

Research on Mechanical Properties of New Aluminum Alloy Scaffold Nodes

Zihang Jiang¹, Xinlei Fu², Jian Wang¹, Mian Liu¹, Hong Zhang¹

¹ Beijing Zhongjian Architectural Science Research Institute Co., Ltd, Beijing 100076, China

² Tianjin Haihe Landscape Construction and Development Co., Ltd, Tianjin 300100, China

Abstract: This article explores the feasibility of using aluminum profiles to design a new type of foldable scaffolding system. To verify the ultimate bearing capacity and failure mode of structural node connectivity points, mechanical performance tests were conducted on the tensile strength of cast aluminum and angle iron nodes to clarify the ultimate bearing capacity and failure mode of the nodes, providing a reference for using aluminum profiles to make new types of scaffolding.

Keywords: Foldable scaffolding; Mechanical properties; Strain analysis

新型铝合金脚手架节点力学性能研究

姜子航¹, 付新磊², 王健¹, 刘冕¹, 张洪¹

¹ 北京中建建筑科学研究院有限公司, 中国 · 北京 100076

² 天津市海河风貌建设发展有限公司, 中国 · 天津 300100

摘要: 本文探究了利用铝型材设计一种新型可折叠脚手架体系的可行性。为验证结构节点连接性点极限承载力以及破坏模式, 通过对铸铝、角铁两种节点抗拉进行力学性能测试, 以明确节点极限承载力以及破坏模式, 为使用铝型材制新型脚手架提供了参考。

关键词: 可折叠脚手架; 力学性能; 应变分析

1 研究背景

从20世纪70年代开始, 中国高空作业平台逐渐系统化、规模化生产, 至今已经有500多年的发展历史^[1,2]。在施工现场经常有屋顶装修和外墙粉刷等各种低空(2m-4m)作业需要, 工人经常通过搭设各种马凳或临时性施工平台来完成施工, 受搭设拆除、移动、使用空间面积、施工环境等众多因素的影响, 这种搭设方法往往速度慢、安全性差、施工效率低。中国的建筑施工量居全球首位, 也是建筑安全事故频发的大国。2020年6月19日, 住建部通报了2019年度的房屋市政工程安全生产事故^[3]。目前现有的门式脚手架采用钢材作为原材料, 配合剪刀撑进行组装, 在可移动性、耐久性均有可改进空间。本文基于此现状设计了利用铝型材脚手架, 并对其力学性能进行了实验。

2 前言

在工程施工中, 脚手架被视为最关键的工具, 它

是整个工程建设中不可或缺的核心部分。中国自60年代初期采用的扣件式钢管脚手架以其安装拆卸灵活, 便于携带, 通用性好, 价格低廉而成为国内用量最大的脚手架、在市场上, 最常用的脚手架类型大约占据了60%的市场份额。后有门式脚手架和碗扣式脚手架的介绍和研制。近年来, 随着建筑业的蓬勃发展, 对脚手架的需求十分旺盛。由于脚手架使用普通钢材, 施工过程中又长期处于室外环境, 日晒雨淋, 特别容易锈蚀, 在海南等沿海环境地区钢管脚手架的使用寿命不足两年, 在其它地区也只有两年左右。扣件式钢管脚手架存在多个问题, 如安全性不足、施工效率低下和材料消耗过大等。加上产品质量严重不稳定, 不合格的钢管占80%以上, 扣件占90%左右, 这已经成为建筑施工中的一个重大安全隐患^[4]。企业无论是租赁还是自购都比较昂贵, 而且浪费物资、回收利用率不高, 这与国家建筑业可持续发展的政策不符。基于对铝合金和钢材特性的深入分析和比较, 本文对新型

铝合金脚手架进行了探索性的研究,期望能为未来的研究提供有价值的启示。

纯铝强度、硬度较低,不宜作为建筑构件使用。而在纯铝的基础上添加锰,硅,铜等合金元素再经热处理增强,所成型的铝合金便具有优异的物理力学性能和轻质的特点,成为较为理想的建筑材料。欧美某些国家早在20世纪50年便已开始了铝合金在建筑结构中的应用研究。近年来,随着城镇化不断推进和建筑行业的快速发展,中国新建了不少铝合金工程结构^[5,6],并颁布了相关标准^[7,8]。

2.1 铝合金种类

基于不同的添加元素,铝合金可以被分类为 $1 \times \times \times$ 至 $8 \times \times \times$ 的八个不同系列。其中 $1 \times \times \times$ 表示铝含量不小于99.00%的纯铝,建筑行业常用的是以镁和硅为主要合金元素并以Mg₂Si相为强化相的 $6 \times \times \times$ 系列铝合金。铝合金韧度分别用F、O、H、W、T表示,如6061-T6表示热处理人工时效之后再行溶解热处理,韧度较为稳定。6063铝合金被广泛认为是目前最常用的变形铝合金种类,它涵盖了6063、6063A、6463、6463A、6763、6963等型号,其在全球的生产量很大,主要被应用于建筑材料的制造中。关于这种合金在美国铝业协会公司(AA)的注册成分,请参考表1^[9]。

表1 在美国铝业协会公司(AA)注册的6063型合金化学成分

化学成分 牌号	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	其它杂质		
									每个	总计	Al
6063	0.20- 0.6	0.35	0.10	0.10	0.45- 0.9	0.10	0.10	0.10	0.05	0.15	其余
6063A	0.30- 0.6	0.15- 0.35	0.10	0.15	0.60- 0.9	0.05	0.15	0.10	0.05	0.15	其余
6463	0.20- 0.6	0.15	0.10	0.05	0.45- 0.9	0.05	0.15	0.10	0.05	0.15	其余
6463A	0.20- 0.6	0.15	0.20	0.05	0.30- 0.9	/	0.10	/	0.05	0.15	其余
6763	0.20- 0.6	0.03	0.25	0.03	0.45- 0.9	/	0.10	/	0.05	0.15	其余
6963	0.40- 0.6	0.25	0.04- 0.16	0.05	0.35- 0.9	0.10	0.10	0.10	0.05	0.15	其余

2.2 铝合金物理力学性能及特点

铝合金和钢材物理力学性能见表2^[10,11],与传统钢材相比,铝合金用于脚手架,具有如下特点:一是质量轻、比强度大、节省材料、降低劳动强度,但是弹性模量小、变形稳定。铝合金的密度只有钢材的35%。例如6061-T6铝合金的强度就已经分别超过了钢管脚手架通常使用的Q235钢。根据上表,铝合金与

钢的比强度是0.098与0.0299,铝合金的比强度越高说明它达到对应强度所使用的材料越轻,显著降低了结构体自重,而又尽可能以较小的断面达到强度要求。所以,将铝合金代替钢材应用于脚手架上,不仅可以显著降低结构重量、便于运输及施工搬运、极大地降低劳动强度,同时也可以提高施工效率、缩短工期、提高租赁及使用效益、节省材料。然而,铝合金的弹性模量只有钢材的35%,这也使得在工程结构中使用铝合金时,其变形和稳定性问题变得尤为明显,需要寻找方法进行控制或实施相应的补偿措施。

另一方面是在低温及高温下具有良好的力学性能,但是对于温度,裂纹较为敏感,抗疲劳性能较差。实验研究发现^[12],铝合金的屈服强度,拉伸强度和弹性模量均随温度的降低而提高,而韧性则是随着温度的升高先升高后下降,至70K附近达最大,随后随着温度的下降,疲劳性能得到改善,疲劳裂纹的扩散在较低温度时不会发生劣化。此外,铝合金焊接材料的抗拉强度与屈服强度随温度的下降而提高,但是与同类型的母材比较增幅不大,延伸率与母材的比值呈下降趋势。从整体上看铝合金抗低温性能较好,可以应用于中国北方严寒地区。同济大学的彭航等人对6061-T6进行了高温力学性能的实验研究^[13],结果显示,当温度升高到112.8° C~172.3° C、221.2° C~270.7° C、300.6° C~398.1° C时,其弹性极限平均值与常温14.1° C平均值相比分别降低7.8% (305.46Mpa)、14.91% (281.92Mpa)、39.89% (199.15Mpa),与常温下的平均值相比,其抗拉强度的平均值分别下降了8.35% (353.13Mpa)、16.22% (322.80Mpa)和40.99% (227.37Mpa),而延伸率大致维持在10%的水平。此外,铝合金材料自身对于应力集中以及裂纹较为敏感,通过固熔热处理,人工时效以及挤压成型后,铝合金构件疲劳强度较为低下,抗疲劳能力较差。6061-T6抗疲劳试验表明^[11],6061-T6铝合金疲劳寿命在120Mpa超过120万次,疲劳强度近似正比于抗拉强度,对裂纹更为敏感,单轴拉伸疲劳特性更依赖于加载应力幅值。此外,铝合金温度线膨胀系数为钢的两倍左右,其温度变化敏感性强于钢,相同条件下受温度变化影响而产生的形变大于钢。

具有良好的抗腐蚀性能、较低的回收处理费用和循环利用率,但是初始成本较高。大气环境下,铝合金说明有氧化层生成,这就阻止了铝合金的腐蚀并赋

予了铝合金优异的抗腐蚀性能。所以铝合金适合在腐蚀性较强的环境中应用,例如海洋气候环境,化工和污水处理中。得益于其出色的耐腐蚀特性,它可以降低防腐和维护的成本,延长其使用寿命,减少材料的周转损失,并且容易回收,再处理的费用也相对较低,循环利用率较高,因其作为绿色环保建材的理想选择,能够较好地满足建筑业可持续发展的需要。但是因为铝合金的初始成本明显高于钢材,所以就普通钢管与铝合金管相比后两者的价格约为前两者的三倍。从循环使用周期长,劳动强度减轻,施工效率和回收利用率高角度来看,综合成本增加较少。

表 2 铝合金和钢材物理力学性能

项 目	密度 (kg/ m ³)	屈服强度 (MPa)	极限强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	温度线膨胀系 数 (℃)
铝合金	2700	245	265	70	2×10^{-5}
钢 材	7850	210	235	210	1.2×10^{-5}

注:强度及弹性模量所用铝合金为 6061-T6, 钢材所用数据参考 Q235 钢材。

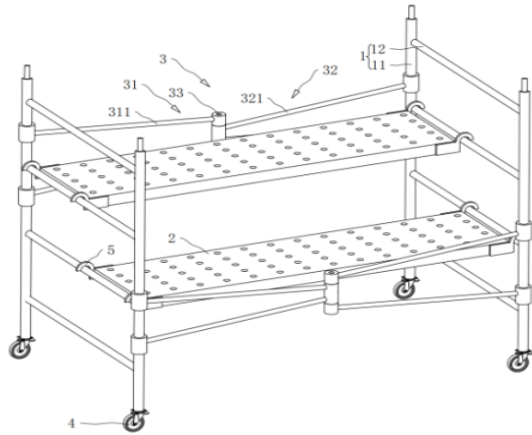


图 1 低空操作平台2.0设计图

3 方案选型

在ABAQUS软件中导入此低空操作平台的2.0模型,对该结构型在极限承载状态下的变形和失效进行了结构承载有限元计算,从而预知了其使用风险,起到了相应防范效果。在低空操作平台的立柱底端,我们加入了纵向的限制,而在长度方向上,一侧的三根立柱底端加上了宽度方向的限制,宽度方向上的一侧的两根立柱底端则加入了长度方向的限制,从而为结构的形变创造了空间。我们模拟了实际操作中跳板的放置位置,并在两侧的第三根横杆上施加了相应的荷载。经过详细分析,我们得到了低空操作平台的位移

云图,如图展示,这种结构型在荷载作用下的形变主要集中于中间的折叠组件上,因此使用这种结构型应附加关注折叠轴上的来回抖动等现象,并且要加入限位功能。但是鉴于该结构型应用于实际施工过程中,施工人员踏上施工跳板后往往会踩踏下折叠组件,原本未承载折叠组件连接节点易出现掉落现象,给结构安全带来了一定影响。因此对该结构型进行了细节上的调整,改进推出低空操作平台3.0(实物图如下图所示),将材料、截面等更换成更为稳定的6063-T5方形铝型材,以及下折叠组件竖杆落地,在两折叠组件上增设限位功能以进一步提高结构稳定可靠。通过反复验算调整方案和模型后,最终确定第三种反对称结构型式为低空操作平台结构型。

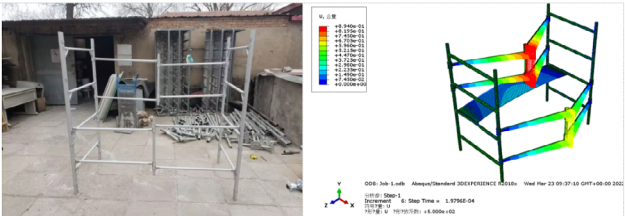


图 2 低空操作平台2.0实体及位移云图



图 3 低空操作平台3.0设计及实体图

4 材料性能试验

本试验设计的可折叠架体采用的铝合金型材作为材料进行组装搭建,如下图所示。为得到6063-T5铝合金的力学本构,依据《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1-2010)和《变形铝、镁及其合金加工制品拉伸试验用试样及方法》(GB/T 16865-2013)制作相应标准试件3个,具体尺寸和标准试件实物如图3.1所示。图中,R为过渡圆弧半径;L0为原始标距;Lc为试样平行长度。控制伺服万能试验机,采用位移控制加载速率为0.1mm/min,直到试件被拉断对其弹性模量、屈服强度、抗拉强度等进行记录和计算,结果如下表3所示。

表3 6063-T5 高强铝合金材料参数

编号	断后外径 (mm)	断后长度 (mm)	断面收缩率 (%)	断后伸长 率 At (%)	弹性模量 E(MPa)	屈服 fy(MPa)
AL-1	7.47	294	44.2	2.80	112701	392
AL-2	7.97	294	36.5	2.80	111378	389
AL-3	7.94	296	37.0	3.50	115580	394
平均值	7.79	294.67	39.23	9.10	113219.67	391.67

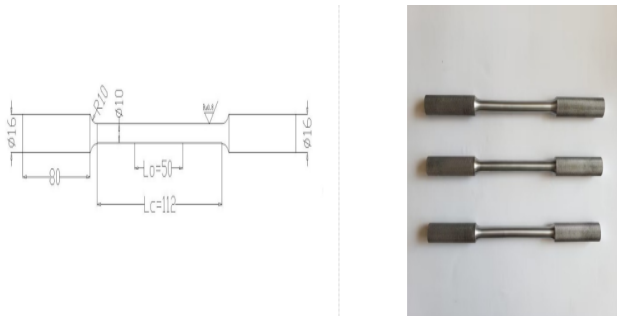


图4 6063-T5铝合金标准试件

5 节点力学性能试验

5.1 试验应变片布置

对铝型材常用的两种连接方式进行节点强度试验,分别制作铸铝连接件和角铁连接件试件18个进行抗拉、抗压和抗剪试验,并对主要变形区域布置应变片用以分析其应变分布情况。应变片布置情况如下图所示。

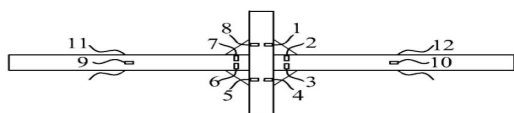


图5 抗拉节点应变片编号示意图

5.2 试验加载及现象

采用万能试验机依据《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1-2010)进行加载,位移控制加载速度为1mm/min。在试验开始前进行2kN预加载,卸掉荷载后再进行正式加载,用以消除初始连接的间隙。当存在螺栓脱落的情况时立即停止试验。

荷载位移曲线如图6、图7所示,铸铝节点在达到极限承载力后发生了波浪式承载力丧失,在此加载过程中,铸铝节点发出多次清脆的断裂声音,结合铸铝节点的破坏形式,连接节点的4个铸铝连接件发生部分撕裂,而配套螺栓仍处于正常工作状态承担相应荷载,直至铸铝连接件退出工作。

角铁试件荷载位移曲线呈现单调增加趋势,在加载时角铁发生明显形变,失效时破坏位置为杆件外槽与螺栓啮合处,杆件外翼与螺栓啮合铝合金被拉断,发生螺栓拔出破坏。

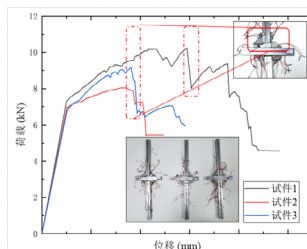


图6 铸铝节点试件破坏模式

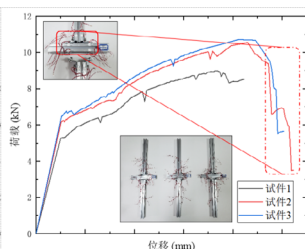


图7 角铁节点试件破坏模式

5.3 应变分布分析

试验过程中应变片效果良好,但囿于其精密易损的特性,仍有个别应变片失效。本文选取同组三个试件中效果最优的试件上进行应变分布分析。

选取荷载达到最大值前的应变片数据如图8、图9,由数据可知,铝型材连接件和角铁连接件的应变分布类似。应变片1、4、5、8最大,应变片9、10、11、12其次。分析可知,在节点连接件附近应变较大,角铁节点4应变剧烈此部分发生螺栓拉出,由此可知在受拉构件的横梁应进行加厚优化,且铸铝连接件使用性能更强。

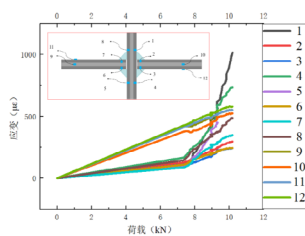


图8 铸铝节点应变片数据

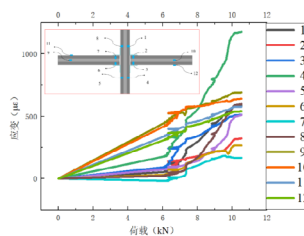


图9 角铁节点应变片数据

6 结论

通过对低空操作平台使用材料进行材料性能试验研究,提供了低空操作平台的材料力学参数。对铸铝节点和角铁节点分别进行节点抗拉试验,得到了试件的荷载-位移曲线及各测点的荷载-应变曲线,发现连接节点的刚度对节点承载能力及破坏模式有明显的影 响,在实际应用时,除了对低空操作平台及连接节点质量严格把控之外,还应该对节点生产、销售等环节进行严格审查。

参考文献

- [1] 张华,李守林.国内外高空作业机械的现状与发展趋势(上)[J].建筑机械化,2011,32(03):19-24+16.
- [2] 张华,李守林.国内外高空作业机械的现状与发展趋势(下)[J].建筑机械化,2011,32(04):36-40.

-
- [3] http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/202006/t20200624_246031.html [Z].
- [4] 糜嘉平. 中国模板、脚手架行业的技术进步 [J]. 施工技术, 2011, 40(1):60-63, 74.
- [5] 石永久, 程明, 王元清. 铝合金在建筑结构中的应用与研究 [J]. 建筑科学, 2005, 21(6):7-11, 20.
- [6] 陈奇芬. 铝合金在建筑结构工程中的应用 [J]. 中国新技术新产品, 2010(24):112-113.
- [7] 中华人民共和国国家标准 铝合金结构设计规范 (GB50429-2007) [S]. 2007.
- [8] 中华人民共和国国家标准 铝合金建筑型材 GB5237.1-2008 [S]. 北京, 2008.
- [9] 王祝堂. 论铝合金的挤压机固溶热处理及 6063T6 铝型材的优化生产工艺参数 [J]. 轻合金加工技术, 2001, 20(3):6-11
- [10] 李志强. 铝合金的特点及其在建筑结构中的应用 [J]. 工业建筑 (S), 2007 增刊: 1449-1452.
- [11] 吴培明主编. 混凝土结构 (上) [M], 武汉理工大学出版社, 2003 年 12 月, 第 2 版.
- [12] 陈鼎, 陈振华. 铝合金在低温下的力学性能 [J]. 宇航材料工艺, 2000(4):S1-7.
- [13] 彭航, 蒋首超, 赵媛媛. 建筑用 6061-T6 系铝合金高温下力学性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2009, 42(7): 46-49.