

瑞士温特图尔镇斯托克桥上碳纤维 (CFRP) 斜拉索的介绍

乌尔斯·梅尔 著

李双荣 译

(瑞士联邦材料测试与研究实验室 EMPA) (柳州欧维机械股份有限公司 柳州 545005)

摘要:从1980年起,瑞士杜本多夫的EMPA,苏黎世-斯维尔森巴的BBR公司,巴塞尔的Ciba AG公司,以及祖维尔的Stesalit AG公司,就一直研究开发应用于斜拉桥和悬索桥的碳纤维增强聚合物(CFRP)平行纤维线束。这种纤维线束具有卓越的力学性能及抗腐蚀性,很高的强度和相应的弹性模量,以及优良的抗疲劳特性。运用CFRP拉索以及将来推广使用所面临的关键问题是如何锚固。这里描述了一种已申请了专利——基于陶瓷和环氧树脂而制成的梯度锚固方法。1995~1996年,两根大尺寸的CFRP斜拉索首次运用于位于瑞士温特图尔镇斯托克桥上。该桥为一主跨124米,两车道的斜拉桥。

1 介绍

在过去的30年里,桥梁界已见证了越来越多的斜拉桥和悬索桥的拉索破坏情况。由于日益增加的腐蚀和疲劳载荷,桥上的拉索已难堪重负。大多数桥梁工程师似乎都认同应提高此类拉索的防腐和抗疲劳性能的观点。研究者们提出了使用非金属材料亦即非腐蚀性材料的现代解决办法。从二十世纪八十年代早期,替代钢丝用于斜拉索的碳纤维增强聚合物(CFRP)已有介绍。从使用寿命的观点出发,研究表明碳纤维增强聚合物(CFRP)相对于芳香族化合物或玻璃具有非凡出众的效果。未来碳纤维增强聚合物具有极高的应用潜力。接下来研究开发工作的目的是开发能适用于碳纤维丝束(CFRP)、并能发挥其巨大潜力的锚具系统,使得用这种复合材料制成的平行丝束具有高可靠性,并将其运用于试验工程项目。

2 碳纤维

这种理想的建筑材料主要由位于化学周期表的中间部分的元素制成。这些元素包括碳元素,在其原子周围形成有强而稳定的离子键。通过这种离子键将原子绑结在一起的材料,具有刚硬、高强度、甚至在相对很高的气温条件下,也能承受各种化学环境的侵蚀的特性。而且其密度低,

原材料来源丰富,取之不尽。碳纤维是将直径5~10微米范围内的有机聚脂纤维丝经碳化而制成的。在本研究项目上使用的碳纤维是TORAYCA T700S,其强度达4900MPa,弹性模量达230GPa,破断延伸率2.1%。密度1.8g/cm³。轴向热膨胀系数几乎为零。

3 碳纤维增强聚合物丝

乍一看,一种由平行纤维束和聚合物基体制成的先进复合材料似乎有不必要的复杂性。为什么不把实心碳棒(丝)用作索体的平行线束呢?正如上述所提到的,碳是一种非常粗糙,但却如化学元素周期表中间的元素一样具有非凡的性能表现的材料。然而由于其极具脆性,像这样的材料以往很少用作结构材料。用这类材料制作的构件,即使表面上存在光滑凹槽或内部细微缺陷都会导致突然地、早强地和灾难性地失效。考虑其化学结构特性,及统计表明用度碳制成纤维形式,能显著增强其强度以及大大地提高其可靠性。而且,存在于复合纤维丝内的裂纹不会像其在实心碳丝内那样突然地传播,纤维丝上的缺陷不会不可避免地导致构件失效,当纤维丝内置于聚合物基体时,能充分展示其全部强度,而且其破断时变形量极小。鉴于上述这些因素,CFRP纤维丝是非常可靠的。

CFRP纤维丝是通过抽拔挤出的方式加工而成的。这是一个将增强聚合物丝连续撞出的工艺过程。原纱的抽拉依次经过灌满环氧树脂的容器、成型模,最后到达养护区。纤维丝具有很好的平行排列和连续性。在本研发项目上用的增强纤维丝的纤维的体积含量比在68%~72%的范围之间。CFRP丝的轴向性能(弹性模量、强度)可简单地通过混合物规则计算得出。测出的性能参数值参见表1。本项目上用的纤维丝直径为5mm。

表1 抽拔T700S纤维线的性能参数

抗拉强度 σ_{μ} (纵向)	3300	MPa
弹性模量E (纵向)	165	GPa
密度	1.56	g/cm^3
纤维含量	68	Vol%
热膨胀性 (纵向)	0.2×10^{-6}	$m/m/^\circ C$

4 CFRP索体

索体由平行的CFRP纤维丝束制成。将纤维丝平行布置的主要目的是使纤维丝在索体中较之单根纤维丝而言具有最小的强度损失。既然CFRP纤维丝具有非常好的防腐性能,因此不需灌浆或作防腐处理。然而,仍需采取必要的防护措施保护其免受风蚀和紫外线辐射的侵蚀,因为这两种侵蚀可降低纤维丝的表面性状。塑料管(PE填充碳黑)可用作合适的外层防护。

5 CFRP拉索锚具

CFRP拉索的应用面临的关键的问题,和将来推广使用的障碍是如何锚固拉索的问题。上述的CFRP纤维丝的卓越的机械性能参数仅仅是在其纵向上的性能表现,其侧向性能包括内层组织间的抗剪性能相对贫弱,这使得锚固CFRP纤维丝束并获取其全部的静载和疲劳强度非常困难。

EMPA开发的CFRP拉索使用锥形树脂填充成型锚固体。对填充入锚头的金属锥筒和CFRP纤维丝之间的空间的填充材料的评估是问题的关键。这种浇铸材料,也叫荷载传递介质(LTM)必须满足诸多要求。

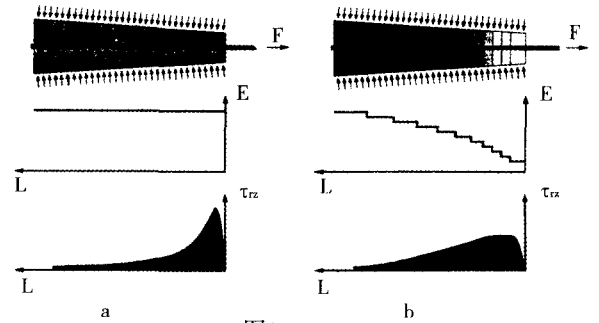


图1

—通过这种形式的固结,荷载必须能长时间地保持CFRP纤维丝的高静载和疲劳强度。

—锚头的金属锥筒和CFRP丝之间应避免产生电流腐蚀。电流腐蚀对金属锥筒有害。因此荷载传递介质(LTM)应为电绝缘材料。

锚固筒内的锥面提供了必要的放射状压力以提高CFRP纤维丝内层组织的抗剪强度。此概念通过用一根纤维丝的系统为例说明,如图1所示。如果锚固筒内的荷载传递介质全长都用环氧树脂填充,那么在锚固体最前端的CFRP纤维丝表面上将产生很高的剪应力集中(图1a)。这个剪应力峰值将引发CFRP纤维丝撕裂或拉伸失效,但却远远低于其抗拉强度。

可以通过不填充树脂的方法避免此剪应力峰值的产生。然而这样会引起徐变和早期应力破断。最好的设计方案如图1b所示。荷载传递介质(LTM)是一种梯度变化材料。在锚固筒的前端,介质的弹性模量较低,依次向后连续提高至最大值。荷载传递介质包含有氧化铝(Al_2O_3)陶瓷颗粒物,直径为2mm。所有的颗粒具有相同的尺寸。为获取较低的介质弹性模量,颗粒物用一层厚环氧树脂涂覆,并在使用前做养护,由此可避免其在锚固筒内产生收缩。中等弹性模量介质,对颗粒物进行薄层环氧涂覆获取。高弹性模量介质,用颗粒物不进行涂覆直接填入锚固筒(图2)获取。通过这种方法,荷载传递介质的弹性模量可达到特定要求的效果。颗粒物之间的孔穴可用环氧树脂以真空铸型方法填充。

此方案的结果如图2所示。大量的此类碳纤维束在EMPA进行了静载和疲劳试验,结果证明了所采用的锚固系统很可靠。其静载抗拉能力达

到了整束中单根纤维抗拉极限总合的92%。这个结果已十分接近理论要求抗拉能力94%。在EMPA进行的拉索疲劳试验表现出了CFRP循环荷载下高强的疲劳性能。此锚固系统已申请专利保护(美国专利号5713169和欧洲专利号0.71013B1)。设于苏黎世--斯维尔森巴的BBR公司已从EMPA获得国际许可证。

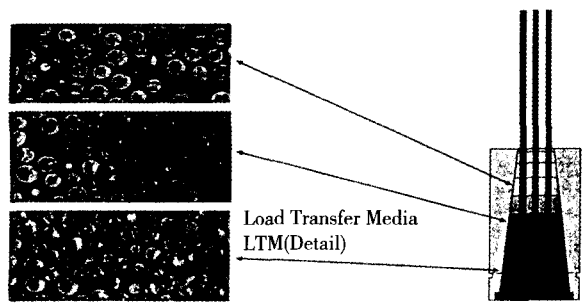


图2

6 斯托克桥创造了国际桥梁建设上使用CFRP拉索的里程碑

斯托克桥建于1996年,位于瑞士温特图尔火车站,跨越18道铁轨。为中央A形独塔,两几乎相同的边跨各为63米和61米(图3)。其拉索汇集于塔顶,并在A形塔顶部的箱锚室内锚固。上部结构有两条主纵梁(HEM550, Fe E460),间隔8米,支承预制面板。在斜拉索的锚固点设立横梁(IPE550, E335)纵梁通过剪力钉与桥面板连接,组成复合梁结构形式。

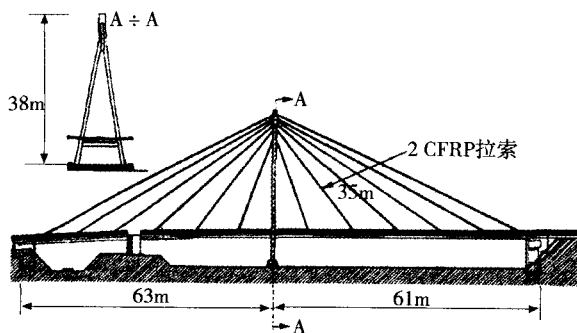


图3

用于斯托克桥的CFRP斜拉索型号包含有241根 $\phi 5\text{mm}$ 纤维丝。此拉索承受的荷载大于桥梁的允许荷载的3倍,并经受了1000万次的循环荷载。这相当于桥梁在使用过程中的预期荷载的好

几倍。两根CFRP拉索的锚具与其相邻的钢丝拉索锚具都由EMPA安装了常规传感器和具有当时技术水平的玻璃纤维传感器,以对拉索的应力和变形进行长期监控。这一布置也提供了理论模型与实际应用的对比状况。

这一开发项目受到了CTI(技术与创新委员会)的支持,目的是在世界范围内增强桥梁建设工程师对碳纤维拉索的信心,并由此创立瑞士工业在斜拉索领域内的领先地位。

斯托克斜拉桥理所当然世界桥梁建造史上的一座里程碑,因为CFRP拉索不仅在防腐和疲劳性能上具有优良的表现,而且在具有同等强度条件下,CFRP拉索的重量只有钢丝拉索的五分之一。这种高强轻质的特性使得未来建造更长跨度的桥梁成为可能。

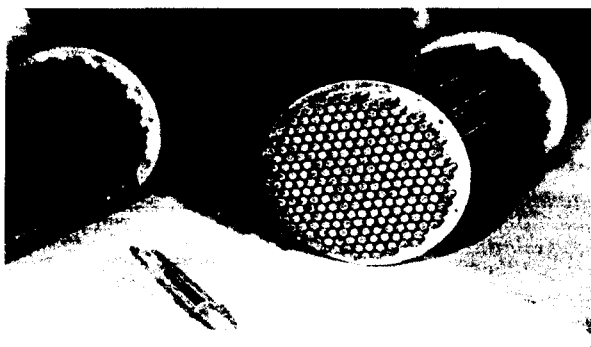


图4

7 长期监控

对于小规模试用CFRP拉索,要求做长期的监测以最后获得对使用这种现代材料的信心。这类材料的结构安全和结构特性变化令人最感兴趣,尤其是长期使用经验的缺失。清晰的健康记录只可能通过可靠的传感器和收集数据获取。受力、应力和变形经常通过应变测量来监测。在本工程项目上,CFRP的应变由基于纤维光栅(FBGs)和电阻应变计(RSGs)的传感系统作测量,这里利用了其高分辨率、低漂移性和高可靠性。大量地使用传感器不仅提高了测量的可靠性,而且还可对传感系统的实际可靠性和测量的不确定性做出评估结论。结合实际应用,也测试了传感器的大致的使用寿命。

纤维光栅(FBGs)被粘附在受力纤维丝表面上,及粘附在假纤维丝上用于温度补偿。(与斯

托克桥作对比，两年后在位于卢瑟恩附近修建的克林内埃梅桥上所有光栅（BG）传感器都是在工业生产过程中内置于CFRP线束中的。在纤维线上的一些纤维光栅传感器施加了预应力2500 $\mu\text{m}/\text{m}$ 以监测由于纤维分层涂覆或环氧护层引起的徐变。在CFRP束上所受的载荷为适中载荷，相应的平均应变值约为1200 $\mu\text{m}/\text{m}$ 。传感器自1996年4月使用以来没有出现可靠性问题。

关于斯托克桥上的光纤监控数据可靠性的重要信息，可以从所谓的假纤维丝上的纤维光栅传感器（FBGS）获取。每根索上的七组纤维光栅

传感器（FBGS）中的四组安置在无载荷的假纤维丝上用于温度补偿和徐变监测。经施加预应变的传感器上的临时应变量的变化等同于未施加应变传感器的应变量的变化。假如产生了滑移或徐变，预应力传感器会显示一个负飘移值。这个结果证实了该操作无误。

最重要的测量是锚固体锥面和荷载传递介质（LMT）之间的相对位移。图5，如预期那样，显示了相对位移因时效作用的变化情况。四条曲线清晰显示了变化平缓的迹象。这与前期估计的情形相符。

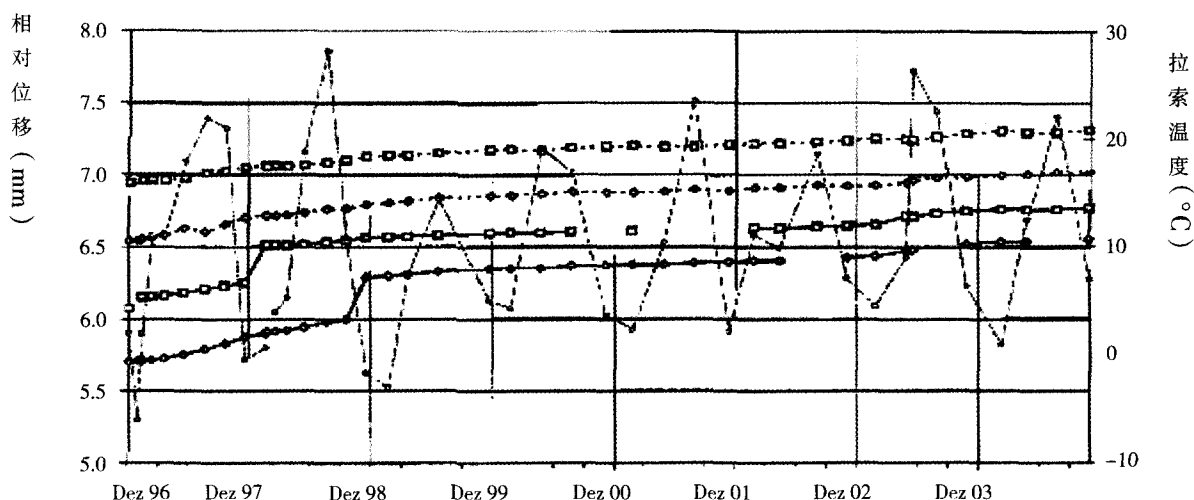


图5

8 结论

世界范围内，悬索桥的吊杆被定期更换。在过去20年里，斜拉桥的维护成本相当高。许多斜拉索需要更换。毫无疑问，从技术角度看，CFRP是当今做吊杆和拉索最合适的材料。然而，建桥初期的成本总是最主要的，经常是桥梁业主在做决定时所使用的唯一指标，这使得CFRP很难与钢材相竞争。即使碳纤维价格在以后五年内下降到CHF20/kg（USD16），（CFRP材料比钢材轻5.2倍），CFRP拉索仍难以竞争，除非将维系桥的寿命的全部成本加以考虑。一些用户，如交通部不断要求增加更多的维护桥梁寿命的成本投入。这考虑了全桥使用寿命过程中的

预计检测和维护费用，通常按100年计算。如成本用计算支出费用的净现值方法，以典型现金折旧6%计算，CFRP拉索对比钢材拉索则优势很大。

最重要的一点是要记住，这不是一公斤重材料的成本，而是制成品、制作安装的成本效率，考虑使用寿命和以后的更换成本。就这一理念，利用CFRP纤维带粘结技术已应用于结构加固工程上，很有可能，这也将是未来CFRP拉索使用的范例。

译者注：经征求瑞士EMPA材料测试与研究实验室相关人员意见，其同意将本文转译成中文，仅用于内部交流，不得涉及其它商业目的。特此说明。由于翻译水平有限，不足之处，欢迎批评指正。