

# 304 不锈钢低周疲劳断裂特性的研究\*

## Study on Low Cycle Fatigue Fracture Properties of 304 Stainless Steel

西北工业大学航空学院 刘俭辉 王生楠

兰州理工大学机电学院 韦尧兵

68306 部队 牟伟杰

**[摘要]** 在应力控制条件下对 304 不锈钢试样进行拉压疲劳试验,研究其低周疲劳断裂特性。对试验数据处理,得到 304 不锈钢在应力控制下的低周  $S-N$  曲线并拟合出低周应力寿命的表达式;利用表达式计算出 304 不锈钢的疲劳极限;分析在不同应力下应变与寿命之间的关系以及加载次数与塑性应变能之间的关系;对断口进行观察表明:裂纹萌生于试样表面,且具有多源性,应力大小影响断口形貌。

**关键词:**  $S-N$  曲线 疲劳试验 低周疲劳 条件疲劳极限 断口形貌

**[ABSTRACT]** Low cycle fatigue fracture properties are investigated through the tension-compression fatigue testing on 304 stainless steel. Based on the analysis of experimental data, low cycle  $S-N$  curve, the conditions fatigue limit ( $N=105$ ), the relationship between life and strain under different stress and the relationship between life and plastic strain energy could be obtained. Observations of fracture surfaces show that fatigue cracks initiate with multi-initiation sites from the specimen surface and fracture morphology relate to stress level.

**Keywords:**  $S-N$  curve Fatigue test Low cycle fatigue Condition fatigue limit Fracture morphology

304 不锈钢是应用最为广泛的一种铬-镍不锈钢,具有良好的耐蚀性、耐热性、低温强度和机械特性,同时具有良好的加工性能和可焊性<sup>[1]</sup>。它广泛用于制作要求具有良好综合性能(耐腐蚀和成型性)的设备和机件中,在机械、航空航天等领域中应用的比较广泛,主要是制成油气管、压力容器等,大多在特殊的工作环境中。油气管、压力容器等在整个寿命内受到的循环次数有限,例如,压力容器有时每天只受到几个载荷循环<sup>[2]</sup>。在工程实际应用中它的静强度一般都会满足要求,因而

对它的低周疲劳断裂特性的研究就有实际意义<sup>[3]</sup>。304 不锈钢构件疲劳断裂的事件时有发生,导致严重的后果。工程中 304 不锈钢被广泛应用,但对于其低周疲劳特性研究还尚待深入,现有的研究低周疲劳大多是在控制应变的条件下来完成的,而在应力控制下来研究低周疲劳特性相对较少<sup>[4]</sup>。本文主要研究在应力控制条件下 304 不锈钢的低周疲劳断裂特性,以 105 作为条件寿命极限来研究 304 不锈钢疲劳断裂特性,这可以为我们的工程实际和结构寿命的估计提供理论数据

### 1 试验内容及方法

#### 1.1 试验材料

本试验使用江苏豪光钢业有限公司生产的 304 不锈钢,热轧处理。在疲劳试验机上对其进行静强度测试,试验部分直径为  $d=11\text{mm}$ ,长度为  $l=20\text{mm}$ ,当试件加载到 56.8kN 时试件发生断裂,将试验断开两部分对接,测量对接后试验部分长度为 29mm,由此可以计算出 304 不锈钢的应变率  $\delta = \Delta l/l=45\%$ ,其成分及性能如表 1 所示,各项指标均满足 304 不锈钢的性能要求,疲劳试验参数将参照此试验结果。

表1 304不锈钢化学成分及性能

C/%	Mn/%	S/%	P/%	Si/%	Cr/%	Ni/%	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\delta/\%$
0.054	0.79	0.002	0.034	0.42	17.27	8.14	577	45

#### 1.2 试验设备

试验采用岛津电液伺服高频疲劳试验机,其最大载重为动态  $\pm 100\text{ kN}$ ,最大振幅  $\pm 25\text{ mm}$ ,试验机控制方式采用计算机控制的包含 DSP,采用 32bit 处理装置的全数字化测算控制方式,实现试验的自动控制和数据的自动采集。试验的软件为 GLUON TESTING 和 GLUON DATAPROCESSING,试验机的载荷精度和对中度均满足 ASTM E606-80 和 GB6399-86 标准要求。断口 SEM 观察是在日立 S-3400N 扫描电镜下对断口形貌进行观察并保存照片。

\* 国家科技重大专项项目(2009ZX04001-015)资助。

### 1.3 试样制备

试验试样的制作参考了ASTME606-92标准以及《轴向等幅低周疲劳试验方法》(GB/T15248-94)、《金属轴向疲劳试验方法》(GB3075-82)等国家标准,试件形状及尺寸如图1所示。对疲劳试验中试件的断口进行加工,用线切割将其切成1cm的圆柱状,利于在扫描电镜上安装观察。

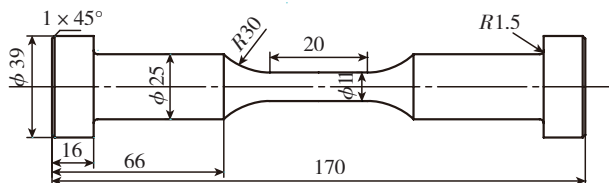


图1 拉压试样

Fig.1 Tension sample

### 1.4 试验条件

疲劳试验为轴向拉压对称循环试验,应力比 $R=-1$ ,加载频率 $f=10\text{Hz}$ 。试验温度为 $20^\circ\text{C}$ ,试验中载荷控制方式为应力控制,载荷波形为三角波。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 应力水平对寿命的影响

试验中的应力是按照名义应力来计算,每个应力水平重复3次试验,试验结果如表2所示。

用最小二乘法对数据进行曲线拟合,结果如图2所示。从图中可以看出试件的寿命随着应力幅的减少而增大;曲线斜率随着应力幅的增大而减小,试件寿命减小的速度随着应力幅的增大而减小。

在材料寿命大于 $10^3$ ,用数学表达式来描述 $S-N$ 曲线时,一般采用幂函数式来表达<sup>[5-6]</sup>:

$$S^m \times N = C, \quad (1)$$

其中, $m$ 和 $C$ 是与材料、应力比、加载方式等有关的参数。有经验表明频率在小于 $20\text{Hz}$ 时对材料的寿命影响

表2 304不锈钢化学成分及性能

应力/MPa	第一次/周	第二次/周	第三次/周
293 ( $\sigma_1$ )	2066	2270	2106
283 ( $\sigma_2$ )	3184	1311	2044
273 ( $\sigma_3$ )	4087	3391	3339
262 ( $\sigma_4$ )	5425	4826	5261
252 ( $\sigma_5$ )	6097	7904	7051
242 ( $\sigma_6$ )	11260	8958	10008
231 ( $\sigma_7$ )		$10^5$ 未断	

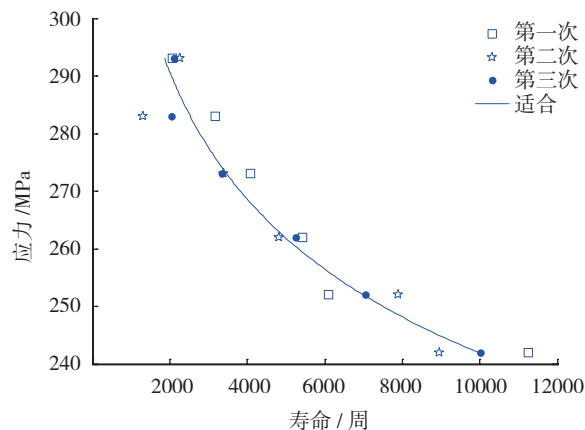


图2 应力-寿命曲线

Fig.2 Stress-life curve

不大,可以不考虑加载频率对结果的影响。用幂函数形式来拟合数据,从而求出 $m$ 和 $C$ 的值:

$$m=8.8496, C=1.3044 \times 10^{25}.$$

在应力比 $R=-1$ ,频率小于 $20\text{Hz}$ 时304不锈钢的应力寿命曲线可以表示为:

$$S^{8.8496} \times N = 1.3044 \times 10^{25}. \quad (2)$$

以此公式可以计算出304不锈钢的疲劳极限( $N=10^7$ )为 $187.51\text{MPa}$ 。根据经验公式材料的疲劳极限一般为 $(0.3\sim 0.45)\sigma_b$ ,可以得出304不锈钢的疲劳极限在 $173.10\text{MPa}\sim 259.65\text{MPa}$ 之间, $187.51\text{MPa}$ 满足此条件,可以看出用式(2)来计算304不锈钢的低周疲劳寿命是可靠的。

对表达式(1)两边取对数:

$$\lg S = A + B \lg N, \quad (3)$$

式中, $A = \lg C/m$ ,  $B = -1/m$ 。

由式(3)可以看出 $S$ 、 $N$ 双对数曲线应该满足线性关系。对试验数据取对数,然后在双对数坐标上进行描点,如图3所示。可以发现这些点近似处于一条直线上,从而验证了应力与寿命有双对数线性关系。

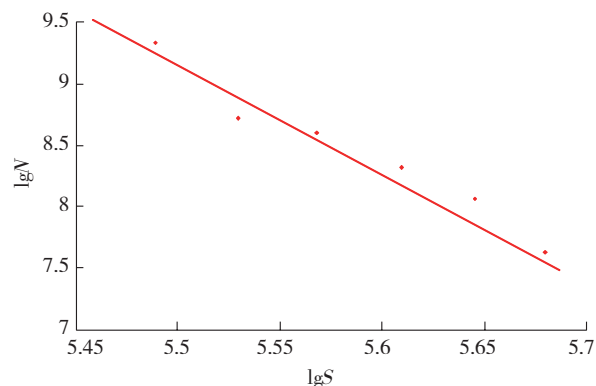


图3 应力-寿命双对数曲线

Fig.3 Double logarithmic curve of stress-life

在测定 304 不锈钢条件疲劳寿命时采用如下方法,在本方法中选择应力幅由高到低依次试验<sup>[7]</sup>。在  $\sigma_1 \sim \sigma_5$  时,试件在  $10^5$  周次内断裂;当  $\sigma_6=242$  MPa 时,试件的寿命大于  $10^5$  周次;  $\sigma_7=231$  MPa 时  $10^5$  周次未断裂,并且 2 次的应力差 11MPa 小于  $\sigma_7$  的 5%,则  $\sigma_6$  和  $\sigma_7$  的平均值就是条件疲劳极限  $\sigma_{-1}$ :

$$\sigma_{-1} = \frac{1}{2} (\sigma_6 + \sigma_7) = 236.5\text{MPa}。 \quad (4)$$

### 2.2 应变寿命关系

在应变寿命分析中假定试件的试验部分的应变是均匀的,本文中是用应变仪来测量试验部分的应变  $\Delta\varepsilon$ ,在研究应变寿命关系中主要考虑寿命与真实应变  $\Delta\varepsilon$  的关系<sup>[8-12]</sup>,对每个应力幅水平的试验数据进行最小二乘法曲线拟合,结果如图 4 所示。

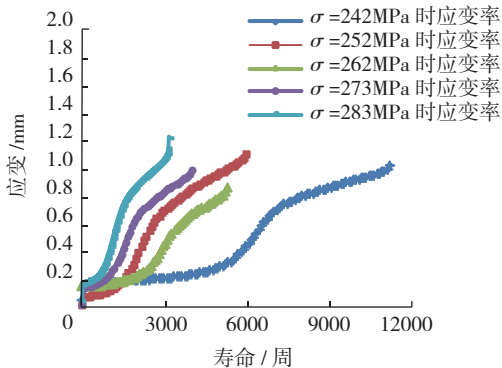


图4 不同应力时应变-寿命曲线  
Fig.4 Strain-life curves with different stress

从图 4 中可以看出在试件寿命的前 1/3 阶段应变随着循环周次的增加而加大,但加大的幅度较小;当循环次数达到 1/3 左右时,应变迅速增加;当循环次数达到试件寿命 1/2 左右时,应变趋于稳定直到试件断裂。同时可以发现,应力幅值越大,达到稳定后真实应变也就越大。

### 2.3 寿命能量关系

在分析能量与寿命的关系中,假定在整个系统中能量是保守的,即忽略除塑性应变能以外的其他形式的能量,假设材料内部不产生热能<sup>[13]</sup>。文中的能量是指考虑循环一周次的塑性应变能。对试验数据进行最小二乘法曲线拟合,结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出在整个寿命的前一阶段(约总寿命的 1/3),塑性应变能随着循环周次的增加迅速变大;当循环周次达到总寿命的 1/3 左右时,塑性应变能会达到极大值;随后略有减小而基本保持稳定;当试件断裂的时候塑性应变能再次增大随后试件发生断裂。对其他应力水平的数据分析存在同样的规律。

在应力幅为 273MPa 时,对试验的过程进行连续

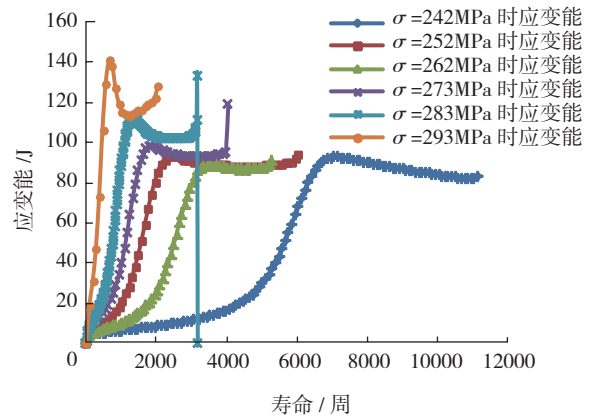


图5 不同应力时能量-寿命曲线  
Fig.5 Energy-life curves with different stress

观察,当发现试件表面出现微裂纹时,循环次数大致在 1000 周,而试件的总寿命为 3500 周次左右,也就是说当试件表面出现微裂纹时,其循环的次数为总寿命的 1/3,也可以预测试件的总寿命,通过观察其他应力幅时的试验过程,可以验证以上结论。分析试验数据也可以发现当出现微裂纹时,塑性应变能也达到极大值,也就是说在塑性应变能达到极大值时开始在试件表面出现裂纹,形成裂纹源。

### 3 试样断口观察

文中试验属于低周、应力疲劳,其断口的最大特点是有多个裂纹源,疲劳裂纹的扩展充分,因此裂纹扩展区较大,瞬断区小,断口上有贝纹状推进线<sup>[14-15]</sup>。

用扫描电镜对试样断口放大 25 倍观察,如图 6 所示。在图中可以看到明显的裂纹源区(A 区,很小一部分)、裂纹扩展区(B 区,占断口的 2/3 左右)和瞬断区(C 区,占断口的 1/3 左右)。

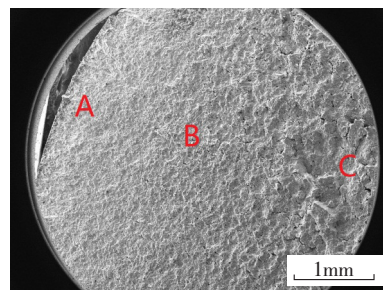


图6 断口宏观形貌  
Fig.6 Fracture macro-morphology

疲劳源区主要是裂纹萌生和疲劳裂纹稳定扩展的第一个阶段,由于疲劳裂纹萌生机制和疲劳裂纹扩展机制不同,不同条件下疲劳源区的微观形貌也有显著的差异。图 7 给出了不同应力时裂纹源形貌。

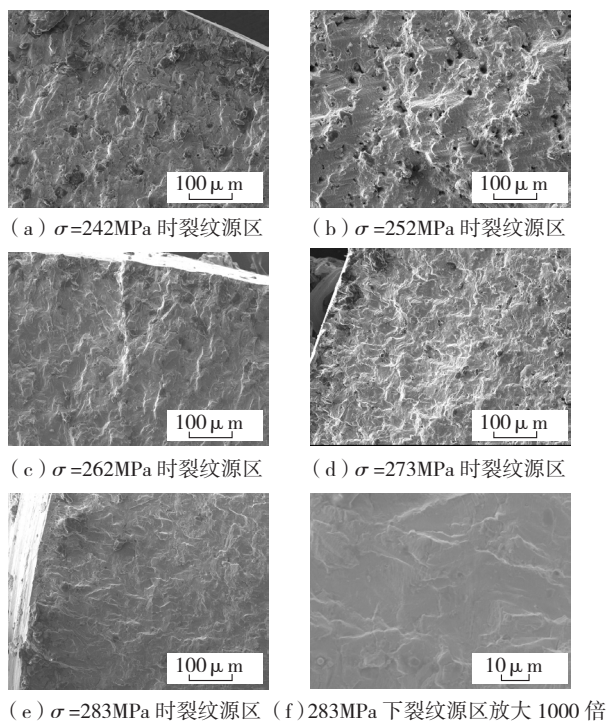


图7 裂纹源区  
Fig.7 Crack initiation area

图7(a)~(b)给出的裂纹源区形貌看不到明显的裂纹源,不能判断出裂纹源数目以及裂纹源的间距;图7(c)可以看到有明显的裂纹源,但数目不多;图7(d)可以观察到裂纹源数目相较于图7(a)、(b)、(c)有明显增加,裂纹源间距减小;图7(e)可以清晰看出裂纹源,并且其数目较多;图7(f)给出了裂纹源区放大1000倍的形貌,可以看出裂纹源区相对较为平坦。

从以上可以看出:载荷越大,疲劳源越多,其间距越小,试件断裂越快,寿命越短,断口疲劳源区越粗糙。这是由于当载荷较大时,在试件表面易于形成裂纹源,裂纹源数目越多,试件越易于断裂,断口表面摩擦的次数较少,也就较粗糙;载荷越小,试件断裂需要时间越久,那么断口表面摩擦也就越严重,相对来说也就越平整。

裂纹扩展区最主要的特征是断口表面出现疲劳条纹,疲劳条纹是判断是否疲劳断裂的基本依据。有很多因素影响着疲劳条纹的形式及其形貌,人们通过对疲劳断口上显示疲劳条纹的材料的研究统计认为:一般情况下,材料的静拉伸强度越高,越不容易出现疲劳条纹;韧性较高的材料容易生成疲劳条纹<sup>[16]</sup>。

304不锈钢是奥氏体不锈钢,韧性较高,因此在断口上较容易观察到疲劳条纹,另外载荷对疲劳条纹的影响也十分重要,一般来讲,载荷的频率越高、应力幅越低,疲劳条纹越细,间距越小,断口在扫描电镜下观察,如图8所示。

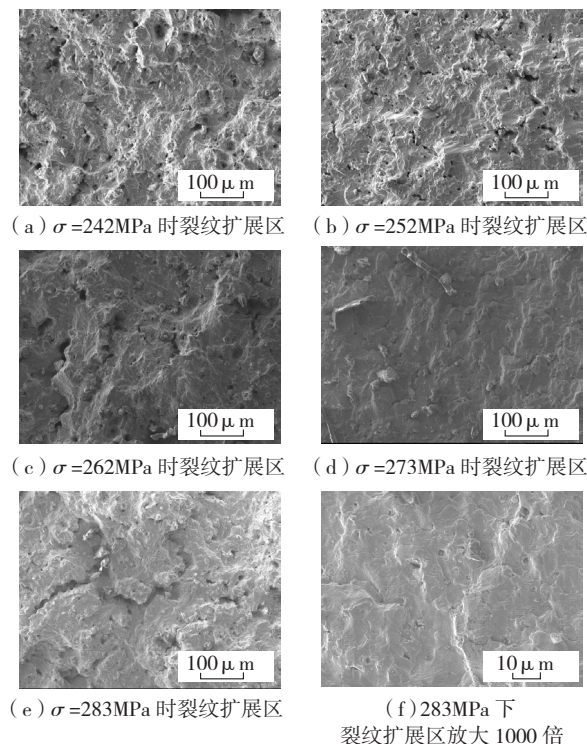


图8 裂纹扩展区  
Fig.8 Crack propagation area

从图8中可以看出载荷越大,疲劳条纹间距越大,疲劳条纹越粗,疲劳条纹的间距越大。

瞬断区是试件最后发生断裂的区域,一般是混合断口。断口的微观形貌主要表现为静载荷瞬断时特征,大部分情况为韧窝,有时候也出现准解理、解理和沿晶等形貌,具体形貌与材料性质、载荷类型等都有关系。

图9给出了载荷不同时瞬断区形貌,可以看出:呈现撕裂状,断口特征为韧窝;载荷越大,瞬断区面积越大,瞬断区越粗糙。

## 4 结论

(1)通过试验测得304不锈钢的条件疲劳极限 $\sigma_{-1}$ ( $N=10^5$ )为236.5MPa;试件的寿命随着应力幅的减少而增大,试件寿命减小的速度随着应力幅的增大而减小。

(2)在应力幅一定时,应变在循环过程中逐渐增大,达到一定值时不再加大,基本保持稳定直到最后断裂;在应力控制下,试件在断裂时的总应变随应力幅增大而增大。

(3)当试件表面出现微裂纹时,塑性应变能达到极大值,循环次数为总寿命的1/3,此时形成裂纹源。

(4)通过对断口观察分析可以得到:低周疲劳有多个疲劳源,断口形貌与应力水平有关系,应力越大,裂纹源越多,疲劳条纹间距越大,瞬断区面积越大,越粗糙。

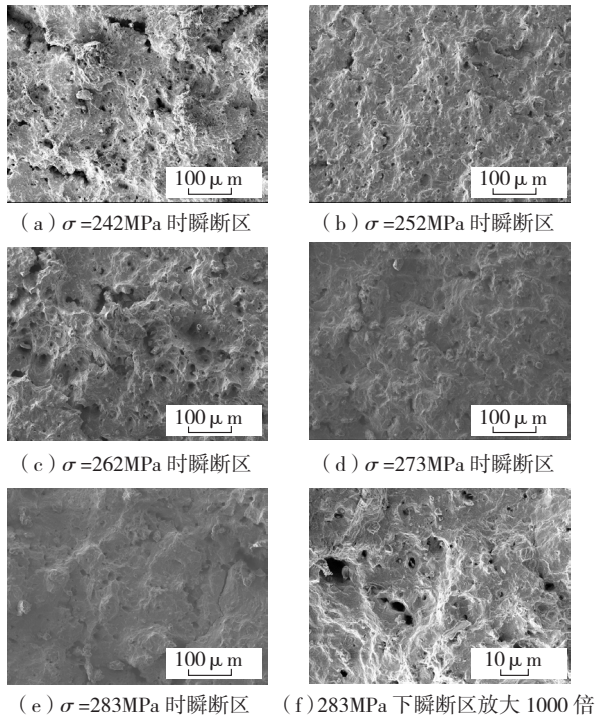


图9 瞬断区  
Fig.9 Blink area

参考文献

[1] 李双江. 304 奥氏体不锈钢夹杂物的冶金行为. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(3): 402-405.  
 [2] 李永泰. 压力容器分析设计需讨论的问题. 压力容器, 2007, 24(2): 46-47.  
 [3] Kanazawa, Miller K J, Brown M W. Low-cycle fatigue under out-of-phase loading conditions. Trans. ASME J. Engng Mater. Tech., 1977, 99: 222-228.  
 [4] 丁剑, 张荻, 西田信一. 应力控制条件下奥氏体不锈钢的低周疲劳性能. 金属学报, 2002, 38(12): 1261-1265.  
 [5] Sergiy S, Oleksandr Z, Timophiy P. Multiaxial Low Cycle Fatigue Life Prediction Criteria: Comparisons and Results. Transactions of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT 17), 2003.  
 [6] 陈传尧. 疲劳与断裂. 武汉: 华中科技大学出版社. 2001.  
 [7] 徐瀛. 疲劳强度. 北京: 高等教育出版社. 1988.  
 [8] 魏楠, 金尧, 孙训芳. 低周循环应力-应变关系与损伤. 机械强度, 2002, 24(3): 426-428.  
 [9] Bela I Sandor. Fundamentals of cycle stress and strain. Beijing: Science Press, 1985.  
 [10] Yao C, Liang G, Zhang Q. Research on curves of cyclic stress-strain and definition of fracture life. Proc. of 1st. National Conf. on Metal Fatigue, Beijing: Metallurgy Industry Press, 1984.  
 [11] Wang B, Fan J, Yang Q. Experimental research on material behavior of cyclic hardening and softening In Fatigue and Fracture, Beijing: Aviation Industry Press, 1998.

[12] Hassan T, Kyriakides S. Ratcheting of Cyclically Hardening and Softening Material: Part I: Uniaxial Behavior. Beijing: International Journal of Plasticity, 1994, 10: 149-184.  
 [13] 刘忠侠, 宋谋胜, 李继文, 等. A356 合金钢的低周疲劳行为及塑性应变能. 中国有色金属学报, 2006, 12(6): 260-267.  
 [14] 朱杰武, 许雁, 葛利玲, 等. 1.4 %C 超高碳钢显微组织与疲劳性能的研究. 材料热处理学报, 2004, 25(3): 30-34.  
 [15] 张亚军. 10CrNiMo 高强钢的低周疲劳特性. 北京科技大学学报, 2011, 1(1): 22-28.  
 [16] 钟群鹏, 赵子华. 断口学. 北京: 高等教育出版社, 2006.

(责编 小城)

(上接第 80 页)

以一端的定位孔为基准, 按照工艺数模上确定的两定位孔的距离来修正样板上的定位孔。具体方法为: 将样板置于专用夹具上放在数控机床的工作台上, 确定好工件坐标系, 以一端定位孔作为原点, 按照工艺数模上两定位孔的距离移动主轴到目标位置, 进行“点加工”标记出目标定位孔, 然后加工出理想的定位孔。

为了保证样板工艺孔和蒙皮零件上工艺孔的一致性, 将样板上工艺孔与化铣轮廓线等相关型线一起利用专用夹具在数控机床上加工出来, 样板与专用夹具之间采用销钉定位并固定其相对位置; 而蒙皮零件的工艺孔在拉型模胎上直接加工获得。

5 结束语

本文主要分析了大型飞机制造中的大型蒙皮零件(长度 ≥ 4000mm)减轻槽化铣加工的化铣立体样板的制造问题。根据先进航空制造技术发展的实际需求, 围绕大型飞机蒙皮的立体化铣样板的研制工作, 探索出了新型的样板工装制造工艺方法。本文探索研究的“大型立体化铣样板”的设计与制造技术用于工程实践, 使得某机型的蒙皮零件的刻形精度由 10mm 提高到了 4mm 以内。它填补了国内航空工业在“大型立体化铣样板”设计与制造方面的技术空白。

参考文献

[1] Harris W T. 化学铣切. 朱永昌, 译. 北京: 国防工业出版社, 1983.  
 [2] CAKIR O. Chemical etching of aluminium. Materials Processing Technology, 2008, 99: 337-340.  
 [3] DICKENSON T A. Chemical milling of aluminium and steel. Light Metals, 1956, 19(19): 297-301.  
 [4] 《航空制造工程手册》总编委员会. 航空制造工程手册: 特种加工. 北京: 航空工业出版社, 1993.  
 [5] 于芝兰. 铝合金化学铣切的现代技术. 轻合金加工技术, 1995, 9(23): 28-29.

(责编 日午)