



郭咏华 张斌 张建明 著

Q690 钢管塔试验 及工程应用



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

Q690 钢管塔试验 及工程应用

郭咏华 张斌 张建明 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

近年来,钢管塔在我国同塔双(多)回输电线路以及大跨越工程中得到较大规模的应用,使用的钢材最高强度等级为 Q460,与 Q690 尚有一定差距。为此,著者在多年来对 Q690 钢管塔设计、试验等应用研究的基础上,编写了本书。

本书共分 11 章,内容包括 Q690 钢管的材料力学性能及残余应力、Q690 轴心受压钢管的整体稳定性能、Q690 轴心受压钢管的局部稳定性能、Q690 钢管受压构件的稳定系数、Q690 钢管塔 K 形节点极限承载力研究分析、Q690 钢管塔柔性法兰极限承载力研究分析、Q690 高强钢焊接试验研究、Q690 钢管塔的设计参数和选用原则、Q690 钢管塔的真型塔设计和试验研究、Q690 钢管塔的工程应用。

本书可供从事输电线路工程铁塔研究、设计、加工、施工和运行工作的技术人员和管理人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

Q690 钢管塔试验及工程应用/郭咏华,张斌,张建明著.

北京:中国电力出版社,2013.2

ISBN 978-7-5123-3888-3

I. ①Q… II. ①郭… ②张… ③张… III. ①线路杆塔-研究
IV. ①TM753

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 309031 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 3 月第一版 2013 年 3 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 12.25 印张 237 千字

印数 0001—1000 册 定价 39.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



序

从钢结构工程的发展历史来看，钢结构的发展始终是与钢材的强度以及生产工艺的发展带来的加强性能紧密相关的。同时由于钢结构的发展，对钢材的各种性能指标不断提出新的要求，促进了钢材种类的扩展及强度的提高。正是钢材生产工艺的不断改进，提高了钢结构的力学性能、经济性能和使用性能，满足和促进了钢结构工程的发展、应用、推广及进步，同时与高强度钢材匹配的具有良好韧性、延性和足够强度的焊接金属材料和焊接工艺逐渐成熟，为高强度钢材的应用创造了条件。我国新的钢材规范《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591—2008)，代替 GB/T 1591—1994，给出了 Q500、Q550、Q620、Q690 级性能钢材，使得在输电铁塔中采用 Q690 高强钢成为可能。

在电网建设中，采用 Q690 钢管塔可有效降低塔重、基础重量及造价，减小杆塔根开，压缩线路走廊宽度，减少拆迁、植被破坏和林木砍伐，有利于节约资源和环境保护，具有显著的经济效益和社会效益，但受使用原则、设计方法、生产及加工工艺等技术难题的影响，Q690 钢管塔的推广应用仍存在一些困难。本书作者对 Q690 钢管塔的受力性能及加工工艺开展了大量的试验研究和工程实践，取得成果如下：

系统地进行了 Q690 高强钢的材料性能试验、残余应力测试、局部稳定试验、整体稳定试验、K 形节点试验和柔性法兰试验，结合相关规范和有限元分析，系统研究了 Q690 钢管的各项性能，首次提出了 Q690 钢管塔的设计参数及设计公式，完善了设计方法。

开展了 Q690 高强钢的对接焊缝焊接试验和 T 型连接焊接试验，提出了高效、可靠、稳定、经济的电弧焊对接技术，并制定了相应的焊接工艺规程。

完成了我国首个 Q690 钢管塔真型试验并首次进行了 Q690 钢管塔的工程应用，取得了良好的经济效益和社会效益，为今后推广应用 Q690 钢管塔提供了科

学的设计和加工依据。

结合实际工程对 Q690 钢管塔的技术经济指标进行了深入分析，为推广应用 Q690 钢管塔提供了有力依据。

本书著述成果有利于实现我国电网建设的技术跨越和产业升级，提高整个电网工程高强钢管塔应用水平，同时对带动我国钢材质量的不断提升，促进我国钢铁工业的技术进步具有重要意义，具有广阔的应用前景。



2013 年 1 月



前言

我国输电铁塔主要采用热轧角钢，少量荷载较大的铁塔采用钢管，钢管材质以 Q235 和 Q345 为主。与先进国家相比，我国钢管塔所用钢材的材质单一、强度值偏低、材质的可选择余地小，致使塔重偏大，经济和社会效益偏低。Q690 钢管塔的推广应用，可以在保证结构安全的前提下，减少钢材用量，降低铁塔造价，同时也可以减少钢铁冶炼造成的污染物和温室气体的排放量，经济和社会效益显著。经过多年的试验、研究，Q690 钢管塔已在我国输电线路中得到试点应用。

同普通强度钢管塔相比，Q690 钢管塔的设计参数、设计方法及加工技术等方面均具有一定的特殊性。多年的理论分析、试验研究和工程应用，证明 Q690 钢管塔安全可靠，在电网建设中具有广阔的应用前景，值得推广应用。

本书著者总结了多年来从事 Q690 钢管塔研究及工程应用的成果，全书共分 11 章：第 1 章对国内外输电铁塔中高强钢应用情况进行了介绍，并提出了工程应用中需解决的问题；第 2 章介绍了 Q690 钢管的材料力学性能及残余应力的测定；第 3 章介绍了 Q690 轴心受压钢管的整体稳定性能；第 4 章介绍了 Q690 轴心受压钢管的局部稳定性能；第 5 章介绍了 Q690 钢管受压构件稳定系数的计算方法；第 6 章对 Q690 钢管塔 K 形节点极限承载力进行了研究分析；第 7 章对 Q690 钢管塔柔性法兰极限承载力进行了研究分析；第 8 章进行了 Q690 高强钢焊接试验研究；第 9 章介绍了 Q690 钢管塔的设计参数和选用原则；第 10 章介绍了 Q690 钢管塔的真型塔设计和试验研究；第 11 章介绍了 Q690 钢管塔的工程应用。

本书作者为河南省电力勘测设计院郭咏华、张斌和张建明。郭咏华撰写了第 1 章~第 7 章，张斌撰写了第 8 章~第 9 章，张建明撰写了第 10 章~第 11 章。全书由郭咏华统稿审定。

河南省电力勘测设计院的曹志民副院长、张先俊总工程师、杨宗奇，西安交通大学的孙清教授、张贵锋副教授等为本书的编写提供了参考资料。河南省电力公司的于旭东副总工程师和吴中越主任为本书的编写提供了宝贵的修改意见，在此一并致谢。

由于水平有限，书中定有不妥和需改进之处，尚祈工程技术界同仁不吝赐教。

著者

2013年1月

目 录

序
前言

1 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 国内输电铁塔现状	1
1.3 国内外输电铁塔中高强钢应用情况	2
1.4 Q690 钢管塔的工程应用需要解决的问题	3
2 Q690 钢管的材料力学性能及残余应力	4
2.1 概述	4
2.2 Q690 钢的材料力学性能测定	4
2.3 Q690 钢管的残余应力测定	8
3 Q690 轴心受压钢管的整体稳定性能	16
3.1 概述	16
3.2 钢管整体稳定试验研究	16
3.3 钢管整体稳定有限元分析	24
3.4 结论	28
4 Q690 轴心受压钢管的局部稳定性能	30
4.1 概述	30

4.2	钢管局部稳定试验研究	30
4.3	钢管局部稳定有限元分析	38
4.4	结论	42
5	Q690 钢管受压构件的稳定系数	44
5.1	概述	44
5.2	逆算单元长度法	44
5.3	稳定系数计算	50
5.4	结论	54
6	Q690 钢管塔 K 形节点极限承载力研究分析	55
6.1	概述	55
6.2	K 形节点有限元分析	56
6.3	K 形节点试验研究	62
6.4	K 形节点试验值、设计值与有限元计算结果对比分析	74
6.5	结论	78
7	Q690 钢管塔柔性法兰极限承载力研究分析	80
7.1	概述	80
7.2	柔性法兰试验研究	80
7.3	柔性法兰有限元分析	87
7.4	柔性法兰试验与有限元计算结果对比分析	90
7.5	结论	97
8	Q690 高强钢焊接试验研究	99
8.1	概述	99
8.2	Q690 钢母材成分、组织、性能及裂纹敏感性分析	99
8.3	8mm 厚 Q690 钢板对接接头焊接试验研究	108
8.4	20mm 厚 Q690 钢板对接接头焊接试验研究	114
8.5	T 型连接焊接试验研究	117
8.6	结论	119

 Q690 钢管塔的设计参数和选用原则	121
9.1 概述	121
9.2 设计参数	121
9.3 受拉高强钢管使用原则	123
9.4 受压高强钢管使用原则	123
 Q690 钢管塔的真型塔设计和试验研究	126
10.1 真型塔试验	126
10.2 整塔节点有限元计算	128
10.3 试验结果与有限元结果对比分析	133
10.4 结论	140
 Q690 钢管塔的工程应用	141
11.1 概述	141
11.2 Q690 高强钢管塔工程应用情况	142
11.3 Q690 钢管塔在特高压工程中应用的技术经济分析	142
11.4 结论	144
附录 1 逆算单元长度法程序	145
附录 2 节点 ANSYS 命令流	152
附录 3 法兰 ANSYS 命令流	175
参考文献	185

1

绪 论

1.1 概 述

GB/T 1591—2008《低合金高强度结构钢》中钢材序列最高屈服强度已达到 Q690，随着我国冶金工业的发展，使得输电铁塔采用 Q690 高强钢成为可能。在输电线路中采用 Q690 钢管塔，既有明显的技术经济效益，又有利于提高我国输电线路的建设水平。

1.2 国内输电铁塔现状

我国输电线路铁塔目前用材主要以热轧角钢型材为主，辅以少量钢管，钢材的品种以 Q235 和 Q345 两种为主，铁塔采用热镀锌防腐，使用年限约为 50 年；与发达国家相比，品种少、强度值偏低、可选择余地小^[1,2]。近年来，我国电力事业高速发展，电网不断升级，输电线路向高电压、大容量、多回路和紧凑型发展，随着同塔多回路工程、大截面导线工程、大跨越工程的建设，塔型越来越大，承受的荷载也越来越大。例如，2008 年，建成晋东南—南阳—荆门 1000kV 特高压交流试验示范工程；2010 年，建成云南—广东±800kV 特高压直流输电工程、向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程，我国成为目前世界上交直流运行电压等级最高的国家。为满足“全国联网、西电东送、南北互供”的需要，预计到 2020 年，在南北方向构建多回百万级特高压输电线路大通道，1000kV 输电铁塔的塔重与现在相比会发生质的变化，塔重将增加 4~5 倍，单回路塔重将达到 50~100t，双回路塔重将达到 100~250t。我国将在 2015 年前后建成 7200 多千米特高压直流输电线路工程，特高压直流输电铁塔塔重将是现在直流输电铁塔的 2~2.5 倍。这就对输电铁塔的结构设计、钢

材强度提出了更高的要求。为了使输电铁塔经济合理，满足建设要求和设计需求，钢材强度就必须大幅提高。

当构件设计荷载较大时，传统的角钢截面将不能满足设计需求，因此一般要通过采用组合断面的方法来满足铁塔构件的承载能力要求，这必然导致铁塔杆件数量及钢材规格增多，节点构造复杂，安装工作量增大，从而造成投资和资源消耗的增加，影响我国电力行业在国际市场上的竞争力。与角钢构件相比，钢管构件具有风压小、刚度大、结构简洁、传力清晰的特点，能够充分发挥材料的承载性能，适合在荷载较大的铁塔中采用。在大荷载杆塔中推广应用高强度钢管塔可有效降低塔重、基础重量及造价，减小杆塔根开，压缩线路走廊宽度，减少拆迁、植被破坏和林木砍伐，有利于节约资源和环境保护，具有显著的综合经济效益和社会效益。因此在输电线路中采用高强度钢管塔是有效缓解上述矛盾的措施之一。

1.3 国内外输电铁塔中高强钢应用情况

国外，日本在 20 世纪 90 年代相继建成四段同塔双回路共 425km 的 1000kV 线路中，就采用了 SS55 高强钢管（屈服强度 415MPa），日本 JEAC 6001—2000《架空送电规程》又将钢材屈服强度提高到 520MPa；欧美国家大多采用屈服强度为 450MPa 的钢材。目前，欧美、日本等国家的高强钢基本用于 500kV 及以上电压等级输电线路铁塔上，新建线路铁塔主材已全部采用高强度钢材。

国内，GB 50017—2003《钢结构设计规范》和 GB 50545—2010《110kV～750kV 架空输电线路设计规范》中钢材的最高强度等级为 420MPa（Q420 钢材）。高强钢在我国输电线路领域中的使用起步较晚，2002 年在 500kV 吴淞口黄浦江大跨越工程跨越钢管塔中首次采用了 Q390 钢材；2004 年在西北 750kV 输电线路中，首次使用了 Q420 高强钢；2007 年，由河南省电力勘测设计院设计的平顶山—洛南 500kV 线路工程中首次进行了 Q460 铁塔的试点应用，之后又于华豫电厂—信阳变电站、禹州电厂—许昌变电站、焦西—塔铺、祥符—永城和平顶山—白河 5 条 500kV 线路工程中对 Q460 铁塔进行了设计应用^[3]；2010 年，河南省电力勘测设计院等研究、设计的我国首个 Q690 钢管塔，在中国电力科学研究院霸州特高压杆塔试验基地顺利通过真型塔试验，获得成功；之后，在平顶山—白河 500kV 线路工程中首次进行了 Q690 铁塔的试点应用，运行情况良好，表明 Q690 钢管塔的设计理论应用于实际工程是安全可靠的。

1.4 Q690 钢管塔的工程应用需要解决的问题

1.4.1 Q690 受压钢管的设计方法和设计参数

由于钢材强度的提高，构件的压杆稳定强度折减系数及轴心受压稳定系数等设计参数和相关设计方法均相应发生变化，目前国内普通材质压杆承载力设计方法和设计参数不可直接应用于 Q690 高强钢管。

1.4.2 Q690 钢管塔节点和法兰受力性能

钢管塔节点受力较为复杂。目前对此类节点的受力性能研究还不够深入，国内外规范也未对此类节点极限承载力做出详细的规定，缺乏相应可供实际工程设计使用的计算分析方法，而采用 Q690 这种高强钢材的节点，受力性能研究更是空白，需要对其进行深入的试验研究和理论分析。

法兰连接作为钢管塔结构中的主要连接方式，其受力性能是钢管塔结构设计的一个关键环节，但目前对 Q690 钢管塔柔性法兰节点的研究国内尚属空白，需要对其进行深入研究。

1.4.3 Q690 钢的焊接

高强钢在焊接过程中，热影响区容易形成淬火组织——马氏体，使近缝区的硬度提高，塑性下降，导致焊后发生裂纹，易形成冷裂纹、层状撕裂，需要对 Q690 钢的焊接工艺进行试验研究。

2

Q690钢管的材料力学性能及 残余应力

2.1 概 述

Q690 钢管的材料力学性能指标和残余应力分布,对结构性能有直接的影响,是结构计算的重要依据,为分析试验结果、有限元模拟和逆算单元长度法计算提供了重要参数。

本章对 Q690 钢管进行了材料力学性能试验研究以及残余应力测定,给出了材料的屈服强度、抗拉强度、泊松比和弹性模量以及残余应力分布模式。

2.2 Q690 钢的材料力学性能测定

2.2.1 试验目的

该试验为单向拉伸试验,用来测定 Q690 钢在单向受力状态下的力学性能,包括屈服强度、抗拉强度、泊松比和弹性模量,为分析试验结果和有限元模拟计算提供材料力学性能参数。

2.2.2 试验装置

该试验采用的拉伸试验机为微机控制电子万能试验机,如图 2-1 所示。试验中可直接记录荷载、位移等数据,采用的应变仪为 CML-1H 型应变 & 力综合测试仪,如图 2-2 所示。

2.2.3 试件设计

试件按 GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》中的规定进行设计、制造,共计 6 个。试件形式及尺寸如图 2-3 所示,实物如图 2-4 所示。

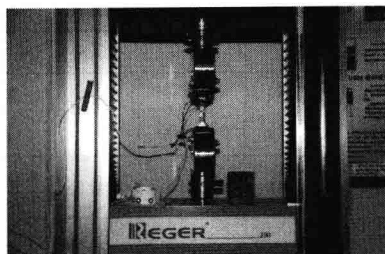


图 2-1 微机控制电子万能试验机

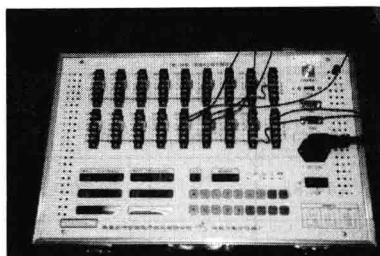


图 2-2 CML-1H 型应变 & 力综合测试仪

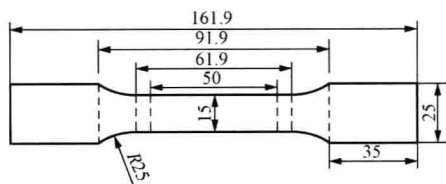


图 2-3 试件形式及尺寸

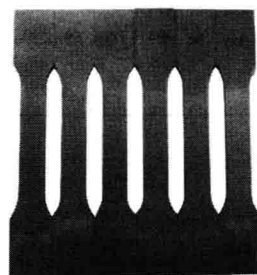


图 2-4 试件实物

2.2.4 试验过程

试验前按 GB/T 228—2002 及 GB/T 22315—2008 《金属材料弹性模量和泊松比试验方法》中的规定对试件尺寸进行三点测量，得到各试件横截面数据，见表 2-1。

表 2-1 Q690 钢材性试验试件尺寸测量原始数据

试件编号	CX1			CX2			CX3		
	宽 (mm)	厚 (mm)	截面积 (mm ²)	宽 (mm)	厚 (mm)	截面积 (mm ²)	宽 (mm)	厚 (mm)	截面积 (mm ²)
位置 1	14.72	4.96	73.01	14.74	5.00	73.70	14.70	5.02	73.79
位置 2	14.76	4.92	72.62	14.68	4.98	73.11	14.70	5.10	74.97
位置 3	14.42	4.98	71.81	14.52	4.98	72.31	14.66	5.10	74.77

续表

试件编号	CX4			CX5			CX6		
	宽 (mm)	厚 (mm)	截面积 (mm ²)	宽 (mm)	厚 (mm)	截面积 (mm ²)	宽 (mm)	厚 (mm)	截面积 (mm ²)
位置 1	14.82	5.00	74.10	14.80	5.00	74.00	14.74	4.98	73.41
位置 2	14.92	5.00	74.60	14.72	4.92	72.42	14.76	4.98	73.50
位置 3	14.92	4.96	74.00	14.80	4.96	73.41	14.78	4.98	73.60

由表 2-1 得到各试件的最小截面积和平均截面积, 见表 2-2。

表 2-2 Q690 钢材性试验试件最小及平均截面积

试件编号	CX1	CX2	CX3	CX4	CX5	CX6
最小截面积 (mm ²)	71.81	72.31	73.79	74.00	72.42	73.41
平均截面积 (mm ²)	72.48	73.04	74.51	74.23	73.28	73.50

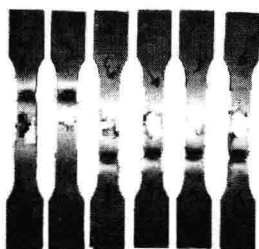


图 2-5 试件破坏形式

为了测试试件的泊松比和弹性模量, 需在试件中间位置粘贴纵向和横向应变片。试件安装至试验机上时, 需确保试件中心线和钳口里的中心线吻合。试验时室温为 25°左右, 试验连续缓慢加载, 加载速率控制为 1mm/min, 一定荷载值时采集一次应变。试件破坏形式见图 2-5。

2.2.5 试验数据整理

根据采集的试验数据, 计算 Q690 钢的基本力学性能参数。

一、弹性模量及泊松比

根据各个试件的荷载、应力、纵向应变和横向应变测试结果 (应力为荷载值除以该试件测量的平均截面积), 采用线性拟合方法, 可得各试件的弹性模量和泊松比, 见表 2-3。

表 2-3 Q690 钢的弹性模量及泊松比

试件编号	CX1	CX2	CX3	CX4	CX5	CX6	平均值
弹性模量 (GPa)	189.1	189.3	187.6	218.8	188.4	203.5	196.1

续表

试件编号	CX1	CX2	CX3	CX4	CX5	CX6	平均值
直线斜率变异系数 (%)	1.2	1.1	1.1	1.7	1.9	1.6	—
泊松比	0.2195	0.2236	0.2085	0.2507	0.2271	0.2308	0.2267
直线斜率变异系数 (%)	54.0	1.2	267.5	1.7	3.2	1.4	—

GB/T 22315—2008 中规定, 如果拟合直线斜率变异系数在 2% 以上, 则计算值无效。将拟合直线斜率变异系数在 2% 以上的数据全部剔除得到 Q690 钢修正后的弹性模量及泊松比, 见表 2-4。

表 2-4 Q690 钢修正后的弹性模量及泊松比 (修正后)

试件编号	CX1	CX2	CX3	CX4	CX5	CX6	平均值
弹性模量 (GPa)	189.1	189.3	187.6	218.8	188.4	203.5	196.1
泊松比	—	0.2236	—	0.2507	—	0.2308	0.2350

二、屈服强度

各试件的荷载—位移曲线形式较为接近, 本节以试件 CX3 为例, 其荷载—位移曲线如图 2-6 所示。

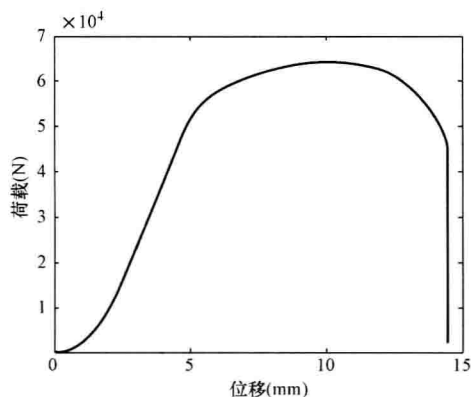


图 2-6 试件 CX3 荷载—位移曲线

从图 2-6 可以看出, Q690 钢没有明显的屈服台阶, 根据 GB/T 228—2002, 取卸荷后残余应变为 0.2% 对应的应力为屈服强度, 见表 2-5。