fracture toughness test

表5 连续球压痕与断裂韧性试验的结果对比

Table 5 Comparison of continuous ball indentation and fracture toughness test results

试样编号	断裂韧性试验		连续球压痕试验	
	断裂韧性 $K_{IC}/$ ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	平均值	断裂韧性 $K_{JC}/$ ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	平均值
D1	76.1		49.6	
D2	59.1	67.7	64.9	59.4
D3	68.0		63.8	

对比表5可知,连续球压痕法测试得到的断裂韧性平均值与实际断裂韧性试验平均值的偏差为12.3%。在断裂韧性测试试验中,同组试样测试结果 $59.1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 与 $76.1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 之间偏差可达25.1%。因此,利用连续球压痕试验方法测得的断裂韧性结果与三点弯曲测试得到的断裂

韧性结果相比,具有一致性,证明了利用连续球压痕法进行断裂韧性估算的可行性。

3 基于连续球压痕的冲击韧性估算

由于仪器化压痕设备体积小、便于携带,便于开展在役设备的现场检测。利用连续球压痕方法,已大量开展了对材料屈服强度、抗拉强度及断裂韧性的估算,文中基于连续球压痕法的拉伸性能与断裂性能测试的验证,证明了方法的可靠性。冲击韧性作为一种表征材料韧性的关键性能指标,对评价在役设备抗冲击能力具有重要的意义。目前基于连续球压痕方法进行冲击性能测试评价的研究较少,本研究基于该方法开展了对冲击韧性的估算研究。拟通过能量守恒原理,建立材料冲击韧性、断裂韧性及连续球压痕性能数据之间的关联关系,最终得到针对在役设备材料的冲击韧性估算方法。

3.1 冲击能量关联

在室温条件下,对45钢进行了30次仪器化冲击试验,其典型的仪器化冲击曲线如图5(a)所示。根据GB/T 19748—2019《金属材料夏比V型缺口摆锤冲击试验仪器化试验方法》^[12]将仪器化冲击曲线中到达屈服力 F_{qy} 之前所消耗的能量定义为 W_{qy} ,当材料开始进入塑性变形阶段逐渐开裂所吸收的能量为冲击断裂能 W_{cp} 。根据仪器化冲击试验结果进行了 W_{cp} 与总吸收能量 W_t 的对应关系拟合见图5(b)。

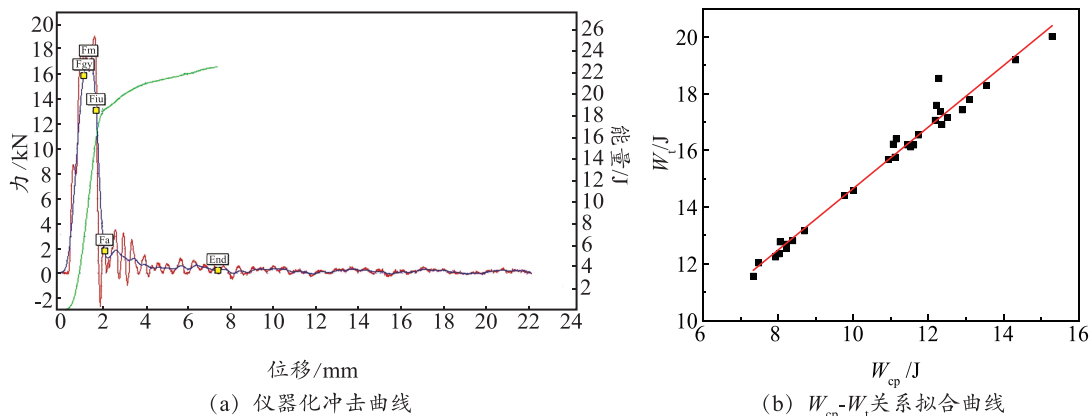


图5 冲击能量关联

Fig. 5 The correlation of impact energy

冲击启裂能 W_{cp} 与总吸收能量 W_t 的关联表达式为

$$W_t = 1.084W_{cp} + 3.815 \quad (7)$$

3.2 冲击韧性与断裂韧性关系换算

进行冲击韧性与断裂韧性的关系换算,旨在以断裂韧性作为中间参量,通过能量释放率的变换实现连续球压痕能量与冲击能量之间的关系换算。断裂力学中能量释放率 G 为表征断裂韧性的等效参量,根据一般计算公式可将断裂韧性 K_{IC} 转化成能量释放率 G 。

$$G = \frac{(1 - \nu^2)}{E} K_{IC}^2 \quad (8)$$

式中: E 为被测材料的弹性模量, $E = 207$ GPa; ν 为被测材料的泊松比, $\nu = 0.3$ 。

能量释放率 G 的国际单位为 N/m,是指势能随着裂纹面积的变化,因此又被称为裂纹驱动力或裂纹扩展力。在断裂韧性与连续球压痕试验中塑性功作为影响试验结果的主要因素,可将塑性功与能量释放率建立联系。定义单位面积压痕塑性功 W_{lp}^* 与能量释放率 G 关联参数为 α ,则 α 为:

$$\alpha = \frac{G}{W_{lp}^*} \quad (9)$$

将 3 次常规断裂韧性试验的平均值代入关联式,得到 $\alpha = 0.147$ 。由于连续球压痕试验使用的球压头直径 $d = 0.5$ mm,下压深度 $h = 150$ μ m,因此下压接触面积 $S_1 = 2\pi Rh = 2.355 \times 10^{-7}$ m²。单位面积压痕塑性功 W_{lp}^* 计算表达式为:

$$W_{lp}^* = \frac{W_{lp}}{S_1} \quad (10)$$

在夏比冲击试验中,材料的冲击韧性可由下式计算得到:

$$a_k = \frac{W_t}{S_c} \quad (11)$$

式中 W_t 表示冲击吸收能, S_c 为冲击试样断口截面积,本研究中 $S_c = 0.8$ cm²。将式(7)代入式(11)中得到冲击韧性 a_k 与冲击断裂能 W_{cp} 的关联表达式:

$$a_k = \frac{1.084W_{cp} + 3.815}{S_c} \quad (12)$$

建立基于连续球压痕法的断裂韧性数据与基于冲击试验的冲击韧性数据的关联式,其关键在于建立压痕塑性功 W_{lp} 与冲击断裂能 W_{cp} 的关系,通过试验得到两者的数据关联系数 $\beta = 2.729 \times 10^{-3}$,即 $W_{lp} = \beta \cdot W_{cp}$ 。

由于仪器化压痕试验所得断裂韧性值与常规试验值存在一定偏差,因此引入修正系数:

$$\Delta = \frac{K_{IC}}{K_{JC}} \quad (13)$$

式中 K_{IC} 为常规断裂韧性试验值, K_{JC} 为连续球压痕试验估算值,根据表 5 中试验结果,得到修正系数 $\Delta = 1.139$ 。将以上各式代入式(8)后得到 45 钢冲击韧性与断裂韧性的关联表达式:

$$a_k = \frac{1.084(1 - \nu^2)\Delta^2 K_{JC}^2 S_1 + 3.815\alpha\beta E}{\alpha\beta E S_c} \quad (14)$$

利用 45 钢硬度块进行了连续球压痕试验,每组试验开展 3 次,将其带入式(14)中得到了冲击韧性的估算值,并与仪器化冲击试验结果进行对比,以验证估算公式的准确性。由于冲击试验数据具有一定的波动性,根据试验结果给出数据波动范围的最小值与最大值,即试验上、下限值。两种试验方法所得冲击韧性对比结果见表 6。

表 6 关联公式验证

Table 6 Verification of correlation formula

试验 编号	断裂韧性 $K_{JC}/$ (MPa · m ^{1/2})	冲击韧性 $a_k/(J \cdot cm^{-2})$		仪器化冲击试验 值 $a_k/(J \cdot cm^{-2})$	
				试验 下限值	试验 上限值
		计算值	平均值		
Y1	66.6	24.7			
Y2	56.3	19.0	22.2	16.8	25.1
Y3	63.3	22.8			

由表 6 可知,通过式(14)估算得到的材料冲击韧性,其结果在仪器化冲击试验值的范围内,证明了利用连续球压痕法进行冲击韧性估算的准确性,未来还将开展连续球压痕方法对冲击韧性快速测试估算方法的可靠性验证。利用该方法可开展在役设备冲击性能的现场检测,为设备安全评估提供数据支持。

4 结论

(1) 研究证明了利用连续球压痕法进行材料屈服强度、抗拉强度、断裂韧性的可靠性。通过与实际拉伸、断裂试验数据进行对比,利用连续球压痕法估算得到的屈服强度、抗拉强度值偏差在 10% 以内,断裂韧性估算值与试验值偏差为 12.3%,证明了基于连续球压痕方法对材料强度、断裂性能进行快速测试的准确性。

(2) 基于能量换算开展了连续球压痕法测试材料冲击韧性的方法研究,建立了材料冲击韧性、断裂韧性与连续球压痕参数之间的关联公式。利用该公式估算得到的冲击韧性值与仪器化冲击试验值的偏差较小,可以较准确的测试材料的冲击韧性,该方法为在役设备材料韧性的现场快速检测提供了有效的技术支撑。

参考文献:

- [1] 王军. 无损探伤技术在钢结构检测中的应用[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(7): 138-139.
- [2] JEON J Y, KIM Y J, LEE M Y, et al. Fracture toughness prediction of aged CF8M using small punch test[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2015, 38(12): 1456-1465.
- [3] 耿卫民. 焊接接头的微型剪切试验[J]. 焊接技术, 2017, 46(6): 21-23.
- [4] 孙明成, 张超群, 韩德斌, 等. 球形压痕表征应力应变法测金属材料的力学性能[J]. 机械工程材料, 2017, 41(9): 106-110.
- [5] PATIL D C, DAS M, DAS G, et al. Evaluating the mechanical properties of HPT processed aluminium alloys using automated ball-indentation technique [J]. Procedia Materials Science, 2014, 5: 379-386.
- [6] 汤杰, 王威强, 苏成功, 等. 连续球压痕法测试压力容器钢力学性能的研究[J]. 振动测试与诊断, 2015, 35(2): 281-288.
- [7] 张国新, 王威强, 王尚. Q345R 钢板断裂韧度的自动球压痕试验测算研究[J]. 机电一体化, 2017, 23(6): 23-29.
- [8] 魏中坤, 伍声宝, 关凯书. 球压痕法评价 16MnR 钢的断裂韧性[J]. 机械工程材料, 2016, 40(1): 32-34.
- [9] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 准静态断裂韧度的统一试验方法: GB/T 21143—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [11] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属材料夏比摆锤冲击试验方法: GB/T 229—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [12] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料 夏比 V 型缺口摆锤冲击试验 仪器化试验方法: GB/T 19748—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [13] HAGGAG F M. Field indentation microprobe for structural integrity evaluation: US4852397[P]. 1989-08-01.
- [14] 伍声宝, 徐彤, 喻灿, 等. 采用球压痕法测 16MnR 钢的拉伸性能[J]. 机械工程材料, 2015, 39(1): 82-85.
- [15] ZHANG T R, WANG S, WANG W Q. A comparative study on fracture toughness calculation models in spherical indentation tests (SITs) for ductile metals [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 160: 114-128.