

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.06.016



# 龙卷风作用及核电站结构极端风荷载 相关问题研究综述

张文娜, 钱江

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:**在结构荷载规范中一般均不考虑龙卷风荷载,但对于某些设防要求极高的重要工程设施,如核电站,则需要考虑可能的龙卷风荷载作用。从龙卷风风场理论模型的研究发展入手,对直接风压荷载的确定、风致飞射物间接作用以及特种工程结构-核电站抗龙卷风设计的研究现状进行了归纳总结,指出了龙卷风直接风压计算中考虑轴吸力作用、风场平移运动及风致扭转作用的必要性以及飞射物冲击作用应区别弹体相对刚度及端部形态对作用效果的影响。

**关键词:**龙卷风荷载;风致飞射物;冲击响应;抗龙卷风设计

**中图分类号:**TU312.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)06-0121-08

## Literature review of tornado action and related issues of nuclear power plants under extreme wind load

Zhang Wenna, Qian Jiang

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

**Abstract:** Generally, the cost of tornado-resistant design of structures is much higher than expected loss of wind-induced disaster. Therefore, load codes for the design of building structures generally take no consideration of tornado. However, some important engineering facilities with extreme high security requirements, like nuclear power plants, need to consider possible tornado-induced wind loads. This paper starts with the state-of-art of tornado models, then, the determination of direct wind pressure on structures, indirect action of tornado-generated missiles and the tornado-resistant design of special engineering structure like nuclear power plant, are summarized. Then it points out the necessity of calculating the tornado-induced wind loads by considering axial wind suction, translational motion of wind field and torsional response. The effect of the relative stiffness and end form of projectiles should be taken into account in the impact load of tornado-generated missiles.

**Keywords:** tornado-induced wind loads; tornado-generated missiles; impact response; tornado-resistant design

**收稿日期:**2016-03-09

**基金项目:**科技部国家重点实验室基金(SLDRCE15-B-06);国家自然科学基金(91315301-4)

**作者简介:**张文娜(1988-),女,博士生,主要从事结构抗冲击性能研究,(E-mail)88zwn@163.com。

钱江(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)jqian@tongji.edu.cn。

**Received:**2016-03-09

**Foundation item:** Foundation of State Key Laboratory from the Ministry of Science and Technology(No. SLDRCE15-B-06); Major Research Plan of the National Natural Science Foundation of China(No. 91315301-4)

**Author brief:** Zhang Wenna (1988-), PhD candidate, main research interest: impact resistance of structure, (E-mail) 88zwn@163.com.

Qian Jiang(corresponding author), professor, doctoral supervisor, (E-mail)jqian@tongji.edu.cn.

龙卷风是由大气剧烈对流产生的一种高速旋转的移动风暴,它作用范围小,生消快,其发生时间和位置难以确定,风速极高,破坏力巨大,龙卷风经过之处会对影响范围内的建筑物造成极其严重的破坏<sup>[1]</sup>。在任何一个地方,龙卷风的发生概率远低于其他极端风,通常认为抗龙卷风设计的结构成本远远高于龙卷风袭击危害有关的期望损失,因此,在各国的建筑规范中一般不考虑龙卷风荷载,但是对于重要生命线工程,如核电站设计,需要进行抗龙卷风设计。中国在建核电站大多分布在辽宁、山东、浙江、福建和广东等经济发达和人口密集的沿海地区,而这些地区也是龙卷风和台风等极端风易发地区<sup>[2]</sup>,一旦发生核电站事故往往造成巨大的生命和财产损失,因此,对于核电站抗龙卷风设计研究至关重要。

对于龙卷风的研究可以追溯到19世纪末,早期的研究主要侧重于龙卷风气象研究和龙卷风产生的破坏。之后,学者们从理论上、现场实测、实验和数值模拟等方面对龙卷风进行了深入的研究分析。龙卷风风场模型是确定风荷载的基础,风致荷载主要包括以下3个方面<sup>[3]</sup>:气流直接作用在结构上引起的风压;龙卷风掠过结构物时大气压力场变化引起的压力;龙卷风飞掷物引起的冲击力。

## 1 龙卷风理论模型研究

龙卷风的成因比较复杂,而一旦形成后,其形态与运动是致灾的关键。在结构抗龙卷风设计中,首先需要解决的问题是确定龙卷风荷载,因此,需要了解龙卷风风场及龙卷风理论模型。自19世纪末起,提出过多种龙卷风的理论模型,比较有代表性的是:Rankine二维涡模型、Wen三维半经验模型以及Burgers-Rott三维涡模型。由龙卷风理论模型给出的风速分布,进而确定风压力。

### 1.1 二维 Rankine 涡模型

在龙卷风研究的初期,有学者发现龙卷风运动规律与Rankine涡模型比较接近,因此,在研究过程中将龙卷风简化为二维模型。1882年Rankine提出了Rankine涡模型,它是一种二维环流运动,在此环流区域中围绕原点整体旋转,其速度正比于离原点的距离;在区域的外边,旋度是自由的,其速度反比于离原点的距离。其切向速度分布如(1)式及图1所示<sup>[4]</sup>。

$$V_r = \begin{cases} \frac{r}{R} V_R & (0 \leq r \leq R) \\ \frac{R}{r} V_R & (R \leq r \leq \infty) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $V_r$ 是距涡旋中心为 $r$ 处的切向风速, $V_R$ 是Rankine涡旋的最大切向风速, $R$ 是最大切向风速对应的旋转半径, $r$ 是风场中任一点距龙卷风中心的距离。

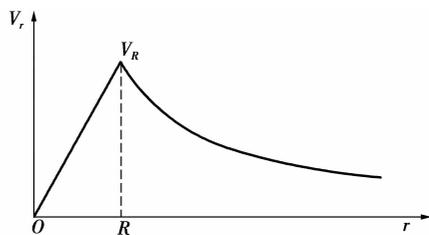


图1 Rankine 涡速度分布图

Fig. 1 The velocity profile of Rankine core

Hoecker<sup>[5-6]</sup>研究发现龙卷风333 m高度处的运动与Rankine涡旋较为接近。Sun等<sup>[7]</sup>以Navier-Stokes方程和Hoecker提出的旋转风方程等为基础进行理论推导,提出了适用于核电站风荷载计算的龙卷风通用简化模型,Rankine涡模型和Hoecker涡模型是该模型的一种特殊情况。Rankine涡模型具有模型简单、有精确解等优点,且在一定程度能够反应龙卷风风场的一般特性,因此,学者在研究龙卷风荷载时风速一般采用二维Rankine涡模型<sup>[8-10]</sup>。目前有关对龙卷风荷载的规定大多是采用二维Rankine模型表示龙卷风风速分布。尽管Rankine涡模型已经广泛的应用在龙卷风研究中,但是该模型是不考虑轴向流运动的二维流,且不考虑黏性作用,与实际的三维龙卷风风场是不符的。

### 1.2 三维龙卷风理论模型

由于二维Rankine涡模型与实际龙卷风风场不符合,Kuo<sup>[11]</sup>提出一种三维龙卷风理论模型,同时给出了龙卷风风速分布。Wen<sup>[12]</sup>在此基础上提出了龙卷风半经验理论模型,规定涡旋边界层内外风速和各个最大运动参数的固定比例。龙卷风边界层厚度表达为

$$\delta(r') = \delta_0 [1 - \exp(-0.5r'^2)] \quad (2)$$

式中: $r = \frac{r'}{r_{\max}}$ , $r'$ 是模拟点距龙卷风中心的距离; $r_{\max}$ 是最大切向风速处半径; $\delta_0$ 是 $r \gg 1$ 时龙卷风边界层厚度,一般取457 m,见图2。

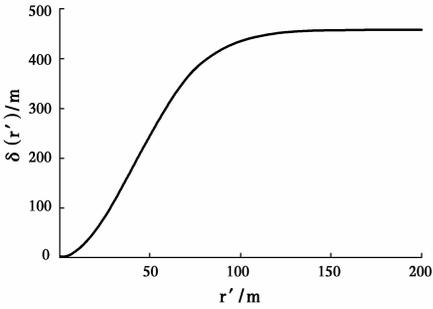


图 2 边界层厚度曲线

Fig. 2 Boundary layer thickness of a tornado

边界层以上风速如(3)式分布。

$$\begin{cases} v_T(\eta, r) = f(r) = 1.4[1 - \exp(-1.256r^2)] \frac{v_{\max}}{r} \\ v_R(\eta, r) = 0 \\ v_w(\eta, r) = f(r) = 93r^2 \exp(-5r) v_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

边界层内部风速为(4)式分布。

$$\begin{cases} v_T(\eta, r) = f(r)[1 - e^{-\pi\eta} \cos(2b\pi\eta)] \\ v_R(\eta, r) = f(r)\{0.672e^{-\pi\eta} \sin[(b+1)\pi\eta]\} \\ v_w(\eta, r) = 93r^2 \exp(-5r) v_{\max} [1 - e^{-\pi\eta} \cos(2b\pi\eta)] \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $v_T(\eta, r), v_R(\eta, r), v_w(\eta, r)$  分别是切向速度、径向速度和竖向速度;  $v_{\max}$  是最大切向速度;  $b = 1.2e^{-0.8r^4}$ ,  $\eta = \frac{z}{\delta(r')}$ ,  $z$  是模拟点距地面的高度。

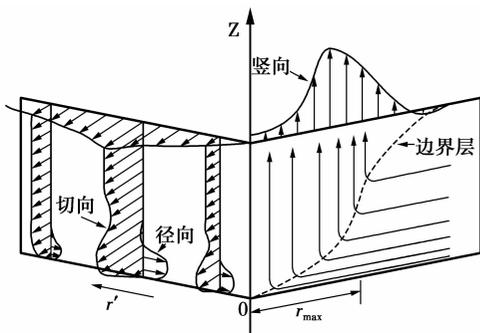


图 3 三维龙卷风风速分布图

Fig. 3 Schematic representation of a tornado

Wen 建立的三维龙卷风理论模型为以后的龙卷风研究提供了很好的理论依据, Savory 等<sup>[13]</sup>采用 Wen 模型研究了龙卷风作用下输电塔响应。陈艾荣等<sup>[14]</sup>利用 Wen 风场半经验公式分析了大跨径斜拉桥在龙卷风作用下的响应。Wen 半经验理论风场模型对气压降的考虑不够完善, 而气压降对低矮封闭结构有着巨大作用。汤卓等<sup>[15]</sup>对 Wen 给出

的三维龙卷风理论模型进行了完善补充, 得出 Wen 龙卷风风场模型下的气压场控制方程。尽管 Wen 半经验理论模型得到广泛应用, 但是该模型规定涡边界层内外风速及各最大运动参数的比例固定, 隐含了龙卷风规模的缩放关系及模型的指向性, 这与龙卷风的多样性是不符的。

另一种三维龙卷风模型基于 Burgers 涡旋流<sup>[16]</sup>, 这是一种有轴向拉伸的定位轴对称涡旋流, Burgers 涡考虑了空气黏性作用, 能够较好的反映出某些常见涡旋流动的主要特征<sup>[17]</sup>。Rott<sup>[18]</sup>在 Burgers 涡旋流的理论上考虑科里奥利的柱坐标方程提出了 Burgers-Rott 涡旋。实际龙卷风除保持涡旋运动外, 在前进方向是一种具有梯度风特性的平移运动。然而, 学者们在研究龙卷风对结构的作用时鲜有考虑龙卷风的平移运动。因此, 甘文举等<sup>[19]</sup>运用 Burgers 涡运动理论及平移风速梯度理论建立了涡旋及平移运动合成下的准定常三维龙卷风模型。Burgers 涡的不足之处是假定轴向速度只是  $z$  坐标的函数, 致使其与另外两个方向的速度耦合较弱, 这与实际情况并不一致。

由上述研究可以看出, 多年来学者们对龙卷风理论模型进行了大量的研究并取得一系列成果, 成为研究结构抗龙卷风设计的理论基础。但是, 实际的龙卷风风场是非常复杂的, 迄今为止人们对它还不完全了解, 现有理论模型与实际龙卷风风场均存在一定的差异。对于龙卷风理论模型仍有待进一步完善与验证, 特别是龙卷风风场的实测验证。

## 2 龙卷风作用及风致飞射物冲击荷载研究现状

现行建筑荷载规范针对的是常规风场对结构的作用, 龙卷风由于其发生概率极低、设防成本过高, 并未纳入设计荷载考虑范围。但对于一些特殊结构、特定的地域, 如核电站设施, 龙卷风可能导致严重后果, 是结构设计中必须考虑应对的。龙卷风对于土建结构的危害通常由风和大气压力改变这两个现象引起, 主要体现在 3 个方面: 空气移动并围绕着结构所建立起来的风压, 相对大气压快速改变引起的负压, 龙卷风飞射物所引起的冲击。

### 2.1 龙卷风荷载

Simiu 等<sup>[13]</sup>较为系统的阐述了龙卷风对结构的影响, 采用二维 Rankine 涡为理论模型获得龙卷风风速分布, 给出了龙卷风风压和降压差计算方法, 对

龙卷风飞射物冲击荷载进行了讨论,同时,考虑了龙卷风的区域分布特点,将全美国划分为 3 个龙卷风强度区,并给出了各个龙卷风强度区的龙卷风最大风速,旋转风速,移动速度和最大旋转风速半径等参数值。为此后的结构抗龙卷风设计奠定了基础。

风灾统计表明:龙卷风作用与建筑结构位置、地面粗糙及龙卷风平移速度均有关。Zhang 等<sup>[20]</sup>利用 PIV 技术观测实验模拟的微小尺度龙卷风流场,研究分析了地面粗糙度对龙卷风漩涡的影响及其速度分布,结果表明,地面粗糙度对龙卷风速度和湍流特性有重要影响。Sengupta 等<sup>[21]</sup>对建筑在微风暴和龙卷风作用下的瞬时加载进行了研究,发现微风暴的峰值取决于平移速度,高的微风暴平移速度下阻力系数峰值单调增加;F2 级龙卷风作用下的峰值超出美国荷载规范规定值的 1.5 倍。Yang 等<sup>[22]</sup>对龙卷风作用下高层建筑进行了实验研究,结果表明漩涡的演变和湍流结构以及引起的大风明显不同于传统直线大风。Natarajan 等<sup>[23-24]</sup>研究了建筑位置、地面粗糙度和平移速度对龙卷风漩涡及建筑物表面压力的影响。Rajasekharan 等<sup>[25-26]</sup>研究了地面粗糙度对暴露在龙卷风作用下建筑物内部压力的影响,结果表明:地面粗糙度增高,建筑物外部和内部压力系数都将增大,且外部压力系数增大幅度较内部压力系数大。

中国对龙卷风荷载研究起步较晚,夏祖颢<sup>[27]</sup>1987 年为应对秦山核电厂核安全结构抗龙卷风设计的需求,编制了秦山核电厂核安全结构龙卷风荷载设计标准。在此基础上,于 1989 年形成了《三十万千瓦压水堆核电厂安全重要土建结构抗龙卷风设计规定(EJ 420—89)》<sup>[28]</sup>,该规定对抗龙卷风设计进行了较系统的阐述。并成为之后涉核工程结构抗龙卷风设计的参考依据。甘文举等<sup>[10]</sup>应用 Rankine 涡运动理论,结合中国的龙卷风灾害探讨了气流速度和压力沿平面的分布规律,对建筑物风压力、风吸力、扭转的实用计算进行了探讨。其后,进一步研究了龙卷风近地移动梯度对低层房屋风场影响,探讨了考虑近地水平风剖面分布下的风场规律及其对低层房屋的作用特点<sup>[19]</sup>。刘伟等<sup>[29]</sup>对房屋进行漏斗结构平移模型下的龙卷风荷载分析,得出龙卷风吸力的大小随龙卷风的高度而变化,对低矮房屋的作用力最大。白俊峰等<sup>[9]</sup>进行龙卷风作用下空间桁架的受力分析,结合实例建立龙卷风的风场数值模型,提出在龙卷风作用下桁架结构的荷载处理方法和加

载方法。汤卓等<sup>[15]</sup>在综合分析了龙卷风袭击建筑物时高速风冲击作用和突然气压降作用的基础上,提出了封闭结构龙卷风荷载的计算方法。采用计算流体动力学(CFD)方法对某大跨穹顶结构周围风场进行数值模拟,得到了结构的压力系数以及该结构的龙卷风荷载时程,利用时程分析方法对结构进行龙卷风作用下的风致动力响应分析,得到了结构在龙卷风作用下的位移时程。其后对龙卷风作用下双坡屋面风压分布进行了试验研究<sup>[30]</sup>,获得了屋面风荷载的分布规律。

现行规范中龙卷风荷载的计算方法,仍类比于常规风荷载公式,差别仅在于风速度取值,而风速的确定则是基于二维 Rankine 涡模型,这与实际的龙卷风风场并不相符。事实上,龙卷风竖向运动对结构的作用是巨大的,尤其龙卷风产生的吸力容易对结构产生巨大破坏,对于龙卷风吸力及风致扭转力对结构作用的研究还需要进一步深入探讨。

## 2.2 风致飞射物研究

龙卷风对结构的破坏作用除了直接产生的风压外,风致飞射物对结构的冲击破坏也是不可忽视的。早期的研究内容主要关注风致飞射物的冲击速度、冲击力曲线以及冲击轨迹等。Lee<sup>[31]</sup>对龙卷风飞射物进行了普遍性研究,对飞射物的气动特性进行了假定,提出了一种计算龙卷风飞射物速度的程序。Simiu 等<sup>[8]</sup>针对核电站抗龙卷风设计需求,对龙卷风飞射物的速度分布给出了评估。在核电站设计中,通常认为有可能成为飞掷物的物体均为钝体,譬如厚木板、钢棒、钢管、电线杆以及汽车等。Kar<sup>[32-33]</sup>对龙卷风飞射物冲击荷载及加载时间进行了研究,提出一种确定飞射物与目标面之间的接触力的方法,获得速度与加速度时间历程曲线;并与全尺寸实验进行了比较,两者的结果吻合较好,此种计算方法已经很有效的应用在侵彻计算中。Stephenson 等<sup>[34]</sup>对龙卷风飞射物进行了全尺寸实验研究,对常见的杆、管和棒等飞射物进行了 18 组实验,获得的数据可以直接用于结构设计和检验。Twisdale 等<sup>[35]</sup>对龙卷风飞射物的运动轨迹进行了分析,提出一种可以模拟龙卷风飞射物的初始释放和后续运动的方法。Dun 等<sup>[36]</sup>采用一种合成的风场模型研究了龙卷风飞射物的运动轨迹,研究表明采用此模型可以统计分析获得龙卷风飞射物的速度。McDonald 等<sup>[37]</sup>对常用建筑材料在龙卷风飞射物作用下的耐冲击性能进行了研究,实验研究了最可能

成为龙卷风飞射物的板和管的冲击速度,并确定他们穿过普通建筑墙体所需的速度。Schmidlind 等<sup>[38]</sup>对车辆在龙卷风中的行为进行研究,通过现场调查并依据龙卷风过后建筑物的破坏来评估车辆在龙卷风中的行为。Wills 等<sup>[39]</sup>根据风致飞射物的几何形状及空气动力学的性质将风致飞射物大致分为 3 类:块状飞射物、板状飞射物和棒状飞射物。现场实测及全尺寸实验结果为标准的制定提供了最直接的依据。

Maruyama<sup>[40]</sup>对在龙卷风漩涡下的飞行碎片进行了数值模拟分析,给出三维飞射物运动轨迹和最大水平速度的统计值。唐飞燕等<sup>[8]</sup>研究了龙卷风场中沙粒对结构的冲击作用,指出龙卷风中沙粒对结构的作用不可忽视。Zhou 等<sup>[41]</sup>对由碳纤维加强混合聚合物-基体复合材料保护的新型风暴安全房屋系统进行了龙卷风飞射物冲击性能试验与理论分析研究,研究表明文中所提新型风暴安全房屋系统能够更好地抵抗龙卷风飞射物的冲击。Li 等<sup>[42]</sup>对龙卷风飞射物作用下的管道设计进行了研究,提出一种单自由度非线性分析模型并分析了冲击作用下管道的四种破坏模式。

研究表明,风速超过 34 m/s 时就有可能在风场内物体或建筑物结构中诱发飞射物,大多龙卷风都会产生飞射物并可能造成结构的破坏。常规结构设计由于设防成本并不考虑龙卷风的影响,但是对于重要的工程结构,如核电站,由于安全原因需要考虑抗龙卷风设计。现行的核电站抗龙卷风设计一般由龙卷风飞射物速度设计谱确定飞射物的冲击性能。美国核标准 RG1.76 规则中给出了龙卷风飞射物速度设计谱。中国规范要求:核电厂在建设的早期阶段厂址选择的调研中,需考虑飞射物对核电站可能的影响;对于飞射物的质量、速度、形状、尺寸、材料、结构特点、冲击角度等参数需要详细的调查<sup>[43]</sup>。EJ 420—89 核标准给出了核电厂龙卷风飞射物的设计谱。1991 年中国核安全局批准发布的《核电厂厂址选择的极端气象条件》(HAD101/10)给出风致飞射物的暂行规定<sup>[44]</sup>:1 800 kg 重的汽车,125 kg 重的 20 cm 穿甲炮弹,2.5 cm 实心钢球;飞射物的碰撞速度取设计基准龙卷风最大水平风速的 35%。

这些规定明显过于粗糙,依据也并不充分:核标准中仅给出 3 种较为单一的钝体飞射物,而实际龙卷风产生的飞射物是多种多样的,且对于飞射物冲击速度的规定也较为笼统;飞射物前段形态及其冲

击破坏效果的影响是显而易见的,至少应该区分钝体和尖锐飞射物的不同。

### 2.3 核电站结构抗龙卷风设计方法

目前,荷载规范均不涉及结构抗龙卷风设计,但在核电站设计中,都列入了抗龙卷风设计的相关要求,一般采用如下步骤:

1) 确定结构所在区域龙卷风设计基准。收集区域内龙卷风的历史资料并分析龙卷风的时空分布特征,根据核标准中相关方法计算得出区域龙卷风设计基准参数,包括龙卷风等级、最大旋转风速半径以及设计基准风速等参数<sup>[43]</sup>。

2) 确定龙卷风风压。采用调研获得的龙卷风设计基准风速等参数,根据有关核标准计算龙卷风风压。各国的计算方法具体虽有不同,但其思路都是以常规风荷载风压计算方法为基础修改相应参数来获取风卷风风压。采用二维 Rankine 涡确定龙卷风风速分布、风压计算时假设风速与相应的风压不随离地面的高度变化。

中国 EJ 420-89 标准中给出的建筑物表面龙卷风荷载计算公式如式(5)<sup>[28]</sup>。

$$W_w = K_1 \cdot K_2 \cdot W_0 \quad (5)$$

式中: $W_0$  是设计基准龙卷风的风压,基本风压公式通过伯努利方程推导,适用条件是不可压缩气体,当风速不大于 102 m/s 时,此假设是成立的。值得注意的是空气密度需要考虑气流夹雨滴、水汽、沙尘、杂物等修正。对于龙卷风而言,阵风系数和风压高度变化系数可以假定为 1。 $K_1$  是尺寸系数,设计风速由最大风速决定,为了得出设计所需要的平均压力,在结构的风载考虑中可计入小于 1 的结构尺寸系数,以适当考虑实际龙卷风风压分布的不均匀性。 $K_2$  是风荷载体型系数,由于龙卷风的旋转风速的分布近似地为 Rankine 漩涡所控制,风载的结构体型系数可参考常规风荷载规范。

3) 确定龙卷风降压差。美国和中国核标准都是以 Wen 龙卷风半经验理论模型为基础,获得龙卷风降压差<sup>[4,44]</sup>。EJ 420-89 标准中采用一个近似为梯形的阶梯函数来考虑作用在屋顶和墙体上的差压荷载。

4) 确定飞射物的冲击性能。根据确定的龙卷风设计基准参数,参照相关核标准飞射物设计速度谱,确定飞射物的材质、形状、质量、速度等参数。

5) 荷载组合。对于飞射物冲击作用,先将冲击动力荷载等效成静态力,然后与其他静荷载进行组

合,将组合荷载施加在结构上进行结构验算。

以上基于静态计算的抗龙卷风设计方法,虽然具有简便、实用的特点,但在合理、准确性方面仍存在明显不足:依据二维 Rankine 涡确定龙卷风荷载,无法考虑龙卷风轴向运动产生的轴吸力作用,而龙卷风产生的轴向吸力往往对房屋屋顶造成严重的破坏;没有考虑龙卷风的平移运动和风致扭转作用对结构的作用,龙卷风的平移运动会增强风吸力作用,而风致扭转效应也是导致房屋产生破坏的重要因素;龙卷风风场是非常复杂的涡旋,龙卷风降压差与常规风降压差有所不同,采用近似为梯形的阶梯函数来考虑龙卷风降压差是否准确需要进一步验证;采用基于静态计算的方法不能正确反映风致飞射物冲击作用的短时瞬变特性和响应局部化特征。

### 3 核电站结构抗龙卷风研究存在的问题与发展趋势

由上述研究现状看出,学者们对龙卷风的场及风致荷载的研究从最早采用灾后结果实测到理论研究,从二维理论模型逐渐推广到各种三维理论模型研究,再到风洞实验和有限元方法数值模拟研究,均取得了一定成果,为结构抗龙卷风设计提供了有力的理论依据。但由于龙卷风发生地域有限、发生概率极低、设防成本过高,直接导致了研究动力不足,相关理论无论其完备性还是深入程度都存在欠缺或不足。面向特种结构的设防需求,以下问题值得关注也有待解决。

1) 尽管学者们对于龙卷风风场的研究投入了大量的精力,但是由于龙卷风的作用范围小,生消快,其发生时间和位置难以确定等特点,人们对其了解得不透彻,已有的各类龙卷风风场理论模型也都需要进一步的验证与完善。

2) 现行龙卷风风压荷载的确定方法仍有不足之处,首先 Rankine 涡理论模型没有考虑涡旋轴向运动,这与现实中的龙卷风运动不符,因此,无法考虑龙卷风产生的轴向吸力,而龙卷风吸力可能对结构造成严重的破坏,尤其底层房屋屋顶可能因为龙卷风吸力而被掀翻。其次,龙卷风风压是在常规风荷载基础上加以修正而获得,体型系数、尺寸系数等修正参数有待精确。结构抗龙卷风设计并未考虑龙卷风运动的移动性和运动过程产生的扭转运动,这些方面仍需深入研究。

3) 结构因风致飞射物的损害是一系列随机事

件,且飞射物进入风场的方式也不同,这造成确定风致飞射物的冲击性能上的困难。故而工程上采用标准的龙卷风设计谱确定风致飞射物的冲击性能。然而设计谱中的风致飞射物种类有限,并不能全面覆盖龙卷风运动过程中可能发生的各类突发状况。如现行规定中仅给出钢管、汽车和 2.5 cm 实心钢球 3 类飞射物的设计谱,而现实龙卷风可能产生角钢、钢板及建筑受龙卷风袭击自身产生的飞射物等。角钢等尖锐飞射物对结构的冲击性能是否可以参照设计谱给出的数据设计是个开放性问题;不同种类飞射物对结构的冲击持时有所不同,然而规定中并未涉及此类问题。因此对于各类典型风致飞射物的冲击性能研究还有待完善。

4) 目前对于风致飞射物的研究主要集中在飞射物性能和其对结构构件的冲击影响研究,一般不考虑飞射物本身的刚度特性以及与靶体的耦合效应,这方面有待扩展。

5) 现行规范对风致飞射物的冲击荷载设计方法为拟静力方法,将动力荷载简化为静力荷载施加于结构进行分析,该分析方法存在计算不够准确、不能正确反应结构破坏的局部效应等问题。飞射物的形状、飞射角度、飞射物材质刚度等因素都可能影响结构破坏的局部效应,而采用拟静力方法无法体现其影响结果。现行抗龙卷风设计中采用公式估算飞射物侵入深度来考虑结构防止飞射物穿透,验算可靠性有待研究。因此,对于采用风致飞射物的冲击力曲线进行动力时程分析或者用有限元进行风致飞射物冲击结构的动力响应分析值得研究。

#### 参考文献:

- [1] 曾辉,马中元,聂秋生. 核电站评价区域龙卷风的统计与天气特征分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2012, 29(2): 46-51, 55.  
ZENG H, MA Z Y, NIE Q S. Statistics on the tornado in evaluation area of nuclear power plant and weather characteristics analysis [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2012, 29(2): 46-51, 55. (in Chinese)
- [2] 魏文秀,赵亚民. 中国龙卷风的若干特征[J]. 气象, 1995(5): 36-40.  
WEI W X, ZHAO Y M. The characteristics of tornadoes in China [J]. Meteorological Monthly, 1995(5): 36-40. (in Chinese)
- [3] 埃米尔·希缪,罗伯特·H·斯坎伦. 风对结构的作

- 用—风工程导论[M]. 刘尚培,项海帆,谢霖明,译. 上海:同济大学出版社,1992.
- [4] US Nuclear Regulatory Commission, Design-basis tornado and tornado missiles for nuclear power plants; Regulatory guide 1.076 [S]. Washington: Office of Nuclear Regulatory Research, 2007.
- [5] HOECKER W H. Three-dimensional pressure pattern of the Dallas tornado and some resultant implications [J]. Monthly Weather Review, 1961, 89(6): 533-542.
- [6] HOECKER W H. Wind speed and air flow patterns in the Dallas tornado of April 2, 1957 [J]. Monthly Weather Review, 1960, 88(5): 167-180.
- [7] SUN C N, BURDETTE E G, BARNETT R O. Theoretical tornado vortex model for nuclear plant design [J]. Nuclear Engineering and Design, 1977, 44(3): 407-411.
- [8] 唐飞燕,汤卓,吕令毅. 龙卷风场中沙粒对结构冲击作用的研究[J]. 工程建设, 2013(3): 19-23.  
TANG F Y, TANG Z, LU L Y. Study on impact action of sand particles in tornado field to the structure [J]. Engineering Construction, 2013(3): 19-23. (in Chinese)
- [9] 白俊峰,鞠彦忠,曾聪. 龙卷风作用下空间桁架的受力分析[J]. 东北电力大学学报, 2011(Sup1): 46-51.  
BAI J F, JU Y Z, ZENG C. Force analysis of space truss subjected to tornado loads [J]. Journal of Northeast Dianli University, 2011(Sup1): 46-51. (in Chinese)
- [10] 甘文举,何益斌. Rankine 涡平移模型下低层房屋龙卷风荷载的分析[J]. 四川建筑科学研究, 2009(1): 84-86.  
GAN W J, HE Y B. Analysis of tornado forces on low-rise buildings according to the model of transmitting Rankine vortex [J]. Sichuan Building Science, 2009(1): 84-86. (in Chinese)
- [11] KUO H L. Axisymmetric flows in the boundary layer of a maintained vortex [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1971, 28(11): 20-41.
- [12] WEN Y K. Dynamic tornadic wind loads on tall buildings-closure [J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1976(5): 1160-1162.
- [13] SAVORY E, PARKE G A R, ZEINODDINI M, et al. Modelling of tornado and microburst-induced wind loading and failure of a lattice transmission tower [J]. Engineering Structures, 2001, 23(4): 365-375.
- [14] 陈艾荣,刘志文,周志勇. 大跨径斜拉桥在龙卷风作用下的响应分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005(5): 569-574.
- CHEN A R, LIU Z W, ZHOU Z Y. Tornado effects on large span cable-stayed bridges [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005(5): 569-574. (in Chinese)
- [15] 汤卓,张源,吕令毅. 龙卷风风场模型及风荷载研究[J]. 建筑结构学报, 2012(3): 104-110.  
TANG Z, ZHANG Y, LU L Y. Study on tornado model and tornado-induced wind loads [J]. Journal of Building Structures, 2012(3): 104-110. (in Chinese)
- [16] BURGERS J M. A mathematical model illustrating the theory of turbulence [J]. Advances in Applied Mechanics, 1948(1): 171-199.
- [17] 童秉纲,尹协远,朱克勤. 涡运动理论[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2009.
- [18] ROTT N. On the viscous core of a line vortex [J]. Zeitschrift Fur Angewandte Mathematik Und Physik, 1958(5/6): 543-553.
- [19] 甘文举,何益斌,童小龙. 龙卷风近地移动梯度对低层房屋风场影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2011(4): 22-25.  
GAN W J, HE Y B, TONG X L. Influence of near-ground translational gradient on the tornado-induced wind-field around a low-rise building [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2011(4): 22-25. (in Chinese)
- [20] ZHANG W. Effects of ground roughness on tornado-like vortex using PIV [C]// The 1st American Association for Wind Engineering Workshop, Vail, Colorado, 2008.
- [21] SENGUPTA A, HAAN F L, SARKAR P P, et al. Transient loads on buildings in microburst and tornado winds [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(10/11): 2173-2187.
- [22] YANG Z, SARKAR P, HU H. An experimental study of a high-rise building model in tornado-like winds [J]. Journal of Fluids and Structures, 2011, 27(4): 471-486.
- [23] SABAREESH G R, MATSUI M, TAMURA Y. Dependence of surface pressures on a cubic building in tornado like flow on building location and ground roughness [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 103(1): 50-59.
- [24] NATARAJAN D, HANGAN H. Large eddy simulations of translation and surface roughness effects on tornado-like vortices [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 104-

- 106: 577-584.
- [25] GEETHA R S, MATSUI M, TAMURA Y. Characteristics of internal pressures and net local roof wind forces on a building exposed to a tornado-like vortex [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2013, 112(1): 52-57.
- [26] SABAREESH G R, MATSUI M, TAMURA Y. Ground roughness effects on internal pressure characteristics for buildings exposed to tornado-like flow [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2013, 122(11): 113-117.
- [27] 夏祖讽. 秦山核电站核安全结构的抗龙卷风设计[J]. *核动力工程*, 1987(6): 26-28.  
XIA Z F. Tornado-resistance design for the nuclear safety structure of the Qinshan nuclear power plant [J]. *Nuclear Power Engineering*, 1987(6): 26-28. (in Chinese)
- [28] EJ420-89 三十万千瓦压水堆核电站安全重要土建结构抗龙卷风设计规定标准[R]. 北京: 中华人民共和国核工业标准出版社, 1989.
- [29] 刘伟, 张博, 刚芹果. 漏斗结构平移模型下房屋龙卷风荷载的分析[J]. *山西建筑*, 2010(35): 1-2.  
LIU W, ZHANG B, GANG Q G. Analysis on house tornado load under transitional model of funnel structure [J]. *Shanxi Architecture*, 2010(35): 1-2. (in Chinese)
- [30] 汤卓, 王兆勇, 卓士梅, 等. 龙卷风作用下双坡屋面风压分布试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2013(9): 112-117.  
TANG Z, WANG Z Y, ZHUO S M, et al. Experimental study on pressure distribution of gable roof to tornado [J]. *Journal of Building Structures*, 2013(9): 112-117. (in Chinese)
- [31] LEE A J H. A general study of tornado-generated missiles [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1974, 30(3): 418-433.
- [32] KAR A K. Loading time history for tornado-generated missiles [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1979, 51(3): 487-493.
- [33] KAR A K. Impact load for tornado-generated missiles [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1978, 47(1): 107-114.
- [34] STEPHENSON A E, SLITER G E, BURDETTE E G. Full-scale tornado-missile impact tests [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1978, 46(1): 123-143.
- [35] TWISDALE L A, DUNN W L, DAVIS T L. Tornado missile transport analysis [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1979, 51(2): 295-308.
- [36] DUNN W L, TWISDALE L A. A synthesized windfield model for tornado missile transport [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1979, 52(1): 135-144.
- [37] MCDONALD J R. Impact resistance of common building materials to tornado missiles [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 36,(1-3): 717-724.
- [38] SCHMIDLIN T W, KING P S, HAMMER B O, et al. Behavior of vehicles during Tornado winds [J]. *Journal of Safety Research*, 1998, 29(3): 181-186.
- [39] WILLS J A B, LEE B E, WYATT T A. A model of wind-borne debris damage [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(4/5): 555-565.
- [40] MARUYAMA T. Simulation of flying debris using a numerically generated tornado-like vortex [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011, 99(4): 249-256.
- [41] ZHOU H, DHIRADHAMVIT K, ATTARD T L. Tornado-borne debris impact performance of an innovative storm safe room system protected by a carbon fiber reinforced hybrid polymeric-matrix composite [J]. *Engineering Structures*, 2014, 59(2): 308-319.
- [42] LI J, WANG S, JOHNSON W. Pipe/duct system design for tornado missile impact loads [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, 269(4): 217-221.
- [43] 国家核安全局. 核电厂厂址选择的外部人为事件[R]. 北京: 中国法制出版社, 1989.
- [44] 国家核安全局. HAD101/10 核电厂厂址选择的极端气象事件[R]. 北京: 中国法制出版社, 1991.