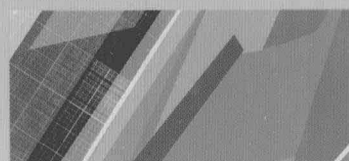


钢—混凝土组合结构 防火设计原理



FIRE SAFETY DESIGN
THEORY OF STEEL-CONCRETE
COMPOSITE STRUCTURES

韩林海 宋天诣 著



科学出版社

钢-混凝土组合结构抗火设计原理

Fire Safety Design Theory of Steel-Concrete Composite Structures

韩林海 宋天诣 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书论述了第一作者领导的课题组在钢-混凝土组合结构抗火设计原理方面进行的研究工作和取得的成果,具体内容包括:组合构件,如型钢混凝土、中空夹层钢管混凝土、不锈钢管混凝土和FRP(Fiber Reinforced Polymer)约束钢管混凝土等的耐火性能;火灾后钢管混凝土构件的力学性能和修复加固方法;钢-混凝土组合框架梁-柱连接节点的耐火性能;火灾后钢-混凝土组合框架梁-柱连接节点的力学性能;钢-混凝土组合平面框架结构的耐火性能。

本书内容新颖,系统实用,可供从事土木工程及相关领域研究的科技人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢-混凝土组合结构抗火设计原理/韩林海,宋天诣著. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-034348-2

I. ①钢… II. ①韩… ②宋… III. ①钢筋混凝土结构—防火—结构设计 IV. ①TU375.04

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第098129号

责任编辑:童安齐 / 责任校对:耿 耘
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2012年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012年6月第一次印刷 印张:26 1/2

字数:606 000

定价:130.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026 (VP04)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

众所周知，火灾会严重威胁人们的生命财产安全，同时也会产生不良的社会影响，并对环境造成污染。在可能发生的火灾中，建筑火灾的发生最为频繁。火灾之所以对建筑结构产生危害，实际上是由建筑结构的属性决定的。火灾发生具有随机性，面对火灾，人类需掌握其灾变机理，深入研究建筑结构的抗火设计原理，进行科学的抗火设计，从而使建筑结构具备要求的“抗火”性能。

组合结构 (Composite Structures) 是目前在建筑结构中应用较广泛且发展较快的一种结构形式，是由两种或两种以上结构材料组合而成的结构。作者有幸在我国土木工程建设事业快速发展时期进行了一些组合结构方面的研究工作。关于钢管混凝土构件方面的研究成果在《钢管混凝土结构》(科学出版社，2000年初版；2004年第一版；2007年第二版)中进行了论述；有关一些新型组合结构构件、组合结构节点和平面框架、混合剪力墙结构、混合结构体系等方面的研究成果则在《现代组合结构和混合结构》(2009年，科学出版社)中进行了阐述。本书主要论述作者在钢-混凝土组合结构抗火设计原理方面取得的研究结果。

建筑结构抗火设计的总体目标可概括为最大限度地减少人员伤亡、降低财产的直接和间接损失、减轻对环境的污染和影响。以往，人们已在建筑结构抗火设计原理方面取得了不少成果，积累了不少工程实践经验，但对钢-混凝土组合结构抗火设计原理方面仍有不少问题需要继续深入研究，有关设计规程也需要制订、补充或完善。

钢-混凝土组合结构抗火设计原理的研究包括其耐火性能、抗火设计方法和防火保护措施等方面，其中耐火性能研究是确定抗火设计方法的前提，而如何根据工程结构的特点，“因地制宜”地采用适当的防火保护措施是最大限度地实现建筑投入经济性与结构性能有效性统一的保证，是保证实现结构抗火设计目标的基础。

掌握基本构件的耐火性能是进行组合结构体系抗火性能研究的基础。本书第2章论述了型钢混凝土构件的耐火性能和抗火设计方法；第3章论述了中空夹层钢管混凝土、不锈钢管混凝土、FRP约束钢管混凝土和钢筋混凝土构件的耐火性能；第4章中论述了火灾后钢管混凝土构件修复加固方面的研究成果。

实际建筑结构多为超静定结构，因此火灾作用下单个构件的破坏并不等同于整个建筑结构的破坏。例如，在局部火灾下，即使某一构件达到耐火极限，往往也不会因为单根构件的失效而导致整体结构破坏；但节点的破坏却使得整体建筑可能从结构转变为机构，从而失去整体稳定性而倒塌。在对火灾下结构体系的力学分析中，合理地模拟节点的工作机理往往是难点，也是关键点。本书第5章论述了型钢混凝土柱-型钢混凝土梁、钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁连接节点的耐火性能；第6章论述了考虑升、降温影响时钢管混凝土柱-组合梁、型钢混凝土柱-型钢混凝土梁连接节点火灾后的力学性能；第7章则介绍了火灾后钢管混凝土柱-钢梁连接节点的滞回性能。

研究火灾下单层、单跨框架的力学性能是进行多层、多跨框架以及空间框架结构体系耐火性能和性能化抗火设计的基础。本书第8章论述了钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁平面框架结构耐火性能的研究结果。

本书第9章对钢-混凝土组合结构抗火设计原理研究的一些关键问题进行了探讨和展望。

本书的研究工作先后得到国家杰出青年科学基金项目（项目编号：50425823）、国家自然科学基金重点项目（项目编号：50738005）、国家重大基础研究计划（“973”计划）项目（项目编号：2012CB719703）、国家科技支撑计划子课题（项目编号：2006BAJ06B06，2006BAJ03A03-11，2008BAJ08B014-07和2012BAJ07B014）、高等学校博士学科点专项科研基金课题（项目编号：20090002110043）、公安部应用创新计划项目（项目编号：2007YYCXTXS155）、清华大学“百名人才引进计划”资助课题、清华大学自主科研计划课题（攻坚专项，课题号：2011THZ03）等的资助，特此致谢！

本书第一作者的博士后和研究生们对本书所论述内容做出了重要贡献，如王卫华、谭清华和郑永乾进行了型钢混凝土构件耐火性能的研究（第2章）；卢辉、廖飞宇、陶忠、杨有福、陈峰等进行了组合柱耐火性能的研究（第3章）；陶忠、林晓康和陈峰进行了钢管混凝土火灾后性能的研究（第4章）；郑永乾、王卫华和谭清华进行了组合框架梁-柱节点耐火性能的研究（第5章）；霍静思和江莹等进行了火灾后框架梁-柱节点力学性能的研究（第6章和第7章），王卫华和王广勇进行了组合框架结构耐火性能的研究（第8章和第9章）等。作者在此谨向他（她）们致以诚挚的谢意！

作者感谢公安部天津消防科学研究所、国家固定灭火系统和耐火构件质量监督检验中心，亚热带建筑科学国家重点实验室，澳大利亚 Monash 大学土木工程系结构实验中心等单位为进行与本书内容有关的火灾试验所给予的支持和帮助！

组合结构学科所包含的内容广泛，其抗火设计原理研究的内容非常丰

富。本书仅结合作者所熟悉的领域和取得的阶段性研究结果进行论述，内容远非全面和系统。开展本书有关研究工作的目的：一则期望能解决一些具体的组合结构抗火设计原理研究方面的问题；二则期望能为有关领域研究工作的进一步深入开展提供参考。随着课题组研究工作的不断深入，作者期望能对本书内容进行充实和完善。

由于作者学识水平所限，书中难免存在不妥之处，作者怀着感激的心情期待读者给予批评指正！

2012年5月1日于清华园

主要符号表

a_b	梁防火保护层厚度
a_c	柱防火保护层厚度
A_c	混凝土横截面面积
A_s	钢管横截面面积；型钢横截面面积
A_{sb}	钢筋总截面面积
A_{sc}	钢管混凝土横截面面积
A_{SV}	箍筋单肢的面积
b_e	方形钢管截面有效计算宽度
b_f	钢梁的翼缘宽度
B	矩形截面短边边长；方形截面边长
B_i	中空夹层钢管混凝土或劲性钢管混凝土中内方钢管的外直径
B_r	修复后外套矩形钢管横截面短边边长
c	混凝土保护层厚度；材料的比热
c_c	混凝土的比热
c_s	钢材的比热
C	组合结构构件横截面周长
d	钢筋直径；距外表面深度
D	矩形截面长边边长；圆形截面外直径
D_i	中空夹层钢管混凝土或劲性钢管混凝土中内圆钢管的外直径
e	荷载偏心距
e_0	荷载初始偏心距
E_c	常温下混凝土弹性模量
E_{cT}	高温下混凝土弹性模量
E_s	常温下钢材（钢管或型钢）弹性模量
E_{sb}	钢筋的弹性模量
E_{sc}	降温过程中钢材的弹性模量
E_{sp}	高温后钢材的弹性模量
f_c	常温下混凝土棱柱体抗压强度
f'_c	常温下混凝土圆柱体强度
$f'_c(T)$	温度 T 时混凝土圆柱体强度
f_{ck}	常温下混凝土抗压强度标准值
f_{cu}	常温下混凝土立方体强度
f_t	常温下混凝土抗拉强度

f_y	常温下钢材（型钢或钢管）的屈服强度
f_{yb}	常温下钢筋的屈服强度
f_{yc}	降温过程中钢材的屈服强度
f_{yp}	高温后钢材的屈服强度
h	钢梁的高度或梁拉压区边缘间距离
H	节点（或框架）柱的高度
I_c	混凝土的截面惯性矩
I_s	型钢（钢管）的截面惯性矩
I_{sb}	钢筋的截面惯性矩
I_{sc}	钢管混凝土截面抗弯惯性矩
k	梁柱线刚度比
k_b	梁的线刚度
k_c	组合柱的线刚度；混凝土的导热系数
k_i	火灾下节点初始刚度变化系数
k_j	节点初始抗弯刚度
k_m	梁柱强度比
k_M	火灾下节点弯矩变化系数
k_s	钢材的导热系数
k_t	火灾下构件的承载力影响系数
k_u	火灾下梁跨中挠度变化系数
k_θ	火灾下转角变化系数
$k_{\theta b}$	火灾下节点梁转角变化系数
$k_{\theta c}$	火灾下节点柱转角变化系数
$k_{\theta r}$	火灾下节点相对转角变化系数
$k_{\tau T}$	高温下黏结强度的变化系数
K	组合构件的抗弯刚度
K_0	第一级加载位移时的环线刚度
K_i	组合节点的初始刚度
K_j	同级变形下的环线刚度
K_r	组合节点的相对初始刚度
K_{sT}	高温下极限滑移量变化系数
K_t	混凝土抗拉强度降低系数
L	构件计算长度
L_b	框架中梁的跨度
m	梁荷载比
M	弯矩
M_b	节点梁极限弯矩
M_c	节点柱极限弯矩

M_F	梁端弯矩
M_j	节点弯矩
M_p	梁的全塑性弯矩
M_u	常温下梁的抗弯极限承载力
M_{ub}	钢梁的抗弯承载力
M_{uc}	组合构件极限弯矩计算值或钢管混凝土柱的抗弯承载力
M_{ue}	组合构件的极限弯矩实测值
M_{uj}	节点的极限抗弯承载力
$M_u(t)$	火灾作用下梁的抗弯承载力
n	柱荷载比
N	荷载（或轴力）
N_c	混凝土承受的荷载
N_F	柱轴向荷载
N_u	常温下柱的极限承载力
$N_{u,cr}$	轴心受压柱的稳定承载力
N_{uc}	组合柱轴压极限承载力计算值
N_{ue}	组合柱轴压极限承载力实验值
$N_u(t)$	火灾下柱的极限承载力
P	水平荷载
P_F	梁上集中荷载
P_{max}	水平荷载极限值
P_u	常温下梁受集中荷载时的极限承载力
P_{uc}	压弯构件（或节点、框架）计算极限水平承载力
P_{ue}	压弯构件（或节点、框架）实测极限水平承载力
P_y	屈服荷载
q_F	梁上均布荷载
q_u	常温下梁受均布荷载时的极限承载力
S	相对滑移量
S_T	高温下（后）相对滑移量
S_u	常温下极限滑移量
S_{uT}	高温下（后）极限滑移量
t	受火时间
t_f	钢梁的翼缘厚度
t_i	中空夹层钢管或劲性钢管混凝土中内钢管的壁厚
t_r	修复后外套钢管壁厚
t_R	耐火极限
t_s	钢管壁厚
t_w	钢梁的腹板厚度

T	温度
T_{cr}	临界温度
T_0	环境温度
T_f	火焰温度
T_{max}	最高温度
u	梁的挠度
u_m	构件跨中挠度
V	剪力
V_j	节点区所受剪力
V_y	屈服剪力
W_{nx}	钢梁净截面抗弯抵抗模量
W_{scm}	构件截面抗弯模量
α_c	柱截面含钢率
α_b	梁截面含钢率
Δ_c	柱轴向变形
Δ_h	水平变形
Δ_y	屈服位移
δ_b	梁端挠度或梁竖向变形
ϵ	综合辐射系数；应变
ϵ_c	混凝土的应变
ϵ_{ccr}	混凝土的高温徐变
ϵ_{cth}	混凝土的自由膨胀应变
ϵ_{cr}	混凝土的应力应变
ϵ_o	截面形心处应变
ϵ_s	钢材的应变
ϵ_{scr}	钢材的高温瞬时蠕变
ϵ_{sth}	钢材的自由膨胀应变
$\epsilon_{s\sigma}$	钢材的应力应变
ϵ_{terT}	高温下混凝土峰值拉应力对应的应变
ϵ_{tr}	混凝土的瞬态热应变
ϵ_{tT}	高温下混凝土拉应变
ϵ_{tuT}	高温下混凝土受拉最大应变
ϵ_y	钢材的屈服应变
ϕ	曲率
φ	轴心受压柱的稳定系数
γ	剪切角；钢梁截面塑性发展系数
λ	构件长细比
λ_i	同级荷载强度退化系数

λ_j	总体荷载退化系数
μ	构件位移延性系数；框架柱计算长度系数
μ_θ	构件层间变形角延性系数
ν_c	混凝土弹性阶段的泊松比
ν_s	钢材弹性阶段的泊松比
θ	夹角
θ_b	梁端转角
θ_c	柱端转角
θ_d	层间位移角
θ_p	塑性转角
θ_r	梁柱相对转角
σ	应力
σ_c	混凝土应力
σ_s	钢材应力
σ_{to}	混凝土峰值拉应力
σ_{tT}	高温下混凝土拉应力
τ	黏结应力
τ_T	高温下（后）黏结应力
τ_u	常温下极限黏结强度
τ_{uT}	高温下（后）极限黏结强度
ξ	钢管混凝土的约束效应系数 $\left(\xi = \frac{A_s \cdot f_y}{A_c \cdot f_{ck}} \right)$

目 录

前言

主要符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 组合结构抗火设计原理研究现状	3
1.2.1 组合结构构件	3
1.2.2 梁-柱连接节点	9
1.2.3 框架结构	12
1.3 本书的目的和内容	12
参考文献	16
第 2 章 型钢混凝土构件的耐火性能	19
2.1 引言	19
2.2 数值计算模型	19
2.2.1 纤维模型法	19
2.2.2 有限元法	26
2.3 型钢混凝土柱耐火性能试验研究	36
2.3.1 试验概况	36
2.3.2 试验结果及分析	37
2.4 耐火性能分析	42
2.4.1 破坏形态	43
2.4.2 应力、应变分布规律	45
2.4.3 滑移影响分析	49
2.5 承载力影响因素分析和实用计算方法	50
2.5.1 火灾下承载力影响因素分析	50
2.5.2 火灾下承载力实用计算方法	51
2.5.3 耐火极限实用计算方法	54
2.6 型钢混凝土构件火灾后力学性能评估	56
2.6.1 评估方法	56
2.6.2 工程案例	58
2.7 本章小结	62
参考文献	62
第 3 章 新型组合柱的耐火性能	66
3.1 引言	66

3.2 中空夹层钢管混凝土柱·····	66
3.2.1 短柱耐火性能试验·····	66
3.2.2 长柱耐火性能试验·····	73
3.2.3 有限元计算模型·····	79
3.2.4 小结·····	81
3.3 不锈钢管混凝土柱·····	81
3.3.1 试验概况·····	81
3.3.2 试验结果及分析·····	83
3.3.3 小结·····	89
3.4 FRP约束钢管混凝土和钢筋混凝土柱·····	89
3.4.1 试验概况·····	90
3.4.2 试验结果及分析·····	91
3.4.3 小结·····	96
3.5 钢管混凝土柱的抗火设计方法·····	97
3.5.1 防火保护措施·····	97
3.5.2 抗火设计方法·····	98
3.5.3 计算例题·····	106
3.6 本章小结·····	107
参考文献·····	108
第4章 火灾后钢管混凝土柱的修复加固方法 ·····	110
4.1 引言·····	110
4.2 加固后钢管混凝土柱的静力性能·····	111
4.2.1 “增大截面法”·····	111
4.2.2 “FRP包裹法”·····	120
4.3 加固后钢管混凝土柱的滞回性能·····	122
4.3.1 “增大截面法”·····	122
4.3.2 “FRP包裹法”·····	139
4.4 火灾后钢管混凝土柱修复加固措施·····	141
4.5 本章小结·····	143
参考文献·····	143
第5章 组合框架梁-柱连接节点的耐火性能 ·····	144
5.1 引言·····	144
5.2 节点有限元分析模型和试验验证·····	144
5.2.1 节点计算模型·····	144
5.2.2 有限元分析模型·····	145
5.2.3 节点耐火性能试验·····	146
5.3 火灾下节点工作机理分析·····	164
5.3.1 型钢混凝土柱-型钢混凝土梁节点·····	164

5.3.2 钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点	179
5.4 节点耐火极限影响因素分析	187
5.5 本章小结	191
参考文献	191
第 6 章 火灾后组合框架梁-柱连接节点的力学性能	193
6.1 引言	193
6.2 有限元分析模型	193
6.2.1 材料热力学模型	193
6.2.2 力学分析模型	194
6.3 火灾后节点试验研究	195
6.3.1 试验概况	195
6.3.2 试验结果及分析	202
6.4 荷载-变形-升温时间关系分析	232
6.4.1 分析模型	233
6.4.2 温度-受火时间关系	235
6.4.3 力学性能分析	237
6.5 弯矩-转角关系影响因素分析和实用计算方法	279
6.5.1 影响因素分析	279
6.5.2 剩余刚度系数实用计算方法	288
6.5.3 剩余承载力系数实用计算方法	293
6.6 本章小结	296
参考文献	296
第 7 章 火灾后钢管混凝土柱-钢梁连接节点的滞回性能	298
7.1 引言	298
7.2 试验研究	298
7.2.1 试验概况	298
7.2.2 试验结果及分析	302
7.2.3 节点抗震性能分析	314
7.3 数值计算模型	325
7.3.1 模型建立	325
7.3.2 模型验证	328
7.3.3 水平荷载-水平变形滞回关系计算	333
7.4 相对水平荷载-层间位移角关系分析	341
7.4.1 相对水平荷载-层间位移角关系确定	341
7.4.2 影响因素分析	344
7.5 实用计算方法	348
7.5.1 节点框架柱计算长度系数	348
7.5.2 节点承载力实用计算方法	350

7.5.3	水平荷载-水平变形滞回关系模型	351
7.5.4	火灾后组合节点修复方法讨论	353
7.6	本章小结	354
	参考文献	355
第8章	平面组合框架的耐火性能	356
8.1	引言	356
8.2	有限元分析模型	357
8.2.1	温度场计算	357
8.2.2	力学性能分析	357
8.3	耐火性能试验研究	360
8.3.1	试验概况	360
8.3.2	试验结果及分析	363
8.4	火灾下框架工作机理研究	384
8.4.1	梁柱变形特征	384
8.4.2	构件内力	385
8.4.3	应力分析	388
8.4.4	应变分析	392
8.5	框架耐火极限影响因素分析	394
8.6	本章小结	398
	参考文献	398
第9章	组合结构抗火设计原理研究展望	399
9.1	若干关键问题探讨	399
9.2	结语	407
	参考文献	407

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

火灾是指可燃物发生燃烧并失去控制，在其蔓延发展过程中会给人们生命和财产造成危害和损失，并对环境造成污染的一种灾害性现象。火灾是一种具有自然和人为双重特征的社会灾害（李引擎，2004）。

现代建筑物的高层化、大规模化及用途复合化使得火灾发生的因素随之增加，火灾规模和危害也有日趋扩大的趋势。由于火灾而使大型建筑结构破坏甚至倒塌的例子不少，如 2001 年“9.11”事件中美国纽约世贸中心（WTC）两座 100 多层、400 多米高的大楼因飞机撞击引发猛烈火灾而倒塌（NIST，2005），造成了重大人员伤亡、财产损失和不良的社会影响。2003 年湖南衡阳市衡州大厦发生火灾，灭火过程中结构突然坍塌，导致 20 名消防官兵殉职。2006 年比利时布鲁塞尔国际机场的一个飞机修理库发生火灾时结构倒塌，造成多人受伤和多架飞机被损坏。

火灾即使不引起建筑的整体倒塌，也可能造成结构的严重破坏。图 1.1 所示为火灾后某高层建筑内部结构破坏的情形。受火后，该建筑的钢-混凝土组合楼盖受损严重，

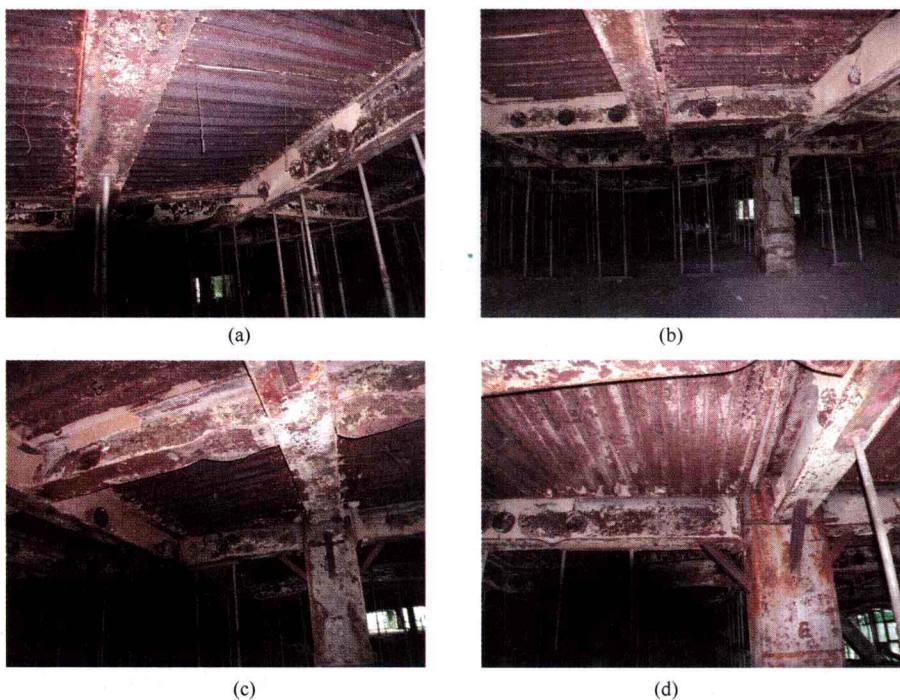


图 1.1 火灾后某高层建筑内部结构破坏的情景

变形显著,如图 1.1 (a) 和 (b) 所示;主梁-次梁连接节点及钢梁-钢柱连接节点区域也发生了明显变形,如图 1.1 (c) 和 (d) 所示。

图 1.2 所示为某采用钢管混凝土柱、轻型钢结构屋盖的工业厂房发生火灾后结构发生破坏的情形。火灾后,屋盖结构挠度很大,破坏严重 [如图 1.2 (a) 所示],钢管混凝土柱-钢梁连接区域也发生了明显变形 [如图 1.2 (b) 所示]。

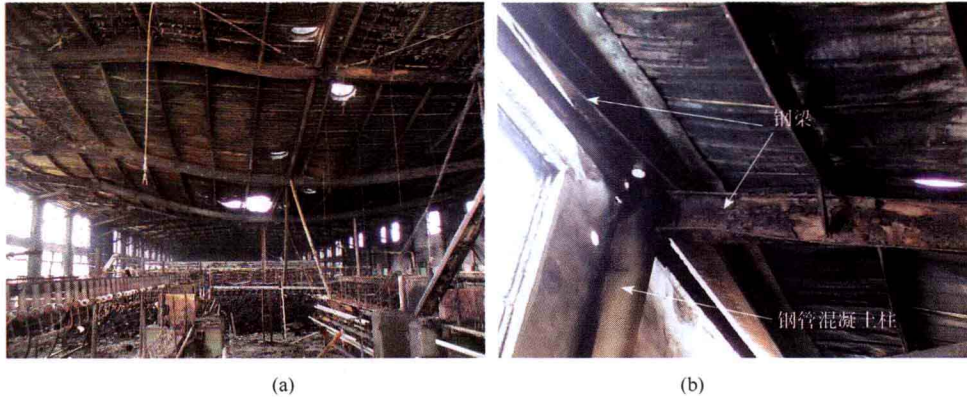


图 1.2 某工业厂房火灾后结构破坏的情景

众所周知,组合结构 (Composite Structures) 是由两种或两种以上结构材料组合而成的结构。组合结构构件工作的实质在于其组成材料之间的“组合作用”,即:①在施工阶段:通过材料之间的合理组合,实现方便施工、简化施工程序,提高工业化建造程度的目的;②在使用阶段:通过“组合作用”,充分发挥材料各自的优点,达到取长补短、协同互补、共同工作的效果 (韩林海,等,2009)。

钢-混凝土组合结构的特点使其能较好地适应现代工程结构的施工和使用要求,因而正在多、高层和超高层建筑中得到广泛应用。如天津今晚报大厦外框柱采用了钢管混凝土柱、深圳赛格广场大厦其框架柱及抗侧力体系内筒的密排柱均采用了圆钢管混凝土、杭州瑞丰国际商务大厦采用了方钢管混凝土柱、深圳京基中心采用了矩形钢管混凝土柱等。上海金茂大厦、上海环球金融中心、北京国贸三期、央视新址 TVCC 主楼等都采用或部分采用了型钢混凝土结构。还有一些高层建筑工程采用了钢管混凝土叠合柱,如沈阳方圆大厦、沈阳皇朝万鑫大厦和深圳华润中心二期等。此外,钢-混凝土组合楼盖结构也在高层建筑中广泛应用。

建筑结构抗火设计的目标总体上可概括为:最大限度地减少人员 (包括消防队员) 伤亡、降低财产的直接和间接损失、减轻对环境的污染和影响。科学地进行钢-混凝土组合结构火安全设计的重要前提是掌握其抗火设计原理,具体包括组合结构的耐火性能研究、抗火设计方法、防火保护措施及其火灾后的评估和修复方法。

(1) 耐火性能研究

耐火性能研究指对组合结构在火灾下的工作机理研究。火灾下组合结构构件组成材料之间的相互作用是研究的关键。这种组合作用或相互作用虽使组合结构具有良好的耐火性能,但同时也导致其工作机理研究的复杂性。深入研究组合结构构件的耐火