

彭奕亮 等著

Q690

高强度钢管构架

设计研究



黄河水利出版社

Q690 高强度钢管构架设计研究

彭奕亮 等著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

随着我国输变电工程的飞速发展,220 kV、500 kV 变电站正在大量地建设。同时,1 000 kV 特高压变电站也已成功应用于实际工程项目中,全钢结构构架已逐步成为我国变电站构架结构的主流。随着电压等级及导线容量不断增大,变电站中各种结构所承受的荷载也相应增大,由此导致构件尺寸、基础尺寸、占地面积不断增大,变电站整体投资规模不断增大。因此,为达到节省用地、节省用钢量、降低工程造价的目的,在变电站最主要的结构体系——变电构架中探讨采用高强钢及其设计方法已显得十分必要。

本书对高强钢在变电构架中的应用这一问题进行了全面分析。全书共分 12 章,主要内容包括概述、Q690 高强度钢管截面残余应力分布试验研究、Q690 高强度钢管截面残余应力分布有限元分析、Q690 高强度钢管轴心受压稳定系数研究、Q690 钢管轴压性能试验研究等。

图书在版编目(CIP)数据

Q690 高强度钢管构架设计研究/彭奕亮等著. —郑州:
黄河水利出版社,2012. 12
ISBN 978 - 7 - 5509 - 0392 - 0

I. ①Q… II. ①彭… III. ①钢管结构 - 结构设计 - 研究 IV. ①TU392. 304

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 304159 号

组稿编辑:李洪良 电话:0371 - 66024331 E-mail:hongliang0013@163.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:16

字数:370 千字

版次:2012 年 12 月第 1 版

印数:1—1 000

印次:2012 年 12 月第 1 次印刷

定价:48.00 元

前 言

随着我国输变电工程的飞速发展,220 kV、500 kV 变电站正在大量地建设。同时,1 000 kV 特高压变电站也已成功应用于实际工程项目中,全钢结构构架已逐步成为我国变电站构架结构的主流。随着电压等级及导线容量不断增大,变电站中各种结构所承受的荷载也相应增大,由此导致构件尺寸、基础尺寸、占地面积不断增大,变电站整体投资规模不断增大。因此,为达到节省用地、节省用钢量、降低工程造价的目的,在变电站最主要的结构体系——变电构架中探讨采用高强度及其设计方法已显得十分必要。

全书共分 12 章。第 1 章对研究的目的和意义、国内外研究水平、Q690 钢构架应用需解决的问题进行了综述,对本书的主要研究内容作了介绍;第 2、3 章对 Q690 高强钢管截面残余应力分布进行了试验研究及有限元分析;第 4 章至第 8 章对 Q690 钢管轴压、压弯性能进行了试验研究及数值分析;第 9、10、11 章对 Q690 人字柱主管与横撑相贯节点转动刚度及承载力进行了试验研究及数值分析;第 12 章提出了相关结论及建议。

本书各章编写分工如下:第 1 章由彭奕亮高工编写,第 2、3 章由杨俊芬副教授、湛磊博士编写,第 4 章至第 8 章由彭奕亮高工和李洪波工程师编写,第 9、10、11 章由杨俊芬副教授、彭奕亮高工编写;第 12 章由李洪波工程师、韩选民工程师编写。湛磊博士对全书进行了文字校核和修改工作。彭奕亮、杨俊芬负责全书统稿。

感谢河南省电力勘测设计院土建室李金胜主任、李国田主任在本书编写过程中给予的各种支持和指导。本书参考并应用了一些公开发表的文献和资料,谨向这些作者表示深深的感谢。由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2012 年 10 月

目 录

前 言

第 1 章 概 述	(1)
1.1 目的和意义	(1)
1.2 国内外研究水平综述	(1)
1.3 Q690 钢构架应用需解决的问题	(5)
1.4 主要研究内容	(8)
第 2 章 Q690 高强钢管截面残余应力分布试验研究	(10)
2.1 锯割法测试残余应力	(10)
2.2 盲孔法测试残余应力	(15)
2.3 试件设计	(22)
2.4 材性试验	(23)
2.5 锯割法测试结果	(27)
2.6 盲孔法测试结果	(27)
2.7 锯割法与盲孔法测试结果对比	(31)
2.8 盲孔法测试黑件钢管与镀锌件钢管结果对比	(32)
2.9 带端头钢管残余应力测试	(33)
2.10 残余应力分布建议图	(36)
2.11 本章小结	(37)
第 3 章 Q690 高强钢管截面残余应力分布有限元分析	(38)
3.1 焊接热过程有限元分析的理论基础	(38)
3.2 基于 ANSYS 软件的焊接热过程模拟计算	(44)
3.3 有限元模型的验证	(55)
3.4 钢管管径改变对残余应力的影响	(56)
3.5 钢管壁厚改变对残余应力的影响	(58)
3.6 残余应力分布简化图	(59)
3.7 本章小结	(59)
第 4 章 Q690 高强钢管轴心受压稳定系数研究	(61)
4.1 概 述	(61)
4.2 逆算单元长度法介绍	(62)
4.3 轴心受压钢管稳定系数计算结果	(66)
4.4 本章小结	(77)

第 5 章	Q690 钢管轴压性能试验研究	(78)
5.1	试验方案	(78)
5.2	试件轴压试验测试结果分析	(80)
5.3	本章小结	(92)
第 6 章	Q690 钢管轴压性能有限元分析	(93)
6.1	有限元分析模型	(93)
6.2	轴压试验试件轴压性能模拟结果分析	(95)
6.3	Q690 钢管轴压性能参数分析	(111)
6.4	本章小结	(116)
第 7 章	Q690 钢管压弯性能试验研究	(117)
7.1	试验方案	(117)
7.2	试件压弯试验测试结果分析	(119)
7.3	本章小结	(137)
第 8 章	Q690 钢管压弯性能有限元分析	(139)
8.1	有限元分析模型	(139)
8.2	压弯试验试件压弯性能模拟结果分析	(140)
8.3	Q690 钢管压弯性能参数分析	(158)
8.4	本章小结	(163)
第 9 章	人字柱主管与横撑相贯节点转动刚度试验研究	(164)
9.1	试验设计	(164)
9.2	试验现象及试验结果	(170)
9.3	节点刚度分析	(191)
9.4	本章小结	(200)
第 10 章	人字柱主管与横撑相贯节点转动刚度数值分析	(201)
10.1	有限元分析模型的建立	(201)
10.2	有限元分析模型的验证	(205)
10.3	瓦形板加强型相贯节点转动刚度数值分析	(213)
10.4	内隔环加强型相贯节点转动刚度数值分析	(216)
10.5	内套筒加强型相贯节点转动刚度数值分析	(220)
10.6	轴压比对相贯节点转动刚度影响的数值分析	(223)
10.7	本章小结	(227)
第 11 章	人字柱主管与横撑相贯节点承载力数值分析	(229)
11.1	有限元模型的建立	(229)
11.2	相贯节点承载力的确定原则	(230)
11.3	瓦形板加强型相贯节点承载力数值分析	(230)
11.4	内隔环加强型相贯节点承载力数值分析	(233)

11.5	内套筒加强型相贯节点承载力数值分析	(236)
11.6	轴压比对相贯节点承载力影响的数值分析	(238)
11.7	本章小结	(242)
第 12 章	结论及建议	(243)
12.1	结 论	(243)
12.2	建 议	(246)
参考文献		(248)

第1章 概述

1.1 目的和意义

随着我国输变电工程的飞速发展,220 kV、500 kV 变电站正在大量地建设。同时,1 000 kV 特高压变电站也已成功应用于实际工程项目中,全钢结构构架已逐步成为我国变电站构架结构的主流。随着电压等级及导线容量不断增大,变电站中各种结构所承受的荷载也相应增大,由此导致构件尺寸、基础尺寸、占地面积不断增大,变电站整体投资规模不断增大。因此,为达到节省用地、节省用钢量、降低工程造价的目的,在变电站最主要的结构体系——变电构架中探讨采用高强钢及其设计方法已显得十分必要。

自从钢结构得到应用以来,钢结构的发展始终是与钢材的特性和生产工艺的发展紧密相连的。正是钢材的不断改进提高了钢结构的承载力、经济性能和使用性能,促进了钢结构的发展和应用。新的钢材生产工艺,如微合金化技术和热机械处理技术(TMCP)等能使钢材具有更高的洁净度(即S、P、N、H、O等杂质元素含量和C元素含量低);以Nb、V及Ti元素为代表的微合金化代替传统的碳元素强化方式,在提高钢材屈服强度的同时,也能够改善其塑性和韧性,降低含碳量。以此新工艺开发的高强钢(强度标准值为460~1 100 MPa),具有强度高、韧性好、加工和可焊性能好等特点,并已在国内外多个实际工程中得到应用,在结构安全、建筑使用功能和经济效益以及低碳节能等方面取得了良好的效果。Q690钢已经大量应用于船舶、港口机械、起重机、煤矿机械、挖掘机等的制造,积累了成熟的焊接、加工和工程应用经验,取得了显著的效益。

但目前国内的变电构架中,使用的钢材最高强度等级为Q420,与Q690尚有一定的差距。高强钢力学性能的变化必然导致其结构构件承载性能的改变,但目前国内外钢结构设计规范均没有专门针对高强钢钢结构的设计方法和计算理论。为确保高强钢钢结构安全可靠,充分发挥其优势,更进一步促进高强钢钢结构的工程应用,需要进行全面系统的试验研究和理论分析,为补充和完善钢结构设计规范奠定基础。为此,本书主要针对Q690钢材的牌号,对变电构架中使用Q690钢材的几个关键问题进行相应的探讨,争取在技术应用上有所突破,实现与国际先进设计水平接轨,补充并验证国家现行技术标准,并为新版钢结构规范的修订提供一定的依据,同时为今后大量采用高强钢变电构架提供科学的设计依据,以期取得可观的经济效益和社会效益。

1.2 国内外研究水平综述

1.2.1 低合金钢的国家标准及牌号

国家标准《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591—2008)规定了低合金高强度结构钢的

牌号、化学成分、力学性能等技术要求,以及钢材的试验方法和检验规则。标准中含有 Q345、Q390、Q420、Q460、Q500、Q550、Q620、Q690 八个牌号,其中 Q500 ~ Q690 为新增牌号,各牌号钢材的区别在于化学成分和力学性能上的差异。

1.2.2 我国高强钢的生产能力

经过近 50 年的研制与开发,我国低合金钢和低合金高强度钢的生产能力得到了突飞猛进发展,并具备了一定的规模。根据 1980 ~ 2004 年的资料统计,我国的低合金钢由 302 万 t 增加到 1 068.5 万 t,平均年增长率为 6%。其中,低合金高强度钢净增 766.5 万 t,平均年增长率为 10.6%。近年来,Q550、Q620、Q690 等高强钢已经大量应用于船舶、港口机械、起重机、煤矿机械、挖掘机等的制造,积累了成熟的焊接、加工和工程应用经验,取得了显著的效益。这也为高强钢在我国钢管杆塔中的应用提供了借鉴。在冶金企业中,宝钢、武钢、鞍钢等企业有很强的品种开发能力和生产经验;首钢、邯钢、济钢等企业具有很强的微合金化高强度钢的发展潜力。钢管构件中 300 mm 以上直径的钢管主要使用钢板卷制,调研发现,目前高强钢板(Q690)在市面上都有现货,而且能够生产的厂家也比较多,其市场供应没有问题。我们对 Q690 板材的规格及能够生产供货的厂家进行了调研,情况如下。

(1) 规格:Q690 板材长为 3 000 ~ 18 800 mm,宽为 1 500 ~ 4 020 mm,厚为 6 ~ 60 mm。

(2) 主要供应厂家:唐钢、宝钢、武钢、首钢、邯钢等。

在钢管构架中采用高强度钢板是具有市场保证的。

1.2.3 我国高强钢焊接及加工工艺水平

河南省电力勘测设计院承担的河南省电力公司科研项目“Q690 钢管杆塔设计试验研究”及输电杆塔中的工程实际应用表明:

(1) Q690 钢板的可焊性较好,在机械行业中有大量的 Q690 钢板焊接经验,可以采用 Q690 钢板焊接进行连接,但应进行 Q690 钢的焊接工艺评定和焊工培训工作。

(2) 设计时除受力较大的主材采用高强钢管外,其他构件如法兰、节点板、一般受力材等使用 Q345 钢或 Q235 钢,可以进一步降低焊接难度,保证焊接质量。这样高强钢与高强钢的焊接仅出现在高强钢管的直缝焊上,直缝焊管一般采用生产工艺简单、焊缝质量高的埋弧焊工艺生产。而且钢管的直缝方向与钢管的轴力方向垂直,实际受力较小,强度要求不高。高强钢与普通钢的异种钢焊接与常规普通钢焊接相比,难度增加有限。

(3) Q690 钢管的卷制:利用大型液压折弯机,采用 JCOE 工艺加工而成。其加工工艺为下料、折弯、合缝、纵缝焊接、校圆、矫直等。Q690 钢管的卷制与普通强度钢管的卷制相比,难度相当。

(4) Q690 钢管的焊接:Q690 钢管的纵缝焊接采取埋弧焊的方式进行。首先采用 WH-80-G(直径为 1.2 mm)焊丝,保护气体采用 Ar + CO₂ 混合气进行打底焊接,然后采用 MCJH-70Q(直径为 2.5 mm)焊丝、MJ105 焊剂,埋弧焊一次成型。在埋弧焊焊接过程中,需要在钢管两侧设置引弧板,以保证钢管端部的焊缝质量。

(5) Q690 钢管的镀锌:通过对锌液温度、镀锌时间和冷却时间的控制可以做到锌层

颜色一致,无明显色差。Q690 钢管镀锌的难易程度及工艺要求与 Q345 钢材的相当,一般塔厂均能掌握。

总之,一般杆塔加工企业不经设备改造就能焊接及加工 Q690 变电构架,Q690 变电构架已具备工程应用的条件。

1.2.4 高强钢结构的研究进展

随着高强钢在工程实践中越来越广泛的应用,国内外很多专家及学者越来越重视对高强钢钢结构的研究。高强钢结构的破坏主要是由结构屈服、局部失稳以及结构整体失稳引起的。这类问题已成为当前研究领域相当活跃的一个课题。

国外关于高强钢结构的研究已经取得了一定的进展,但总体上都局限在对材料性能和构件层面的受力性能的研究方面。在受压构件方面,多位学者主要针对高强度焊接箱形、工字形和十字形等截面钢柱进行了整体稳定、局部稳定等相关试验研究,结果表明,高强钢钢柱的稳定系数有明显提高。在受弯构件方面,有学者对高强钢工字形截面梁的板件局部稳定性进行了分析计算和研究。对于梁柱节点,有学者将高强钢应用于钢框架梁柱节点域和端板连接节点中的端板,并进行了初步研究。

国内对高强钢结构的相关研究相对较少,清华大学施刚等对 60 个 Q420 热轧等边角钢轴压钢柱的整体稳定性能进行了试验研究,结果表明,该类钢柱的整体稳定系数明显提高,部分试件宽厚比的超限并没有对其整体稳定承载力造成明显影响;此外,造成试验结果偏大的原因除钢材强度提高后对初始缺陷敏感性降低外,也与《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)(以下简称《钢规》)对于单轴对称截面钢柱的换算长细比计算的合理性以及试验中两端球铰约束条件的有效性有关。

施刚等对 8 个端部带约束的 Q690、Q960 高强钢焊接工字形截面受压柱的整体稳定性能进行了试验研究。结果表明,当正则化长细比一定时,高强钢钢柱的整体稳定系数有明显提高,明显高于针对普通强度钢材钢柱设计采用的 b 类柱子曲线;现有设计方法对于高强钢太过保守;同时,Q960 与 Q690 钢柱的整体稳定系数相比并没有明显的区别,这表明当高强钢强度等级超过 690 MPa 时,其整体稳定系数提高幅度较小。

同济大学李国强等对 Q460 高强钢焊接箱形柱的稳定承载力进行了试验研究,并建议规范中 b 类截面可包含宽厚比小于 20 的高强钢焊接箱形截面。但是,限于试验数量较少,该结论需要更多的数值分析加以进一步验证。

我国《钢规》对普通强度钢材构件的宽厚比提出了限值,以保证构件在整体失稳前不发生局部屈曲,并且不考虑钢板的屈曲后强度利用。但是对于高强钢,此宽厚比限值的适用性以及考虑钢板屈曲后强度的设计方法都有待进一步研究。规范中规定也仅针对钢材屈服强度不大于 420 MPa 的钢材,对屈服强度大于 420 MPa 的钢材没有作任何规定。因此,为推广高强钢在工程中的广泛应用,还需进行大量的研究工作。

1.2.5 高强钢在输变电工程中的应用现状

1.2.5.1 国内外规范中高强钢的采用情况

为了说明国内外高强钢的应用情况,现将有代表性的标准及其钢种列举如下,见

表 1-1。

表 1-1 国内外高强钢标准

国名	标准标号	钢号	屈服点(N/mm ²)	钢种或用途
美国	ASTM	A852	485	低合金钢
		A572	450	高强度钢
英国	BS4360	55C - E	450	低合金钢
日本	JIS G 3101	SS 540	400	一般结构钢
	JIS G 3106	SM 570	460	焊接结构钢
	JIS G 3444	STK 540	390	一般结构钢管
	JIS G 3114	SMA - 570	460	焊接耐候钢
	JIS G 3445	STKM 17 - C	480	钢管
	JIS G 3129	SH590	440	铁塔用高拉力钢材
	JSS II 12—1999	JS690S	520	铁塔用高拉力型钢
苏联	TOCT 9281—73	10 × CH	392	低合金钢
		12H2Mφ A10	686	高强度钢
中国	GBJ 17—88	15MnV、15MnVq	350	结构钢
	GB 50017—2003	Q420	420	低合金钢
	GB/T 1591—2008	Q690	690	低合金结构钢,仅钢板
	GB 16270—1996	Q690	690	高强度结构钢,仅钢板

就变电构架常用的结构钢而言,与美国的钢材相比,A36 屈服强度(250.0 MPa)比 Q235 的高 15 MPa;A529 的 Grade50(345 MPa)与 Q345 的持平;而与日本的钢材相比,SS400 屈服强度(245 MPa)比 Q235 的高 10 MPa,SS540 屈服强度(400 MPa)比 Q345 的高 55 MPa。也就是说,国外规范中材料等级通常较我国的要高,而且国外相应的规范还都规定了相当于或高于我国 Q420 级别的钢材,如美国的 A572(相当于我国的 Q420),日本的 SH590(屈服强度达 440 MPa)、JS690S(屈服强度达 520 MPa)。我国钢管构架所用钢材的强度等级普遍较国外发达国家同类规范中的钢材强度偏低,这种情况使得我国所设计的钢管构架往往大且重。

1.2.5.2 高强钢在输变电工程中的应用

近年来,随着高强钢在工程实际中越来越广泛的应用,国内电网工程中已陆续出现高强钢应用的实例。2002 年,华东电力设计院设计的 500 kV 黄浦江吴淞口大跨越工程钢管塔首次采用了 Q390 钢材,主要用在塔身下部四段主材,该跨越塔塔高为 177.5 m,管径为 1 000 mm,壁厚为 24 mm;2005 年,在 750 kV 官亭—兰州东输电线路中,采用了 Q420

高强角钢,并且通过了真型试验;上海维蒙特工业(中国)有限公司采用美国标准 ASTM A572 GR65 在上海宝钢生产了屈服强度为 450 MPa 的钢材,2007 年已用于长沙东、福建大园 500 kV 变电站的 500 kV、220 kV 构架;2007 ~ 2008 年,河南省电力勘测设计院在平顶山—洛南、华豫电厂—信阳、禹州电厂—许昌 500 kV 输电线路的设计中采用了 Q460 高强角钢,并且通过了真型试验。2009 年河南省电力勘测设计院设计的济源 500 kV 变电站 500 kV 构架中首次采用了 Q420 钢材,主要用于人字柱,圆钢管规格为 $\phi 450 \times 6$ 及 $\phi 450 \times 8$ 。如图 1-1 所示为高强钢在输变电工程中的实际应用情况。

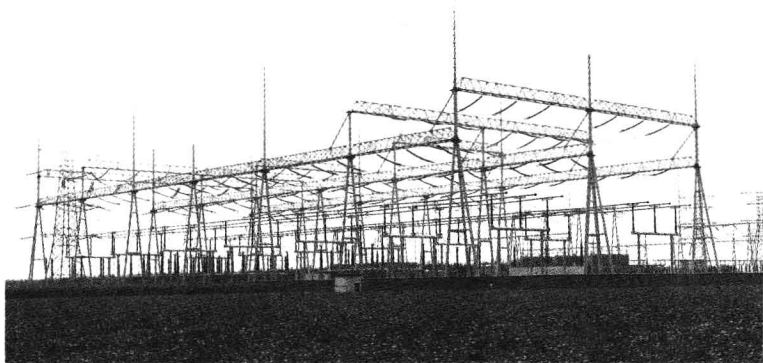


图 1-1 济源 500 kV 变电站 Q420 高强钢构架

随着高强钢在电网工程中的推广应用,许多大型钢构架加工企业开始加工高强钢并获得了相关经验,河南鼎力杆塔股份有限公司、常熟市铁塔厂、青岛武晓铁塔有限公司、南京江标集团有限责任公司等企业都有加工业绩。

1.3 Q690 钢构架应用需解决的问题

变电构架通常采用自立格构式钢管结构或人字柱结构。自立格构式钢管结构由钢管或角钢结构形成空间桁架结构体系,梁与柱组成门形钢架,构架柱外形类似于线路输电塔,构架梁一般为矩形断面格构式钢梁,构架梁、柱的弦杆通常采用热轧无缝钢管,腹杆采用角钢或圆钢管,这类构架的典型结构立面图见图 1-2;人字柱结构由“A”型钢管柱和三角形桁架梁组成,梁、柱采用铰接,构架纵向设置端撑形成抗侧力体系,构架柱通常采用直焊缝钢管,在构架柱中部一般设置 1 ~ 2 道横撑,以减小构架横向变形及柱平面内弯矩,桁架梁的弦杆采用热轧无缝钢管,这类构架的典型结构立面图(正立面、侧立面图)见图 1-3。如图 1-4 和图 1-5 所示为此两种结构形式的应用实例。

Q690 高强钢在输变电结构中的应用,尽管已有很多专家及学者对其进行了研究,但目前还没有可参照的规范进行指导设计,这造成了我国输变电结构设计方面通常使用 Q235、Q345 低等级钢材。为了更好地推广 Q690 高强钢在变电构架中的应用,为 Q690 高强钢变电构架的设计提供理论依据,需重点解决以下几方面的问题:

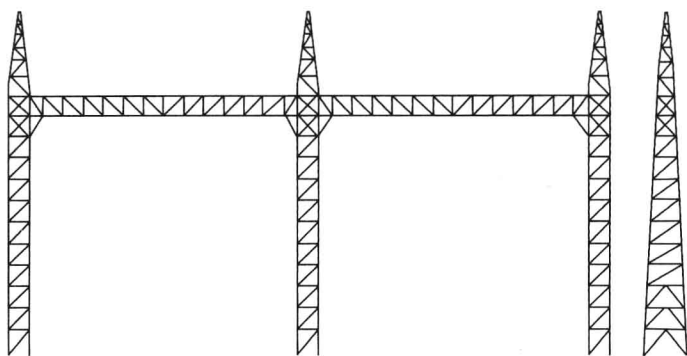


图 1-2 自立格构式结构正立面、侧立面图

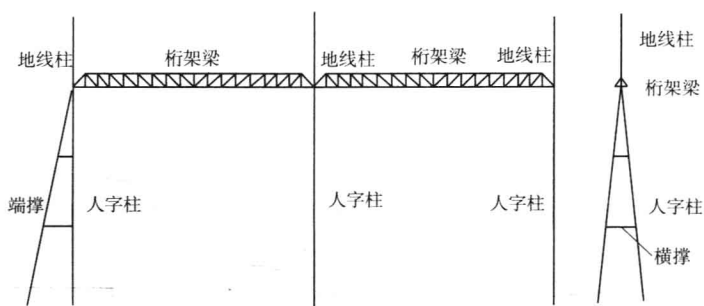


图 1-3 人字柱结构正立面、侧立面图

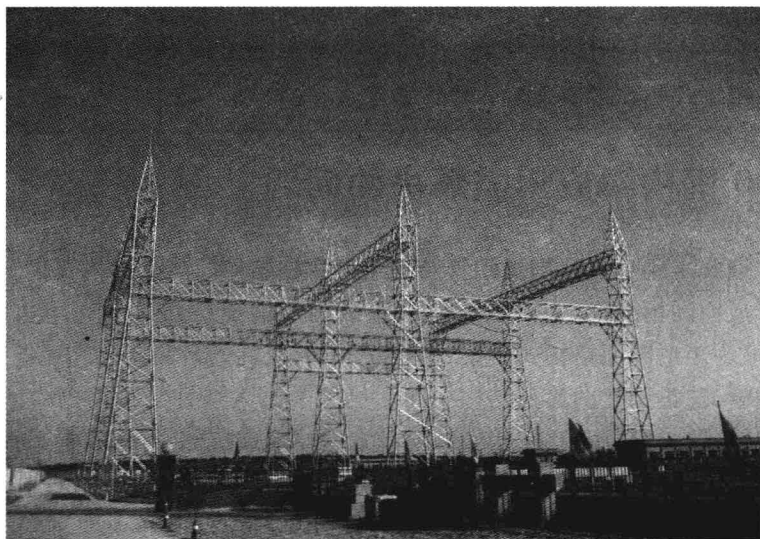


图 1-4 荆门 1 000 kV 变电站自立格构式构架

(1) Q690 高强钢轴心受压稳定系数取值问题。我国现行《钢规》中根据不同的截面形式将稳定系数划分为 a、b、c、d 四类,《架空送电线路杆塔结构设计技术规定》(DL/T 5154—2002)(以下简称《塔规》)中,受压钢管杆件的稳定系数直接采用了《钢规》中的 b

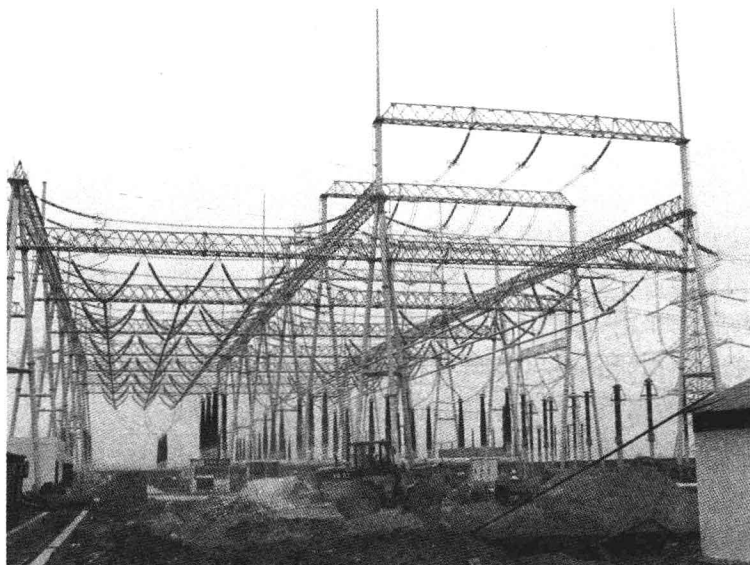


图 1-5 郑州东 500 kV 变电站 6 间隔人字柱变电构架

类截面柱子曲线,但这一规定是基于 Q235 或 Q345 的理论及试验结果而定的,且试验对象多为槽钢或工字钢,对钢管的试验研究较少。因此,应参照《钢规》的方法,计算 Q690 高强钢管的柱子曲线,并通过试验及数值分析进行验证。

(2) Q690 高强钢残余应力分布及其对受压柱稳定系数影响的问题。受压构件的稳定承载力与构件的整体稳定系数 φ 有关,构件的整体稳定系数与构件的材料、力学性能、几何缺陷等有关,其中残余应力的影响是应引起重视的一个因素。目前有很多资料研究了高强钢工字形及箱形截面残余应力分布及其对受压柱稳定承载力的影响,但尚未有资料对 Q690 高强钢管的残余应力分布及其影响进行系统的研究,因此应通过试验及数值方法研究掌握 Q690 钢管截面残余应力分布及其对受压柱稳定系数的影响。

(3) Q690 高强钢构件偏心受压问题。大多数变电构架杆件为偏心受压构件,而已有的针对高强钢的研究主要集中于轴向受压构件,因此需对 Q690 高强钢管作为偏心受压构件时的稳定承载能力进行研究,为工程设计提供合理的理论依据。

(4) 人字柱主管与横撑相贯节点的转动刚度及承载力问题。人字柱主管与横撑的相贯节点是钢管构架结构中常用的一种节点形式。虽然国内外对管—管节点的理论研究及试验研究相对较多,然而 Q690 高强钢目前还未普遍在实际工程中应用,对于 Q690 高强钢人字柱与横撑相贯节点的受力性能和破坏机制尚不清楚,因此对 Q690 高强钢的此种形式节点进行试验研究,并在试验基础上进行系统的数值分析很有必要。人字柱主管与横撑相贯节点处的转动刚度对整个变电构架的抗侧刚度有着十分重要的影响,通常在相贯节点处会采取不同的加强方式以增加其转动刚度并提高其承载能力,因此需进行试验研究及数值模拟研究 Q690 高强钢人字柱与横撑相贯节点在不同加强方式下的转动刚度及承载力性能。

1.4 主要研究内容

1.4.1 Q690 高强钢管截面残余应力分布试验研究及有限元分析

通过锯割法和盲孔法对 $\phi 250 \times 8$ 、 $\phi 300 \times 8$ 、 $\phi 350 \times 8$ 三种截面形式的 Q690 高强钢管的纵向残余应力分布进行试验研究,拟得到黑件、镀锌件和带端头钢管的纵向残余应力分布图;在试验基础上,采用 ANSYS 有限元程序对 12 种截面规格的 Q690 高强钢管的残余应力分布进行数值模拟研究,考察钢管管径改变及壁厚改变对截面纵向残余应力分布的影响,根据数值模拟数据拟合得到钢管的纵向残余应力分布图。

1.4.2 Q690 高强钢管轴心受压稳定系数研究

现行《钢规》中给出的柱子曲线是根据较低强度钢材的试验结果得出的,与高强度钢材的柱子曲线可能会存在一定的差异。为了使 Q690 高强钢管的受压稳定计算符合实际,采用李开禧教授于 1981 年提出的“逆算单元长度法”(我国《钢规》所采用的计算方法),利用 MATLAB 语言编制程序来计算不同长细比的 Q690 高强钢管轴心受压时的临界承载力,得出 Q690 高强钢管轴心受压稳定系数与长细比的对应曲线。

1.4.3 Q690 高强钢管轴心受压承载力试验研究及数值分析

对 $\phi 250 \times 8$ 、 $\phi 300 \times 8$ 、 $\phi 350 \times 8$ 三种截面形式,长细比为 30、45、60 的 Q690 高强钢管 6 组 18 根试件进行轴压承载力性能试验研究,分析其不同长细比的钢管的稳定承载力及其失稳模态,并与中国和美国相关设计规范中的公式计算值进行比较,为 Q690 高强钢在变电构架中的应用提供设计参考。

对 $\phi 250 \times 8$ 、 $\phi 300 \times 8$ 、 $\phi 350 \times 8$ 三种截面形式,不同长细比的 Q690 高强钢管轴压承载力性能进行数值分析,将数值分析结果与试验结果及相关设计公式计算值进行比较。分析其不同长细比的钢管的稳定承载力及其失稳模态,确定钢管发生整体失稳与局部失稳的临界长细比,研究残余应力、整体几何缺陷、局部几何缺陷及径厚比对其稳定性的影响。

1.4.4 Q690 高强钢管压弯承载力性能试验研究及数值分析

对 $\phi 250 \times 8$ 、 $\phi 300 \times 8$ 、 $\phi 350 \times 8$ 三种截面形式,设计长细比为 30、45、60 的 Q690 高强钢管 9 组 27 根试件进行压弯性能试验研究,分析其不同长细比的钢管偏心受压时的稳定承载力及其失稳模态,并与中国和美国相关设计规范中的公式计算值进行比较,为 Q690 高强钢在变电构架中的应用提供设计参考。

对 $\phi 250 \times 8$ 、 $\phi 300 \times 8$ 、 $\phi 350 \times 8$ 三种截面形式,不同长细比的 Q690 高强钢管偏心受压承载力性能进行数值分析,将数值分析结果与试验结果及相关设计公式计算值进行比较,研究残余应力、整体几何缺陷、局部几何缺陷、长细比及径厚比对稳定性的影响。

1.4.5 人字柱主管与横撑相贯节点转动刚度试验研究及数值分析

对人字柱主管与横撑型号均为 $\phi 300 \times 8$ 的 8 个相贯节点进行试验研究,考察各相贯节点的转动刚度以及不同的节点加强方式对节点转动刚度的影响;在试验基础上,采用 ANSYS 有限元程序进行人字柱主管与横撑相贯节点转动刚度的数值分析,研究瓦形板、内隔环及内套筒三种加强方式对节点转动刚度的影响。并进一步开展瓦形板加强型相贯节点的瓦形板厚度、长度和弧度的参数分析;开展内隔环加强型相贯节点的内隔环厚度、宽度和间距的参数分析;开展内套筒加强型相贯节点的内套筒厚度和长度的参数分析。

1.4.6 人字柱主管与横撑相贯节点承载力数值分析

采用 ANSYS 有限元程序进行人字柱主管与横撑相贯节点承载力的数值分析,研究瓦形板加强型相贯节点的瓦形板厚度、长度和弧度等参数对各自节点承载力的影响;研究内隔环加强型相贯节点的内隔环厚度、宽度和间距等参数对各自节点承载力的影响;研究内套筒加强型相贯节点的内套筒厚度和长度等参数对各自节点承载力的影响。

第2章 Q690 高强钢管截面 残余应力分布试验研究

轴心受压钢管的稳定承载力与构件的整体稳定系数 φ 有关,构件的整体稳定系数和构件的材料、力学性能、几何缺陷有关,并受构件两端约束情况的影响。其中,构件端部约束情况可通过计算长度系数来考虑,几何缺陷(初弯曲和初偏心)按照钢结构施工验收规范取值,这两个影响因素对于高强钢和普通钢并无差异,但力学缺陷—残余应力的影响却差别较大。本章研究内容拟对钢管截面的纵向残余应力分布进行实测分析,采用锯割法和盲孔法来测试钢管截面的残余应力,得到截面上残余应力的分布及数值大小,为钢管柱整体稳定系数 φ 的确定奠定基础。

输变电工程中的钢结构构件均应进行防腐处理,通常采用的防腐处理方式热浸镀锌。为考察热浸镀锌对焊接钢管截面的纵向残余应力的影响,需分别测试未镀锌钢管和镀锌钢管两种情况下的纵向残余应力分布。

此外,为考察钢管端部焊接底板和加劲肋以后对钢管截面的纵向残余应力的影响,还需要对3种管径的端部残余应力进行测试。

2.1 锯割法测试残余应力

很多情况下可假设残余应力主要是单轴作用的,在要测量的残余应力的方向把构件切成大量的窄条,并由释放的应变求得应力,即 $\sigma_x = -E\varepsilon_x$ 。

可用锯条把试件锯成15~18 mm的板条,释放应变由可拆卸的应变计或粘贴的电阻应变计测量。

2.1.1 试件准备

2.1.1.1 试件选取

残余应力试件取于构件中,所截出的试件要有一定的长度,见图2-1,以保证在测试范围的残余应力分布不破坏、不释放,即保持了残余应力的初始状态。根据以往研究和国内外有关文献,试件长度的计算公式如下:

$$L = a + 2c \quad (2-1)$$

式中: L 为试件长; a 为标距长加上两边所留打孔的距离,试验中取为 $250 + 25 + 25 = 300$ (mm); c 为边距, $c = 2b$; b 为试件宽,对于圆管截面取管的直径。

c 取长些可保持残余应力更好些,但给下面的一些工作带来不便,所以不宜过长。试验中所选取的试件如图2-2所示。

2.1.1.2 划线

划线即保证钢条的加工线,保证铣条的正确位置。在试件中部取300 mm(250 + 50)