

# 高强度碳纤维索在上海美的全球创新园区项目中的 设计和应用探索

李明菲\*, 邢佳宇

(上海天华建筑设计有限公司, 上海 200235)

**摘要:** 碳纤维拉索具有轻质和超高抗拉强度的优点,适用于建筑结构的受拉构件中,其应用的推广有助于推进建筑行业节能减排的进行。国内目前尚未出台关于碳纤维索结构设计方面的规范和标准,高强度、大吨位的碳纤维索在我国房屋建筑中尚无应用先例。为了推进碳纤维索的研究和应用,在美的全球创新园区项目中,局部应用了强度等级为2 800 MPa的高强度碳纤维平行筋索,其中规格为7×139拉索的破断荷载达14 991 kN。文章介绍了在项目中碳纤维索的力学性能和承载力的确定过程及碳纤维索结构的抗震计算和防连续倒塌计算。结合碳纤维索的高温力学性能和构造措施,文中提出了在确保建筑耐火极限的要求下碳纤维索及其锚具防火保护目标的确定,碳纤维索结构的耐火计算及构造实现。

**关键词:** 高强度碳纤维索; 抗震计算; 防连续倒塌计算; 高温力学性能; 防火设计

中图分类号: TU399

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)05-0097-08

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20231211002

## Exploration of the Design and Application of High-Strength Carbon Fiber Reinforced Polymer Cables in Midea Shanghai Innovation Campus

LI Mingfei\*, XING Jiayu

(Tianhua Architecture Planning & Engineering Limited, Shanghai 200235, China)

\*Corresponding author: nakolee@163.com

**Abstract:** Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) cables have lightweight and ultra-high tensile strength, making them an ideal material for tension members in building structures. Their application can help promote energy conservation and emission reduction in the construction industry. However, there are currently no design codes for CFRP cable structures in China, and no precedents for the application of high-strength heavy duty CFRP cables in China's building structures. In order to promote the research and application of CFRP cables, cables with a strength of 2 800 MPa were used in the project of the Midea Shanghai Innovation Campus. The breaking load of a 7×139 cable reached 14 991 kN. This paper introduces the mechanical properties and bearing capacity determination of CFRP cables in the project. The seismic calculation and the analysis of progressive collapse resistance are also introduced. Considering the high-temperature performance of CFRP cables and structural measures, this paper proposes the determination of the fire protection target of CFRP cables and their

收稿日期: 2023-12-11

作者简介:

李明菲(1978—),男,硕士,高级工程师,主要从事住宅、办公、剧院、商业综合体等民用建筑结构设计工作。

E-mail: nakolee@163.com。(通信作者)

邢佳宇(1995—),男,学士,工程师,主要从事住宅、办公、商业综合体等建筑结构设计工作。

anchorages under building fire resistance requirements. The calculation method and structural implementation of the fire resistance of CFRP cable structures are proposed in this paper.

**Keywords:** high-strength carbon fiber reinforced polymer (CFRP) cable; seismic calculation; analysis of progressive collapse resistance; high-temperature performance; fire resistance design

中国近年来致力于向低碳转型推动并积极承担了全球节能减排的重任。随着国家“双碳”战略顶层设计文件的发布,碳达峰、碳中和成为中国经济长期健康可持续发展的重要指导思想。

建筑在建造和使用过程中的碳排放量占我国碳排放总量的40%,因此“双碳”目标的实现需要建筑的建造朝着更节能、更低碳的方向发展。在建筑材料方面包括高强、高耐久性材料的研究和应用,此方面碳排放量的减少将从材料的生产、运输、使用、维护等方面进行,因此高强度建筑材料是建筑材料领域的重要研究方向之一。

其中,碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)由于其优异的性能,近些年来被广泛运用于土木工程领域中。它具有强度高、自重轻、耐腐蚀、抗疲劳性好等特点。碳纤维材料的自重仅为钢材自重的1/5,而强度是普通钢材强度的8~15倍。例如在日本东丽T700级碳纤维在土木工程领域中应用广泛,其强度高达4 900 MPa。将碳纤维材料应用在建筑结构中,不仅可因其轻质高强的特性大幅减少材料的用量和自重,也可以大幅减轻其支撑构件的负担,进而减少结构建造过程中碳的排放量。碳纤维材料还可因其良好的耐腐蚀、抗疲劳的特性,可减少建筑在使用维护过程中的碳排放。

在我国,碳纤维复合材料已经在工程加固领域中广泛应用,土木工程领域有80%~90%的碳纤维用于建筑及桥梁结构的加固补强。在工程加固领域中,我国已经建立了相对完善的标准体系,但相对于发达国家,我们的研究、应用和起步仍较晚,这也制约了碳纤维材料在建筑结构中更广泛的应用。

欧美日等发达国家对桥梁使用碳纤维索的研究和应用处于领先地位,自20世纪90年代起,已经在10余座不同类型的桥梁中应用了碳纤维索,比如英国的Aberfeldy人行桥和瑞士的Stork公路桥。

可喜的是,随着应用研究和生产工艺的进步,我国在碳纤维索方面的应用也取得了突破,比如三亚体育场和厦门白鹭体育场的屋面结构均采用了碳纤维板索。在山东聊城的徒骇河大桥中,局部应用了碳纤维斜拉索。但在我国的房屋建筑领域,尚无碳纤维索的应用先例。

上海美的全球创新园区项目由两座L形巨构(A塔、B塔)组成,塔楼的承重结构是由斜拉索和桁架组成的大跨

斜拉结构,最大跨度72 m,端部大悬挑桁架跨度达46 m,A塔结构模型如图1所示。项目中应用了1 860 MPa强度级别的钢制斜拉索,但在承载力合适的情况下,替代钢制斜拉索会更好碳纤维索,并且碳纤维索还可作为桁架中的拉杆。在与建设单位、工程总承包单位的共同努力下,最终项目中采用了规格为7×139的碳纤维拉索,实现了高强度碳纤维索在高层建筑中应用的创新和突破。

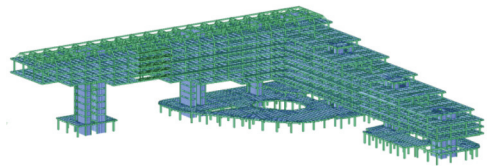


图1 A塔结构模型

Fig. 1 Structure model of Tower A

## 1 碳纤维拉索的受力计算

### 1.1 碳纤维平行筋索的构造

碳纤维索通常是由碳纤维原丝和环氧树脂通过拉挤工艺复合而成。碳纤维索是一个统称,其具有不同的形式,包括CFRP筋、多根CFRP筋排列组成的平行索、绞线索、CFRP平行板索和CFRP环状索。

该项目拟采用碳纤维平行筋索,索体断面呈由碳纤维筋紧密排列而成的正六边形或缺角六边形。碳纤维筋经专用于制索设备中并以平行且拢成束的形态呈现,将聚拢成束的碳纤维筋同心右扭 $2^{\circ}\sim 4^{\circ}$ 后用高强度聚脂缠绕包带进行缠包定型,再外置高密度聚乙烯(high density polyethylene, HDPE)护套,如图2所示。

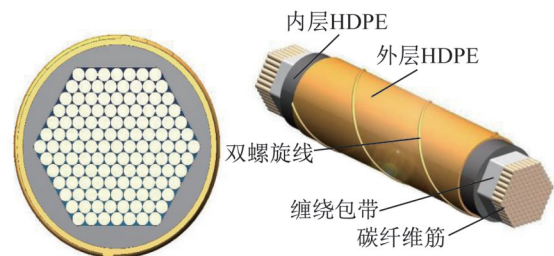


图2 碳纤维平行筋索构造

Fig. 2 The form of CFRP cable

碳纤维平行筋索一侧设计为固定端,一侧设计为调节端。与主体结构连接端采用双叉耳式销轴的连接方式连接。锚具、销轴的坯件应为锻件,采用热镀锌或渗锌的工艺处理,锌层厚度不应小于90 μm,并对其进行超声无损探伤。

不同于钢索端部可以使用墩粗工艺连接,碳纤维索的锚固仅能由其与环氧基锚固料粘结提供。对于大吨位的碳纤维拉索,其锚固尤为重要。该项目采用冷铸锚固的方式,并使用内锥形锚杯以提升结构的锚固力。设计要求锚固承载力不小于索破断力,并建议进行试验验证。索构造如图3所示。

## 1.2 碳纤维拉索的力学性能

碳纤维筋的纵向(平行于纤维方向)力学性能由碳纤维的性能决定,具有较高的力学强度和弹性模量;而横向

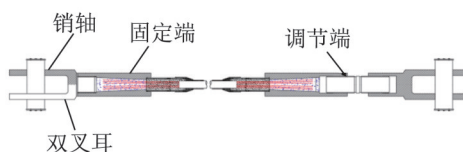


图3 碳纤维平行筋索及锚具的构造

Fig. 3 The form of a CFRP cable and its anchor system

(垂直于纤维方向)力学性能则取决于基体树脂的性能,具有较低的力学强度和弹性模量。

我国现行规范《纤维增强复合材料工程应用技术标准》(GB 50608—2020)<sup>[1]</sup>、《结构工程用纤维增强复合材料筋》(GB/T 26743—2011)<sup>[2]</sup>、《结构用纤维增强复合材料拉索》(GB/T 35156—2017)<sup>[3]</sup>中对碳纤维筋和索的力学性能规定略有差异。如文献[2]中规定碳纤维筋的受力性能应满足表1要求。

表1 碳纤维筋的力学指标

Table 1 Mechanical indexes of carbon fiber reinforcement

标准名称	抗拉强度标准值/MPa	弹性模量/GPa	极限应变/%	剪切强度/MPa
GB/T 26743—2011	≥1 800	≥120	≥1.5	—
GB/T 35156—2017	≥2 100	≥120	≥1.5	—
本项目采用的指标	2 800	160	≥1.5	≥200

研究表明,碳纤维筋具有较好的耐疲劳性能和较优越的耐腐蚀性能,适合用于外桥梁和沿海环境中。同时,研究表明纤维复合材料存在徐变断裂的问题,即在低于其抗拉强度拉力的长期作用下发生断裂的现象<sup>[4-5]</sup>。美国混凝土协会的《Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars》(ACI 440.1R-15)<sup>[6]</sup>规定在准永久组合下CFRP的应力不超过其抗拉强度极限值的55%。

目前,在我国的桥梁及建筑结构领域中,尚未出台关于碳纤维索抗拉承载力设计值或容许应力的规范。针对钢制索现行规范《索结构技术规程》(JGJ 257—2012)<sup>[7]</sup>中规定钢索的拉力设计值按式(1)确定。

$$F = \frac{F_{tk}}{\gamma_R} \quad (1)$$

式中: $F$ 为拉索抗拉力设计值; $F_{tk}$ 为拉索极限抗拉力标准值; $\gamma_R$ 为拉索的抗力分项系数,对钢索取2.0,对钢拉杆可取1.7。

参考《索结构技术规程》(JGJ 257—2012)<sup>[7]</sup>,并考虑到碳纤维材料的特殊性和首次应用的不确定性,该项目适当提高抗力分项系数至2.5,即碳纤维索的抗拉承载力设计值取破断力的40.0%。该项目采用的碳纤维拉索性

能指标要求如表1所示,承载力如表2所示。

## 1.3 碳纤维索在项目中的应用选择

美的全球创新园区项目采用的大跨度斜拉结构中应用了强度为1 860 MPa级别的半平行钢丝束索,索体规格从7×283至7×583不等。为了研究和推广碳纤维索在房屋结构中的应用,在结构局部采用了强度为2 800 MPa级的碳纤维索代替原结构的钢索或钢结构杆件。碳纤维索与钢索参数和力学性能对比如表2所示。对比可见,虽因规格限制碳纤维索可达的最大承载力仍不及钢索的最大承载力,但其轻质高强的特点仍相当显著,在荷载合适的情况下,碳纤维索是钢索的良好替代。

本项目为高强碳纤维平行筋索在房屋建筑中的首次应用,且其破断荷载规格达千吨以上,为安全起见,同时为避免对主体结构造成较大的影响,高强碳纤维平行筋索的应用部位选择如下:在高区端部46 m大悬挑的端跨处应用规格为7×139碳纤维索以替换原规格为600 mm×600 mm箱形压杆,如图4所示;并拟于在底平区12号索位置处将原规格为7×283的钢索替换为规格为7×199碳纤维索,如图5所示。碳纤维索的长度约12.5 m(含锚具)。

将12号碳纤维双索与主体结构连接,以延续原钢索

表2 碳纤维索与钢索参数和力学性能对比

Table 2 Comparison of parameters and mechanical properties between CFRP cables and steel cables

索体规格	抗拉强度/MPa	公称直径/mm	每米自重/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$ )	破断力/kN	抗拉承载力/kN
CFRP索 7×139	2 800	121	9.2	14 978	5 991
CFRP索 7×199	2 800	140	13.2	21 443	8 577
钢索 7×199	1 860	137	63.8	14 244	7 122
钢索 7×283	1 860	153	90.6	20 257	10 128
钢索 7×583	1 860	214	187.4	41 732	20 866

注:钢索抗拉承载力的抗力分项系数按2.0;碳纤维索按2.5。钢索7×199是与同尺寸的碳纤维索进行对比,并未应用于实际活动中。

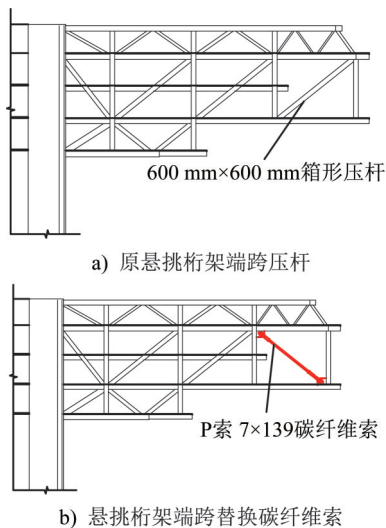


图4 悬挑桁架碳纤维索应用部位

Fig. 4 The location of the CFRP cable in the cantilever truss

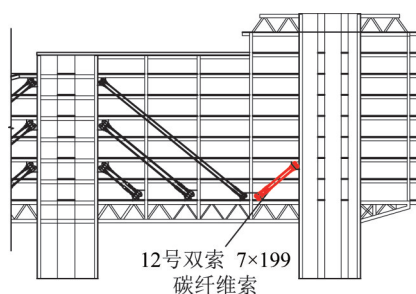


图5 底平区碳纤维索拟应用部位

Fig. 5 The location of the CFRP cable in the lower cable-stayed structure

与主体结构连接的方式,由于双索并行时连接的荷载较大,采用双叉耳对三块连接板销轴的连接方式连接,如图6所示。P索与主体结构的连接也采用销轴连接的方式连接,如图7所示。锚具采用42C<sub>1</sub>M<sub>0</sub>钢,销轴钢材采用的型号为40C<sub>1</sub>M<sub>n</sub>M<sub>0</sub>,结构侧节点板采用Q460GJ钢,耳板厚度65~80 mm。节点均已经有限元分析验证过其安全性。

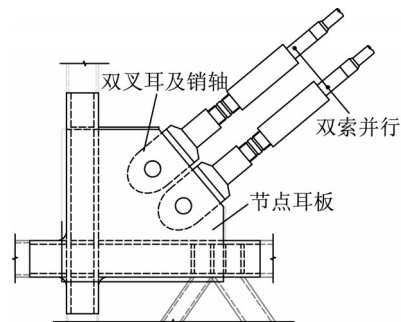


图6 双索与主体结构连接节点

Fig. 6 The connection of double cables and the main structure

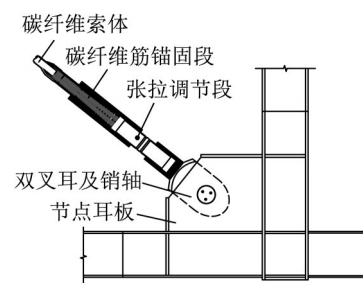


图7 碳纤维索与结构的连接

Fig. 7 The connection of CFRP cable and the main structure

#### 1.4 碳纤维索的结构受力分析

对大悬挑部位的斜拉索,为了适当减小悬挑端的挠度,可对其施加2 850 kN的预拉力;对12号索,仍以原预应力为施加目标(在预应力作用及0.7倍恒荷载组合下,底部桁架找平)来确定双索预应力值为7 340 kN。

在大悬挑端部将压杆更换为碳纤维索后,仅改变了悬挑桁架端跨的竖向刚度,略减轻了悬挑端的结构自重,但未改变抗侧力构件的刚度。因此,在大悬挑部位局部采用碳纤维索,可以认为未改变结构的整体抗震性能。在计算分析中仅考察大悬挑桁架的受力表现即可。

针对将12号索由钢索更换为碳纤维索的情况,核

心筒间大跨斜拉结构的刚度会受到影响而改变,理论上会对侧向力的作用有一定影响。但在整体结构中,斜拉索在抗侧刚度中的贡献较低,因此地震作用没有发生明显的变化。本文利用MIDAS GEN软件对整体结构模型进行了分析并对比了钢索和碳纤维索的计算结果,通过振型分解法的分析对比,发现二者的模态、地震响应十分接近。限于篇幅,表3列出了二者前三个振型的对比,可以看出其振动特性几乎一致;本文也对比了与碳纤维索相连的核心筒其地震基底剪力和倾覆弯矩,在将钢索更换为碳纤维索后其变化均不超过1.5%,限于篇幅具体不再赘述。因此可以判断,该变化对主要抗侧力构件如核心筒和钢结构其他区段的地震响应没有明显影响。

表3 钢索模型和碳纤维索模型的振动特性对比

Table 3 Comparison of the vibration characteristics between steel cable models and CFRP cable models

振型 编号	钢索模型		碳纤维索模型	
	周期(s)/平动因子 (x+y)	扭转 因子 z	周期(s)/平动因子 (x+y)	扭转 因子 z
T1	0.944 5/(0.00+0.90)	0.00	0.944 5/(0.00+0.90)	0.00
T2	0.856 2/(0.02+0.76)	0.20	0.856 1/(0.02+0.76)	0.20
T3	0.822 1/(0.30+0.00)	0.69	0.822 0/(0.30+0.00)	0.69

采用碳纤维拉索后,对悬挑端索施加一定的预应力,可以发现桁架端部有向上15 mm的变形,但因碳纤维索刚度较原钢压杆刚度有所降低,故在总荷载作用下端部与原压杆桁架的变形基本一致,如图8所示。12号索位置的变形也与钢索位置的变形一致。

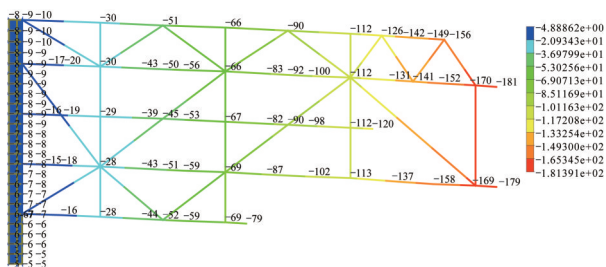


图8 悬挑桁架变形结果

Fig. 8 The deformation of the cantilever truss

碳纤维索相关区域钢结构的性能均可以满足原抗震性能目标的要求,大部分钢结构在遇到设防地震和罕遇地震时保持弹性,少数普通构件在遇到罕遇地震时产生塑性铰。

通过整体结构的有限元计算,考虑采用三向地震的振型分解法可得到各工况下的索内力,例举如表4所示。

表4 索拉力计算结果

Table 4 Tensile force calculation results of CFRP cables

荷载工况	P索(7×139)		12号单索(7×199)	
	索拉力/ kN	与破断 力比/%	索拉力/ kN	与破断 力比/%
竖向荷载	5 263	35.1	6 232	29.1
小震	5 308	35.4	5 247	24.4
中震	5 225	34.9	4 977	23.2
大震	max 6 415 min 1 297	42.8	max 5 505 min 2 971	25.6

注:中震及大震考虑荷载的标准组合。

碳纤维索在各竖向荷载、小震和中震的工况下,索力的设计值或标准值均未超过破断力的40%;在大震作用下索力也没有超过破断力的50%,因此可以满足安全承载的要求。同时,在大震作用下,索力最小值仍大于0,说明索始终处于受拉状态,没有发生松弛现象。但同时也可以看出,大悬挑端的索在大震下的最小拉力也较小,说明在反复荷载作用下索力的变幅较大,此时,施加一定程度的预应力避免其松弛现象的发生是必要的。

因该项目应用的拉索的吨位大,在极端荷载作用下(冲击、老化、或人为蓄意破坏或失误等原因),拉索一旦断裂失效,可能会造成整体结构严重损坏甚至倒塌,因此本文进行了单根拉索破断时防连续倒塌的分析。断索分析的方法采用线性静力分析法,并考虑了动力放大系数为2.0时的影响。分析结果表明,当单根碳纤维索破断时,在荷载组合1.0D+0.5L作用下,剩余结构仍能承载,其变形(悬挑端最大位移240 mm)和应力比(最大应力比0.92)均可满足防连续倒塌的要求。图9为悬挑端断索后剩余结构的应力比。

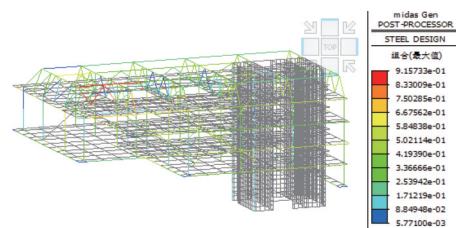


图9 单索破断后剩余结构应力比

Fig. 9 The structural stress ratio after cable breakage

同时,设计提出了碳纤维索在施工和使用中持续索力监测的要求。

## 2 碳纤维索的防火保护设计研究

### 2.1 碳纤维索的高温性能

碳纤维复合材料由碳纤维和树脂复合而成。其中树脂的作用是传递纤维间的剪力,使复合材料中的碳纤维能够共同承受外部荷载。但在高温的作用下,绝大多数聚合物材料的形态会从玻璃态转变至高弹态,再到黏流态。同理CFRP中的树脂当外部温度超过玻璃化温度 $T_g$ 时,树脂开始变软,导致传递纤维间剪力的能力下降,CFRP的力学性能会明显发生变化。碳纤维索中所使用的树脂平均玻璃化温度为 $111.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。

研究表明当环境的温度 $\leq T_g$ 时,CFRP的力学性能不会发生明显的变化;当 $T_g \leq$ 环境温度 $\leq 300\text{ }^\circ\text{C}$ 时,CFRP的强度下降不超过初始强度的50%,弹性模量保持率也在50%以上。YU等<sup>[8]</sup>进行了碳纤维棒的高温力学性能试验,在 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 时强度保持率为58.8%,如表5所示。WU等<sup>[9]</sup>也进行了碳纤维筋的高温力学试验,在 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 时维持0.5h后加载,强度保持率为51.6%。

表5 YU等<sup>[8]</sup>碳纤维棒高温力学性能试验结果

Table 5 Mechanical properties of CFRP at elevated temperatures obtained by Yu et al. <sup>[8]</sup>

温度/ $^\circ\text{C}$	强度保持率/%	弹性模量保持率/%
100	88.7	87.8
200	80.8	74.0
300	58.8	71.7

综上,该项目的防火保护目标可以转化为下述三点:

(1) 要求碳纤维筋在温度条件为 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 下的抗拉承载力不低于破断力的50%;

(2) 通过适当的防火保护,使碳纤维索在耐火极限的设计要求下,索体表面温度不超过 $300\text{ }^\circ\text{C}$ ;

(3) 在耐火极限要求下,通过进行适当的防火保护,考虑整体结构的刚度随温度的变化和温度效应,保证碳纤维索的拉力不超过破断力的50%。

碳纤维是一种特殊的材料,它随着温度的升高会有少量的收缩;同时,树脂材料具有随温度升高而膨胀的特性,二者结合会使碳纤维复合材料线膨胀系数接近于零,即可以认为不膨胀。该项目采用的碳纤维筋由厂家提供的线膨胀系数为 $0.7 \times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,约为钢材线膨胀系数的1/18,可以忽略不计。但在整体结构中,由于碳纤维和钢材的热膨胀性能的差异,在升温过程中钢材膨胀和碳纤维索不变形的现象差异,将在碳纤维索中产生一定程度的拉力,如图10所示。此时,温度效应产生的影响必须在计算中予以考虑。

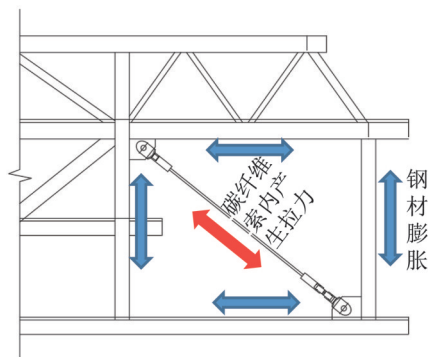


图10 碳纤维索温度内力产生示意

Fig. 10 Forces produced by the thermal effect in CFRP cable

### 2.2 火灾下碳纤维索的内力计算

结构的防火计算参考《建筑钢结构防火技术规范》(GB 51249—2017)<sup>[10]</sup>,其中碳纤维索的弹性模量与温度变化的关系参考表5确定,火灾升温曲线按照纤维类火灾的升温情况来确定,初始温度设定为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。

由于大悬挑桁架和碳纤维拉索为重要承重构件,其耐火极限为3h。为了减少温度效应对结构的影响,桁架构件采用50mm厚非膨胀型防火涂料,导热系数不大于 $0.1\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ 。

经过计算,可得出3h火灾下钢构件的温度分布,如图11所示。可以看出,在采用了较厚防火层的防火保护后,桁架杆件温度一般在 $100\text{ }^\circ\text{C} \sim 200\text{ }^\circ\text{C}$ 之间,此时钢材的强度尚未明显下降。计算考虑了温度效应的影响,此时钢构件承载力的验算均满足安全承载的要求,不再赘述。

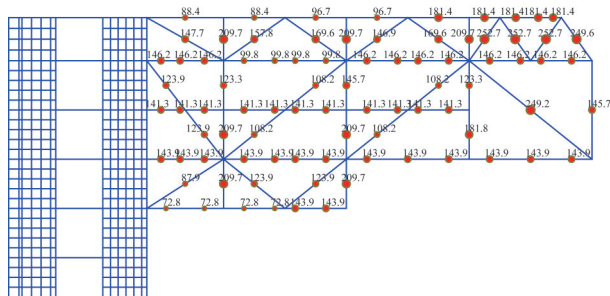


图11 3h火灾下的悬挑桁架钢构件温度分布(单位: $^\circ\text{C}$ )

Fig. 11 Temperature distribution at the fire duration time of 3 hours (unit:  $^\circ\text{C}$ )

耐火极限下的碳纤维索内力如表6所示,火灾3h碳纤维索的总拉力为 $4\,827\text{ kN}$ ,尚未达到破断力的50%。火灾升温的情况下,随着碳纤维索刚度的降低,其在竖向荷载和预应力工况中的拉力都略有降低,但由于其热膨胀基本为零,钢结构的升温膨胀会造成碳纤维索内拉力上升,根据计算可知其内力组成中有 $1\,344\text{ kN}$ 的部分是

由于温度效应引起的,占总索力的28%。如果将钢桁架的防火保护厚度减至25 mm,钢结构的升温将更高,由温度效应产生的影响在碳纤维索中引起的拉力将上升至2 335 kN。因此,有必要对钢桁架采取充足的防火保护措施,这样不仅能保证钢材部分的强度和刚度,也有利于避免碳纤维索中的温度内力过大。

表6 碳纤维索常温和火灾下内力对比

Table 6 Comparison of the forces of CFRP cables under normal temperature and fire

荷载工况	20℃下索力/kN	火灾3h下索力/kN	增减幅度
D+0.5 L	1 407	1 295	-8%
预应力	2 341	2 187	-7%
温度作用		1 344	
总索力	3 748	4 827	28%

### 2.3 碳纤维索的防火保护构造

碳纤维索外层为PE保护层,不利于防火涂料附着,在高温下PE材料也会熔化。因此先在索外侧设置6~8 mm厚度的钢管,钢管外侧设置一定厚度的非膨胀型防火保护层,如图12a)所示。防火层的材料可为非膨胀型的防火涂料或防火毯等。本项目在碳纤维索生产时,于PE层内侧一体化缠绕了7 mm厚的玄武岩纤维防火毯,这部分可作为安全储备。

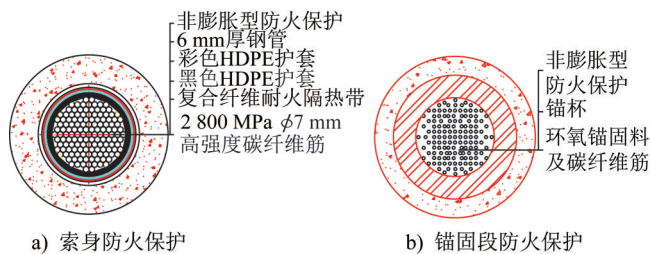


图12 碳纤维索防火构造

Fig. 12 The form of the fire protection of CFRP cable

为避免外围碳纤维筋由于温度较高而先发生破坏,研究人员较保守地设计了控制索外层的控制温度,即在考虑PE层热容量的有利作用下,计算控制外包钢管的温度不超过300℃。

按照规范<sup>[10]</sup>第6.2.2条可计算出在控制温度条件下的防火保护层所需厚度(不建议采用6.2.3条的简化算法),如表7所示。可以看出,当选用导热系数较低的防火保护层时,所需的防火保护层厚度较小;当选用一般性的非膨胀防火涂料时,防火保护层的厚度需要约60~80 mm,此时需要在涂料的中间层设钢丝网避免脱落。

表7 防火保护厚度计算结果

Table 7 Fireproofing coating thickness calculation results

防火保护导热系数/ $W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1}$	火灾3h控制温度/℃	
	250	300
0.10	83 mm	69 mm
0.08	70 mm	58 mm
0.04	45 mm	36 mm

对于锚固段的防火保护目标与索身的防火保护目标不同。为了保证锚固不失效,要求避免锚固料的状态(环氧铁砂)达到高弹态,即控制其温度不超过玻璃化转变温度 $T_g$ 。该项目也控制了锚固料外层的温度,即较保守地控制金属锚杯计算温度不超过150℃。锚杯可根据其直径及平均壁厚按照圆管截面的公式计算。根据规范<sup>[10]</sup>第6.2.2条计算,当采用导热系数为0.08  $W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1}$ 的防火涂料时,锚杯的防火保护层厚度可不超过35 mm。锚固段防火保护构造如图12b)所示。

以上通过理论分析,验证了在一定的防火保护条件下,结构可以达到设定的防火保护目标。因施工进度原因,项目在大悬挑部位实际应用了碳纤维索,碳纤维索的现场安装如图13所示。鉴于该项目为高强度碳纤维索在高层建筑中的首次应用,因此对于碳纤维索的耐火极限要求较高,需要对该项目采用的碳纤维索的高温性能及防火保护的实际情况等进行进一步的试验研究。

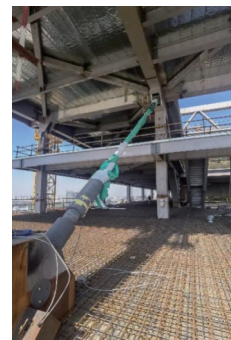


图13 碳纤维索的现场安装

Fig. 13 The application of the CFRP cable at the construction site

### 3 结论

本文以上海美的全球创新园区项目为载体,探索了千吨级以上的高强度碳纤维索在高层建筑中的应用,得到如下重要结论:

(1) 目前我国尚未出台关于碳纤维索的设计规范,参考现行《索结构技术规程》(JGJ 257—2012)<sup>[7]</sup>中关于钢索的规定,同时考虑碳纤维材料的特性,本文建议将

碳纤维拉索抗拉承载力的抗力分项系数相对安全地取为2.5。

(2) 碳纤维索的受力应满足各工况下的承载力需求及抗震性能目标。对关键部位需采用碳纤维索的结构,应考虑当断索情况发生时的极端状况,并满足防连续倒塌的需求。

(3) 根据碳纤维索的构造和高温特性,本文提出了火灾下其结构中碳纤维索的防火保护目标,并给出了整体结构的防火计算。通过计算发现,由于碳纤维索具有升温不膨胀的特性,在火灾下可能会产生较大的温度内力,在设计中应引起重视。

(4) 本文给出了一种针对碳纤维平行筋索和锚具的防火保护构造并给出了防火层厚度的计算方法。

(5) 鉴于该项目是高强度碳纤维索在高层建筑中的首次应用,需要对索及锚固段火灾下的表现及防火保护效果等进行进一步的试验研究。

## 参考文献:

- [ 1 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.纤维增强复合材料工程应用技术标准:GB 50608—2020[S].北京:中国计划出版社,2020.  
Ministry of House and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Technical Standard for Fiber Reinforced Polymer (FRP) in Construction: GB 50608—2020[S]. Beijing: China Planning Press, 2020. (in Chinese)
- [ 2 ] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.结构工程用纤维增强复合材料筋:GB/T 26743—2011[S].北京:中国标准出版社,2011.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Fiber Reinforced Composite Bars for Civil Engineering: GB/T 26743—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011. (in Chinese)
- [ 3 ] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.结构用纤维增强复合材料拉索:GB/T 35156—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Fiber Reinforced Polymer Composites Structural Cables: GB/T 35156—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)
- [ 4 ] 任慧韬,胡安妮,赵国藩.碳纤维片材的徐变性能试验研究[J].工程力学,2004,21(2):10-14. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2004.02.002.  
REN Huitao, HU Anni, ZHAO Guofan. Experimental study of creep behavior of carbon fiber reinforced plastics[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(2): 10-14. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2004.02.002. (in Chinese)
- [ 5 ] 尹世平,华云涛,徐世焯.FRP配筋混凝土结构研究进展及其应用[J].建筑结构学报,2021,42(1):134-150. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0349.  
YIN Shiping, HUA Yuntao, XU Shilang. A review on research progress and application of concrete structures internally reinforced with FRP bars[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(1): 134-150. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0349. (in Chinese)
- [ 6 ] Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars: ACI 440.1R-15[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2015.
- [ 7 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部.索结构技术规程:JGJ 257—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Cable Structures: JGJ 257—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [ 8 ] YU B L, KODUR V. Effect of temperature on strength and stiffness properties of near-surface mounted FRP reinforcement[J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 58: 510-517. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.10.055.
- [ 9 ] WU H Z, XU G W, MA M L, et al. Mechanical properties of CFRP bar with different elevated-temperature experiences[J]. Construction and Building Materials, 2023, 384: 131394. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131394.
- [ 10 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.建筑钢结构防火技术规范:GB 51249—2017[S].北京:中国计划出版社,2017.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Fire Safety of Steel Structures in Buildings: GB 51249—2017[S]. Beijing: China Planning Press, 2017. (in Chinese)