

高强钢在输电线路工程中的应用

华北电力设计院工程有限公司

2011 年 11 月

目 录

1. 高强钢在输电线路工程中的应用现状

1. 1 国内外高强度钢的使用情况

1. 2 国内高强钢的生产和市场供货情况

2. 高强钢的材料特性

2. 1 高强钢材料参数

2. 2 高强钢材承载力比值

3. 高强钢在输电线路工程中的应用

3. 1 Q420 高强钢在 1000kV 交流输电铁塔中的应用

3. 2 Q420 高强钢在云-广±800kV 线直流输电铁塔中的应用

3. 3 Q420 高强钢在特高压直流试验基地的应用

3. 4 Q460 高强钢在 1000kV 交流输电钢管塔中的试验研究

3. 5 Q420 高强钢在向上、锦苏±800kV 线直流输电工程中的应用

3. 6 高强钢在超高压工程中的应用

4. 工程应用技术经济分析

4. 1 不同强度等级钢材的经济性

4. 2 工程应用技术经济比较

5. 采用高强钢时铁塔的构造和规格

5. 1 铁塔构造

5. 2 高强钢角钢的规格选用

5.3 高强螺栓的应用

6. 应用高强钢需注意的问题

7. 结束语

高强钢在输电线路工程中的应用

1. 高强钢在输电线路工程中的应用现状

铁塔结构是输电线路的直接支撑结构，其安全可靠性直接关系到整个电网的稳定运行，我国输电线路工程铁塔一般采用角钢或钢管结构，铁塔材料用材主要以 Q235 和 Q345 热轧角钢型材或钢板为主，具有强度稳定性好、离散度低的优点，但缺点是屈服点低，与国外先进国家相比我国输电铁塔结构所用钢材强度值偏低、可选择的范围较小，如日本常用的 SH590 钢屈服强度是 440Mpa，美国的 ASTM A572 钢，屈服强度为 450Mpa。近几年，随着我国电力建设的快速发展和特高压交、直流工程的建设，使得铁塔趋于大型化，同塔多回路、电压等级为特高压等都使铁塔设计荷载越来越大，常用的 Q235 和 Q345 热轧角钢强度和规格难以满足工程使用要求，虽然可用组合角钢和钢管来解决但在加工、施工和经济性等方面存在一些弊端，经优化设计和综合技术经济比较采用高强度的 Q420/Q460 高强钢更具用实用性和经济性。因此在近几年设计的特高压交流 1000kV、直流±800kV 工程、750kV、±660kV 以及 500kV 的同塔双回路等输电线路工程都大量的采用了 Q420/Q460 高强钢，取得了较好的经济和社会效益。

1.1 国内外高强度钢的使用情况

目前我国输电线路铁塔所采用的钢材强度等级主要是 Q235 和 Q345 两种，其中 Q235 为碳素结构钢，Q345 为低合金钢，Q235 和 Q345 钢材具有强度稳定

性好、离散度低的优点，但存在的缺点是屈服点太低。与国外先进国家相比，我国输电铁塔结构所用钢材的材质单一、强度值偏低、材质的可选择余地小。

下表给出了各国输电线路杆塔上已采用过高强钢材的情况。

各国高强钢材的屈服强度

钢号	屈服强度 (MPa)	供货品种	国 家
SH590P	440	钢板、型钢	日本
SH590S	440	钢板、型钢	日本
JS690S	520	型钢	日本
STK 590	440	钢管	日本
GR65	450	钢管	欧美
Q420	420	角钢、钢板	中国
Q460	460	角钢、钢板	中国

就线路中经常使用的同类结构钢而言，国际上在输电线路铁塔材料方面，有许多国家已经采用了比我国高强度钢高得多的钢材，欧美国家大多采用A36、G50、GR65(屈服强度450MPa)等级钢材，日本国家大多采用SH590(屈服强度440MPa)、JS690(屈服强度520MPa)等级钢材，。与美国的钢材相比，美国的ASTM A572 Gr65，钢材最低屈服强度可达450MPa，与我国Q460强度持平，比Q345强度高30%；A572 Gr50钢材与我国Q345强度相当，A36屈服点250.0MPa比Q235高13MPa；与日本的钢材相比，日本SS540钢材屈服强度400MPa，比我国Q345强度高约16%，SS400钢材屈服点245MPa，比Q235高10MPa。而且国外

常用角钢规格品种齐全，最大规格为L250×35，L40×3及以上等边角钢常用规格达84种，而我国常用的大约有37种；我国等边角钢最大规格为L200×24。

随着电力建设的快速发展，铁塔趋于大型化，铁塔设计荷载也越来越大，目前常用的Q235和Q345热轧角钢强度和规格已难以满足使用要求，解决此问题一般可以采用组合角钢和钢管两种材料型式。采用组合角钢来满足设计要求不但设计、加工、施工复杂，而且由于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、辅助材用量多，从而导致铁塔指标增加；采用钢管塔虽然强度容易满足，而且可以降低铁塔塔身风负荷，但钢管塔节点处理复杂，焊接量大，塔材运输困难，且管材价格相对较高，因此在输电线路中减少铁塔耗钢指标的一个重要措施是采用高强钢材，高强钢可有效提高杆件承载力，有效降低铁塔的塔重，降低工程总投资。

近几年Q420高强钢在750kV和±800kV、1000kV电压等级输电线路中和500kV同塔双回线路工程中的得到广泛应用，取得了较好的经济和社会效益。Q460高强钢的应用也正在得到科研、设计和建设人员的关注，在输电线路工程中进入试验研究和工程逐步应用阶段。

1.2 国内高强钢的生产和市场供货情况

目前，多数钢厂的生产能力在强度方面已经达到或超过了Q420、Q460的强度等级，铁塔用钢主要是角钢和钢板，通过调研和近几年工程应用，强度超过Q420、Q460的高强钢板材市面上都有现货，而且能够生产的厂家也比较多，如唐钢、济钢、鞍钢、邯钢、宝钢、武钢等，其市场供应没有问题；但Q420、Q460的角钢由于市场需求量少，产量比较小，市面上没有现货，其规格和用量都需要预定排产。目前，国内可生产角钢的厂家中唐山钢铁厂、鞍山宝德轧钢厂、无锡金鑫钢厂、济南钢铁厂、马鞍山钢铁公司等。

如平板（钢板）(Q420/Q460) 规格 厚: 6~25mm, 宽: 1500~2200mm, 长: 6000~12000mm; 价格 18~25mm 厚范围价格: 4200~5000 元/吨左右。

如高强度角钢 (Q420): 主要是按工程应用角钢规格表进行生产, 规格一般肢宽在 125~200mm 之间, 最大规格可生产到 L200×24, 价格 5000 元/吨左右。

对于 Q460 角钢, 钢材除必须满足屈服强度、抗拉强度、延伸率等指标外, 还要满足低温冲击韧性的要求, 国内可生产角钢的厂家中唐山钢铁厂等。

2. 高强钢的材料特性

2.1 高强钢材料参数

目前我国已经有了可以使用的高屈服点钢材 Q390、Q420 和 Q460, 国标《钢结构设计规范》(GB50017—2003)、《110kV—750kV 架空输电线路设计规范》(GB50545—2010) 给出了高强度刚材的强度设计取值, 如下表:

高强度钢材的强度设计值表

材料类别		厚度或直径 mm	抗 拉 f	抗压和抗弯 f	抗剪 fv	孔壁承压 fc
钢 材	Q390	≤16	350	350	205	530
		>16—35	335	335	190	510
		>35—50	315	315	180	480
		>50—100	295	295	170	450
	Q420	≤16	380	380	220	560
		>16—35	360	360	210	530
		>35—50	340	340	195	510
		>50—100	325	325	185	480

		≤ 16	415	415	240	590
	Q460	$>16-35$	395	395	230	560
		$>35-50$	380	380	220	540
		$>50-100$	360	360	210	535

Q235 与 Q345 钢材强度设计值 N/mm^2

材料	类别	厚度或直径 (mm)	抗拉	抗压和抗弯	抗剪	孔壁承压*
钢 材	Q235	≤ 16	215	215	125	370
		$>16-40$	205	205	120	
		$>40-60$	200	200	115	
		$>60-100$	190	190	110	
	Q345	≤ 16	310	310	180	510
		$>16-35$	295	295	170	490
		$>35-50$	265	265	155	440
		$>50-100$	250	250	145	415

高强钢材料焊接的强度设计值表

N/mm^2

焊接方法和焊条类型	构件钢材		对接焊缝				角焊缝 抗拉、抗压 和抗剪	
	钢号	厚度或 直 径 mm	抗 压	焊缝质量为下列等级时， 抗拉和抗弯		抗 剪		
				一级、二级	三 级			
自动焊、半自动焊和 E55××型焊条的手工 焊	Q390	16	350	350	300	205	220	
		$16-35$	335	335	285	190		
		$35-50$	315	315	270	180		
自动焊、半自动焊和 E55××型焊条的手工 焊	Q420	16	380	380	320	220	220	
		$16-35$	360	360	305	210		
		$35-50$	340	340	290	195		
自动焊、半自动焊和	Q460	16	415	415	350	240	240	

焊接方法和焊条类型	构件钢材		对接焊缝				角焊缝 抗拉、抗压 和抗剪	
	钢号	厚度或 直 径 mm	抗 压	焊缝质量为下列等级时， 抗拉和抗弯		抗 剪		
				一级、二级	三 级			
E60××型焊条的手工焊		16—35 35—50	395 380	395 380	335 325	230 220		

高强度钢 Q390/Q420/Q460 与普通 Q235/Q345 钢材相比，本身具有强度高的特点，在强度上能提高很多，但其稳定系数折减也比 Q235 和 Q345 钢材快。

由于 Q390 钢与 Q345 钢在强度上提高不是很多，工程常用的高强钢是 Q420 或 Q460 钢。

2.2 不同强度等级钢材的承载力对比

铁塔受力材主要由轴心受力的强度控制和轴心受压稳定控制，采用 Q420/Q460 高强钢与普通 Q235 和 Q345 钢材相比承载力有明显提高。

强度等级钢材的强度承载力比值 (厚度<16mm)

钢材品种	抗拉或抗压设计值 N/mm^2	与 Q235 的承载力比值	与 Q345 的承载力比值
Q235	215	1	
Q345	310	1.44	1
Q420	380	1.77	1.23
Q460	415	1.93	1.34

与普通钢材相比，高强钢本身具有强度高的特点，以中心受压主材为例，不同强度等级钢材的承载力对比见下表：

Q420/Q345强度提高比值表

长细比 角钢规格	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
L125×8	1.11	1.11	1.10	1.09	1.07	1.04	1.02	0.99	0.97	0.96	0.95	0.95
L125×10	1.22	1.21	1.21	1.19	1.17	1.15	1.12	1.09	1.07	1.06	1.05	1.04
L125×12	1.22	1.21	1.21	1.19	1.17	1.15	1.12	1.09	1.07	1.06	1.05	1.04
L125×14	1.22	1.21	1.21	1.19	1.17	1.15	1.12	1.09	1.07	1.06	1.05	1.04
L140×10	1.13	1.13	1.12	1.10	1.09	1.06	1.03	1.01	0.99	0.98	0.97	0.96
L140×12	1.22	1.21	1.21	1.19	1.17	1.15	1.12	1.09	1.07	1.06	1.05	1.04
L140×14	1.22	1.21	1.21	1.19	1.17	1.15	1.12	1.09	1.07	1.06	1.05	1.04
L140×16	1.22	1.21	1.21	1.19	1.17	1.15	1.12	1.09	1.07	1.06	1.05	1.04
L160×10	1.11	1.10	1.09	1.08	1.06	1.04	1.01	0.99	0.97	0.95	0.95	0.94
L160×12	1.17	1.16	1.16	1.14	1.12	1.10	1.07	1.04	1.03	1.01	1.00	1.00
L160×14	1.22	1.21	1.21	1.19	1.17	1.15	1.12	1.09	1.07	1.06	1.05	1.04
L160×16	1.22	1.21	1.21	1.19	1.17	1.15	1.12	1.09	1.07	1.06	1.05	1.04
L180×12	1.12	1.11	1.10	1.09	1.07	1.05	1.02	1.00	0.98	0.96	0.96	0.95
L180×14	1.19	1.19	1.18	1.17	1.15	1.12	1.09	1.06	1.05	1.03	1.02	1.02
L180×16	1.22	1.21	1.21	1.19	1.17	1.15	1.12	1.09	1.07	1.06	1.05	1.04
L180×18	1.22	1.21	1.20	1.19	1.17	1.14	1.11	1.08	1.06	1.05	1.03	1.03
L200×14	1.13	1.12	1.11	1.10	1.08	1.06	1.03	1.00	0.99	0.97	0.96	0.96
L200×16	1.22	1.21	1.21	1.19	1.17	1.14	1.12	1.09	1.07	1.05	1.05	1.04
L200×18	1.22	1.21	1.20	1.19	1.17	1.14	1.11	1.08	1.06	1.05	1.03	1.03
L200×20	1.22	1.21	1.20	1.19	1.17	1.14	1.11	1.08	1.06	1.05	1.03	1.03
L200×24	1.22	1.21	1.20	1.19	1.17	1.14	1.11	1.08	1.06	1.05	1.03	1.03

Q460/Q345强度提高比值表

长细比 角钢规格	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
L125×8	1.16	1.15	1.14	1.12	1.09	1.05	1.01	0.98	0.95	0.93	0.92	0.91
L125×10	1.32	1.30	1.29	1.27	1.23	1.19	1.15	1.11	1.08	1.06	1.05	1.04
L125×12	1.33	1.32	1.31	1.28	1.25	1.21	1.16	1.12	1.09	1.07	1.06	1.05
L125×14	1.33	1.32	1.31	1.28	1.25	1.21	1.16	1.12	1.09	1.07	1.06	1.05
L140×10	1.19	1.18	1.16	1.14	1.11	1.08	1.03	1.00	0.97	0.96	0.94	0.94
L140×12	1.33	1.32	1.31	1.28	1.25	1.21	1.16	1.12	1.09	1.07	1.06	1.05
L140×14	1.33	1.32	1.31	1.28	1.25	1.21	1.16	1.12	1.09	1.07	1.06	1.05
L140×16	1.33	1.32	1.31	1.28	1.25	1.21	1.16	1.12	1.09	1.07	1.06	1.05
L160×10	1.15	1.14	1.12	1.10	1.08	1.04	1.00	0.96	0.94	0.92	0.91	0.90
L160×12	1.24	1.22	1.21	1.19	1.16	1.12	1.07	1.04	1.01	0.99	0.98	0.97
L160×14	1.33	1.32	1.31	1.28	1.25	1.21	1.16	1.12	1.09	1.07	1.06	1.05
L160×16	1.33	1.32	1.31	1.28	1.25	1.21	1.16	1.12	1.09	1.07	1.06	1.05
L180×12	1.17	1.15	1.14	1.12	1.09	1.05	1.01	0.98	0.95	0.94	0.93	0.92
L180×14	1.26	1.25	1.24	1.21	1.18	1.14	1.10	1.06	1.03	1.01	1.00	0.99

L180×16	1.33	1.32	1.31	1.28	1.25	1.21	1.16	1.12	1.09	1.07	1.06	1.05
L180×18	1.33	1.32	1.31	1.28	1.25	1.21	1.16	1.12	1.09	1.06	1.05	1.04
L200×14	1.18	1.17	1.16	1.14	1.11	1.07	1.03	0.99	0.97	0.95	0.94	0.93
L200×16	1.29	1.28	1.27	1.24	1.21	1.17	1.12	1.09	1.06	1.04	1.03	1.02
L200×18	1.33	1.32	1.31	1.28	1.25	1.21	1.16	1.12	1.09	1.06	1.05	1.04
L200×20	1.33	1.32	1.31	1.28	1.25	1.21	1.16	1.12	1.09	1.06	1.05	1.04
L200×24	1.33	1.32	1.31	1.28	1.25	1.21	1.16	1.12	1.09	1.06	1.05	1.04

以轴心受压主材 长 1500mm, L160×16 角钢为例, 不同强度等级钢材的承载力对比见下表:

L160×16 角钢 (1500mm) 不同强度等级钢材的承载力比值

钢材品种	稳定系数 ϕ	承载力 (kN)	与 Q235 的承载力比值	与 Q345 的承载力比值
Q235	0.868	915.688	1	
Q345	0.8180	1244.241	1.355	1
Q420	0.7860	1465.533	1.600	1.18
Q460	0.769	1547.033	1.689	1.24

由上表的示例可以看出, 采用高强度 Q420/Q460 钢材, 对常用的主材构件, 其强度和承载能力都有较大提高, Q420 强度较 Q235 提高 77%, 较 Q345 提高 23%, Q460 强度较 Q235 提高 77%, 较 Q345 提高 23%, 示例构件的承载力分别提高 60%; 和 18%; Q460 强度较 Q235 提高 93%, 较 Q345 提高 33%, 承载力分别提高 69% 和 24%。强度和承载能力都有明显提高, 因此可达到节约钢材的作用。

3. 高强钢在输电线路工程中的应用

3.1 Q420 高强钢在 1000kV 交流输电铁塔中的应用

1000kV 晋东南～南阳～荆门交流特高压试验示范工程是我国拥有自主知识产权、自主研发设计的第一条 1000kV 特高压交流输变电工程，输电线路起自山西省长治的晋东南 1000kV 变电站，经河南省南阳 1000kV 开关站，止于湖北省荆门 1000kV 变电站。输电线路单回架设，线路全长约 639.847km，额定电压为 1000kV，自然输送功率为 5000MW。由中国电力顾问集团公司和华北、中南、华东、西北、西南、东北六大设计院共同完成输电铁塔的设计，全线采用角钢型铁塔，依据路径特点优化设计了平地、丘陵地区适用的猫头型直线塔、山区适用的酒杯型直线塔和平字型耐张塔，塔高限制区门型限高塔，煤矿采动影响区分体型耐张塔等共 45 种塔型，猫头型及酒杯型直线塔采用导线呈中相“V”串边相“I”串排列。工程应用的铁塔经过优化设计后，塔身主材、横担主材及塔身横材等均采用了 Q420 高强钢，有效的降低了铁塔的材料耗量。

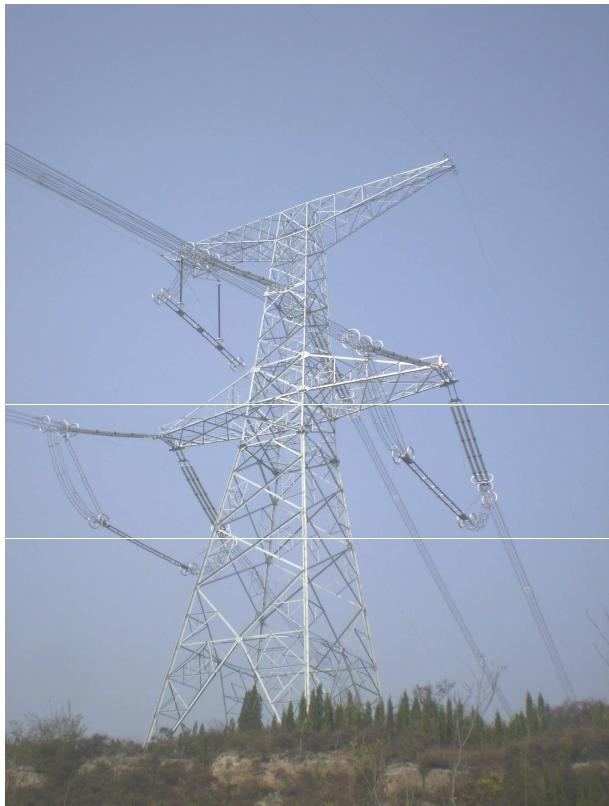




1000kV 猫头型直线塔实景



山区酒杯型直线塔实景



干字型耐张转角塔实景图



平丘地区猫头型直线塔实景图





限高区直线塔实景图



限高区耐张转角塔实景图



煤矿采动影响区分体耐张塔实景图

1000kV 特高压输电铁塔，采用 8 分裂 LGJ-500/35 导线，电气间隙、铁塔外荷载及塔型尺寸等都较一般 500kV 线路铁塔大且更为复杂，根据特高压工程建设“安全可靠、自主创新、经济合理、环境友好、国际一流”的原则，铁塔优化设计时在塔身主材、横担主材及塔身横材，角钢规格在 L100X8 以上时均采用了 Q420 高强钢，并配合 8.8 级 M24 的螺栓，优化了结构的构造，减少了设计、运输、安装的工作量，有效地降低了铁塔耗钢量和节省工程投资，取得了较好的经济效益。

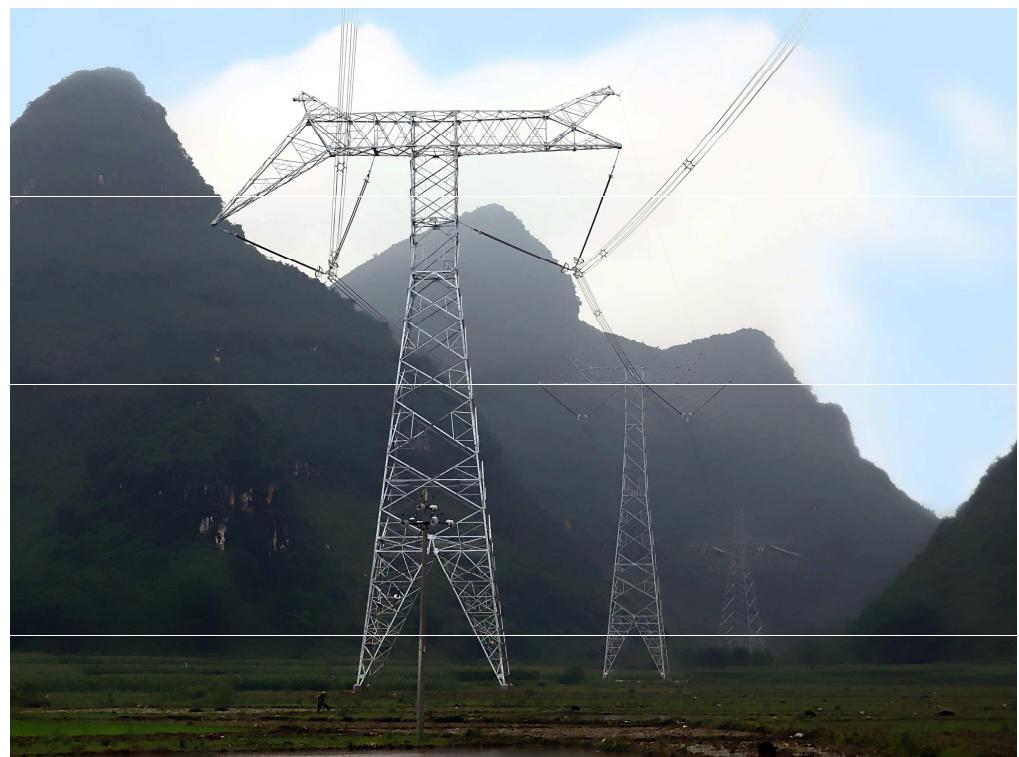
以 1000kV 特高压输电铁塔 ZBS2 酒杯型直线塔为例，呼称高 60m，全高 65m，单基塔重 63.471t，其中 Q420 高强钢应用 28.09 t，占整个塔重的 44%，塔腿主材如采用 Q345 钢材料规格为 2L180X16，采用 Q420 高强钢材料规格降为 2L160X14，塔身某段主材，如采用 Q345 钢材料规格为 2L180X12，采用 Q420 高强钢材料规格降为 L200X20；

以 1000kV 特高压输电铁塔 JTS1 干字型耐张塔为例，呼称高 45m，全高 72.3m，单基塔重 97.398t，其中 Q420 高强钢应用 33.635 t，占整个塔重的 34.5%，塔腿主材如采用 Q345 钢材料规格为 2L200X20，采用 Q420 高强钢材料规格降为 2L200X16，塔身某段主材，如采用 Q345 钢材料规格为 2L200X16，采用 Q420 高强钢材料规格降为 2L180X14；

经过铁塔优化计算采用 Q420 高强钢材对常用的主材构件，其强度和承载能力都有较大提高，降低塔重 6 – 8 % 左右。

3.2 Q420 高强钢在云-广±800kV 线直流输电铁塔中的应用

云南-广东±800 特高压直流输电线路工程，是由六大设计院和广东电力设计院联合设计的我国第一条特高压直流输电线路工程，导线采用 6 分裂 LGJ-630/45 导线，设计覆冰厚度 10mm-30mm，线路全长约 1417km，系统输送功率为 5000MW，全线采用角钢型铁塔，经过充分的合理规划及优化设计共设计了 49 种塔型，在铁塔结构的塔身主材、横担主材等关键部位均采用了 Q420 高强钢，与之相匹配的连接螺栓采用了 8.8 级高强螺栓。





3.3 Q420 高强钢在特高压直流试验基地的应用

2007 年在北京昌平科技园区建成了我国第一个进行 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电关键技术研究的特高压直流试验基地，它在电压等级、设计规模、综合试验能力等方面均处于世界领先地位，其中同塔双回直流试验线段总长 1084 m，是世界最长、试验线段可升压至 $\pm 1200\text{kV}$ 电压等级世界最高，包括电源终端塔、换极性塔、门型直线塔和门型锚塔等。其中门型直线塔总高 88 米宽 80 米，设有连接两侧立柱的固定横梁和两层各 60 米长活动横梁，采用全螺栓连接角钢结构，塔型结构主材采用十字四组合及双拼组合角钢，斜材采用 T 型双组合角钢，两层活动横梁垂直方向运动和水平移动为自动控制。该塔单基总重 705 吨，其中塔架重量 565 吨，两层活动横梁各重 70 吨。在铁塔设计时针对外荷载大的特点，在各种塔型结构的塔身主材、横担主材均采

用了 Q420 高强钢，与之相匹配的连接螺栓采用了 8.8 级高强螺栓，有效地降低了 6% 的塔重，在保证安全可靠的基础上取得了较好的经济效益。



3.4 Q460 高强钢在 1000kV 交流输电钢管塔中的试验研究

皖电东送淮南-上海 1000kV 交流输电线路工程是我国第一条交流特高压同塔双回路线路工程，线路全长 $2 \times 655.95\text{km}$ ；导线采用 $8 \times \text{ACSR}-630/40$ ，设计基准风速取 27m/s 、 30m/s 、 32m/s 三类风区，设计覆冰有 10mm 、 15mm 两类冰区。全线采用同塔双回路钢管塔结构，钢管塔材料采用 Q235 和 Q345 钢。在工程设计同时由国家电网公司、华北院、中国电科院和电力顾问集团公司组成课题组进行 Q460 高强钢的应用研究并选择了应用较多的一种直线型塔 SZ2U 直线塔进行了真型试验。

SZ2U 高强钢管塔全高 103.6 米，呼高 57 米，塔重 131.8 吨，该塔塔身主材、横担主材和部分横材采用 Q460 高强钢管，塔身主材高强钢管之间的连接采用 Q460 带颈锻造法兰，在国内输电线路工程中是首次，塔腿主材最大钢管直径 Q460 $\Phi 426\times10$ 。同时，钢管、高颈法兰和插板连接大量采用了系列化、标准化的成果，主材采用 Q460 高强钢后，与 Q345 相比，其重量减轻约 11%；（采用 Q345 钢材的同等设计条件和高度的塔型 SZ272P，单基重量 148.4 t，塔腿主材最大钢管直径 Q345 $\Phi 508\times12$ ）。采用高颈法兰和插板连接后，减少了焊接工作量，提高了加工的效率及质量。





2010 年 1 月 16 日 ~20 日，国内第一基 1000kV 同塔双回 Q460 钢管塔 SZ2U 塔真型试验在河北霸州特高压杆塔试验基地顺利通过了真型试验，钢管塔主材采用 Q460 高强钢管和 Q460 带颈对焊锻造法兰连接，在国内均为首次。

SZ2U 塔真型试验，先后顺利通过 4 个断线工况以及导地线安装、60° 大风、90° 大风和 60° 大风超载等共 8 个工况的试验。60° 大风超载工况试验，检验铁塔的极限承载力，加荷至设计荷载的 120% 时，主要受力杆件达到其屈服强度，与设计计算结果基本吻合，加荷至 130% 时，发生塑性变形但结构未破坏。试验表明 Q460 高强钢管和法兰的设计、加工等可以满足工程要求，也表明了钢管塔具有更好的承载性能与稳定能力。采用钢管作为同塔多回大荷载杆塔的主要受力构件，与角钢塔相比，塔重可减轻 15%~20%，基础砼量节省 20% 左右。采用 Q460 高强钢管与 Q345 相比，

直线塔可降低塔重 8~10%，转角塔降低 10~16%。使用 Q460 高强钢带颈锻造法兰后，法兰重量比刚性法兰可减轻 30%左右，降低塔重指标 2~3%。采用 Q460 高强钢管塔可有效降低塔重和基础耗材及工程造价，减小杆塔根开，压缩线路走廊宽度，减少拆迁和对植被的破坏、林木的砍伐，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。

3.5 Q420 高强钢在向上、锦苏±800kV 线直流输电工程中的应用

向家坝-上海±800kV 特高压直流输电线路工程和锦屏-苏南±800kV 特高压直流输电线路工程，导线分别采用 6 分裂 ACSR-720/50 导线和 6 分裂 ACSR-900/50 导线，线路全长 1980. km，输送容量为 7200MW。全线采用角钢型铁塔，在铁塔结构的塔身主材、横担主材等关键部位均采用了 Q420 高强钢，与之相匹配的连接螺栓采用了 8.8 级高强螺栓。

以向家坝-上海±800kV 特高压直流输电线路工程应用的 ZC30102 型直线塔为例，呼称高 60m，全高 66.5m，单基塔重 46.29t，其中 Q420 高强钢应用 19.80 t，占整个塔重的 42%，塔腿主材如果采用 Q345 钢材料规格需使用组合角钢 2L180X14，采用 Q420 高强钢材料规格可以为单肢角钢，Q420 L200X24，不仅降低了杆件规格，又减少了组合角钢连接的缀板和加工、安装工作量。

在锦屏-苏南±800 直流输电线路工程中研究应用了 Q420 大规格角钢，大规格角钢规格包括肢宽 220mm 厚度 16~26mm，肢宽 250mm 厚度 18~35mm，材质为 Q420 高强钢，通过对 ZC27105B 直线塔和 JC1、JC5D 耐张塔的计算分析比较和真型塔试验研究，采用 Q420 高强大规格角钢，由于规格宽和规格厚均加大，大幅提高单构件的承载能力，实现了单根大规格角钢代替双组合角钢，取消了角钢间的填板，减少了螺栓使用数量，降低铁塔钢耗指标，采用 Q420 大规格角钢可降低铁塔材料用量 2%~4% 左右，同时减轻加工、运输、安装等工作量，有利于造价控制和节能减排，具有好的安全性和经济性。

在特高压锦屏-苏南±800 直流输电线路工程中进行了真型试验和应用分析研究，

3.6 高强钢在超高压工程中的应用

Q420/Q460 高强钢在超高压线路工程中逐步得到应用，如西北电力设计院设计的 750kV 酒泉～安西双回输电线路工程，在 31m/s 以上的大风区应用同塔双回钢管塔 23 基，同塔双回路钢管塔主材采用了 Q420 C 高强度钢材，法兰采用 Q420 高强带颈锻造法兰。2009 年 11 月 28 日至 12 月 1 日，SJ2 钢管塔在特高压杆塔试验基地完成真型试验。并通过了 90° 大风超载至设计荷载的 120% 工况的试验。



750kV 酒泉～安西双回送电线路工程钢管塔真型试验

又如广东省电力设计研究院设计的 2009 年投运的 500kV 蝶岭至砚都送电线路

工程，该线路沿线地形主要为山地，路径长 155km，导线采用 4xLGJ- 720/50 钢芯铝绞线，同塔双回路、按 32m/s、35 m/s 风设计，主材采用 Q420 高强钢，该工程 Q420 高强钢的用量约为 3100 吨，采用 Q420 钢后使铁塔重量减少 7%，节约了本体投资，塔的钢材每千米指标 104 吨/km。

4 工程应用技术经济比较

4. 1 不同强度等级钢材的经济性

铁塔构件的选材主要是取决于其受力状态，对于铁塔受力材主要由轴心受力的强度控制和轴心受压稳定控制来确定。对于轴心受力的强度控制构件，其选材主要是由材料本身的强度来决定，构件材料量与材料强度设计值成反比，强度越高其所用材料越少；对于轴心受压稳定控制构件，构件的长细比 λ 是主要影响因素。

采用 Q420/Q460 高强钢材，对于由轴心受力强度控制的单根杆件，其强度和承载能力都有较大幅度提高，Q420 钢强度分别为 Q235 钢和 Q345 钢的 1.77 和 1.23 倍，Q460 钢强度分别为 Q235 钢和 Q345 钢的 1.93 和 1.34 倍。因此，在杆塔设计中，由轴心受力强度控制的构件采用高强钢有明显的优势，如铁塔受拉的横担上平面主材、塔身横材等采用高强钢降低塔材耗钢量效果明显。

强度等级钢材的强度承载力比值（厚度<16mm）

钢材品种	抗拉或抗压设计值 (N/mm ²)	与 Q235 的承载力比值	与 Q345 的承载力比值
------	----------------------------------	---------------	---------------

Q235	215	1	
Q345	310	1.44	1
Q420	380	1.77	1.23
Q460	415	1.93	1.34

对于由轴心受压稳定控制的铁塔受力材，如塔身主材、塔身斜材、横担下平面主材等构件，轴心受压稳定设计值与构件稳定系数 ϕ 值和压杆稳定强度折减系数 m_N 有关，受压稳定系数 ϕ 值的主要影响因素就是构件的长细比 λ ，随着钢材强度的增加，其稳定系数是减小的，也就是说杆件的承载能力并没有随其钢材强度增加而相应的成正比增长。

经过对 Q420/Q460 高强钢与普通钢材的大量的计算分析比较，对于角钢构件：

当构件长细比 λ 小于 40 时，构件由强度控制，

同规格 Q420 角钢比 Q345 角钢承载力提高约 19% – 22%，

同规格 Q460 角钢比 Q345 角钢承载力提高约 28% – 33%，

当构件长细比 λ 在 40–80 之间时，构件由稳定控制，

同规格 Q420 角钢比 Q345 角钢承载力提高约 8% – 19%，

同规格 Q460 角钢比 Q345 角钢承载力提高约 12% – 28%，

当构件长细比 λ 大于 80 时，构件由稳定控制，

同规格 Q420 角钢比 Q345 角钢承载力提高不足 5%，

同规格 Q460 角钢比 Q345 角钢承载力提高不足 12%，

当构件长细比 λ 小于 40 时，构件由强度控制，同规格 Q420/Q460 角钢比

Q345角钢承载力提高约19% – 22%和28% – 33%，Q420/Q460比Q345钢具有明显优势；当构件长细比 λ 在40–80之间时，构件由稳定控制，同规格Q420角钢比Q345角钢承载力提高约8% – 19%，Q460角钢比Q345角钢承载力提高约12% – 28%，采用Q420/Q460钢一般可使角钢规格降低1–2个规格，且长细比 λ 越低其优势越大；当构件长细比 λ 大于80时，构件由稳定控制，同规格Q420角钢比Q345角钢承载力提高不足5%，Q460角钢比Q345角钢承载力提高不足12%，不宜采用Q420/Q460高强钢。当构件长细比 λ 大于120时，Q420/Q460与Q345角钢承载力基本相当；

但要注意高强钢在强度上提高很多，但其稳定系数折减也比Q345钢材快。受压稳定系数的主要影响因素就是构件的长细比，随着钢材强度的增加，其稳定系数是减小的，也就是说杆件的承载能力并没有随其钢材强度增加而相应的成正比增长。同时还要注意尽量采取一些措施来避免构件局部应力集中。

4.2 工程应用技术经济比较

根据1000kV晋东南~南阳~荆门交流特高压试验示范工程及云南-广东、向家坝-上海、锦屏-苏南±800kV特高压直流输电线路工程铁塔结构设计应用Q420高强钢的技术经济分析和总结，工程设计中塔材使用Q420高强钢用量占全部铁塔总重约30% – 40%，对直线型塔和耐张型塔采用Q420高强钢和普通Q345钢材进行比较，直线塔的耗钢量将减少5%~7%，转角塔的耗钢量将减少8%~10%，具有较好的经济优势。

目前1000kV晋东南-南阳-荆门交流输电线路、云南-广东、向家坝-上海±800kV特高压直流输电线路工程，特高压直流试验基地试验线段都已投入运行，在750kV输电线路以及500kV输电线路等工程中得到应用，有了比较

成熟的工程实践经验，在保证安全可靠的基础上取得了较好的经济效益和社会效益。

通过特高压交直工程应用理论计算分析、实际塔型用钢量经济分析、杆件及部件试验、铁塔真型试验、工程应用结果及运行反馈意见，表明输电线路铁塔采用高强钢是安全可靠的，可降低铁塔材料耗量和工程造价，符合电网建设“资源节约、环境友好”和在设计成果中充分体现应用新技术、新工艺、新材料的要求。

5. 采用高强钢时铁塔的构造和规格

5.1 铁塔构造

对于铁塔受压构件，其选材主要由轴心受压的强度和轴心受压稳定来确定，对于轴心受拉构件，其选材主要由材料本身的强度来决定，铁塔采用何种强度等级的钢材主要取决于构件的受力特性和构件的长细比。

当角钢构件长细比大于120后，Q420、Q460与Q345角钢承载力趋于持平；当构件长细比小于40时，采用高强钢可使角钢规格有较大降低，且Q460优势更明显；当构件长细比在40~80之间时，构件由稳定控制，采用高强钢可使角钢规格有一定降低；当构件长细比大于80时构件完全由稳定控制，这时采用高强钢意义不大了。

采用高强钢后，铁塔型式的节间长度应与采用Q345时有区别，为了充分发挥材料的强度优势，主材采用的长细比通常取值为40~50，在该范围内，Q420的稳定系数降低幅度在1.6~6%，Q460的稳定系数降低幅度在2.5~10%，而Q420的材料强度比Q345提高约21%，Q460的材料强度比Q345提高约33%，强度的提高总是比稳定的降低多，对受力构件，高强钢的节间长度需反复进行优化设计计算，确定最优节间长度。

根据工程设计经验，一般工程Q235钢材作为一般铁塔辅助材的首选材

质，以充分体现其稳定强度好的性能。但对大荷载铁塔，由于构件内力较大，按照节点承受1/50主材内力或1/20斜材内力进行受力分析时，要求辅助材所提供的支撑力也大，因而构件规格大、螺栓个数也多。鉴于辅助材长细比比较大的特点，采用Q420和Q460高强钢不具有优势，而采用Q345钢构件规格一般要小于或最多不会超过Q235材质对应的规格，但Q345的孔壁挤压强度要比Q235高许多，可使螺栓数量得到减少，也避免或减小了辅助材用节点板，最终达到减小塔重的目的。

对构件之间连接的节点板，一般采用平板，高强钢材质的使用与以往普通钢基本相同，但由于高强钢存在热加工和焊接的工艺问题，弯板、制弯和对接焊接时应注意。

采用大规格高强度 Q420 角钢由于肢宽和肢厚均加大，可有效提高铁塔杆件的承载能力，与普通规格组合型角钢相比在承受荷载上有大幅度提高，可用单肢角钢替代常规的普通双组合角钢，用双拼组合角钢替代常规普通的四拼组合角钢，取消了角钢间的填板，减少了螺栓使用数量，降低铁塔钢材耗量，且铁塔整体受力状态和承载能力较好。

5.2 高强钢角钢的规格选用

根据近几年工程应用高强钢的经验，使用Q420/Q460高强钢，角钢规格最好在L125X8以上。

铁塔角钢构件一般来讲，小的Q345受压杆件，使用Q420代替时规格不会减小很多，且即使有所减小，减少的重量也很有限，这样的杆件采用Q420就不经济，采用Q460更是如此。对于大的角钢规格，特别是对于Q345的双肢和四肢杆件，若能采用Q420或Q460的单肢或双肢杆件代替，材料节约量将有优势，根据近几年工程应用高强钢的经验，使用Q420/Q460高强钢，主要应用于

塔身主材、横担主材及横材等部位，角钢规格最好在L125X8以上。

高强角钢的规格选用与其材料价格紧密相关的，优化计算和技术经济分析时应考虑采购和工程用量等因素。

5.3 高强螺栓的应用

采用 Q420/Q460 高强钢设计的构件，连接螺栓采用与之相匹配的 8.8 级高强螺栓比较适宜。

输电线路角钢铁塔结构中的连接方式主要是螺栓连接，而螺栓连接又以普通螺栓连接为主。普通螺栓连接的优点是施工简单、拆装方便，缺点是用钢量较多。随着高强钢在输电线路上的大量应用，与高强钢相匹配的高强螺栓也正在逐步得到应用。

铁塔连接螺栓一般常用的是 4.8 级和 6.8 级螺栓，Q420/Q460 高强钢的应用，为减少连接部件及节点处螺栓个数和缩小节点板的尺寸，可采用 8.8 级高强螺栓或适当应用 10.9 级高强螺栓。使用 8.8 级高强螺栓与铁塔结构的塔身主材、横担主材采用 Q420 高强钢相匹配，可以合理减少接头连接螺栓个数和节点板的重量，从而达到有效降低塔重的目的。

8.8 级高强螺栓在工程应用过程中要注意和说明材质选择和加工防腐工艺处理要求，热处理工艺技术是直接影响成品螺栓的整体性能的关键加工工序，避免发生高强螺栓易出现的氢脆断裂现象，保证成品螺栓的强度和韧性。

6. 应用高强钢需注意的问题

输电线路工程采用Q420/Q460高强钢需注意采取有效措施来避免构件局部应力集中：主要问题有：焊接、层状撕裂、热变形加工及镀锌等。

1) 焊接问题

高强钢在焊接冷却过程中，热影响区容易形成淬火组织，使近缝区的硬度提高，塑性下降，导致焊后发生裂纹。冷却速度越快，裂纹趋向越严重，

应力集中敏感性也越强。如果工艺编制不当，高强钢焊接结构的综合机械性能反而会低于普通钢。因此，为确保铁塔结构的焊接质量，需要对高强钢的焊接工艺进行规范，对焊工进行专业培训和考核。

2) 层状撕裂问题

层状撕裂是因为焊接收缩应力作用在钢板厚度方向时，以钢中非金属杂质为起点而产生与钢板轧制表面基本平行的裂纹。一般来讲层状撕裂与焊接接头有关，在T型、角型或十字型接头的厚钢板多道焊接件中易发生层状撕裂。此时就要求钢材具有板厚方向的收缩率要求，以防止钢材活动方向的分层、撕裂。国际焊接学会第九委员会的调查结果表明：层状撕裂与钢材的含硫量有很大关系，几乎所有层状撕裂事故都发生在含硫量 $\geq 0.02\%$ 的钢材上，此外还与钢材的含氢量、Al2O3、SiO2的含量有关，为保证钢材具有很好的Z向性能，必须严格控制上述物质的含量。由于输电线路铁塔承受的荷载越来越大，铁塔用型钢、钢板的规格也随之增大，所以对输电线路铁塔结构用钢材，特别是高强钢的Z向性能也应加以考虑，对采用Q420钢的构件，当板厚 $\geq 18\text{mm}$ 时，应注意焊接部位的层状撕裂问题。

3) 热变形加工问题

Q420、Q460等級別钢材的热变形加工与低等级材料的加工要求有本质不同，主要是在热变形加工后的材质性能如按照常规工艺进行时出现材料恶化的几率大幅度增加。必须采取附加的工艺措施，应引起各铁塔制造厂家的重视。

4) 热镀锌问题

高强钢铁塔构件和螺栓防腐采用热镀锌防腐措施可以满足要求。

热镀锌质量主要包括镀锌层厚度均匀性、表面质量和镀层冶金学方面（如

合金相组成、形态) 的控制问题等。在镀锌方面出现镀锌厚度不够和颜色不正的问题, 可能与 Q420 钢中一定含量的合金元素对钢结构构件热镀锌的影响有关, 分析不同合金元素对镀锌的影响以及根据不同成分的钢材应选用不同的热镀锌工艺需要更深一步的研究。

对 Q420/Q460 高强钢的质量等级, 应满足 Q420 高强钢不低于 B 级、Q460 高强钢不低于 C 级钢的要求, 当结构工作环境温度不高于-40℃对 Q420 钢和 Q460 钢应具有-40℃冲击韧性合格的保证, 质量标准应提高一级。

7. 结束语

输电线路铁塔应用 Q420/Q460 高强钢可有效提高杆件承载力、降低铁塔材料耗量和工程造价, 符合电网建设“资源节约、环境友好”和在设计成果中充分体现应用新技术、新工艺、新材料的要求, 在输电线路铁塔上推广使用高强钢是必要可行的。

Q420 高强钢在特高压交流 1000kV、直流±800kV 工程、750kV、±660kV 以及 500kV 的同塔双回路等输电线路工程中较多地应用, 具有工程实践经验, 目前 1000kV 晋东南-南阳-荆门交流输电线路、云南-广东、向家坝-上海±800kV 特高压直流输电线路工程, 特高压直流试验基地试验线段, 750kV 酒泉~安西双回输电线路工程, 500kV 蝶岭至砚都送电线路等工程都已投入运行, 在工程中得到应用, 有了比较成熟的工程实践经验, 在保证安全可靠的基础上取得了较好的经济效益和社会效益。

Q420 高强钢应用较广泛有了比较成熟的工程实践经验可以推广, Q460 高强钢目前在输电线路工程中还处在试验研究阶段, 工程应用经验相对较少, 应用需慎重。

