

FRC/钢嵌入式 T 型接头疲劳试验及可靠性分析*

陈国涛,梅志远,祝 熠

(海军工程大学 舰船与海洋学院,湖北 武汉 430033)

摘要:为了研究 FRC/钢嵌入式 T 型连接接头疲劳特性,采用真空成型工艺(VARTM)及缝合技术制作 T 型连接接头,利用 Letry 疲劳试验机对接头开展拉-拉疲劳试验。根据疲劳试验结果,研究了 T 型接头在拉-拉疲劳载荷作用下初始损伤特性及损伤演变规律;基于两参数 Weibull 分布模型,开展 T 型连接接头疲劳可靠性分析,拟合得到接头在不同应力水平下的疲劳寿命分布规律,给出接头在不同应力水平下疲劳可靠度函数,以及接头在指定可靠度下应力/寿命双对数曲线关系式($R\text{-ln}S\text{-ln}N$ 曲线)。结果表明, $\ln \ln[1/R(N)]$ 与 $\ln N$ 呈现良好的线性关系,T 型接头疲劳寿命服从 Weibull 分布;疲劳寿命可靠度双对数方程建立了可靠度、疲劳寿命以及疲劳应力的关系,可指导接头疲劳可靠性设计和工程应用。

关键词:嵌入式 T 型接头;缝合技术;拉-拉疲劳;初始损伤特性;两参数 Weibull 分布模型; $R\text{-ln}S\text{-ln}N$ 曲线

中图分类号:TH114;TB332

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2023)04-224-08



听语音
与作者互动
聊科研

Fatigue test and reliability analysis of FRC/steel embedded T-joint

CHEN Guotao, MEI Zhiyuan, ZHU Yi

(College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to study the fatigue characteristics of FRC/steel embedded T-joint, the vacuum forming process (VARTM) and stitching technology were used to make T-joint, and the tension-tension fatigue test was carried out on the joint using the Letry fatigue testing machine. According to the fatigue test results, the initial damage characteristics and damage evolution of T-joints under tension-tension fatigue load were studied; based on the two-parameter Weibull distribution model, fatigue reliability analysis of T-joint connection joints was carried out, and the distribution law of fatigue life of joints under different stress levels was fitted. The fatigue reliability function of joints under different stress levels was given, as well as the stress/life double logarithmic curve relationship ($R\text{-ln}S\text{-ln}N$ curve) of joints under specified reliability levels. The results show that $\ln \ln[1/R(N)]$ has a good linear relationship with $\ln N$, and the fatigue life of T-joints follows Weibull distribution; the double logarithmic equation of fatigue life reliability establishes the relationship between reliability, fatigue life and fatigue stress, which can guide the fatigue reliability design and engineering application of joints.

Keywords: embedded T-joint; stitch technology; tension-tension fatigue; initial damage characteristics; two parameter Weibull distribution model; the cure of $R\text{-ln}S\text{-ln}N$

先进复合材料具有较好的可设计性,其整体性设计可以有效降低连接件的数目以及过渡带的附加质量,从而有效降低整体结构设计的重量,节约装配成本^[1]。在舰船结构设计中,不可避免地出现复合材料与钢结构分离面的接合,并确保连接处具有一定的载荷传递能力及连续性^[2-3]。玻璃钢复合材料/钢 T 型胶结连接结构作为舰用复合材料整体化结构的重要组成部分,具有不影响复合材料元件强度特性、纤维连续性以及无摩擦腐蚀的优点,

已经受到广泛重视。国内相关研究人员对结构参数、材料体系等对 L 和 T 型接头静力学特性的影响规律及失效机理已有了较为深入的研究^[4-6]。但是在该连接结构中,整个黏结界面没有连续承载纤维,加上层间拉伸和剪切强度较低以及几何连接、黏结缺陷等不可避免地出现应力集中,连接区域即使在低应力承载状态下,也会因长期交变疲劳承载而产生初始缺陷,并进一步破坏接头的完整性和水密功能特性。因此,必须对接头开展相关载荷作用

* 收稿日期:2022-01-14

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(51479205);国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51609252);海军工程大学自主立项资助项目(2020505040)

作者简介:陈国涛(1990—),男,山东德州人,讲师,博士研究生,E-mail:1181590188@qq.com;

梅志远(通信作者),男,湖南常德人,教授,博士,博士生导师,E-mail:zhiyuan_mei@163.com

下的疲劳试验研究,获得可靠的试验结果,以有效评估其疲劳特性。然而,国内目前几乎还未进行任何这方面的研究工作。

文章研究对象为内嵌式T型胶结接头。为了解该接头疲劳特性,根据其承载特征,对其开展拉-拉疲劳特性试验研究。通过疲劳试验,探究了T型接头疲劳失效机理、疲劳寿命特征值等。Weibull分布是可靠性理论中的重要分布模型之一,能以较少的试样数量较为准确地表征不同类型产品的失效规律,如对于大对数机械设备、机电产品等^[7-8]。同时,由于Weibull分布在数学上具有良好的拟合特性,已有大量试验数据表明疲劳寿命较好地服从Weibull分布^[9-14]。基于Weibull分布模型特点,得出了T型接头在不同可靠度下的应力/寿命图谱,表明T型接头疲劳寿命较好地服从Weibull分布模型。此外,文章建立了接头疲劳可靠度、疲劳寿命、应力水平之间的关系。

1 T型接头试样制备及疲劳试验方案

1.1 T型接头试样制备

T型接头结构如图1所示。连接方案主要由钢制槽体、填充芯材、嵌入层合板以及平铺层合板四部分组成,其中,钢制槽体为45#钢;填充芯材为短切纤维;嵌入层合板和平铺层合板对应纤维织物均为E800多轴向布,采用0/90°正交铺层方式,平铺层厚度和嵌入层厚度均为6mm;成型树脂基体为QC-350环氧树脂。

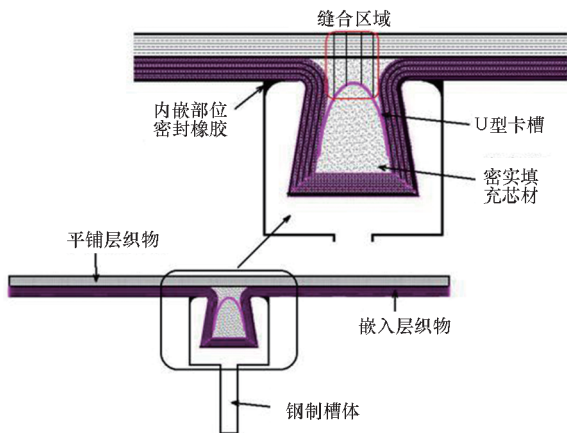


图1 T型接头结构形式

Fig.1 Structural style of T-joint

主要成型及制作工艺:向已加工好的钢制槽体内嵌入E800纤维织物,之后在密实填充部位填充短切纤维,在U型卡槽(材料为65Mn回火弹簧钢,卡槽两侧设有开孔)内部填充短切纤维,并用纤维丝束将卡槽与平铺层织物进行缝合,随后

将卡槽及内部包含的短切纤维一起塞入钢制槽体内部,此时,平铺层织物下端面应与内嵌织物上端面较好贴合,最后进行一次抽真空成型。模型试样固化成型后,在钢制槽体两端内嵌端面填充密封橡胶。

1.2 疲劳试验方案

根据T型接头工程应用背景,文章对其主要开展拉-拉疲劳特性试验研究。试验仪器采用Letry疲劳试验机;试验温度为15~20℃,跨距为200mm。

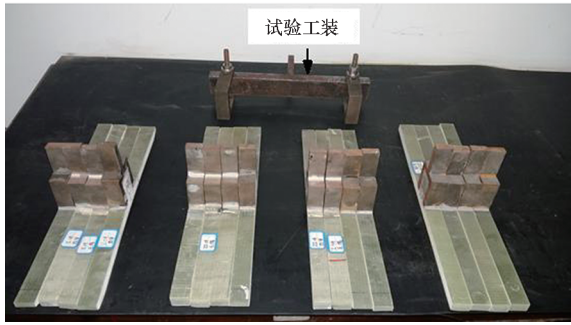
试验方案:恒幅载荷、正弦波加载方式,应力比 $R=0.1$;由于纤维增强复合材料具有高阻尼、低散热性能,不能将内部热量尽快散失,试样内部温度的升高将使材料发生热软化进而导致性能衰退,因此,对纤维增强复合材料进行疲劳性能测试时,加载频率将限制在非常低的频率,一般不超过5Hz^[7],同时,为了便于观察疲劳初始裂纹的产生及其扩展规律,本次试验疲劳加载频率取 $f=3$ Hz。由于T型接头在服役期间,其初始损伤特性是确保接头水密性能、抑制槽体腐蚀的关键,因此在疲劳过程中,只要接头紧固水密特性遭到破坏,就认为其疲劳失效。

根据GB/T 16779—2008《纤维增强塑料层合板拉-拉疲劳性能试验方法》,要求至少选取4个应力水平进行疲劳加载,且推荐使用静强度的80%、55%、40%、25%作为分级最大应力进行试验。本次试验中,取 $\gamma \times F$ ($F=1.23$ kN)作为分级加载的最大疲劳应力,其中,应力水平 γ 取值分别为0.80、0.70、0.55以及0.40,这是由于连接接头在工程设计中,一般取1.5作为设计安全系数,对应最大设计载荷为初始损伤载荷的67%,因此,为了研究连接接头在最大设计载荷工况下疲劳寿命,本文增加0.70的疲劳应力水平进行疲劳试验。由于采用0.25疲劳应力水平进行试验时,接头受力水平较低,试验周期较长,且本文疲劳试验重点研究接头在中高应力水平下疲劳性能,因此,不进行0.25疲劳应力水平下疲劳试验。疲劳加载工况如表1所示。T型接头疲劳试件及加载状态如图2所示。

表1 T型接头疲劳试验加载方案

Tab.1 Loading scheme of T-joint fatigue test

试样编号	$\sigma_{\min}/$ kN	$\sigma_{\max}/$ kN	$\sigma_m/$ kN	$\sigma_a/$ kN	加载频 率/Hz	应力 水平 γ
T1~T4	0.098	0.984	0.541	0.443	3	0.80
T5~T8	0.086	0.861	0.474	0.387	3	0.70
T9~T12	0.068	0.677	0.372	0.304	3	0.55
T13~T16	0.049	0.492	0.271	0.221	3	0.40



(a) 接头试验前状态

(a) State of joints before the test



(b) 疲劳试验状态

(b) Fatigue test condition

图 2 疲劳试验工装及加载状态

Fig. 2 Fatigue test tooling and loading conditions

表 1 中,在每个疲劳应力水平下,控制每组试验有效试样数量保持在 3 个以上,各接头产生初始裂纹对应的疲劳加载周次 N_i 、紧固水密特性失效对应的疲劳寿命 N 如表 2 所示。显然,在不同的应力水平下,4 个试样疲劳寿命离散度基本在

表 2 T 型接头疲劳寿命

Tab. 2 Fatigue life of T joints

应力水平 γ	试样编号	N_i	N
0.80	T1	228	4 068
	T2	196	4 396
	T3	204	4 431
	T4	216	5 023
0.70	T5	355	13 209
	T6	321	14 765
	T7	398	15 632
	T8	342	16 889
0.55	T9	452	57 960
	T10	403	60 896
	T11	416	64 519
	T12	432	68 562
0.40	T13	787	134 530
	T14	698	150 230
	T15	752	156 540
	T16	403	165 420

10% 以下,数据稳定性较好,因此,确定疲劳试验有效试样数量为 4 个合理可行。

表 1 中,疲劳特征值计算根据式(1)~(3)计算得出。

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (1)$$

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) \quad (2)$$

$$\sigma_a = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \quad (3)$$

其中: σ_{\max} 和 σ_{\min} 分别为循环中的最大应力与最小应力, $\sigma_{\max} = \gamma \times F$,其中 $F = 1.23$ kN 为接头静态初始拉伸强度; σ_a 和 σ_m 分别为应力幅值与应力均值; r 为应力比,本次疲劳试验取 $r = 0.1$ 。

2 试验结果与分析

试验表明,在各种拉伸疲劳应力水平下,试样初始裂纹产生部位、裂纹扩展形式以及最终损伤状态基本一致,如图 3 所示。以 T2 接头为例,对接头损伤过程做简要说明。T2 接头在疲劳加载初始阶段(加载周次在 50 左右),两侧密封胶与钢制槽体黏结界面完全剥离,但与复合材料层合板界面黏结良好;随着疲劳加载周次的增加,初始裂纹逐渐产生,出现在层合板与钢制槽体水平黏结界面处,并迅速向内扩展至槽口弧形过度区域,此时疲劳加载周次仅为 196 左右(裂纹①);当裂纹扩展至弧形过度区域时,裂纹扩展受到抑制,直至加载周次达到 800 附近时,密封芯材 U 型卡槽区域与两侧嵌入织物黏结界面出现肉眼可见的裂纹,且靠近槽口区域卡槽界面基本完全剥离(裂纹②);当加载周次达到 3 000 时,在拉伸疲劳载荷作用下,嵌入层织物与钢制槽体内壁黏结界面完全破坏,可以看到凹槽底部嵌入层织物与槽体底部明显剥离,随着加载周次增加,剥离现象越来越明显(裂纹③);与此同时,槽口附近内嵌层织物与密封芯材黏结界面处均出现损伤,且内嵌层织物裂纹沿弧形区域逐渐向外扩展,当裂纹扩展至与平铺层相交处时,认为试样紧固水密特性遭到破坏,试样失效(裂纹④)。此外,在加载周次达到 1 200 以后,弧形区域内嵌层织物已经出现层间损伤,但裂纹扩展较慢。

对疲劳失效后试样表面进行观察发现,复合材料层合板内部有明显的损伤,主要表现为凹槽两侧弧形过渡区域处层合板有明显的断裂、分层现象,如图 4 所示。这是由于两侧嵌入层织物受力可以等效为 L 型梁单元,平铺层织物等效于水

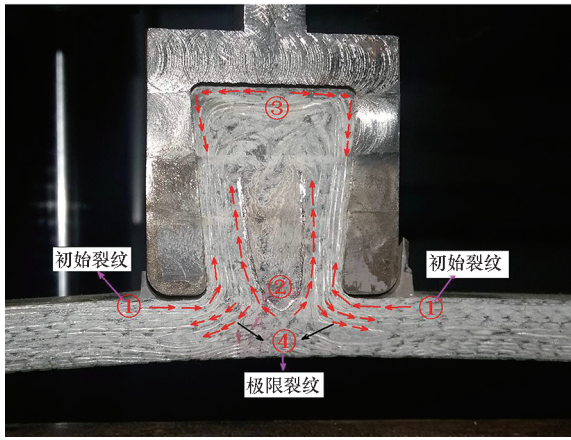


图 3 裂纹扩展形式

Fig. 3 Fatigue crack propagation

平梁单元,简化受力图如图 5 所示。由于嵌入部位层合板不能转动和移动,因此认为该部位为固支约束,见简化图中红色部位。由图可知,在疲劳载荷作用下,当嵌入层与平铺层界面黏结良好、变形协调时,弧形转角区域应力集中比较严重,就会导致嵌入层与平铺层织物均出现层间损伤。随着疲劳加载周期的增加,一方面,层间裂纹数量逐渐增加,另一方面裂纹逐渐扩展,从而导致部分纤维织物发生断裂,出现发白现象。

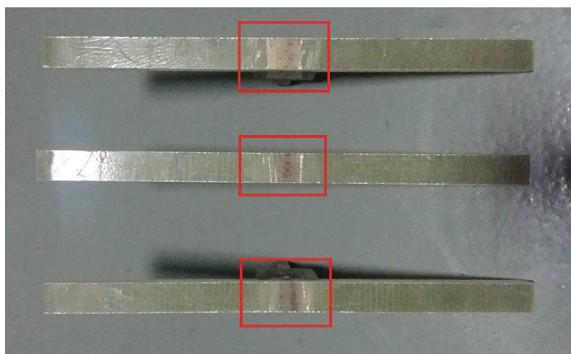


图 4 疲劳后层合板状态

Fig. 4 State of the laminate after fatigue

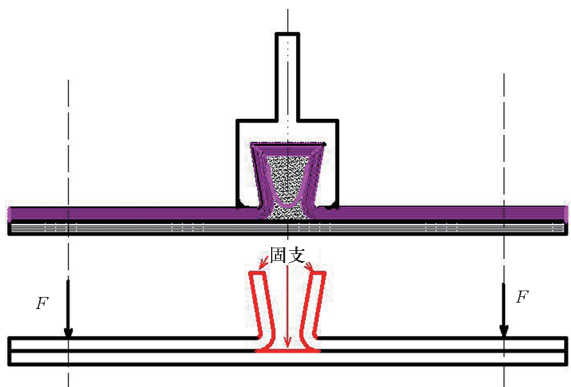


图 5 层合板受力等效原理图

Fig. 5 Principle of equivalent of laminated plates

3 疲劳寿命评估

3.1 Weibull 理论分布模型

疲劳寿命 N 的三参数 Weibull 分布模型失效概率密度表达式为

$$f(N) = \frac{m}{N_T - N_0} \left(\frac{N - N_0}{N_T - N_0} \right)^{m-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{N - N_0}{N_T - N_0} \right)^m \right], \quad N_0 \leq N \leq +\infty \quad (4)$$

式中主要包含三个参变量:形状参数 m ;尺度参数 N_T ,为 36.8% 的置信度;最小寿命参数 N_0 ,其中 $N_T - N_0$ 称为特征寿命值。显然,三参数 Weibull 分布是一种较为完善的分布,但三个分布参数进行估计就导致计算过程比较复杂或者增加了试验工作量,进而导致其应用受到一定程度的限制。为了简化参数估计,同时又使得计算结果相对可靠,本文令最小寿命参数 $N_0 = 0$,而形状参数 m 和尺度参数 N_T 直接通过线性回归即可得出。于是三参数 Weibull 分布简化为两参数 Weibull 分布,即式(4)变形为

$$f(N) = \frac{m}{N_T} \left(\frac{N}{N_T} \right)^{m-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{N}{N_T} \right)^m \right], N \geq 0 \quad (5)$$

即疲劳寿命服从 $T \sim W(m, N_T)$,此时,对应接头疲劳寿命的分布函数为

$$F(N) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{N}{N_T} \right)^m \right], N \geq 0 \quad (6)$$

则可靠度函数 $R(N)$ 为

$$R(N) = 1 - F(N) = \exp \left[- \left(\frac{N}{N_T} \right)^m \right]$$

或

$$\frac{1}{R(N)} = \exp \left[\left(\frac{N}{N_T} \right)^m \right], N \geq 0 \quad (7)$$

对式(7)两边同时取双对数得

$$\ln \ln \left[\frac{1}{R(N)} \right] = m [\ln N - \ln N_T] = m \ln N - m \ln N_T \quad (8)$$

不妨令式(8)中 $\ln \ln [1/R(N)] = Y, X = \ln N, b = m \ln N_T$,即式(8)变形为

$$Y = mX - b \quad (9)$$

显然,由式(9)可知, Y 与 X 之间呈线性关系。因此,基于 Weibull 分布模型理论可知,当 T 型接头疲劳寿命转换为 Y 与 X 形式时,只要数据点可以拟合成良好的线性关系(相关系数 R^2 趋近 1),就可以说明 T 型接头疲劳寿命服从 Weibull 分布。

由 Weibull 分布理论可知,疲劳寿命 N 对应疲劳寿命可靠度为

$$p = R(N) = 1 - \frac{i}{k + 1} \quad (10)$$

式中: k 为试样数量; i 为序号。

3.2 疲劳寿命可靠度函数

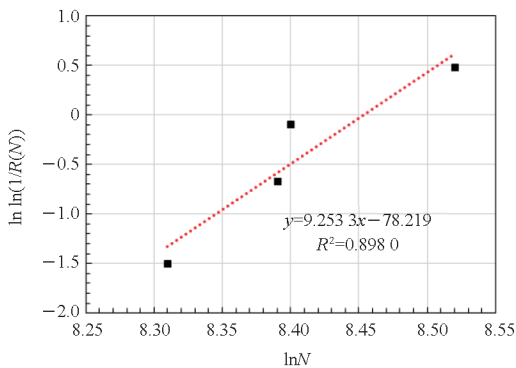
对试验测试结果进行计算整理, 如表 3 和图 6 所示, 表中疲劳寿命按从小到大排序。

表 3 Weibull 分布参数

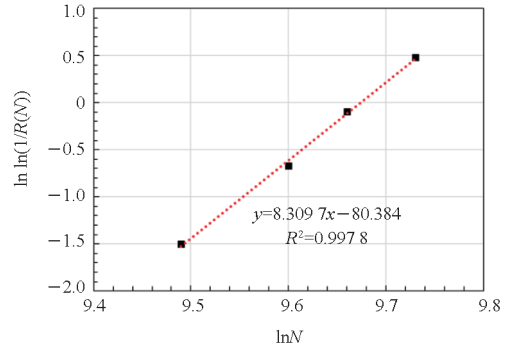
Tab. 3 Parameters of Weibull distribution

应力水平 γ	i	N	p	$X_i = \ln N_i$	$y_i = \ln \ln \left[\frac{1}{p} \right]$	相关系数 R^2
0.80	1	4 068	0.8	8.31	-1.50	0.898 0
	2	4 396	0.6	8.39	-0.67	
	3	4 431	0.4	8.40	-0.09	
	4	5 023	0.2	8.52	0.48	
0.70	1	13 209	0.8	9.49	-1.50	0.997 8
	2	14 765	0.6	9.60	-0.67	
	3	15 632	0.4	9.66	-0.09	
	4	16 889	0.2	9.73	0.48	
0.55	1	57 960	0.8	10.97	-1.50	0.971 9
	2	60 896	0.6	11.02	-0.67	
	3	64 519	0.4	11.07	-0.09	
	4	68 562	0.2	11.14	0.48	
0.40	1	134 530	0.8	11.81	-1.50	0.985 2
	2	150 230	0.6	11.92	-0.67	
	3	156 540	0.4	11.96	-0.09	
	4	165 420	0.2	12.02	0.48	

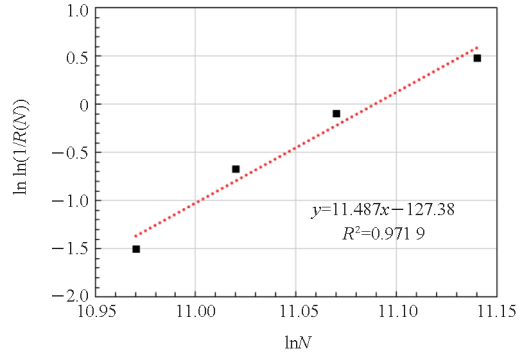
由表 3 和图 6 可知, 接头疲劳寿命随着疲劳应力水平的增加而减少; $\ln \ln \left[\frac{1}{R(N)} \right]$ 与 $\ln N$ 呈现良好的线性关系, 说明 T 型接头疲劳寿命可以较好地服从 Weibull 理论分布模型。



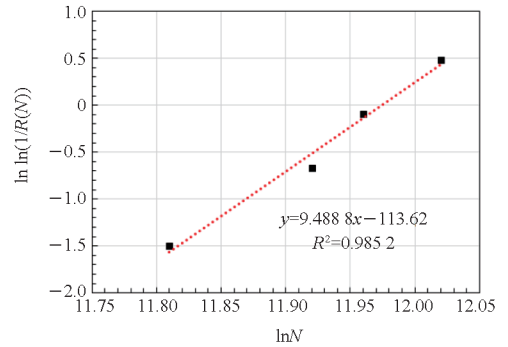
(a) $\gamma = 0.80$



(b) $\gamma = 0.70$



(c) $\gamma = 0.55$



(d) $\gamma = 0.40$

图 6 各应力水平下 $\ln \ln \left[\frac{1}{R(N)} \right]$ 与 $\ln N$ 之间的关系

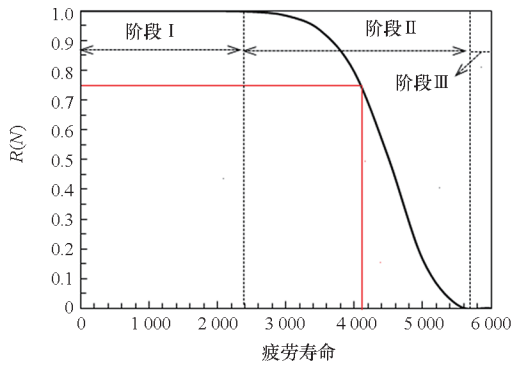
Fig. 6 Relationship between $\ln \ln \left[\frac{1}{R(N)} \right]$ and $\ln N$ at different stress levels

根据拟合结果, 基于式(7), 得出各应力水平下接头可靠度函数以及可靠度 $R(N)$ 与疲劳寿命 N 的函数关系曲线分别如表 4 及图 7 所示。

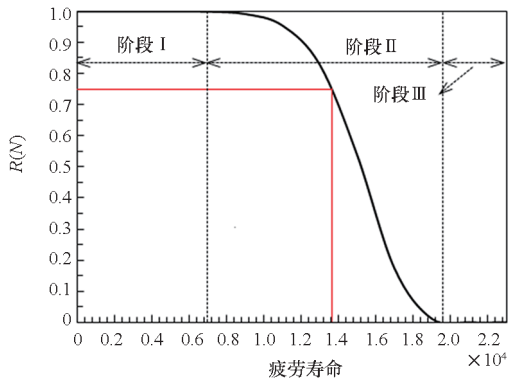
表 4 可靠度函数表达式

Tab. 4 Reliability function expression

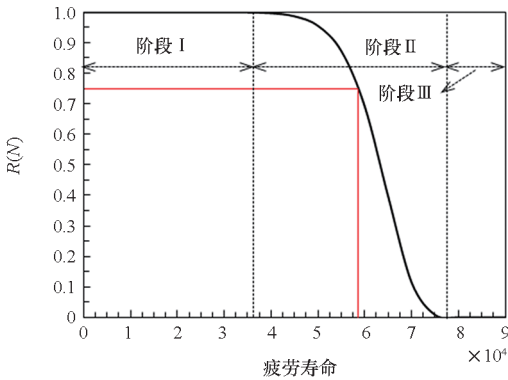
应力水平 γ	m	$b = m \ln N_T$	$\ln N_T$	N_T	$R(N) = \exp \left[- \left(\frac{N}{N_T} \right)^m \right]$
0.80	9.232 6	78.046	8.45	4 690.56	$\exp \left[- \left(\frac{N}{4 690.56} \right)^{9.232 6} \right]$
0.70	8.299 3	80.285	9.67	15 894.17	$\exp \left[- \left(\frac{N}{15 894.17} \right)^{8.299 3} \right]$
0.55	11.47	127.19	11.09	65 442.53	$\exp \left[- \left(\frac{N}{65 442.53} \right)^{11.47} \right]$
0.40	9.476 4	113.48	11.98	158 738.20	$\exp \left[- \left(\frac{N}{158 738.20} \right)^{9.476 4} \right]$



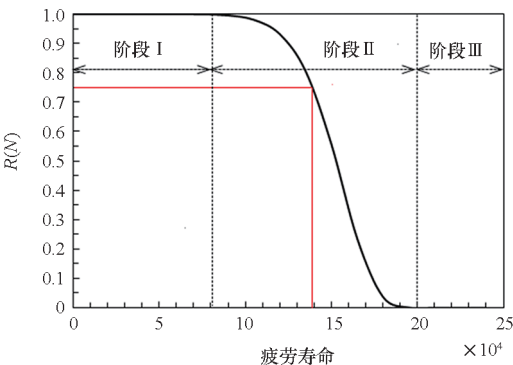
(a) $\gamma = 0.80$



(b) $\gamma = 0.70$



(c) $\gamma = 0.55$



(d) $\gamma = 0.40$

图7 疲劳寿命可靠度函数

Fig.7 Fatigue life reliability function

由图7可知:

1) 可靠度随着疲劳寿命的增加呈现三阶段变化趋势(I、II和III)。阶段I占整个工作寿命的1/4~1/3,此时,接头疲劳可靠度水平很高,接近于1,说明接头在该阶段产生的裂纹对接头功能可靠性水平影响不大(对应图3中裂纹扩展①、②);阶段II中,接头疲劳寿命可靠度迅速降低,说明在该阶段疲劳裂纹迅速扩展并累积,接头出现明显的可见裂纹,接头功能可靠性水平受到显著的影响,该阶段持续时间约占工作周期的1/3~1/2(对应图3中裂纹扩展③);阶段III复合材料层间裂纹进一步扩展,直至结构疲劳失效(对应图3中④)。

2) 当规定T型接头疲劳寿命可靠度 $R(N) = 1.5 \times 0.5 = 0.75$ 作为维修指标(为安全起见,疲劳寿命取1.5倍安全系数,见图中红色部分)时,此时接头在0.80、0.70、0.55、0.40应力水平下的使用寿命分别为4 098.4、13 678.6、58 706.47、139 182次,即在给定应力水平下,接头工作周期分别达到上述寿命值时,认为接头已经损伤,失去功能特性,需要及时维修或更换。

3.3 R-lnS-lnN 曲线

R-S-N曲线是成组不同可靠度下的S-N曲线集合,对疲劳寿命预测具有较强的工程实践与指导意义^[8]。本文基于两参数Weibull分布模型,分析T型接头疲劳寿命特征及对应的疲劳的可靠度。

基于表4给出的结果,得出指定应力水平下,疲劳寿命与可靠度之间的关系,如表5及图8所示。表5给出了T型接头在最大疲劳应力下,疲劳可靠度(0.5~0.95)对应的疲劳寿命值,图8给出了指定可靠度下的双对数应力/寿命模型。

表5 各应力水平下接头寿命与可靠度之间的关系

Tab.5 Relationship between fatigue life and reliability under each stress lever

R(N)	疲劳应力最大值 S			
	0.98 kN	0.86 kN	0.68 kN	0.49 kN
0.99	2 849.95	9 130.96	43 821.00	97 692.44
0.95	3 400.24	11 112.46	50 512.41	116 027.30
0.90	3 675.95	12 119.32	53 784.02	125 184.12
0.80	3 987.21	13 266.23	57 420.52	135 500.41
0.70	4 194.99	14 037.52	59 817.11	142 375.38
0.60	4 361.41	14 658.42	61 720.03	147 875.71
0.50	4 508.00	15 207.53	63 384.43	152 715.99

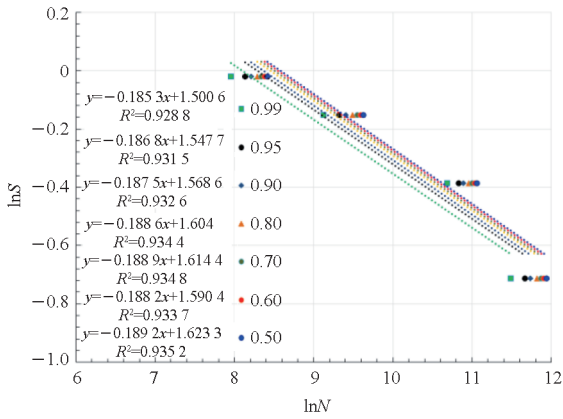


图 8 双对数应力/寿命疲劳方程

Fig. 8 Double logarithmic stress/life fatigue equation

显然,由图 8 可知:双对数疲劳方程相关系数接近 1,说明其线性度比较好;接头在各应力水平下的 $\ln S$ - $\ln N$ 关系式,即 R - $\ln S$ - $\ln N$ 曲线方程,如接头疲劳寿命可靠度 $R(N)$ 为 0.99、0.9 时,对应曲线方程分别为 $\ln S = -0.1853 \ln N + 1.5006$ 和 $\ln S = -0.1875 \ln N + 1.5686$ 。

4 结论

通过开展以上研究工作,得出以下结论:

1) 在不同应力水平下,T 型接头拉伸疲劳失效形式基本一致。主要表现为层合板与钢制槽体水平黏结界面首先开裂,并迅速扩展至槽口弧形过渡区域;最终失效模式均为嵌入层织物与平铺层织物黏结界面出现明显损伤裂纹,结构刚度特性损失严重,接头失去功能特性。

2) 采用 Weibull 理论分布模型证明 $\ln \ln \left[\frac{1}{R(N)} \right]$ 与 $\ln N$ 呈现良好的线性关系,表明 T 型接头疲劳寿命服从 Weibull 分布。对接头疲劳寿命可靠度进行分析,拟合出各应力水平下,接头的疲劳可靠度表达式,并指出疲劳可靠度随着疲劳寿命的增加呈现三阶段变化趋势。

3) 给出了考虑疲劳寿命可靠度的双对数疲劳方程,建立了可靠度、疲劳寿命以及疲劳应力的关系,为接头疲劳寿命预测及可靠性评价提供依据。

参考文献 (References)

[1] 陈国涛,梅志远,李华东. FRP/钢 T 形连接结构优化设计及拉伸初始损伤特性研究[J]. 复合材料科学与工程, 2022(9): 35-40.
CHEN G T, MEI Z Y, LI H D. Optimization design and

initial tensile damage characteristics of FRP/steel T-shaped connection structure [J]. Composites Science and Engineering, 2022(9): 35-40. (in Chinese)

- [2] LIU X L, ZHENG G, LUO Q T, et al. Fatigue behavior of carbon fibre reinforced plastic and aluminum single-lap adhesive joints after the transverse pre-impact [J]. International Journal of Fatigue, 2021, 144: 105973.
- [3] 张洪池,刘肖光,江婧,等. 复合材料与金属混合连接构件拉伸性能研究[J]. 化工新型材料, 2021, 49(增刊 1): 293-295.
ZHANG H C, LIU X G, JIANG J, et al. Study on tensile property of composite and metal mixed connection[J]. New Chemical Materials, 2021, 49(Suppl 1): 293-295. (in Chinese)
- [4] 梅志远,杨坤,周晓松,等. FRC/钢 T 型燕尾槽连接结构抗弯损伤机理及强度特性研究[J]. 材料科学与工艺, 2014, 22(3): 114-118.
MEI Z Y, YANG K, ZHOU X S, et al. The damage mechanism and bending strength characteristic of T type swallow-tailed slot joint of FRC/steel[J]. Materials Science and Technology, 2014, 22(3): 114-118. (in Chinese)
- [5] 梅志远,谭大力,杨坤. FRC/钢燕尾槽单向连接结构强度特性及损伤机理[J]. 材料科学与工艺, 2012, 20(1): 144-148.
MEI Z Y, TAN D L, YANG K. The design and mechanical characteristic research of swallow-tailed slot joint of FRC/steel[J]. Materials Science and Technology, 2012, 20(1): 144-148. (in Chinese)
- [6] 张志强,梅志远,李华东. FRC/钢嵌入式 L 型单向接头改进设计及失效机理[J]. 海军工程大学学报, 2015, 27(6): 31-35.
ZHANG Z Q, MEI Z Y, LI H D. Structure design and failure mechanism study of improved embedded L type joint [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2015, 27(6): 31-35. (in Chinese)
- [7] 张志华. 可靠性理论及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
ZHANG Z H. Reliability theory and engineering application[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [8] 张响鹏,刘伟庆,万里,等. 泡桐木夹层梁的弯曲疲劳试验[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2014, 36(5): 76-82.
ZHANG X P, LIU W Q, WAN L, et al. Bending fatigue experiment on paulownia core sandwich composite beam[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2014, 36(5): 76-82. (in Chinese)
- [9] PORTALÉS R M, DEL MAR BOCHONS SANIA M, KLEMENC J. Theoretical framework for estimating a product's reliability using a variable-amplitude loading spectrum and a stress-based approach[J]. fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2018, 41(8): 1662-1673.
- [10] LAN C M, BAI N N, YANG H T, et al. Weibull modeling of

- the fatigue life for steel rebar considering corrosion effects[J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 111: 134 - 143.
- [11] 赵永翔, 梁红琴. 基于两参数 Weibull 分布的概率疲劳 $S-N$ 曲线模型 [J]. *机械工程学报*, 2015, 51 (20): 208 - 212.
- ZHAO Y X, LIANG H Q. Modeling of the probabilistic fatigue $S-N$ curves using the two parameter Weibull distribution[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(20): 208 - 212. (in Chinese)
- [12] HANIF A, KIM Y, PARK C. Numerical validation of two-parameter Weibull model for assessing failure fatigue lives of laminated cementitious composites: comparative assessment of modeling approaches[J]. *Materials*, 2018, 12(1): 110.
- [13] 杨冬鹏, 郭卫民, 王宝民. 基于 Weibull 模型的混凝土冻融损伤寿命预测及应用[J]. *水利学报*, 2022, 53(8): 977 - 983.
- YANG D P, GUO W M, WANG B M. Prediction and application of freezing-thawing damage life of concrete based on Weibull model [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(8): 977 - 983. (in Chinese)
- [14] 吴毅彬, 许丽华, 金国芳, 等. 基于 Weibull 分布函数的 FRP 退化模型研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2022(6): 10 - 16.
- WU Y B, XU L H, JIN G F, et al. Study on deterioration model of fiber reinforced polymer by Weibull probability distribution [J]. *Composites Science and Engineering*, 2022(6): 10 - 16. (in Chinese)