DOI:10.3724/zrht.1674-5825.2024180

纳入拘束的薄壁异种金属高能束焊接结构界面区疲劳寿命预测

范 凯[1,2], 乔 琳[1,2], 邓加加[1,2], 邓正松[1,2], 包 乐[1,2]
(1. 上海空间推进研究所,上海 201112;2. 上海空间发动机工程技术研究中心,上海 201112)

摘 要:为实现可重复使用空天飞行器各组件薄壁异种金属高能束焊接结构(DMHEBWS)界面区准确的疲劳寿命预测,基于拘束理论对传统疲劳寿命预测方法中的线弹性断裂韧度K_{IC}、裂纹扩展速率da/dN、临界裂纹尺寸a_c进行修正,提出了纳入拘束的疲劳寿命预测方法。建立了1050A/5A06 DMHEBWS界面区拘束相关的疲劳寿命曲面及其计算公式,并针对该界面区某一裂纹进行了疲劳寿命预测和试验验证。结果表明:与传统疲劳寿命预测方法相比,纳入拘束的疲劳寿命预测方法可得到较为准确的预测结果。

关键词:拘束;疲劳寿命;薄壁异种金属高能束焊接结构;界面区;裂纹
中图分类号:TH142; V415.6 **文献标识码**:A **文章编号**:1674-5825(2026)01-0063-09

Fatigue Life Prediction Incorporating Constraint for the Thin-walled Dissimilar High-energy Beam-welded Structure Interface Region

FAN Kai[1,2], QIAO Lin[1,2], DENG Jiajia[1,2], DENG Zhengsong[1,2], BAO Le[1,2]
(1. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China;
2. Shanghai Engineering Center of Space Engine, Shanghai 201112, China)

Abstract: To accurately predict fatigue life in the interface region of thin-walled Dissimilar Metal High-energy Beam-welded Structures (DMHEBWS) of reusable space vehicle components, a fatigue life prediction method incorporating constraints is proposed. The method modifies the linear elasticity fracture toughness, (K_{IC}) crack expansion rate (da/dN), and critical crack size (a_c) of the traditional fatigue life prediction method based on constraint theory. The constraint-related fatigue life surface of the 1050A/5A06 DMHEBWS interface region and its calculation formula were established, and fatigue life prediction and experimental verification were carried out for a certain crack in this interface region. Experimental results show that compared with traditional fatigue life prediction methods, the method incorporating constraints is more accurate.

Key words: constraints; fatigue life; thin-walled Dissimilar Metal High-energy Beam-welded Structure; interface region; cracks

1 引言

作为商业航天和低空经济两大新质生产力的重要载体之一,可重复使用空天飞行器(Reusable Space Vehicle,RSV)为满足更为严苛的性能、重量、制造工艺需求,其各组件广泛采用薄壁异种金属高能束焊接结构(Dissimilar Metal High-energy Beam-welded Structure,DMHEBWS)。薄壁DMHEBWS界面区因其较高的宏观力学性能不均匀性、较低的缺陷容忍

收稿日期:2024-12-18; 修回日期:2025-05-27
基金项目:上海市“科技创新计划”启明星培育(扬帆专项)项目(22YF1429400)
第一作者:范凯,男,博士,研究员,研究方向为空间压力容器技术。E-mail:kfan1990@yeah.net
引用格式:范 凯,乔 琳,邓加加,等. 纳入拘束的薄壁异种金属高能束焊接结构界面区疲劳寿命预测[J]. 载人航天,2026,32(1):63-71. Fan K,Qiao L,Deng J J,et al. Fatigue life prediction incorporating constraint for the thin-walled dissimilar high-energy beam-welded structure interface region[J]. Manned Spaceflight,2026,32(1):63-71.

性和较为恶劣的周期服役工况，成为发生疲劳失效的薄弱环节，其寿命决定了整个RSV的服役寿命和维修成本。因此，准确的薄壁DMHEBWS界面区疲劳寿命预测对RSV的研发设计、总装制造、商业应用完整产业体系建立至关重要[1,2]。

材料发生疲劳失效通常要经历裂纹萌生(起裂)、裂纹稳定扩展和裂纹失稳扩展(断裂)3个阶段，材料疲劳总寿命为上述3个阶段寿命之和[3]。一方面，薄壁DMHEBWS界面区因无法完全避免气孔、微裂纹等初始缺陷，导致其在载荷作用下快速完成裂纹萌生[4]；另一方面，裂纹失稳扩展速度通常很快，对寿命的影响几乎可以忽略。因此，薄壁DMHEBWS界面区的疲劳寿命主要由裂纹稳定扩展寿命决定。此时，基于S-N曲线的传统疲劳寿命预测方法已不再适用，需采用基于断裂力学的疲劳寿命预测方法。研究人员先后建立疲劳裂纹扩展速率与断裂参量的关联，进而提出一系列疲劳裂纹扩展速率公式[5-7]。其中，Forman公式[6]因引入了应力比、断裂韧度的影响，得到广泛应用。

基于Forman公式，国内外已开展了多种结构的疲劳寿命预测研究[8,9]。然而相关研究表明，断裂韧度并非仅与材料相关，还会受到结构几何、材料性能失配的影响，即呈现拘束相关性[10-12]。范凯等[13]研究发现，薄壁DMHEBWS界面区不同初始裂纹尺寸和位置的试样断裂韧度不同，并得到了界面区断裂韧度与拘束参数之间的关联[14]。如果针对薄壁DMHEBWS界面区不同初始尺寸和位置的裂纹，采用特定试样测得的断裂韧度进行疲劳寿命预测，将会得到过于保守或非保守的结果。

本文以1050A/5A06 DMHEBWS界面区为研究对象，基于前期研究得到的拘束相关的断裂韧度对Forman公式进行修正，建立纳入拘束的疲劳寿命预测方法。

2 疲劳寿命预测方法

传统的Forman公式见式(1)。

$$\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}N}=\frac{C(\Delta K)^m}{(1-R)K_{\mathrm{IC}}-\Delta K} \tag{1}$$

式中，$\mathrm{d}a/\mathrm{d}N$为裂纹扩展速率；K_{IC}为线弹性断裂韧度；R为循环应力比；ΔK为应力强度因子幅度，C和m为疲劳参数。

纳入拘束的薄壁DMHEBWS界面区疲劳寿命预测步骤分6步。

1)获取薄壁DMHEBWS界面区典型区域材料力学性能参数。参数包括：屈服强度σ_{s}、抗拉强度σ_{b}、弹性模量E、泊松比υ。

2)获取薄壁DMHEBWS界面区拘束相关的断裂韧度$J_{\mathrm{IC}}(CP)$。CP代表拘束参数(Constraint Parameter)。

首先，针对薄壁DMHEBWS界面区每个典型区域，制备n组不同初始位置和尺寸的裂纹试样($n\geq 2$)，通过试验或有限元方法得到裂纹扩展直至断裂过程中的载荷–位移曲线(P–V曲线)。根据式(2)计算每一加载点i对应的J积分，同时与裂纹扩展量Δa作图得到裂纹扩展阻力曲线簇$J_{\mathrm{R}}[J_{\mathrm{R1}},J_{\mathrm{R2}},\ldots,J_{\mathrm{Rn}}]$。

$$J_i=\frac{K_i^2(1-\upsilon^2)}{E}+\eta^{\mathrm{CMOD}}\frac{U_{\mathrm{pi}}^{\mathrm{CMOD}}}{(W-a_i)B} \tag{2}$$

其中，$U_{\mathrm{pi}}^{\mathrm{CMOD}}$表示此时载荷–CMOD曲线下的塑性部分面积；$\eta^{\mathrm{CMOD}}$表示基于CMOD的$\eta$因子；$K_i$表示线弹性应力强度因子；$W$表示试样宽度；$B$表示试样厚度；$a_i$表示裂纹长度。

然后，基于裂纹扩展阻力曲线簇，采用各典型区域材料钝化线(式(3))可计算得到对应的界面区断裂韧度组$J_{\mathrm{IC}}[J_{\mathrm{IC1}},J_{\mathrm{IC2}},\ldots,J_{\mathrm{IC}n}]$。

$$J=2(\sigma_{\mathrm{s}}+\sigma_{\mathrm{b}})\Delta a \tag{3}$$

再选取可以表征裂尖拘束的参数CP，例如，基于裂尖等效塑性应变等值线面积的A_{p}、基于裂尖张开位移CTOD的参数A_{d}等。针对上述试样，计算得到对应的拘束参数组$CP[CP_1,CP_2,\ldots,CP_n]$。

最后，联合断裂韧度组和拘束参数组作图，得到关联曲线，对其拟合得到的关系式即为拘束相关的断裂韧度$J_{\mathrm{IC}}(CP)$。

3)计算薄壁DMHEBWS界面区拘束相关的裂纹扩展速率$\mathrm{d}a/\mathrm{d}N(CP)$和临界裂纹长度$a_{\mathrm{c}}(CP)$。

应力强度因子K表达见式(4)。

$$K=Y\sigma\sqrt{\pi a} \tag{4}$$

式中，a为裂纹尺寸；σ为应力；Y为形状系数。

基于式(4)，应力强度因子幅度ΔK计算见式(5)。

$$\Delta K=Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \tag{5}$$

拘束相关的线弹性断裂韧度$K_{\mathrm{IC}}(CP)$为式(6)。

$$K_{\mathrm{IC}}(CP)=\sqrt{\frac{EJ_{\mathrm{IC}}(CP)}{1-\upsilon^2}} \tag{6}$$

将式(5)和式(6)共同带入式(1)，即得到拘束相关的裂纹扩展速率da/dN(CP)，见式(7)。

$$\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}N}(CP)=\frac{C(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a})^{m}}{(1-R)\sqrt{EJ_{\mathrm{IC}}(CP)/(1-\nu^{2})}-Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a}} \tag{7}$$

拘束相关的临界裂纹尺寸见式(8)。

$$a_{\mathrm{c}}(CP)=\frac{1}{Y^{2}\sigma_{\max}^{2}\pi}\sqrt{\frac{EJ_{\mathrm{IC}}(CP)}{1-\nu^{2}}} \tag{8}$$

4)获取薄壁DMHEBWS界面区典型区域材料疲劳参数。针对薄壁DMHEBWS界面区典型区域，制备不同初始裂纹尺寸和位置的试样进行疲劳裂纹扩展试验，并获取da/dN-ΔK的曲线。同时计算对应的拘束参数CP。采用式(1)对曲线簇进行拟合，计算得到对应的疲劳参数C和m。

5)构建纳入拘束的薄壁DMHEBWS界面区疲劳寿命预测模型。对式(7)进行积分，带入式(8)，并带入薄壁DMHEBWS界面区典型区域材料性能参数和疲劳参数，即得到疲劳寿命，见式(9)。

$$N(CP)=\int_{a_0}^{a_{\mathrm{c}}}\frac{1}{\mathrm{d}a/\mathrm{d}N}\mathrm{d}a=\frac{(1-R)\sqrt{\dfrac{EJ_{\mathrm{IC}}(CP)}{1-\nu^{2}}}}{C(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi})^{m}(0.5m-1)}\left(\frac{1}{a_0^{0.5m-1}}-\frac{1}{\left(\dfrac{\sqrt{\dfrac{EJ_{\mathrm{IC}}(CP)}{1-\nu^{2}}}}{Y^{2}\sigma_{\max}^{2}\pi}\right)^{0.5m-1}}\right)-$$
$$\frac{1}{C(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi})^{m-1}(0.5m-1.5)}\left(\frac{1}{a_0^{0.5m-1.5}}-\frac{1}{\left(\dfrac{\sqrt{\dfrac{EJ_{\mathrm{IC}}(CP)}{1-\nu^{2}}}}{Y^{2}\sigma_{\max}^{2}\pi}\right)^{0.5m-1.5}}\right) \tag{9}$$

6) 薄壁DMHEBWS界面区疲劳寿命预测。针对待评定薄壁DMHEBWS界面区裂纹A，确定初始裂纹长度$a_{0\mathrm{A}}$、形状系数Y_{A}、循环载荷应力幅值$\Delta\sigma_{\mathrm{A}}$、最大应力$\sigma_{\max\mathrm{A}}$、应力比$R_{\mathrm{A}}$和拘束参量值$CP_{\mathrm{A}}$，并带入式(9)即得到该裂纹的疲劳寿命。

3　疲劳寿命预测算例

针对航天领域某薄壁1050A/5A06 异种金属电子束焊接结构界面区裂纹进行疲劳寿命预测。

3.1　界面区材料力学性能

针对薄壁1050A/5A06 DMHEBWS界面区，通过小冲杆试验和有限元模拟反演得到4个典型区域(1050A母材区、熔合区(FZ)、热影响区(HAZ)和5A06母材区)的真应力–塑性应变曲线，并通过数值计算确定了典型区域材料的力学性能参数，如图1和表1所示[15]。这里需要注意的是，FZ和HAZ是对力学性能区别于1050A和5A06母材区的区域的定义。

3.2　界面区拘束相关的断裂韧度

对薄壁1050A/5A06 DMHEBWS界面区5组初始裂纹尺寸(a_0/W=0.2，0.3，0.5，0.6，0.7)和11组初始裂纹位置(x=–4.8，–2，–1.2，–0.8，–0.4，0，0.4，0.8，1.2，2，4.8 mm)的单边缺口弯曲(SEN(B))试样(图2)进行了断裂模拟，并基于式(2)获得对应的裂纹扩展阻力

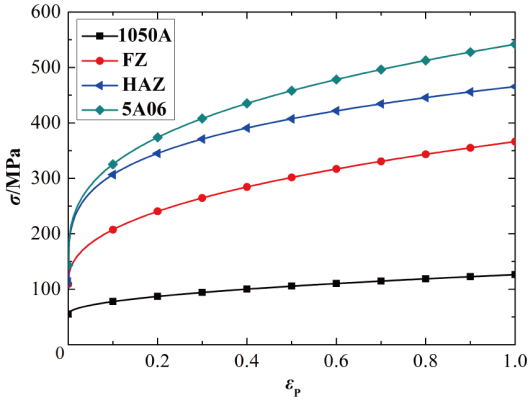


图 1　室温下薄壁1050A/5A06 DMHEBWS 界面区典型区域材料的真应力–塑性应变曲线[15]

Fig. 1　True stress-plastic strain curves of typical materials in thin-walled 1050A/5A06 DMHEBWS interface region at room temperature [15]

表 1　室温下薄壁1050A/5A06 DMHEBWS 界面区典型区域材料性能[15]

Table 1　Properties of typical materials in the thin-walled 1050A/5A06 DMHEBWS interface region at room temperature[15]

参数	1050A	FZ	HAZ	5A06
杨氏模量E/GPa	67	67	67	67
泊松比ν	0.3	0.3	0.3	0.3
屈服强度σ_y/MPa	58.3	127.8	182.9	190.9
抗拉强度σ_s/MPa	71.4	196.7	282.7	305.6
硬化指数n	0.5	0.42	0.35	0.34

曲线簇J_R，如图3所示。同时将表1中4种典型区域材料的屈服强度σ_s和抗拉强度σ_b分别代入式(3)得到对应的钝化线，进而结合裂纹扩展阻力曲线簇J_R计算对应的断裂韧度组J_{IC}，如图4所示。

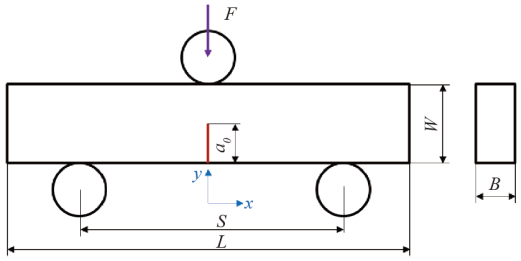


图 2 单边缺口弯曲试样几何及加载方式[13]

Fig. 2 Loading configuration and geometry of SENB specimen[13]

本文选取A_d作为表征裂尖拘束的参数，其定义见式(10)。

$$A_d = \delta / \delta_{ref} \tag{10}$$

其中，δ为某一裂纹试样或结构在一定载荷或断裂时的裂尖张开位移(Crack Tip Open Displacement，CTOD)，δ_{ref}为标准参考试样在断裂时的CTOD。

将a_0/W=0.5的均质1050A裂纹试样确定为标准参考试样，其断裂时的J积分(断裂韧度J_{IC})作为参考断裂韧度J_{ref}，其在厚度方向中心截面的J积分达

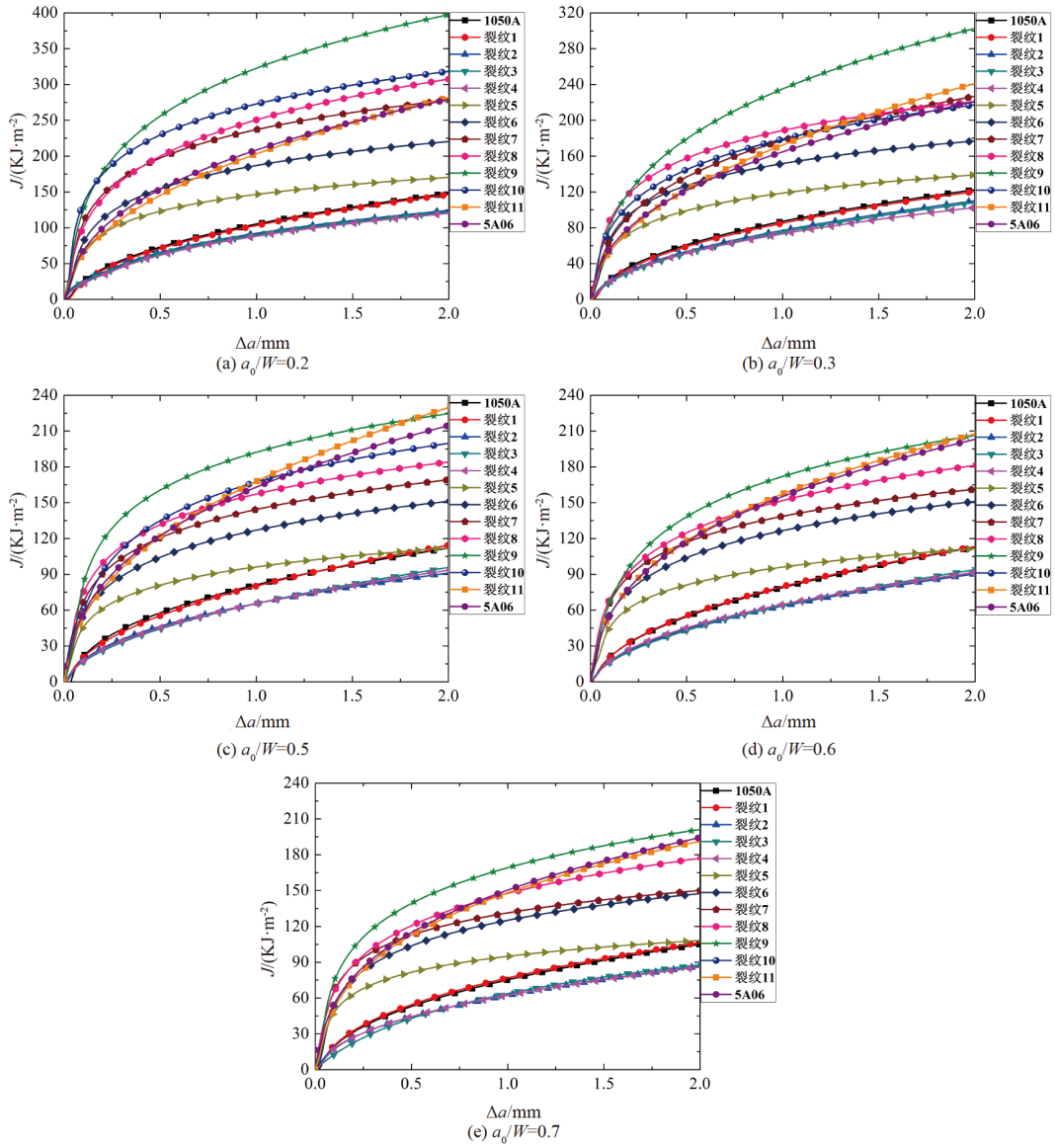


图 3 5组初始尺寸下薄壁1050A/5A06 DMHEBWS 界面区不同初始位置裂纹的扩展阻力曲线[13]

Fig. 3 J_R curves of the cracks with different initial locations in the thin-walled 1050A/5A06 DMHEBWS interface region under five initial crack sizes[13]

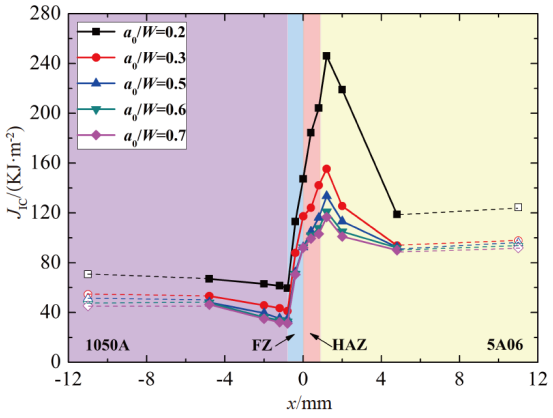


图 4　薄壁1050A/5A06 DMHEBWS 界面区不同初始尺寸和位置裂纹试样的断裂韧度[13]

Fig. 4　Fracture toughness of the cracks with different initial sizes and locations in the thin-walled 1050A/5A06 DMHEBWS interface region[13]

到断裂韧度J_{IC}时所对应的CTOD作为参考裂尖张开位移δ_{ref}。针对薄壁1050A/5A06 DMHEBWS界面区不同初始尺寸和位置的裂纹试样，采用有限元计算得到各试样在$J=J_{IC}$时的中截面的δ和对应的A_d。再对界面区4个典型区域各裂纹试样的(A_d，J_{IC}/J_{ref})数据点分别作图，得到关联线簇[14]，如图5所示。

对上述关联线簇的拟合方程如式(11)所示。

$$J_{IC}/J_{ref}=\begin{cases}0.88A_d+0.12 & x\leqslant -0.8\\ 0.74A_d+0.46 & -0.8<x<0\\ 0.76A_d+1.44 & 0\leqslant x<1.2\\ 1.6A_d+1.16 & x\geqslant 1.2\end{cases} \tag{11}$$

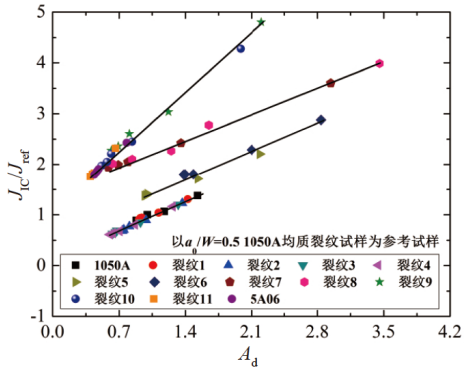


图 5　薄壁1050A/5A06 DMHEBWS界面区J_{IC}/J_{ref}-A_d关联线[14]

Fig. 5　J_{IC}/J_{ref}–A_d correlation line for the thin-walled 1050A/5A06 DMHEBWS interface region[14]

由式(11)可以得到拘束相关的断裂韧度$J_{IC}(A_d)$见式(12)。

$$J_{IC}(A_d)=\begin{cases}45.06A_d+6.14 & x\leqslant -0.8\\ 37.89A_d+23.55 & -0.8<x<0\\ 38.91A_d+73.73 & 0\leqslant x<1.2\\ 81.92A_d+59.39 & x\geqslant 1.2\end{cases} \tag{12}$$

3.3　界面区拘束相关的裂纹扩展速率和临界裂纹长度

将式(12)带入式(6)可得到拘束相关的线弹性断裂韧度$K_{IC}(A_d)$，如式(13)所示。

将式(12)带入式(7)可得到拘束相关的裂纹扩展速率da/d$N(A_d)$，如式(14)所示。

将式(12)代入式(8)可得到拘束相关的临界裂纹尺寸$a_c(A_d)$，如式(15)所示。

$$K_{IC}(A_d)=\begin{cases}\sqrt{E(45.06A_d+6.14)/(1-\nu^2)}\\ \sqrt{E(37.89A_d+23.55)/(1-\nu^2)}\\ \sqrt{E(38.91A_d+73.73)/(1-\nu^2)}\\ \sqrt{E(81.92A_d+59.39)/(1-\nu^2)}\end{cases}=\begin{cases}\sqrt{3317.77A_d+452.09} & x\leqslant -0.8\\ \sqrt{2789.84A_d+1733.99} & -0.8<x<0\\ \sqrt{2864.94A_d+5428.74} & 0\leqslant x<1.2\\ \sqrt{6031.77A_d+4372.89} & x\geqslant 1.2\end{cases} \tag{13}$$

$$\frac{da}{dN}(A_d)=\begin{cases}\dfrac{C_1(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a})^{m_1}}{(1-R)\sqrt{3317.77A_d+452.09}-Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a}} & x\leqslant -0.8\\ \dfrac{C_2(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a})^{m_2}}{(1-R)\sqrt{2789.84A_d+1733.99}-Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a}} & -0.8<x<0\\ \dfrac{C_3(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a})^{m_3}}{(1-R)\sqrt{2864.94A_d+5428.74}-Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a}} & 0\leqslant x<1.2\\ \dfrac{C_4(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a})^{m_4}}{(1-R)\sqrt{6031.77A_d+4372.89}-Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a}} & x\geqslant 1.2\end{cases} \tag{14}$$

$$a_c(A_d)=\begin{cases}\sqrt{3317.77A_d+452.09}\,/\,(Y^2\sigma_{max}^2\pi) & x\leqslant -0.8\\ \sqrt{2789.84A_d+1733.99}\,/\,(Y^2\sigma_{max}^2\pi) & -0.8<x<0\\ \sqrt{2864.94A_d+5428.74}\,/\,(Y^2\sigma_{max}^2\pi) & 0\leqslant x<1.2\\ \sqrt{6031.77A_d+4372.89}\,/\,(Y^2\sigma_{max}^2\pi) & x\geqslant 1.2\end{cases} \tag{15}$$

3.4 界面区材料疲劳参数

针对薄壁1050A/5A06 DMHEBWS界面区4个典型区域制备与3.2节一致的SEN(B)试样，并进行裂纹疲劳扩展试验。采用式(1)对曲线簇进行拟合，计算得到对应的疲劳参数C和m，如表2所示。计算得到不同的拘束水平裂纹对应的da/dN-ΔK的曲线，如图6所示。

表 2 薄壁1050A/5A06 DMHEBWS 界面区典型区域材料疲劳参数

Table 2 Fatigue parameters of typical materials in the thin-walled 1050A/5A06 DMHEBWS interface region at room temperature

疲劳参数	1050A	FZ	HAZ	5A06
C	2.74×10^{-4}	2.85×10^{-4}	2.92×10^{-4}	2.98×10^{-4}
m	2.92	2.34	1.26	1.01

3.5 构建纳入拘束的薄壁1050A/5A06 DMHEBWS界面区疲劳寿命预测模型

对式(14)进行积分，并带入式(15)，同时带入3.1和3.4节得到的材料力学性能参数和疲劳参数，即得到纳入拘束的薄壁1050A/5A06 DMHEBWS界面区疲劳寿命(式(16))。绘制对应的纳入拘束的疲劳寿命曲面，如图7所示。

$$N(A_d)=\begin{cases}\dfrac{(1-R)\sqrt{3177.77A_d+452.09}}{1.26\times10^{-4}\left(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi}\right)^{2.92}}\left(\dfrac{1}{a_0^{0.46}}-\dfrac{1}{\left(\sqrt{3177.77A_d+452.09}\,/\,Y^2\sigma_{max}^2\pi\right)^{0.46}}\right)-\\ \dfrac{1}{-0.11\times10^{-4}\left(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi}\right)^{1.92}}\left(\dfrac{1}{a_0^{-0.04}}-\dfrac{1}{\left(\sqrt{3177.77A_d+452.09}\,/\,Y^2\sigma_{max}^2\pi\right)^{-0.04}}\right) & x\leqslant -0.8\\ \dfrac{(1-R)\sqrt{2789.84A_d+1733.99}}{1.26\times10^{-4}(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi})^{2.34}}\left(\dfrac{1}{a_0^{0.17}}-\dfrac{1}{\left(\sqrt{2789.84A_d+1733.99}\,/\,Y^2\sigma_{max}^2\pi\right)^{0.17}}\right)-\\ \dfrac{1}{-0.94\times10^{-4}(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi})^{1.34}}\left(\dfrac{1}{a_0^{-0.33}}-\dfrac{1}{\left(\sqrt{2789.84A_d+1733.99}\,/\,Y^2\sigma_{max}^2\pi\right)^{-0.33}}\right) & -0.8<x<0\\ \dfrac{(1-R)\sqrt{2864.94A_d+5428.74}}{-1.08\times10^{-4}(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi})^{1.26}}\left(\dfrac{1}{a_0^{-0.37}}-\dfrac{1}{\left(\sqrt{2864.94A_d+5428.74}\,/\,Y^2\sigma_{max}^2\pi\right)^{-0.37}}\right)-\\ \dfrac{1}{-2.54\times10^{-4}(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi})^{0.26}}\left(\dfrac{1}{a_0^{-0.87}}-\dfrac{1}{\left(\sqrt{2864.94A_d+5428.74}\,/\,Y^2\sigma_{max}^2\pi\right)^{-0.87}}\right) & 0\leqslant x<1.2\\ \dfrac{(1-R)\sqrt{6031.77A_d+4372.89}}{-1.48\times10^{-4}(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi})^{1.01}}\left(\dfrac{1}{a_0^{-0.5}}-\dfrac{1}{\left(\sqrt{6031.77A_d+4372.89}\,/\,Y^2\sigma_{max}^2\pi\right)^{-0.5}}\right)-\\ \dfrac{1}{-2.98\times10^{-4}(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi})^{0.01}}\left(\dfrac{1}{a_0^{-1}}-\dfrac{1}{\left(\sqrt{6031.77A_d+5428.74}\,/\,Y^2\sigma_{max}^2\pi\right)^{-1}}\right) & x\geqslant 1.2\end{cases} \tag{16}$$

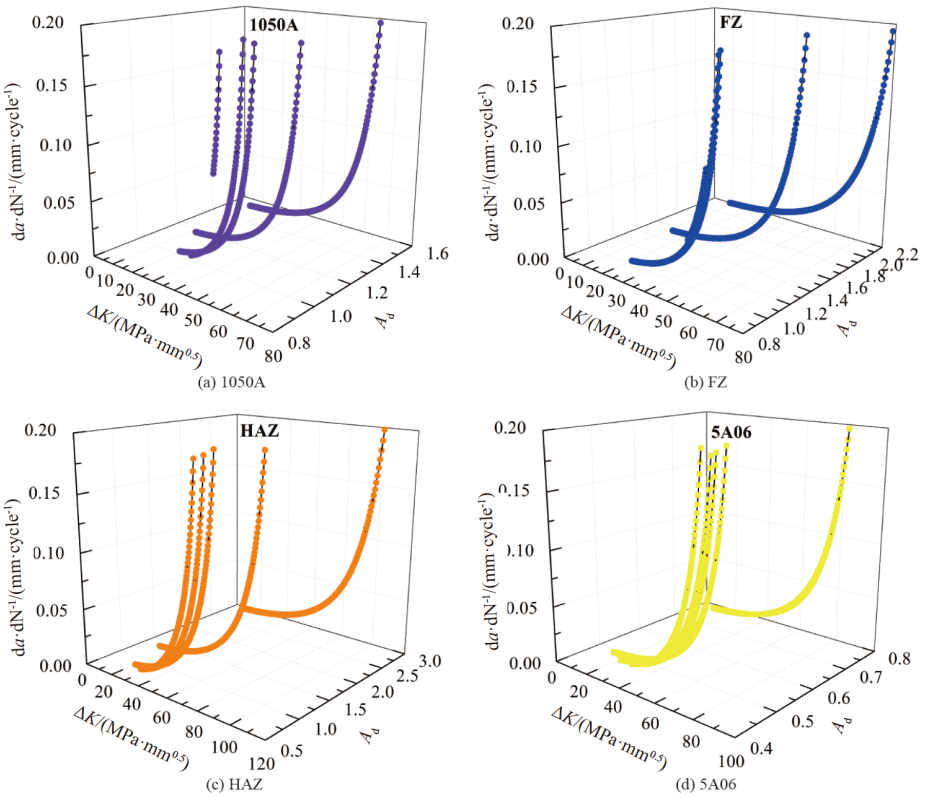


图 6　薄壁1050A/5A06 DMHEBWS 界面区典型区域不同A_d对应裂纹的da/dN-ΔK的曲线

Fig. 6　da/dN-ΔK curves of the cracks with different A_d values in the thin-walled 1050A/5A06 DMHEBWS interface region

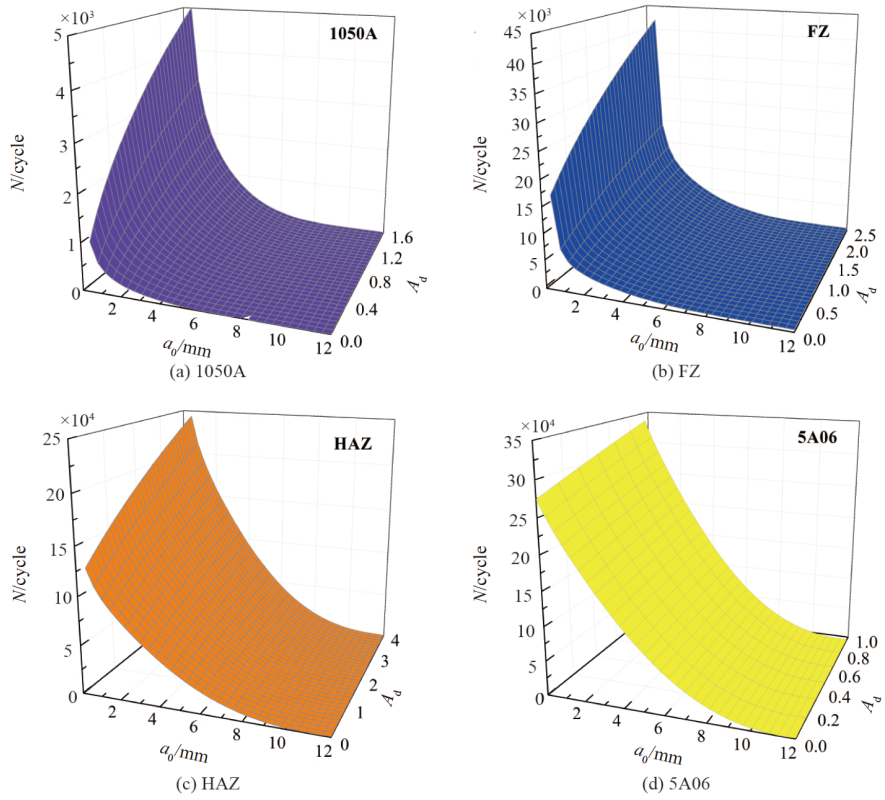


图 7　薄壁1050A/5A06 DMHEBWS 界面区典型区域的拘束相关的疲劳寿命

Fig. 7　Fatigue life incorporating constraint in the thin-walled 1050A/5A06 DMHEBWS interface region

3.6 界面区某裂纹的疲劳寿命预测及验证

由于3.5节针对该薄壁1050A/5A06 DMHEBWS界面区构建的纳入拘束的疲劳寿命预测模型及方法不受限于特定的裂纹尺寸及位置，综合考虑疲劳试验的时间与经济成本，本节以位于该界面区5A06母材区内(x=2 mm)、初始尺寸为a_0=4.32 mm(a_0/W=0.3)的裂纹为对象，分别采用基于Forman公式的传统方法和本文提出的方法进行疲劳寿命预测。经计算，形状系数Y_A=1.12。

通过有限元对交变载荷下的应力进行分析，得到最大应力为σ_{maxA}=2.93 MPa，最小应力σ_{minA}=0 MPa，则循环载荷应力幅值$\Delta\sigma_A$和应力比R_A见式(17)、式(18)。

$$\Delta\sigma_A=\sigma_{maxA}-\sigma_{minA}=0 \tag{17}$$

$$R_A=\sigma_{minA}/\sigma_{maxA}=0 \tag{18}$$

通过有限元计算得到该裂纹在其厚度方向中心截面的J积分达到断裂韧度J_{IC}时所对应的参数A_d为0.84。采用传统方法和本文方法计算得到疲劳寿命见式(19)、式(20)。

$$\begin{aligned}N=&\frac{(1-0)\sqrt{(67\times95.7)/(1-0.3^2)}}{2.98\times10^{-4}\times(1.12\times2.93\sqrt{\pi})^{1.01}(0.5\times1.01-1)}\left(\frac{1}{4.32^{0.5\times1.01-1}}-\frac{1}{\left(\sqrt{(67\times95.7)/(1-0.3^2)}/(1.12^2\times2.93^2\pi)\right)^{0.5\times1.01-1}}\right)-\\&\frac{1}{2.98\times10^{-4}\times(1.12\times2.93\sqrt{\pi})^{1.01-1}(0.5\times1.01-1.5)}\left(\frac{1}{4.32^{0.5\times1.01-1.5}}-\frac{1}{\left(\sqrt{(67\times95.7)/(1-0.3^2)}/(1.12^2\times2.93^2\pi)\right)^{0.5m-1.5}}\right)=99351\end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned}N(A_d)=&\frac{(1-0)\sqrt{6031.77\times0.84+4372.89}}{-1.48\times10^{-4}(1.12\times2.93\times\sqrt{\pi})^{1.01}}\left(\frac{1}{4.32^{-0.5}}-\frac{1}{\left(\sqrt{6031.77\times0.84+4372.89}/\left(1.12^2\times2.93^2\pi\right)\right)^{-0.5}}\right)-\\&\frac{1}{-2.98\times10^{-4}(1.12\times12.93\times\sqrt{\pi})^{0.01}}\left(\frac{1}{4.32^{-1}}-\frac{1}{\left(\sqrt{6031.77\times0.84+4372.89}/\left(1.12^2\times2.93^2\pi\right)\right)^{-1}}\right)\\=&120443\end{aligned} \tag{20}$$

针对该裂纹试样进行了疲劳试验，同时采用传统方法和本文提出的纳入拘束新方法进行预测，2种预测结果与试验结果对比如表3所示。其中，考虑到试验结果散差，采用3个试样子样结果的平均值作为试验结果。

从表3可以看出，基于本文提出的纳入拘束的疲劳寿命预测方法计算得到的疲劳寿命较传统方法更为准确。

综上所述，针对薄壁异种金属高能束焊接结构，通过界面区典型区域有限试样可以得到界面区全区域拘束相关的断裂韧度，进而对传统裂纹扩展速率公式进行修正，得到上述结构界面区全区域疲劳寿命曲面，从而对该区域内任意尺寸和位置的裂纹进行疲劳寿命预测。其他均质材料结构、焊接结构(同种金属、异种金属及其他焊接方式)、厚壁结构均可按照相同的方法获取纳入拘束的疲劳寿命预测模型。

表 3 疲劳寿命计算结果和试验结果对比

Table 3 Comparison of calculated and experimental results of fatigue life

项目	疲劳寿命/次	误差
传统方法	99 351	15.73%
本文方法	120 443	2.16%
试样子样1	116 018	—
试验子样2	119 597	—
试验子样3	118 063	—
试验平均值	117 893	—

4　结论

1）通过对传统疲劳寿命预测方法中的线弹性断裂韧度K_{IC}、裂纹扩展速率da/dN、临界裂纹尺寸a_c进行修正后，与传统方法相比，得到的纳入拘束的薄壁异种金属高能束焊接结构疲劳寿命预测结果更为准确。

2）本文方法可从薄壁异种金属高能束焊接结构推广至其他均质材料结构、焊接结构、厚壁结构等。

3）本文方法可基于界面区典型区域有限试样构建界面区全区域疲劳寿命曲面。

参考文献（References）

［1］ 范凯, 黄立钠, 邱中华, 等. 纳入拘束效应的含缺陷航天压力容器安全评定[J]. 载人航天, 2021, 28(10): 22-28.
Fan K, Huang L N, Qiu Z H, et al. Safety assessment incorporating constraint effect for aerospace pressure vessels with defects[J]. Manned Spaceflight, 2021, 28(1): 22-28 (in Chinese).

［2］ 范凯, 赵和明, 施金箭, 等. 液体姿轨控动力系统压力容器产品成熟度量化评价研究 [J]. 航天工业管理，2023(3): 37-41.
Fan K, Zhao H M, Shi J J, et al. Quantitative evaluation of product maturity for pressure vessels in liquid attitude and orbit control propulsion system[J]. Aerospace Industry Management，2023(3): 37-41 (in Chinese).

［3］ Schijve J. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(8): 679-702.

［4］ Al-Mukhtar A M, Biermann H, Hübner P, et al. Determination of some parameters for fatigue life in welded joints using fracture mechanics method[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2010, 19(9): 1225-1234.

［5］ Paris P, Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws[J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85(4): 528-533.

［6］ Forman R G, Kearney V E, Engle R M. Numerical analysis of crack propagation in cyclic-loaded structures[J]. Journal of Basic Engineering, 1967, 89(3): 459-463.

［7］ Walker K. The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 aluminum[J]. ASTM STP 462, 1970:1-14.

［8］ 王爱红, 徐格宁, 高有山. 桥式起重机随机应力谱获取及疲劳寿命估算[J]. 机械工程学报, 2012, 48(18): 192-198.
Wang A H, Xu G N, Gao Y S. Random stress spectrum acquisition and fatigue residual life estimate for overhead travelling crane[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(18): 192-198 (in Chinese).

［9］ Vasseur J, Lefebvre F, Vasiukov D, et al. Methodology of fatigue life assessment on components with porosity clusters[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020, 108: 1-9.

［10］ Fan K, Wang G Z, Xuan F Z, et al. Local fracture resistance behavior of interface regions in a dissimilar metal welded joint[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 136: 279-291.

［11］ Fan K, Wang G Z, Xuan F Z, et al. Local failure behavior of a dissimilar metal interface region with mechanical heterogeneity[J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 59: 419-433.

［12］ Fan K, Wang G Z, Tu S T, et al. Geometry and material constraint effects on fracture resistance behavior of bi-material interfaces[J]. International Journal of Fracture, 2016, 201(2): 143-155.

［13］ 范凯, 乔琳. 薄壁异种金属高能束焊接结构界面区局部断裂行为研究[J]. 载人航天, 2025, 31(4):480-492.
Fan K, Qiao L. Local fracture behavior of thin-walled dissimilar high energy beam welded structure interface region[J]. Manned Spaceflight, 2025, 31(4):480-492 (in Chinese).

［14］ 范凯, 胡灏轶, 李慧明. 薄壁异种金属高能束焊接结构界面区拘束与断裂韧度的统一关联[J]. 载人航天, 2025, 31(6): 781-788.
Fan K, Hu H Y, Li H M. Unified correlation of constraints with fracture toughness of thin-walled dissimilar high energy beam welded structure interface region[J]. Manned Spaceflight, 2025, 31(6): 781-788 (in Chinese).

［15］ 范凯, 钟继如. 基于微小试样的薄壁异种金属高能束焊接结构界面区局部力学性能表征[J]. 载人航天, 2025, 31(2): 212-219.
Fan K, Zhong J R. Prediction of local mechanical properties in the interface region of thin-walled dissimilar high energy beam welded joint based on micro-specimen[J]. Manned Spaceflight, 2025, 31(2): 212-219 (in Chinese).

（责任编辑：高慧）