

航天压接型电缆组件失效模式与分析

徐林¹ 邱凯¹ 李瑛¹ 朱平国² 吴欢¹

(1. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600; 2. 上海航天电源技术责任有限公司, 上海 201615)



摘要: 研究了航天 J18DMA 系列失效的压接电缆的失效模式, 以 GJB5020—2001 标准为指导, 通过实验对失效电缆的电阻和抗拉力数据进行了统计和分析。对异常的失效情况, 采用金相分析方法分析了失效机理, 最后对解决方案进行了探讨。

关键词: 压接; 失效; 金相分析; 电阻; 拉力

Failure Mode and Analysis of Aerospace Crimping Cable

Xu Lin¹ Qiu Kai¹ Li Ying¹ Zhu Pingguo² Wuhuan¹

(1. Shanghai Spaceflight Precision Mechanism Institute, Shanghai 201600;

2. Shanghai Aerospace Power Technology Co. Ltd., Shanghai 201615)

Abstract: The failure modes of aerospace J18DMA series crimping cable were studied. Guiding by the GJB5020—2001 standards, the resistance and tensile strength of the failed cable were statistically investigated. For some abnormal failure, the failure mechanism of the crimping cable was studied by using metallographic analysis. Finally, the results and the solutions were discussed.

Key words: crimping; failure; metallographic analysis; resistance; tensile

1 引言

现代国防和航空航天系统所用电缆需要更高的环境防护能力、更好的电磁屏蔽效果以及更小的尺寸和重量。电缆组件作为型号产品信号传输的载体, 是控制、通讯、电源等系统的关键部件, 其失效将直接导致发射失败。电缆的连接一般通过钎焊、压接等工艺实现。相比较其他连接方式, 压接工艺具备越来越明显的优势, 性能稳定、节约空间等特点

使其设计采用率逐步提升。但是, 由于压接接触件与导线之间的匹配性、压接工艺的机械操作特性使得压接工艺的控制流程复杂, 在型号研制过程中极易发生质量问题。

图 1 是 J18DMA 系列舱外电缆示意图, 采用压接工艺制造, 在电缆网导过程中发生了 W4 舱外电缆导通电阻异常质量问题, 为了解失效原因, 找到合理的解决方法, 判定贮存寿命, 对电缆网失效原因、机理等方面的内容进行了研究。



a 失效舱外电缆总览

b 电连接器内部结构照片

c 失效部分

图 1 J18DMA 系列舱外电缆示意图

作者简介: 徐林 (1981-), 工程师, 电子信息工程专业; 研究方向: 航天电缆组件制作及检测工艺技术研究。

收稿日期: 2014-05-29

2 研究内容

2.1 电阻模型

某型号电缆网研制阶段，出现单点导通阻值不稳定现象，其阻值在 1~100Ω 之间跳动，远远超出阻值小于 2Ω 的技术要求。

电连接器导通过程遵循霍姆模型，在该模型中把接触电阻近似作为合金材料电阻率和膜层电阻率的一个函数：

$$R_l = R_c + R_f = \rho / d + \sigma_f / \pi r^2 \tag{1}$$

式中： ρ ——金属电阻率，Ω.m； d ——圆形接触斑点直径； σ_f ——膜层电阻率。

认为集中电阻取决于两接触面之间导电斑点的数量与大小，把接触电阻近似作为合金材料电阻率和膜层电阻率的一个函数。

根据霍姆模型进行仿真，得出的接触电阻模型：

$$R_i = R_{ci} + R_{fi} = \rho / d_i + 1 / \sum (1 / R_{ij}) \tag{2}$$

式中： R_{ij} 代表导电区域 i 中的第 j 导电斑点的接触电阻，计算式为 $R_{ij} = \rho / a_{ij}$ ； a_{ij} 为导电区域 i 中的第 j 导电斑点的面积； d_i 为导电斑点区域 i 的直径。

2.2 失效机理分析

压接电连接器接触电阻的剧烈变化应与接触面之间导电斑点数量与大小在环境条件下剧烈变化有关，因此失效机理主要归结为三类：导线芯线发生断裂或破损；导通测试过程中出现接触不良；接触件的压接部位存在质量问题。

该舱外电缆选用 J18DMA 系列电连接器，制作完成后均进行了灌封处理，经对电连接器支架内部挖胶分解后，发现导线及与接触件连接部位均完好，因此排除上述第一类故障；对导通测试环节进行多次模拟，包括对导通仪表、工艺电缆以及更换合格产品进行验证，导通环节所有部位均接触良好，排除了第二类故障。

因此对第三类因素进行详细的研究和分析，对于导通电阻值不稳定且超标的问题，其失效可由多种原因导致，如：结合操作、检验及材料等问题。将失效电连接器分解后，对导线与接触件结合部位进行仔细观察，发现绝缘层与线芯均处理到位，可排除操作和检验等因素。

对于其他的影响因素，可以按照军用标准 GJB5020—2001《压接连接技术要求》对该型号舱外

电缆进行模拟压接实验，实验样品数为 3 件，型号为 J18DMA 电连接器 P 类接触件，导线截面面积为 0.15mm²。对这 3 件制品进行了外观检查、电压降和耐拉力测试，测试结果见表 1。经与压接标准比对，压接样件检测结果均符合 GJB5020—2001 中的要求，结论为合格。

表 1 P 类压接样件电压降和耐拉力测试结果

序号	压接筒 配范围 /mm ²	导线 规格 /mm ²	试验项目	试验数据	标准要求	试验 结论
1	0.2~0.4	0.15	电压降（测 试电流 2.2A）/mV	1.98	电压降 ≤4mV	合格
2				1.95		
3				2.03		
(1)			耐拉力/N	33	（拉力值 ≥26N）	
(2)				34		
(3)				33		

上述检测结果表明，对压接试件进行外观、电压降和耐拉力检测，测试结果均满足要求，因此，常规检测手段无法分析出此次失效原因，从宏观结构分析不能得到合理结论，必须开展微观结构分析。

2.3 金相分析

从国外相关技术文献可以了解，定量金相分析等微观分析手段正逐渐成为人们分析研究电连接器失效的重要手段之一和有力工具。采用金相分析手段可以确定电连接器的三维空间分布特征，建立与机械性能的内在联系，通过金相分析计算空隙比，可定量分析压接过程中金属芯线的变形行为和效果，真实地反应压接的可靠性，进行更科学地评价。

本文所用压接方法为坑压式压接，通过压接钳压头将压线筒压成坑式窝点来实现，坑压式压接原理图见图 2。

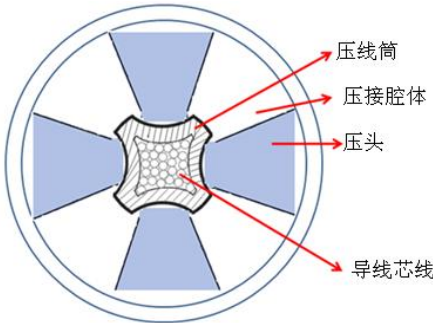


图 2 坑压式压接原理图

坑压式压接主要工艺及检验流程见图 3。对失效电缆进行金相分析，结果如图 4 所示。

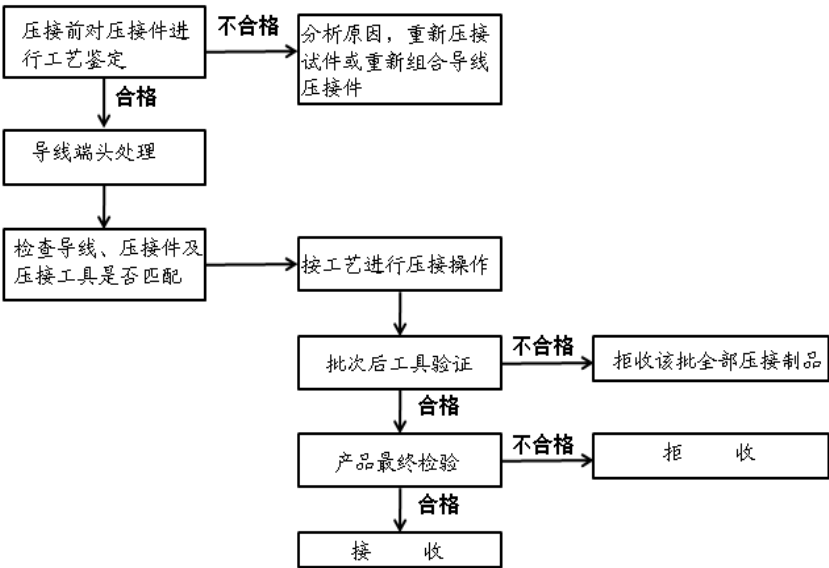


图 3 坑压式压接工艺及检验流程图

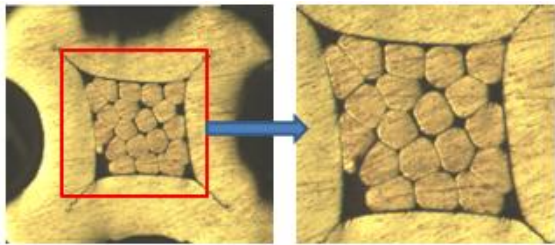


图 4 失效电缆金相照片

由图 4 可见，接触件与导线压接后，其压痕截面空隙较大，且导线变形不充分。压接过程中，导线和压线筒须符合下述规定：导线线芯尺寸、接触件线芯压线筒尺寸、压接工具压头和压模尺寸，三者必须正确匹配。当导线线径和压接筒尺寸不匹配时，压接的可靠性将受到很大影响，压接不可靠可能引起接触电阻变大和不稳定等现象。

经对某型号电缆网进行复查，发现 J18DMA 电连接器所选用的 P 类接触件与导线 0.15mm² 存在不匹配情况（P 类接触件适配导线为 0.2~0.4mm²）。因此，故障电缆失效原因可定位为压接接触件与导线不匹配。在压接制作过程中，直接将 0.15mm² 截面导线压入 J18DMA 电连接器 P 类接触件内，超出了此接触件压线筒承受的导线范围，存在压线筒相对导线截面较大的情况。经对该批次其他舱外电缆进行分析，每束电缆均有少量接点发生接触电阻异常、不稳定现象，该现象全部发生在截面积为 0.15mm² 导线使用了适配 0.2~0.4mm² 接触件的电缆组件中。

取 5 只适配 0.15mm² 导线的 PI 类接触件（PI 类

接触件适配导线为 0.1~0.15mm²），分别压接线径为 0.15mm² 的导线，按照 GJB5020《压接连接技术要求》进行外观、接触电阻、耐拉力、金相显微镜检查及留样比对，结果见表 2。

表 2 PI 类压接样件电压降和耐拉力测试结果

序号	压接筒适 配范围 /mm ²	导线规 格/mm ²	试验项目	试验数据	标准要求	试验 结论
1	0.1~0.15	0.15	电压降（测 试电流 2.2A）/mV	1.78	电压降 ≤4mV	合格
2				1.69		
3				1.82		
(1)			耐拉力/N	36	（拉力值 ≥26N）	
(2)				35		
(3)				38		

对比表 1 和表 2，上述两种规格接触件（P 类与 PI 类接触件）与 0.15mm² 导线压接后，虽然前者电压降略大于后者、耐拉力略小于后者，但都满足 GJB5020 相关检测指标。

选取其中一只压接件（PI 类接触件与 0.15mm² 导线压接），进行金相分析，结果见图 5。

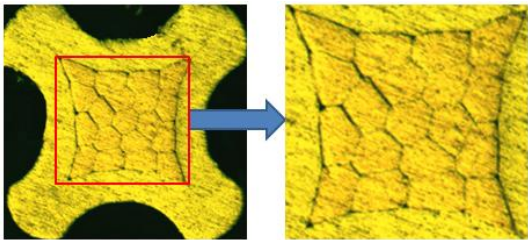


图 5 PI 接触件与 0.15mm² 导线压接后金相照片

对比图 4 和图 5, 从 PI 类接触件压接 0.15mm^2 导线的金相显微镜照片中可以看到, 压线筒内线芯变形均匀, 导线和压线筒之间呈气密性连接, 所有导线线芯圆形截面均已发生变形, 其外观形态与 GJB5020《压接连接技术要求》优选形态相符合。

若导线线芯截面积相对接触件尺寸过小, 当接触件通过过大的形变量压接时, 导线与压线筒之间形成空隙, 压接可靠性下降, 就会出现个别压接件接触电阻不稳定。

2.4 结果分析

J18DMA 电连接器 P 类接触件配 0.15mm^2 导线进行压接, 因其截面小于该电连接器压接最小值 0.2mm^2 要求, 压接后其压线筒内空隙面积会增大 (比 0.2mm^2 大)。通过对不同线径导线压接效果进行描述, 导线与接触件匹配且操作规范的压接件其压痕位置可通过图 6 进行显示。由图可见, 压接后, 导线线芯应全部被压线筒整齐包裹, 无芯线外漏, 压接部位无导线松动或存在因压接形成的断头等畸形。若出现导线线径相对偏小、压线筒尺寸偏大的不匹配压接件, 即欠压情况, 其压痕部位导线相对压线筒易出现松动, 导致芯线与压线筒无法呈气密性连接, 对导线稍微施加外力即可能导致线芯松动或脱离, 其压痕位置剖面效果参见图 7。通过对欠压压接件压痕截面进行金相显微镜观察 (见图 8), 发现压接后导线之间仍有明显间隙, 且导线芯线未发生明显变形。

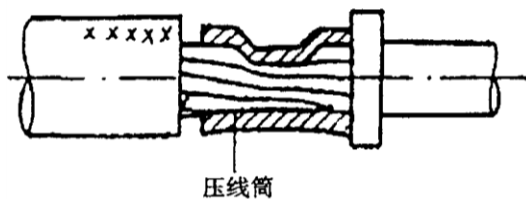


图 6 正常压接件压痕部位剖面图

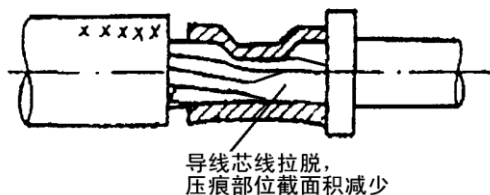


图 7 压痕部位芯线部分拉脱剖面图

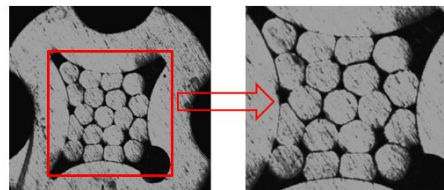


图 8 导线芯线欠压后其截面金相示意图

当电连接器接触件与导线进行压接后, 在压线筒内所有空隙所占面积应小于导线所占空间总面积的 10%, 且所有芯线须变形均匀; 当空隙率较大时, 压线筒内芯线会产生不变形或变形不均匀现象, 在此情况下, 产生压接不可靠, 可能引起接触电阻变大和不稳定。由于本批次舱外电缆 0.15mm^2 导线截面过小而接触件相对过大, 通过过大形变量的压接, 由此造成压接件接触电阻不稳定现象, 使压接可靠性下降。

2.5 可靠性验证探讨

针对电连接器端头进行灌封处理的电缆组件, 当舱外电缆产品和测试电缆对接插合好后, 由于产品的插针 (孔) 被测试电缆的插孔 (针) 固定住而不会出现单芯测试时的晃动情况, 但在电缆组件的生产、检验环节, 可增加单点手动导通方法进行测试, 不通过工艺电缆对接, 确保该类故障能及时暴露。

3 结束语

a. 造成本批次 W4 舱外电缆出现部分孔位线路导通电阻异常是由导线截面积与接触件压线筒尺寸不匹配引起。

b. 通过金相分析, 失效原因是电缆 0.15mm^2 截面积的导线未按照技术文件 (电连接器手册) 推荐的压接筒规格进行压接, 从而导致了导线截面积过小而接触件通过过大形变量的压接, 压接件接触电阻不稳定, 使整束电缆可靠性下降。

参考文献

- 1 武海军. 航天电连接器综合应力可靠性建模及统计验证[硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2007
- 2 李能贵. 电子元器件的可靠性. 西安: 西安交通大学出版社, 1990
- 3 王家平. 机械系统可靠性分析中几个关键问题的研究. 杭州: 浙江大学, 1995