

薄壁结构焊接接头 CTOD 试验分析

Analysis on CTOD Test of Thin-Walled Structure Welding Joint

中航工业北京航空制造工程研究所 赵海涛 李晓红 刘颖
北京航空航天大学 吴素君

[摘要] 设计测试薄壁结构平面应力断裂韧性的三点弯曲测试试样,应用于 GH4169 焊接接头 CTOD 测试试验。采用光学金相显微镜和扫描电镜观察分析各试样的裂纹扩展形貌和断口形貌。依据 BS7448 标准的规定分析 CTOD 测试过程有效性。结果表明,采用设计三点弯曲试样进行的 GH4169 焊接接头 CTOD 测试过程是有效的;GH4169 母材的断裂韧性较好,裂纹为延性起裂特性;GH4169 焊缝和熔合区的断裂韧性较差,裂纹为脆性起裂特性。

关键词: GH4169 焊接接头 CTOD 测试 三点弯曲试样

[ABSTRACT] A special kind of three point bend specimen is designed for the plane-stress fracture toughness test of thin-walled structure, which is used as the specimen in the CTOD test of Inconel 718 welded joint. Metallographic microscope and stereoscan are used to observe the crack propagation pattern and fractography for all specimens respectively. Validity check is made in the light of the relative specification of BS7448 code. The results show that the CTOD test of Inconel 718 welded joint which uses the special kind of specimen is valid. The base metal of Inconel 718 welded joint has a good fracture toughness, in which the character of crack start is ductile. However, the welded bead and fusion area of Inconel 718 welded joint have bad fracture toughness, in which the character of crack start are brittle.

Keywords: GH4169 welded joint CTOD test Three point bend specimen

近年来,结构完整性评估技术在航空领域获得了一定的应用^[1-2]。由于航空构件多为薄壁结构,针对薄壁结构的完整性评估研究也成为该领域研究的新热点。现有民用领域应用的结构完整性评估标准(如:R6、BS7910、API579、FITNET 和 GB/T 19624-2004 等^[3-7])多用于中厚板构件的完整性评估,所采用的断裂韧性参量为平面应变断裂韧性 K_{Ic} ,该参量为材料常数,与

结构的板材厚度无关。然而薄壁结构处于平面应力状态,其断裂韧性值不但与材料性能有关,而且与板材厚度有关,如图 1 所示。如果在薄壁结构完整性评估中采用平面应变断裂韧性值将会导致评估结果过于保守,不能反应薄壁结构的实际能力。现有断裂韧性测试标准(如:BS7448、ASTM E399 和 GB/T 2358-94 等^[8-10])规定的标准试样均为平面应变状态试样,其测量值为平面应变断裂韧性。目前国内外针对薄壁结构的平面应力断裂韧性测试研究鲜有报道。本文根据某航空发动机薄壁焊接机匣结构完整性评估的需要,设计了测试该薄壁结构平面应力断裂韧性所需的三点弯曲试样,并应用于 GH4169 焊接接头 CTOD 测试试验。

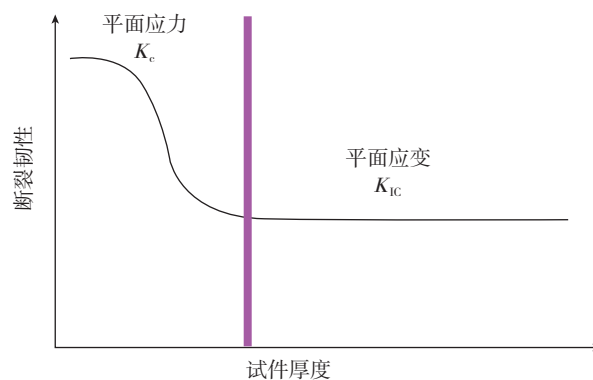


图1 断裂韧性与试样厚度关系示意图

Fig.1 Relation between fracture toughness and plate thickness

1 试验

1.1 试样设计及制备

采用 GH4169 合金平板对接焊接试件作为研究对象,合金主要成分如表 1 所示,试件厚度与薄壁焊接机匣壁厚相同,为 2.5mm,采用钨极氩弧焊方法焊接,采用的焊接参数和热处理参数与实际焊接机匣相同,焊接接头的力学性能如表 2 所示。

在 BS7448 标准试样尺寸的基础上,按与实际结构壁厚相同的原则设计平面应力断裂韧性测试试样。试样形式采用三点弯曲试样,形状尺寸如图 2 所示。可见,与标准试样所规定的宽度(W)/厚度(B)=2(或 1)相

表1 GH4169合金主要成分(质量分数) %

C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr
0.031-0.032	0.02	0.01	0.001	0.007	52.13	18.49
Co	Mo	B	Cu	Ti	Nb+Ta	Fe
0.03	3.03	0.005	<0.07	1.02-1.03	5.26	余

表2 GH4169母材与焊接接头拉伸性能

试件类型	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	断后伸长率 A /%
GH4169 焊接接头	1141.03	1300.68	4.4
GH4169 母材	1233.38	1433.68	36

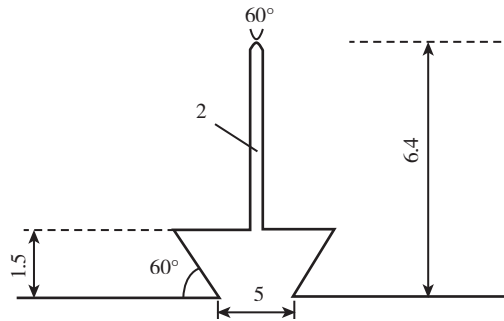


图3 CTOD试样缺口形位尺寸

Fig.3 Size of precrack in CTOD specimen

有效性可以通过 CTOD 测试完后的金相和断口观察方法进行检验验证。

1.3 CTOD 测试与计算

CTOD 测试试验在 Istron8801 设备上完成,试验过程按 BS7448 规定严格执行。在加载过程中,试样没有出现侧向翘曲等影响试验效果的现象。试验采用线性工作范围在 2.5mm 以内的引伸计测量张开位置,加载跨距 75.8mm,试验取最大载荷点为 F_m 。采用 BS7448 标准推荐的 CTOD 值计算方法,如下:

$$\delta_t = \delta_e + \delta_p = \frac{K_I^2}{2E\sigma_{ys}} + \frac{v_p r b}{r b + a_0 + z} \quad (1)$$

式中, $K_I = \sigma_N \sqrt{W} \cdot k_\beta(\alpha)$; E 为弹性模量; σ_{ys} 为测试区材料的屈服强度; v_p 为张开位移; r 为转动系数(本试验中 r 取 0.4); b 为韧带宽度($b=W-a_0$); a_0 为初始裂纹长度; z 为刀口宽度(本试验中刀口宽度为 0)。

2 试验结果与讨论

2.1 测试过程有效性分析

通过验证三点弯曲试样的疲劳裂纹和初始裂纹尺寸和形貌特征是否满足 BS7448 标准关于测试过程有效性的规定来判断本试验测试过程的有效性。在 CTOD 测试完成后打开裂纹,采用光学金相显微镜观察裂纹区域形貌。观察表明母材、焊缝和熔合区 3 类试样的疲劳裂纹走向与裂纹扩展方向一致,裂纹前缘走向与裂纹扩展方向夹角在 10° 以内,如图 4 所示。在高倍数下观察,裂纹均为穿晶扩展,在裂纹扩展区域没有发现二次疲劳裂纹等现象,如图 5 所示。

采用“体视显微镜”观察 CTOD 测试试样的宏观断口。按照 BS7448 标准推荐的初始裂纹长度计算方法规定,在疲劳裂纹前沿平均取 9 个点,疲劳裂纹长度的外侧测试点应距离试样表面 $1\%B$ (B 为试样厚度),如图 6 所示。本试验中的外侧测试点距离表面距离仅为 0.025mm,小于一个晶粒尺寸,宏观上可以看作试样表面

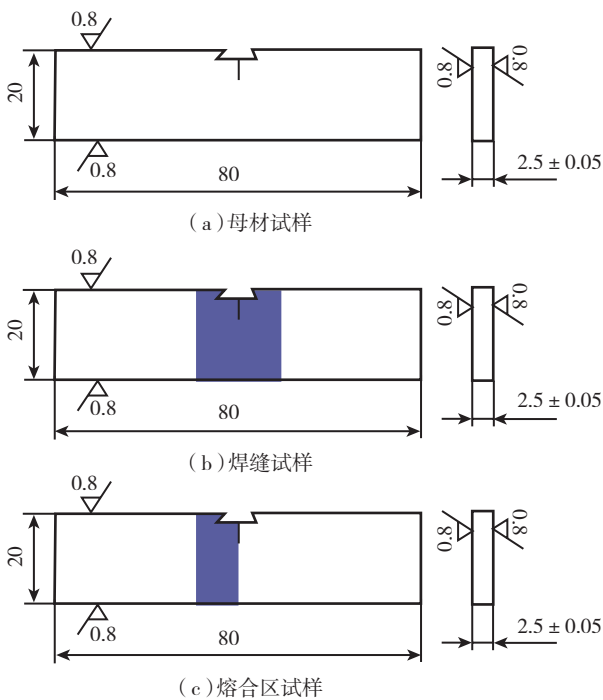


图2 CTOD试样尺寸及预制裂纹位置

Fig.2 Size of special specimen and precrack location

比,设计试样的 $W/B=8$ 。为了测试母材、焊缝和熔合区的断裂韧性值,试样预制裂纹位置分别位于母材、焊缝中心和熔合区。按照 BS7448 标准规定,采用直径不超过 0.15mm 钼丝线切割起始缺口,切口根部半径不超过 0.1mm,形状尺寸如图 3 所示。

1.2 预制疲劳裂纹

疲劳裂纹预制试验在 Istron8801 上完成,采用循环加载方式引发出裂纹,每个试样的加载周期控制在 20000~35000 循环周次,母材试样的最小载荷 $P_{min}=2192N$,焊缝和熔合区试样的最小载荷 $P_{min}=2006N$ 。加载过程中试样均未发生挠曲变形。预制疲劳裂纹的

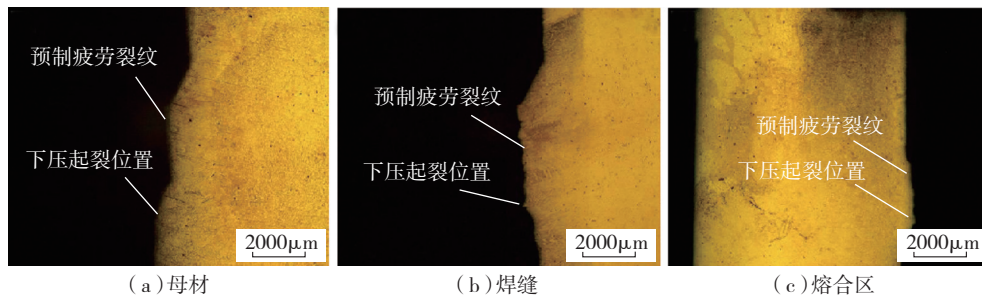


图4 3种试样的裂纹走向宏观照片

Fig.4 Macroscopic metallograph of crack propagation for three kinds of specimens

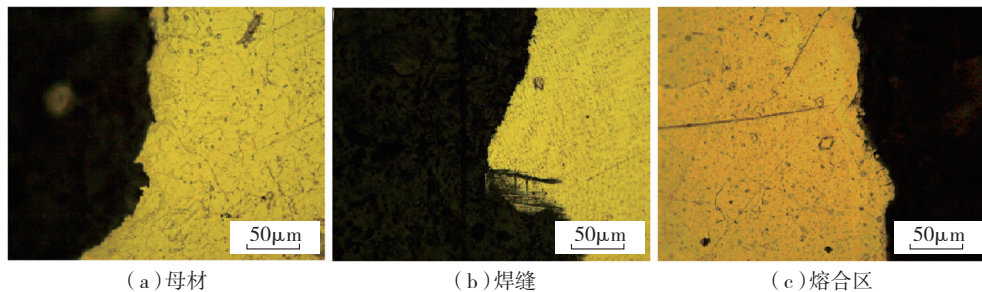


图5 3种试样的起裂区域高倍照片

Fig.5 High-magnified metallograph of crack start for three kinds of specimens

区。采用公式(2)计算初始裂纹长度。

$$a_0 = \frac{1}{8} \left(\frac{a_1 + a_2}{2} + \sum_{i=2}^8 a_i \right) \quad (2)$$

表3为针对所有试样测量的裂纹长度 a_i ,并且按式(2)计算初始裂纹 a_0 。可见,所有试样的初始裂纹 a_0 均满足:(1) $0.45W < a_0 < 0.55W$; (2)同一试样的任何两点裂纹长度之差均小于 $10\%a_0$; (3)疲劳裂纹长度均大于1.3mm。根据BS7448标准规定,以上试样的裂纹尺寸所满足条件和裂纹走向特征均符合标准中关于测试过程有效性的各项指标要求,由此可以认为本试验设计的CTOD测试试验是有效的。

2.2 GH4169 焊接接头断裂韧性分析

母材、焊缝和熔合区的CTOD值如表4~表6所示。可见,除了3-3和3-5两个熔合区试样的CTOD值偏

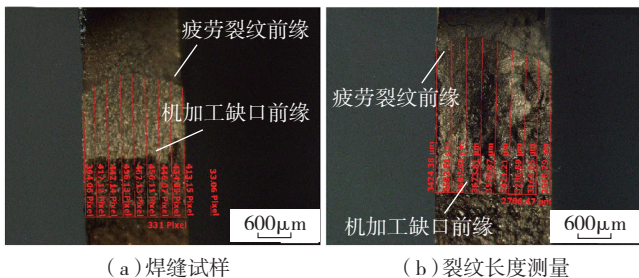
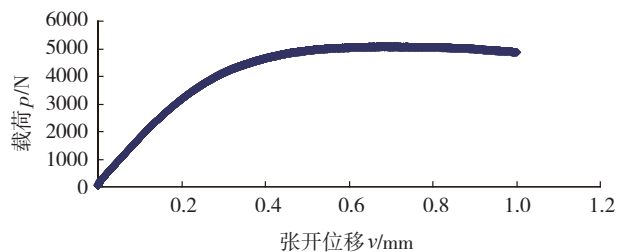


图6 母材试样

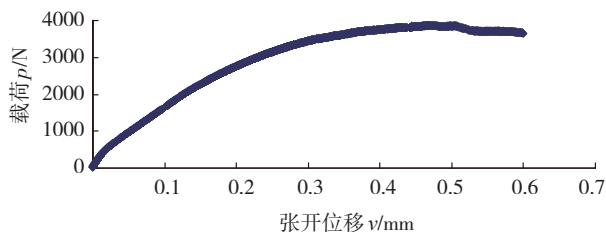
Fig.6 Base metal specimens

差百分比大于10%以外,其余的数据偏差百分比均在10%以内,分散性很小,这也可以认为是CTOD测试试验的有效性依据。根据BS7910-2005的规定^[4],采纳剔除分散性大的数据之后的CTOD数据可以用于完整性评估。母材、焊缝和熔合线试样的CTOD平均值分别为:0.1324mm、0.0926mm和0.08313mm。可见,母材试样的断裂韧性明显高于焊缝和熔合区试样。

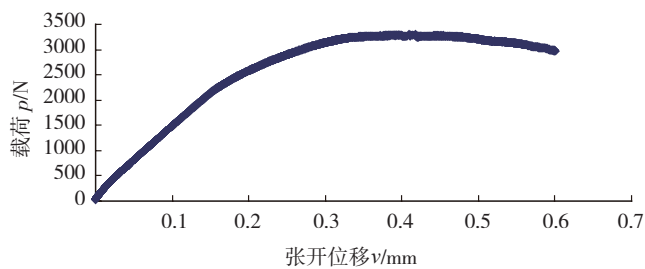
进一步分析母材试样在CTOD测试过程中的载荷-张开位移曲线($P-V$ 曲线),如图7所示。可见,



(a) 母材试样



(b) 焊缝试样



(c) 熔合区试样

图7 3种类型试样的 $P-V$ 曲线特征

Fig.7 $P-V$ curve of three kinds of specimens

表3 初始裂纹长度计算结果

类型	编号	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
母材试样	1-1	2.64	2.81	2.99	3.10	3.14	3.10	3.02	2.93	2.78	9.38
	1-2	3.55	4.01	4.16	4.19	4.16	4.15	4.12	4.00	3.72	10.45
	1-3	2.81	3.03	3.14	3.23	3.29	3.26	3.16	3.04	2.91	9.53
	1-4	2.72	2.90	3.03	3.15	3.21	3.15	3.10	2.98	2.84	9.44
	1-5	2.44	2.61	2.73	2.81	2.85	2.82	2.81	2.73	2.60	9.14
	1-6	2.86	3.03	3.09	3.16	3.20	3.12	3.02	2.88	2.73	9.44
	1-7	2.93	3.09	3.18	3.20	3.18	3.17	3.11	2.99	2.87	9.50
	1-8	2.89	3.02	3.08	3.12	3.13	3.11	3.06	2.97	2.90	9.45
焊缝试样	2-1	3.54	3.59	3.69	3.74	3.82	3.86	3.84	3.80	3.62	9.14
	2-2	3.54	4.05	4.32	4.28	4.24	4.14	3.86	3.58	3.35	10.39
	2-3	3.47	3.64	3.73	3.72	3.62	3.4	3.33	3.21	2.99	9.89
	2-4	4.12	4.24	4.27	4.29	4.27	4.26	4.21	4.05	3.78	10.59
	2-5	3.50	3.58	3.76	3.72	3.70	3.66	3.47	3.77	3.35	9.66
	2-6	3.91	4.16	4.37	4.48	4.48	4.44	4.40	4.17	3.84	10.70
熔合区试样	3-1	9.9	10.33	10.52	10.6	10.57	10.46	10.28	10.09	9.9	10.34
	3-2	9.94	10.27	10.42	10.46	10.45	10.38	10.31	10.19	9.94	10.30
	3-3	9.76	10.05	10.28	10.4	10.51	10.57	10.56	10.51	9.76	10.36
	3-4	10.47	10.56	10.6	10.53	10.54	10.39	10.3	10.16	10.47	10.41
	3-5	10.01	10.16	10.29	10.38	10.45	10.44	10.41	10.33	10.01	10.32

在最大载荷点处,母材试样存在一个屈服平台。通过金相观察发现在下压起裂点前存在明显的“钝化阶梯”,如图4(a)所示,这说明裂纹前缘起裂前发生了较大的塑性形变。采用扫描电镜观察母材试样的起裂扩展区前缘的断面形貌,可以看到断面主要为韧窝形貌,如图8所示。由此可以认为,母材试样的裂纹为延性起裂特性,母材的断裂韧性较好。

相比较而言,焊缝和熔合区试样在CTOD测试过程中P-V曲线在载荷达到最高点时即下行,没有出现明显的屈服平台,如图7所示。通过金相观察发现在下压起裂点前“钝化阶梯”微乎其微,如图4(b)和图4(c)所示。

表4 焊接接头的CTOD计算结果

母材试样			焊缝试样			熔合区试样		
编号	CTOD 值	偏差 /%	编号	CTOD 值	偏差 /%	编号	CTOD 值	偏差 /%
1-1	0.1339	1.13	2-1	0.0915	1.19	3-1	0.08517	7.33
1-2	0.1251	-5.51	2-2	0.0854	7.8	3-2	0.08235	3.78
1-3	0.1324	0	2-3	0.0937	1.19	3-3	0.05578	-29
1-4	0.1324	0	2-4	0.0964	4.10	3-4	0.08188	3.19
1-5	0.1356	2.42	2-5	0.0953	2.92	3-5	0.09157	15
1-6	0.1310	-1.06	2-6	0.0935	0.97			
1-7	0.1365	3.10						
1-8	0.1326	0.15						

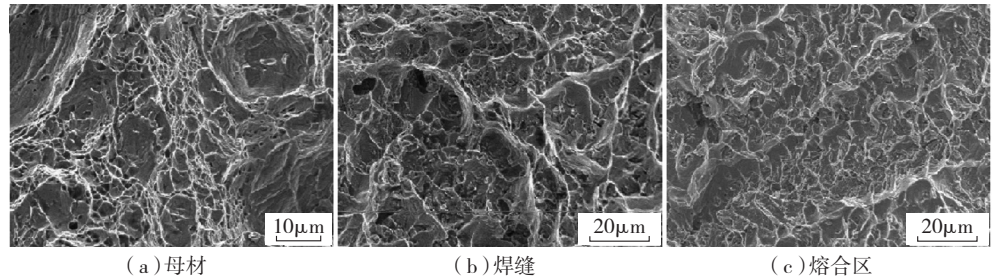


图8 3种试样的下压起裂扩展区前缘断面形貌

Fig.8 Near crack start fractography of three kind of specimens (下转第 107 页)

阶段产生的压缩塑性应变没有影响;在冷却阶段,由于热沉的拉伸作用,热沉前方温度高于“力学熔点”的金属产生了拉伸塑性应变,从图4可以看到,这一拉伸塑性应变刚好补偿了加热阶段产生的缩短的不协调应变,使得残余不协调应变趋于0。对于 $D=80\text{mm}$ 情况,由于热沉与热源相距甚远,虽然在温度历史曲线上也可以看到温度的下降,但这一温差值相比前两种情况要小得多,而且,该点温度在热沉作用前很长一段时间内与常规焊曲线重合,虽然热沉在冷却阶段有所拉伸,但可以看到, $D=80\text{mm}$ 对应的 $y=0\text{mm}$ 点的塑性应变历史几乎与常规焊重合。综合以上分析可知,选取不同的热源与热沉的距离,对焊缝中塑性应变的发展影响不同,在讨论的3种情况下, $D=50\text{mm}$ 对应的焊缝在残余态塑性应变趋于0,进行DC-LSND焊控制变形的效果最好。

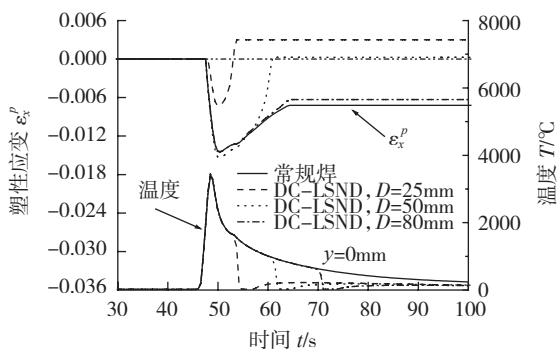


图4 热源与热沉距离对纵向塑性应变历史的影响
Fig.4 Influence of distance between arc and heat sink on longitudinal plastic strain histories

4 结论

(1) 热源与热沉中心的距离 D 是DC-LSND焊接技术的重要参数之一,无论热源与热沉距离 D 如何,冷却介质的急冷作用都使得热沉作用处成为焊缝中心线上温度最低的位置。在纵向上,热沉仅对其周围金属产生降温冷却作用,而对远处的高温金属冷却作用较弱。

(2) 热源与热沉中心的距离 D 不同,对应变场的影响不同。热源与热沉之间距离越近,拉伸作用越强。拉伸作用使得温度处于力学熔点以上的高温金属产生较大的拉伸塑性应变,热源与热沉中心的距离较近时,可以产生大于加热阶段形成的压缩塑性应变的拉伸塑性应变,由此不仅补偿加热时产生的缩短应变,而且还使焊缝中存在拉伸塑性应变。

参考文献

- [1] Q Guan. A survey of development in welding stress and distortion

controlling in aerospace manufacturing engineering in China. *Welding in the World*, 1999, 43(1):14-24.

[2] 关桥,张崇显,郭德伦. 动态控制的低应力无变形焊接新技术. *焊接学报*, 1994, 15(1): 8-15.

[3] 关桥,彭文秀,刘继达,等. 焊接热源有效利用率的测试计算法. *焊接学报*, 1982, 3(1): 10-23.

[4] 中国航空材料手册编辑委员会. *航空材料手册*. 北京: 中国标准出版社, 1988. (责编 可岚)

(上接第104页)

起裂扩展区前缘的断口照片也显示断面以小刻面解理平台为主,为典型的准解理形貌,如图8所示。由此可以认为焊缝和熔合区试样的裂纹为脆性起裂特性,焊缝和熔合区的断裂韧性较差。

3 结论

针对薄壁结构完整性评估的需要,设计了测试平面应力断裂韧性的三点弯曲试样,并进行了GH4169焊接接头的CTOD测试试验,结论如下:(1)采用所设计的平面应力三点弯曲试样进行的GH4169焊接接头CTOD测试过程满足BS7448标准中关于测试过程有效性检测指标要求,而且测试数据分散性很小,可以认为是有效的;(2)GH4169母材的断裂韧性较好,裂纹为延性起裂特性,而焊缝和熔合区的断裂韧性较差,裂纹为脆性起裂特性。

参考文献

[1] 武淮生,钟群鹏. 飞机发动机零部件结构完整性的概率R6评定. *航空学报*, 2000, 21(4): 96-99.

[2] 吴德锋,隋福成,毛春见. 先进飞机典型结构关键部位损伤容限分析研究. *飞机设计*, 2010(10): 16-19.

[3] R6. Assessment of the integrity of structures containing defects, Revision 3. British Energy Generation, 2000.

[4] BS7910. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. London, BSI, 2005.

[5] FITNET. Fitness for service analysis of structures using the FITNET procedure; An Overview, 24th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Eng., Greece 12-17 June, 2005.

[6] API RP 579. Standardized fitness-for-service assessment techniques for pressurized equipment used in the petroleum industry. API, 2004.

[7] 钟群鹏,李培宁. 国家标准《在用含缺陷压力容器安全评定》的特色和创新点综述. *管道技术与设备*, 2006(1): 1-5.

[8] ASTM E399-09. Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness KIC of Metallic Materials, ASTM, 2002.

[9] BS7448-1. Fracture mechanics toughness tests—Method for determination of KIC, critical CTOD and critical J values of metallic materials. BSI, 1991.

[10] GB/T 2358-94. 金属材料裂纹尖端张开位移试验方法.

(责编 小城)