



山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列

高强度Q460钢结构 抗火设计原理

Fire Safety Design Theory of High
Strength Q460 Steel Structures

王卫永 李国强 著



科学出版社

山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列

高强度 Q460 钢结构抗火设计原理

Fire Safety Design Theory of High Strength Q460 Steel
Structures

王卫永 李国强 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书论述作者的课题组在高强度 Q460 钢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:高强度 Q460 钢材高温下和高温后力学性能,高强度 Q460 钢高温下蠕变性能,高强度 Q460 钢焊接截面高温下残余应力分布,高强度 Q460 钢轴心受力柱抗火性能,高强度 Q460 钢梁抗火性能,高强度 Q460 约束钢柱抗火性能,高强度 Q460 钢柱高温局部稳定性能及高强度 Q460 钢柱受火后受力性能。本书内容新颖,系统实用,语言规范简练;是我国目前唯一的一部涉及高强度钢结构抗火设计的学术著作。

本书可供从事土木工程及相关领域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

高强度 Q460 钢结构抗火设计原理/王卫永,李国强著. —北京:科学出版社, 2015

(山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列)

ISBN 978-7-03-047261-8

I. ①高… II. ①王…②李… III. ①高强度钢-钢结构-防火-结构设计 IV. ①TU391.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 024057 号

责任编辑:童安齐 / 责任校对:刘玉靖

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>

北京中科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 12 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2015 年 12 月第一次印刷 印张: 19 1/4

字数: 380 000

定价: 90.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<中科>)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62130750

版权所有,侵权必究

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

山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列

编委会名单

主 任：周绪红

副主任：张四平 毛志兵 文安邦 王清勤 刘汉龙

委 员：（按姓氏笔画排序）

卢 峰 申立银 任 宏 刘贵文 杜春兰

李正良 李百战 李英民 李和平 吴艳宏

何 强 陈宁生 单彩杰 胡学斌 高文生

黄世敏 蒋立红

总 序

中国是一个多山国家,山地面积约为 666 万 km^2 ,占陆地国土面积的 69%,山地县级行政机构数量约占全国的 2/3,蓄积的人口与耕地分别占全国的 1/3 和 2/5。山地区域是自然、文化资源的巨大宝库,蕴含着丰富的水力、矿产、森林、生物、旅游等自然资源,也因多民族数千年的聚居繁衍而积淀了灿烂多姿的历史遗迹与文化遗产。

然而,受制于山地地形复杂、灾害频发、生态脆弱的地理环境特点,山地城镇建设挑战多、难度大、成本高,导致山地区域城镇化水平低,经济社会发展滞后,存在资源低效开发、人口流失严重、生态环境恶化、文化遗产衰落等众多经济社会问题。截至 2014 年,我国云南、贵州、西藏、甘肃、新疆等省、自治区的山地城镇化率不足 40%,距离《国家新型城镇化规划(2014~2020)》提出的常住人口城镇化率达到 60%的发展目标仍有很大差距。因此,采用“开发与保护”并重的方式推进山地城镇建设,促进山地城镇可持续发展,对于推动我国经济结构顺利转型、促进经济社会和谐发展、支撑国家“一带一路”发展战略具有不可替代的重要意义。

为解决山地区域城镇化建设的重大需求,2012 年 3 月重庆大学联合中国建筑股份有限公司、中国建筑科学研究院、中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所等单位共同成立了“山地城镇建设协同创新中心”,针对山地城镇建设面临的安全与防灾关键问题开展人才培养、科技研发、学科建设等创新工作。经过三年的建设,中心围绕“规划—设计—建造—管理”的建筑产业链,大力整合政府、企业、高校、科研院所的优势资源,在山地城镇建设安全与防灾领域汇聚了一流科研团队,建设了高水平综合性示范基地,取得了有重大影响的科研理论与技术成果。迄今为止,中心已在山地城镇生态规划、山地城镇防灾减灾、山地城镇环境安全、山地城镇绿色建造、山地城镇建设管理等五大方向取得了一系列重大科研成果,培养和造就了一批高素质建设人才,有力地支撑了山地城镇的重大工程建设,并着力营造出城镇建设主动依靠科技创新、科技创新更加贴近城镇发展需求的良好氛围。

山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列丛书集中展示了山地城镇建设协同创新中心在山地城镇生态规划与文化遗产保护、山地灾害形成理论与减灾关键技术、山地环境安全理论与可再生能源利用、山地城镇建设管理与可持续发展等领域

的最新科研成果，是山地城镇建设领域科技工作者智慧与汗水的结晶。本套丛书的出版，力图服务于山地城镇建设领域科学交流与技术转化，促进该领域高层次的学术传播、科技交流、技术推广与人才培养，努力营造出政产学研高效整合的协同创新氛围，为山地城镇的全面、协调与可持续发展做出新的重大贡献。

中国工程院院士，重庆大学校长

周绪红

2015年12月18日

前 言

火灾会严重威胁人们的生命财产安全。在所有发生的火灾中,建筑火灾是最常见的一种,建筑火灾除了危害人们的生命安全和造成巨额经济损失外,还会对建筑结构的安全产生很大的威胁。火灾的发生具有偶然性和严重性的特点,面对建筑火灾,人们需要掌握其发生的规律和特点,深入研究建筑结构的抗火设计原理,进行科学的抗火设计,从而提高建筑物的抗火性能。

目前国内已经有多个知名建筑采用高强钢结构,高强度钢具有较高的强度和良好的加工性能,在建筑结构中使用可节约钢材用量、减轻结构自重、提高结构抗震性能,因而高强钢在建筑结构中具有广阔的应用前景。建筑结构抗火设计的总体目标为最大限度地减少人员伤亡和财产损失,减轻对环境的污染和影响。高强度钢与普通钢类似,不耐火,高强度钢构件在火灾下容易破坏。研究人员对普通钢结构的抗火性能已经进行了大量的研究,我国已经编制了专门的建筑钢结构防火技术规范,但对高强钢结构的抗火性能研究还比较少,本书主要论述作者在高强度 Q460 钢结构抗火设计原理方面开展的一些工作和取得的研究成果。

本书第一作者从 2002 年开始进行结构抗火研究,先后师从董毓利教授和李国强教授进行研究生学习,此后硕士和博士阶段做了大量的结构抗火试验和结构抗火性能分析,主要研究了钢结构的梁柱连接节点的抗火性能,钢柱上防火涂料在地震作用下的破损机理及防火涂料破损对结构抗火性能的影响,博士论文入选 2010 年度上海市研究生优秀成果。从 2008 年开始进行高强度 Q460 钢结构的抗火性能研究,已经完成了高强度 Q460 钢高温下和高温后的力学性能试验及高温下蠕变性能,高强度 Q460 钢焊接 H 形和箱形截面高温后残余应力测试和钢构件的一系列抗火性能试验。本书主要介绍第一作者及其研究团队在李国强教授和戴国欣教授的指导和帮助下近 7 年的研究成果。

本书内容包括 12 章。第 1 章介绍高强度钢结构抗火研究的背景及国内外的研究进展。第 2 章论述高强度 Q460 钢高温下力学性能。第 3 章论述高强度 Q460 钢高温后力学性能。第 4 章论述高强度 Q460 钢高温下蠕变性能。第 5 章论述高强度 Q460 钢焊接 H 形和箱形截面高温下残余应力分布。第 6、7 章分别论述高强度 Q460 钢轴心受力柱、钢梁抗火性能分析结果以及强度和整体稳定抗火设计方法。第 8 章介绍高强度 Q460 约束钢柱的抗火性能试验和有限元分析。第 9 章介绍高温下高强度 Q460 钢柱的局部稳定性能试验和有限元分析,以及局部稳定设计方法。第 10 章介绍高温后高强度 Q460 钢柱的受力性能试验和有限元分析,以及高温后剩余承载力设计方法。第 11 章探讨高温蠕变对富强度 Q460 钢构件抗火性能的影响。第

12 章对高强度 Q460 钢结构抗火设计原理中的其他一些关键问题进行探讨和展望。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金(项目编号: 51008320)、教育部高等学校博士学科点科研基金(项目编号: 20090191120032)、重庆市自然科学基金(项目编号: CSTC, 2010BB4224)、中国博士后基金面上项目(项目编号: 20110490811)、中国博士后基金科研特别资助(项目编号: 2012T50765)、重庆市人力资源和社会保障局博士后科研项目特别资助(项目编号: 渝 xm201103007)、中央高校基金基本科研业务费项目(CDJZR 12200004 和 106112013CDJZR200006)等项目的资助, 特此致谢!

本书大纲的制定和全书统稿由王卫永和李国强教授共同负责。作者的研究生对本书所论述内容做出了重要贡献: 刘兵进行了高强度 Q460 钢的力学性能试验及轴心受力钢柱承载力分析(第 2、6 章), 刘天姿进行了高强度 Q460 钢高温后力学性能试验和受火后钢柱承载力试验及分析(第 3、10 章), 闫守海进行了高强度 Q460 钢高温下蠕变性能试验研究和有限元分析(第 4、11 章), 秦世奇进行了高强度 Q460 钢焊接 H 形和箱形截面高温后残余应力分布测试试验(第 5 章), 周一超进行了高强度 Q460 钢梁的抗火性能分析(第 7 章), 葛勇进行了约束高强度 Q460 钢柱的抗火性能试验和有限元分析(第 8 章), 杨兴才进行了高强度 Q460 钢短柱的局部稳定性能试验和有限元分析(第 9 章), 何平召分析了考虑蠕变的约束高强度 Q460 钢梁的抗火性能(第 11 章)。重庆大学周绪红院士, 戴国欣教授和刘界鹏教授对研究工作给予了无私的帮助和支持, 在此谨向他们致以诚挚的谢意。

感谢同济大学土木工程防灾国家重点实验室、重庆睿安特科技集团有限公司、重庆大学结构工程实验室等单位在试验中提供的支持和帮助。感谢日本东京理科大学高等火灾安全科学与技术教育与研究中心(合作教授 Prof. Yoshifumi Ohmiya), 美国密歇根州立大学土木与环境工程系(合作教授 Venkatesh Kodur)资助作者赴对方高校开展高强度 Q460 钢结构抗火性能合作研究。感谢国家留学基金委员会资助作者赴美国得克萨斯大学奥斯汀分校 Ferguson 结构试验室(合作教授 Michael D. Engelhardt)进行高强钢抗火性能学术合作和交流。

高强度 Q460 钢结构抗火研究方面包含的内容广泛, 其抗火设计原理的内容非常丰富。本书仅结合作者所熟悉的领域和取得的阶段性研究成果进行论述, 内容远非全面和具体。开展本书有关研究工作的目的旨在期望能解决一些高强度 Q460 钢结构抗火设计原理方面的问题并能为有关领域研究工作的进一步深入开展提供参考。随着作者研究工作的不断深入, 作者亦期望能对本书内容进一步进行充实和完善。

由于作者的水平和知识范围有限, 书中不当之处在所难免, 敬请读者批评指正。

王卫永

2015 年 6 月

主要符号表

A	构件截面面积
a	横向荷载作用点至截面剪力中心的距离
$a_1 \sim a_8$	参数
a^{eq}	等效刚度后横向荷载作用点至截面剪力中心的距离
B	钢构件单位长度综合传热系数
B_1	与钢材有关的常数
b	板的宽度
b_f	翼缘外挑宽度
b_{f1}	等效刚度变换之后上翼缘宽度
b_{f2}	等效刚度变换之后下翼缘宽度
$C_1 \sim C_3$	与荷载类型有关的系数
$c_1 \sim c_7$	与材料有关的参数
c_s	钢材比热容
D	构件截面周长
d	间距
d_0	试件直径
E	钢材常温下弹性模量
E_2	材料蠕变参数
E_T'	钢材高温冷却后弹性模量
E_T	钢材高温下弹性模量
e_0	初始弯曲率
F	构件单位长度受火表面面积
F_0	最高温度保温时间
f	常温下钢材强度设计值
f_0	切条矢高
f_1	试件基频共振频率
f_{uT}'	钢材高温冷却后极限强度
f_{uT}	钢材高温极限强度

f_u ——钢材常温极限强度

f'_{yT} ——钢材高温冷却后屈服强度

f_{yT} ——钢材高温屈服强度

f_y ——钢材常温屈服强度

G ——钢材的剪切模量

G_T ——高温下钢材的剪切模量

h_0 ——腹板高度

I ——试件横截面惯性矩

I_0 ——焊接电流

I_1^{eq} ——受压翼缘对腹板轴线的惯性矩

I_1 和 I_2 ——受压翼缘和受拉翼缘对自身水平轴线的惯性矩

I_2^{eq} ——受拉翼缘对腹板轴线的惯性矩

I_t^{eq} ——等效刚度后构件截面的扭转惯性矩

I_t ——构件截面的扭转惯性矩

I_ω ——构件截面的扇性惯性矩

I_ω^{eq} ——等效刚度后构件截面的扇性惯性矩

I_y^{eq} ——等效刚度后构件截面绕弱轴 y 轴的惯性矩

I_y ——构件截面绕弱轴 y 轴的惯性矩

K ——对流传热系数和辐射传热系数之和

k ——屈曲系数

k_0 ——随偏心率而变的系数

k_{sm} ——构件表面积与质量的比值

l ——构件长度

l_0 ——切条前孔间距

M ——弯矩设计值

M_0 ——冷却阶段的等效时间

$M_{\text{cr}T}$ ——高温时受弯构件的临界弯矩

m ——试件质量

N ——荷载

$N_1 \sim N_3$ ——代表牛顿

N_{cr} ——常温时钢柱的稳定承载力

N'_{ET} ——高温冷却后钢柱的欧拉临界力

- N_{ET} ——高温下钢柱的欧拉临界力
- n ——与钢材有关的常数
- R ——摩尔气体常量
- R_{V3} 、 R_{V4} ——柱顶位移
- S ——对蠕变变形的阻力
- T ——温度
- T_{bf} ——修正后下翼缘温度
- T_g ——空气温度
- T_s ——钢柱温度
- T_{tf} ——修正后上翼缘温度
- T_{wf} ——修正后腹板温度
- t ——时间
- t_f ——翼缘厚度
- t_w ——腹板厚度
- t_0 ——板厚度
- U ——焊接电压
- V ——构件体积
- W ——构件毛截面模量
- W_0 ——构件单位长度的质量
- W^{eq} ——等效刚度后构件的毛截面模量
- W_n ——最不利截面净截面模量
- X ——升温阶段的等效时间
- x ——坐标
- y_{e0} ——截面瞬时弹性区形心坐标
- Z ——Zemer-Hollomon 常数
- Δl ——实测孔间距改变量
- Δt ——时间间隔
- ΔT ——温度差值
- ΔH ——蠕变激活能
- α ——钢构件传热系数
- α_k ——对流传热系数
- β ——反映截面不对称程度的参数
- β^{eq} ——等效刚度后反映截面不对称程度的参数

- γ —— 截面塑性发展系数
 γ_R —— 抗力系数
 δ —— 常温下钢材极限伸长率
 δ'_T —— 高温冷却或时间增量后的极限伸长率
 ε —— 应变
 $\varepsilon_{cr, 0}$ —— 基本蠕变参数
 $\dot{\varepsilon}_{cr}$ —— 蠕变应变率
 ε_{nom} —— 名义应变
 η —— 等效弹性模量折减系数
 η_{bf} —— 下翼缘温度修正系数
 η_{fyT} —— 高温下屈服强度降低系数
 η_{rT} —— 高温下残余应力降低系数
 η_{tf} —— 上翼缘温度修正系数
 η_w —— 焊接热效率
 η_0 —— 考虑初始弯曲的压力放大系数
 η_1 、 η_2 —— 材料蠕变参数
 η_T —— 高温下钢材的强度折减系数
 η_{wb} —— 腹板温度修正系数
 η'_T —— 高温冷却后钢材的强度折减系数
 θ —— 温度补偿时间
 λ —— 构件长细比
 λ_s —— 钢材导热系数
 λ_y^{eq} —— 钢梁对弱轴长细比
 ν —— 泊松比
 ρ_N —— 荷载比
 ρ_s —— 钢材密度
 σ —— 应力
 σ_{crT} —— 高温下轴压构件临界应力
 σ_{fuT} —— 翼缘屈曲极限应力
 σ_{nom} —— 名义应力
 σ_n —— 截面中各个单元形心处残余应力值
 σ_{wuT} —— 腹板屈曲极限应力
 σ'_{crT} —— 高温冷却后轴压构件临界应力

- φ —— 常温下轴心受压钢构件的稳定系数
- φ_b —— 常温下受弯构件的整体稳定系数
- φ_{bt}^{eq} —— 高温下考虑温度不均匀分布的受弯构件整体稳定系数
- φ_{bT} —— 高温下受弯构件的整体稳定系数
- φ_{ft} —— 考虑翼缘局部屈曲的强度折减系数
- φ_T —— 高温下钢构件稳定系数
- φ_{wt} —— 考虑腹板局部屈曲的强度折减系数
- φ'_T —— 高温冷却后钢柱的稳定系数
- χ —— 嵌固系数

目 录

总序

前言

主要符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.1.1 高强度钢的定义	1
1.1.2 高强度钢的应用	1
1.1.3 高强度钢结构抗火研究的必要性	3
1.2 高强度钢结构抗火研究现状	5
1.2.1 材料力学性能	5
1.2.2 高强度钢基本构件抗火性能	6
1.3 本书的目的和内容	7
1.3.1 本书的目的	7
1.3.2 本书的内容	7
参考文献	8
第 2 章 高强度 Q460 钢高温下力学性能	11
2.1 引言	11
2.2 高强度 Q460 钢高温下强度指标	11
2.2.1 屈服强度的定义	11
2.2.2 高温拉伸试验概况	13
2.2.3 试验结果及对比	14
2.2.4 拟合公式	17
2.3 高强度 Q460 钢高温下弹性模量	18
2.3.1 动态测量方法	18
2.3.2 弹性模量测量结果	24
2.4 本章小结	25
参考文献	26

第 3 章 高强度 Q460 钢高温冷却后力学性能	27
3.1 引言	27
3.2 高强度 Q460 钢高温冷却后力学性能试验概况	27
3.2.1 试件设计	27
3.2.2 升温装置	28
3.2.3 拉伸试验装置	28
3.2.4 升温 and 冷却方式	29
3.2.5 常温下材性试验结果	29
3.3 高强度 Q460 钢高温冷却后力学性能试验结果及分析	30
3.3.1 应力-应变关系曲线	30
3.3.2 屈服强度	31
3.3.3 极限强度	33
3.3.4 弹性模量	34
3.3.5 断后伸长率	35
3.3.6 试件外观特征	36
3.4 高强度 Q460 钢和其他钢高温冷却后力学性能对比	39
3.4.1 屈服强度的对比	39
3.4.2 极限强度的对比	39
3.4.3 弹性模量的对比	40
3.5 高强度 Q460 钢与其他高强钢高温冷却后力学性能对比	40
3.6 高强度 Q460 钢受火冷却后力学性能指标计算公式	41
3.6.1 屈服强度	42
3.6.2 极限强度	43
3.6.3 弹性模量	43
3.6.4 断后伸长率	43
3.7 本章小结	44
参考文献	44
第 4 章 高强度 Q460 钢高温蠕变性能	45
4.1 引言	45
4.2 高强度 Q460 钢高温蠕变试验	46
4.2.1 材料力学性能试验	46
4.2.2 蠕变试验概况	47
4.2.3 蠕变试验结果及分析	49
4.3 高强度 Q460 钢高温蠕变模型	53

4.3.1 现有蠕变模型	53
4.3.2 基于试验数据的 ANSYS 复合时间强化模型	58
4.3.3 基于本节试验数据的 Norton 模型	60
4.3.4 基于本节试验数据的 Fields-Fields 模型	63
4.3.5 蠕变模型的对比分析	66
4.4 本章小结	67
参考文献	68
第 5 章 高强度 Q460 钢焊接截面高温下残余应力分布	69
5.1 引言	69
5.2 高强度 Q460 钢焊接截面高温后残余应力试验	69
5.2.1 试验概况	69
5.2.2 试验方案及过程	70
5.2.3 试验结果	77
5.3 高强度 Q460 钢焊接截面高温后残余应力分布模型	82
5.3.1 已有的常温下残余应力分布模型	82
5.3.2 高强度 Q460 钢焊接 H 形截面常温残余应力分布模型	83
5.3.3 高强度 Q460 钢焊接箱形截面残余应力分布模型	88
5.3.4 高温后残余应力降低系数	92
5.4 焊接残余应力及高温后残余应力有限元分析	93
5.4.1 焊接及受热分析理论	93
5.4.2 焊接热流和温度计算	94
5.4.3 焊接及受热分析参数	94
5.4.4 焊接残余应力模拟	95
5.4.5 焊接残余应力受热分析	101
5.4.6 高强度 Q460 钢焊接 H 形截面受热后残余应力分析结果	102
5.4.7 高强度 Q460 钢焊接箱形截面受热后残余应力分析结果	103
5.5 高温下焊接高强度 Q460 钢截面残余应力分布	105
5.5.1 焊接 H 形截面高温下残余应力	105
5.5.2 焊接高强度 Q460 钢箱形截面高温下残余应力	106
5.5.3 蠕变对高温残余应力有限元分析的影响	107
5.5.4 高温下残余应力降低系数	108
5.5.5 高温下和高温后残余应力降低系数对比	109
5.6 本章小结	110
参考文献	111

第 6 章 高强度 Q460 钢轴心受力柱抗火性能	113
6.1 引言	113
6.2 轴心受压高强度 Q460 钢柱极限承载力分析	113
6.2.1 轴心受压高强度 Q460 钢柱临界应力法	113
6.2.2 轴心受压高强度 Q460 钢柱稳定系数	115
6.2.3 高温下高强度 Q460 钢轴心受压构件临界温度	117
6.2.4 高强度 Q460 钢柱与普通钢柱抗火性能的比较	118
6.3 逆算单元长度法	119
6.3.1 逆算单元长度法的基本原理	120
6.3.2 逆算单元长度法的步骤与程序实现	121
6.3.3 逆算单元长度法的结果与分析	124
6.3.4 两种计算方法的结果比较	125
6.4 高强度 Q460 钢轴心受压柱抗火性能有限元分析	125
6.4.1 ANSYS 热分析模型	125
6.4.2 材料属性定义	126
6.4.3 温度场分析结果	126
6.4.4 结构屈曲分析	128
6.4.5 有限元分析迭代方法选择	130
6.4.6 屈曲分析结果	130
6.4.7 ANSYS 分析结果对比	131
6.5 高强度 Q460 钢轴心受压柱抗火性能参数分析	131
6.5.1 初始弯曲	131
6.5.2 残余应力	132
6.6 本章小结	135
参考文献	136
第 7 章 高强度 Q460 钢梁抗火性能	137
7.1 引言	137
7.2 钢梁在三面受火下的温度分布	137
7.2.1 有限差分法计算钢梁的温度分布	137
7.2.2 温度计算	139
7.3 强度分析	141
7.3.1 高温下普通结构钢受弯构件的强度	141
7.3.2 高温下高强度 Q460 钢梁的强度	141
7.4 整体稳定分析	142
7.4.1 高温下普通钢梁的整体稳定	142
7.4.2 高温下高强度 Q460 钢梁的整体稳定	144