

某铁矿超大型主井井塔结构设计

Structural Design of a Super Large Main Shaft Tower in a Certain Iron Mine

黄斯拜, 耿璐, 辛占德, 崔小雄(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要:以某特大型铁矿主井井塔为例,对井塔结构设计过程进行探讨。阐述了超大型井塔平面和竖向布置过程,介绍了井塔的荷载取值与工况组合,给出了该井塔抗震不利情况的优化措施,利用 YJK 进行了小震弹性分析,采用 MIDAS Building 进行了验证,并以弹性时程分析作为补充计算。为后续超大型井塔的设计提供参考和帮助。

关键词:超大型井塔; 结构设计; 小震弹性分析; 小震弹性时程分析

中图分类号: TD262 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)01-0044-06

Abstract: Taking the main shaft tower of a certain super large iron mine as an example, this paper explores the design process of the shaft tower structure. This article elaborates on the process of arranging the plan and vertical layout of a super large well tower, introduces the load values and working condition combinations of the well tower, provides optimization measures for the seismic unfavorable situation of the well tower, uses YJK for small earthquake elastic analysis, verifies it using MIDAS Building, and supplements the calculation with elastic time history analysis. Provide reference and assistance for the design of super large well towers in the future.

Key words: ultra large well tower; structural design; small seismic elasticity analysis; elastic time history analysis of small earthquakes

1 前言

随着经济发展对矿石资源需求的迅猛增长,而浅部、易采矿产资源却日益减少,深部开采变得迫切重要。在深部采矿的工业建筑中,井塔是连接矿井上下通道的关键性构筑物^[1-2],正朝着大型化的方向发展。

本文以国内某特大型铁矿的主井井塔为例,阐述超大型井塔的结构选型、布置、计算分析等设计过程。

2 井塔概况

本工程设计包含有两座相同的井塔,每座井塔生产规模为 750 万 t/a。井塔设计使用年限为 50 年,结构安全等级为一级,抗震设防类别为重点设防类(乙类)。基本风压为 0.45 kN/m²,基本雪压为 0.55 kN/m²,建筑场地类别为 II 类,场地抗震设防烈度为 6 度,设计基本地震加速度值为 0.05 g,设计地震分组为第一组,特征周期为 0.35 s。采用内框外

筒结构,抗震等级筒体二级,框架二级。基础设计等级为甲级。

主井提升系统主要技术参数:矿石提升任务为 22 728 t/d,最大提升高度 1 478 m,最大提升速度为 18.025 m/s;采用双箕斗提升,提升机型号为塔式 JKM-6.75x6,摩擦轮直径为 6 750 mm,导向轮直径为 6 000 mm;采用 2 台交流同步提升电动机,单台功率 6 500 kW,电机与摩擦轮同频,最大转速为 51 r/min。

3 结构布置

总体布置原则:井塔的布置应在结构安全的前提下满足工艺、建筑等专业的要求,做到安全适用、经济合理、方便施工。井塔有钢筋混凝土和钢结构两种结构体系,在钢筋混凝土井塔诸多形式中,箱形和箱框形是国内外最广泛采用的结构形式^[3]。综合各专业及现场条件,本项目井塔采用外箱内框的结构形式,该体系受力简单明确,内框柱主要承担竖向荷载,外部筒体抵抗水平荷载,提供主要抗侧刚度。

3.1 平面布置

井塔的平面布置主要包括提升机大厅、导向轮层、底层平面布置^[4]。首先考虑提升机大厅,其次是底层平面布置,再是其他各层。

[作者简介] 黄斯拜(1988—),男,硕士,工程师,主要从事矿山结构工程咨询、设计与研究工作。

[引用格式] 黄斯拜,耿璐,辛占德,等.某铁矿超大型主井井塔结构设计[J].中国矿山工程,2025,54(1):44-49+62.

提升机大厅层布置:本层设备主要有提升机、电机,上方设置电动桥式吊车,主要房间有控制室、卫生间、电梯间。在布置上要满足工艺设备的布置、吊装、安装距离及检修场地要求,并且要使得提升机大梁的传力简单直接。本层平面布置如图1所示。

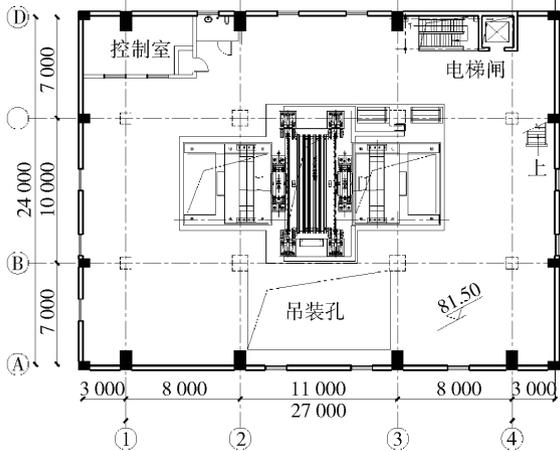


图1 提升机大厅层平面布置图(单位:mm)

首层布置:井筒居中,矿石仓和吊装区域围绕井筒布置,矿石仓下设胶带运输系统。该井塔布置4个内柱,内柱布置要避开上部提升系统的罐道留洞,且避开井壁一定距离,井塔四周为剪力墙结构,设11个扶壁柱。电梯间、楼梯位置与提升机大厅层位置一致,方便竖向布置。本层平面布置如图2所示。

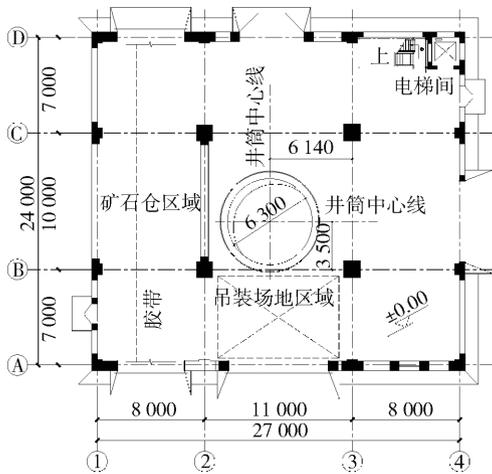


图2 首层平面布置图(单位:mm)

3.2 竖向布置

矿井提升系统的竖向布置决定了井塔的竖向布置,如矿石仓、卸矿层、主井提升箕斗过卷装置(防撞梁)层、导向轮层、提升大厅层等层高均与工艺有关,其他各层层高根据使用功能确定,尽量做到均匀合理。首层标高11 m,防撞梁层底标高为51 m,导向轮层底标高为62.9 m,大厅层楼面标高81.5 m,

吊车轨面标高93.5 m,结构总标高99.6 m,其中矿石仓顶标高18 m,底标高5.8 m,其他结构层根据需要设置高低压配电室、整流变压器室、传动室等。在井塔竖向布置上,除原本工艺需要的10层外,加设46.6 m一个结构层,结构层设置框架梁无楼板,井塔共11层。井塔内设客货两用兼消防电梯一部,楼梯间一个。井塔竖向布置如图3所示。

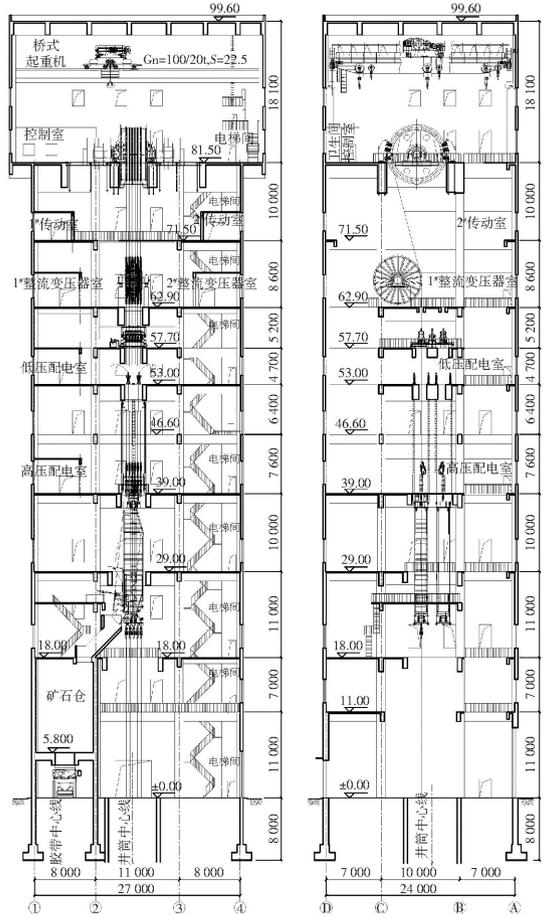


图3 井塔竖向剖面布置图(单位:mm)

3.3 主要构件截面尺寸

剪力墙厚度从基础顶至11.0 m取700 mm,11.0~39.0 m厚度取400 mm,以上取300 mm;框架柱截面尺寸从基础顶至29.0 m取1 200 mm×1 200 mm,以上取1 100 mm×1 100 mm;外墙扶壁柱从基础顶至提升机大厅层取800 mm×800 mm,大厅层以上取600 mm×800 mm或800 mm×1 350 mm;提升机主梁取1 245 mm×3 170 mm;防撞梁尺寸取500 mm×1 970 mm。

4 井塔荷载取值与工况组合

4.1 荷载取值

井塔的荷载可分为永久荷载、可变荷载、偶然荷

载、地震作用四种类型。下面列举了井塔结构设计的部分重要荷载:

(1) 钢丝绳荷载: 箕斗容量为 30 m^3 , 自重 55 t , 载重 55 t ; 提升首绳 15.26 kg/m , 共计 6 根, 首绳长度 1625 m ; 平衡尾绳 18.32 kg/m , 共计 5 根, 尾绳长度 1565 m ; 罐道钢丝绳 14.21 kg/m , 共计 5 根, 罐道绳长度 1575 m ;

(2) 楼面活荷载: 提升机大厅层楼面均布荷载为 30 kN/m^2 ; 导向轮层及有设备楼层为 6 kN/m^2 ; 其他楼层为 4 kN/m^2 。

(3) 摩擦轮荷载标准值: 正常工作时, $Q_{1k} = 2S_{\max} + q \left(\frac{a}{9.8} - 0.9 \right) = 2 \times 2482 + 1100 \times \left(\frac{15}{9.8} - 0.9 \right) = 5657 \text{ kN}$; 事故时, $A_{1k} = 1.33T = 1.33 \times 20148 = 5008 \text{ kN}$ 。其中 S_{\max} 为提升机钢丝绳最大静张力, q 提升容器的载重, a 为提升加速度, T 为摩擦轮一侧钢丝绳断绳荷载, 参数均由工艺专业提供。

(4) 电动机作用于楼面支承梁上荷载标准值: 正常工作时, $Q_{4k} = \pm \frac{M_2}{l_2} = \pm \frac{1227}{4.85} = 253 \text{ kN}$, 事故时, $A_{4k} = \pm \frac{2.5M_2}{l_2} = \pm \frac{2.5 \times 1227}{4.85} = 632.5 \text{ kN}$ 。其中, M_2 为电动机额定扭矩; l_2 为电机支座间的距离, 两者均由工艺专业提供。

(5) 导向轮作用于楼面支撑梁上荷载标准值: 正常工作时水平荷载 $Q_{5kx} = S_{\max} \sin\theta = 2482 \times \sin 14.39 = 617 \text{ kN}$, 垂直荷载 $Q_{5ky} = S_{\max} (1 - \cos\theta) = 2482 \times (1 - \cos 14.39) = 78 \text{ kN}$; 事故时水平荷载 $A_{5kx} = T \sin\theta = 20148 \times \sin 14.39 = 5008 \text{ kN}$, 垂直荷载 $A_{5ky} = T(1 - \cos\theta) = 20148 \times (1 - \cos 14.39) = 632 \text{ kN}$ 。荷载均作用于导向轮轴承中心。

(6) 防撞梁荷载标准值: $A_{6k} = 4.0S_{\max} = 4 \times 2482 = 9928 \text{ kN}$ 。

(7) 吊车荷载: $100/20 \text{ t}$ 吊钩桥式起重机, 跨度为 22.5 m , A5 工作制, 最大轮压 360 kN 。

4.2 工况组合

按承载力极限状态和正常使用极限状态分别进行荷载组合, 对承载力极限状态按基本组合、事故组合、地震作用组合进行设计。

根据井塔的实际受力情况, 简化为 7 个工况施加荷载组合, 除正常提升工况、地震工况、施工临时改绞工况^[5]外, 还有事故工况^[6-7]: 摩擦轮事故工况、箕斗过卷工况(2 个)、电机事故工况。对于以上

工况需做如下说明:

(1) 摩擦轮和电机事故工况仅用于提升机大厅层及下一层构件计算, 以及导向轮下一层。

(2) 对于两个过卷工况, 由于过卷方向向上, 不考虑楼面活荷载, 过卷工况与正常使用工况和抗震工况共同控制防撞梁层配筋。

(3) 各工况的效应分项系数和组合值系数按照《矿山提升井塔设计规范》GB 51184—2016 中 4.2 节的要求进行。但对于承载能力极限状态荷载效应组合分项系数取值应以《工程结构通用规范》GB 55001—2021 中第 3.1.13 条为准, 对于承载能力极限状态地震作用效应组合分项系数的取值应以《建筑与市政工程抗震通用规范》GB 55002—2021 第 4.3.2 条为准。

5 抗震不利情况及优化措施

5.1 楼板开洞过大

根据工艺及建筑专业需要, 楼层设置了提升孔、吊装孔、电梯孔和楼梯孔等孔洞, 其中第 1、5、7、9 层层顶楼板开洞率均超过 30%, 造成楼板尺寸和平面刚度急剧变化, 属于楼板局部不连续的平面不规则, 与整体指标计算时采用的“刚性楼板假定”不符。

为满足设计要求, 这些孔洞往往无法避免, 可以在这些楼板层采取加大楼板厚度、采用双层双向配筋、提高楼板配筋率、设置洞口边梁等措施进行加强。

5.2 质量分布不均

井塔设备及荷载在平面上基本对称居中, 但在竖向分布极不均匀, 具体如图 4 所示。其中钢丝绳固定层质量比为 2.02, 提升机大厅层质量比达到了 2.6, 严重超过了限值 1.5, 使得井塔头重脚轻, 加重了地震效应。

由于井塔工艺特殊, 通过调整结构竖向布置来满足质量比要求, 不经济且收效甚微, 只能通过结构调整来尽量满足质量比的要求, 例如加大底部楼层质量、减小底部楼层层高等措施。

5.3 层刚度分布不均

受工艺专业竖向布置限值, 井塔各层层高差异较大。例如底层受运输需求开门洞和卸矿高度的影响见, 底首层高刚度小, 可通过增加剪力墙厚度、设置扶壁柱增加层刚度, 而增设扶壁柱又可以解决墙体壁板稳定性的问题。

该井塔的第 5、6 层为提升箕斗过卷装置层,

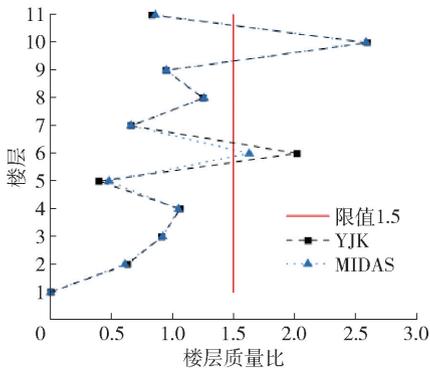


图4 楼层质量比

层高达 14 m,未加第 5 层结构层前楼层侧向刚度和受剪承载力均不符合规范要求,可见楼层过高时通过加设结构层使得层高更加均匀,对抗震更为有利。

5.4 大厅层悬挑过大

由于工艺设备吊装安装需要,为不增加井塔大厅层以下面积,减小工程量,需悬挑大厅层及屋面层。该井塔提升机大厅层 X 向水平尺寸为下部楼层的 1.2 倍,悬挑程度超过《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3—2010(以下简称《高规》)第 3.5.5 条的限值,属于竖向不规则。根据《高规》10.6.1 条和 10.6.4 条,采取了将悬挑梁和与之相连的上下各一层的柱的抗震等级提高一级的措施,最终为一级抗震。

5.5 顶层空旷房间

根据工艺布置要求,井塔顶部设置提升机大厅层,大厅顶部设置桥式吊车,取消了部分墙、柱形成了空旷房间。根据《高规》第 3.5.9 条规定,宜进行弹性时程分析作为补充计算,通过乘以地震剪力放大系数来调整设计内力,详见 6.2 节,并采取相应的构造措施。

6 计算分析

6.1 小震弹性分析

采用 YJK 软件对结构正常提升工况进行振型分解反应谱法的小震弹性分析,其他工况另行分析,不在本文研究范围内,并采用 MIDAS Building 软件进行验证计算。考虑偶然偏心地震作用、双向地震作用、扭转耦联的影响,主要计算结果见表 1。结果表明两款软件的小震弹性分析结果基本一致。

该井塔 X 向与 Y 向的振型质量参与系数均大于 90%,满足《高规》5.1.13 条的要求。X 向与 Y 向的刚重比 EJ_d/GH^2 大于 1.4,能够通过《高规》5.4.4

表 1 振型分解反应谱法计算结果

软件	YJK	MIDAS building
重力荷载代表值/t	26 957	26 490
结构自振周期/s		
T_1 (Y 向平动)	1.069 8	1.046 5
T_2 (X 向平动)	0.994 6	0.971 2
T_3 (扭转)	0.396 8	0.380 4
周期比 T_1/T_2	0.37	0.364
振型质量参与系数		
X 向	95.28%	93.21%
Y 向	94.76%	91.34%
地震作用下基底剪力/kN		
X 向	233 963.9	233 253
Y 向	221 005	220 385
地震作用下底层剪重比		
X 向	1.477%	1.55%
Y 向	1.372%	1.46%
刚重比		
X 向	34.550	31.14
Y 向	30.269	27.01
地震作用下顶点最大位移/mm		
X 向	5.62	5.591
Y 向	6.04	6.024
地震作用下最大层间位移角		
X 向	1/9 999(10 层)	1/13 230(7 层)
Y 向	1/9 999(10 层)	1/12 407(9 层)
地震作用下最大位移比		
X 向	1.04(1 层)	1.1(1 层)
Y 向	1.07(1 层)	1.16(1 层)
风荷载作用下顶点最大位移/mm		
X 向	4.95	5.013
Y 向	7.33	7.477
风荷载作用下最大层间位移角		
X 向	1/9 999(5 层)	1/13 332(7 层)
Y 向	1/9 028(5 层)	1/7 890(7 层)
刚度比最小值		
X 向	1.012 9(1 层)	0.915 1(7 层)
Y 向	1.110 8(7 层)	0.997 4(7 层)
受剪承载力比最小值		
X 向	0.87(6 层)	0.92(1 层)
Y 向	0.87(6 层)	0.92(6 层)

条的整体稳定验算,刚重比 EJ_d/GH^2 大于 2.7,满足《高规》5.4.1 条的要求,可以不考虑重力二阶效应。

由表 2 可知,该井塔属于高宽比大于 4 的高层建筑,基础底面无零应力区,在重力荷载与水平荷载标准值或重力荷载代表值与多遇水平地震标准值共同作用下,符合《高规》12.1.7 条的规定,抗倾覆验算结果满足规范要求。

表 2 抗倾覆验算

工况	抗倾覆力矩 $Mr/kN \cdot m$	倾覆力矩 $Mov/kN \cdot m$	比值 Mr/Mov	零应力区/ %
EX	3.46×10^6	2.74×10^5	12.62	0
EY	3.26×10^6	2.54×10^5	12.82	0

在考虑偶然偏心影响的规定水平地震力作用下,各楼层的扭转位移比如图5所示,最大位移比均小于1.2;第1、2阶振型分别为Y、X向平动主振型,自振周期基本接近,第3阶振型为扭转主振型,周期比 $T_1/T_2 < 0.9$,满足《高规》3.4.5条的要求。

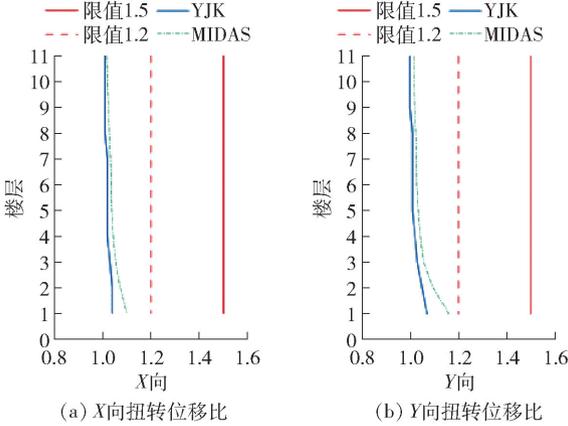


图5 地震作用下扭转位移比(YJK)

地震作用下X向与Y向的底层剪重比均大于0.8%,满足《建筑与市政工程抗震通用规范》GB 55002—2021第4.2.3条的规定。风荷载和多遇地震作用下的层间位移角均远小于1/800,满足《高规》3.7.3条的要求。

由图6可知,楼层与其相邻上层的侧向刚度比均大于0.9,满足《高规》3.5.2条的要求。但应注意到,该井塔仅首层层高大于相邻上层层高的1.5倍,比值达到1.574,根据《高规》3.5.2条规定,侧向刚度比限值宜大于1.1,YJK软件X向的计算结果略小于1.1。

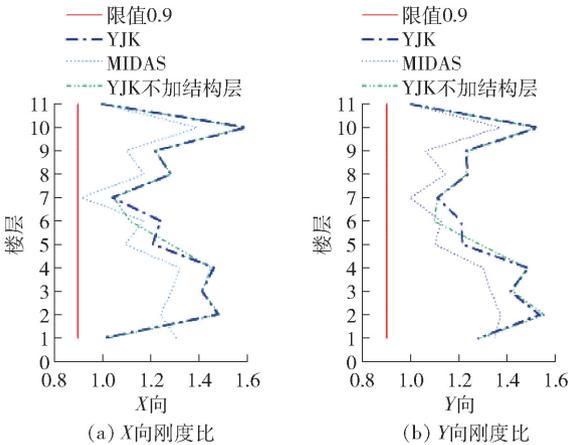


图6 楼层侧向刚度比

由图7可知,经过增加结构层的优化调整后,所有楼层受剪承载力比值均大于0.8,无薄弱层存在。

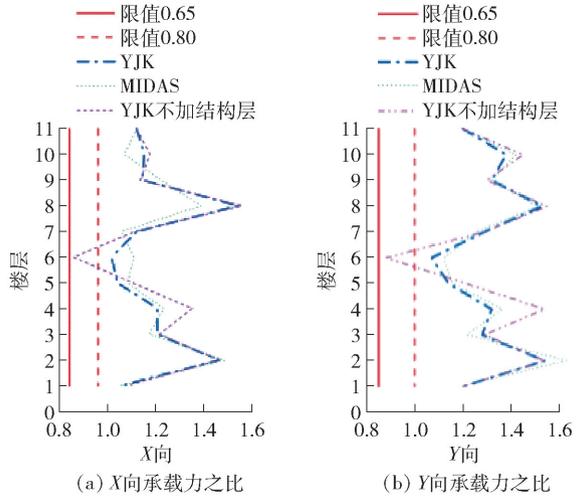


图7 地震作用下受剪承载力之比

YJK计算的第一振型基本周期为 $T_1 = 1.0698$ s,相当于结构自振频率为56 r/min,与提升机摩擦轮转速为51 r/min的频率有一定差别,避免了提升设备与井塔本身产生共振。其他设备与结构构件的周期及共振分析限于篇幅不在本文阐述。

6.2 小震弹性时程分析

采用YJK软件的弹性时程分析模块对井塔进行小震作用下的弹性时程分析。根据《高规》第4.3.5条规定,选取II类场地上两组天然波(Northridge波,Chi-Chi波)和一组人工波(ArtWave波)如图8至图10所示,进行弹性时程分析。三条时程波的平均地震影响系数曲线与振型分解反应谱法(CQC法)所用的地震影响系数曲线相比,在对应于结构主要振型的周期点上相差不大于20%,满足《建筑抗震设计规范》GB50011—2010中5.1.2条文说明的“在统计意义上相符”的要求。时程分析采用双向激励作用,主方向峰值加速度值为 18 cm/s^2 ,次方向取 0 cm/s^2 。

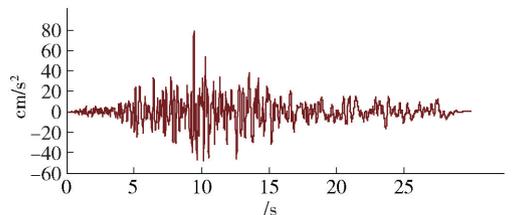


图8 天然波Northridge地震加速度曲线

由表3分析可知,每条时程曲线计算所得结构底部剪力均在振型分解反应谱法计算结果的65%~135%之间,三条时程曲线计算所得结构底部剪力的平均值在振型分解反应谱法计算结果的80%~120%之间,满足《高规》第4.3.5条规定。各层弹

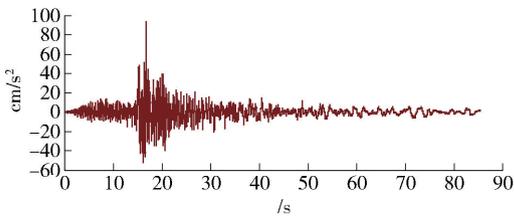


图 9 天然波 Chi-Chi 地震加速度曲线

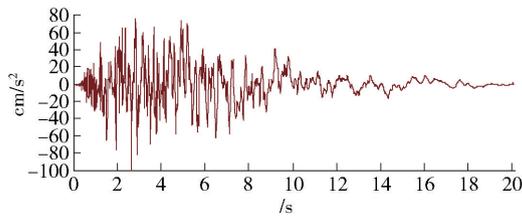


图 10 人工波 ArtWave 地震加速度曲线

性时程分析的计算结果取 3 条波计算结果的包络值,弹性时程分析所得楼层剪力如图 11 所示,基本大于 CQC 法的楼层剪力。

表 3 各地震波与 CQC 法基底剪力对比

地震波	底部剪力 X 向/kN	X 向剪力 与 CQC 值 比较	底部剪力 Y 向/kN	Y 向剪力 与 CQC 值 比较
Northridge	2 819	75.8%	2 490	72.1%
Chi-Chi	3 026	81.3%	2 971	86%
ArtWave	4 398	118.2%	3 542	102.5%
3 条波平均值	3 414	91.8%	3 001	86.9%
CQC	3 720	100%	3 455	100%

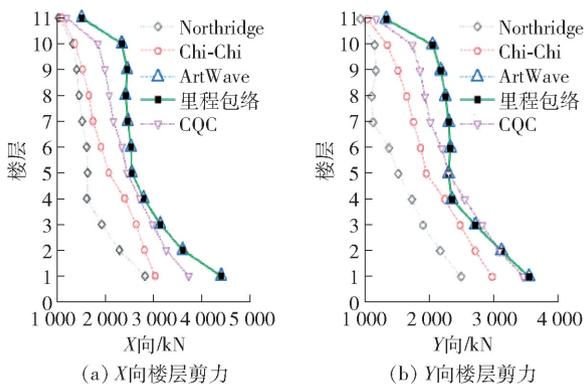


图 11 弹性时程分析楼层剪力

由于弹性时程分析软件不具备后处理配筋功能,在构件设计过程中,为确保结构安全,可结合弹性时程分析结果和振型分解反应谱法所得结果进行配筋设计,对这些楼层的小震层剪力做相应放大。最终小震层剪力取弹性时程分析包络值与 CQC 法计算结果的较大值,后进行配筋计算,以达到采用弹性时程分析法进行补充计算的要求。X 向各楼层的

放大系数在 1.032 ~ 1.268, Y 向各楼层的放大系数在 1 ~ 1.179,多波包络值全楼放大系数建议值取 1.268。

7 基础设计

根据岩土勘察报告和井塔上部结构荷载情况,本工程采用条形基础和独立基础。考虑井筒临时锁口深度,设一层地下室,选择中风化石英砂岩作为持力层,地基承载力特征值 $f_a = 3\ 000\ \text{kPa}$,埋深 8 m,满足《矿山提升井塔设计规范》第 7.2.1 条基础埋置深度不小于井塔高度的 1/15 的规定。条形基础宽 4 m 厚 1 m,并设置 1.2 m × 2 m 基础反梁,基础平面布置如图 12 所示。

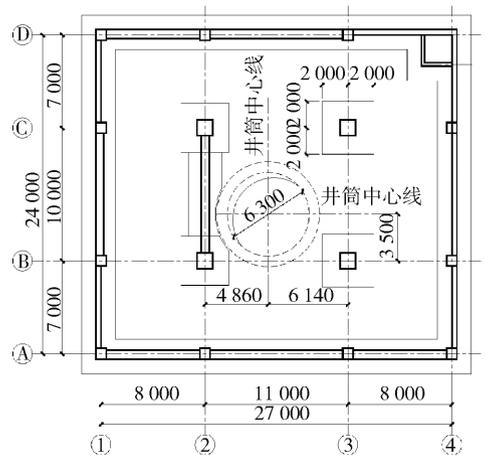


图 12 基础平面布置图(单位:mm)

在准永久组合作用下,基底平面形心与结构竖向永久荷载重心之间的偏心距 $e \leq 0.1M/W$,经计算,抗震作用下基础底面无零应力区,满足《建筑地基基础设计规范》的要求。

8 结论

(1)井塔属于矿山特种结构,为满足工艺需要,给井塔结构造成诸多抗震不利影响,通过合理的平面和竖向结构布置,以及相应的抗震优化措施,除楼层质量比外,其他结构整体指标可基本满足。

(2)计算分析表明,井塔结构布置特殊,为确保结构安全,除常规小震弹性分析外,进行小震弹性时程分析作为补充计算十分必要。

(3)在设计中还有诸多因素需要做进一步的深入研究论证,例如,设计中如何避免其他附属设备振动影响及相应的构造措施,抗震设计时关于框架柱“二道防线”调整问题,以及今后实现超大型井塔全钢结构化等问题。

(下转第 62 页)