

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.05.03

# 含纵向裂纹斜接弯管在内压作用下极限载荷的研究

王冉<sup>1</sup>, 康志远<sup>2</sup>, 漆向东<sup>1</sup>, 徐浪<sup>1</sup>, 苑鸿志<sup>1</sup>

(1. 中国航天空气技术研究院, 北京 100074; 2. 北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

**摘要:** 应用三维有限元方法分析在内压作用下含纵向裂纹斜接弯管的极限载荷。采用数值模拟的方法, 研究含裂纹结构的极限承载能力。创建了斜接弯管及纵向裂纹的有限元模型, 对内压作用下影响这种含缺陷结构极限载荷的因素进行了研究, 分析了弯管形状参数、裂纹形状参数对结构极限载荷的影响。经总结含纵向裂纹斜接弯管的极限载荷随形状参数的变化规律, 可知: 各形状参数存在临界值, 超过该值结构的极限载荷会显著下降。

**关键词:** 斜接弯管; 纵向裂纹; 极限载荷; 有限元分析

**中图分类号:** TB9      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-5795 (2018) 05-0012-05

## Analysis of Automatic Testing Technology Based on VXI Bus

WANG Ran<sup>1</sup>, KANG ZhiYuan<sup>2</sup>, QI Xiangdong<sup>1</sup>, XU Lang<sup>1</sup>, YUAN Hongzhi<sup>1</sup>

(1. China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China;

2. Beijing Institute of spaceflight test technology, Beijing 100074, China)

**Abstract:** The 3D finite element analysis is used to calculate and analyze the limit load of mitred bend with the longitudinal crack under internal pressure. A finite element model of mitred bend with the longitudinal crack is created, and the influence factors of the limit load under internal pressure are studied. The influence of several dimensionless parameters such as the relative thickness, the relative shapefactor, the relative depth is analyzed. The variation law of the limit load of the longitudinal cracked mitred bend with the shape parameters is summarized. It is found that there is the critical value for each shape parameter. When the parameter exceeds the critical value, the limit load of the structure will decrease significantly.

**Key words:** mitred bend; longitudinal crack; limit load; finite element method

## 0 引言

现代工业生产的高速发展使得压力管道趋向复杂化, 操作运行条件更加苛刻, 压力管道系统停用维修会带来严重的经济损失。而多种多样的压力管道缺陷表现为裂纹、未熔合、未焊透、气孔、夹渣等形式, 其中裂纹对压力管道性能影响最为严重。

裂纹在一定条件下会造成压力管道失效, 形式主要有: 脆性断裂、韧性撕裂及塑性失效。其中, 脆性断裂常发生在低温或材料性能严重裂化的情况下, 会造成严重后果, 但由于压力管道一般以钢铁材料制作而成, 韧性较好, 在发生脆性断裂前会先破坏塑性极限强度, 因此纯粹的脆性断裂一般发生的可能性较小。

斜接弯管是一种较常见的压力管道非标元件, 航天航空一些非标设备系统中可能会用到, 且通常为现场焊制, 而裂纹通常就集中在这种焊接接头部位(包括热影响区)。在用压力管道缺陷的安全评定技术因为其

出故障时损失较严重而得到了极大的发展, 但斜接弯管国内外研究相对较少。2007 年 J. Wood 作过一篇有关安全评价技术的综述<sup>[1]</sup>; 大连理工大学应用数值方法分析过无缺陷斜接弯管的整体应力<sup>[2]</sup>, 及斜接弯管一些裂纹形式的线弹性计算<sup>[3-5]</sup>。本文主要分析含纵向裂纹斜接弯管的极限载荷。

无缺陷的低碳钢可视理想弹塑性材料, 计算极限承载能力可采用一定的简化力学模型。但缺陷极大的影响了材料及结构整体的应力应变场, 含缺陷结构的极限载荷用力学理论模型难以精确的描述, 而通过试验模拟要求条件较苛刻周期较长。所以本文采用 3D 有限元软件进行建模计算。

## 1 形状参数

斜接弯管为四节 90°, 壁厚为  $t$ , 外直径为  $D_0$ , 公称直径为  $D_N$ , 管弯曲半径为  $R$ , 直管段长度为  $L$ 。裂纹形状简化为矩形(计算结果偏保守), 如图 1, 裂纹

深度为  $a$ ，裂纹长度为  $b$ ，裂纹位置为  $\varphi$ ， $\varphi = 0^\circ$ ， $90^\circ$ ， $180^\circ$  分别对应裂纹位于弯管的外弧线、中弧线和内弧线。用 1 个无量纲参数定义裂纹在弯管中的位置： $a/t$  裂纹相对深度定义为  $\alpha$ ，用 1 个无量纲参数定义裂纹的几何形状特征： $b/a$  裂纹相对形状定义为  $\beta$ 。

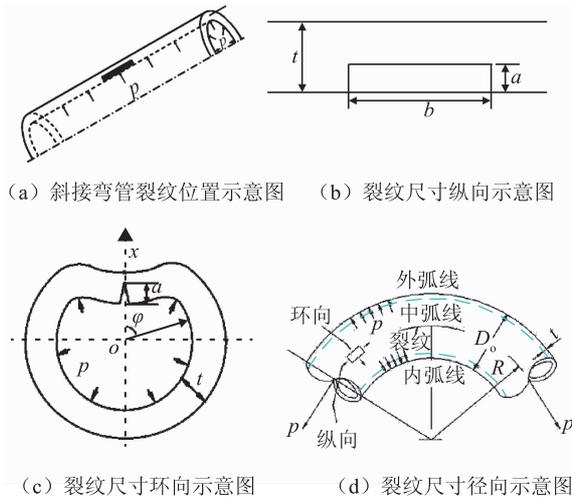


图 1 斜接弯管裂纹尺寸及位置

$R/D_N = 1.5$ ， $D_o = 377$  mm， $R = 525$  mm， $L = 500$  mm，裂纹具体位置如图 2 所示。用 1 个无量纲参数定义斜接弯管的几何形状特征： $D_o/t$  管壁相对厚度定义为  $\gamma$ 。斜接弯管的极限载荷为  $P_L$ ，弯管内压为  $P_i$ 。

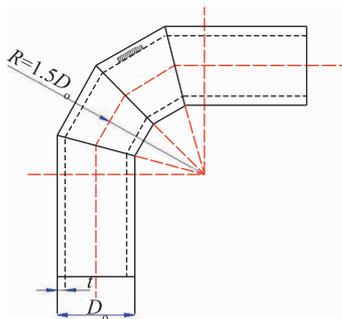


图 2 斜接弯管及裂纹

## 2 建立模型

在 3D 有限元软件 ANSYS 中建立斜接弯管及裂纹的模型，如图 3 所示。在裂纹尖端选用了与斜接弯管实体不同的三维单元退化等参奇异元 Solid95，并加密了尖端及附近的网格，以更加精确的模拟裂纹尖端极度变化的应力应变场。斜接弯管材料取普通碳钢材料，对弯管内壁面施加加载荷内压，两端进行全约束。通过 ANSYS 自带语言完成编程、建模和计算。

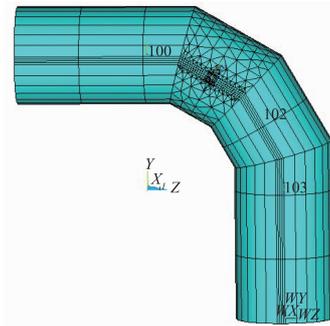


图 3 斜接弯管及裂纹结构网格划分

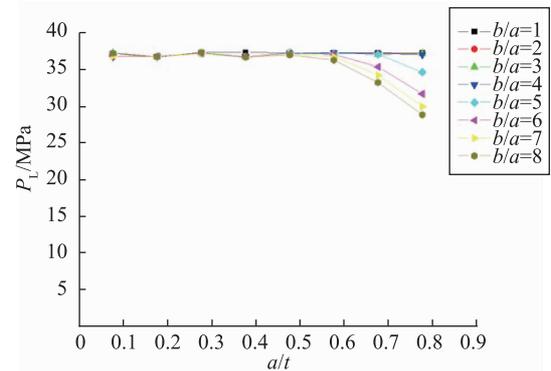
## 3 结果分析

分别计算斜接弯管在半穿透纵向裂纹和穿透裂纹在内压作用及不同几何参数下的极限载荷，然后分析各几何形状参数  $\alpha$ ， $\beta$  和  $\gamma$  对含裂纹结构极限载荷的影响。

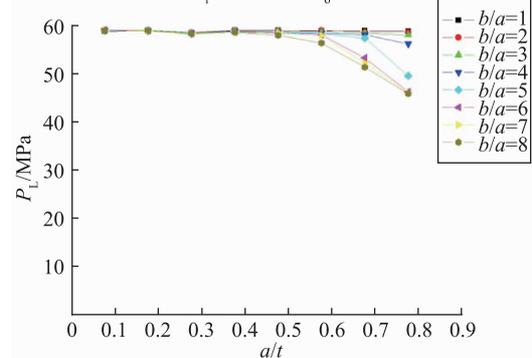
### 3.1 斜接弯管含半穿透纵向裂纹

#### 3.1.1 形状参数 $\alpha$ 对极限载荷的影响

取裂纹位置角度  $\varphi$  为  $90^\circ$ ，固定裂纹相对长度  $\beta$ ，分析结构的极限载荷  $P_L$  随裂纹相对深度  $\alpha$  的变化规律，变化固定值  $\beta$  可以得到  $P_L$ - $\alpha$  曲线族。 $P_i = 50$  MPa， $D_o/t = 18$  时， $P_L$ - $\alpha$  曲线族如图 4(a) 所示； $P_i = 100$  MPa， $D_o/t = 12$  时， $P_L$ - $\alpha$  曲线族的变化规律如图 4(b) 所示。



(a)  $P_i = 50$  MPa， $D_o/t = 18$  时



(b)  $P_i = 100$  MPa， $D_o/t = 12$  时

图 4 极限载荷-相对深度 ( $P_L$ - $\alpha$ ) 曲线族

观察曲线族可以发现，内压作用下斜接弯管的极限载荷  $P_L$  随形状参数  $\alpha$  的变化有两种情况。开始随着  $\alpha$  的变大，结构的极限载荷  $P_L$  无明显波动，基本保持不变；随着  $\alpha$  逐渐增大至一定值 ( $\alpha = 0.4 \sim 0.5$ )，极限载荷曲线  $P_L-\alpha$  由平直的直线开始下降，下降趋势近似线性。我们将曲线的拐点定义为结构极限载荷下降的临界形状参数  $\alpha_0$ 。这个临界值  $\alpha_0$  随裂纹相对长度  $\beta$  而变， $\alpha_0-\beta$  变化曲线也存在一段直线区。开始时  $\beta$  变大，临界值  $\alpha_0$  基本保持不变；但当  $\beta$  增大至一定值 (0.4 左右) 后，临界值  $\alpha_0$  开始变小，结构更早出现极限载荷  $P_L$  下降的情况。

### 3.1.2 形状参数 $\beta$ 对极限载荷的影响

取裂纹位置角度  $\varphi$  为  $90^\circ$ ，固定裂纹相对深度  $\alpha$ ，分析结构的极限载荷  $P_L$  随裂纹相对长度  $\beta$  的变化规律，变化固定值  $\alpha$  可以得到  $P_L-\beta$  曲线族。 $P_i = 50 \text{ MPa}$ ， $D_o/t = 20$  时， $P_L-\beta$  曲线族如图 5(a) 所示； $P_i = 50 \text{ MPa}$ ， $D_o/t = 16$  时， $P_L-\beta$  曲线族如图 5(b) 所示。

观察曲线族可以发现，内压作用下斜接弯管的极限载荷  $P_L$  随形状参数  $\beta$  的变化也有不同情况。当  $\alpha$  比较小的时候 ( $\alpha \leq 0.5$ )， $P_L-\beta$  曲线基本成直线，随着  $\beta$  的增大， $P_L$  保持基本不变； $\alpha$  增大至一定值 ( $\alpha > 0.5$ ) 后， $P_L-\beta$  曲线的变化规律与  $P_L-\alpha$  曲线类似，开始随着  $\beta$  的变大，结构的极限载荷  $P_L$  无明显波动，基本保持不变； $\beta$  逐渐增大至一定值后 ( $\beta = 3 \sim 5$ )，极限载荷曲线  $P_L$  开始下降，下降趋势也成基本线性。同样也存在极限载荷曲线的拐点和引起结构极限载荷下降的临界形状参数  $\beta_0$ 。这个临界值  $\beta_0$  也随裂纹相对深度  $\alpha$  而变化。 $\beta_0-\alpha$  变化规律与  $\alpha_0-\beta$  类似，刚开始随着  $\alpha$  的变大，临界值  $\beta_0$  基本保持不变；但当  $\alpha$  增大至一定值 (0.5 左右) 后，临界值  $\beta_0$  开始变小，结构更早的开始出现极限载荷  $P_L$  下降趋势。 $\beta_0-\alpha$  的变化更剧烈。

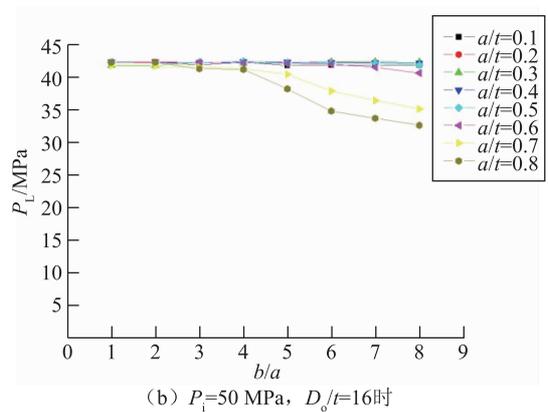


图 5 极限载荷-相对长度 ( $P_L-\beta$ ) 曲线族

### 3.1.3 形状参数 $\gamma$ 对极限载荷 $P_L$ 的影响

取裂纹位置角度  $\varphi$  为  $90^\circ$ ，固定裂纹相对深度  $\alpha$ ，固定裂纹相对长度  $\beta$ ，分析结构的极限载荷  $P_L$  随形状参数管壁相对厚度  $\gamma$  的变化规律。 $P_i = 100 \text{ MPa}$  时， $P_L-\gamma$  在不同的裂纹相对深度  $\alpha$  和相对长度  $\beta$  下的变化曲线如图 6 所示。

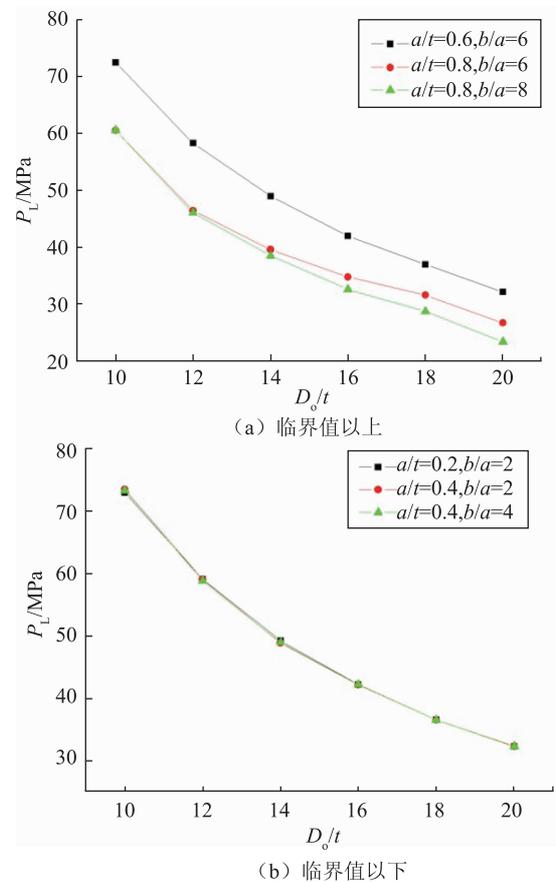
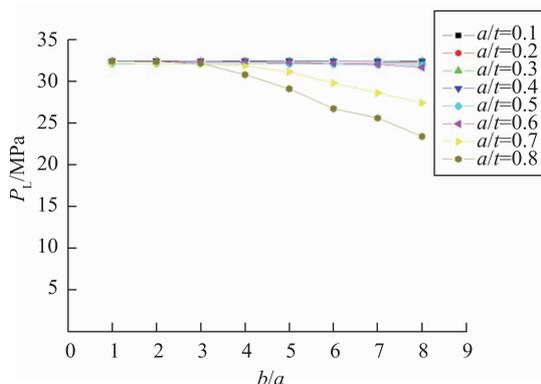


图 6  $P_i = 100 \text{ MPa}$   $P_L-\gamma(D_o/t)$  变化曲线

图 6  $P_i = 100 \text{ MPa}$  极限载荷-相对厚度 ( $P_L-\gamma$ ) 曲线族



(a)  $P_i = 50 \text{ MPa}$ ， $D_o/t = 20$  时

可以看到，结构的极限载荷  $P_L$  随  $\gamma$  的增大成非线性的减小，且极限载荷  $P_L$  的下降梯度逐渐变小，表示结构的削弱趋势稍放缓；其他形状参数  $\alpha$  和  $\beta$  的变化对  $P_L$ - $\gamma$  变化趋势没有很明显的影

响。  
 $P_i = 100$  MPa,  $\beta = 6$  时，变化  $\alpha$  得到  $P_L$ - $\gamma$  曲线族如图 7 所示； $P_i = 100$  MPa,  $\alpha = 0.7$  时，变化  $\beta$  得到  $P_L$ - $\gamma$  曲线族如图 8 所示。

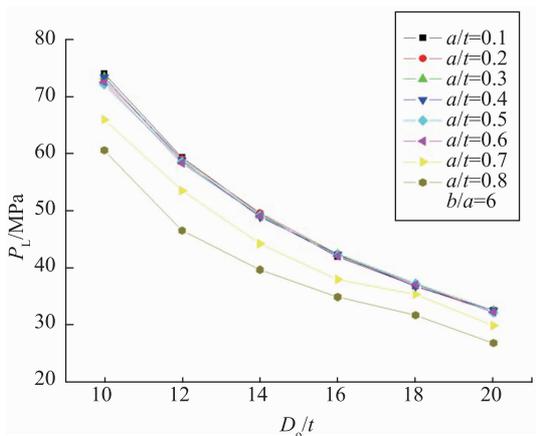


图 7  $P_i = 100$  MPa,  $\beta = 6$  时,  $P_L$ - $\gamma(D_0/t)$  曲线族

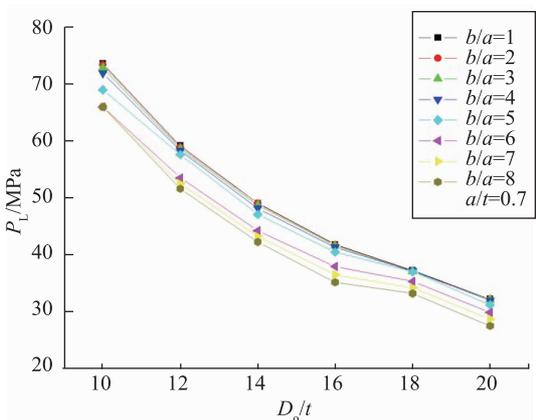


图 8  $P_i = 100$  MPa,  $\alpha = 0.7$  时,  $P_L$ - $\gamma(D_0/t)$  曲线族

### 3.2 斜接弯管含穿透裂纹

斜接弯管穿透裂纹的 3D 有限元模型需重新建立，如图 9 所示。模型建立方法与半穿透裂纹类似。对于穿透裂纹，形状参数  $\alpha = 1$  ( $a = t$ )， $\beta = b/t$ 。

取裂纹位置角度  $\varphi = 90^\circ$ ， $P_i = 100$  MPa 时，变化管壁相对厚度  $\gamma$  得到  $P_L$ - $\beta$  曲线族如图 10 所示。

穿透裂纹较明显的削弱了结构的极限承载能力，相比半穿透裂纹极限载荷变化曲线不存在开始的直线段区。在  $\beta$  很小时， $P_L$  就开始明显的下降，下降趋势基本成线性，且  $\gamma$  越大， $P_L$  的下降梯度越大，说明穿

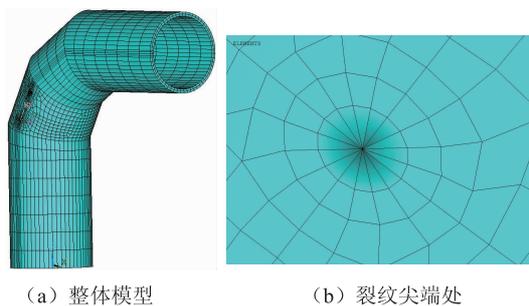


图 9 穿透裂纹的 3D 有限元模型

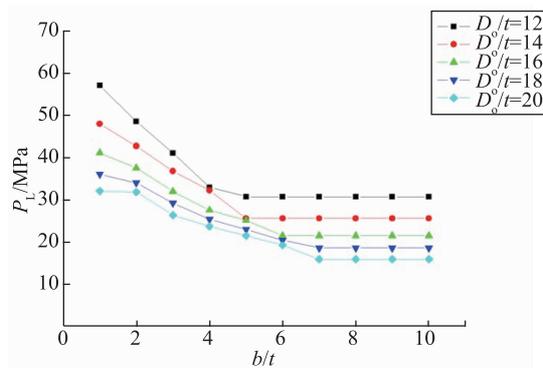


图 10  $P_i = 100$  MPa 时,  $P_L$ - $\beta$  曲线族

透裂纹对厚壁结构极限载荷有更大的削弱作用。 $\beta$  增大到一定程度会超过结构单节最大长度达到最大值，极限载荷  $P_L$  也就不会再发生变化。

$P_i = 100$  MPa，变化  $\beta$  得到极限载荷  $P_L$ - $\gamma$  曲线族，如图 11 所示。随  $\gamma$  的增大，结构极限载荷呈下降趋势，但  $P_L$  的下降梯度也在减小，说明穿透裂纹对结构极限载荷的影响在随管壁的减薄而减弱。

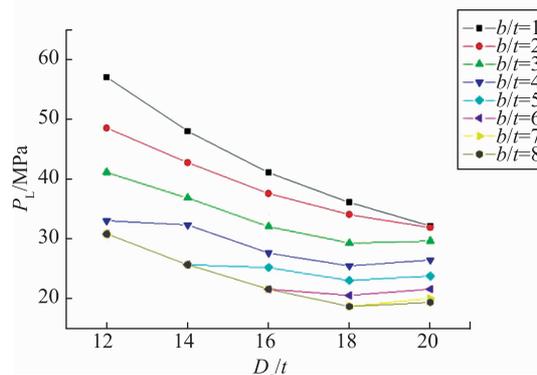


图 11  $P_i = 100$  MPa 时  $P_L$ - $\gamma(D_0/t)$  曲线族

## 4 结论

纯内压下纵向裂纹对结构极限载荷  $P_L$  的影响可总结为：①半穿透裂纹只有深度长度大到一定值才会对

结构极限载荷造成明显的削弱,  $P_L-\alpha$ ,  $P_L-\beta$  变化曲线开始都存在直线区,  $P_L$  随  $\alpha$ ,  $\beta$  的增大基本不减小, 当  $\alpha$ ,  $\beta$  增大到一定临界值  $\alpha_0$ ,  $\beta_0$  时,  $P_L$  才开始比较明显的下降; ②结构极限载荷  $P_L$  对形状参数  $\alpha$  的变化更为敏感,  $\alpha$  对  $P_L$  的影响要大于  $\beta$ ; ③随形状参数  $\gamma$  的增大, 极限载荷  $P_L$  逐渐减小, 但  $P_L$  变化梯度也在变小, 薄壁管的极限载荷受裂纹影响更小; ④穿透裂纹极大的削弱了斜接弯管的极限承载能力,  $P_L-\beta$  变化曲线不存在半穿透裂纹中出现的直线区。

参 考 文 献

[1] Wood J. A Review of Literature for the Structural Assessment of Mitred Bends[J]. International Journal of Pressure Vessels & Piping, 2008, 85(5): 275 - 294.  
 [2] 肖传冰, 李惠荣, 唐柱才. 焊制斜接弯管应力的有限元分析[J]. 石油化工设备, 2004, 33(2): 28 - 30.  
 [3] 王冉, 李惠荣, 闻拓. 内压作用下斜接弯管纵向半穿透裂

纹应力强度因子研究[J]. 化工装备技术, 2012, 33(4): 14 - 17.  
 [4] 李玉贵. 斜接弯管环向穿透裂纹有限元分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.  
 [5] 杜国强, 李惠荣. 斜接弯管内侧环向内表面裂纹弹性分析[J]. 化工装备技术, 2009, 30(4): 62 - 65.

收稿日期: 2018 - 09 - 03

作 者 简 介



王冉(1985 -), 男, 工程师, 硕士。2012年毕业于大连理工大学安全技术与工程系, 同年到中国航天空气动力技术研究院工作至今。主要从事航天试验平台配套特种设备检验检测工作, 曾组织参与多个航天大型试验平台项目的验收工作, 主导并参与多个院所自主创新研发课题。



光兴产业, 福及万家 ——《户用屋顶光伏系统认证规范》正式发布

2018 年 9 月 6 日, 《户用屋顶光伏系统认证规范》的行业标准发布会在上海江苏饭店正式举行。

在分布式光伏发电政策的有力支持下, 国内户用光伏产业迎来爆发式增长。为进一步规范户用光伏市场, 促进户用光伏行业健康发展, 建立起完善、科学的户用光伏系统安全和性能检测标准及质量评估技术规范, 受国家认监委委托, 由中国质量认证中心负责认证的行业标准《户用屋顶光伏系统认证规范》的编制工作于 2017 年开始筹备。该项标准的草案制定工作于 2018 年 1 月 19 日正式着手进行, 并于 2018 年 7 月 31 日公示, 9 月 2 日结束公示。

分布式光伏发电的发展前景非常广阔, 但在相关标准出台前, 无论是光伏组件的生产、安装和维护等缺乏统一的规范, 其标准的制定又涉及生产、维护和电网等不同的企业单位。需要有能够为光伏行业提供如逆变器的检测、接地绝缘检测、温度检测等电能质量检测技术手段。据专业人士透露, 在计量行业内负责生产测试和检测故障仪器的福禄克公司参与了该标准的起草和制定工作。作为光伏产业链中的一员, 福禄克承担了《户用屋顶光伏系统认证规范》中电磁兼容和通用要求等两项标准的制定工作。

随着光伏产业健康有序的发展, 装机量的快速增加, 据相关部门预测, 未来几年很可能会超越风能发电, 成为更受欢迎的新能源产业之一。户用光伏的优势在于既可满足自用需求, 也可以并网缓解电力系统的用电需求。除了节能环保, 还可作为帮助农村发展的一种脱贫手段。农户安装后, 可选择作为储能设备自用或并网给国家电网机构, 从而获得相应的电费补贴; 也可以将其屋顶出租给专业的光伏生产厂家, 由其进行产品安装, 农户向厂家收取一定的屋顶使用费用。这样不但很好的解决了西藏、内蒙等游牧偏远地区的用电问题, 还可增加贫困地区居民的经济收入。专业人士预计, 在不久的将来, 随着户用光伏的普及, 人们将惊喜地看到家家户户屋顶上, 那一片片的“光”与清晨金色的阳光交相辉映。

(刘倩倩 供稿)