



抗震设计丛书

烟囱抗震设计

文良谟 任保寿 王祖慧



地震出版社

86.3591
9010070

烟囱抗震设计

文良谟 任保寿 王祖慧

地震出版社

1990

内 容 提 要

本书为配合《建筑抗震设计规范(GBJ11-89)》的实施而撰写,专门介绍钢筋混凝土烟囱和砖烟囱的抗震设计。全书共分四章,内容包括:烟囱设计概况;烟囱震害特点;烟囱的自振特性(理论计算和实测统计方法);烟囱抗震计算的基本原理和方法,包括简化法、振型分解法、直接动力法、强度计算和计算实例等。

本书可供从事烟囱抗震设计、施工和科研人员参考。

烟囱抗震设计

文良谟 任保寿 王祖慧

责任编辑:王 伟

责任校对:耿 艳

地震出版社 出版

北京复兴路63号

北京朝阳小红门印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

850×1168 1/32 5印张117千字

1990年3月第一版 1990年3月第一次印刷

印数 0001—7000

ISBN 7-5028-0346-7/TU·18

(735) 定价:3.50元

序 言

法国哲学家华莱理曾经说过：“科学，就是把许多成功的秘诀收集在一起”。我们这套《抗震设计丛书》就是把国内外成功的、经过实践和时间检验的、能保障房屋和工程结构地震安全的秘诀收集到一起，供广大从事抗震设计、研究、教学以及参与抗震防灾决策的有关人员参考。

地震灾难主要来源于房屋和工程结构的破坏或倒毁。以往强烈地震的后果表明，凡按良好的规范设计，有严格的施工监理，且地动参数与设计时采用的参数相适应的房屋或工程结构极少受害。这说明：强烈地震时房屋和工程结构的破坏虽不能避免，但却可以通过提高对抗震的理性认识，精心设计和精心施工而得以减轻；良好的抗震设计是保障新建房屋和工程结构地震安全的关键措施。

抗震设计所采用的地震荷载或地震作用是地震诱发的。所以，抗震设计必须以较大的破坏将发生在最近将来的概率为依据。否则，是像墨西哥地震工程专家E.罗森布卢斯所说的那样：“为了满足我们的要求，人类所有财富可能都是不够的，大量的一般结构将成为碉堡”。抗震设计的目标是小震不坏，中震能修，大震不倒。而一般静力设计的目标则是防止裂缝或破坏。抗震设计的这个特点要求设计人员不仅要有丰富的抗震设计经验，而且要掌握工程地震和抗震设计的知识与原理，仅仅会照套抗震设计规范是不可能做出经济、合理、安全的抗震设计的。为此，本丛书系统地介绍了工程地震知识，抗震设计原理，抗震设计经验和新颁的抗震设计规范，以适应减轻地震灾害的需要。

叶耀先

1988年9月于北京

前 言

烟囱是建设中广泛应用且不可缺少的工程建设项目，由于它是高耸构筑物，在工程中具有重要地位。因此，作好烟囱的抗震设计具有十分重要的意义。

烟囱与一般框架结构不同，它是一个独立悬臂结构，没有赘余杆件，一旦某截面出现塑性铰则必然造成严重破坏，在某些情况下，它不但涉及自身安全，而且还危及相邻建筑物。因此，烟囱在地震时，应尽可能保持在弹性范围内工作。

由于工业建设的发展及环境保护要求的提高，烟囱的高度越来越高，国外的烟囱已高达381m，我国在1985年先后建成两座高240m的烟囱。随着烟囱高度不断增加，对高烟囱的抗震设计技术要求也相应提高

本书充分吸收了我国近年来多次强震中有关烟囱的震害资料和经验，同时还编入了国外的烟囱震害资料。为了全面反映烟囱的抗震计算，书中介绍了一般烟囱的简化法、多振型组合的反应谱法及对结构输入地震波计算的直接动力法。

本书比较全面地收入了国内近10多年来烟囱动力特性的实测资料。进行这项工作的单位有原国家建委建筑科学研究院、四川省建筑科学研究所、太原工业大学、西北电力设计院等。这些资料对烟囱的抗震设计有较大的参考价值。同时也介绍了砖烟囱和钢筋混凝土烟囱的基本周期实测统计公式。

本书收入了西北电力设计院有关烟囱抗震的一些内部资料以及陆卯生、朱为荣提供的许多烟囱抗震的科研和设计成果，书中还采用了潘士劫、钱培风在烟囱抗震方面发表的文献。编者对此表示衷心感谢。

限于编者的水平及编写时间仓促，书中不妥之处恳请同志们指正。

编者

目 录

前言

第一章 概述	(1)
第一节 一般情况	(1)
第二节 烟囱的发展状况	(2)
第三节 烟囱结构的一般型式	(3)
第二章 震害特点	(13)
第一节 砖烟囱的震害	(13)
第二节 钢筋混凝土烟囱的震害	(35)
第三节 其它烟囱的震害	(45)
第三章 烟囱的自振特性	(49)
第一节 结构动力学的一般方法	(49)
第二节 多振型计算方法	(51)
第三节 其它方法	(63)
第四节 经验公式	(68)
第四章 烟囱的抗震设计和计算	(88)
第一节 结构型式的选择	(88)
第二节 不验算范围	(89)
第三节 抗震计算方法	(90)
第四节 筒身的剪力和弯矩简化计算	(93)
第五节 竖向地震作用	(102)
第六节 附加弯矩计算	(109)
第七节 国外烟囱的抗震计算	(118)
第八节 强度计算和计算实例	(126)
参考文献	(148)

第一章 概 述

第一节 一 般 情 况

钢筋混凝土烟囱从十九世纪后期开始应用，至今已有百余年的历史。最初由于脚手架、模板费用昂贵，发展比较缓慢。1903年美国首先采用手动滑模施工技术，1926年以后苏联、德国、法国等也先后采用滑模技术。60年代由于液压技术与激光技术的发展和应，烟囱滑模施工技术得到迅速发展，其滑升的高度不断增加。1964年英国应用液压滑模技术，建成高137m的烟囱；1965年美国采用滑模技术，建成高250m的烟囱；1970年加拿大采用西德阿尔公司专利，建成高381m的烟囱。我国从1965年开始应用滑模施工，1979年已创造了具有我国特色的滑模施工技术，并建成3座210m高烟囱，近年来又滑升建成了240m高烟囱。

钢筋混凝土烟囱与砖烟囱相比，具有耐久、轻、造型美观、抗震性能好等优点，稍高的烟囱较少采用砖烟囱。与钢烟囱相比较，钢筋混凝土烟囱费工，但建成后一般不需要维修，而钢烟囱的维修工作量很大，特别是高大烟囱的维修更加困难。由于60年代出现了无井架自动液压滑模施工方法，使钢筋混凝土烟囱施工大为简化，目前一些工业发达国家的高烟囱一般均采用钢筋混凝土烟囱。

现在国际上采用的烟囱结构型式众多，有单管式、多管式。烟囱内衬有独立自承重式、分段支承式和悬挂式，后两者支承在外筒上。内衬材料有钢材、耐火砖或耐酸砖。外筒型式有现浇、框架及装配式筒壳。筒壳截面有圆形、矩形、三角形等。

第二节 烟囱的发展状况

50年代,我国烟囱的最大高度约为100m左右,国外虽然有超过100m的,但超过150m的只有几座。60年代,我国高150m的烟囱仅一座(即抚顺电厂烟囱),而国外烟囱高度提高得很快,日本的烟囱平均高度几乎提高了80%;加拿大和美国有120座高度超过150m的烟囱,电厂烟囱的平均高度已达到180m左右;英国的15座电厂烟囱高度都在155—265m之间。70年代初期,国外电厂烟囱高度发展到最高峰,一些闻名世界的高烟囱多数在这个时期建造。据日本资料统计,这个时期80%烟囱的高度都超过150m;到70年代中期,苏联已建和在建的250—320m高烟囱总数已达70多座。1975年以后,国外尤其是西方工业发达国家的烟囱高度趋向稳定,一般大型电厂的烟囱高度都在200—300m。当今超过300m的烟囱有苏联乌格列果尔斯克电站高320m的烟囱、美国密契尔电站高368m的烟囱、加拿大安大略省萨德伯里冶炼厂高381m的烟囱。

1975年前我国电厂的烟囱高度一直没有提高,高烟囱的建设实际上于70年代后期才开始,如1976年建成的辛店电厂高210m的烟囱。嗣后高150—210m的烟囱数量逐年增多,当前我国已建成烟囱最高达240m。目前,我国电厂烟囱的高度还在不断提高,预计将在300m左右达到稳定。

工业建筑中的高烟囱以电厂居多,主要与环境保护有关。60年代前,电厂容量都不大,环保问题不突出;60年代后,由于大容量电厂的大规模建设,大气环境污染严重恶化。对此可以采取的措施有:①净化烟气(脱硫、除尘);②建造高烟囱,扩大烟气扩散范围,降低地面有害物浓度;③提高烟气流速,增加烟气排放量,提高烟气抬升高度,扩大烟气稀释范围。

以上措施都在设计中进行了综合考虑。目前的问题是烟气净化费用很高,烟气流速也已由原来的15m/s左右提高到25—35m/s的极限。所以,解决烟气污染还要靠增加烟囱的高度。目前推行

高烟囱的因素还有：①设计技术比较成熟；②施工技术水平提高；③运行后很少需要维修；④与其它防治措施比较经济性好。

各国对高烟囱设计都较重视，抗震设计方法也各有特色。美国、苏联、西德、法国、日本等国都先后制定了专门的设计规范，我国烟囱设计规范编制稍晚，到1983年才出版试行本。

世界上除日本外，90%以上的高烟囱都是钢筋混凝土烟囱。我国亦如此，凡高度超过60m者，几乎全部是钢筋混凝土烟囱。

钢筋混凝土烟囱的抗震性能很好，许多烟囱在地震后仍安全无恙。我国在这方面也有很好的实际经验，如海城、唐山地震中砖烟囱大量倒塌，而钢筋混凝土烟囱破坏极少，原因是：①高烟囱结构较柔，在地震作用下，通过大变位可以吸收大量能量；②烟囱截面内的钢筋均沿圆环截面均匀分布，在混凝土截面中好似放了钢环，整个烟囱截面兼有纯混凝土截面和钢管截面的优点，既耐压又耐拉，类似于钢烟囱，具有一定的结构延性；③高烟囱的基本振动周期都大于2.0s，而地震波卓越周期一般都小于1s。因此烟囱地震反应较小。

我国的烟囱结构有自己的特点，在地震区，较低烟囱（高度60m以下）以配筋砖烟囱为主，而高烟囱则采用钢筋混凝土烟囱。这是因为我国钢材价格相对较贵，且大规格型钢和钢管数量也少，对高烟囱采用钢筋混凝土结构更具有造价低廉的优点。

第三节 烟囱结构的一般型式

一、钢筋混凝土烟囱

1. 单管式烟囱

一般采用圆环形截面，外表坡度约2%，顶部筒壁厚度（最薄处）为14—20cm（视出口直径大小而定）、底部（最厚处）为30—80cm（指高80—210m的烟囱），筒壁混凝土强度等级采用C20、C30，筒身采用单面或双面配筋（美国规范规定采用双面配筋）。当采用单面配筋时，钢筋靠外侧放置。筒身钢筋的含钢量约为

1000N/m³，水灰比不超过0.45—0.55。

内衬和保温层紧靠外筒壁放置，普通每隔10—15m分段支承于外筒壁挑出的环形牛腿上。50年代，这类烟囱的构造如图1.1，其中50—80mm厚的封闭空气层用作隔热层。内衬用MU10普通粘土砖和M2.5（或M5）混合砂浆砌筑，顶部和底部一段内衬，有时改用耐火砖和耐酸砂浆。

60年代后期，我国一些单位把外筒壁、隔热层、内衬做成三位一体，一次滑升，同时完成整个烟囱的施工（简称为“双滑烟囱”），其构造型式如图1.2。

保温材料采用加气混凝土预制块、泡沫混凝土块、水泥蛭石预制块、水泥珍珠岩预制块，甚至草垫子等，内衬用抗硫酸盐水泥的陶粒混凝土。施工时内外三层一起滑升浇灌，由于这种施工方法给烟囱构造及材料带来一些问题，有待改进。烟囱顶部内衬构造如图1.3。

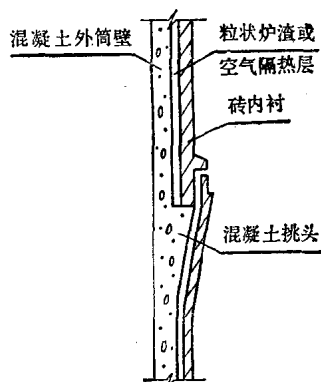


图1.1 砖内衬烟囱

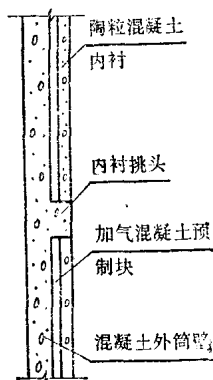


图1.2 陶粒混凝土内衬烟囱

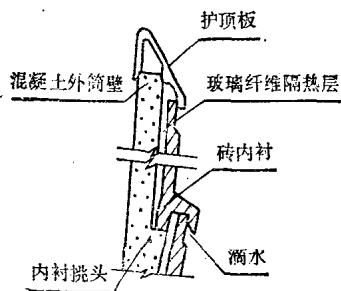


图1.3 烟囱顶部内衬构造

调查资料表明，单管式烟囱不适合在低温、潮湿、有冷凝酸溶液的烟气条件下使用，因为单管式烟囱在这种条件下运行多年

后会遭到不同程度的腐蚀。西德、波兰、美国、苏联等国曾先后发表文章，阐述这个问题，概括起来为：①砖内衬砂浆腐蚀。水泥受酸性介质侵蚀后，生成石膏，体积大增，强度锐减，使砖砌体灰缝变得松散而无粘结力，出现白色结晶体，影响内衬砌体的整体稳定，使烟气很易由内衬灰缝中通过，渗透到隔热层和外筒壁。②外筒壁用于支承内衬、隔热层的环形挑头处，易积存酸性凝聚液，该处一般又是施工缝。筒壁混凝土不密实，酸液渗入缝中，腐蚀筒身混凝土，使外筒壁在该处发生内裂缝，降低混凝土强度。严重时，在外筒壁外表面，可以看到有白色结晶体。③从一些电厂烟囱筒壁上凿取混凝土试块，得到的混凝土后期强度较原设计强度低。例如苏联曾系统调查了一批高100—200m 建于1950—1960年的电厂烟囱，在投入运行不到10年时间，混凝土试块的后期强度仅800—1500N/cm²（原设计28天强度应为2000N/cm²，考虑后期强度应为3000—3500N/cm²）。

我国近几年也发现烟囱的腐蚀情况，正准备进行专题研究。因此，从安全角度出发，以往传统构造方式的单管烟囱，应减少使用范围，即只能用于排除干燥烟气的情况，并且还应在原有基础上适当增加防腐蚀措施，如：①严格控制筒身混凝土水灰比；②在筒壁内表面涂刷沥青玛蹄脂隔气层；③砖内衬内表面用耐酸砂浆勾缝，采用耐酸陶砖或耐火砖等。

当烟气的含硫量大、温度低、湿度大，在烟囱内易形成冷凝酸溶液时，可采用以下单管烟囱：

（1）非通风式单管烟囱。图1.4所示的结构型式是苏联做法。筒壁内表面涂沥青玛蹄脂，然后紧贴一层砖内衬，目的是防止沥青玛蹄脂在高温下流淌。内衬用耐酸砖和耐酸砂浆砌筑（耐火砖也可）。内衬内侧是封闭空气或填以各种保温、隔热材料的隔热层。有时在筒壁内表面增贴两层沥青油毡，以进一步保护外筒壁。这类烟囱在施工时要特别注意环形牛腿挑头处防腐工程的质量。

图1.5所示的结构型式是西德的做法，与苏联做法的不同在

于内衬改用异型企口陶瓷砖，使侵蚀性酸液更不易从内衬中渗透通过。

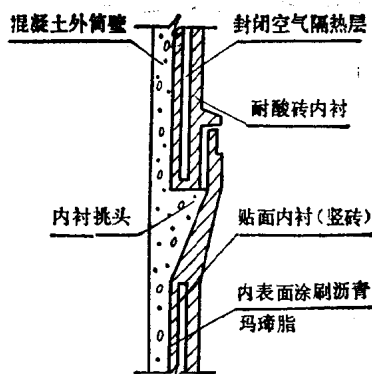


图1.4 苏联的非通风式单管烟囱

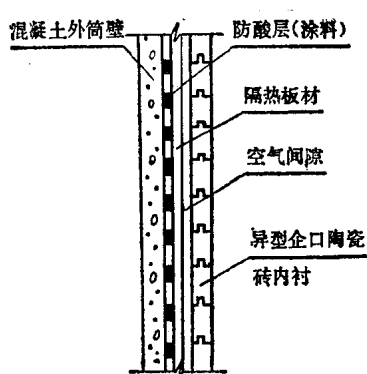


图1.5 西德的非通风式单管烟囱

(2) 通风式单管烟囱。该类烟囱有两种通风方式，即自然通风式和机力通风式。

图1.6是自然通风式单管烟囱构造示意图。这类烟囱的特点是在烟囱筒身的下部和上部开设进气孔，使内衬和筒身之间的空气层产生对流，以减少烟囱内烟气对外筒壁的影响（包括温度和腐蚀两方面）。此类烟囱设计时，应注意以下几点：①由于冷空气进入空气夹层，筒壁内表面容易结露，故应予保护；②内衬应密实，以免冷空气渗入烟囱管内；③要选用耐腐蚀内衬材料，并做好内衬的保温。

图1.7是机力通风式单管烟囱构造示意图。这类烟囱的特点是用机力通风代替自然通风，使空气层内形成一定气压并使该压力略大于烟管内部的烟气压力，以防止烟气通过内衬向外扩散。这类烟囱对烟管内烟气呈正压运行状态特别合适。设计这类烟囱应注意如下几点：①内衬要密实，尤其在接头处；②进入夹层内的空气最好预热，以避免结露和减少内衬里外温差；③加强内衬的防腐耐酸性能；④控制好夹层内的空气压力；⑤防止环形牛腿挑头处的通风孔被砂浆、建筑垃圾等堵塞。

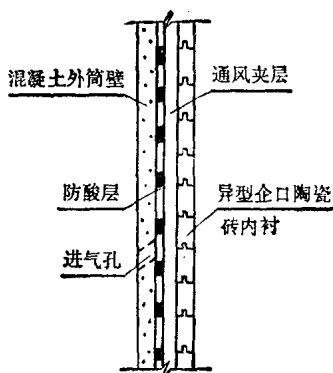


图1.6 自然通风式单管烟囱

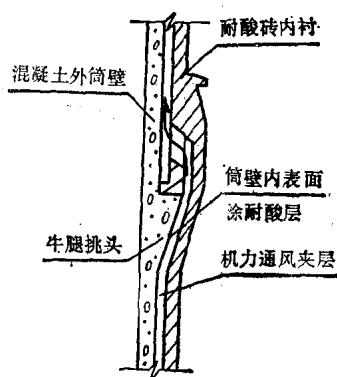


图1.7 机力通风式单管烟囱

2. 套筒式烟囱

当烟囱排除的烟气具有侵蚀性，并能形成冷凝酸溶液时，采用套筒式烟囱具有许多优点。这类烟囱的特点是：外筒与内衬之间留有宽度不小于700mm的通风间隙（目前工程设计中常用宽度为1000mm左右），筒身上下设有出进气孔，人员可以在该间隙内上下巡检，而且耐久性好。国外称它为“筒中筒烟囱结构”，使用很广泛。这类烟囱的造价稍高于单管式烟囱，但比下述多管烟囱要低很多。我们认为，对于烟气侵蚀性较大的烟囱，应尽可能采用这类结构型式。具体可分为：

（1）独立砖内筒套筒式烟囱（图1.8）。内筒独立自承重，全部内筒轴向力直接传给基础。内筒顶部壁厚约18cm，下部按强度计算逐步加大。内筒可用陶土砖或耐火砖，最好用企口型砖，采用钾硅砂浆或其他耐酸砂浆砌筑。一般独立内筒沿高度做1%—1.5%坡度。为防止内筒发生温度裂缝，沿高度每隔1—2m左右设置环向加劲扁箍。这类烟囱的内筒一般沿高度不设横向支撑与外筒连接，所以只能用于非地震区。并应注意在大风情况下，烟囱顶部内、外筒变形的协调。在美国，独立砖内筒套筒式烟囱已建起高达250m的电厂烟囱。

（2）钢内筒套筒式烟囱（图1.9）。钢内筒套筒式烟囱在美国

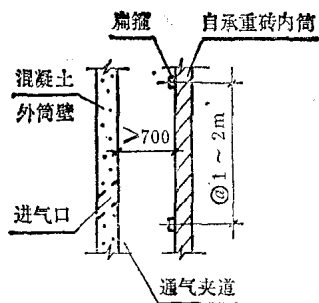


图1.8 独立砖内筒套筒式烟囱

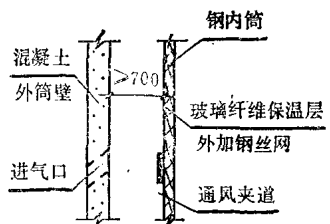


图1.9 钢内筒套筒式烟囱

和西欧曾一度相当流行，其特点是抗震性能和密封性能好，施工方便。适用于烟气呈正压运行状态且烟气温度较高的地震区烟囱。

内筒钢板在美国一般都采用含铜的碳素钢（烟囱顶部一段用不锈钢），钢板最小厚度为6mm。内筒沿高度不做锥度，而采用直径不同的几个圆柱形钢筒，用大小头锥筒拼接而成。内筒沿高度每隔30—40m用横向支撑与外筒相连，内筒本身也应沿高度每隔6m左右设劲性加劲环。钢内筒外面须用保温材料（如玻璃纤维、矿渣棉垫等）包裹，使钢板受热温度高于烟气露点温度。保温层外面须加钢丝网保护。内筒可以采用支承式，也可采用悬挂式。

这类烟囱用于排除易形成有冷凝酸溶液的烟气时可在钢板表面喷铅粉、刷耐酸涂料，或者改用不锈钢和镍铬合金钢。

（3）内筒分段支承的套筒式烟囱（图1.10）。经验证明，砖内筒的防酸耐腐蚀性能好，但采用独立支承方式，内筒材料消耗大，抗震性能差。为弥补这一缺点，可改用内筒分段支承方法，它是套筒式烟囱中较好的一种烟囱结构型式。

这类烟囱的构造做法是：砖内筒沿高度每隔20—40m左右通过环形平台分段支承于外筒壁上。环形平台用许多沿圆周径向均匀分布的三角架支承。环形平台和三角架可用混凝土预制件或钢结构构件拼装而成。平台上设有通风格栅。内筒用陶土砖、耐酸砖或耐火砖，采用耐酸胶泥砌筑。内筒外侧一般都没有保温层。

这类烟囱的内筒比较薄，故结构构造要求较高，一般采用企口异型的。保温层有的采用泡沫玻璃（价格昂贵），也有的在普通保温材料外面包裹0.5mm的铝合金板。

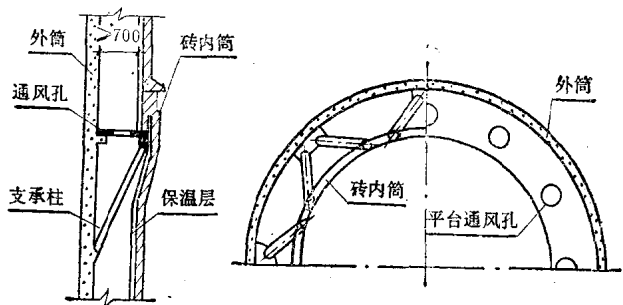


图1.10 内筒分段支承套筒式烟囱

3. 多管式烟囱

一个烟囱排出的烟气所含的热量越多，烟气的热浮力就越大，也就是它的有效高度越高。因此当电厂内装有几台锅炉时，最好用一个烟囱。过去许多单管烟囱就是这样做的。其缺点是当一台或几台锅炉停炉时，烟囱出口流速太低。为解决这个矛盾，近20年来，国外许多大型电厂改用多管式烟囱，其中英国、日本、西德等国使用得较多。我国也曾试用过一个，造价很高。关于这类烟囱可参阅专门资料。

二、砖烟囱

砖烟囱是目前应用最为广泛的一类烟囱，建造数量比钢筋混凝土烟囱多，其高度绝大多数都在60m以下。

为使砖烟囱能耐久工作，必须选用正确的结构方案和材料，并要保证施工质量。烟囱筒身采用的材料和内衬，以及隔热层的厚度都必须符合排烟的温度状态。对有腐蚀性的烟气，须考虑耐酸的內衬，而筒身应考虑防腐蚀保护，否则，可能引起严重的腐蚀和损坏。

砖烟囱的筒身有不配筋砖筒壁和配筋砖筒壁两种。在 地震区，砖烟囱均为配筋砖筒壁，筒壁采用标准型或异型的一般普通

粘土砖，砖强度等级不低于MU7.5，砂浆强度等级不低于M5。

砖烟囱的内衬设置与温度有关，当烟气温度大于 400°C 时，应沿全高设置；当烟气温度小于 400°C 时，可在烟囱下部设置。有关内衬设置情况参见图1.11。

内衬到顶的烟囱，其顶部宜设钢筋混凝土压顶板。

烟囱筒壁一般设计成截顶圆锥形，筒壁坡度采用 2% — 3% ，筒壁厚度不小于 240mm 。筒壁厚度可随分节高度自下而上减薄，同一节厚度应该相同，每节高度一般不超过 15m 。

筒壁顶部应向外侧加厚，其厚度为 180mm ，并以阶梯形向外挑出，每阶挑出不得超过 60mm ，加厚上部以 $1:3$ 水泥砂浆抹成排水坡（图1.12）。

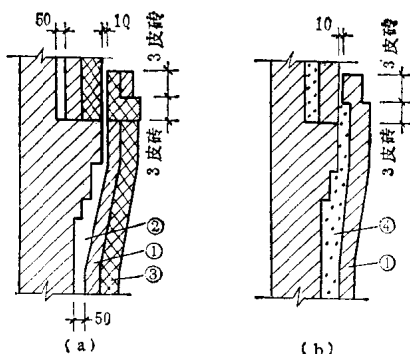


图1.11 砖烟囱内衬和隔热层的构造

- ① 内衬砖；② 空气隔热层；③ 硅藻土隔热层；④ 散粒体隔热层

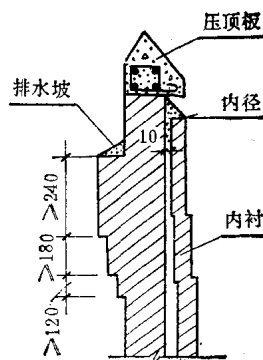


图1.12 砖筒壁顶部构造详图

烟囱受温度影响一般需要设置环箍或环向钢筋，根据烟囱受温度高低以及具体要求，可选择其中一种或两种构造方案。按计算配置的环箍，间距为 $0.5\text{—}1.5\text{m}$ ；按构造配置的环箍，其间距也不大于 1.5m 。环箍宽度不小于 60mm ，厚度不小于 6mm ，每圈环箍的扣环不应少于2个，每段环箍长度不超过 5m 。环箍扣环上的连接螺栓采用I级钢（ A_3 ），其净截面积不小于环箍截面面积。环箍接头的位置应沿筒壁高度相互错开，有关构造见图1.13。

