

# 钢烟囱结构概念设计中若干关键问题的研究

王晶

中冶华天南京工程技术有限公司, 江苏 南京 210000

**[摘要]**在工业厂房设计中, 炼钢工程, 高炉系统工程, 干燥系统, 烧结项目等都必须设计除尘站, 会设置有一次除尘站, 二次除尘站, 三次除尘站, 料仓除尘站, 机尾除尘站, 配料除尘站; 在除尘系统中必不可少的就是烟囱, 烟囱属于高耸结构, 本篇文章结合不同高度不同直径的烟囱的计算, 主要包括烟囱的风荷载的计算, 烟囱横向风振的计算, 打桩时桩基础承台直径的确定, 烟道口加固等。

**[关键词]**风荷载; 横向风振; 桩基

DOI: 10.33142/ec.v5i10.7025

中图分类号: S611

文献标识码: A

## Research on Some Key Problems in Conceptual Design of Steel Chimney Structure

WANG Jing

MCC Huatian Nanjing Engineering & Technology Corporation, Nanjing, Jiangsu, 210000, China

**Abstract:** In the design of industrial plants, dust removal stations must be designed for steelmaking engineering, blast furnace system engineering, drying system and sintering projects. There will be primary dust removal stations, secondary dust removal stations, tertiary dust removal stations, bunker dust removal stations, tail dust removal stations and batching dust removal stations. The chimney is indispensable in the dust removal system, which belongs to the high-rise structure. This paper combines the calculation of chimney with different heights and diameters, mainly including the calculation of wind load of chimney, the calculation of lateral wind vibration of chimney, the determination of pile foundation bearing platform diameter during piling, and the reinforcement of flue outlet.

**Keywords:** wind load; lateral wind vibration; pile foundation

### 引言

烟囱的作用就是用于处理废弃烟气的构筑物, 烟囱的作用就是把热烟气拔的很高, 然后高空烟气随风排走, 这样做的目的就是能改善烟囱内部的燃烧条件。当烟囱内温度高于烟囱外温度时, 烟囱内密度小的热空气, 便沿着这些烟囱自然上升, 烟囱外面的冷空气因为空气密度大就会由较低的空气层渗入然后补充进来, 这样呢就会形成我们所说的烟囱效应。另外, 高空风力大, 便于空气中烟尘向周围的扩散, 会减少空气的污染。烟囱有很多种分类: 砖烟囱, 单筒式钢筋混凝土烟囱, 套筒式的烟囱, 多管式的烟囱, 还有常见的钢烟囱等等。烟囱结构或者附属构件达到了最大承载力时, 例如发生强度破坏, 局部或者整体失去稳定以及因为过度变形导致承载能力破坏的, 还有烟囱结构或者附属构件达到正常使用规定的限值, 变形以及裂缝和最高受热温度等都是我们需要注意的问题。

### 1 风荷载的计算

#### 1.1 基本风压的计算

烟囱是主要受力结构, 烟囱的风荷载标准值的计算值应该按照  $w_k = \beta_z u_s u_z w_0$  计算, 式中有高度  $z$  处的风振系数, 还有就是风荷载的体型系数, 以及风压高度的变化引起的系数; 基本风压。基本风压和它的确定方法以及重现期都有直接的关系, 这个也会关系到建筑或构筑物在风荷载作用下是否是安全的。基本风压  $w_0$  的来历呢, 是根据

当地气象台站根据历年来的记录, 取最大风速, 同时呢也按照基本风速所要求的, 分别测量不同风速仪不同高度和不同时次不同距的, 取年最大风速, 然后统一换算为离地 10m 高, 最后记录 10min 所经历的平均年的最大风速, 作为数据统计下来, 经过统计分许后最终就可以确定重现期是 50 年时所发生的最大风速, 然后可以作为当地的结构计算常用参数基本风速  $v_0$ , 再按照贝努力给出的公式就可以得到:  $w_0 = 1/2 \rho v_0^2$ 。高层建筑和高耸结构以及自重较轻的钢结构都是对风荷载比较敏感的, 这类结构计算风荷载时, 风荷载起控制作用, 但是由于计算风荷载时考虑的各种因素以及计算方法都不确定, 因此对于高层建筑, 烟囱类似的高耸结构, 风荷载起控制作用的其他结构, 要适当的提高基本风压的取值, 按照 1.1  $w_0$  计算。

#### 1.2 横风向风振计算

近年来, 虽然我们没有发现由于横风向风振的原因, 导致烟囱强度和失去稳定破坏的, 但是通过使用烟囱的研究中发现, 钢筋混凝土烟囱上部, 普遍出现水平裂缝。这不仅与温度引起的因素外, 也不能排除其他因素, 包括是风荷载引起的, 对于钢烟囱, 由于阻尼系数较小, 往往横风向风振起控制作用, 因此考虑横风向风振是必要的。对于自立式钢结构烟囱, 对于坡度小于或者等于 2% 的时候呢, 我们就应该根据雷诺数验算横风向风振。

$Re = 69000 v d$ , 当  $Re < 3 \times 10^5$ , 且  $v_H > v_{CRJ}$  时, 对

于自立式的钢烟囱，还有钢筋混凝土的烟囱，我们都可以不计算亚临界横风向共振荷载，但是对于塔架式钢烟囱其中最不利的塔架杆件，在构造上我们应该采取一定的措施，包括防振措施或控制杆件的临界风速，使其不小于 15m/S。

当  $Re \geq 3.5 \times 10^6$ ，且  $1.2 v_H > V_{CR,J}$  时，应验算共振响应。

当  $3 \times 10^5 \leq Re \leq 3.5 \times 10^6$ ，我们可不计算横风向共振的不利影响。

## 2 烟囱的计算

### 2.1 高度与直径的关系

应该根据强度的要求和变形的要求，钢烟囱的直径  $d$  以及相应高度  $h$  也应该满足一定的规范要求，经过计算后确定，并且相应的应该满足  $h \leq 30d$ ；当不满足下式要求时，应该将烟囱增加底部直径等措施。

### 2.2 钢烟囱强度

在同时作用有弯矩以及轴向力的时候，钢结构烟囱的

筒壁厚度及自身的截面特性应该满足公式  $\frac{N_i}{A_{ni}} + \frac{M_i}{W_{ni}} \leq f_i$ ，

是因为钢烟囱一直在较高温度下的不利环境中工作，没有考虑截面塑性发展，在强度和稳定性计算公式中也相应取消了截面塑性发展系数  $\gamma$ ；弯矩和轴向力作用下，等效

弯矩系数  $\beta_m$  由于悬臂结构是为 1，所以钢烟囱局部稳定

性应满足  $\sigma_N + \sigma_B \leq \sigma_{crit}$ 。

### 2.3 烟道入口的加强

烟囱都会设计有烟道入口，一般我们尽量成圆形设计，如果是矩形孔洞的话，也应该尽量转角宜圆弧设计。孔

洞应力应满足下式要求： $\sigma = \left( \frac{N}{A_0} + \frac{M}{W_0} \right) \alpha_k \leq f_i$ 。

### 2.4 隔热层的设置

温度超过 425 度后，碳素钢要产生蠕变，在荷载作用下容易产生永久变形，为了控制钢材使用温度，应设置隔热层，以降低钢筒壁的受热温度。碳素钢的抗氧化温度上限为 560 度，金属锚固件温度不应超过此界限。因为金属锚固件一旦超过抗氧化界限出现氧化现象，将造成连接松动，影响正常使用。

(1) 如果是普通黏土砖做成的筒壁，那么不应超过 400℃。

(2) 如果是钢筋混凝土的筒壁，那么不应超过 150℃。

(3) 碳素结构沸腾钢不应超过 250℃。

(4) 碳素结构镇静钢不应超过 350℃。

(5) 低合金结构钢和可焊接低合金耐候钢不应超过 400℃。

设计中如果烟气的温度很高，已经高于以上的温度时，

那么在设计中就应该加隔热层；隔热层的厚度应由温度计算确定，但是有个最小厚度的规定，那就是不宜小于 50mm，对于全辐射炉型的烟囱，也有个最小的隔热层厚度，就是不宜小于 75MM；设计中隔热层牢固连接于筒壁，当采用不定型现场浇筑材料时，可采用锚固钉或金属网固定，烟囱顶部可设置钢板圈保护隔离层边缘。钢板圈厚度不用小于 6mm。并且应沿烟囱高度方向，每隔 1m~1.5m 设置角钢支撑环，当烟囱内部的温度高于 560℃时，一般采用碳素钢材料可以制作成烟囱。

### 2.5 破风圈的设置

钢烟囱在风荷载的作用下，经常在实际工程中会发生横风向风振（共振），对于烟囱的刚度小的特别明显，设计的最大风速一般大于临界风速，因此，在设计中就会经常出现临界风速，如果烟囱的自振频率与临界风速主线以及涡流脱落的频率一致或者几乎一致，烟囱就要发生横风向共振，因此，在设计中，应尽量避免出现共振现象。如果调整烟囱的刚度难以达到目的时，我们最常用的方法就是设置破风圈在烟囱的上部。除了破风圈以外，也可以采用其他形式的减振装置对烟囱进行减振。在设计中，烟囱计算出来的临界风速，如果小于 6m/S~7m/S 时，我们就要采取措施包括破风圈类似的措施，如果设计风速大于 7m/S~13.4m/S，虽然可以通过改变烟囱的高度等措施但是这样费时，我们也可以通过设置烟囱顶部的破风圈来满足要求；有破风圈的烟囱在这个范围内计算风荷载的时候取 1.2 的烟囱体型系数；需要破风圈的时候，我们一般在应在  $>1/3H$  处的范围内设置；破风圈形式可以采用螺旋板型或交错排列直立板型，当我们用第一种时，其螺旋钢板的厚度  $>6mm$ ，宽度为  $1/10$  的烟囱直径。一般设置为三道钢筋板，烟囱的筒壁圆周均匀布置，螺旋的距离可以为 5d。当选用第二种形式的时候，其钢筋板的厚度  $>6mm$ ，长度  $<1.5mm$ ，每一层立板可以为 4 块，每相邻一圈的立板应该是 45 度。

### 2.6 烟囱桩基承台的计算

烟囱设计的桩基础设计，可以采用预制钢筋混凝土桩，混凝土的灌注桩等等，桩基础的横断面及进入持力层我们考虑地质情况等因素，烟囱桩基础设计时，桩应以承台平面中心点布置，呈放射状布置，并且应里面稀疏外面密集，应该增加基础的截面抵抗距。在风荷载的作用下，基础有轴向力还有弯矩，每个桩承受的力为  $N_{ik} = \frac{F_K + G_K}{n} \pm \frac{M_{yK} y_i}{\sum y_i^2} \pm \frac{M_{xK} x_i}{\sum x_i^2}$ ，由于考虑风荷载的不利影响，尽量最外侧的桩不出现拉力或者很小的拉力。

## 3 烟囱的实例计算风荷载及破风圈的设置

实例 1 中的高炉系统工程中烟囱高度为 46m，直径为 6300mm，基本风压  $0.8KN/m^2$ ，计算风荷载如下：

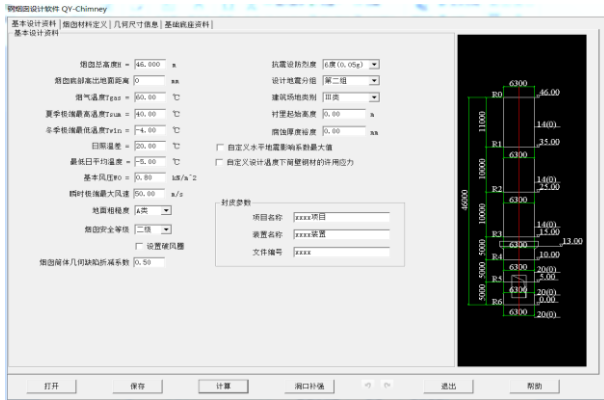


图1 烟囱参数图

### 3.1 横向风振判断

#### 3.1.1 第1振型时的临界风速计算

$$V_{cr1} = \frac{D_{2/3}}{T1St} = \frac{6.30}{0.3053 \times 0.20} = 103.17\text{m/s}$$

式中  $D_{2/3}$ -----2H/3 高度处烟囱的外直径

#### 3.1.2 烟囱雷诺数 $Re$

$$VH = 40\sqrt{mHw0} = 40\sqrt{1.8500 \times 0.80} = 48.66\text{m/s}$$

$$Re = 69000V_{cr1}D_{2/3} = 69000 \times 103.17 \times 6.30 = 44.85 \times 10^6$$

$$Re \geq 3.5 \times 10^6, 1.2 \times V_H \leq V_{cr1}$$

满足要求，不需要考虑横风向风荷载

表1 荷载组合工况表

组合1	$S = 1.0S_{Gk} + 1.5S_{Wk} + 1.0M_a + 0.7 \times 1.5 \times S_{Lk}$
组合2	$S = 1.3S_{Gk} + 1.4S_{Wk} + 1.0M_a + 0.7 \times 1.5 \times S_{Lk}$
组合3	$S = 1.35S_{Gk} + 0.6 \times 1.5 \times S_{Wk} + 1.0M_a + 0.7 \times 1.5 \times S_{Lk}$
组合4	$S = 1.3S_{Gk} + 1.3S_{Ehk} + 0.2 \times 1.5 \times S_{Wk} + 1.0 \times M_{aE}$
组合5	$S = 1.0S_{Gk} + 1.3S_{Ehk} + 0.2 \times 1.5 \times S_{Wk} + 1.0 \times M_{aE}$
组合6	$S = 1.3S_{Gk} + 1.3S_{Ehk} + 0.5S_{Evk} + 0.2 \times 1.5 \times S_{Wk} + 1.0M_{aE1}$
组合7	$S = 1.0S_{Gk} + 1.3S_{Ehk} - 0.5S_{Evk} + 0.2 \times 1.5 \times S_{Wk} + 1.0M_{aE2}$
组合8	$S = 1.3S_{Gk} + 0.5S_{Ehk} + 1.3S_{Evk} + 0.2 \times 1.5 \times S_{Wk} + 1.0M_{aE1}$
组合9	$S = 1.0S_{Gk} + 0.5S_{Ehk} - 1.3S_{Evk} + 0.2 \times 1.5 \times S_{Wk} + 1.0M_{aE2}$
组合10	$S = 1.0S_{Gk} + 1.0M_a + 1.0S_{Maxk}$
组合11	$S = 1.0S_{Gk} + 1.0M_a + 1.5S_{Wk}$

标高(m)	组合10	
	N (kN)	M (kN.m)
45.00	0	0
40.00	121	371
35.00	243	1448
30.00	364	3158
25.00	486	5414
20.00	607	8133
15.00	729	11243
10.00	850	14675

标高(m)	组合10	
	N (kN)	M (kN.m)
5.00	972	18363
1.13	1067	21365
1.13	1044	21365
0.00	1078	22258

按照组合10 最不利进行控制，

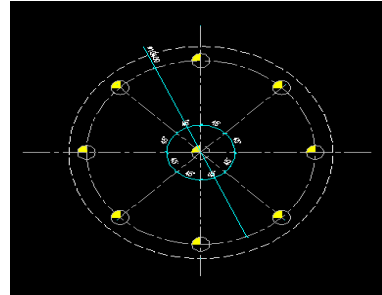


图1 桩布置图

在布置桩的计算中， $N_{ik} = \frac{F_k + G_k}{n} \pm \frac{M_{Xk}y_i}{\sum y_i^2} \pm \frac{M_{Yk}x_i}{\sum x_i^2}$  表达

式中，并不是桩数越多越有利，主要计算外围桩不会产生拉力。以下实例中计算桩基均按照这种原则进行计算。

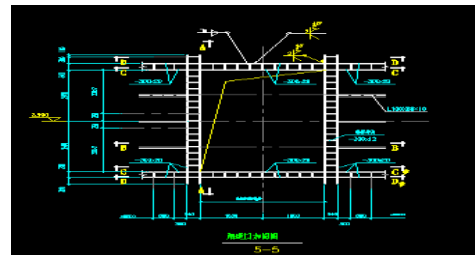


图2 烟囱加强图

在烟囱侧壁开孔洞 3000\*4900 的洞口，侧壁削弱比较厉害，通过增加加劲板的方式补强，满足

$$\sigma = \left( \frac{N}{A_0} + \frac{M}{W_0} \right) \alpha_k \leq f_t$$

实例2 中的干燥系统工程中烟囱高度为 30m，直径为 2400mm，基本风压 0.45KN/m<sup>2</sup>，计算风荷载如下：

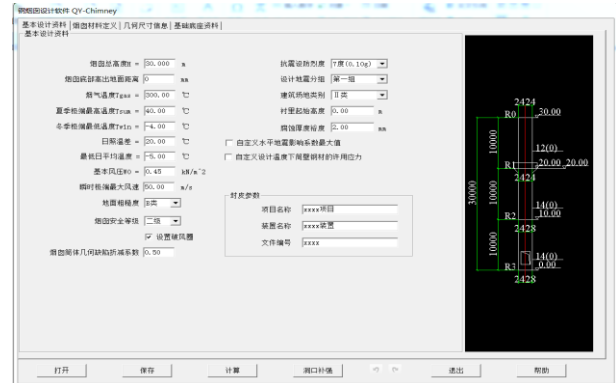


图3 基本条件参数图

### 3.2 横向风振判断

#### 3.2.1 第1振型时的临界风速计算

$$V_{cr1} = \frac{D_{2/3}}{T1St} = \frac{2.42}{0.5128 \times 0.20} = 23.64\text{m/s}$$

式中  $D_{2/3}$ ——2H/3 高度处烟囱的外直径

#### 3.2.2 烟囱雷诺数 $Re$

$$V_H = 40\sqrt{mHw0} = 40\sqrt{1.3900 \times 0.45} = 31.64\text{m/s}$$

$$Re = 69000V_{cr1}D_{2/3} = 69000 \times 23.64 \times 2.42 = 3.95 \times 10^6$$

$$Re \geq 3.5 \times 10^6, 1.2 \times V_H > V_{cr1}$$

需要考虑横风向风荷载

已经设立破风圈, 不考虑横风向作用

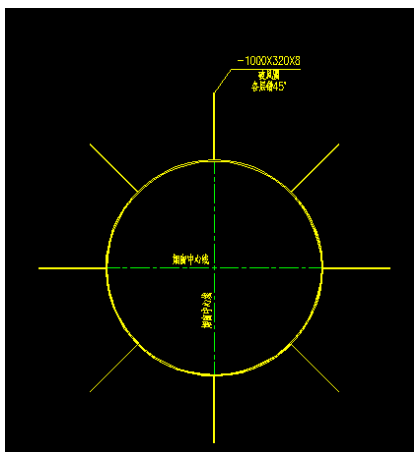


图4 破风圈布置图

在距离烟囱顶部 8m 的范围内设置了破风圈。

实例 3 中的烧结项目工程中烟囱高度为 50m, 变截面烟囱, 底部直径为 5000mm, 顶部直径为 2800mm, 基本风压  $0.6\text{KN/m}^2$ , 计算风荷载如下:

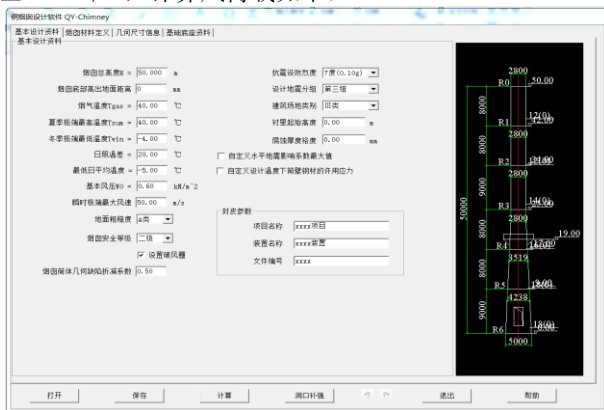


图5 基本参数图

### 3.3 横向风振判断

#### 3.3.1 第1振型时的临界风速计算

$$V_{cr1} = \frac{D_{2/3}}{T1St} = \frac{2.80}{0.4912 \times 0.20} = 28.50\text{m/s}$$

#### 3.3.2 烟囱雷诺数 $Re$

$$V_H = 40\sqrt{mHw0} = 40\sqrt{1.8900 \times 0.60} = 42.60\text{m/s}$$

$$Re = 69000V_{cr1}D_{2/3} = 69000 \times 28.50 \times 2.80 = 5.51 \times 10^6$$

$$Re \geq 3.5 \times 10^6, 1.2 \times V_H > V_{cr1}$$

需要考虑横风向风荷载

已经设立破风圈, 不考虑横风向作用

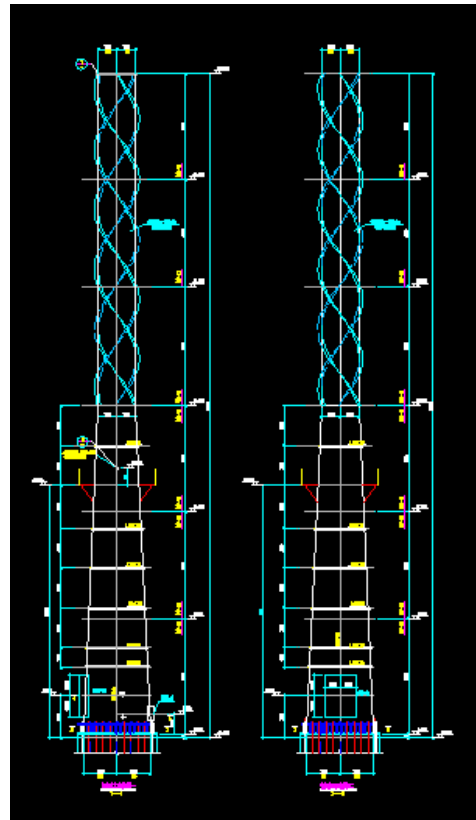


图6 烟囱立面图

实例 4 中的烧结项目工程中烟囱高度为 50m, 变截面烟囱, 底部直径为 6000mm, 顶部直径为 4800mm, 基本风压  $0.6\text{KN/m}^2$ , 计算风荷载

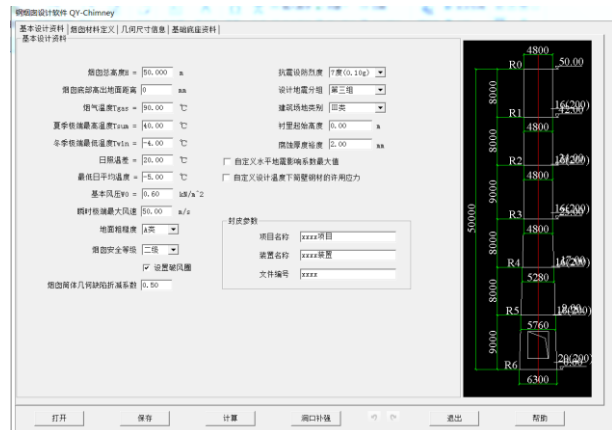


图7 基本参数图

### 3.4 横向风振判断

#### 3.4.1 第1振型时的临界风速计算

$$V_{cr1} = \frac{D_{2/3}}{T_{1st}} = \frac{4.80}{0.6348 \times 0.20} = 37.81\text{m/s}$$

式中  $D_{2/3}$ ——2H/3 高度处烟囱的外直径

#### 3.4.2 烟囱雷诺数 $Re$

$$V_H = 40\sqrt{mHw_0} = 40\sqrt{1.8900 \times 0.60} = 42.60\text{m/s}$$

$$R_e = 69000V_{cr1}D_{2/3} = 69000 \times 37.81 \times 4.80 = 12.52 \times 10^6$$

$$R_e \geq 3.5 \times 10^6, 1.2 \times V_H > V_{cr1}$$

需要考虑横风向风荷载

已经设立破风圈, 不考虑横风向作用

实例 5 中的炼钢项目工程中烟囱高度为 45m, 直径为 5300mm, 基本风压  $0.35\text{kN/m}^2$ , 计算风荷载如下:

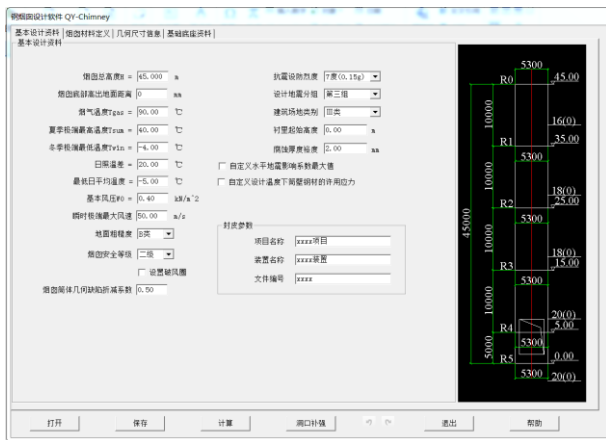


图 8 基本参数图

### 3.5 横向风振判断

#### 3.5.1 第1振型时的临界风速计算

$$V_{cr1} = \frac{D_{2/3}}{T_{1st}} = \frac{5.30}{0.3714 \times 0.20} = 71.36\text{m/s}$$

式中  $D_{2/3}$ ——2H/3 高度处烟囱的外直径

#### 3.5.2 烟囱雷诺数 $Re$

$$V_H = 40\sqrt{mHw_0} = 40\sqrt{1.5700 \times 0.40} = 31.70\text{m/s}$$

$$R_e = 69000V_{cr1}D_{2/3} = 69000 \times 71.36 \times 5.30 = 26.10 \times 10^6$$

$$R_e \geq 3.5 \times 10^6, 1.2 \times V_H \leq V_{cr1}$$

满足要求, 不需要考虑横风向风荷载

通过以上对比, 可以更好的解决什么情况下需要考虑横风向荷载, 以及破风圈的设置。

### 4 结论

本文针对钢烟囱不同风压, 不同高度, 不同直径下风荷载的计算, 熟悉了横风向风振的判别, 破风圈设置的高度及怎样设置。桩基础设计时应该注意些的内容。保证烟囱的稳定和基础的稳定, 避免烟囱发生横向风振带来的不利影响。

#### [参考文献]

- [1]GB 50051-2013 烟囱设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [2]GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [3]JGJ3—2010, 高层建筑混凝土结构技术规程[S]北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [4]JGJ94—2008, 建筑桩基技术规程[S]北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

作者简介: 王晶(1989.2-)女, 西安建筑科技大学土木工程, 中冶华天工程技术有限公司, 无职务, 中级工程师。