

[电缆舱]

66 kV开关设备电缆舱安全设计

文/杨 哲 倪国财 党建伟 弋江淼 刘朋勋
西安西电开关电气有限公司

海上风电66 kV开关电缆舱结构不同于常规开关柜，一旦发生内部燃弧故障，事故可能波及整个风电机组塔筒。介绍了66 kV开关设备电缆舱泄压装置、壳体强度及电缆舱门紧固等相关设计，并通过仿真及实际试验进行了验证，为从业者提供相关参考。

随着海上风电的发展，大容量风电机组已成为发展趋势。风电机组容量提升，集电电压由35 kV提高到66 kV，原塔筒内的中压电气设备更替为66 kV高压电气设备。为防止内部燃弧故障，中压开关柜通常都设置分隔舱室，并配置泄压装置，柜体门板配置加强螺钉，以提高整个产品在内部燃弧故障中燃弧冲击的抵受力。当电压等级提高至66 kV时，高压开关设备整体结构与中压开关柜已完全不同。

66 kV高压开关设备的断路器、隔离开关为独立的气室，各回进线出线单独配置隔离开关及接地开关，各回进线出线电缆接头处设置电缆舱。如果电缆舱抗内部燃弧故障能力不足，故障将波及设备其他气室及周边设备。由此可见，电缆舱及泄压装置设计是否合理，关系到产品安全可靠。

电缆舱内部燃弧故障

电气设备内部燃弧故障产生的原因主要有：
①因电缆接头绝缘失效引起相间短路故障；
②电气设备回路接触面腐蚀或装配原因引起短路故障；
③雷电过电压或大气过电压等引起故障；
④连闭锁失效或操作人员误合接地开关。

电气设备内部燃弧故障时的故障电流和电弧电压都很高，瞬间产生巨大的热能，电缆、导体及壳体等固体材料受到烧蚀，电弧使金属受热而出现熔融现象，随着故障电流的不断增大，电缆舱壳体甚至可能被烧穿。电弧产生的高温高压气体迅速使

电缆舱膨胀，如果电缆舱强度设计不合理，泄压装置不及时动作，电缆舱内的高温高压气体得不到释放，将引起电缆舱局部破碎或爆炸，威胁周围设备和人员安全。

泄压装置

为避免电缆舱内部燃弧故障危害，应采取相应措施限制电弧引起的机械效应和热效应，合理的电缆舱外壳及泄压装置设计能够有效地防护内部燃弧故障带来的危害。66 kV海上风电机组高压开关设备的电缆舱通常单独设置，每回进线电缆、出线电缆通常设置单独的电缆舱并配有泄压装置，当某一电缆舱发生内部燃弧故障时，不影响其他电缆舱内部件，舱内高温高压气体通过泄压装置排出舱体。

泄压装置对于电缆舱抗内部燃弧故障尤为重要，在内部燃弧故障事故中，电缆舱泄压装置大多存在缺陷，造成电缆舱严重变形或发生爆炸。泄压装置顶板受到内部气流冲击应打开，泄压装置顶板设计不合理时，抗弯折应力较大，当电缆舱气体压力不够大时，泄压装置可能不动作。

电缆舱泄压装置顶板通常一端由金属螺栓固定，另外一端由尼龙螺栓固定，当电缆舱内部产生燃弧故障时，舱内压力升高，尼龙螺栓被拉断或剪断，高压气体得到释放。泄压装置顶板在金属螺栓根部采取缺口折弯的形式，如图1所示。或在金属螺栓根部采用铰链的形式，如图2所示。泄压顶板

两种不同的打开方式所要求的最小压力是不同的。

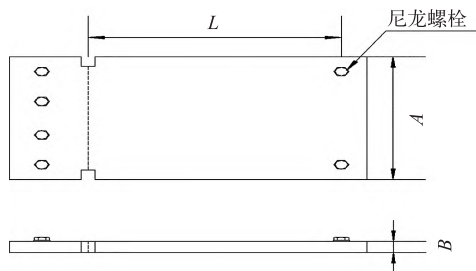


图1 金属折弯式泄压顶板

当泄压顶板采用缺口折弯形式时，电缆舱泄压装置顶板的最小动作压力 F_1 为

$$F_1 = \frac{2(LN + ABP)}{SL} \quad (1)$$

式中， L 为尼龙螺栓到顶板折弯处长度； N 为尼龙螺栓抗拉应力； A 为泄压顶板的宽度； B 为泄压顶板的厚度； S 为泄压顶板的面积； P 为泄压顶板的抗弯应力。

由式（1）可知， F 值与泄压顶板的抗弯应力 P 及泄压顶板的截面积成正比，当 P 值较大时， F 值也较大。

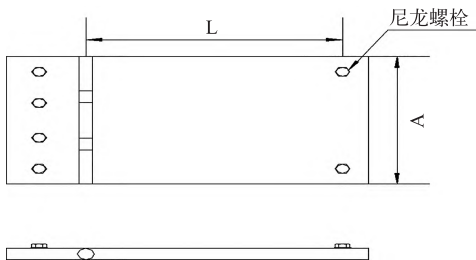


图2 铰链式泄压顶板

当泄压顶板采用铰链折弯形式时，泄压顶板最小动作压力 F_2 为

$$F_2 = \frac{2N}{AL} \quad (2)$$

比较式（1）和式（2）可知，铰链式泄压顶板的最小动作压力与泄压顶板强度无关，且小于折弯式泄压顶板。海上风电机组电气设备要求高可靠性和高安全性，在66 kV开关电缆舱设计时，应选用铰链式泄压顶板，以满足在较小故障压力下泄压的要求。

电缆舱壳体

当66 kV开关设备电缆舱发生内部燃弧故障

时，电弧的高温能使金属出现熔融现象，随着故障电流的持续，可能出现电缆舱壳体烧穿的情况。为了避免在电缆舱发生内部燃弧故障而泄压装置顶板未打开时壳体烧穿，选取合适的金属材料及厚度至关重要。通常情况下，在开关设备电缆舱内部燃弧故障型式试验中，燃弧时间为1 s，此时泄压装置顶板越早打开，越有利于电缆舱内压力降低。通常泄压顶板打开的时间为10~80 ms，如果电缆舱壳体能够耐受至少80 ms的电弧烧蚀，就不会引起电缆舱壳体烧穿。

静止电弧引起的电缆舱壳体烧穿时间一般取决于故障电流大小、电缆舱壳体材料和厚度及电缆舱体积等因素。根据经验公式得66 kV开关设备电缆舱壳体承受的电弧能力为

$$T = \frac{Kd^{1.77}}{I} \quad (3)$$

式中， T 为电缆舱壳体烧穿时间； K 为材料耐烧系数，铁、不锈钢为500，铝为180； d 为电缆舱厚度； I 为短路故障电流值。

由于是海上风电设备，电缆舱除考虑内部燃弧故障影响外，还需要考虑耐腐蚀的问题，因此，电缆舱壳体选用3 mm厚的不锈钢材质，短路电流为25 kA。将数据代入式（3），计算得到 $T=110$ ms。电缆舱壳体耐受电弧烧蚀时间大于泄压顶板开启时间，可确保在电缆舱烧穿之前泄压装置顶板开启。

电缆舱强度仿真

内部燃弧故障是一个复杂多变的物理及化学过程，短路电弧发生过程是快速时变和空间分布过程，其中有较多高度非线性参数，涉及可压缩气体的流动、热量的发散与吸收、物体性质的变化、物质的组成及电磁场的分布等。为降低计算复杂度，以等体积密度为原则，将开关设备电缆舱内燃弧故障产生的电弧等效为热源球体。试验参数见表1。

表1 试验参数

参数名称	A/AB	B/BC	C/CA
电流峰值/kA	-46.1	-52.3	64.9
前三个半波有效值/kA	25.8	26.4	27.0
电流有效值/kA	25.7	26.4	26.9
电流持续时间/s	1.03	1.03	1.03
试验电压/kA	12.2	12.2	12.1

根据表1试验参数,对随时间变化的电弧电压和电流进行积分,估算出总的电弧能量约为 $6.25 \times 10^7 \text{J}$ 。仿真中把电弧等效成半径为5 mm的热源球体,对应的电弧能量换算至该球体的能量热损耗密度。

建立66 kV开关设备电缆舱结构模型,使用ANSYS Design Modeler进行模型处理。电缆舱模型如图3所示。将模型导入ANSYS Meshing进行网格划分,如图4所示,最终得到的模型总网格数约为300万。



图3 电缆舱模型

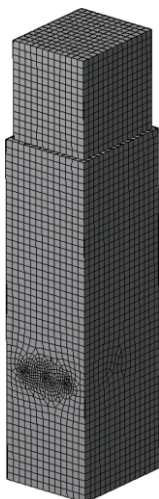


图4 电缆舱模型网格划分

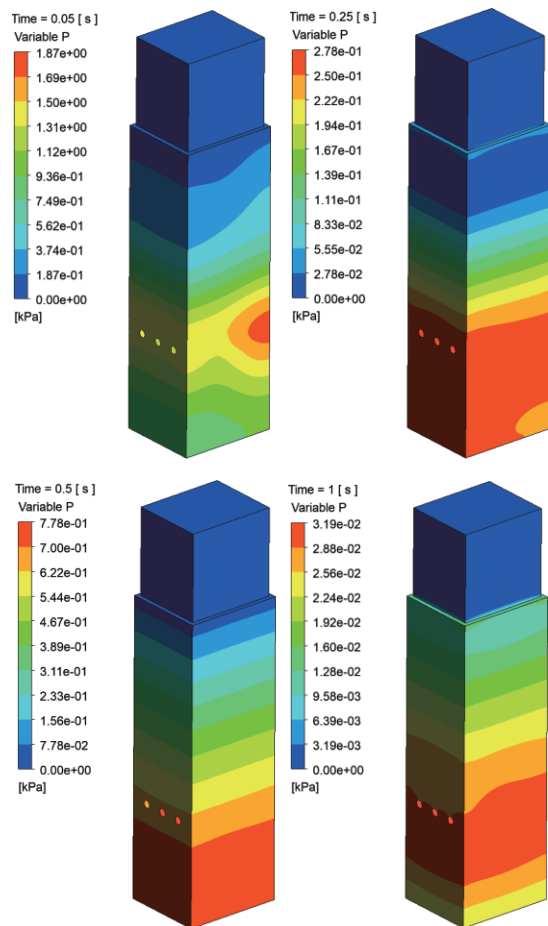


图6 电缆舱壁面压力云图

使用上述模型对电缆舱进行25 kV、1 s内部燃弧故障试验工况的仿真计算,得到的计算结果如图5、图6所示。

由图5可知,电缆舱壁面压力在初始的75 ms左右达到最高,约为7.4 MPa,远低于电缆舱壳体材料不锈钢304的屈服强度。在压力达到最高值后泄压顶板打开,电缆舱内压力快速释放。

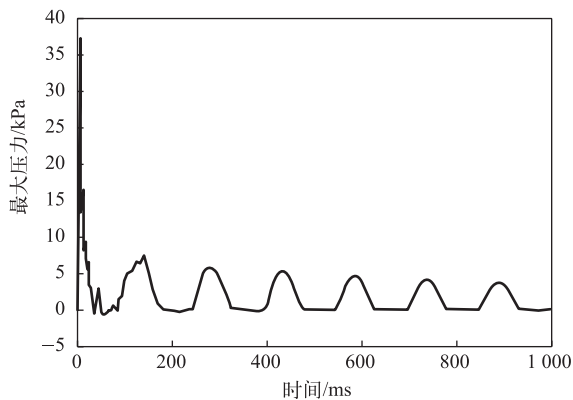


图5 电缆舱壁面最高压力随时间变化

电缆舱门

当66 kV开关设备电缆舱发生内部燃弧故障时,如果电缆舱舱门设计不合理,在高压作用下有飞出的危险。按照仿真结果,当发生内部燃弧故障时,电缆舱受到的最大压力为7.4 MPa,设计电缆舱舱门的尺寸如图7所示。

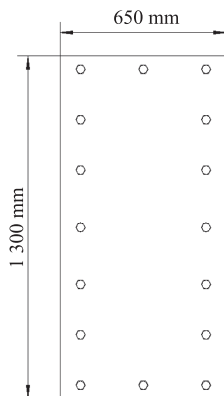


图7 电缆舱舱门示意图

电缆舱舱门采用8.8级M10螺栓进行紧固，所需的螺栓数 N 为

$$F_b = N \frac{F_c}{S} \quad (4)$$

式中， F_b 为电缆舱舱门所受的最大压力； S 为电缆舱舱门的面积； F_c 为单个螺栓的最大抗拉应力； N 为电缆舱舱门固定螺栓个数。

单个8.8级M10螺栓的最大抗拉应力为49 000 N，通过式（4）计算出 N 为15，故紧固电缆舱舱门至少需要15个以上的螺栓。

试验验证

按照上述仿真及计算制造电缆舱，并依据GB 3906—2006《3.6 kV～40.5 kV 交流金属封闭开关设备和控制设备》的要求进行内部燃弧故障检验，试验参数为25 kA、1 s。试验电源接入电缆舱电缆接头处，使用金属线在电缆接头相间短接，形成短路回路。试验过程中电缆舱内部出现燃弧火光，并伴随有大量炙热气体，泄压顶板打开，将高温高压气体排出电缆舱。试验后检查电缆舱壳体完好无开裂、烧穿情况，电缆舱周围指示器完好，试验通

过。电缆舱试验前后如图8、图9所示。

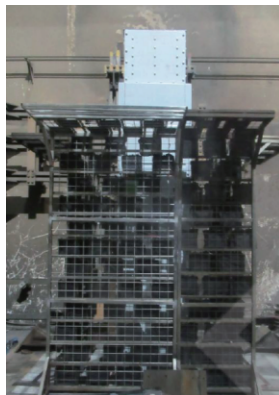


图8 内部燃弧故障试验前



图9 内部燃弧故障试验后

结束语

海上风电机组66 kV开关设备电缆舱与传统开关柜电缆舱结构有所不同，新工况下设备安全可靠性能尤为重要。本文介绍了电缆舱泄压装置、壳体及电缆舱门的相关设计，并通过仿真校验了电缆舱强度，最终通过试验进行了验证，为电缆舱的设计、改进提供参考。EA

(收稿日期：2022-11-01)

