

# 一次强龙卷风过程破坏力的估计

薛德强 李长军

(山东省气象中心, 济南 250031)

## 提 要

估计了1975年6月7日山东省栖霞县一次强龙卷风的环流参数:最大风速可达 $62\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,最大平移风速 $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,最大旋转风速 $50\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,总压力降为 $27.5\text{hPa}$ 。对龙卷风产生的极强的瞬时荷载、强烈的旋转扭曲、突然压力降及飞射物造成的破坏力进行了估计。

**关键词:** 龙卷风 环流参数 破坏力 评估

## 引 言

龙卷风是一种小范围的强烈旋风,从外观看,是从积雨云(或发展很盛的浓积云)底盘旋下垂的一个漏斗状云体。有时稍伸即隐或悬挂空中;有时触及地面或水面,旋风过

境,对树木、建筑物、船舶等均可能造成严重破坏。调查发现山东半岛区域1950~1997年共出现74次龙卷风,最强的是1975年6月7日发生在栖霞县的龙卷风。

1975年6月7日13时30分(北京时,

下同),栖霞县唐家泊、蛇窝沟镇迎门口、卧龙沟村遭龙卷风袭击。重灾区宽约100m,长度约9km以上。迎门口一棵40多厘米粗的梧桐连根拔起后(估计重量约300kg多),卷向空中200多米,飞行100多米落下,越过5处房子从村中心刮到村东头;村子一半房屋掀起屋顶,有的只剩房梁;某农家囤子放着地瓜干100~150kg,卷出2~2.5km。卧龙沟村2公顷多,共600多棵粗30多厘米的苹果树(21年树龄)连根拔起后,100多棵卷出200多米,近的10多米落下;一棵半搂粗的大栗树(直径40多厘米)连根拔起,刮出20米远;100多间房屋鼓了屋顶,有的房椽卷飞;一人旋到空中落在房顶落下摔伤。两村重伤16人,轻伤20余人。

### 1 龙卷风模型及参数的确定

众所周知,就当时的气象观测网和观测手段,极难甚至无法测到诸如龙卷风风速、气压等气象要素值,对于龙卷风的定量评定只能根据其经过的路径上的破坏景象加以鉴别。我们请了10位对天气预报、应用气候学、灾害学、工程气象学等有专长的同志依据该龙卷风的破坏景象,参照富士达~皮尔森强度分类法<sup>[1]</sup>定量评定得出该龙卷风的特征风速,综合大家的意见并集中讨论,使意见趋向一致,得出该龙卷风的最大风速估计 $62\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,强度为F2.6。

为了计算估计龙卷风的其它参数,利用旋衡风方程模型(描述龙卷风向内的径向压力与离心力平衡)<sup>[2]</sup>:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp_a}{dr} + v_i^2/r = 0$$

$dp_a/dr$ 表示离龙卷风涡旋中心 $r$ 处的大气压力梯度, $v_i$ 龙卷风旋转风速(切向风速),积分得压降

$$p_a = \rho v_m^2 (2 - r^2/r_m^2)/2 \quad 0 \leq r \leq r_m$$

$r_m$ 表示最大旋转风速半径, $v_m$ 为最大旋转风速,若为不通气结构,龙卷风通过时,结构

内压与大气压之差等于 $p_a$ , $p_a$ 最大值发生在 $r = 0$ 处, $p_{a,\max} = \rho v_m^2$ 是总压力降。

美国ANSI对核电站设计基准龙卷风中设定当最大风速 $63\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,最大旋转风速半径为 $77\text{m}$ <sup>[3]</sup>。国家核安全局编写的核电厂安全导则HAF0112-1991设计基准龙卷风中假定强龙卷风最大旋转风速半径约为 $50\text{m}$ <sup>[1]</sup>。本文取 $50\text{m}$ ,这和灾情中记录“重灾区宽约100m”相吻合。

对强龙卷风,中心气压很低,空气密度也较低,取 $\rho = 1.10\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,并假定最大旋转风速、平移风速比值为常数, $V_m/V_f = 290/70$ <sup>[1]</sup>,同时 $V_m + V_f = V$ ,则当最大风速 $V = 62\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,算出龙卷风最大平移风速为 $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,最大旋转风速 $50\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,总压力降为 $27.5\text{hPa}$ 。

### 2 龙卷风过程破坏力的估测

龙卷风对构筑物的破坏主要由于极高风速的冲击作用,对建筑物可产生极强的瞬时荷载;其强烈的旋转扭曲,在构筑物不同部位或同一部位先后产生极大扭矩;龙卷风中心通过时产生的突然压力降,可使密闭或半密闭的建筑物或容器产生炸裂式破坏;龙卷风产生的飞射物等会对建筑物或构筑物造成破坏。

#### 2.1 强荷载及旋转扭曲

我国风荷载规范规定,对一般建筑结构重现期取30年,对高层建筑或结构重现期取50年一遇的最大风速为标准所确定的风压值为设计规范。而国家核安全局核电厂安全导则HAF0112中假设龙卷风平均破坏面积是由 $V \geq 33.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速造成,对此我们认为平均破坏面积取当地30年一遇的最大风速以上的风速造成的更有依据。

因为风压与最大风速的平方成正比,经计算山东省各地30年一遇的最大风速均在 $30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,远小于这次龙卷风最大风速 $62\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,其瞬时最大风压是30年一遇设计

风压的4倍左右,况且农村一般民房并不一定按建筑规范设计,抗风能力更差,造成摧毁不可避免。同时龙卷核心存在强的上曳气流。由于夏季树木长有茂密的枝叶,遭受如此强力,正如灾情所述“许多大树连根拔起”。

### 2.2 突然压力降

这次龙卷风造成的重灾区宽约100m,最大平移风速为 $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,经过某地仅用10几秒。假定一个屋子内气压为标准大气压,即每平方米承受 $1.013\times 10^5\text{N}$ 的压力,当龙卷风从屋上经过时,屋外气压10几秒内降低27.5hPa,即每平方米承受 $0.985\times 10^5\text{N}$ 的压力,当门窗紧闭时屋内气压并没有降或降得很慢,这时候屋内外很大的气压差,就对每平方米的墙或天花板作用2750N的压力,如屋子天花板面积 $50\text{m}^2$ ,则作用于屋顶上的力应为 $1.38\times 10^5\text{N}$ (14t)左右。这种突然施加的力立即会把屋顶掀掉,象从内部发生爆炸一样,四周墙壁也将承受巨大的压力而爆炸。正如灾情所述“一半房屋掀起屋顶,有的只剩房梁”,“100多间房屋鼓了屋顶”。

### 2.3 龙卷风产生的飞射物

由于飞射物进入龙卷风场的方式(如爆炸的、气动的或滑行的)及在龙卷风中被加速物体的空气动力学系数等的不确定性,计算

龙卷风产生的飞射物的碰撞速度是困难的,国家核安全局核电厂安全导则 HAF0112 中将基准龙卷风的最大水平风速的35%作为碰撞速度,若如此则这次龙卷风产生的飞射物的速度是 $21.7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

### 3 小结

龙卷风是大气中范围极小的猛烈风暴,且持续时间较短,破坏力极大,历史上由于受探测手段的限制对龙卷风参数的探测非常困难,所以只能根据龙卷风过后的破坏景象加以估计。本文采用专家综合评估结合物理模型估计了1975年6月7日发生于山东省栖霞县一次强龙卷风的环流参数,在此基础上对龙卷风产生的极强的瞬时荷载、强烈的旋转扭曲、突然压力降及飞射物造成的破坏力进行了评价。

### 参考文献

- 1 国家安全局政策法规处编.核电厂安全导则汇编.中国法制出版社,1992.
- 2 张澄昌.产业工程气象学.气象出版社,1997:273~274.
- 3 American national standard for estimating tornador and extreme wind characteristics at nuclear power site. ANSI/ANS-2. 3-1983, American national standards. institute, New York, N. Y.

## Assessment of a Strong Tornado Destructibility

Xue Deqiang Li Changjun

(Shandong Meteorological Center, Jinan 250031)

### Abstract

Using the cyclostrophic wind equation of Rankine vortex, the vortex features of a tornado happened in Xixia county of Shandong Province are calculated. The maximum wind speed of a strong tornado, the maximum translatory velocity, the maximum tangential velocity, and the maximum atmospheric pressure drop are  $62\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $50\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  and 27.5hPa, respectively. The assessment of tornado's destructibility is given.

**Key Words:** tornado vortex features destructibility assessment