

基于小冲杆试验的工业纯钛断裂韧性研究

郝龙 代巧 李俊

(江苏理工学院 机械工程学院, 常州 213001)

摘要:【目的】针对在役钛制设备无法提供足够材料进行常规断裂试验这一问题,基于小冲杆试验建立由微小试样获取材料断裂韧性的方法,为在役设备的材料性能评估提供参考。【方法】首先,对工业纯钛 TA2 进行断裂韧性试验,获取其断裂韧性;然后,进行小冲杆试验,通过试样断口、载荷-位移曲线、能量等方面的分析,研究小冲杆试样的缺口长度对断裂过程的影响;最后,基于由小冲杆试验结果得到能量差的方法获取 TA2 的断裂韧性。【结果】结果表明,随着缺口长度的增加,小冲杆试样所能承受的最大载荷减小,载荷最大时的位移增大,试验过程中消耗的能量增加。试样的失效形式与缺口长度有关,无缺口试样和缺口长度为 4.5 mm 的试样的失效形式为周向断裂失效;缺口长度为 5、5.5 mm 的试样的失效形式为沿缺口方向裂纹扩展断裂失效;缺口长度为 6 mm 的试样的失效形式为缺口整体变形失效。当采用小冲杆试验评估材料断裂性能时,若侧开缺口试样的失效形式为沿缺口方向裂纹扩展断裂失效,通过不同缺口长度的试样在试验过程中消耗的能量差,便能有效评估材料的断裂性能。

关键词: 工业纯钛 TA2; 小冲杆试验; 缺口试样; 失效形式; 断裂韧性

中图分类号: TH114; TH142.3 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.07.011

0 引言

钛材料具有韧性好、耐腐蚀、密度低等材料属性,广泛应用于汽车、化工、发电、海水淡化等领域^[1],是制造承压设备的理想材料。由于承压设备工作强度高、服役时间长,恶劣的工况会导致设备内部缺陷聚集或形成裂纹,直至发生宏观断裂,从而使设备提前损坏或发生突发性的损坏,造成严重的人员伤亡和重大的经济损失^[2]。因此,通过研究材料的断裂特性,预防承压设备的突然断裂失效,保证设备安全运行,具有重要的工程价值。

断裂韧性作为材料断裂特性的重要参数,能够表征材料阻止裂纹扩展的能力。断裂韧性值的定义通常为能量释放率、应力强度因子、裂纹尖端张开位移(Crack Tip Opening Displacement, CTOD)和 J 积分等描述裂纹尖端力学状态的断裂参量达到裂纹非稳定扩展的初值。GB/T 21143^[3]、ASTM E1820^[4]、ISO 12135^[5]等标准制定了金属材料在承受准静态加载时断裂韧性测定的试验方法。采用紧凑拉伸(Compact Tension, CT)试样、3点弯曲试样,通过疲劳的方法预制裂纹,在缓慢增加位移量的条件下进行试验,利用引伸计连续测量裂纹张开位移随载荷的变化,以测定材料的断裂韧性值。试验测定结果受试样类型^[6-7]、试

样尺寸^[8-10]、加载条件^[11-13]等因素的影响。为获得非尺寸敏感的测量值,需要使裂纹前缘附近处于平面应变状态^[3],这对试样尺寸提出了较高要求。对于在役设备,若取下满足标准试样尺寸要求的材料进行试验,难以保证设备的完整性^[14],故通过微小试样测定材料的断裂性能成为了研究热点。

小冲杆试验法利用微小试样获取材料的力学性能,可以近乎无损地对在役设备进行取样测试和安全评定^[15]。目前,缺口试样法已成为利用小冲杆试验法研究材料断裂韧性的主流方法^[16-17],其中,采用侧开缺口试样最为适合^[18]。Alegre 等^[19]、Cuesta 等^[20]、Lai 等^[21]、Zu 等^[22]、宋明等^[23]、魏之杰^[24]主要采用方形和圆形 2 种侧开口试样,考虑不同缺口尺寸,将小冲杆试验的结果与断裂参量进行关联,如表 1 所示。表 1 中, J_{IC} 为不同标准中的断裂韧性值。针对不同的工程材料,采用缺口尺寸为试样尺寸的 50% 左右的试样,通过裂纹尖端张开位移评定、能量释放率评定、有限元仿真等方法,结合理论分析,能够有效评估材料的断裂性能。然而,不同材料适用的缺口尺寸不同,即使对相同材料采用不同的研究方法,所需的缺口尺寸也有所不同。因此,对于钛材料,在仅采用小冲杆试验的情况下,确定合适的缺口尺寸,从而建立合适的断裂韧性评估方法,是值得研究的课题。

收稿日期: 2024-12-30 修回日期: 2025-01-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52075050); 江苏理工学院研究生实践创新计划项目(XSJXC23_07)

作者简介: 郝龙,男,2000年生,河南开封人,硕士研究生;主要研究方向为机械构件机械强度评定、可靠性分析;E-mail:2398542221@qq.com。

代巧(通信作者),女,1986年生,四川资中人,博士,副教授;主要研究方向为机械结构优化设计与强度评定、可靠性分析与寿命预测;E-mail:daiqiao@126.com。

引用格式: 郝龙,代巧,李俊. 基于小冲杆试验的工业纯钛断裂韧性研究[J]. 机械强度, 2026, 48(7):94-101.

Hao Long, Dai Qiao, Li Jun. Study on fracture toughness of commercially pure titanium based on small punch test[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(7):94-101.



免费获取

本文基于小冲杆试验对工业纯钛 TA2 的断裂韧性进行研究。首先,对 CT 试样进行断裂韧性试验,获取 TA2 的断裂韧性;其次,对缺口长度不同的多个小冲杆试样进行试验,结合试样断口形貌、载荷-位移曲线、试验消耗能量,分析缺口长度对试样失效形式和

断裂过程的影响;最后,选出适合的试样缺口长度范围,通过计算能量差,获得 TA2 的断裂韧性,并与断裂韧性试验的结果进行对比。该研究为利用微小试样研究材料的断裂韧性提供了方法,满足在役设备的机械强度评定需求。

表 1 含缺口小冲杆试样的断裂性能

Tab. 1 Fracture properties of notched small punch specimens

试样类型	研究者	缺口长度/mm	缺口尺寸占试样尺寸的百分比范围/%	研究方法	材料	断裂参量
方形试样 (边长 10 mm、 厚 0.5 mm)	Alegre 等 ^{[19]104-112}	4.5、5、5.5	45~55	CTOD 评定、能量释放率评定、 有限元仿真	15.5PH 钢	CTOD、J 积分
	Cuesta 等 ^{[20]1-8}	5、5.4	50~54	能量释放率评定	5083 铝合金	J 积分
圆形试样 (直径 10 mm、 厚 0.5 mm)	Lai 等 ^{[21]109059}	4.6、4.8、5.0	46~50	有限元仿真	P91 钢	J_{IC}
	Zu 等 ^{[22]109525}	4、5	40~50	能量释放率评定、有限元仿真	X80 钢	J_{IC}
	宋明等 ^{[23]83-92}	6	60	有限元仿真	X80 钢	J 积分
	魏之杰 ^{[24]29-42}	5、5.3	50~53	CTOD 评定、能量释放率评定	X65 钢	J 积分

1 试验

试验材料使用工业纯钛 TA2,取自厚 18 mm 的热轧钛板,其化学成分如表 2 所示,TA2 的力学性能参数如表 3 所示^{[25]191}。

表 2 工业纯钛 TA2 的化学成分

Tab. 2 Chemical composition of the commercially pure titanium TA2

元素	Fe	C	N	H	O	Ti
含量/%	0.3	0.08	0.04	0.01	0.17	>99

表 3 工业纯钛 TA2 的力学性能参数

Tab. 3 Mechanical property parameters of the commercially pure titanium TA2

弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	屈服强度 R_y/MPa	抗拉强度 R_m/MPa
110 691	0.33	484	560

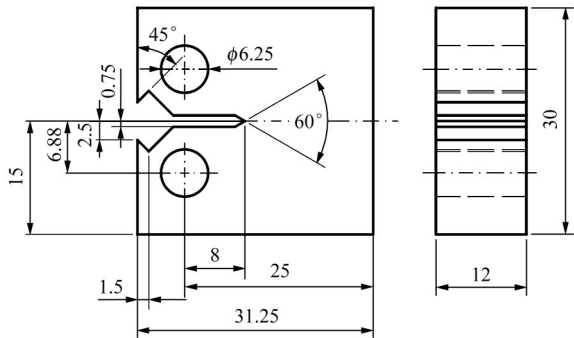
1.1 断裂韧性试验

采用 CT 试样,根据标准 GB/T 21143^{[3]1-92},对 TA2 进行断裂韧性测试,试样尺寸如图 1(a)所示。试样通过线切割获得,裂纹扩展方向与钛板轧制方向一致,使用砂纸对试样表面进行打磨并抛光,使试样表面粗糙度达到标准要求。

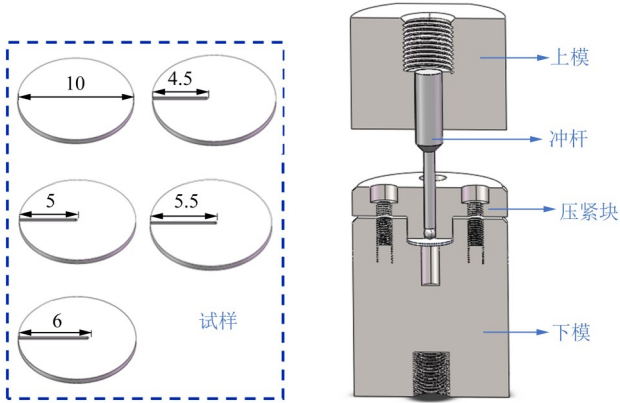
断裂韧性测定试验使用型号为 HDT105B 的电液伺服疲劳试验机,在室温条件下进行。首先,对 CT 试样预制疲劳裂纹,设置初始裂纹长度 a_0 为 15.5 mm,采用降 K 法 (K -decreasing Method) 预制 7.5 mm 长的疲劳裂纹,预制结束时的最大应力强度因子 $K_{\max}$ 为 $17 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,加载频率为 10 Hz。其次,对 CT 试样进行断裂韧性测定试验:采用单试样法,借助卸载柔度技术,对试样进行“加载-卸载-再加载”过程,选定 0.02 mm、0.04 mm 这 2 组位移间隔对试样进行部分卸载再加载,30 次卸载后停止试验。试验过程中记录载荷、加载线位移,并通过柔度法测量裂纹扩展的长度。

1.2 小冲杆试验

根据标准 GB/T 29459.1^[26]进行 TA2 的小冲杆试验。采用直径为 10 mm、厚 0.5 mm 的圆形试样,为了获取其断裂韧性,考虑侧开口缺口试样,使其裂纹扩展方式与 CT 试样保持一致^{[21]109059}。为了与断裂能相关联,考虑采用缺口尺寸不同的多个试样,以获取裂纹萌生能量,缺口长度 l 分别为 4.5、5、5.5、6 mm,缺口宽度均为 0.3 mm,如图 1(b)所示。试样通过线切割获得,缺口方向与钛板轧制方向一致。使用砂纸对加工的试样进行打磨,使试样表面粗糙度达到试验标准。



(a) 紧凑拉伸试样



(b) 小冲杆试样

(c) 夹具模型

图 1 TA2 试样及夹具模型

Fig. 1 TA2 specimens and fixture models

小冲杆试验采用型号为 UTM5105 的微机控制电子万能试验机,在室温条件下进行试验。夹具装置由上模、下模、冲杆、压紧块组成,并配有引伸计、钢珠等部件,如图 1(c)所示。试验过程中,通过压紧块和下模将试样压紧,试验机通过位移控制冲杆,推动钢珠对试样缓慢下压,位移加载速度为 0.2 mm/min,钢珠直径为 2.5 mm。试验过程中记录载荷、位移,对每种缺口长度的试样均进行 3 组试验,以保证试验数据的可靠性。

2 结果与讨论

2.1 断裂韧性试验结果

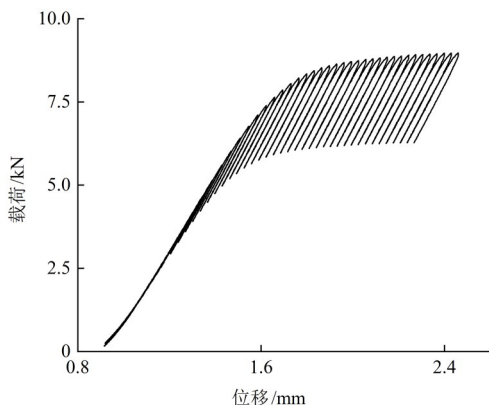
由断裂韧性测定试验获得 CT 试样加、卸载过程中的加载力 P 和加载线位移,并得到载荷-位移曲线,如图 2(a)所示。将由柔度法获得的裂纹长度 a 减去初始裂纹长度 a_0 ,得到裂纹长度增量 Δa ,通过式(1)、式(2)计算每个裂纹长度增量 Δa 对应的 J 积分值,即

$$J = \frac{1-\nu^2}{E} \left[\frac{P}{(BB_N W)^{0.5}} g_2 \left(\frac{a_0}{W} \right) \right]^2 + \frac{\eta_p U_p}{B_N (W - a_0)} \left[1 - \frac{(0.75\eta_p - 1)\Delta a}{W - a_0} \right] \quad (1)$$

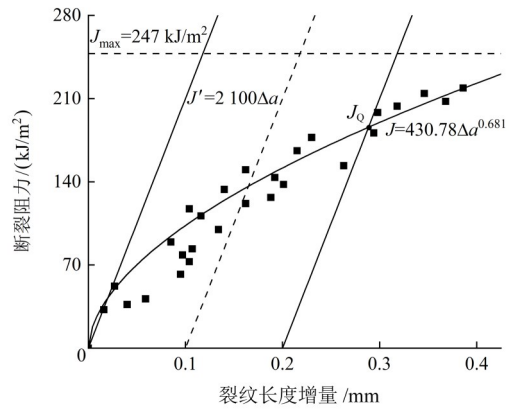
$$\eta_p = 2 + 0.522(1 - a_0/W) \quad (2)$$

式中, J 为断裂阻力; P 为加载力,由试验获得; B 为未开侧槽的试样的厚度; B_N 为 GB/T 21143^[31-92] 中规定的开侧槽的试样的厚度, $B_N = B$; W 为试样宽度; a_0 为试样的初始裂纹长度,可通过测量试样获得; $g_2(\frac{a_0}{W})$ 为尺寸参数,可通过查阅试验标准获得; U_p 为试样发生塑性变形需要的能量,可通过计算试样的载荷-位移曲线与横轴围成的面积获得。

测出每个断裂韧性试样裂纹长度增量 Δa 与对应的 J 积分的值,由 $J_{\max} = (W - a_0)(R_m + R_y)/40$ 、试样尺寸、TA2 的抗拉强度和屈服强度,获得 $J_{\max} = 247 \text{ kJ/m}^2$,确定断裂阻力 J 的上边界线。由 $J' = 3.75R_m \Delta a$ 和 TA2 的抗拉强度,确定钝化线 $J' = 2100\Delta a$ 。过 $\Delta a = 0.1 \text{ mm}$ 作钝化线的偏置线,确定有效裂纹扩展量的左



(a) 载荷-位移曲线



(b) J - R 阻力曲线

图 2 TA2 断裂韧性试验结果

Fig. 2 Results of the TA2 fracture toughness test

边界线,通过拟合边界线右侧的数据,得到 TA2 的 J - R 阻力曲线 $J = 430.78\Delta a^{0.681}$ 。过 $\Delta a = 0.2 \text{ mm}$ 作钝化线的偏置线,设 J_0 为钝化线的偏置线与 J - R 阻力曲线的交点的纵坐标的值,如图 2(b)所示。通过断裂韧性测定试验,获得的 TA2 的 J_0 值(断裂韧性)为 182.68 kJ/m^2 。

2.2 小冲杆试验结果

通过小冲杆试验获得了失效试样,也得到了试验过程的载荷-位移曲线,本节对试验结果进行分析。首先,根据断裂力学理论,分析试样的失效形式,通过观察试样的断口形貌,对缺口长度不同的试样的失效形式进行分类;其次,结合试样的失效形式,对缺口长度不同的各试样的载荷-位移曲线进行分析;最后,通过研究试验消耗能量的规律,讨论不同缺口长度的各试样的断裂行为。经上述分析,确定适用于缺口型小冲杆试样断裂韧性研究的最优缺口长度。

2.2.1 小冲杆试样失效形式分析

由小冲杆试验获得的 TA2 无缺口试样的断口形貌,如图 3(a)所示;含缺口试样的断口形貌,如图 3(b)~图 3(e)所示,由图 3(a)可知,无缺口试样的裂纹出现在试样与钢珠接触边缘的圆周上,这是因为在加载过程中,当试样与钢珠完全接触后,试样在接触边缘位置处有最大应力,该位置处的试样厚度随着载荷的增大逐渐减小^[27];当塑性变形量达到一定程度时,材料内部的孔洞聚集到一起,在试样与钢球接触边缘位置产生裂纹,随后裂纹扩展,最终发生韧性材料小冲杆试样典型的周向断裂。因此,TA2 小冲杆无缺口试样的失效形式为完全周向断裂。

由图 3(b)~3(e)可知,不同缺口长度的 TA2 试样呈现不同的失效形式。当缺口长度 $l = 4.5 \text{ mm}$ 时,在缺口根部、试样与钢珠接触边缘圆周上均出现了裂纹,呈现出缺口根部裂纹向周向断裂延伸的状态;由于缺口尺寸较小,缺口根部未超过试样中心,加载过程中,缺口根部的集中应力和钢珠接触边缘处的最大

应力相叠加,在缺口根部靠近接触边缘位置处萌生裂纹,随后沿最大应力圆周方向扩展。因此,缺口根部的应力集中对裂纹萌生产生了影响。然而,试样失效形式仍以周向断裂为主,如图 3(b)所示。当缺口长度 l 分别为 5、5.5 mm 时,裂纹出现在缺口根部,且沿缺口圆周呈现多裂纹状态;由于缺口根部超过了试样中心,

加载过程中缺口的应力集中程度较 $l = 4.5$ mm 时高,导致裂纹在缺口根部萌生;试样失效形式为沿缺口方向裂纹扩展,无周向断裂,如图 3(c)、图 3(d)所示。当缺口长度 $l = 6$ mm 时,试样缺口根部几乎没有裂纹,缺口向两边张开,钢珠几乎能够穿过试样,该试样的失效形式为缺口整体变形失效^{[22]109525},如图 3(e)所示。

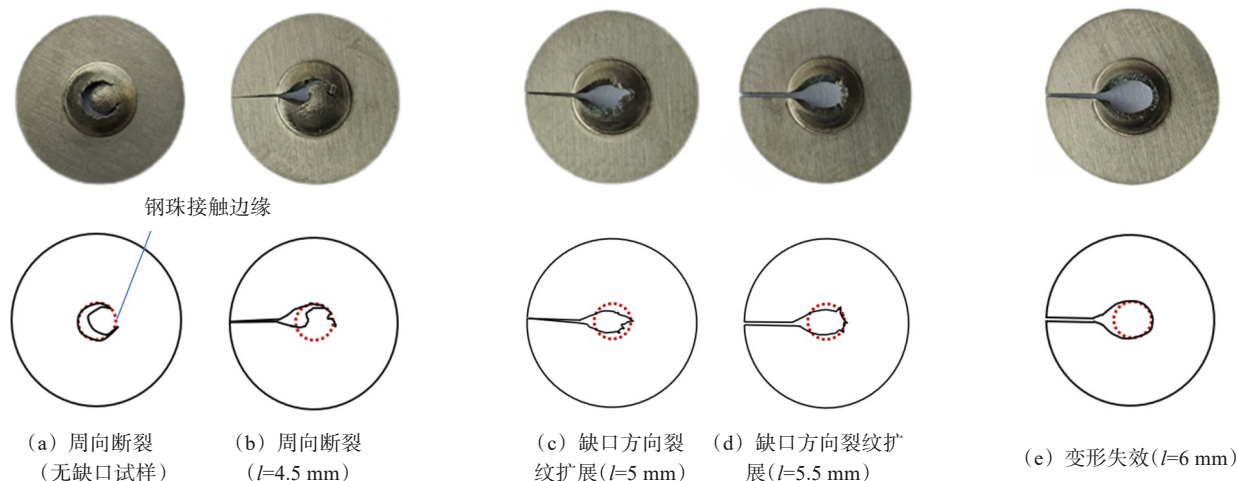


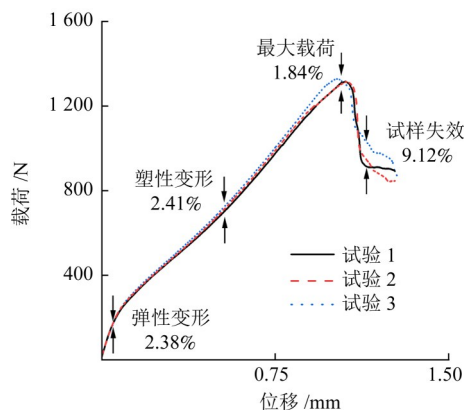
图 3 TA2 小冲杆试样断口形貌

Fig. 3 Fracture morphology of TA2 small punch specimens

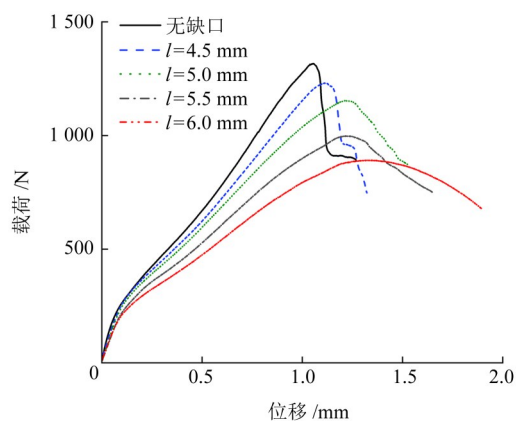
由此可见,TA2 含缺口试样的失效形式与缺口长度相关,仅当缺口长度为 5 mm 和 5.5 mm 时,试样的失效形式表现为沿缺口方向裂纹扩展。同时,由图 3(c)、图 3(d)可知,两试样在缺口圆周呈现出多裂纹状态,区别在于 $l = 5$ mm 的试样有一条较长的主裂纹。

2.2.2 载荷-位移曲线

由 TA2 小冲杆试验获得的无缺口试样及不同缺口尺寸试样的载荷-位移曲线如图 4 所示。为表明试验过程的可靠性,对缺口尺寸相同的试样进行 3 组重复性试验,无缺口试样的 3 组试验结果如图 4(a)所示。由图 4(a)可知,3 组试验的结果基本一致:在弹性变形、塑性变形、最大载荷 $F_{\max}$ 处,3 组试验结果的相对误差均在 3% 以内,最大相对误差为塑性变形的 2.41%;仅在最后失效时有 9.12% 的相对误差。



(a) 无缺口试样



(b) 不同缺口尺寸的试样

图 4 TA2 小冲杆试验的载荷-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of the TA2 small punch test

图 4(b)所示为 TA2 不同缺口长度试样的载荷-位移曲线。由图 4(b)可知,在弹性变形阶段,各试样的载荷-位移曲线基本重合;进入塑性变形阶段后,各试样的载荷-位移曲线开始分离,无缺口试样位于最上方,载荷-位移曲线随着缺口长度的增加而下移,缺口长度为 6 mm 试样的载荷-位移曲线位于最下方。因此,无缺口试样的载荷-位移曲线的载荷峰值最大,其余试样的载荷峰值随缺口长度的增加而减小,小冲杆试样的承载能力随缺口长度的增加而减小。另外,由于缺口的存在,由缺口根部的应力集中造成了较大变形,试样整体变形量随着缺口长度的增加而增大,因此,各试样载荷最大时的位移随缺口长度的增加而增大。图 5 所示为最大载荷、载荷最大时的位移与缺口

长度的关系。由图5可知,缺口长度为5、5.5 mm 试样的载荷最大时的位移基本相同,表明这2种试样在试验过程中整体变形量基本一致。在达到最大载荷之后,试样进入失效阶段。不同缺口长度的试样的载荷-位移曲线特征不同。结合小冲杆试样的失效分析结果发现,当试样的失效形式一致时,其载荷-位移曲线在失效阶段的形状更为接近。

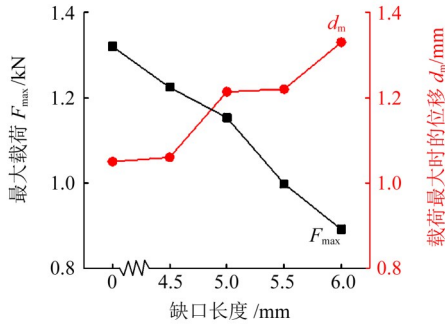


图5 最大载荷、载荷最大时的位移与缺口长度的关系

Fig. 5 Relations between notch length and maximum load, displacement at maximum load

由第2.2.1节的分析可知,无缺口试样和缺口长度为4.5 mm 的试样的失效形式均为周向断裂,其载荷-位移曲线在失效阶段均呈现快速下降的特征。缺口长度为5、5.5 mm 的试样的失效形式均为沿缺口方向裂纹扩展断裂,其载荷-位移曲线在失效阶段的下降速度较慢,相较于周向断裂这一失效形式,该失效形式下,缺口方向的裂纹扩展速度更为缓慢。缺口长度为6 mm 的试样的失效形式为变形失效,试样缺口两边因变形而张开,试样的变形速度相较于由裂纹造成失效的试样更为缓慢,载荷-位移曲线在失效阶段的下降速度最慢。

综上所述,TA2含缺口试样的载荷-位移曲线特征与缺口长度相关,最大载荷随缺口长度的增加而减小,载荷最大时的位移随缺口长度的增加而增大。缺口长度越大,试样的承载能力越小,变形越大。其中,缺口长度为5、5.5 mm 试样的载荷最大时的位移基本相同,表明两者的变形能力基本一致。

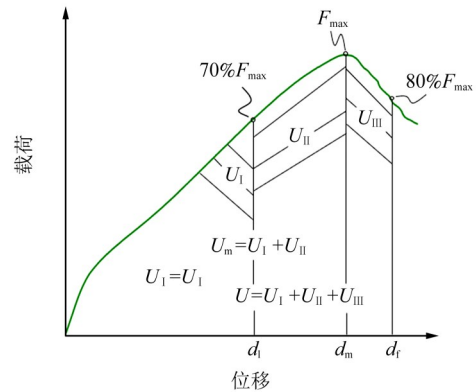
2.2.3 能量分析

由第2.2.1节的分析可知,当缺口长度小于6 mm 时,TA2小冲杆试样的失效形式均为韧性断裂,断裂过程包括裂纹萌生、裂纹扩展这2个阶段。工程上一般认为加载至最大载荷时萌生裂纹,Cuesta等^{[20]5}通过中断试验对含缺口小冲杆试样进行观察,发现当外加载荷上升到 $F_{\max}$ 的70%时,试样萌生裂纹。裂纹萌生后,进入裂纹扩展阶段,当载荷由最大值 $F_{\max}$ 下降到 $F_{\max}$ 的80%时,试样失效^{[25]192-193}。断裂过程中的能量消耗与材料的抗断裂性能密切相关,载荷-位移曲线与横轴围

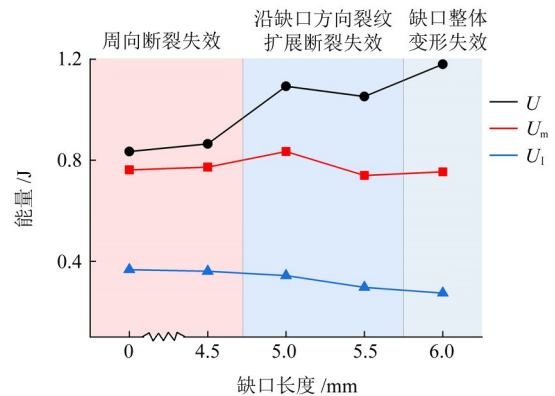
成的面积代表试样在试验过程中消耗的总能量 $U^{[25]195}$,其计算式为

$$U = \int_0^{d_f} F(d) dd \quad (3)$$

式中, d 为加载位移; $F(d)$ 为对应的载荷; d_f 为试样失效时的位移。如图6(a)所示,当载荷增至 $F_{\max}$ 的70%时,位移值为 d_1 ,将此时消耗能量记为 U_1 ;当外加载荷达到 $F_{\max}$ 时,位移值为 d_m ,将此时消耗能量记为 U_m ;当外加载荷降至 $F_{\max}$ 的80%时,试样失效,此时位移值为 d_f ,将此时消耗能量记为 U 。



(a) 能量分段图



(b) 能量规律图

图6 TA2小冲杆试样的断裂能量

Fig. 6 Fracture energy of the TA2 small punch specimen

由图4(b)中各缺口试样的载荷-位移曲线,根据式(3)计算出对应的能量值,如图6(b)所示。由图6(b)可知,小冲杆试样在试验过程中消耗的能量与缺口长度及其失效形式相关,无缺口试样和缺口长度为4.5 mm 的试样发生周向断裂失效,消耗的总能量最低;缺口长度为5、5.5 mm 的试样发生沿缺口方向裂纹扩展的断裂失效,消耗的总能量高于周向断裂失效;缺口长度为6 mm 的试样发生缺口变形失效,其消耗的总能量最高。由于受缺口应力集中的影响,70% $F_{\max}$ 处的 U_1 随着缺口长度的增加而减小。各试样在载荷最大时对应的能量基本相当,仅缺口长度为5 mm 的试样的 U_m 略高一些。同时发现,缺口长度为

5.5 mm 的试样的 U 、 U_1 、 U_m 均小于缺口长度为 5 mm 的试样。

2.3 基于小冲杆试验获取 TA2 的断裂韧性

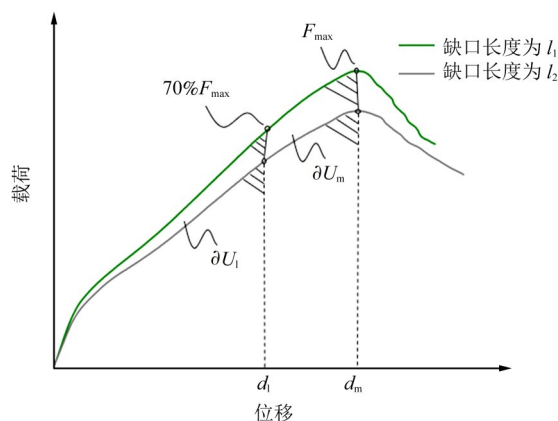
能量释放率 G 可用于衡量裂纹扩展所需要的能量大小,定义为由裂纹扩展产生单位面积的新表面所需的断裂能,表征裂纹扩展的驱动力。而对于弹塑性材料,产生单位面积的新表面所需的断裂能不仅包含裂纹表面能,还包含材料发生塑性变形所需的能量,此时,采用 J 积分来表征裂纹扩展的驱动力更为有效,其能够与裂纹尺寸相近的试样所吸收的能量差进行关联^{[20]3}。Begley 等^[28]对标准断裂试样进行 J 积分测量时,采用一系列几何尺寸相同、材料相同而裂纹长度不同的试样,获取它们的载荷-位移曲线,其与横轴围成的面积为试样吸收的能量 U' 。当试样萌生裂纹且裂纹从长度 l_1 扩展到 l_2 时, J 积分的值^{[19]109}为

$$J = -\frac{1}{t} \left(\frac{\partial U'}{\partial l} \right) = -\frac{1}{t} \left(\frac{U_2 - U_1}{l_2 - l_1} \right) \quad (4)$$

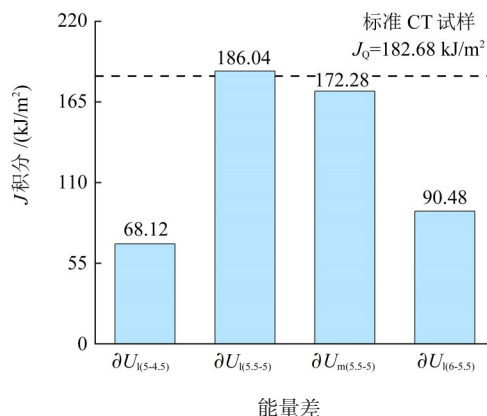
式中, t 为试样厚度; U_1 和 U_2 分别为裂纹长度为 l_1 、 l_2 时试样的能量。若采用接近断裂时的能量计算 J 积分的值,将获得材料的断裂韧性。

Cuesta 等^{[20]7}采用上述方法,利用含缺口小冲杆试样获取材料的断裂韧性,即通过缺口长度不同的试样的载荷-位移曲线获取能量差,从而计算断裂韧性。由于存在 $70\%F_{\max}$ 和 $F_{\max}$ 这 2 种裂纹萌生点的说法,采用 2 处的能量值分别进行计算,如图 7(a)所示。图 7(a)中, ∂U_1 为 2 个试样在 $70\%F_{\max}$ 点处的能量差, ∂U_m 为 2 个试样在 $F_{\max}$ 点处的能量差。根据图 6(b)中不同缺口尺寸的试样的能量值,采用式(4)进行计算,获得 TA2 的断裂韧性值,如图 7(b)所示。将 $70\%F_{\max}$ 点处的能量差标记为 $\partial U_{l(l_2-l_1)}$,将 $F_{\max}$ 点处的能量差标记为 $\partial U_{m(l_2-l_1)}$ 。其中, $\partial U_{m(5-4.5)}$ 、 $\partial U_{m(6-5.5)}$ 为负值,违背由试验确定的 J 积分的值为裂纹扩展能量这一概念,不能用于计算。

采用缺口长度为 5.5 mm 的试样,通过计算能量差,获得断裂韧性值,其中, $70\%F_{\max}$ 处的断裂韧性值为 186.04 kJ/m^2 , $F_{\max}$ 处的断裂韧性值为 172.28 kJ/m^2 ,均接近由 CT 试样获得的 J_0 值 (182.68 kJ/m^2),相对误差分别为 1.84% 、 5.69% 。因此,基于缺口长度为 5.5 mm 的试样在 $70\%F_{\max}$ 和 $F_{\max}$ 这 2 处的能量差,均能够获取 TA2 的断裂韧性,其中, $70\%F_{\max}$ 点处的结果更接近 CT 试样的结果。然而,缺口长度为 4.5 mm 的组合及缺口长度为 5.5、6 mm 的组合的结果均不理想:首先, $F_{\max}$ 处的能量不能用于计算;其次, $70\%F_{\max}$ 处的结果分别为 68.12 、 90.48 kJ/m^2 ,与由 CT 试样获得的 J_0 值相差甚远。



(a) 不同缺口长度试样的能量差 ($l_2 > l_1$)



(b) 含缺口小冲杆试样的断裂韧性结果与 CT 试样的结果对比

图 7 由小冲杆试验获取的 TA2 的断裂韧性

Fig. 7 Fracture toughness of TA2 obtained by small punch tests

由第 2.2.3 节的分析可知,TA2 小冲杆试样消耗的能量与失效形式相关,失效形式则由试样缺口长度决定。由第 2.2.1 节的试样失效分析可知,TA2 含缺口小冲杆试样中,缺口长度为 4.5 mm 试样的失效形式为周向断裂失效,缺口长度为 5.5 mm 试样的失效形式为沿缺口方向裂纹扩展断裂失效,缺口长度为 6 mm 试样无裂纹扩展,失效形式为缺口变形失效。而上述试样中,仅有缺口长度为 5.5 mm 试样组合的能量差能够用于 TA2 断裂韧性的评估,这与文献^{[19]104-112}、文献^{[21]109059}、文献^{[24]29-42}中的研究结果一致,当侧开缺口尺寸为试样尺寸的 50% 左右时,试样发生沿缺口方向的裂纹扩展,其试验结果能够用于材料断裂性能的评估。因此,当采用小冲杆试验评估材料的断裂性能时,若侧开缺口试样的失效形式为沿缺口方向裂纹扩展,通过缺口长度不同的试样在试验过程中消耗的能量差,便能有效评估材料的断裂性能。

3 结论

对工业纯钛 TA2 进行断裂韧性试验和小冲杆试验,利用试样断口对小冲杆试样的失效形式进行表征,通过试样的载荷-位移曲线、能量等方面研究小冲杆试样缺口长度 l 对断裂过程的影响,并通过计算试验能量

差获取 TA2 的断裂韧性,得出以下主要结论。

1)TA2 小冲杆试样的断口结果表明,不同缺口长度的试样的失效形式不同:无缺口试样和缺口长度为 4.5 mm 试样的失效形式为周向断裂失效;缺口长度为 5.5 mm 试样的失效形式为沿缺口方向裂纹扩展断裂失效;缺口长度为 6 mm 试样的失效形式为缺口整体变形失效。

2)TA2 小冲杆试样的载荷-位移曲线结果表明,随着缺口长度的增加,试样所能承受的最大载荷减小,载荷最大时的位移增大;试验过程中消耗的能量与缺口长度及试样的失效形式有关,无缺口试样和缺口长度为 4.5 mm 试样消耗的总能量最低;缺口长度为 5.5 mm 试样消耗的总能量高于失效形式为周向断裂失效的试样的总能量;缺口长度为 6 mm 试样消耗的总能量最高。

3)当采用小冲杆试验评估材料的断裂性能时,若侧开缺口试样的失效形式为沿缺口方向裂纹扩展断裂失效,通过不同缺口长度的试样在试验过程中消耗的能量差,便能有效评估材料的断裂性能。

参考文献(References)

- [1] 包骐乐,代巧,邱睿. 基于 DIC 的工业纯钛缺口疲劳裂纹萌生及扩展表征[J]. 机械强度,2024,46(5):1258-1264.
Bao Qile, Dai Qiao, Qiu Rui. Characterization of notch fatigue crack initiation and propagation of industrial pure titanium based on DIC[J]. Journal of Mechanical Strength, 2024, 46(5): 1258-1264. (In Chinese)
- [2] 陈明亚,向文欣,祁爽,等. 基于塑性极限载荷的奥氏体不锈钢圆承压管道役致裂纹接受标准研究[J]. 机械强度,2023,45(2):469-473.
Chen Mingya, Xiang Wenxin, Qi Shuang, et al. Study on acceptance criteria of service induced cracks for austenitic stainless steel piping based on plastic limit load criteria [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(2): 469-473. (In Chinese)
- [3] GB/T 21143—2014 金属材料 准静态断裂韧度的统一试验方法[S].
GB/T 21143—2014 Metallic materials: unified method of test for determination of quasistatic fracture toughness[S]. (In Chinese)
- [4] ASTM E1820-23b Standard test method for measurement of fracture toughness[S].
- [5] ISO 12135: 2016 Metallic materials: unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness[S].
- [6] 范永琦. 三点弯曲与紧凑拉伸试样动态断裂研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学,2018:49-53.
Fan Yongqi. Dynamic fracture study of three-point bending and compact tensile specimen [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018: 49-53. (In Chinese)
- [7] 李庆华,种法澄,张麒,等. 改进的圆形紧凑拉伸法研究混凝土双 G 断裂参数[J]. 水利学报,2018,49(4):474-482.
Li Qinghua, Chong Facheng, Zhang Qi, et al. Study of double-G fracture parameters using modified round compact tension method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(4): 474-482. (In Chinese)
- [8] Jeon J Y, Kim Y J, Lee S Y, et al. Extracting ductile fracture toughness from small punch test data using numerical modeling[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2016, 139: 204-219.
- [9] Zhang S, An D C, Zhang X L, et al. Research on size effect of fracture toughness of sandstone using the center-cracked circular disc samples [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 251: 107777.
- [10] Zhang M, Zhao L, Guan J F, et al. Fracture model of meso-ceramics based on relative size and prediction of fracture toughness and bending strength [J]. Ceramics International, 2023, 49(22): 35135-35144.
- [11] 邹广平,吴松阳,闫安石,等. 基于 CT 试样的动态断裂韧性尺寸影响因素试验研究[J]. 机械强度,2023,45(6):1326-1331.
Zou Guangping, Wu Songyang, Yan Anshi, et al. Experimental study on influence factors of dynamic fracture toughness size based on CT sample [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(6): 1326-1331. (In Chinese)
- [12] 吴海利,孙林根. 新型转子钢 FW2 高温断裂韧性实验研究[J]. 机械强度,2022,44(1):232-238.
Wu Haili, Sun Lingen. Experimental research of fracture toughness on new rotor steel FW2 at elevated temperature [J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(1): 232-238. (In Chinese)
- [13] 王宇航,曹辉,开晓鹏,等. 偏置加载下八重桁架点阵结构的断裂行为[J]. 复合材料学报,2025,42(11):6264-6273.
Wang Yuhang, Cao Hui, Qi Xiaopeng, et al. Fracture behavior of octet-truss lattice structures under offset loading [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(11): 6264-6273. (In Chinese)
- [14] 单应强,钟继如,王琼琦,等. 基于模拟退火粒子群算法与小冲杆试验确定材料塑性性能的方法[J]. 华东理工大学学报(自然科学版),2024,50(1):153-160.
Shan Yingqiang, Zhong Jiru, Wang Qiongqi, et al. Method of determining the plastic properties of materials based on simulated annealing particle swarm optimization and small punch test [J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2024, 50(1): 153-160. (In Chinese)
- [15] 和雅洁,陈灵芝,阮章顺,等. 小冲杆技术及其在材料与铅铋脆化效应研究中的应用[J]. 中国腐蚀与防护学报,2024,44(3):567-575.
He Yajie, Chen Lingzhi, Ruan Zhangshun, et al. Progress of small punch test technique and its application in detecting embrittlement effect of molten lead-bismuth on metallic materials [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2024, 44(3): 567-575. (In Chinese)
- [16] He X D, Yang Y B, Chen Y F, et al. Microstructure and toughness of heat-affected zone in girth welding of X80 steel pipe with different Nb content [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(3): 75-81.
- [17] 曹宇光,伍志明,司伟山,等. 基于小冲杆试验的 X80 管道钢断裂韧性研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2020,44(5):131-138.

- Cao Yuguang, Wu Zhiming, Si Weishan, et al. Study on fracture toughness of X80 pipeline steel based on small punch test [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020, 44(5): 131-138. (In Chinese)
- [18] Ding H R, Peng J, Wang Y Q, et al. Exploring stress states of notched small punch test specimens with different notch types [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2024, 132: 104482.
- [19] Alegre J M, Cuesta I I, Barbachano H L. Determination of the fracture properties of metallic materials using pre-cracked small punch tests [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2015, 38(1): 104-112.
- [20] Cuesta I I, Alegre J M. Influence of biaxial pre-deformation on fracture properties using pre-notched small punch specimens [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 131: 1-8.
- [21] Lai H S, Jiang X W. Determination of fracture toughness through small punch test of notched-tube specimen [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 279: 109059.
- [22] Zu Y Z, Cao Y G, Zhen Y, et al. Determination on the fracture toughness of the welded joints of X80 pipeline steels based on small punch test [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 291: 109525.
- [23] 宋明, 祖毅真, 马帅, 等. 贯穿型缺口小冲杆试样确定高钢级管线钢断裂韧度的研究 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(12): 83-92.
- Song Ming, Zu Yizhen, Ma Shuai, et al. Determination of fracture toughness of high-grade pipeline steel based on through-thickness-notched specimen by small punch test [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(12): 83-92. (In Chinese)
- [24] 魏之杰. X65/Incoloy825 双金属管焊接接头的断裂性能研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018: 29-42.
- Wei Zhijie. Study on fracture properties of bimetallic pipe welded joints of X65/Incoloy825 [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018: 29-42. (In Chinese)
- [25] 郭成, 代巧, 彭剑, 等. 基于小冲孔试验的工业纯钛塑性强化与损伤效应研究 [J]. 塑性工程学报, 2024, 31(8): 189-198.
- Guo Cheng, Dai Qiao, Peng Jian, et al. Study on plastic strengthening and damage effects of commercial pure titanium based on small punching test [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31(8): 189-198. (In Chinese)
- [26] GB/T 29459. 1—2025 在役承压设备金属材料小冲杆试验方法第 1 部分: 总则 [S].
- GB/T 29459. 1—2025 Small punch test methods of metallic materials for in-service pressure equipments: Part 1: general requirements [S]. (In Chinese)
- [27] Zhao L, Song K, Xu L Y, et al. Determination of creep properties of an advanced Fe-Cr-Ni alloy using small punch creep test with a modified creep strain model [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, 104: 102324.
- [28] Begley J A, Landes J D. The J integral as a fracture criterion [C]// Corten H T. Fracture toughness: proceedings of the 1971 national symposium on fracture mechanics: Part II. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1972: 1-23.

Study on fracture toughness of commercially pure titanium based on small punch test

HAO Long DAI Qiao LI Jun

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

Abstract: [Objective] Conventional fracture tests require a large amount of test material, which is difficult to obtain from in-service titanium equipment. To address this issue, a method for determining material fracture toughness using miniature specimens was established based on the small punch test, providing a reference for material performance evaluation of in-service equipment. [Methods] Firstly, standard fracture toughness tests were carried out on commercially pure titanium TA2 to acquire its fracture toughness. Secondly, small punch tests were performed. The effects of notch length on the fracture process of small punch specimens were investigated by analyzing fracture morphologies, load-displacement curves and absorbed energy. Finally, the fracture toughness of TA2 was determined via an energy difference method derived from small punch test data. [Results] The results show that as notch length increases, the maximum load borne by small punch specimens decreases, the displacement at maximum load rises, and the energy consumed during testing increases. In addition, the failure mode is dependent on notch length. Specimens without notches and those with a 4.5 mm notch fail via circumferential fracture, specimens with 5 mm and 5.5 mm notches experience crack propagation fracture along the notch direction, while specimens with a 6 mm notch undergo overall notch deformation failure. When evaluating material fracture properties using small punch tests, if side-notched specimens fail by crack propagation along the notch, the fracture performance of the material can be reliably characterized using the energy difference obtained from specimens with different notch lengths.

Key words: Commercial pure titanium TA2; Small punch test; Notched specimen; Failure mode; Fracture toughness

Corresponding author: DAI Qiao, E-mail: daiqiao@126.com

Fund: General Program of the National Natural Science Foundation of China (52075050); Postgraduate Practice Innovation Program of Jiangsu University of Technology (XSJCX23_07)

Received: 2024-12-30 Revised: 2025-01-12

(编辑: 刘星泽)