

# 单层球面网壳新型减震体系整体性能研究\*

## Overall Performance of Reticular Dome with New Seismic Vibration Reduction System

王秀丽, 闫志刚, 陈继云

WANG Xiu-li, YAN Zhi-gang, CHEN Ji-yun

(兰州理工大学土木工程学院, 甘肃兰州 730050)

(Department of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu, 730050, China)

**摘要:** 选用 60m 跨度的空间 k 型网壳考虑下部结构和不考虑下部结构两种计算模型进行动力时程分析, 讨论两种模型在地震作用下抗震反应的差异, 分析不同柱高度参数对网壳结构整体性能的影响, 并对考虑下部结构模型布置 4 种约束屈曲支撑方案进行动力分析。结果表明, 单层网壳下部结构的共同作用影响了网壳杆件受力变化规律, 不同下部结构对网壳壳体的影响范围也相应变化; 网壳下部结构柱高度对网壳结构整体刚度影响较大, 柱越高网壳结构整体刚度削弱就越明显; 约束屈曲支撑能够有效地控制网壳节点位移响应, 效果明显, 合理布置约束屈曲支撑有效吸收地震能量, 减小网壳结构的地震响应。在考虑下部结构模型布置 4 种约束屈曲支撑方案中, 方案 2 对主肋节点的水平和竖向位移均有较好的控制效果, 主肋节点减震系数达到 0.75。

**关键词:** 网壳结构 下部结构 约束屈曲支撑 减震分析

中图分类号: TU352.1, TU311.41 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2008)03-0294-05

**Abstract** Through the dynamic time interval analysis about a 60m Kiewitt-bom spanned latticed shell with two calculate models, which were with substructure or not, the differences of the sponsor under earthquake was discussed; the influence of different column height to its overall performance was also analysed. It is obvious that seismic action of reticular dome with BRB has been reduced. And after comparing four kinds of buckling-restrained braces arranged to the model with substructure by dynamic analysis, a reasonable arrangement is obtained.

**Key words** latticed shell, substructure, buckling-restrained braces, seismic vibration reduction analysis

网壳结构因其造型优美, 受力合理, 结构灵活多样, 施工方便, 机械化、工厂化程度高等特点, 已经成为近年来发展最快, 应用最广的一种空间结构。但是在设计中因计算条件的限制, 常常将上部网壳屋盖结构和下部支撑结构分别取计算简图计算, 并以此进行构件设计<sup>[1-5]</sup>。在实际工程中, 下部结构的作用对网壳的内力、支座的侧推力以及节点的挠度均有影响, 尤其在地震作用下, 下部结构的震动对支撑结构附近的杆件, 将引起不可忽视的地震响应, 影响网壳壳体本身的承载能力<sup>[6]</sup>。因此, 抗震设计中充分考虑网壳

与下部结构整体协同工作性能具有重要的理论意义和工程实用价值。

### 1 单层网壳新型减震体系

传统的单层网壳减震方法是利用网壳主要受力杆件在地震作用下屈服进入塑性状态消耗地震能量, 即用网壳结构本身存储和消耗地震能量, 以保证结构具有一定的刚度、强度和耐久性。这种结构抗震方式缺乏自我调节能力, 在地震波达到一定强度时, 既不经济也达不到预期效果。基于以上因素, 近年来土木工程领域中的结构消能减震体系得到迅速普及。

结构消能减震体系是把网壳的某些非承重构件(如支撑、剪力墙、连接件等)设计成消能构件, 或在结构的某些部位(层间空间、结点、连接缝等)装设阻尼器, 在风振或小震的作用下约束屈曲支撑具有足够的初始刚度, 处于弹性状态, 网壳仍具有足够的侧向刚

收稿日期: 2007-11-14

修回日期: 2008-03-25

作者简介: 王秀丽(1963-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事空间结构与钢结构研究工作。

\* 国家自然科学基金项目(50678078), 甘肃省自然科学基金项目(3ZS061-A25-048), 兰州理工大学优秀青年教师计划项目资助。

度以满足使用要求。当出现中、强震时,随着网壳侧向变形增大,约束屈曲支撑率先进入非弹性状态,产生较大阻尼,大量消耗输入结构的地震能量使主结构避免出现明显的非弹性状态,迅速衰减网壳的地震反应(位移、速度、加速度等),确保网壳在强震下的安全性<sup>[3-7]</sup>。

单层网壳新型减震体系是在网壳的关键部位装设约束屈曲支撑,通过约束屈曲支撑的良好力学性能在网壳结构中的充分作用,达到网壳结构消能减震的要求。与采用普通阻尼器减震体系相比,约束屈曲支撑在拉压荷载作用下均能屈服,这就消除了普通支撑受压屈曲问题,因而在强震时有更稳定的耗能能力。约束屈曲支撑通过螺栓或铰链连接到结构,避免现场施焊,安装方便,和支撑的二力杆力学模型符合较好,同时约束屈曲支撑的强度和刚度很容易调整,设计方便,非弹性阶段的滞回性能便于模拟;对承载能力较弱的结构,约束屈曲支撑还可以应用于工程加固。

## 2 单层网壳整体性能分析

### 2.1 分析模型

为分析下部结构对网壳结构的影响情况,采用大型有限元分析软件 ANSYS 建立结构分析模型,结构构件采用 BEAM188 空间梁单元,模型为单层 k 型网壳,下部结构为钢柱支撑,在网壳主肋节点以及主肋节点之间每个对称区等距设置 4 根独立柱,柱与网壳之间铰接。

网壳跨度为 60m,主肋和环杆截面尺寸为  $\Phi 140 \times 4.0$ ,斜杆截面尺寸为  $\Phi 127 \times 3.5$ ,柱的材料参数  $E = 210\text{GPa}$ ,  $\sigma = 235\text{MPa}$ ,  $\lambda = 0.3$ ,密度 =  $7800\text{kg/m}^3$ 。下部结构共同作用的计算模型如图 1A 所示。考虑上部网壳的模型(见图 1) B 网壳环数 1~9 环由网壳中心开始向外周编号。

考虑下部结构模型中,为分析柱高度对网壳影响,选取 3 种下部结构的柱高度: 8m、10m、12m。各柱的截面尺寸均为  $\Phi 140 \times 30$ 。

约束屈曲支撑屈服强度 100MP,弹性模量为 210GPa,密度为  $7800\text{kg/m}^3$ ,泊松比为 0.3,采用 LINK8 空间杆单元,该单元可承受轴向拉压荷载,具备塑性变形能力,每端节点有 3 个自由度,即  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的位移,符合屈曲约束支撑的性能要求。重力荷载代表值均化为集中质量作用在节点上,采用 MASS2 质量单元定义集中质量和该质量体的转动惯量。

通过对网壳本身受力特性的分析,选取 II 类场地的 EL-Centro 强震记录进行地震响应计算,两个记

录的时间间隔为 0.02s, 3 个方向地震波输入,其加速度峰值按 1:0.84:0.64(水平 1:水平 2:竖向)的比例调整。

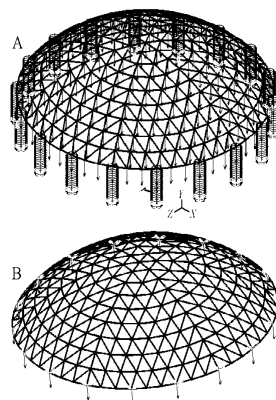


图 1 单层 k 型网壳的几何模型

Fig. 1 The geometry model of k single layer shell

分析约束屈曲支撑对单层网壳结构抗震性能的影响,不同的布置方式产生的效应就不同<sup>[2]</sup>。布置约束屈曲支撑时,采取用等截面约束屈曲支撑替代网壳结构中的构件,并遵循以下原则:(1)约束屈曲支撑不能替代主要受力构件。约束屈曲支撑的承载能力较低,替代主要受力构件,将对结构的承载能力产生较大的影响,不利结构抗震。(2)约束屈曲支撑不能布置在地震力较小的位置。约束屈曲支撑是通过构件屈服、变形吸收地震能量的方式得到抗震、减震效果的,所以约束屈曲支撑的布置位置不能处于地震作用较小的位置,以得充分受力变形,充分发挥效能。(3)替换后的支撑的承载能力和原来杆件的承载能力必须保持相当。由于所分析的网壳结构构件的截面尺寸不能有太大的增加,故采取直接等截面替换的原则,即核心受力单元的截面积和原结构的截面积相同。(4)约束屈曲支撑的受力方向最大限度的和地震作用方向保持一致。(5)下部结构附加约束屈曲支撑时,附加支撑也应布置在下部结构位移较大处。并根据不同位移情况考虑附加位置和数量。同时,通过对结构进行地震作用分析可知,结构在地震作用时间内,最大位移发生位置基本集中在网壳的第 2 环、第 3 环节点,所以约束屈曲支撑的布置应对此部位进行减震控制,另外由于下部结构的惯性作用的影响,最外圈网壳杆件轴力也较大,对此部位也应该考虑设置约束屈曲支撑,进行减震控制,所以综合考虑约束屈曲支撑的各种因素后,采用图 2 的支撑布置。

为有效控制下部结构的惯性作用对网壳的影响,4 种方案均在网壳最外圈斜杆处设置约束屈曲支撑,与主肋连接的斜杆没有布置约束屈曲支撑。控制第 2

圈、第 3 圈节点位移减震布置方面, 4 种方案约束屈曲支撑均布置在第 3 圈斜杆上以达到减小第 2 圈、第 3 圈节点位移的目的。其中, 第 1 种方案布置的约束屈曲支撑的数量最少, 第 4 种方案布置的约束屈曲支撑数量最多。第 2 种、第 3 种方案布置的约束屈曲支撑数量相同, 但是布置的位置有所区别, 第 2 种方案中, 约束屈曲支撑所在斜杆位置处于网壳主肋杆件之间, 并且不与主肋杆件相接; 第 3 种约束屈曲支撑所在斜杆位置位于主肋杆件相邻位置, 并且一端与主肋节点相连接。

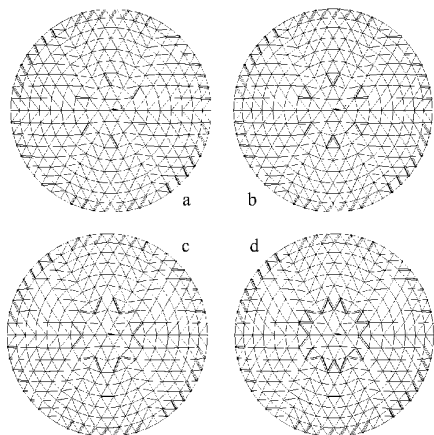


图 2 约束屈曲支撑的布置方式

Fig. 2 Arrangement mode buckling restrained brace

a. 方案 1, b. 方案 2, c. 方案 3, d. 方案 4.

a. Schemel, b. Scheme 2, c. Scheme 3, d. Scheme 4.

## 2.2 结构自振分析

由于篇幅限制, 仅列出第 2 种方案的网壳在不同柱高度下整体性能分析数据。由图 3 和图 4 对比可见, 不同柱高度下结构自振特性具有以下特点: (1) 单层  $k$  型网壳频率的分布非常密集, 并且由于结构有多条对称轴, 各方案网壳均出现大小相近或相同的频率对, 反映了结构的对称性; (2) 在各种工况下, 考虑下部结构模型的结构方案自振频率减弱十分显著, 这说明了下部结构的共同作用, 削弱结构整体刚度, 并且单层网壳结构的自振频率密集, 间隔较小, 表现为高频部分呈连续分布; (3) 考虑下部结构协同作用各方案频率变化规律基本相同, 结构参数变化会对网壳各阶频率的具体数值产生影响, 但是结构频率的基本规律不变, 说明下部结构的高度对网壳本身自振性能影响不大, 只是削弱结构整体的刚度, 柱越高, 这种效果就越明显; (4) 下部结构的协同作用改变了网壳自振振型, 高阶振型尤为明显, 如图 5 和图 6 所示。

## 2.3 杆件轴力分析

网壳的下部结构条件对网壳结构的动力反应有较大影响, 在 3 个方向地震力作用下, 考虑下部结构协同作用时, 杆件轴力的最大响应均有显著变化。

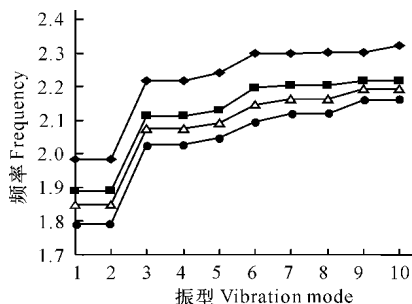


图 3 结构前 10 阶频率

Fig. 3 The frequency of structure on preceding 10 grades

◆: 无柱网壳; ■: 柱高 8m; ▲: 柱高 10m; ●: 柱高 12m

◆: Non-column shell; ■: Column height 8m; ▲: Column height 10m; ●: Column height 12m

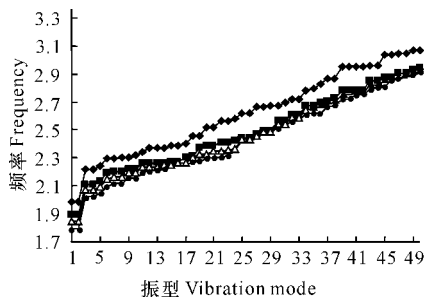


图 4 结构前 50 阶频率变化

Fig. 4 The frequency of structure on preceding 50 grades

◆: 无柱网壳; ■: 柱高 8m; ▲: 柱高 10m; ●: 柱高 12m

◆: Non-column; ■: Column height 8m; ▲: Column height 10m; ●: Column height 12m

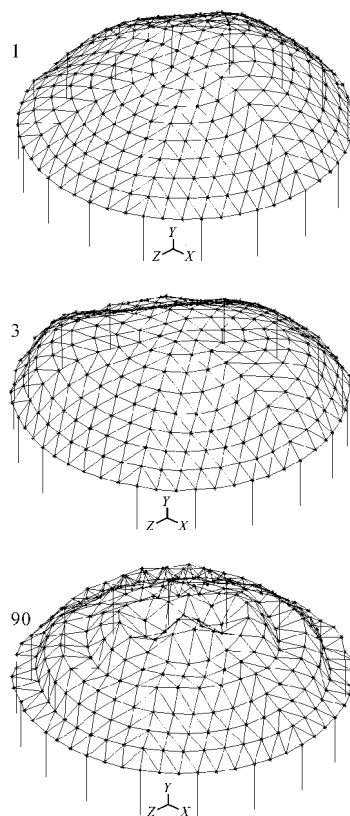


图 5 考虑下部结构协同作用模型第 1、3、90 阶振型

Fig. 5 The 1, 3, 90 vibration mode of the structure with considering the synchronous action of the substructure

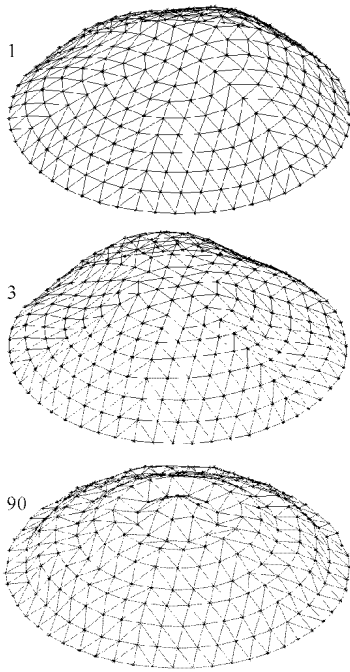


图6 不考虑下部结构协同作用模型第1 3 90阶振型

Fig. 6 The 1 3 90 vibration mode of the structure without considering the synchronous action of the substructure

如表1所示,考虑下部结构模型的主肋杆件6~9环受下部结构惯性作用影响,轴力响应有所增加,最大增幅为60.67%,最小增幅为10.56%;1~5环主肋杆件轴力也发生较大变化,方案4的杆件轴力减小,方案2的杆件轴力增加,方案3的主肋杆件轴力有增有减,这主要是因为地震作用下网壳下部结构对网壳较

Table 1 The response of the axial force under the three dimensional earthquake action

杆件方案 Scheme		轴力响应 Force(kN)								
		1环 Ring 1	2环 Ring 2	3环 Ring 3	4环 Ring 4	5环 Ring 5	6环 Ring 6	7环 Ring 7	8环 Ring 8	9环 Ring 9
主肋 Main rib	无柱网壳 Non-column shell	-57	-94	-93	-84	-90	-89	-85	-104	-161
	柱高8m Column height 8m	-61	-100	-118	-112	-115	-114	-124	-150	-240
	柱高10m Column height 10m	-51	-92	-119	-120	-141	-143	-131	-127	-214
	柱高12m Column height 12m	-52	-92	-92	-79	-89	-99	-94	-124	-181
环杆 Ring bar	无柱网壳 Non-column shell	-141	-161	-161	-161	-161	-129	-129	-118	-92
	柱高8m Column height 8m	-198	-284	-272	-318	-302	-256	-244	-157	-99
	柱高10m Column height 10m	-203	-299	-314	-357	-338	-285	-232	-141	-115
	柱高12m Column height 12m	-193	-221	-244	-238	-243	-257	-247	-150	-119
斜杆 Slant rod	无柱网壳 Non-column shell	-63	-76	-79	-71	-59	-64	-53	-58	
	柱高8m Column height 8m	-89	-91	-100	-104	-103	-94	-110	-122	
	柱高10m Column height 10m	-92	-83	-108	-95	-91	-113	-109	-106	
	柱高12m Column height 12m	-84	-87	-93	-94	-99	-103	-106	-106	

接处的侧推力差异,引起网壳主肋杆件轴力增减,短柱刚度较大,自身变形较小,与网壳协调变形较长柱差,受力变形过程中对网壳侧推作用明显,长柱刚度较小,受地震力作用下,本身的协调变形吸收部分地震能量,并且由于与网壳较好的变形协调,对网壳侧推力并不显著,使得网壳主肋受力减小。下部结构的共同作用,改变了网壳主肋受力变化规律,不同下部结构对网壳壳体的影响范围也相应变化。环杆和斜杆轴力由于受下部结构惯性作用影响,响应值均有所增加。最大增幅为49.7%,最小幅度为7.1%,因为长柱模型中环杆充分发挥作用,边缘环参与工作,使内力趋于缓和。同时,长柱模型中,下部结构的协调变形消耗部分地震能量,柱高越高,这种效应就越明显,使得方案4的环杆轴力较方案2和方案3的响应值减小。因此,在网壳结构的设计中,下部结构的协同作用不容忽视,应充分考虑下部结构协同工作对上部网壳结构的影响,整体地考虑网壳结构体系各部分之间的相互连接,共同作用。

### 3 新型减震体系减震效果分析

三向地震作用下附加约束屈曲支撑的各方案的网壳主肋节点位移较未附加约束屈曲支撑方案无论是节点位移还是杆件内力分布都比较均匀,网壳主肋节点位移均明显下降。说明布置方案较为合理,约束屈曲支撑大幅度削弱结构地震动效应,有效地控制网

壳节点位移幅度。由图 7 和图 8 可以看出,各布置方案对网壳节点位移的控制幅度基本相同,但是控制效果有显著差异。(1)水平方向减震效果。如图 7 所示,方案 4 能够较好的控制  $x$  方向主肋节点位移,方案 1 相对较差,方案 2 和方案 3 的减震效果相差不大,说明控制水平方向位移约束屈曲支撑数量不宜过少,否则约束屈曲支撑减震效果不明显。方案 2 和方案 3 相比较,方案 2 的控制效果稍好些,主要是由于方案 3 约束屈曲支撑集中布置于主肋两边的斜杆上,约束屈曲支撑的承载力较低,支撑给主肋的影响大于支撑带来的减震效应,导致减震效果较同数量支撑的方案 2 差。(2)竖直方向减震效果。如图 8 所示,约束屈曲支撑能有效控制网壳主肋节点的竖向位移,位移降低幅度达到 40%~75%,方案 2 对网壳主肋节点竖向位移控制效果最佳,方案 1 和方案 3 次之,方案 4 的减震效果相对较差。在 3 个方向地震作用下,方案 2 的布置方式使得约束屈曲支撑耗能性能充分发挥,由于方案 4 约束屈曲支撑数量过多,约束屈曲支撑对网壳刚度影响效应超过约束屈曲支撑的减震效应,使得网壳局部刚度变小,位移增大。约束屈曲支撑的数量对网壳减震效果影响非常大,但是并不是数量越多越好,当达到最佳数目时,其对结构的减震效果才能得到充分发挥。

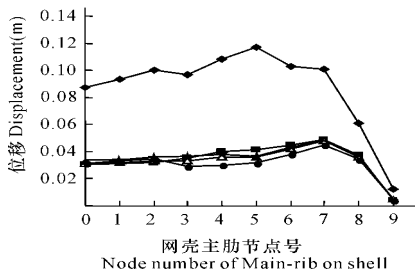


图 7 水平方向位移减震效果

Fig. 7 The damping effect in horizontal direction displacement

◆: 原结构; ■: 方案 1; ▲: 方案 2; ★: 方案 3; ●: 方案 4  
◆: Customary structure; ■: Scheme 1; ▲: Scheme 2; ★: Scheme 3; ●: Scheme 4

综合以上对网壳主肋节点位移分析,可以看出,在三向地震作用下,主肋节点的竖向位移起控制作用。方案 4 控制主肋节点的水平方向位移效果最佳,但是其控制竖直方向位移的效果较差,而且由于其支撑数量最多,对网壳刚度削弱严重,所以不宜考虑此种布置方案。方案 1 由于布置约束屈曲支撑数量较少,所起到减震效果有限。方案 2 和方案 3 的约束屈曲支撑的布置数量相同,但是由于方案 3 布置在主肋附近的斜杆上,约束屈曲支撑对网壳刚度的削弱较方

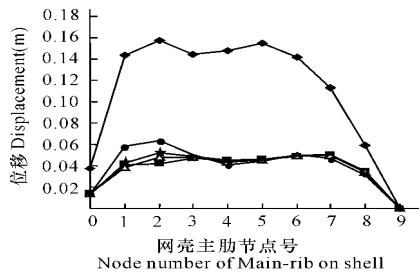


图 8 竖直方向位移减震效果

Fig. 8 The damping effect in vertical direction

◆: 原结构; ■: 方案 1; ▲: 方案 2; ★: 方案 3; ●: 方案 4  
◆: Customary structure; ■: Scheme 1; ▲: Scheme 2; ★: Scheme 3; ●: Scheme 4

案 2 的大,所以方案 2 是最佳布置方案。方案 2 对主肋节点的水平、竖向位移均有较好的控制效果,主肋节点减震系数达到 0.75。

#### 4 结论

通过不同下部结构单层网壳和不同约束屈曲支撑布置方案的动力分析,可以得出以下结论:

(1)下部结构的共同作用改变了网壳杆件受力变化规律,不同下部结构对网壳壳体的影响范围也相应变化。地震作用下网壳受下部结构惯性作用的影响,网壳内力重新分布,在工程设计中应充分考虑下部结构共同作用对网壳整体的影响。

(2)网壳下部结构柱高度参数对网壳结构整体刚度影响较大,柱高越高网壳结构整体刚度削弱就越明显。同时柱高度对网壳自振特性影响较小,结构频率基本规律不变。

(3)约束屈曲支撑能够有效地控制网壳节点位移响应,效果十分明显。约束屈曲支撑这种网壳新型减震体系更适用于对位移限值较为严格的大跨度网壳结构中。

(4)合理布置约束屈曲支撑可有效吸收地震能量,减小网壳结构的地震响应。主肋两边的斜杆不宜布置约束屈曲支撑结构,在主肋附近布置约束屈曲支撑结构对网壳整体刚度的削弱作用会大于对网壳减震作用,不利于提高主肋底部杆件的承载能力,加强减震效果。

#### 参考文献:

[1] 王秀丽,高森,潘霞. 四边支撑单层柱面网壳减震体系性能分析 [J]. 兰州理工大学学报, 2007, 33(2): 120-124.  
[2] 王秀丽,陈祥勇,殷占忠. 约束屈曲支撑对 K型球面网壳减震效果的分析 [J]. 甘肃科学学报, 2007, 19(1): 122-126.

(下转第 303 页 Continue on page 303)

结合的  $\text{H}_2\text{O}_2$  首先电离或发生质子转移, 产生  $\text{NiR}^-$ , 然后  $\text{NiR}^- \rightarrow \text{NiR} + \text{P}$  在此过程中, 溶液  $\text{H}^+$  浓度过大将不利于  $\text{NiR}^-$  的形成, 而溶液  $\text{OH}^-$  浓度过大时可能出现  $\text{NiR}^- + \text{OH}^- \rightarrow \text{NiR} + \text{OH}^- + \text{S}^-$ , 也不利于  $\text{NiR}^-$  的形成。所以,  $\text{pH}$  值不宜过高或过低<sup>[9]</sup>, 这与实验事实相符。

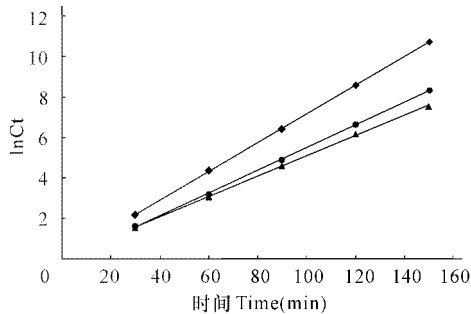


图 9 不同浓度  $\text{H}_2\text{O}_2$  下的分解动力学曲线

Fig. 9 The decomposition dynamics curve in different concentration of  $\text{H}_2\text{O}_2$

◆:  $C = 0.01 \text{ mol/L}$ ,  $y = 0.0708x + 0.065$ ,  $R^2 = 0.9999$ ; ●:  $C = 0.05 \text{ mol/L}$ ,  $y = 0.0558x - 0.0940$ ,  $R^2 = 0.9993$ ; ▲:  $C = 0.09 \text{ mol/L}$ ,  $y = 0.0502x + 0.0497$ ,  $R^2 = 0.9996$

### 3 结论

(1) 利用溶液法合成了二苯甲酰甲烷缩苯丙氨酸镍席夫碱镍配合物, 并且利用紫外、红外、热重等现代仪器分析手段对配合物的结构进行了确认。

(2) 将所合成的二苯甲酰甲烷缩苯丙氨酸镍配合物, 作为仿过氧化氢酶, 成功地用于催化过氧化氢分解反应, 显示出二苯甲酰甲烷缩苯丙氨酸镍配合物具有良好的催化活性。

(3) 实验获得二苯甲酰甲烷缩苯丙氨酸镍配合物的催化分解过氧化氢的最佳反应条件为: 控制配合物催化剂浓度为  $1.0 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ , 反应温度为  $55^\circ\text{C}$ , 过氧化氢浓度为  $0.05 \text{ mol/L}$ , 溶液的  $\text{pH}$  值为 8

(4) 对二苯甲酰甲烷缩苯丙氨酸镍配合物催化过氧化氢分解反应进行的动力学研究表明, 配合物仿酶催化剂催化分解过氧化氢反应符合一级反应特征。

(5) 对二苯甲酰甲烷缩苯丙氨酸镍配合物催化过氧化氢分解反应的机理, 初步认为是席夫碱金属配合物 ( $\text{NiR}$ ) 与  $\text{H}_2\text{O}_2$  ( $\text{S}$ ) 作用很快变成活性物质  $\text{NiR}^-$ , 由  $\text{NiR}^-$  经过  $\text{NiR}^-$  (活性物质)  $\rightarrow \text{NiR} + \text{P}$  (产物) 反应,  $\text{H}_2\text{O}_2$  首先电离或发生质子转移, 产生  $\text{NiR}^-$ , 然后  $\text{NiR}^- \rightarrow \text{NiR} + \text{P}$ , 使过氧化氢分解。

参考文献:

- [1] 冯小珍, 夏金虹, 刘峥. 氨基酸席夫碱配合物的制备及性能研究进展 [J]. 化学研究与应用, 2007, 19(3): 238-243.
- [2] 方海林, 袁淑军. 水杨醛缩牛磺酸铜配合物催化过氧化氢分解 [J]. 应用化工, 2005(11): 11-13.
- [3] 李慎新, 李建章, 谢家庆, 等. Schiff碱铜配合物模拟过氧化物酶的研究 [J]. 化学学报, 2004, 62(6): 567-572.
- [4] 王莹, 谢家庆, 李敏娇, 等. 一种双核铁配合物金属胶束作为模拟过氧化氢酶催化苯酚氧化的动力学研究 [J]. 化学研究与应用, 2006, 18(10): 1196-1199.
- [5] 汪丰云. 化学反应速度测定的绿色化改进 [J]. 安庆师范学院学报: 自然科学版, 2004, 10(3): 10-11.
- [6] 朱业晋, 李勋, 王科军, 等. 过氧化氢催化分解反应的实验数据处理 [J]. 赣南师范学院学报, 2004(6): 91-92.
- [7] 赵晓伟, 张然, 崔元臣, 等. 壳聚糖-Cu(II) 对  $\text{H}_2\text{O}_2$  的分解催化性能研究 [J]. 河南大学学报: 自然科学版, 2005, 35(3): 31-34.
- [8] 天津大学物理化学教研室. 物理化学: 下册 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1979.
- [9] 李慎新, 李建章, 谢家庆, 等. Schiff碱铜配合物模拟过氧化物酶的研究 [J]. 化学学报, 2004, 62(6): 567-572.

(责任编辑: 邓大玉)

(上接第 298 页 Continue from page 298)

- [3] 薛素铎, 王雪生. 空间网格结构多维多点随机地震响应分析的高效算法 [J]. 世界地震工程, 2004, 20(3): 43-49.
- [4] 李永梅, 张毅刚. 凯威特型索承网壳结构的自振特性及参数分析 [J]. 世界地震工程, 2007, 23(1): 91-97.
- [5] 陈应波, 陈军明. 网壳结构与下部结构协同工作的研究 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2004, 32(3): 49-53.
- [6] 陈祥勇. 约束屈曲支撑在单层网壳结构中的减震效果分

析 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2006

- [7] 于晓野, 支旭东. 单层球面网壳结构的频谱特性分析 [J]. 低温建筑技术, 2005, 6: 65-66.
- [8] 曹正罡, 范峰, 沈世钊. k 型单层网壳的弹塑性稳定 [J]. 空间结构, 2005, 11(3): 22-26.

(责任编辑: 邓大玉)