

高强铝合金结构在输变电工程中的应用与发展研究

徐剑佩¹, 吴 将¹, 郭 勇², 单双波³

(1. 国网浙江省电力有限公司建设分公司, 浙江 杭州 310009; 2. 中国能源建设集团浙江省电力设计院有限公司, 浙江 杭州 310012; 3. 华业钢构有限公司, 浙江 宁波 315200)

摘要: 高强铝合金结构在国外输变电工程中的应用已经十分广泛, 但是在国内通常用于活荷载小的大跨度屋面结构和人行天桥等, 在输变电工程中的应用基本处于空白状态. 高强铝合金材料重量轻, 强度高, 耐腐蚀性优异, 生产安装便利, 可回收性高, 在输变电工程中具有极大的应用空间和潜力. 本文从输变电工程背景出发, 结合高强铝合金材料的物理和力学性能, 分析国内外工程案例和研究现状, 给出了高强铝合金结构在输变电工程中应用可能存在的问题和建议.

关键词: 高强铝合金; 输变电工程; 应用

中图分类号: TM203

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2021) 05-0067-07

随着改革开放的深入与产业结构的转型升级, 我国经济稳步发展, 电力能源的需求也随之快速上升. 近年来, 为了满足全国各区域工业生产和经济发展的需求, 通过特高压实现西电东送和跨区域调配, 形成全国联通的国家电网, 大幅提升了电力能源配置能力和电网稳定安全供电水平. 作为保障社会运行的生命线工程, 输变电工程的建设与人们的生产和生活息息相关^[1].

然而, 随着城市化建设的不断推进, 使得输变电工程的规划从郊区逐渐向山地偏远地区迁移. 传统输变电工程中通常采用钢构件, 例如输电线路杆塔一般采用角钢或者圆钢管, 单件重量较重. 在一些偏远山区交通运输极为不便, 大型施工机械无法进入场地, 输变电工程的钢构件依然需要靠人力或者畜力运输, 增加了施工安装的成本和安全隐患.

此外, 对于一些工业区和沿海城市, 大气环境腐蚀较强, 为了避免钢构件的锈蚀, 通常需要采用镀锌防腐工艺, 不仅增加了成本, 而且对环境污染极大, 不符合绿色和可持续发展的理念. 同时, 镀锌保护层的耐久性有限, 需要定期检查和涂刷防锈漆, 也增加了后期维护和检修的成本.

相比于传统钢结构, 铝合金材料在轻质和耐腐蚀方面有着天然优势, 因此高强铝合金结构在输变电工程中的应用意义重大. 本文介绍了工程常用高强铝合金材料的基本特性, 以及在国内输变电工程中的应用情况, 归纳了高强铝合金结构的应用优势. 同时, 针对铝合金的特性指出了在输变电工程设计中可能存在的问题, 并对高强铝合金结构在输变电工程中的推广应用于发展提出了建议.

1 铝合金的材料特性

工程中常用的铝合金为经过固溶热处理和人工时效的 6 系铝硅镁合金. 表 1 中对比了结构用铝合金和 Q235 钢的基本物理和力学特性^[2-3]. 其中 ρ 和 α 分别为材料的密度和线膨胀系数, E 、 G 、 ν 分别为材料的弹性模量、剪切模量和泊松比. 对于钢材来说, f_y 为屈服强度; 但对于铝合金, 由于没有明显的屈服平台, $f_{0.2}$ 是残余应变为 0.2% 时所对应的名义屈服强度. f_u 和 δ 分别为材料的极限抗拉强度和伸长率.

结合铝合金与钢材的物理力学性能参数对比情况, 在结构工程中采用铝合金代替传统钢结构

表1 铝合金挤压型材物理和力学性能(标准值)

材料	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$E/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	ν	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	α	牌号	$f_y/f_{0.2}/\text{MPa}$	f_u/MPa	$\delta/\%$
钢材	7 850	206 000	0.3	~1 500	12×10^{-6}	Q235	235	370	≥ 20
铝合金	2 700	70 000	0.3	555~655	23×10^{-6}	6061-T6	240	265	≥ 8
						6082-T6	260	310	≥ 10
						7020-T6	290	350	≥ 10

的优势在于以下几个方面:

(1)铝合金自重较钢材轻,对于相同尺寸的构件,铝合金重量仅为钢材的 1/3 左右.这使得铝合金便于运输和安装,极大地减少了劳动力成本.

(2)铝合金氧化后能形成直面的保护层,具有优异耐腐蚀性,特别适用于污染较重的腐蚀性环境,减少了后期维护成本.相比之下,钢构件需要镀锌防腐,不仅污染了环境,而且增加了工艺和后期维护成本.

(3)铝合金的熔点远低于钢材,可以轻松地通过挤压生产出各种截面型式的构件,可充分发挥材料的性能.

(4)铝合金的回收率非常高.回收制造后性能不变,符合绿色环保和可持续发展的理念,提高了综合经济效益.

铝合金的这一系列特点非常适用于输变电工程中的应用,例如输电塔、变电站构架等.但是需要注意到,铝合金弹性模量仅为钢材的 1/3,这意味着铝合金结构的稳定性较钢材差,且铝合金在荷载作用下的变形较钢材大.虽然 6061-T6 高强铝合金挤压型材的名义屈服强度 $f_{0.2}$ 与 Q235 钢材接近,但是极限抗拉强度 f_u 远低于钢材,屈强比小,且伸长率较钢材差.因此可通过调整合金组成成分以提高铝合金的名义屈服强度,但弹性模量没有发生改变,即名义屈服强度越高的铝合金,其稳定问题更为突出.此外,铝合金的线膨胀系数为钢材 2 倍,高温下变形较钢材大.因此,铝合金的稳定问题和挠度控制分别是研究和应用过程中的重点.

2 高强铝合金在国内外输变电工程中的应用

2.1 输电塔

高强铝合金结构在输电塔中的应用可以追溯到 20 世纪 60 年代,加拿大采用角铝建造了 Y 型输

电塔用于单回路的 500 kV 线路^[4].1960 年,美国 Delaware 建造了一条双回路 220 kV 线路,由于该线路穿越重工业聚集区,大气腐蚀性强,设计者采用了 6061-T6 角铝建造了铝合金输电塔^[5].到 20 世纪 80 年代初,前苏联设计建造了拉线门式铝合金输电塔,并应用于偏远的高加索山区^[6].由此可以看到,目前铝合金结构在输电塔中的应用主要以拉线塔为主^[7].

当前,高强铝合金结构在我国高压输电塔中的应用尚未见报,仅在通信塔中有所应用.国内对铝合金结构在杆塔中的应用最早是 1994 年建于盐城市的铝合金通讯塔,但是由于荷载计算不足,以及设计方法不当,该通讯塔在使用数月后倒塌^[8].2009 年,在上海崇明岛建造了 30 m 高的铝合金通信塔,该工程采用 6061-T6 铝合金材料,用于抵抗海边高腐蚀环境,取得了很好的效果^[9].

2.2 抢修塔

输电线路在极端气候条件下或者受人为损坏影响,可能发生倒塌事故.对于此类事故通常采用抢修塔快速恢复供电.此时,模块化安装的通用轻质铝合金抢修塔就展现了独特的优势.文献[10-12]记录了近年国内生产、设计和应用的铝合金抢修塔案例.2013 年,浙江萧山的抢修塔组织演练表明,采用铝合金抢修塔,效率提升了 12 倍,节约了人力资源 60%^[4].

2.3 变电站构架

1960 年,前新英格兰电力系统公司在户外变电站构架中采用铝合金代替传统的木结构和镀锌钢结构.在后续的几十年里,铝合金作为构架材料备受英国国家电网公司青睐,其中主要采用了 6 系铝合金作为受力构件.文献[13]表明,1960 年安装的铝合金变电站构件依然正常使用,仅在水渍聚集处和与混凝土直接接触处出现变色斑点和点状腐蚀凹坑,表明了铝合金材料优异的耐久性.虽然

由于铝合金价格高于钢材, 初期投入较高, 但是综合考虑运输、施工和长期的维护成本, 铝合金的综合经济效益不菲。

3 铝合金杆塔研究现状与存在问题

3.1 高强铝合金压杆稳定性的国内外研究现状

国外对于铝合金结构的研究可追溯至 20 世纪 40 年代, 近 80 年来关于铝合金材料、承载力计算、节点连接和设计方法等方面研究不断得到发展^[14]。目前国外的铝合金结构设计规范主要有欧洲规范 (Eurocode 9)^[2], 美国铝业协会的铝合金结构设计手册 (Aluminum Design Manual)^[15], 加拿大标准协会的铝合金强度设计规范 (CSA S157-17)^[16], 及澳大利亚和新西兰的铝合金结构标准 AS/NZS 1664.1: 1997)^[17]。

Lai 等^[18]通过数值计算分析了包含纵向和横向焊接的工字形和 T 形铝合金压杆弯曲屈曲和弯扭屈曲。Langseth 等^[19]研究了铝合金方管的轴压局部屈曲, 表明铝合金材料的应变硬化对屈曲后强度有较大影响。Landolfo 等^[20]分析了大长细比铝合金构件的极限承载力, 包括箱型、帽形和槽型截面, 研究表明铝合金和钢材不同的应变硬化性能导致了屈曲行为的差异, 认为采用有效厚度法对截面厚度进行折减缺乏明确物理意义。Hopperstad 等^[21]研究了十字形截面的弹塑性屈曲强度, 结合切线模量和有效宽度理论, 提出了考虑屈曲后强度的计算公式。Rasmussen 等^[22]对铝合金工字形截面和圆管承载力进行了研究, 基于 Perry-Robertson 公式拟合了初始缺陷系数, 给出了稳定系数的计算方法。Faella 等^[23]进行了 6 系铝合金的短柱试验得到了弹塑性屈曲应力下对应的应变, 提出了考虑板组效应的截面分类方法。Zhu 等^[24-27]对两端固支铝合金矩形管、方管和圆管开展了试验和有限元数值的分析验证, 并考虑了横向焊缝的影响。Mazzolani 等^[28]通过对角铝的轴压试验, 研究了弹塑性局部屈曲, 提出了考虑板组相互作用的角铝截面分类准则。Ashraf 等^[29]归纳了铝合金焊接和非焊接柱的轴压试验数据, 基于连续强度法, 提出了考虑应变硬化的承载力计算公式。Su 等^[30]开展了铝合金方管短柱试验, 拟合了局部屈曲应变和板件长细比之间关系, 给出了铝合金短柱的连续强度法计算

公式。随后, Su 等^[31-32]结合有效宽度的概念, 将连续强度法推广至所有长细比范围的铝合金压杆承载力计算, 并依据截面的屈曲应力和正则化长细比对铝合金截面进行分类。需要注意的是, 上述连续强度法在计算截面屈曲应力时, 并没有给出显式的表达式, 而是依赖有限条分法或者有限元法进行计算。文献[33-36]分别对铝合金异形柱进行了分析, 考虑了不同屈曲模态的相互作用, 并与直接强度法和各国规范进行比较。文献[37-39]通过试验和有限元分析, 研究了 6082-T6 高强铝合金圆管、矩形管、角形和 H 形截面压杆的稳定承载力, 提出了承载力设计方法。文献[40-44]研究了侧面开洞对铝合金圆管、方管和矩形管的轴压承载力影响, 结果表明其中开洞对大长细比构件的承载力削弱最为显著, 并依据试验和有限元分析结果提出了承载力折减系数计算方法。文献[45-46]进行了 7 系高强角铝的轴压承载力试验, 研究结果表明短试件表现为局部屈曲破坏, 中等长细比试件表现为弯扭失稳, 大长细比试件表现为绕弱轴弯曲失稳。Wang 等^[47]研究了一端铰接、一段固支的工字形截面轴压稳定性, 试验和有限元分析结果表明材料的应变硬化能力越强, 各国规范计算结果却越偏保守; 此外还进行了不同温度对 6082-T6 高强铝合金工字形柱轴压承载力的影响, 提出了承载力的温度折减系数。Zhu 等^[48-50]进行了 C 形和卷边 C 形的承载力试验和有限元参数分析, 在欧洲规范的基础上提出了设计方法, 并考虑了高温对承载力的影响。

国内关于铝合金结构的研究起步相对较晚, 2000 年前后在全国多地建成了铝合金空间网架结构, 如 1996 年的天津市平津战役纪念馆、2002 年的上海植物园等^[14]。2001 年上海市出版了地区的《铝合金格构结构技术规程》, 直到 2007 年我国发布《铝合金结构设计规范》(GB50429-2007)^[3]。但是, 国内当前的铝合金结构多用于大跨度屋面空间结构和铝合金人行天桥^[51]。规范更多是针对民用建筑领域的应用, 并不完全符合输变电工程的实际情况, 并且该规范主要是针对 5 系和 6 系铝合金的试验和分析得到的, 对于高强铝合金牌号尚有待补充。

文献[52-54]较早通过试验研究了 6061-T6 铝

合金圆管和工字形压杆的整体稳定。沈祖炎等^[55]进行了 H 形和圆形铝合金压杆试验,分析了材料特性、初偏心、初弯曲和截面形状对承载力的影响,并基于 Perry-Robertson 公式拟合了稳定系数计算公式。杨联萍等^[56]进行了 6061-T6 铝合金工字形和圆管试验和承载力分析,但是长细比趋近于 0 时,其提出的稳定系数公式计算值趋近于 0.85,显得过于保守。金鑫^[57]研究了铝合金材料的本构关系,并基于切线模量理论给出了弹塑性情况下,单轴对称截面铝合金压杆弯曲屈曲和弯扭屈曲的长细比计算公式,最后开展了试验和有限元分析,给出了计算公式。吴亚舸等^[58]依据平衡微分方程,推导了相邻板件约束对屈曲应力的影响,给出了考虑相邻板件约束作用的正则化长细比。吴芸等^[59-63]研究了纵向焊接的热影响区宽度,分析了焊接后的残余应力,并通过试验比较了贴脚焊和剖口焊对工字形铝合金压杆的承载力影响。董震等^[64-65]总结了铝合金轴压构件不同屈曲模态的临界应力计算公式,并在此基础上给出了薄壁铝合金构件的直接强度法计算公式;同时也进行了 6082-T6 高强铝合金工字形和箱型截面轴压试验,并依据直接强度法公式提出计算公式。王元清等^[66]分析了铝合金板件的局部屈曲,依据铝合金材料不同的应变硬化能力,给出了考虑板组效应的宽厚比限值。常婷等^[67]进行了工字形短柱、中长柱的试验和有限元分析,对有效厚度法公式提出了修正。郑韶挺^[68]对大规格工字形和矩形铝合金构件进行了轴压试验,结果表明国内铝合金规范和欧洲规范略偏保守,而美国铝合金规范对大规格截面型钢的整体稳定偏于不安全。郑秀梅^[69]进行了方形、圆形、角形、H 形、槽型截面的铝合金构件轴心受压试验,并对国内铝合金规范公式的系数进行了改进。

3.2 高强铝合金杆塔整体结构研究

相比于铝合金构件的研究,针对铝合金整体结构的研究相对较少。王衍林^[11]进行了铝合金抢修塔试验研究,指出在设计时应考虑拉线处产生的不平和弯矩的影响。陈驹等^[70]分析了铝合金在输变电构架中的综合经济性。束康^[71]采用 7 系高强铝合金进行了塔型比选,结果表明铝合金杆塔在 40~60 m 时较为经济,斜率为 85°~87°为宜。伊丽娜等^[72]分析了不同风向角作用下,结构采用刚接和

铰接对内力的影响。臧亦天^[1]进行了 6 系铝合金杆塔的优化,对于 27~39 m 的铝合金输电塔,整体宽高比在 0.2 左右,上部宽高比在 0.02 左右为宜,且当塔腿和边坡处较为薄弱时,设计时需特别关注。Hu 等^[7]分析对比了相同设计条件下的铝合金杆塔和角钢塔,结果表明铝合金杆塔的质量仅为角钢塔的 70%左右。

3.3 问题与研究建议

民用建筑领域铝合金结构多采用矩形、方形、工字形和圆管等截面形式。但对于输变电工程而言,特别是输电塔,角形截面由于其简单的截面形式和安装连接的便利性而备受青睐。针对输变电工程的特点,铝合金结构可能存在的问题和研究建议如下:

(1)铝合金构件的弹性模量较低,而角形截面由外伸板件组成,局部稳定性较差,对于铝合金构件在杆塔中的稳定承载力、长细比限值以及截面的尺寸优化需要进一步研究。

(2)铝合金弹性模量的降低导致铝合金结构在荷载作用下可能产生较大的变形,特别对于高耸的输电塔和外伸的横担而言,如何优化结构形式和构件尺寸,在满足变形要求的情况下,使采用铝合金结构的杆塔经济性更优化问题需要深入的分析 and 研究。

(3)杆塔中的铝合金构件通常采用螺栓连接,螺栓的数目和节点板的刚度将影响到杆件的端部约束以及内力分布,考虑铝合金杆塔中端部约束对内力和构件承载力的影响值方面值得进一步分析。

(4)铝合金材料本身具有较好的耐腐蚀性,但是当节点板或者螺栓采用钢材时,由于不同金属材料之间电位差的存在,可能导致电化学腐蚀,因此铝合金结构的连接方式和材料需要进行针对性分析。

(5)铝合金结构的延性和曲强比较低,设计时需要考虑结构的变形能力和可靠度。

(6)6 系以上的高强牌号铝合金材料的性能和构件承载力计算方法需要进一步试验分析。

(7)铝合金杆塔的风荷载大小和风荷载作用下的结构失效机理需要厘清。

(8)铝合金结构由于线膨胀系数是钢材的 2 倍,

且熔点较低,其变形和承载力受温度影响较大,铝合金在高温下的承载力以及变形的影响需要深入研究。

4 结论与展望

高强铝合金结构在民用建筑和一些特殊用途的结构中的应用已经越来越广泛,而在输变电工程中的应用仍基本处于空白。本文对高强铝合金结构在输变电工程中的应用研究与发展进行了探讨,整理分析了国内外采用铝合金结构的输变电工程,结合铝合金材料本身的物理和力学性能,对铝合金结构在输变电工程中应用的优缺点进行了分析,并提出了可能存在的问题以及研究建议,以期推动铝合金结构在输变电工程中的应用,提高输变电工程的可靠性和稳定性,实现可持续的长效发展。

参考文献:

- [1] 臧亦天. 铝合金输电塔结构选型与抗风失效机理研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2018.
- [2] European Committee for Standardization (CEN). Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-1 : General structural rules[S].
- [3] GB50429-2007. 铝合金结构设计规范[S].
- [4] 胡晓光, 王中兴, 王元清, 等. 铝合金在输电塔与抢修塔中的应用与研究进展[J]. 工业建筑, 2015(S1):1625-1630.
- [5] Sellers A H, Williams J E. All-aluminum transmission tower line[J]. Electrical Engineering, 1961, 80(3):702-706.
- [6] 陆赐麟. 铝合金结构及其在苏联的发展概况[J]. 钢结构, 1990(1):52-60.
- [7] Hu X G, Lin Y H, Cui Z J, et al. Application prospect of high strength aluminum alloy in transmission tower[J]. Journal of Physics, 2020, 1649:012043.
- [8] 夏军. 铝合金塔架倒塌原因浅析[J]. 建筑结构, 1996(9):56-58.
- [9] 董震. 关于铝合金通信塔的设计及试点工程介绍[J]. 特种结构, 2012, 29(4):81-86.
- [10] 刘正响. “LQG 型铝合金抢修杆塔”技术鉴定会在陕西省汉中市召开[J]. 高电压技术, 1989(1):29.
- [11] 王衍林. 铝合金门形格构式抢修塔的结构设计与试验[J]. 电力建设, 1999, 12:30-33.
- [12] 于景岳, 颜炳辉, 蒋磊. THQXT-24 型铝合金抢修塔在淄博电网中的应用及组立工艺[C]. 中国城市供电学术年会, 泰安, 2006.
- [13] Jonathan D M. Aluminum substation structures[J]. Electrical Transmission Line and Substation Structures, 2007, 62:137-148.
- [14] 沈祖炎, 郭小农, 李元齐. 铝合金结构研究现状简述[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(6):100-109.
- [15] The Aluminum Association. Aluminum design manual [R]. 2015.
- [16] CSA Group. Strength design in aluminum/commentary on CSA S157-17, strength design in aluminum[R]. 2018.
- [17] Standard A Z. Aluminum structures Part 1: Limit state design[R]. 1994.
- [18] Lai Y F W, Nethercot D A. Design of aluminium columns[J]. Engineering Structures, 1992, 14(3):188-194.
- [19] Langseth M, Hopperstad O S. Local buckling of square thin-walled aluminium extrusions[J]. Thin-Walled Structures, 1997, 27(1):117-126.
- [20] Landolfo R, Mazzolani F M. Different approaches in the design of slender aluminium alloy sections[J]. Thin-Walled Structures, 1997, 27(1):85-102.
- [21] Hopperstad O S, Langseth M, Tryland T. Ultimate strength of aluminium alloy outstands in compression: Experiments and simplified analysis[J]. Thin-Walled Structures, 1999, 34(4):279-294.
- [22] Rasmussen K J R, Rondal J. Strength curves for aluminium alloy columns[J]. Engineering Structures, 2000, 22(11):1505-1517.
- [23] Faella C, Mazzolani F M, Piluso V, et al. Local buckling of aluminum members: Testing and classification[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(3):353-360.
- [24] Zhu J H, Young B. Aluminum alloy tubular columns-Part I: Finite element modeling and test verification[J]. Thin-Walled Structures, 2006, 44(9):961-968.
- [25] Zhu J H, Young B. Aluminum alloy tubular columns-Part II: Parametric study and design using direct strength method[J]. Thin-Walled Structures, 2006, 44(9):969-985.
- [26] Zhu J H, Young B. Experimental investigation of aluminum alloy circular hollow section columns[J]. Engineering Structures, 2006, 28(2):207-215.
- [27] Zhu J, Young B, Asce M. Tests and design of aluminum alloy compression members[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(7):1096-1107.
- [28] Mazzolani F M, Piluso V, Rizzano G. Local buckling of aluminum alloy angles under uniform compression[J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(2):173-184.
- [29] Ashraf M, Young B. Design formulations for non-welded

- and welded aluminium columns using continuous strength method[J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(12): 3197-3207.
- [30] Su M, Young B, Asce M, et al. Testing and design of aluminum alloy cross sections in compression[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2014, 140(9):04014047.
- [31] Su M N, Young B, Gardner L. The continuous strength method for the design of aluminium alloy structural elements[J]. *Engineering Structures*, 2016, 122:338-348.
- [32] Su M N, Young B, Gardner L. Classification of aluminium alloy cross-sections[J]. *Engineering Structures*, 2017, 141:29-40.
- [33] Liu M, Zhang L, Wang P, et al. Buckling behaviors of section aluminum alloy columns under axial compression [J]. *Engineering Structures*, 2015, 95:127-137.
- [34] Liu M, Zhang L, Wang P, et al. Experimental investigation on local buckling behaviors of stiffened closed-section thin-walled aluminum alloy columns under compression[J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, 94:188-198.
- [35] Chang Y, Liu M, Wang P. Interacted buckling failure of thin-walled irregular-shaped aluminum alloy column under axial compression[J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 107:627-647.
- [36] Chang Y, Liu M, Wang P, et al. Behaviors and design method for distortional buckling of thin-walled irregular-shaped aluminum alloy struts under axial compression[J]. *Engineering Structures*, 2017, 153:118-135.
- [37] Wang Y, Fan F, Lin S. Experimental investigation on the stability of aluminium alloy 6082 circular tubes in axial compression[J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, 89:54-66.
- [38] Oyeniran A G, Fan F, Wang Y, et al. Stability of 6082-T6 aluminium alloy columns with H-section and rectangular hollow sections[J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, 89:1-16.
- [39] Wang Y, Lin S, Feng F, et al. Numerical simulation of aluminum alloy 6082-t6 columns failing by overall buckling[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2016, 19(10):1547-1574.
- [40] Feng R, Mou X, Chen A, et al. Tests of aluminium alloy CHS columns with circular openings[J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 109:113-131.
- [41] Feng R, Sun W, Shen C, et al. Experimental investigation of aluminum square and rectangular beams with circular perforations[J]. *Engineering Structures*, 2017, 151:613-632.
- [42] Feng R, Zhu W, Wan H, et al. Tests of perforated aluminium alloy SHSs and RHSs under axial compression[J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 130:194-212.
- [43] Feng R, Liu J. Numerical investigation and design of perforated aluminium alloy SHS and RHS columns[J]. *Engineering Structures*, 2019, 199:109591.
- [44] Feng R, Mou X, Chen Z, et al. Finite-element modelling and design guidelines for axial compressive capacity of aluminium alloy circular hollow sections with holes[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 157:107027.
- [45] Wang Y Q, Wang Z X, Hu X G, et al. Experimental study and parametric analysis on the stability behavior of 7A04 high-strength aluminum alloy angle columns under axial compression[J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 108:305-320.
- [46] Wang Z, Wang Y, Yun X, et al. Experimental and numerical study of fixed-ended high-strength aluminum alloy angle-section columns[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(10):04020206.
- [47] Wang Y Q, Yuan H X, Chang T, et al. Compressive buckling strength of extruded aluminium alloy I-section columns with fixed-pinned end conditions[J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 119:396-403.
- [48] Zhu J H, Li Z Qi, Su M N, et al. Behaviour of aluminium alloy plain and lipped channel columns[J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 135:306-316.
- [49] Zhu J H, Li Z Qi, Su M N, et al. Numerical study and design of aluminium alloy channel section columns with welds[J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 139:139-150.
- [50] Zhu J H, Li Z Qi, Su M N. Numerical investigation and design of aluminium alloy channel section columns at elevated temperatures[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 159, 107225.
- [51] 张其林. 铝合金结构在我国的应用研究与发展[J]. *施工技术*, 2018, 47(15):13-17; 25.
- [52] 李明, 陈扬骥, 钱若军, 等. 圆管形铝合金轴心压杆稳定系数的试验研究[J]. *空间结构*, 2000, 6(1):59-64.
- [53] 李明, 陈扬骥, 钱若军, 等. 工字形铝合金轴心压杆稳定系数的试验研究[J]. *工业建筑*, 2001, 31(1):52-54; 60.
- [54] 罗永峰, 季跃, 芮渊等. 铝合金结构轴心压杆稳定性研究[J]. *同济大学学报*, 2001, 29(4):401-405.
- [55] 沈祖炎, 郭小农. 对称截面铝合金挤压型材压杆的稳定系数[J]. *建筑结构学报*, 2001, 22(4):31-36; 48.
- [56] 杨联萍, 姚念亮, 邱枕戈, 等. 铝合金轴心受压杆件的稳定系数研究[J]. *建筑结构*, 2001, 31(2):28-29; 46.

- [57] 金鑫. 单轴对称截面铝合金压杆极限承载力研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.
- [58] 吴亚舸, 张其林. 考虑相关屈曲的轴压铝合金板件有效截面计算[J]. 建筑结构, 2006, 36(2):55-59.
- [59] 吴芸, 张其林. 纵向焊接铝合金柱设计方法研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(4):21-26.
- [60] 吴芸, 张其林. 焊接铝合金压杆屈曲性能试验研究[J]. 建筑结构, 2007, 37(12):110-113.
- [61] 吴芸, 张其林. 焊接铝合金构件残余应力试验研究[J]. 钢结构, 2007, 22(92):29-32; 61.
- [62] 吴芸, 张其林. 纵向焊接铝合金构件的试验和设计研究[J]. 建筑钢结构进展, 2008, 10(1):29-33; 62.
- [63] 吴芸, 张其林, 俞宝达. 纵向焊接铝合金柱构件承载力试验研究及数值分析[J]. 力学季刊, 2011, 32(3):427-434.
- [64] 董震, 张其林. 铝合金轴压构件屈曲荷载计算方法[J]. 结构工程师, 2008, 24(2):28-34; 47.
- [65] 董震, 张其林. 薄壁铝合金轴压构件承载力计算的直接强度法[J]. 土木工程学报, 2009, 42(6):28-34.
- [66] 王元清, 石永久, 袁焕鑫, 等. 铝合金板件的受压屈曲分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(1):74-78.
- [67] 常婷. 铝合金轴心受压构件局部稳定与相关稳定性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [68] 郑韶挺. 大截面铝合金轴心受压构件的稳定性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- [69] 郑秀梅. 铝合金轴心受压构件试验及设计方法研究[D]. 福州: 福建工程学院, 2017.
- [70] 陈驹, 盛晓红, 童建国, 等. 铝合金在输变电构架中的应用[J]. 电力建设, 2008, 29(10):26-28.
- [71] 束康. 高强铝合金输电塔选型及优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [72] 伊丽娜, 高洪俊, 涂佳黄. 铝合金塔架抗风优化研究[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2017, 46(1):53-55; 60.

Application and development of high strength aluminum alloy structure in power transmission and transformation engineering

XU Jianpei¹, WU Jiang¹, GUO Yong², SHAN Shuangbo³

(1.Construction Branch of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 31009, China;

2.China Energy Engineering Group Zhejiang Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310012, China;

3.Huaye Steel Structure Co., Ltd., Ningbo 315200, China)

Abstract: High strength aluminum structures are widely used in foreign electric transmission towers and substations. However, domestically they are mainly used in long-span roof structures and footbridges of small live loads. Hence, the application of aluminum structures in domestic transmission towers and substations requires further development. High-strength aluminum material features light weight, high strength, good corrosion resistance and high recycling value. It is also a simple process in terms of manufacturing and construction. This paper conducts a survey of some typical engineering projects and studies the advantages of applying the aluminium structures in these projects with consideration of the physical and mechanical properties of the aluminium alloy. Base on the results, some suggestions are made for the further investigation and application of aluminum structures in the electric transmission towers and substations.

Key words: high strength aluminium alloy structure; power transmission and transformation project; application

(责任编辑 章践立)