

接触件结构参数对电连接器接触疲劳寿命的影响分析^{*}

姚胜辉¹ 胡 姣² 龚成平³ 何 锋¹

(1. 贵州大学机械工程学院 贵阳 550025; 2. 贵州华烽电器有限公司 贵阳 550009;
3. 贵州经贸职业技术学院 贵阳 550025)

摘 要: 在工业、航空航天及国防等众多系统中,电连接器作为基础性元件,其主要的失效形式是接触失效。为了提高电连接器接触件的接触可靠性,将对接触件进行接触情况与接触疲劳寿命展开研究,利用 ABAQUS 软件对接触件的插拔特性进行运动仿真,得出接触件的插拔力、接触压力变化情况以及最大应力分布情况;并以单次插拔仿真试验的接触状态作为边界条件,利用 FE-SAFE 软件对接触件进行接触疲劳寿命预测;最后基于有限元仿真,分析插孔结构的结构参数对接触性能与接触疲劳寿命的影响程度。结果表明,簧片长度、簧片厚度以及开口量对接触性能与接触疲劳寿命都有显著的影响,其中,开口量对接触性能与接触疲劳寿命的影响程度最大。

关键词: 电连接器;接触件;有限元;接触疲劳;寿命

中图分类号: TN03 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6050

Analysis of influence of contact structural parameters on contact fatigue life of electrical connectors

Yao Shenghui¹ Hu Jiao² Gong Chengping³ He Feng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;
2. Guizhou Huafeng Electric Appliance Co., Ltd., Guiyang 550009, China;
3. Guizhou Vocational and Technical College of Economics and Trade, Guiyang 550025, China)

Abstract: In many systems such as industry, aerospace and defense, electrical connectors are fundamental components, and their main failure form is contact failure. In order to improve the contact reliability of electrical connector contacts, this paper will study the contact conditions and contact fatigue life of the contact parts, and use ABAQUS software to conduct motion simulation on the insertion and withdrawal characteristics of the contact parts, and obtain the insertion and withdrawal force, contact pressure change and maximum stress distribution of the contact parts. FE-SAFE software is used to predict the contact fatigue life of the contact parts by taking the contact state of the single plug and pull simulation test as the boundary condition. Finally, based on the finite element simulation, the influence degree of the structural parameters of the jack structure on the contact performance and contact fatigue life is analyzed. The results show that the length of reed, the thickness of reed and the number of openings have significant effects on the contact performance and contact fatigue life, among which the number of openings has the greatest effect on the contact performance and contact fatigue life.

Keywords: electrical connector; contact part; finite element analysis; contact fatigue; fatigue life

0 引 言

电连接器作为先进装备系统中的基础性元件,其接触

件对电信号和电能的稳定传输发挥着至关重要的作用^[1]。接触件的接触性能将会直接影响到整机设备的稳定运行,因此,关于接触件可靠性的研究成为了众多研究人员关注

收稿日期:2024-10-21

^{*} 基金项目:贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2023]一般 318)资助

的焦点。

近年来,国内外众多学者聚焦于电连接器的失效模式、插拔特性、结构优化以及可靠性等方面展开研究。针对电连接器的失效问题,文献[2]结合热循环工况,设计了一种电连接器热循环加速试验方案并预测出样品的热循环寿命。文献[3]根据连接器接触面的相对位移规律构造特征参数数据集,并采用基于深度信念网络评估模型对电连接器的退化状态进行了评估分析。针对电连接器的插拔特性问题,一部分研究者从接触件的接触性能展开研究,文献[4-7]利用 ANSYS 软件对接触件的参数化有限元模型进行运动仿真,得出接触件各结构参数对接触状态的影响,并确定了关键影响参数(即簧片长度、缩口量以及簧片厚度对接触应力影响最为显著)。文献[8]通过结合有限元仿真和试验,探究了机械应力与接触表面粗糙度对接触电阻的影响。另一部分研究者从接触件的结构优化展开研究,文献[9-11]通过有限元仿真结合试验分析,得出接触件的插拔特性,并通过改变接触件结构参数来优化插拔性能。此外,也有研究者对接触件可靠性展开了研究,文献[12]设计了一种连接器导通绝缘耐压自动测试系统,可快速准确地检测连接器的绝缘性能,提高了测试效率和测试可靠性。文献[13-14]建立了接触件的接触疲劳寿命仿真计算模型,并利用 ABAQUS 软件和 FE-SAFE 软件仿真计算得出接触件的接触疲劳寿命。文献[15]建立了微动循环工况下接触电阻和接触寿命的预测模型,研究分析了微动磨损对接触寿命的影响。针对微动磨损问题,文献[16]通过优化接触对的法向力及数量来提高接触的可靠性。

然而,目前考虑接触件结构参数对电连接器疲劳寿命影响却鲜有研究。为了对电连接器的可靠性展开进一步研究,本文基于仿真技术,分析接触件的结构参数(簧片长度、缩口量以及簧片厚度)对其插拔性能和接触疲劳寿命的影响,对后续的接触件设计与可靠性分析具有参考意义。

1 接触件插拔特性理论分析

1.1 插针的插拔力理论计算模型

选用某型 GJB599 III 系列连接器通用的 24 号接触件为研究对象,其结构如图 1 所示。接触件在插拔过程中,由缩口处理后的插孔簧片发生弹性变形来提供接触压力,确保插孔与插针的可靠接触。

为分析接触件在插拔过程中,其结构参数与接触压力的关系,可将其接触结构简化为悬臂梁模型进行分析,如图 2 所示。

由图 2(a)可知,接触件的接触压力 F 表示为:

$$F = \frac{3EI\delta}{L^3} \quad (1)$$

式中: F 为插孔簧片发生弹性变形时产生的接触压力; E 为插孔材料的弹性模量; I 为插孔簧片横截面的惯性矩; δ

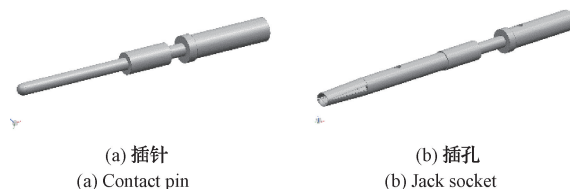
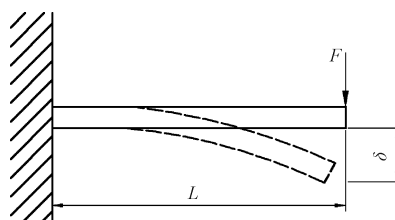
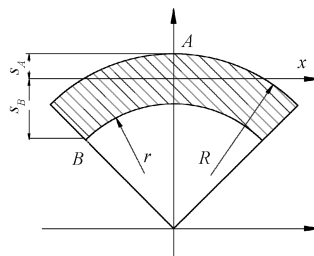


图 1 接触件结构示意图

Fig. 1 Contact structure diagram



(a) 悬臂梁简化模型
(a) Simplified model of cantilever beam



(b) 簧片截面惯性矩
(b) Jack reed section moment of inertia

图 2 接触件结构的简化力学模型

Fig. 2 Simplified mechanical model of contact structure

为插孔簧片变形时的挠度; L 为插孔簧片的长度。

在插合过程中,插针与插孔接触面之间的力由摩擦力 F_t 和法向接触压力 F_n 组成,接触表面的摩擦因数为 μ ,则有 $F_t = \mu F_n$ 。如图 3 所示,对插针进行受力分析,其接触压力记为 F ,则 F 可表示为:

$$F = F_n \cos \alpha - F_t \sin \alpha \quad (2)$$

式中: α 为摩擦力与插针轴线的夹角。

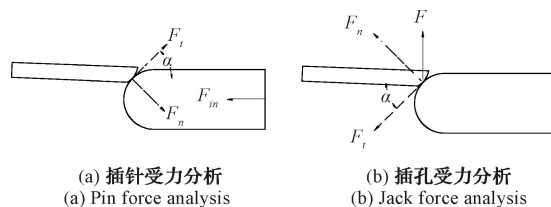


图 3 接触件插入过程受力分析

Fig. 3 Force analysis of contact insertion process

分析图 3 可得,插孔发生弹性变形时产生的接触压力 F 与插针的插入力 F_{in} 可表示为:

$$F_{in} = F \frac{\tan \alpha + \mu}{1 - \mu \tan \alpha} \quad (3)$$

同理,在拔出过程中,如图4所示,对插针进行受力分析,其拔出力记为 F_{ex} ,则 F_{ex} 可表示为:

$$F_{ex} = F \frac{\mu - \tan \alpha}{1 + \mu \tan \alpha} \quad (4)$$

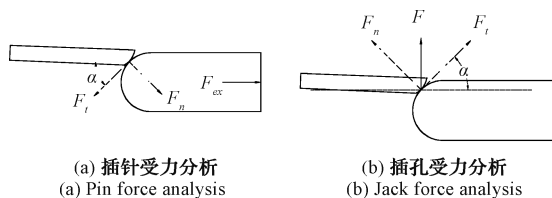


图4 接触件拔出过程受力分析
Fig. 4 Force analysis of contact during pulling out

当接触区域发生在插针头部与插孔内孔圆角处时,接触的压力角 α 会随着插入量 s 变化,而且与插针头部半径 r_p 、插孔内孔圆角半径 r_j 有关,即 α 可表示为:

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\sin \alpha_0 - \frac{s}{r_p + r_j} \right) \quad (5)$$

式中: α_0 为 α 的初始值。

$$\alpha_0 = \cos^{-1} \left(\frac{r_p + r_j - \delta}{r_p + r_j} \right) \quad (6)$$

根据式(6)可知,当插入量为 s 时,插孔簧片变形时产生的挠度 δ 可表示为:

$$\delta = \begin{cases} (r_p + r_j)(\cos \alpha - \cos \alpha_0), & 0 < s < (r_p + r_j) \sin \alpha_0 \\ (r_p + r_j)(1 - \cos \alpha_0), & s \geq (r_p + r_j) \sin \alpha_0 \end{cases} \quad (7)$$

通过计算上述理论公式,可得出插针的插入力与拔出随插入量的变化趋势。

1.2 插孔簧片的根部应力理论计算模型

由上述简化模型可知,接触对产生的接触压力 F 对插孔簧片根部的弯矩最大,即可表示为:

$$M = F \cdot L \quad (8)$$

在簧片根部的横截面上,最大压应力出现在距离中性层轴最远的上端点A处,而最大拉应力出现在距离中性层轴最远的下端点B处,如图2(b)所示。则最大压应力与拉应力可表示为:

$$\sigma_{压} = \frac{M \times S_A}{I_x} \quad (9)$$

$$\sigma_{拉} = \frac{M \times S_B}{I_x} \quad (10)$$

2 接触件单次插拔有限元仿真

2.1 建立有限元模型

为进一步分析接触件插拔过程中的接触情况,采用ABAQUS软件对其单次插拔进行有限元仿真分析。如图5所示,由于接触件为对称结构,故可以将其简化为1/4模型进行仿真分析。

2.2 接触件材料参数设置

接触件的插针与插孔均采用H62黄铜制成,其材料



图5 接触件有限元模型
Fig. 5 Finite element model of contact

属性如表1所示。

表1 接触件的材料属性
Table 1 Material properties of contacts

材料	密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	泊松比	屈服强 度/MPa	抗拉强度 /MPa
H62	8 430	106	0.324	240	600

2.3 模型网格划分

为了使仿真结果更为精确,网格的质量与数量需要合理控制,网格划分的大小、疏密、形状等会成为影响仿真结果的重要因素。接触件网格细化如图6所示,由于插针与插孔的形状比较复杂,因此网格单元选用的是修正的二阶四面体网格单元C3D10M,这样可以精确地计算接触表面的接触压力。在分析接触问题时,应当对应力集中的地方和接触表面的网格进行细密划分,保证模型计算的准确性;而对非关键的地方可以适当进行网格简化,从而提高计算效率。因此,在对插针与插孔网格划分前需要对模型进行区域分割,然后再对每一部分进行网格划分。插针的接触表面受到较大的接触压力,因此将插针发生接触轴段的网格尺寸设置为0.05 mm,对其非接触轴段的网格调整尺寸为0.08 mm;插孔的接触表面以及簧片根部的应力较大,因此将插孔簧片的网格尺寸设置为0.04 mm,而对其端部实体的网格尺寸调整为0.08 mm。

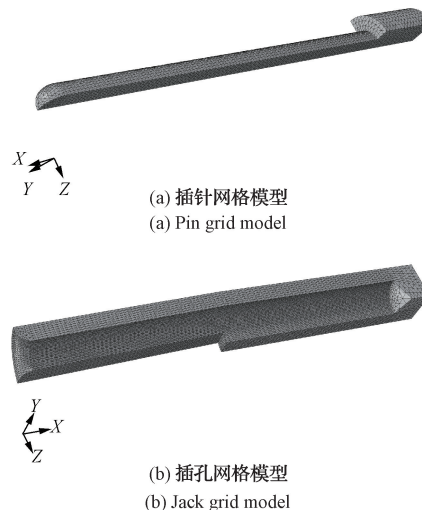


图6 接触件网格细化
Fig. 6 Contact mesh refinement

2.4 仿真条件设置

为使仿真结果更加接近实际情况,仿真条件结合了接

触件的实际插拔过程,合理设置其分析步、相互作用以及边界条件。

接触件的分析步设置,如表 2 所示。

表 2 分析步设置			
Table 2 Analysis step setting			
分析步	时间/s	几何非线性	子步
Step-insert	1	ON	1 000
Step-withdraw			

接触表面的相互作用设置,如表 3 所示。

表 3 接触面相互作用设置		
Table 3 Contact surface interaction settings		
设置对象	设置值	原因
接触属性	接触摩擦且摩擦系数为 0.16	插拔过程中接触对之间存在无润滑摩擦
	摩擦公式:罚	保证求解过程更加稳定,容易收敛
接触面	主表面:插针的头 部半球面及圆柱面	在面-面接触类型中,主面可以穿透到从面内,但从面不能穿透到主面内,因此需要结合接触对的实际位移情况选择接触的主、从面
	从表面:插孔的圆 角面及内孔表面	

边界条件设置,如表 4 所示。

表 4 边界条件设置		
Table 4 Boundary condition setting		
设置对象	设置值	原因
插针与插孔对 称面	无摩擦对称 约束	由于简化对称模型,需要在仿真时还原真实的受力情况
插孔根部端面	固定约束	仿真过程中,模拟插孔被固定
插针根部端面	轴向强迫位 移约束	模拟插针沿轴向匀速位移
插入量/mm	5	

2.5 仿真结果分析

接触件插拔力随插入量的变化趋势如图 7 所示,从 ABAQUS 软件的仿真结果中可以发现,接触件刚开始接触时,插入力迅速增大,最大达到 0.704 N,这是由于插孔簧片的变形与挠度在逐渐增加,且接触平面与插入力之间的夹角在不断接近接触表面的压力角,使得接触表面达到短暂的临界滑动状态,即达到最大静摩擦力状态;随着插入量的增加,插孔簧片的变形与挠度都趋于稳定状态,此时接触表面的接触形式为滑动摩擦,使得插入力基本稳定在 0.429 N。

当接触件插拔进入稳定阶段时,插孔簧片根部位置的等效应力较大,最大值达到 462.3 MPa,如图 8、9 所示。

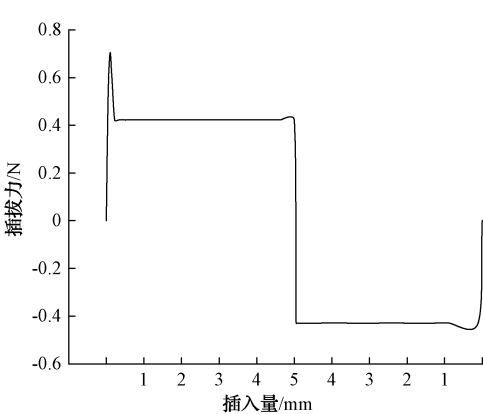
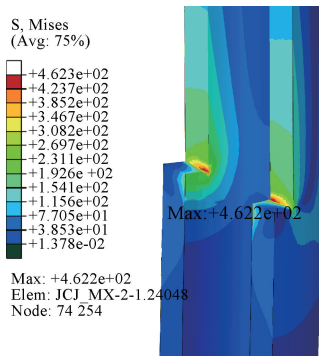
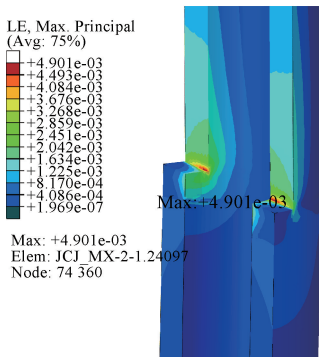


图 7 接触件插拔力的仿真结果
Fig. 7 Simulation results of the insertion and withdrawal force of the contact



(a) 应力分布云图
(a) Distribution of equivalent stress



(b) 应变分布云图
(b) Distribution of equivalent strain

图 8 插孔簧片根部的应力应变云图

Fig. 8 Stress-strain cloud map of the root of the jack reed

该部位的应力值已超过了材料屈服应力较多,容易引起簧片根部的塑性变形,一开始可能会使接触面的压力降低,导致接触电阻增大,随着插拔的次数不断增加,该部位容易发生疲劳断裂,最终造成接触失效。因此,为了预测接触件的接触寿命,需要重点关注插孔簧片根部位置的疲劳寿命。

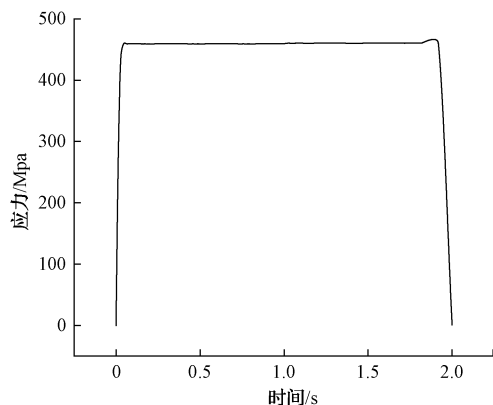


图9 插孔簧片根部等效应力变化曲线

Fig. 9 Curve of equivalent stress change at the root of the jack reed

3 接触件疲劳寿命分析

3.1 接触件疲劳寿命评估模型

考虑到插孔采用的 H62 黄铜属于韧性材料,可采用

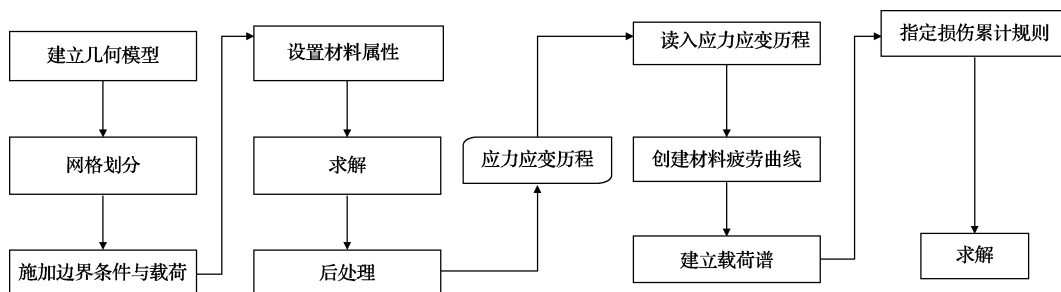


图10 接触疲劳寿命仿真流程

Fig. 10 Contact fatigue life simulation flow

料疲劳性能,即以材料的抗拉强度 600 MPa 和弹性模量 106 000 MPa 为输入进行估算材料疲劳性能参数。考虑到接触件平均应力应变的影响,疲劳算法需要采用 Brown Miller-Morrow 平均应力准则对其修正。材料的表面粗糙度是反映零件表面微观几何形状误差的一项指标,它与应力集中也有很大的联系,表面粗糙度越大,应力集中就越严重,因此根据材料表面处理情况在 FE-SAFE 中选择零件的表面粗糙度范围为 0.25~0.6 μm 。在载荷设置中,将 ABAQUS 仿真过程中两个分析步的增量步应力应变结果按时间顺序导入 Block 模块来生成载荷谱。

FE-SAFE 软件的仿真结果表明,接触件插孔的疲劳寿命仿真结果为 6 652.732 次,且发生疲劳损伤的位置与 ABAQUS 软件仿真中最大应力应变位置吻合。如图 11 所示,随着插拔次数增加,插孔簧片的根部处出现了严重的疲劳损伤,最终导致该部位的失效。

4 接触件结构参数对接触性能及疲劳寿命的影响

接触件的结构参数对接触对的插拔力以及应力分布等接触性能都具有重要的影响,进而影响到接触的可靠

Brown-Miller 临界平面法进行疲劳寿命分析。Brown-Miller 应变-寿命方程为:

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + \frac{\Delta\epsilon_n}{2} = 1.65 \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^b + 1.75 \epsilon_f (2N_f)^c \quad (11)$$

式中: $\Delta\gamma_{\max}$ 为最大剪应变范围; $\Delta\epsilon_n$ 为最大剪应变平面的法向应变范围; σ_f 为疲劳强度系数; ϵ_f 为疲劳延性系数; E 为弹性模量; N_f 为以循环数计的疲劳寿命; b 为疲劳强度指数; c 为疲劳延性指数。

3.2 接触件疲劳寿命仿真

接触件的疲劳寿命仿真分析过程如图 10 所示,基于 ABAQUS 软件中的接触件插拔特性仿真结果,可将其求解的应力应变历程结果文件导入到 FE-SAFE 软件中进行疲劳寿命计算。由于接触件的薄弱部位出现在插孔簧片的根部位置,因此只需重点分析插孔部件的疲劳寿命即可。

由于 FE-SAFE 软件的数据库中未包含有黄铜材料的疲劳性能数据,因此,需要采用 Seeger 算法估算接触件材

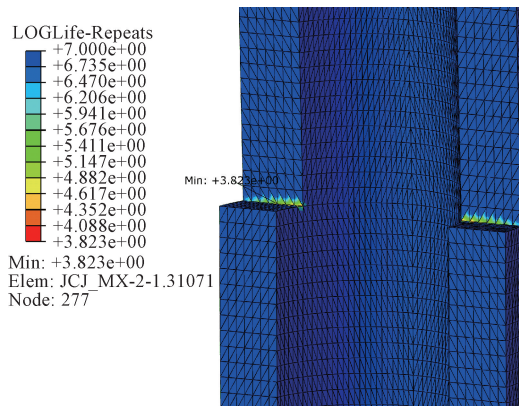


图11 疲劳寿命对数云图

Fig. 11 Logarithmic fatigue life cloud map

性。因此,基于有限元仿真分析方法进一步分析接触件的结构参数对其接触性能与接触疲劳寿命的影响,根据各项参数的影响程度确定出关键参数。

如表 5 所示,依次改变插孔的簧片长度、簧片厚度以及开口量,以便更容易观测接触件接触性能与接触疲劳寿

命随插孔结构参数的变化趋势。由于初始的开口量较小,若继续减小将会增大接触压力,从而导致接触件磨损更为严重,因此只在初始值的基础上增大10%进行分析,其他两项参数则在初始值的基础上进行上下20%的变动。

表 5 插孔结构参数的原始值及变化幅度		
Table 5 The original value and change amplitude of the jack structure parameters		
结构参数	初始值/mm	变化幅度/%
簧片长度	3	±20
簧片厚度	0.25	±20
开口量	0.58	10

4.1 簧片长度的影响

簧片长度对接触性能的影响如图12和表6所示,可知,当簧片长度降低20%时,根部最大应力增大40.75%,插拔力增大93.01%,疲劳寿命仅满足855次插拔;当簧片长度提高20%时,根部最大应力减小29.12%,插拔力减小37.53%,疲劳寿命提高至31260.794次。

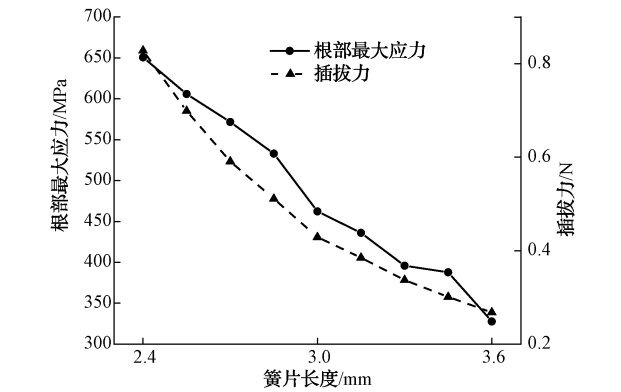


图 12 簧片长度对接触性能的影响
Fig. 12 Effect of opening amount on contact performance

表 6 簧片长度对接触性能及疲劳寿命的影响			
Table 6 Effect of opening amount on contact performance and fatigue life			
簧片长度 /mm	根部最大应力 /MPa	插拔力 /N	疲劳寿命 次数
2.40	650.7	0.828	855.067
2.55	605.8	0.699	1300.169
2.70	571.7	0.591	3564.511
2.85	532.9	0.511	3296.097
3.00	462.3	0.429	6652.732
3.15	436.1	0.385	6807.694
3.30	395.9	0.337	17458.221
3.45	387.8	0.301	28773.984
3.60	327.7	0.268	31260.794

4.2 簧片厚度的影响

簧片厚度对接触性能的影响如图13和表7所示,可

知,当簧片厚度降低20%时,根部最大应力减小15.88%,插拔力减小35.20%,疲劳寿命提高至22233.099次;当簧片厚度提高20%时,根部最大应力增大16.59%,插拔力增大53.85%,疲劳寿命降低为2818.383次。

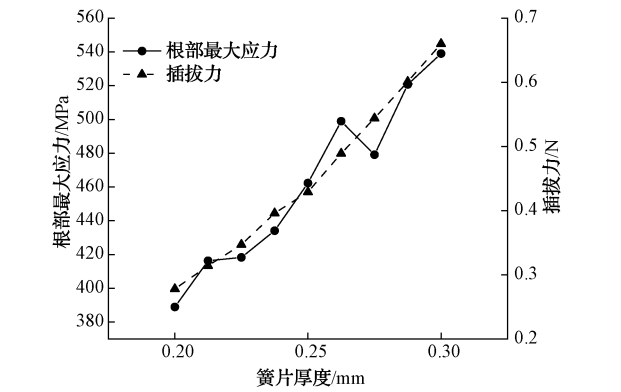


图 13 簧片厚度对接触性能的影响
Fig. 13 Effect of the jack reed length on contact properties

表 7 簧片厚度对接触性能及疲劳寿命的影响			
Table 7 Effect of the jack reed length on contact performance and fatigue life			
簧片厚度 /mm	根部最大应力 /MPa	插拔力 /N	疲劳寿命 次数
0.2000	388.9	0.278	22233.099
0.2125	416.3	0.314	18155.157
0.2250	418.3	0.347	11481.536
0.2375	434.1	0.396	11220.184
0.2500	462.3	0.429	6652.732
0.2625	498.9	0.489	4954.502
0.2750	479.1	0.544	8974.288
0.2875	520.7	0.601	2930.893
0.3000	539.0	0.660	2818.383

4.3 开口量的影响

开口量对接触性能的影响如图14和表8所示,可知,当开口量提高5%时,根部最大应力减小44.51%,插拔力

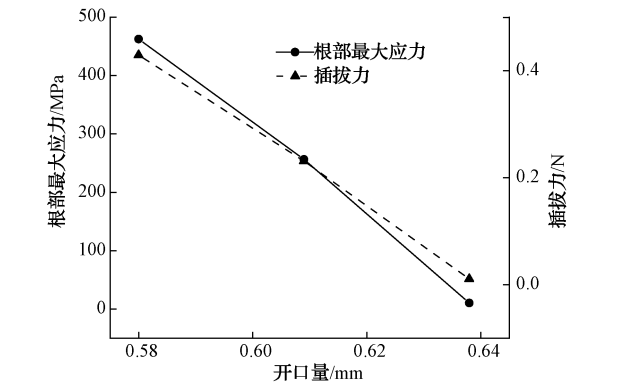


图 14 开口量对接触性能的影响
Fig. 14 Influence of the jack reed thickness on contact properties

减小46.15%,疲劳寿命提高至333 426.413次;当开口量提高10%时,根部最大应力减小97.71%,插拔力减小97.43%,此时插孔根部不存在疲劳失效的风险。

表8 开口量对接触性能及疲劳寿命的影响
Table 8 Influence of the jack reed thickness on contact properties and fatigue life

开口量 /mm	根部最大应力 /MPa	插拔力 /N	疲劳寿命 次数
0.580	462.3	0.429	6 652.732
0.609	256.5	0.231	333 426.413
0.638	10.6	0.011	NO DANGER

5 结论

本文建立了接触件接触压力、插拔力以及插孔根部应力的理论模型,并利用 ABAQUS 软件仿真分析了接触件的插拔力、应力分布情况,结果表明,原尺寸插孔簧片的开槽底部位置应力最大达到462.3 MPa,超出材料的屈服强度,应当合理优化该位置的形状及尺寸。通过 FE-SAFE 软件对接触件进行接触疲劳寿命预测,分析了最容易发生疲劳失效的部位—插孔簧片的开槽底部位置,并预测出该位置的疲劳寿命,预计可承受6 652.732次插拔测试。分析了不同的插孔结构参数对接触性能以及疲劳寿命的影响。插孔簧片根部的应力和插拔力与簧片的长度、开口量呈负相关,而与簧片的厚度呈正相关;接触疲劳寿命与簧片的长度、开口量呈正相关,与簧片的厚度呈负相关;其中,开口量对接触性能及接触疲劳寿命的影响最为显著。

参考文献

- [1] 潘骏,靳方建,陈文华,等.电连接器接触件结构分析与插拔试验[J].中国机械工程,2013,24(12):1636-1641.
PAN J, JIN F J, CHEN W H, et al. Structural analysis of electrical connector contacts and insertion-extraction test [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(12): 1636-1641.
- [2] 骆燕燕,王振,李晓宁,等.电连接器热循环加速试验与失效分析研究[J].兵工学报,2014,35(11):1908-1913.
LUO Y Y, WANG ZH, LI X N, et al. Accelerated thermal cycling test and failure analysis of electrical connectors[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(11): 1908-1913.
- [3] 程先哲,吕克洪,张勇,等.基于间歇故障信号动态响应特征的电连接器退化状态评估方法研究[J].仪器仪表学报,2022,43(11):190-199.
CHENG X ZH, LYU K H, ZHANG Y, et al. Research on the degradation state assessment method for electrical connectors based on dynamic characteristics of intermittent fault signals [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(11): 190-199.
- [4] 骆燕燕,段红玉,马旋,等.接触件结构参数对连接器插拔特性的影响分析[J].机械设计与制造,2024(2):10-16.
LUO Y Y, DUAN H Y, MA X, et al. Research on influence of structural parameters of contacts on the insertion-extraction characteristics of connectors[J]. Machinery Design & Manufacture, 2024(2): 10-16.
- [5] 骆燕燕,梁弘,刘旭阳,等.接触件结构参数对电连接器振动特性的影响[J].电子测量与仪器学报,2018,32(11):202-208.
LUO Y Y, LIANG H, LIU X Y, et al. Effects of structure parameters of electrical connector contacts on the vibration of connector [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(11): 202-208.
- [6] ANGADI S V, JACKSON R L, PUJAR V, et al. A comprehensive review of the finite element modeling of electrical connectors including their contacts [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 2020, 10(5): 836-844.
- [7] LI Y, ZHU F, CHEN Y, et al. Analysis of insertion force of electric connector based on FEM [C]. Physical & Failure Analysis of Integrated Circuits. IEEE, 2014.
- [8] LIM J, KIM H, KIM J K, et al. Numerical and experimental analysis of potential causes degrading contact resistances and forces of sensor connectors for vehicles[J]. IEEE Access, 2019, 7: 126530-126538.
- [9] 周海婷,厚康,潘红良,等.基于有限元仿真电涡流传感器的结构优化[J].电子测量技术,2016,39(7):15-19.
ZHOU H T, HOU K, PAN H L, et al. Structure optimization of eddy current sensor based on the finite element simulation [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(7): 15-19.
- [10] ZENG Z, ZHOU Z, LI X, et al. Numerical modeling and optimization on micro-D electrical connector[J]. International Journal of Numerical Modelling, 2018, 31(1): e2256.1-e2256.11.
- [11] 冯茜.J599圆形连接器结构优化及可靠性测试[D].成都:电子科技大学,2019.
FENG Q. Structural optimization and reliability test of J599 circular connector[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.

- [12] 丁永恒,黄建,郭宏.连接器导通绝缘耐压自动测试系统的设计[J]. 国外电子测量技术,2016,35(8): 62-66.
DING Y H, HUANG J, GUO H. Design of automatic test system for turn-on and insulation and resisting voltage about connector [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(8): 62-66.
- [13] 闻聪聪,杨强,张一鸣,等.军用航空电连接器接触疲劳寿命的仿真计算模型[J]. 机械设计与制造, 2018(S1): 51-54.
WEN C C, YANG Q, ZHANG Y M, et al. Simulation and calculation model of contact fatigue life of military aviation electrical connector [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(S1): 51-54.
- [14] 田宇庚.军用航空电连接器接触性能评估与疲劳寿命分析[D]. 沈阳: 东北大学,2015.
TIAN Y G. Contact performance assessment and fatigue life analysis of military aviation electrical connector[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [15] HUANG B, LI X B, ZENG Z, et al. Mechanical behavior and fatigue life estimation on fretting wear for micro-rectangular electrical connector [J]. Microelectronics Reliability, 2016, 66: 106-112.
- [16] JONATHAN S. Reliability optimisation for the multi-contact connector system under fretting conditions[J]. Electrical Engineering, 2016, 99(1): 1-8.

作者简介

姚胜辉,硕士研究生,主要研究方向为零部件结构可靠性分析。

E-mail: 545903221@qq.com

何锋(通信作者),教授,硕士生导师,主要研究方向为汽车及其零部件设计理论与方法。

E-mail: hef@gzu.edu.cn