小行星探测器电缆绝缘层高低温交变收缩验证方法

杨 祎[1]，柴雅梦[1]，雷英俊[1]，韩 阅[1]，李 斌[2]，张春辉[1]

（1. 北京空间飞行器总体设计部，北京 100094；2. 南京全信传输科技股份有限公司，南京 210036）

摘 要：针对小行星探测器在轨10年，其电缆经受极端温度交变后保证可靠、安全的需求，经历高低温交变后电连接器内部导线根部绝缘层回缩导致线芯裸露，存在电气短路风险，提出基于异速生长模型的导线端头绝缘层经历高低温交变后收缩的验证方法，通过地面试验数据构造导线绝缘层沿导线长度方向（轴向）的收缩量拟合曲线，对导线端头绝缘层经历多次极端温度交变后的收缩量进行预测，评估电缆两端导线根部的绝缘保护有效性。试验结果表明，该方法可较准确地预测高低温交变下导线端头绝缘层的收缩量，验证了所提方法的有效性与工程适用性。该方法可为深空探测领域极端温度交变环境下的电缆可靠性与安全性设计提供参考。

关键词：小行星探测器；电缆；绝缘层；高低温交变；收缩；验证方法

中图分类号：V46 **文献标识码**：A **文章编号**：2096-9287(2026)04-0391-08

DOI:10.3724/j.issn.2096-9287.2026.20250108

引用格式：杨祎，柴雅梦，雷英俊，等. 小行星探测器电缆绝缘层高低温交变收缩验证方法[J]. 深空探测学报（中英文），2026，13（4）：391-398.

Reference format: Yang Y，Chai Y M，Lei Y J，et al. Verification method for shrinkage of asteroid probe cable insulation under alternating high and low temperatures[J]. Journal of Deep Space Exploration，2026，13（4）：391-398.

引 言

小行星探测任务关系到探索小行星形成和演化、太阳系起源和演化、地球生命起源等重大基础前沿科学问题，目前已成为国际深空探测领域的热点领域[1-2]。“隼鸟”（Hayabusa）、“黎明”（Dawn）、“隼鸟-2”（Hayabusa-2）以及“欧西里斯”（Origins Spectral Interpretation Resource Identification Security Regolith Explorer，OSIRIS-Rex）已成功实现小行星探测和采样返回，均为小行星探测领域的标志性任务[3-4]，小行星探测任务依然是未来深空探测领域的重点工程项目[5-6]。中国也已开展了“天问二号”小行星探测任务。

与月球探测和火星探测任务相比，小行星探测器长期在轨飞行阶段需经历多次极端温度交变。探测器电缆作为整器电气传输链路的关键产品，经受在轨10年飞行阶段的极端温度交变后是否仍可保证其可靠性、安全性，这将直接影响探测器成功再入返回以及后续主带彗星探测任务。目前，国内外已对电缆绝缘材料在极端环境条件下发生性能退化的机理进行了研究，主要包括绝缘材料热老化模型，即在热应力下的热裂解或热氧解研究[7-9]；热老化对绝缘材料力学性能、寿命模型、电导特性及机理分析的影响[10-11]，绝缘材料在热–力联合老化前后的力学性能、电气性能和微观结构改变[12]；高温度梯度对电缆绝缘材料电树枝引发特性的影响规律及机理分析[13]，高压电缆绝缘材料在不同温度、厚度的电气击穿特性和电荷分布[14]，10 kV及以上高压电缆绝缘材料的电热老化分析与寿命预测模型[15]，船舶电缆绝缘材料的热老化和油、雾老化寿命快速检测方法及断裂伸长率等参数随老化时间的变化规律[16]，但缺少高低温交变对电缆绝缘材料收缩的影响分析和验证方法研究。

小行星探测器的器外电缆存在贴着舱板和悬空于舱板两种敷设状态，悬空于舱板的器外电缆需经受极端温度环境–170～120 ℃，并在探测器 10 年的在轨工作期间经历数百次高低温交变。针对小行星探测器电缆可靠性、安全性需求，开展的–196～135 ℃耐温试验结果表明试验后电连接器内部导线根部绝缘层回缩导致线芯裸露，存在电气短路风险。因此，本文提出了基于异速生长模型的电缆绝缘层在高低温交变下沿导线长度方向（轴向）收缩的验证方法，通过地面试验数据构造拟合曲线，对绕包式导线绝缘层经历多次极端温度交变后沿导线长度方向（轴向）的收缩量进行预测，评估电缆两端导线根部的绝缘保护有效性。

收稿日期：2025-09-06 修回日期：2026-03-08

基金项目：小行星探测任务资助项目

1 电缆绝缘层高低温交变收缩验证方法

小行星探测器在轨飞行阶段，器外电缆需经受极端温度环境–170～120 ℃，器内电缆需经受的温度环境–50～120 ℃。电缆导线绝缘层会随着环境温度交变而沿导线长度方向（轴向）收缩，收缩量过大可能造成电缆两端电连接器内部与接触件连接的导线根部形成裸露导体，裸露导体相互短接会导致探测器电气短路。

由于小行星探测器的重量资源约束，其电缆选用了新型轻量化低频导线，绝缘层采用PTFE薄膜和FEP/PI/FEP复合薄膜绕包而成。PTFE薄膜在导线长度方向（轴向）收缩明显，而FEP/PI/FEP复合薄膜在导线长度方向（轴向）未有明显变化，两种绝缘层材料的收缩特性存在差异，在温度交变工况下相互作用、制约，绝缘层材料的实际收缩行为对导线端部绝缘覆盖性的影响规律尚不够明确。为此，本文提出了电缆绝缘层收缩试验方法及电缆绝缘层收缩量拟合曲线构造方法，以验证电连接器内部导线根部绝缘套管是否能覆盖全任务周期内探测器电缆的导线绝缘层收缩量，避免导体裸露，保证探测器电缆的电气安全性。

1.1 电缆绝缘层高低温交变收缩方法设计

小行星探测器电缆为绝缘层绕包式，绝缘层材料具有热形变和热收缩特性[17-21]。绝缘层绕包过程中施加的张力，可保证绝缘层与导体紧贴、无缝隙、不起皱。经受温度交变时，绝缘层在热收缩特性和绕包张力的综合影响下会出现收缩现象，温度交变条件越严苛，绝缘层因形变导致的收缩量越大[17-19]。

为充分验证在轨温度环境对探测器电缆导线绝缘层收缩的影响，选取两组试验件分别按照器外、器内在轨温度进行收缩试验，需对探测器电缆导线进行低温和高温贮存，按照试验项目表1和试验剖面图1进行绝缘层收缩试验。

表 1 电缆绝缘层收缩试验项目

Table 1 Items of contraction experiment of wire insulation layer

试验项目		主要内容
电缆绝缘层收缩试验	试验前准备	外观检查，确认导线端头的绝缘层与内部导体齐平
		绝缘和耐压测试
	第1～n–1次循环	温度升至高温T_2，进行绝缘和耐压测试
		取出导线，进行导线绝缘层收缩量测量
		温度降至低温T_1，进行绝缘和耐压测试
	第n次循环	取出导线，进行导线绝缘层收缩量测量
		温度升至高温T_2，进行绝缘和耐压测试
		温度降至室温T_1，取出试验电缆
	试验后测试	外观检查，测量导线绝缘层收缩量
		绝缘和耐压测试

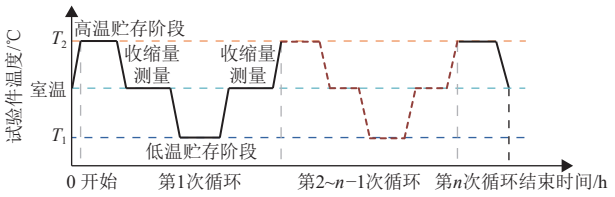


图 1 电缆绝缘层收缩试验剖面图

Fig. 1 Profile of contraction experiment of wire insulation layer

在表1中，n为温度交变次数，数值设置需保证电缆端头导线根部绝缘层的收缩量变化趋势平稳，可拟合电缆绝缘层收缩变化的曲线，用于量化导线根部绝缘防护工艺。试验过程中，对电缆进行绝缘和耐压测量，监测绝缘和耐压电阻值的变化。在图1中，T_1为在轨低温加外扩为–196 ℃和–65 ℃；T_2为在轨高温加外扩为135 ℃；高、低温贮存时间应不短于试验件热透或冷透所需的时间，即试验件达到环境温度且不再升温或降温。

在循环的每个高、低温恢复至室温阶段进行导线端头绝缘层收缩量测量，多次采集绝缘层收缩量数据，消除测量误差的影响。其中，导线的试验前初始状态为端头绝缘层与内部导体齐平，试验过程中每次恢复至室温时使用精密数显投影仪（精度0.001 mm），仪器如图2所示对导线的导体端头位置和绝缘层端头位置进行标记，测量得到的两位置之间距离即为绝缘层材料沿导线长度方向（轴向）的收缩量。同时，在每个高温、低温保持阶段进行导线绝缘和耐压测量，确认导线在高、低温的健康状态。



图 2 精密数显投影仪

Fig. 2 Precise digital projector

1.2 电缆绝缘层高低温交变收缩拟合曲线

小行星探测器10年在轨任务期间需要经历多个飞行阶段，探测器飞行姿态调整复杂且多变，探测器电

缆分布于整器各舱段及整器内外部，导致探测器电缆随姿态调整经历多次在轨空间温度交变。随着温度交变次数的增加，应力逐渐消除，每次温度交变下绝缘层收缩量逐渐减小。考虑试验周期和成本，在积累一定的导线绝缘层收缩量地面试验数据后，根据试验数据变化趋势按照最小二乘法进行导线绝缘层收缩量曲线拟合。通过拟合曲线估算不同温度交变次数下导线绝缘层收缩量，评价电连接器内部导线根部绝缘保护的有效性，起到加速验证全任务周期内电缆绝缘层收缩量的作用。电缆绝缘层收缩拟合曲线公式选用异速生长模型为

$$y = ax^b \tag{1}$$

其中：x为不同温度的交变次数；y为不同温度交变次数的导线绝缘层收缩量；系数a为标准化常数；系数b为异速生长指数，系数a和b通过试验实测数据拟合获得，与绝缘材料固有物理属性及绕包方式有关，不同规格导线的绝缘层收缩量试验数据均不相同，导致系数a和b值也存在差异。

2　电缆绝缘层高低温交变收缩验证与评价

2.1　电缆绝缘层高低温交变收缩验证

电缆绝缘层收缩试验的导线样本规格覆盖20#、22#、24#、26#、28#，样本数量各3根，模拟小行星探测器器外、器内电缆在轨温度交变，在–196～135 ℃温度范围内，进行200次循环交变试验，样本绝缘层收缩量均值结果如图3所示；在–65～135 ℃温度范围内，200次循环交变试验，样本绝缘层收缩量的均值结果如图4所示。随着温度交变次数增加，导线绝缘层的收缩量也在逐渐减小。试验后的导线绝缘层收缩的实物状态如图5所示，电连接器内部导线根部绝缘层回缩导致的线芯裸露如图6所示。

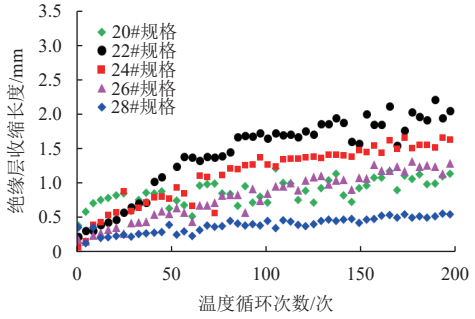


图 3　–196～135 ℃温度交变下的导线绝缘层收缩结果

Fig. 3　Contraction results of wire insulation layers under extreme temperature alternations of –196～135 ℃

绕包式导线绝缘层收缩的主要影响因素为温度交变差值、温度交变次数、导线规格等，与导线长度无关。同一温度交变条件下不同长度同种规格的导线样品的绝缘层收缩量差异小，在–196～135 ℃温度范围内200次循环交变试验中，26#规格导线样品的绝缘层收缩量最大差值0.091 mm，不同长度下导线的收缩量统计数据如图7所示，结果对比如表2所示。

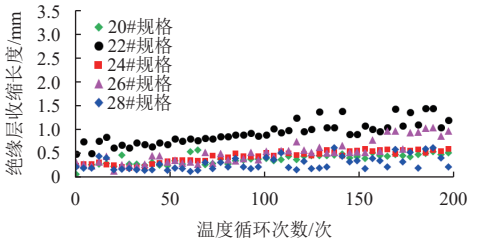


图 4　–65～135 ℃温度交变下的导线绝缘层收缩结果

Fig. 4　Contraction results of wire insulating layers under alternating temperatures from –65℃ to 135 ℃

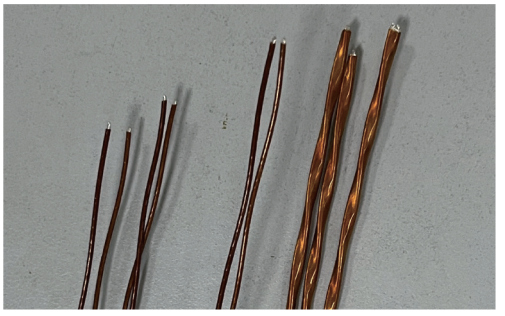


图 5　试验后导线绝缘层收缩的实物状态

Fig. 5　Physical states of wire insulation layers contractions after experiment

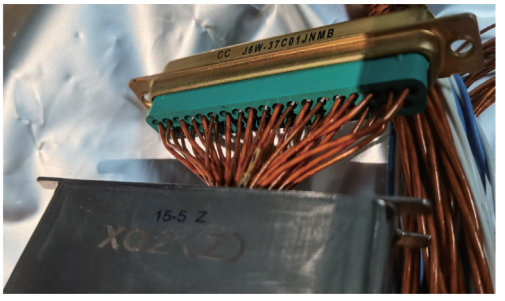


图 6　导线根部绝缘层回缩导致线芯裸露

Fig. 6　Exposure of conductor terminal caused by insulation layer retraction

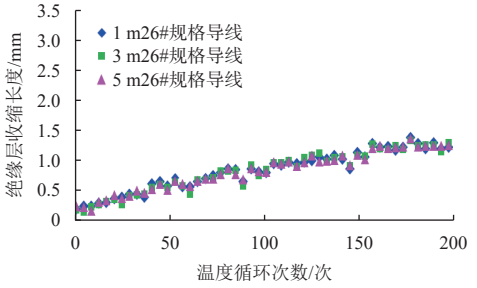


图 7　不同长度26#规格导线样品的绝缘层收缩量

Fig. 7　Shrinkage of insulation layers of #26 wire samples of different lengths

表 2 不同长度26#规格导线样品的绝缘层收缩量对比

Table 2 Comparison of shrinkage of insulation layers of #26 wire samples of different lengths

导线规格	温度交变次数	绝缘层收缩量均值/mm			最大差值/mm
		3×1 m样品	3×3 m样品	3×5 m样品	
26#	1	0.187	0.167	0.228	0.061
	10	0.228	0.225	0.160	0.068
	20	0.358	0.339	0.422	0.083
	30	0.431	0.409	0.40	0.031
	40	0.599	0.536	0.515	0.084
	50	0.566	0.541	0.504	0.062
	60	0.555	0.429	0.567	0.138
	70	0.683	0.665	0.692	0.027
	80	0.842	0.816	0.862	0.046
	90	0.637	0.564	0.672	0.108
	100	0.787	0.838	0.801	0.051
	110	0.904	0.945	0.938	0.034
	120	0.954	1.026	0.962	0.072
	130	1.041	1.101	0.976	0.065
	140	1.075	1.044	1.074	0.064
	150	1.118	1.064	1.087	0.054
	160	1.198	1.175	1.233	0.058
	170	1.151	1.229	1.206	0.078
	180	1.263	1.234	1.222	0.041
	190	1.283	1.235	1.229	0.054
	200	1.209	1.274	1.237	0.065

试验结果表明不同规格导线的绝缘层收缩量存在差异，AWG22规格导线的绝缘层收缩量大于其它规格。不同规格导线的直径不同，绝缘层材料在绕包过程中形成的绕包角度、残余应力等均不同。导线绝缘层材料绕包示意如图8所示，绝缘层材料轴向（图8方向1）与导线法向（图8方向3）之间的角度为绕包角α。绝缘层绕包过程中产生残余应力（图8方向1），在高低温交变作用下，绝缘层材料在残余应力作用下收缩，残余应力也逐渐释放，收缩量趋于稳定。

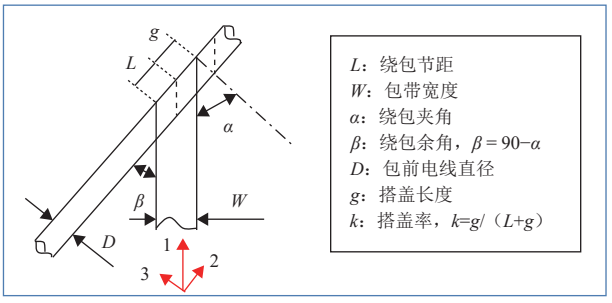


图 8 导线绝缘层的绕包示意图

Fig. 8 Schematic diagram of wire insulation layer wrapping

残余应力沿着导线轴向的分量（图8中方向2）引起绝缘层收缩形变，沿着导线法向的分量（图8中方向3）决定附着力大小。相同残余应力条件下，绝缘层材料绕包角α增大，则绝缘层沿着导线轴向的应力越大，而绝缘层附着力越小，绝缘层在经受高低温冲击时更易收缩。在生产过程中，结合导线规格和生产工艺水平控制绕包角α尽量小，但无法实现绕包角为0°。因此导线在高低温交变环境下使用时，存在不同程度的绝缘层收缩。探测器电缆的各规格导线的绝缘层材料绕包夹角见表3，AWG22规格导线的绕包夹角最大，为57.86°。

表 3 不同规格导线的绝缘层绕包夹角

Table 3 Insulation layer wrapping angles of wires of different specifications

序号	导线规格	绝缘层绕包角/（°）
1	28#	48.38
2	26#	46.68
3	24#	50.41
4	22#	57.86
5	20#	50.08

2.2 电缆绝缘层高低温交变收缩拟合曲线

根据试验实测数据采用最小二乘法对式（1）的系数a和b进行拟合。不同试验温度条件和不同导线规格下试验数据所得的系数a和b拟合结果见表4，拟合结果覆盖探测器常用的单芯、双绞、屏蔽导线，均随温度交变次数的增加收缩量趋于平稳。以单芯导线为例，在–196～135 ℃温度交变下，单芯导线绝缘层收缩拟合曲线如图9所示，在–65～135 ℃温度交变下,单芯导线绝缘层收缩拟合曲线如图10所示。

表 4 系数a和b拟合结果

Table 4 Fitting results of coefficients a and b

试验条件	导线规格		系数a	系数b
–196～135 ℃温度交变	28#	单芯	0.079	0.351
		双绞	0.098	0.345
		双绞屏蔽	0.705	0.140
	26#	单芯	0.068	0.545
		双绞	0.054	0.514
		双绞屏蔽	0.482	0.223
	24#	单芯	0.130	0.482
		双绞	0.067	0.582
		双绞屏蔽	0.371	0.288
	22#	单芯	0.172	0.476
		双绞	0.152	0.555
		双绞屏蔽	0.144	0.424
	20#	单芯	0.422	0.164
		双绞	0.130	0.412
		单芯屏蔽	0.174	0.417
–65～135 ℃温度交变	28#	单芯	0.083	0.278
		双绞	0.075	0.185
		双绞屏蔽	0.182	0.228
	26#	单芯	0.047	0.489
		双绞	0.127	0.125
		双绞屏蔽	0.482	0.223
	24#	单芯	0.090	0.350
		双绞	0.046	0.510
		双绞屏蔽	0.315	0.219
	22#	单芯	0.295	0.260
		双绞	0.212	0.277
		双绞屏蔽	0.117	0.273
	20#	单芯	0.117	0.264
		双绞	0.038	0.530
		单芯屏蔽	0.221	0.221

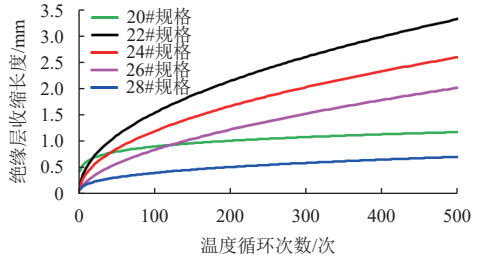


图 9　–196～135 ℃温度交变下单芯导线绝缘层收缩拟合曲线

Fig. 9　Fitted contraction curves of single-core wire insulation layers under alternating temperatures from –196℃ to 135 ℃

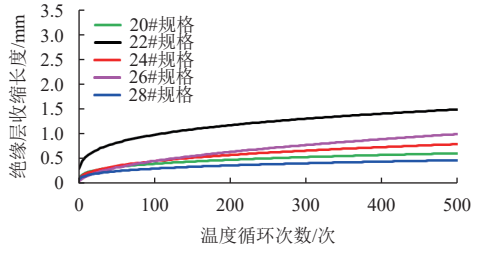


图 10　–65～135 ℃温度交变下单芯导线绝缘层收缩拟合曲线

Fig. 10　Fitted contraction curves of single-core wire insulation layers under alternating temperatures from –65℃ to 135 ℃

随着温度交变次数的增加，绝缘层收缩过程中应力逐渐释放，再加上绝缘层与导体之间的附着力束缚，导致温度交变末期绝缘层收缩率逐渐减缓。在–196～135 ℃温度交变下单芯导线绝缘层收缩变化率曲线如图11所示，在–65～135 ℃温度交变下，单芯导线绝缘层收缩变化率曲线如图12所示。

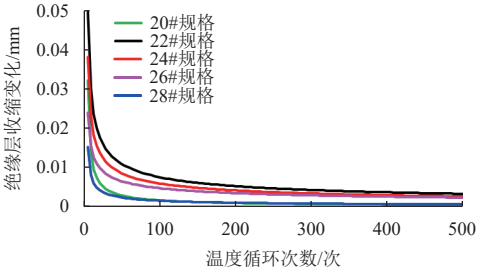


图 11　–196～135 ℃温度交变下单芯导线绝缘层收缩变化率

Fig. 11　Rates of contraction changes of single-core wire insulation layers under alternating temperatures from –196℃ to 135 ℃

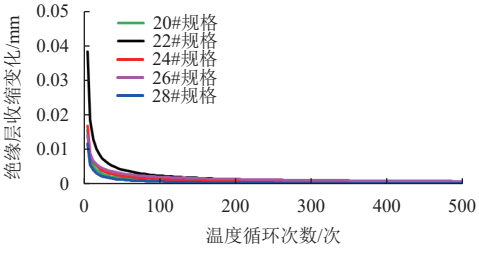


图 12　–65～135 ℃温度交变下单芯导线绝缘层收缩变化率

Fig. 12　Rates of contraction changes of single-core wire insulation layers under alternating temperatures from –65℃ to 135 ℃

根据拟合得到的曲线，模拟小行星探测器在轨飞行阶段经历500次温度交变，可得到探测器用不同规格导线的绝缘层收缩量，估算数值如表5所示，均不超过电连接器内部热缩套管包覆导线的长度6 mm，证明了探测器电缆可满足在轨可靠、安全工作的要求。电连接器内部导线根部增加热缩套管后绝缘处理的实物状态如图13所示。

表 5　第500次温度交变下的导线绝缘层收缩量估算数值

Table 5　Estimated values of contraction amounts of wire insulation layers for the 500th temperature alternation

试验条件	导线规格		第500次温度交变下，绝缘层收缩量估算数值/mm
–196～135 ℃温度交变	28#	单芯	0.700
		双绞	0.836
		双绞屏蔽	1.679
	26#	单芯	2.011
		双绞	1.317
		双绞屏蔽	1.928
	24#	单芯	2.599
		双绞	2.494
		双绞屏蔽	2.219
	22#	单芯	3.313
		双绞	4.784
		双绞屏蔽	2.013
	20#	单芯	1.169
		双绞	1.682
		双绞屏蔽	2.319
–65～135 ℃温度交变	28#	单芯	0.467
		双绞	0.237
		双绞屏蔽	0.752
	26#	单芯	0.982
		双绞	0.276
		双绞屏蔽	1.025
	24#	单芯	0.792
		双绞	1.095
		双绞屏蔽	1.230
	22#	单芯	1.484
		双绞	1.186
		双绞屏蔽	0.635
	20#	单芯	0.604
		双绞	1.024
		单芯屏蔽	0.873

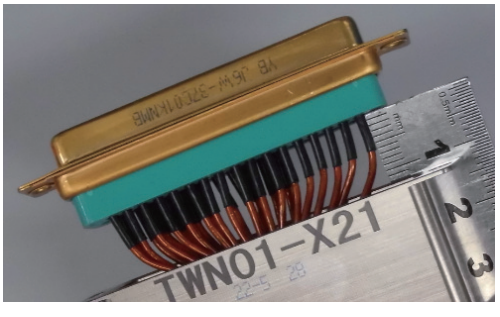


图 13　导线根部热缩套管绝缘处理的实物状态

Fig. 13　Physical state of insulation processing by heat-shrinkable sleeving at conductor terminal

2.3 电缆绝缘层高低温交变收缩验证方法评价

探测器电缆导线的绝缘层材料和成型工艺不同，绝缘层收缩情况不同，采用本文提出的验证方法可进行电缆绝缘层收缩量预测。先进行地面温度交变试验以获取足够的探测器电缆绝缘层收缩量数据；再进行绝缘层收缩量拟合曲线并预测探测器在轨飞行阶段温度交变次数下的导线绝缘层收缩量；最后，考虑探测器电缆中电连接器装联过程中允许的最小导线应力释放弯，对焊接型、压接型电连接器内部的导线根部均设置了不同长度的热缩套管或者不同高度的灌封胶进行绝缘保护，通过探测器电缆中全部规格的电连接器内部热缩套管长度相对导线绝缘层收缩量的覆盖情况，评价探测器电缆全任务周期内可靠安全工作的寿命。目前，已通过小行星探测器电缆地面高低温试验验证，试验件在经历200次高低温交变试验过程中高温、低温以及常温下绝缘和耐压电性能测试结果正常，详见表6，使用80倍放大镜对电缆绝缘层进行外观检查，绝缘层无微裂纹、脱粘。经历200次高低温交变后，试验件无电气短路，绝缘和耐压测试数据满足标准规定。上述验证方法可有效验证电缆电气安全性，该成果可以推广到其它航天器型号中。

表 6 试验件绝缘和耐压测量结果

Table 6 Conduction and insulation measurement results of test samples

温度交变次数	阶段	绝缘和耐压测量结果/MΩ		
		试验件A	试验件B	试验件C
1	高温	>200	>200	>200
	低温	>200	>200	>200
	常温	>200	>200	>200
30	高温	>200	>200	>200
	低温	>200	>200	>200
	常温	>200	>200	>200
60	高温	>200	>200	>200
	低温	>200	>200	>200
	常温	>200	>200	>200
90	高温	>200	>200	>200
	低温	>200	>200	>200
	常温	>200	>200	>200
120	高温	>200	>200	>200
	低温	>200	>200	>200
	常温	>200	>200	>200
150	高温	>200	>200	>200
	低温	>200	>200	>200
	常温	>200	>200	>200
180	高温	>200	>200	>200
	低温	>200	>200	>200
	常温	>200	>200	>200
200	高温	>200	>200	>200
	低温	>200	>200	>200
	常温	>200	>200	>200

3 结 论

本文针对小行星探测器电缆长期在轨飞行阶段经历多次极端温度交变影响，提出了一种电缆绝缘层高低温交变下沿导线长度方向（轴向）收缩的验证方法。通过地面试验数据构造导线绝缘层沿导线长度方向（轴向）的收缩量拟合曲线，对绕包式导线绝缘层经历多次极端温度交变后的收缩量进行了预测。在不同规格电连接器内部设置相应二次绝缘处置措施，确保在探测器全任务周期内电缆两端电连接器内部导线根部无裸露导体短接风险，目前在轨飞行状态正常，可有效确保探测器采样返回以及主带彗星探测任务的顺利执行。本文为后续深空探测领域极端温度交变环境下的电缆可靠性与安全性设计提供了技术支撑。

参考文献

[1] 叶培建，邹乐洋，王大轶，等. 中国深空探测领域发展及展望[J]. 国际太空，2018，478(10)：6-12.
Ye P J，Zou L Y，Wang D Y，et al. Development and prospect of Chinese deep space exploration[J]. Space International，2018，478(10)：6-12.

[2] 张荣桥，黄江川，赫荣伟，等. 小行星探测发展综述[J]. 深空探测学报(中英文)，2019，6(5)：417-423，455.
Zhang R Q，Huang J C H，He R W，et al. The development overview of asteroid exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration，2019，6(5)：417-423，455.

[3] Lauretta D S，Balram-knutson S S，Beshore E，et al. OSIRIS-REx：sample return from asteroid(101955)Bennu[J]. Space Science Reviews，2017，212：925-984.

[4] Tsuda Y，Saiki T，Terui F，et a1. Hayabusa 2 mission status：landing，roving and cratering on asteroid Ryugu[J]. Acta Astronautiea，2020，171：42-54.

[5] 余后满，张熇，黄晓峰，等. 我国小天体探测任务设想[J]. 国际太空，2021，513(10)：4-9.
Yu H M，Zhang H，Hang X F，et al. Draft design of Chinese asteroid exploration[J]. Space International，2018，478(10)：6-12.

[6] 李春来，刘建军，严韦，等. 小行星探测科学目标进展与展望[J]. 深空探测学报(中英文)，2019，6(5)：424-436.
Li C L，Liu J J，Yan W，et al. Overview of scientific objectives for minor planets exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration，2019，6(5)：424-436.

[7] 李磊，马宪民，范文玲. 一种矿用电缆剩余寿命预测方法[J]. 工矿自动化，2018，44(8)：57-62.
Li L，Ma X M，Fan W L. A residual life prediction method of mine-used cable[J]. Journal of Mine Automation，2018，44(8)：57-62

[8] 杨靖. 矿用10kV交联聚乙烯电缆老化分析与剩余寿命研究[D]. 西安：西安科技大学，2021.
Yang J. Aging analysis and residual life study of 10kV XLPE cable for mining[D]. Xi'an：XI'an University of Science and Technology，2021.

[9] 杨颖，游蛟，贾志东，等. 10kV交联聚乙烯电缆运行状态评估分析[J]. 高电压技术，2017，43(5)：1684-1692.

Yang Y，You J，Jia Z D，et al. Evaluation analysis of 10kV XLPF cable's operation condition[J]. High Voltage Engineering，2017，43(5)：1684-1692.

[10] 周远翔，莫雅俊，刘慧芳，等. 加速热老化下聚酰亚胺材料力学性能和寿命模型研究[J]. 绝缘材料，2017，50(7)：31-35.
Zhou Y X，Mo Y J，Liu H F，et al. Mechanical properties and life model of polyimide materials under accelerated thermal aging[J]. Insulating Materials，2017，50(7)：31-35.

[11] 莫雅俊，张灵，周远翔，等. 基于理化分析的热老化聚酰亚胺薄膜的电导特性[J]. 高电压技术，2019，45(4)：1241-1248.
Mo Y J，Zhang L，Zhou Y X，et al. Conduction current characteristics of thermally aged polyimide films based on physico-chemical analysis[J]. High Voltage Engineering，2019，45(4)：1241-1248.

[12] 周远翔，张征辉，张云霄，等. 热-力联合老化对硅橡胶交联网络及力学和耐电特性的影响[J]. 电工技术学报，2022，37(17)：4475-4486.
Zhou Y X，Zhang Z H，Zhang Y X，et al. The effect of combined thermal-mechanical aging on the cross-linking network and mechanical and electrical properties of silicone rubber[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2022，37(17)：4475-4486.

[13] 张云霄，周远翔，张征辉，等. 温度梯度叠加极性反转电压下硅橡胶电荷输运及电树枝特性[J]. 中国电机工程学报，2022，42(11)：4266-4277.
Zhang Y X，Zhou Y X，Zhang Z H，et al. Charge transportation and electrical tree characteristics in silicone rubber under temperature gradient superimposed polarity reversal voltage[J]. Proceedings of the CSEE，2022，42(11)：4266-4277.

[14] 钱恺羽，苏鹏飞，吴建东，等. 不同温度下高压直流电缆绝缘击穿场强的厚度效应[J]. 中国电机工程学报，2018，38(24)：7121-7130.
Qian K Y，Su P F，Wu J D，et al. The effect of thickness on breakdown strength in high voltage direct current cable insulation at different temperatures[J]. Proceeding of the CSEE，2018，38(24)：7121-7130.

[15] 李正明. 中高压电力电缆故障分析和寿命预测的研究[D]. 镇江：江苏大学，2016.
Li Z M. Study on fault analysis and life prediction of MV and HV power cables[D]. Zhenjiang：Jiangsu University，2016.

[16] 王鹤荀. 船舶电缆绝缘老化规律及快速检测方法研究[D]. 大连：大连海事大学，2014.
Wang H X. Study of the rule of ship cable insulation aging and rapid detection methods[D]. Dalian：Dalian Maritime University，2014.

[17] 蒋里锋，董云飞，沈鹏飞，等. 流延法制备聚酰亚胺薄膜的热膨胀系数表征[J]. 塑料工业，2020，48(S1)：128-131.
Jiang L F，Dong Y F，Shen P F，et al. Characterization on the coefficient of thermal expansion of polyimide film produced by casting method[J]. China Plastics Industry，2020，48(S1)：128-131.

[18] 朱梦冰，吕亮，蒋远媛，等. 聚酰亚胺薄膜热形变研究[J]. 绝缘材料，2007，40(6)：53-56.
Zhu M B，Lv L，Jiang Y Y，et al. Investigation on thermal deformation of polyimide film[J]. Insulating Materials，2007，40(6)：53-56.

[19] 曹明，陈英波，孙泽龙. 聚四氟乙烯微孔膜的热处理研究[J]. 有机氟工业，2021，4：1-5.
Cao M，Chen Y B，Sun Z L. Investigation on thermal processing of polytetrafluoroethylene microporous film[J]. Organo-Fluorine Industry，2021，4：1-5.

[20] 闫德才，饶保林，夏宇. 影响聚酰亚胺薄膜热收缩率因素的探讨[J]. 绝缘材料，2009，42(6)：43-46.
Yan D C，Rao B L，Xia Y. Factors to influence the heat shrinkage radio of polyimide film[J]. Insulating Materials，2009，42(6)：43-46.

[21] 朱梦冰. 聚酰亚胺薄膜热形变及杂化研究[D]. 南京：南京工业大学，2008.
Zhu M B. Investigation on thermal deformation and hybridization of polyimide film[J]. Nanjing：Nanjing Technology University，2008.

作者简介：

杨祎(1991－)，女，高级工程师，主要研究方向：航天器供配电系统设计。**本文通信作者**。

通信地址：北京空间飞行器总体设计部(100094)

电话：(010)68112742

E-mail：yyiyvonne@163.com

Verification Method for Shrinkage of Asteroid Probe Cable Insulation Under Alternating High and Low Temperatures

Yang Yi[1]，Chai Yameng[1]，Lei Yingjun[1]，Han Yue[1]，Li Bin[2]，Zhang Chunhui[1]

（1. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering，Beijing 100094，China；
2. Nanjing Quanxin Cable Technology Co., Ltd.，Nanjing 210036，China）

Abstract：Aiming at the requirements for reliability and safety of the cables of asteroid probe，which will operate in orbit for 10 years and must withstand alternating extreme temperatures many times during long-term in-orbit flight，the insulation layer at the terminal of the wires inside the electrical connector shrinks after thermal cycling，exposing the wire core and creating a risk of electrical short circuit. A verification method was proposed based on the allometric growth model for the shrinkage of the insulation layer at the wire end after thermal cycling. Based on ground test data, a fitted curve of the insulation layer shrinkage along the wire axis was constructed to predict the shrinkage at the wire end after multiple extreme thermal cycles and to evaluate the effectiveness of the insulation protection at the wire terminal at both ends of the cable. The test results indicate that the proposed method can accurately predict the shrinkage of the insulation layer at wire terminals under alternating high and low temperatures，thereby confirming its effectiveness and practical feasibility in engineering applications. This verification method provides a reference for the reliability and safety design of cables under extreme temperature environments in deep space exploration.

Keywords：asteroid exploration spacecraft；cable；insulation layer；altering high and low temperatures ；retraction；verification method

Highlights：

- Propose a high-low temperature alternating shrinkage verification method for cable insulation layers，which can effectively avoid the risk of electrical short circuits caused by exposed wire roots inside electrical connectors.
- Based on ground verification data，a fitting curve of wire insulation layer shrinkage was constructed using an allometric growth model，and axial shrinkage of the insulation layer at the wire end along the wire length direction (axial direction) was predicted by combining on-orbit temperature conditions and the number of temperature cycles.
- In conjunction with the insulation layer shrinkage prediction，and taking into account the internal assembly characteristics of different specifications of electrical connectors，develop insulation treatment processes for the wire roots to ensure power supply and distribution safety as well as signal transmission reliability of the probe throughout the entire on-orbit mission period.
- Applicable to reliability and safety design under extreme temperature alternating environments for deep space exploration and other missions，and provide technical support for subsequent spacecraft models.

[责任编辑：杨晓燕，英文审校：宋利辉]