

Experimental study and Electrical Engineering Application
of Q460 high-strength Steel

Q460

高强钢试验研究 及电力工程应用

郭咏华 张天光 王经远 著



NLIC 2970701349



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

Experimental study and Electrical Engineering Application
of Q460 high-strength Steel

要 点 目 录

Q460

高强钢试验研究

及 电力工程应用

郭咏华 张天光 王经运 著



NLIC 2970701349



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

Q460 高强钢是输电线路铁塔领域应用的一种新型材质。全书共分为 12 章，内容包括 Q460 高强钢的特点、Q460 角钢压杆力学性能、Q460 角钢局部屈曲和整体稳定、Q460 高强钢的连接、Q460 高强钢铁塔真型试验、Q460 高强钢铁塔设计参数及选用原则、Q460 高强钢铁塔加工及电力工程应用。

本书可供从事送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参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

Q460 高强钢试验研究及电力工程应用 / 郭咏华, 张天光,
王经运著. —北京: 中国电力出版社, 2010.12

ISBN 978-7-5123-1224-1

I . ①Q… II . ①郭… ②张… ③王… III . ①高强度钢—试验—研究 ②高强度钢—应用—输电铁塔—研究 IV . ①TG142.7
②TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 252095 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

*

2010 年 12 月第一版 2010 年 12 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 11.5 印张 200 千字

印数 0001—2000 册 定价 30.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
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

在电网建设中，采用 Q460 高强钢铁塔可取得良好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，Q460 高强钢铁塔的推广应用仍存在一些困难。本书作者及其合作者对 Q460 高强钢的工程应用及其各项性能进行了深入系统的理论分析和试验研究，取得了一系列研究成果，主要包括以下几个方面：

通过 Q460 高强角钢的压杆稳定试验、焊接和热加工试验、螺栓和接头试验、孔壁承压试验、真型塔试验，结合相关规范和有限元分析，系统研究了 Q460 高强角钢的各项性能，首次提出了 Q460 高强钢铁塔的设计参数及设计公式，完善了设计方法。

通过 Q460 高强钢焊接和热加工试验，首次总结出一套完善的焊接和热加工工艺，用以指导 Q460 高强钢的焊接和热加工，解决了 Q460 高强钢的焊接和热加工问题。

首次进行了 Q460 高强钢铁塔的设计及工程应用，取得了良好的经济效益和社会效益，目前 Q460 高强钢铁塔运行情况良好，证明本书作者研究的设计方法和设计参数安全可靠。

结合实际工程和试验研究结果，对 Q460 高强钢铁塔的加工技术进行了研究，总结出一套完善的 Q460 高强钢铁塔加工方法，保证了铁塔的加工质量。

结合实际工程对 Q460 高强钢铁塔技术经济指标进行了深入的分析，为推广应用 Q460 高强钢铁塔提供了有力支撑。

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，提高整个输电行业高强钢铁塔应用水平，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，应用前景广阔。

前 言

多年来，我国输电铁塔钢材主要以 Q235、Q345 热轧角钢为主，与国际先进国家相比，我国输电铁塔材质较单一、强度值偏低，致使我国设计的铁塔重量偏大、经济效益和社会效益偏低。Q460 高强钢铁塔的推广应用，可带来巨大的经济效益和社会效益，经过多年的研究与工程实践，Q460 高强钢铁塔已在我国输电线路上多个试点工程中得到应用。

Q460 高强钢铁塔是作者及其合作者历经多年研究成功的经济效益和社会效益均较优的新型铁塔。同普通强度铁塔相比，Q460 高强钢铁塔的设计参数、设计方法及加工技术要求等方面均具有特殊性。多年的试验研究、理论分析和工程应用，证明 Q460 高强钢铁塔安全可靠，具有明显的经济效益和社会效益，值得进一步推广应用。

本书总结了作者及其合作者多年从事 Q460 高强钢铁塔研究及工程应用的成果。全书共分 12 章，第 1 章对输电铁塔中高强钢应用情况及应用过程中需要解决的问题进行了概括总结，第 2 章介绍了 Q460 高强钢的特点，第 3 章介绍了 Q460 角钢轴心受压杆件力学性能，第 4 章介绍了 Q460 角钢两端偏心受压杆件力学性能，第 5 章介绍了 Q460 角钢一端偏心受压杆件力学性能，第 6 章介绍了 Q460 角钢局部屈曲性能及计算方法，第 7 章介绍了 Q460 角钢受压杆件稳定系数计算方法，第 8 章介绍了 Q460 高强钢的连接方法及相关注意事项，第 9 章介绍了 Q460 高强钢铁塔的设计参数及选用原则，第 10 章介绍了 Q460 真型塔设计情况及试验研究情况，第 11 章介绍了 Q460 高强钢铁塔的加工方法及其注意事项，第 12 章介绍了 Q460 高强钢铁塔工程应用情况及其技术经济指标。

本书作者为河南省电力勘测设计院郭咏华、张天光和王经运。张天光撰写第 1 章，郭咏华撰写第 2~9 章，王经运撰写第 10~12 章。全书由郭咏华统稿审定。

河南省电力勘测设计院的庞可、曹志民、韩为民、张晓辉、赵金丽、周旸、杨晓持、邓锦辉，中国电力科学研究院的徐德录、张东英、李茂华、韩钰、邢海军、常建伟、何长华、耿景都、丁平，西安建筑科技大学的郝际平、王先铁、曹

现雷，重庆大学的李正良等参与完成了本书有关科研试验工作；河南省电力公司的于旭东、华中电网公司的张云对本书作者给予了大力支持，作者在此一并表示感谢。

由于水平所限，本书不妥和需进一步完善之处，尚祈工程技术界的同仁不吝赐教指正。

作者

2010年11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 国内外标准中钢材强度等级情况	1
1.4 国内外输电铁塔中高强钢应用情况	2
1.5 Q460 高强钢铁塔的工程应用需要解决的问题	3
2 Q460 高强钢的特点	5
2.1 概述	5
2.2 Q460 角钢压杆的整体稳定性性能	5
2.3 缺陷对等边单角钢轴心受压构件稳定承载力的影响	9
3 轴心压杆力学性能	14
3.1 概述	14
3.2 轴心压杆试验研究	14
3.3 有限元分析方案及结果	29
3.4 轴心压杆稳定承载力设计方法	41
3.5 结论	45
4 两端偏心压杆力学性能	46
4.1 概述	46
4.2 两端偏心压杆试验研究	46
4.3 有限元分析方案及结果	59
4.4 两端偏心压杆稳定承载力设计方法	68
4.5 结论	70

5	一端偏心压杆力学性能	72
5.1	概述	72
5.2	一端偏心压杆试验研究	72
5.3	有限元分析方法及结果	86
5.4	一端偏心压杆稳定承载力设计方法	92
5.5	结论	95
6	局部屈曲	97
6.1	概述	97
6.2	局部屈曲试验研究	97
6.3	有限元分析方法及结果	103
6.4	强度折减系数设计方法	105
7	稳定系数	108
7.1	概述	108
7.2	国内规范计算方法	108
7.3	ASCE10—1997《美国输电铁塔设计导则》计算方法	110
7.4	结论	112
8	Q460 铁塔的连接	113
8.1	概述	113
8.2	螺栓连接	113
8.3	焊接连接试验研究	132
9	设计参数和选用原则	149
9.1	概述	149
9.2	设计参数	149
9.3	受拉角钢使用原则	151
9.4	受压高强角钢使用原则	151
10	真型塔设计与试验研究	155
10.1	真型塔试验介绍	155
10.2	试验结果与分析	157
11	Q460 铁塔的加工	159
11.1	概述	159
11.2	热加工试验研究	159
11.3	Q460 铁塔冷加工工艺研究	163
11.4	结论	165

12 工程应用	166
12.1 概述	166
12.2 工程应用情况	166
12.3 经济效益比较	166
12.4 社会效益分析	169
12.5 结论	169
参考文献	171
18	171
19	171
20	171
21	171
201	171
204	171
205	171
206	171
207	171
208	171
209	171
210	171
211	171
212	171
213	171
214	171
215	171
216	171
217	171
218	171
219	171
220	171
221	171
222	171
223	171
224	171
225	171
226	171
227	171
228	171
229	171
230	171
231	171
232	171
233	171
234	171
235	171
236	171
237	171
238	171
239	171
240	171
241	171
242	171
243	171
244	171
245	171
246	171
247	171
248	171
249	171
250	171
251	171
252	171
253	171
254	171
255	171
256	171
257	171
258	171
259	171
260	171
261	171
262	171
263	171
264	171
265	171
266	171
267	171
268	171
269	171
270	171
271	171
272	171
273	171
274	171
275	171
276	171
277	171
278	171
279	171
280	171
281	171
282	171
283	171
284	171
285	171
286	171
287	171
288	171
289	171
290	171
291	171
292	171
293	171
294	171
295	171
296	171
297	171
298	171
299	171
300	171
301	171
302	171
303	171
304	171
305	171
306	171
307	171
308	171
309	171
310	171
311	171
312	171
313	171
314	171
315	171
316	171
317	171
318	171
319	171
320	171
321	171
322	171
323	171
324	171
325	171
326	171
327	171
328	171
329	171
330	171
331	171
332	171
333	171
334	171
335	171
336	171
337	171
338	171
339	171
340	171
341	171
342	171
343	171
344	171
345	171
346	171
347	171
348	171
349	171
350	171
351	171
352	171
353	171
354	171
355	171
356	171
357	171
358	171
359	171
360	171
361	171
362	171
363	171
364	171
365	171
366	171
367	171
368	171
369	171
370	171
371	171
372	171
373	171
374	171
375	171
376	171
377	171
378	171
379	171
380	171
381	171
382	171
383	171
384	171
385	171
386	171
387	171
388	171
389	171
390	171
391	171
392	171
393	171
394	171
395	171
396	171
397	171
398	171
399	171
400	171
401	171
402	171
403	171
404	171
405	171
406	171
407	171
408	171
409	171
410	171
411	171
412	171
413	171
414	171
415	171
416	171
417	171
418	171
419	171
420	171
421	171
422	171
423	171
424	171
425	171
426	171
427	171
428	171
429	171
430	171
431	171
432	171
433	171
434	171
435	171
436	171
437	171
438	171
439	171
440	171
441	171
442	171
443	171
444	171
445	171
446	171
447	171
448	171
449	171
450	171
451	171
452	171
453	171
454	171
455	171
456	171
457	171
458	171
459	171
460	171
461	171
462	171
463	171
464	171
465	171
466	171
467	171
468	171
469	171
470	171
471	171
472	171
473	171
474	171
475	171
476	171
477	171
478	171
479	171
480	171
481	171
482	171
483	171
484	171
485	171
486	171
487	171
488	171
489	171
490	171
491	171
492	171
493	171
494	171
495	171
496	171
497	171
498	171
499	171
500	171
501	171
502	171
503	171
504	171
505	171
506	171
507	171
508	171
509	171
510	171
511	171
512	171
513	171
514	171
515	171
516	171
517	171
518	171
519	171
520	171
521	171
522	171
523	171
524	171
525	171
526	171
527	171
528	171
529	171
530	171
531	171
532	171
533	171
534	171
535	171
536	171
537	171
538	171
539	171
540	171
541	171
542	171
543	171
544	171
545	171
546	171
547	171
548	171
549	171
550	171
551	171
552	171
553	171
554	171
555	171
556	171
557	171
558	171
559	171
560	171
561	171
562	171
563	171
564	171
565	171
566	171
567	171
568	171
569	171
570	171
571	171
572	171
573	171
574	171
575	171
576	171
577	171
578	171
579	171
580	171
581	171
582	171
583	171
584	171
585	171
586	171
587	171
588	171
589	171
590	171
591	171
592	171
593	171
594	171
595	171
596	171
597	171
598	171
599	171
600	171
601	171
602	171
603	171
604	171
605	171
606	171
607	171
608	171
609	171
610	171
611	171
612	171
613	171
614	171
615	171
616	171
617	171
618	171
619	171
620	171
621	171
622	171
623	171
624	171
625	171
626	171
627	171
628	171
629	171
630	171
631	171
632	171
633	171
634	171
635	171
636	171
637	171
638	171
639	171
640	171
641	171
642	171
643	171
644	171
645	171
646	171
647	171
648	171
649	171
650	171
651	171
652	171
653	171
654	171
655	171
656	171
657	171
658	171
659	171
660	171
661	171
662	171
663	171
664	171
665	171
666	171
667	171
668	171
669	171
670	171
671	171
672	171
673	171
674	171
675	171
676	171
677	171
678	171
679	171
680	171
681	171
682	171
683	171
684	171
685	171
686	171
687	171
688	171
689	171
690	171
691	171
692	171
693	171
694	171
695	171
696	171
697	171
698	171
699	171
700	171
701	171
702	171
703	171
704	171
705	171
706	171
707	171
708	171
709	171
710	171
711	171
712	171
713	171
714	171
715	171
716	171
717	171
718	171
719	171
720	171
721	171
722	171
723	171
724	171
725	171
726	171
727	171

绪 论

1.1 概 述

随着我国冶金工业的不断发展，高强度钢材制造质量提高较快且日趋稳定，这在一定程度上使输电铁塔采用更高强度钢材成为可能。在线路工程中采用 Q460 高强钢铁塔（简称 Q460 铁塔）可取得良好的经济效益和社会效益，有利于提高我国电网建设技术水平。

1.2 国内输电铁塔现状

长期以来，我国输电线路铁塔用材主要以 Q235 和 Q345 热轧角钢为主，与国际先进国家相比，我国输电铁塔所用钢材的材质单一、强度值偏低、材质的可选择余地小^[1~2]。随着我国电力需求的不断增长，同时由于我国土地资源紧缺以及环保要求提高，线路路径选取、沿线房屋等设施的拆迁问题也日趋严重，大容量、高电压等级输电线路得到了迅速发展，出现了同塔多回路线路，以及更高电压等级的交流 750、1000kV 及直流±800kV 输电线路。所有这些使得铁塔趋于大型化，杆塔设计荷载也越来越大，常用热轧角钢在强度和规格上都难以满足大荷载杆塔的使用要求。

大荷载杆塔可以使用组合截面角钢，但组合截面角钢风载体型系数较大，杆件数量及规格多，节点构造复杂，连接板、构造板用量多，安装复杂，大大增加了工程建设投资。钢管塔存在构造复杂、焊缝质量不易控制、加工生产效率低、管材价格及加工成本高、塔厂加工设备投入大等缺点。

多年的铁塔设计工作，使铁塔的型式已经趋于完善化，要进一步节省造价，只能从材质上入手。

1.3 国内外标准中钢材强度等级情况

现将部分有代表性的钢材标准列入表 1-1 中，可以看出，目前我国最新规范



已经有高强度钢材相关规定，但由于我国高强钢的应用起步较晚，且高强钢在输电铁塔领域应用研究较少，目前还没有大范围推广应用。与国外先进国家相比，我国输电铁塔用角钢强度值偏低、材质可选择余地小，使得我国设计的铁塔往往大而重，也使得我们在国外投标工程中往往处于劣势。

表 1-1 国内外标准中最大强度等级的钢材

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	BS 4360	55C-E	450	低合金钢
日本	JIS G3101	SS540	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	10XCH	392	低合金钢
		12H2M ϕ A10	686	高强度钢
中国	GB 50017—2003	Q420	420	低合金钢
	GB/T 1591—2008	Q690	690	低合金结构钢
	GB 16270—2009	Q960	960	高强度结构钢，仅钢板

冶金工业信息标准研究院联合有关单位制定了 YB/T 4163—2007《钢塔用热轧角钢》，该标准于 2007 年 9 月 1 日正式实施，首次为 Q460 角钢的制造和工程应用提供了依据。

1.4 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，辅材采用角钢 SS41 或 STK41（屈服强度 255MPa）型钢，主材采用钢管 SS55 或 STK55（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（JS690S 钢）；欧美国家大多采用 A36、G50、GR65（屈服强度为 450MPa）等级的钢材。

国内，2002年华东电力设计院设计的500kV黄浦江吴淞口大跨越工程跨越钢管塔就首次采用了Q390钢材，主要用在塔身下面四段主材，该跨越塔塔高177.5m，管径1000mm，壁厚24mm；上海维蒙特工业（中国）有限公司采用美国家标准ASTM A572 GR65在上海宝钢生产了屈服强度为450 MPa的钢材，已用于国内220kV线路钢管杆和500kV变电构架；2005年，在750kV官亭—兰州东输电线路中，成功采用了Q420高强角钢，使用了Q420高强钢的JG2型转角塔还成功通过了真型试验，试验数据与计算分析相当符合，表明Q420高强钢在铁塔结构中使用是安全可靠的，Q420角钢已经大量应用于包括1000kV线路在内的众多线路，许多塔厂有了加工经验；2007年至今，本书作者及其合作者在平顶山—洛阳、华豫发电厂—信阳变电站、禹州发电厂—许昌、焦西—塔铺、庄周—永城和平顶山—白河等6条500kV线路工程中成功设计应用了Q460铁塔，部分线路已运行一年以上，运行情况均良好，表明将本书推荐的Q460铁塔的设计理论应用于实际工程是安全可靠的。

1.5 Q460高强钢铁塔的工程应用需要解决的问题

一、Q460高强钢受压杆件（简称压杆）设计方法和设计参数

由于钢材强度的提高，构件的抗力分项系数、强度折减系数、稳定系数等设计参数和相关设计方法均相应变化，目前国内普通材质压杆承载力设计方法和设计参数已相当成熟，但不能直接用于Q460高强钢。

Q460高强钢压杆的承载力主要和杆件的换算长细比、宽厚比和边界条件有关。Q460高强钢压杆根据边界条件不同可分为3种情况：一端偏心、两端偏心和一端轴心。相同的杆件，由于边界条件不同，其承载力不同。

二、Q460高强钢的生产

输电线路铁塔要求角钢的冲击性能达到B级，Q460高强角钢B级别冲击实验值偏低，保证能力不强，控制不好时，生产中会出现不能达到B级的情况，有降级处理问题。降级后的A级角钢没有用户，会给生产企业造成极大浪费。

目前，对于大型钢铁企业来说，高强度钢材的生产已不再困难，钢材质量提高较快且日趋稳定，使输电线路杆塔采用高强度钢材成为可能。

三、Q460高强钢铁塔的连接

Q460高强钢铁塔的连接主要有焊缝连接和螺栓连接两种形式。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。普通强度钢材螺栓连接的计

算方法和构造要求不能直接用于 Q460 高强钢铁塔的设计。

四、Q460 高强钢铁塔加工工艺

Q460 高强钢铁塔的剪切、制孔、制弯、镀锌等主要工序与普通钢材有所不同，在工程应用过程中需要对铁塔加工工艺进行详细规定。

Q460 高强钢的特点

2.1 概述

在大负荷铁塔设计中, Q460 钢材由于强度高, 一方面可在一定程度上有效避免主材双肢, 减少双肢所需的构造单元, 使塔重减轻; 另一方面, 也在一定程度上减少了基础作用力, 相应塔型还可以适当减小根开, 以节约占地和适应山地的需要。同时铁塔选材规格小, 相应减小了塔材的挡风面积, 从而减小了塔身风荷载, 形成了铁塔受力的良性循环, 最终使塔材规格小、重量轻、节约占地, 达到降低工程造价的目的。

但由于国内对 Q460 钢材各项性能的研究起步较晚, 目前 Q460 铁塔尚未在全国范围内推广应用。本章将对 Q460 高强钢的稳定性能进行详细分析。

2.2 Q460 角钢压杆的整体稳定性能

由于 Q460 角钢压杆构件偏心的影响, 其承载力差别较大。在实际工程设计中, 通过构件长细比修正系数, 将两端偏心压杆和一端偏心压杆构件进行长细比修正, 然后按轴心受压构件进行设计, 多年的工程实践证明, 该方法安全有效。本节仅以轴心受压构件为例, 对 Q460 角钢受压构件整体稳定性能进行理论分析。

2.2.1 屈曲状态

等边单角钢为单轴对称截面, 其轴心受压时的屈曲状态分为整体屈曲和局部屈曲, 整体屈曲又可分为弯曲屈曲和弯扭屈曲^[3]。

一、整体屈曲

(1) 弯曲屈曲。对无缺陷的轴心受压构件, 当压力较小时, 构件保持顺直, 或存在微弯形式, 随压力增加, 弯曲变形增大而使构件丧失承载力。这种变形称为构件的弯曲屈曲。

(2) 弯扭屈曲。当轴力达到某一临界值, 角钢可能发生绕非对称轴弯曲变形, 也可能发生绕对称轴弯曲变形, 同时伴随有扭转变形, 而使构件丧失承载力。这种变形称为构件的弯扭屈曲。

二、局部屈曲

在轴心压力作用下, 角钢双肢都承受压力。如果双肢的宽度较大, 而厚度相对较薄时, 就可能在构件丧失整体稳定或强度破坏之前, 各自先发生局部屈曲, 即双肢板件偏离其原来的平面位置而发生波状鼓屈。局部屈曲可能导致构件较早地丧失承载力。

2.2.2 弹性屈曲

(1) 弹性弯曲屈曲。轴心压杆承载能力的极限状态是丧失稳定, 完善弹性直杆失稳的临界力可以由著名的欧拉公式算得

$$N_{cr} = \pi^2 EI / (\mu l)^2 = \pi^2 A / \lambda^2 \quad (2-1)$$

式中 μ —构件的计算长度系数^[4]。

式(2-1)是杆件能够继续保持直线平衡形式的极限荷载, 超过这一荷载后杆件就发生弯曲变形。

(2) 弹性弯扭屈曲。等边单角钢是单轴对称截面, 丧失直线形式的平衡并不一定是由直变弯, 也可能弯曲和扭转同时发生, 即弯扭屈曲。只有一个对称轴的等边单角钢截面, 剪心 s 和形心 c 不重合(见图 2-1)。当杆件绕对称轴 cy 弯曲时, 产生的剪力不经过截面剪心, 必然导致杆件扭转。

图 2-2(a) 所示的等边单角钢轴心受压构件截面绕对称轴有弯曲变形 [见图

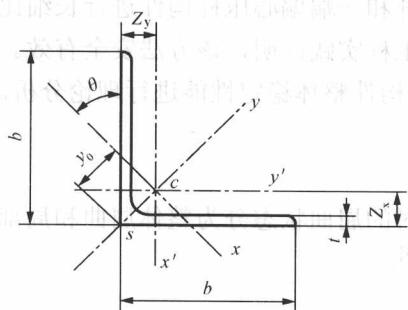


图 2-1 等边单角钢截面

Z_x , Z_y —重心距离; b —肢宽;

t —肢厚; c —形心

2-2(b)], 绕纵轴有扭转变形 [见图 2-2(c)]。离左端距离为 z 处截面剪心的位移 u , 扭转角 φ 。采用两套坐标系, 一套是与原构件相对应的固定坐标系 $oxyz$, 另一套是与变形后构件相对应的移动坐标系 $o'\xi\eta\zeta$ 。由于侧向位移 u 较小, xz 平面内的曲率可以用 u'' 表示, 而截面的扭转角 φ 也较小, 因此 $\xi\zeta$ 平面内的曲率 ξ'' 与 xz 平面内的曲率相同, 即 $\xi''=u''$ 。图 2-2(d) 表示隔离体上的诸力, 在右侧截面上作用有一轴线压力 P , 而形心的位移为 $u+y_0\sin\varphi \approx u+y_0\varphi$ 。

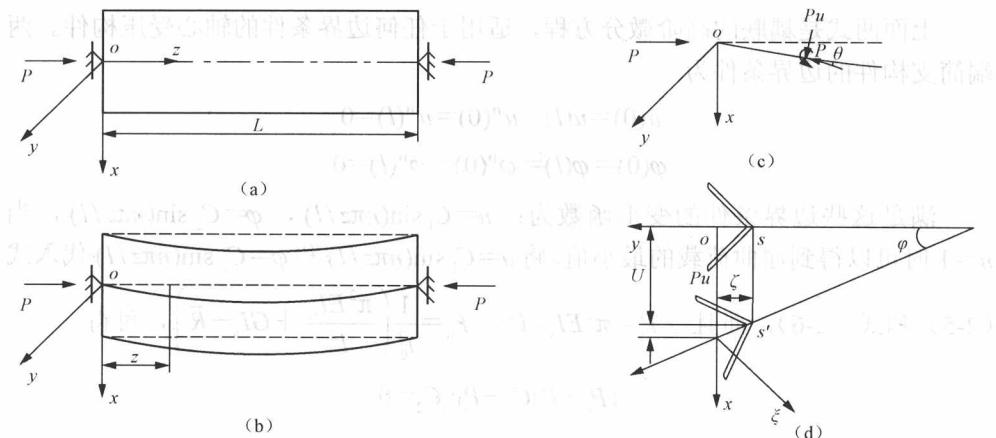


图 2-2 等边角钢轴心受压构件的弯扭变形

(a) 受力简图; (b) 弯曲变形; (c) 扭转变形; (d) 隔离体受力示意图

由图 2-2 知在 $\xi \zeta$ 平面内的弯矩平衡条件为 $-EI_{\eta} \xi'' = -EI_y u'' = P(u + y_0 \varphi)$, 于是可得弯矩的平衡方程

$$EI_y u'' + Pu + Py_0 \varphi = 0 \quad (2-2)$$

截面绕纵轴弯曲时, 纵轴的倾角为 θ , 因而在形心 o' 处产生一切力 $P \sin \theta \approx Ptan \theta \approx Pu'$ 。由图 2-2 (c) 可知, 此切力不通过截面的剪心 s' , 而是绕剪心形成一逆时针方向的力矩 $Pu' y_0 \cos \varphi \approx Pu' y_0$ 。截面上任意点离剪心的距离为 $\rho = \sqrt{x^2 + (y - y_0)^2}$ 。构件扭转时, Wagner 效应为

$$\begin{aligned} \int_A (\sigma + \sigma_r) \rho^2 dA \varphi' &= \int_A (\sigma + \sigma_r) [x^2 + (y - y_0)^2] dA \varphi' \\ &= \sigma (I_x + I_y + A y_0^2) \varphi' + \int_A \sigma_r (x^2 + y^2) dA \varphi' \\ &= P i_0^2 \varphi' + \bar{R} \varphi' \end{aligned} \quad (2-3)$$

式中, $i_0^2 = (I_x + I_y)/A + y_0^2$, $\bar{R} = \int_A \sigma_r (x^2 + y^2) dA$ 。

此时截面的非均匀扭矩应为 $P i_0^2 \varphi' + \bar{R} \varphi' + Pu' y_0$, 于是可得扭矩的平衡方程

$$EL_w \varphi'' + (P i_0^2 - G I_t + \bar{R}) \varphi' + Pu' y_0 = 0 \quad (2-4)$$

对式 (2-2) 微分两次, 对式 (2-4) 微分一次后得到

$$EI_y u^{IV} + Pu'' + Py_0 \varphi'' = 0 \quad (2-5)$$

$$EI_w \varphi''' + (P i_0^2 - G I_t + \bar{R}) \varphi'' + Pu'' y_0 = 0 \quad (2-6)$$

上面两式是耦联的高阶微分方程，适用于任何边界条件的轴心受压构件。两端简支构件的边界条件为

$$u(0)=u(l)=u''(0)=u''(l)=0$$

$$\varphi(0)=\varphi(l)=\varphi''(0)=\varphi''(l)=0$$

满足这些边界条件的变形函数为： $u=C_1 \sin(n\pi z/l)$, $\varphi=C_2 \sin(n\pi z/l)$, 当 $n=1$ 时可以得到屈曲荷载的最小值。将 $u=C_1 \sin(n\pi z/l)$ 和 $\varphi=C_2 \sin(n\pi z/l)$ 代入式 (2-5) 和式 (2-6), 而且令 $P_y=\pi^2 EI_y/l^2$, $P_w=\frac{1}{i_0^2}\left(\frac{\pi^2 EI_w}{l^2}+GI_t-\bar{R}\right)$, 可得

$$(P_y-P)C_1-Py_0C_2=0$$

$$-Py_0C_1+(P_w-P)i_0^2C_2=0$$

C_1 和 C_2 有非零解的条件为其系数行列式为零, 即构件的屈曲方程为

$$(P_y-P)(P_w i_0^2 - P t_0^2) - P^2 y_0^2 = 0 \quad (2-7)$$

或

$$\left[1 - (y_0/i_0)^2\right]P^2 - (P_y + P_w)P + P_y P_w = 0 \quad (2-8)$$

所以弯扭屈曲荷载为

$$P_{yw} = \frac{(P_y + P_w) - \sqrt{(P_y + P_w)^2 - 4P_y P_w \left[1 - (y_0/i_0)^2\right]}}{2 \left[1 - (y_0/i_0)^2\right]} \quad (2-9)$$

P_{yw} 必然小于 P_y , 也小于 P_w , 构件发生弯扭失稳的条件是 P_{yw} 应小于绕截面非对称轴的弯曲屈曲荷载 $P_x=\pi^2 EI_x/l^2$ 。

令 λ_w 和 λ_{yw} 分别表示扭转屈曲与弯扭屈曲的换算长细比, 将 $P_y=\frac{\pi^2 EA}{\lambda_y^2}$,

$P_w=\frac{\pi^2 EA}{\lambda_w^2}$ 和 $P_{yw}=\frac{\pi^2 EA}{\lambda_{yw}^2}$ 代入式 (2-9) 可得

$$\lambda_{yw} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\lambda_y^2 + \lambda_w^2 + \sqrt{(\lambda_y^2 + \lambda_w^2)^2 - 4\lambda_y^2 \lambda_w^2 (1 - y_0^2/i_0^2)} \right]} \quad (2-10)$$

当用式 (2-10) 确定 λ_{yw} 时, 对于单轴对称的单角钢截面, 其翘曲惯性矩用近似值 $I_w=0$, 其有利的误差一般不会超过 3%, 这样 $P_w=GI_t/i_0^2$, $\lambda_w=\pi\sqrt{E/\sigma_w}=5.07\sqrt{A/I_t}=8.77i_0/t$ 。若 $\lambda_{yw}>\lambda_x$, 构件将发生弯扭失稳; 若 $\lambda_{yw}\leqslant\lambda_x$, 构件将发生弯曲失稳。