复合材料矩形截面预紧力齿连接试验

徐玉康　夏庆辉　吴万鑫
（南京工程学院建筑工程学院，江苏 南京 211100）

摘　要　本文对以预紧力、钢齿齿长为变量，以探讨桥梁使用为目的的 CFRP 预紧力齿连接的破坏模式以及力学连接性能进行研究，研究表明：预紧力大小对破坏模式没有影响；由于接触端钢齿齿长的差异，发生于复合材料预紧力齿连接接头的失效形式存在三种；钢齿长度的变化使单齿的承载能力增加，但只限于某一特定的范围，当齿长增加到一定程度时，其承载能力将不会受到钢齿齿长的影响。

关键词　复合材料　预紧力齿连接　破坏模式　极限承载力
中图分类号：TB332　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1007-0745(2022)12-0001-05

土木工程中，由于其自身的高强度，比刚度大，比模量大，耐腐蚀，轻量等优良性能，以及当前生产技术工艺单发展成熟，复合材料得到了广泛的应用，在未来的各项市场、不同工程领域皆有良好的前景、优势。但复合材料在连接方面仍然存在诸多缺陷弊端，导致其多运用于要求荷载较低的构件之中。诸如螺栓连接、胶接、胶栓混合连接的传统连接方式已有不同学者的深入研究 [1-6]，其破坏模式，连接性能等已有所掌握，但其存在的缺点难以克服，导致了复合材料的连接性能、效率不佳，使得承载力较差，复合材料的连接问题突破口也因此成为专家学者们专注的重难点。为此，复合材料预紧力连接作为新型的科技，在 21 世纪被提出 [7-8]，传统复合材料连接形式的问题被解决，充分发挥了材料的优良性能，连接效率可达 80%[9-11]，该技术的充分利用显著提高了复合材料齿层间剪切强度 τ 以及接触面摩擦力 f 传递外荷载 q，因此连接构件的极限承载力得到提升。

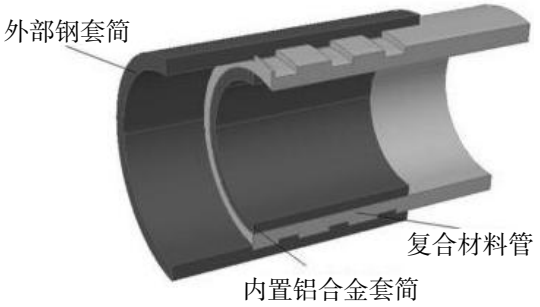

图 1 接头构造

荷载 q 较小时荷载仅由 f 传递，而荷载 q 较大时，复合材料齿端承受挤压，进而荷载 q 得到传递，复合材料齿层间剪切强度 τ 决定了接头承载的效率，纯胶层抗剪强度（约 20Mpa）远远低于了复合材料齿层间剪切强度（一般高于 50Mpa），而径向预紧力 σ 又加强了该强度，所以预紧力齿连接接头连接效率较高，连接性能更加优秀。

前期，科研人员针对预紧力齿连接技术开展了大量的实验研究工作，2008 年赵启林、李飞等率先设计了一个适合于管类结构的复合新型连接工艺——预紧力齿连接工艺，能够在复合材料圆管端部预先制备快速传力的金属连接；2012 李飞等从承载能力原理、单齿承重、多齿承重等方面对预紧力齿连接技术进行了深入的理论研究，从而得到了预紧力齿连接结构的设计计算方法；2013 年苗大胜 [12] 就这种形式的过盈配合进行了讨论，通过一系列实验，得到了一种设计方案；2014-2015 年，徐龙星等 [13-14] 研究了预紧力齿连接单齿在剪切破坏情况下的强度及传力机理；2015 年高一峰 [15] 研究了 CFRP 预紧力单齿接头的拉伸极限承载力及其损伤模型，认为预紧力齿连接接头损伤模型复杂程度较高。预紧力齿连接承载效率高，但适用于单板与圆形截面构件，而对于矩形截面，由于预紧力分布不均，需要做更多的研究。因此，本文对预紧力和钢齿齿长的改变进行了系统的实验研究，从载荷 - 位移曲线、应变和破坏方式分析的结果，探得各变量对连接强度的影响大小。本文研究成果对提高接头稳定性提出了重要参考依据，对复合材料的矩形截面管与预紧力齿接头在桥梁工程上的使用也提出了重要实验基础与技术。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验材料包括以下几种。

1.1.1 复合材料平板

本研究的试件复合材料平板均选用拉挤型碳纤维

表 1 碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP) 板力学参数

材料	E_x（Gpa）	E_y（Gpa）	E_z（Gpa）	μ_{xy}	μ_{yz}
碳纤维板	120	8.2	8.2	0.33	0.3
材料	μ_{xz}	G_{xy}（Gpa）	G_{zy}（Gpa）	G_{xz}（Gpa）	
碳纤维板	0.33	5.3	4.6	5.3	

表 2 Q345 钢板力学参数

材料	E_x（Gpa）	E_y（Gpa）	E_z（Gpa）	μ_{xy}	μ_{yz}
钢材	210	210	210	0.3	0.3
材料	μ_{xz}	G_{xy}（Gpa）	G_{zy}（Gpa）	G_{xz}（Gpa）	
钢材	0.3	81	81	81	

表 3 预紧力齿连接试件分组

组号	试件编号	H2（mm）	L（mm）	h（mm）	b（mm）	N（Mpa）	齿数 n	试件个数
A	1T-gc-1.5-23.3	2	16	1.0	20	23.3	1	2
	1T-gc-1.5-30.2			1.5		30.2		
	1T-gc-1.5-40.5			2.0		40.5		
	1T-gc-1.5-53			2.5		53		
	1T-gc-1.5-58.4			3.0		58.4		
	1T-gc-1.5-63			16.0		63		
B	1T-gc-1.0-60			1.0		60		
	1T-gc-1.5-60			1.5		60		
	1T-gc-2.0-60			2.0		60		
	1T-gc-2.5-60			2.5		60		
	1T-gc-3.0-60			3.0		60		
	1T-gc-16.0-60			16.0		60		

复合材料（Carbon fiber reinforced poly-mer/plastic，CFRP），纤维走向以 0° 为主，板厚为 13mm，宽为 20mm（纤维体积含量为 65%）。材料参数见表 1。

1.1.2 金属板

金属板采用钢板 Q345，厚度为 10mm，宽度取 45mm，材料参数见表 2。

1.1.3 螺栓

螺栓采用犬牙不锈钢 12.9 等级的 M6 高强度螺栓，其拉伸强度和屈服强度分别为 700 Mpa 和 450 Mpa。

1.2 试件分组

预紧力齿连接试件分组见表 3，变量为预紧力、钢尺齿长，共计 12 组，分为 AB 两大组，A 组为预紧力变化试件组，B 组为齿长变化试件组。

1.2.1 预紧力 A 组

共分为 6 组，予以不同预紧力的试件，研究不同预紧力对单齿失效方式及极限承载力的影响。每种预

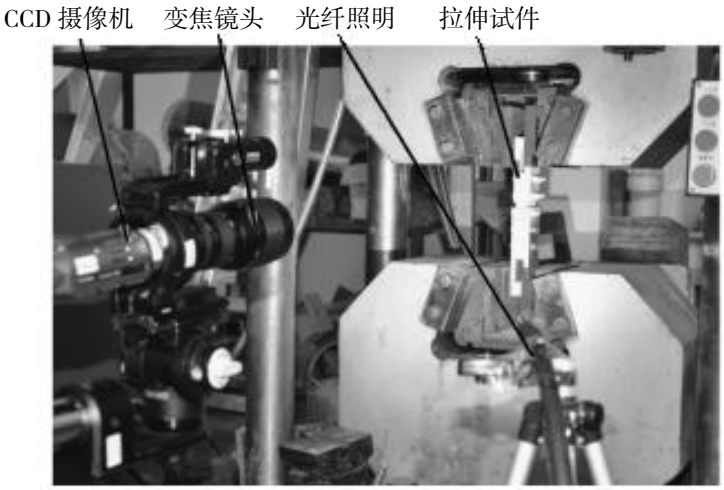

图 2 试验加载及数据采集

表 4 B 组破坏模式试验结果

组号	试件编号	h（mm）	破坏模式
B	1T-gc-1.0-60	1.0	钢齿弯减破坏
	1T-gc-1.5-60	1.5	钢齿弯减破坏
	1T-gc-2.0-60	2.0	钢齿明显弯剪变形，复合材料齿剪切破坏
	1T-gc-2.5-60	2.5	钢齿明显弯剪变形，复合材料齿剪切破坏
	1T-gc-3.0-60	3.0	钢齿明显弯剪变形，复合材料齿剪切破坏
	1T-gc-16.0-60	16.0	钢齿无明显弯剪变形，复合材料齿剪切破坏

紧力大小制作两个试件。

1.2.2 钢齿齿长 B 组

共分为 6 组，予以不同齿长的试件，用于探讨接头中钢齿尺寸变化对单齿破坏模式和极限承载力的作用，每种齿长制作两个试件。

试件共有两端，分别为齿连接以及螺栓连接。螺栓安装在钢板的两边，不受外力的影响，以提供对齿的预应力。为便于观察钢齿的失效，保留了空隙。试件尺寸如下：复合材料齿长 L 和齿深 H1 为 16mm 和 2mm，接触端钢齿齿深 H2 为 2mm，钢齿宽度和复合材料齿 b 为 20mm，改变钢齿长度 h 和预紧力 N。试件编号为 nT-gc-h-N，其中齿数为 n，受拉伸状态以 T 表示，钢齿以 gc 表示，钢齿齿长为 h, 预紧力为 N，如 1T-gc-1.0-60 表示齿数 1，受拉伸，钢齿齿长 16mm，预紧力 60Mpa 的试件。

1.3 试验加载及数据采集

万能试验机用于试验工作，该设备可以自动收集和存储成数据的形式。由 ASTMD3846-94 标准，采取分级加载方式及 0.5mm/s 的速度进行试验加载，记录试件的载荷 - 位移曲线并对其进行了最大承载能力的测量。平板试验加载如图 2 所示。

2 试验结果分析及讨论

2.1 CFRP 复合材料预紧力齿连接接头破坏模式

结果表明，改变预紧力未对破坏模式产生显著影响。钢齿齿长 h 在 1.0mm~2.0mm 范围内，复合材料齿向下滑动，试件钢齿发生介于弯曲破坏与剪切破坏之间的破坏形式，钢齿发生严重弯曲，两端剪断；钢齿齿长在 2.0mm~3.0mm 范围内，剪切破坏发生于复合材料，钢齿将发生介于弯曲变形与剪切变形之间变形；钢齿齿长大于 3.0mm 时，剪切破坏发生于复合材料，钢齿不发生显著介于弯曲变形与剪切变形之间变形。

2.2 CFRP 复合材料预紧力齿连接接头荷载 - 位移

B 组试件的荷载 - 位移曲线，显著的非线性特点

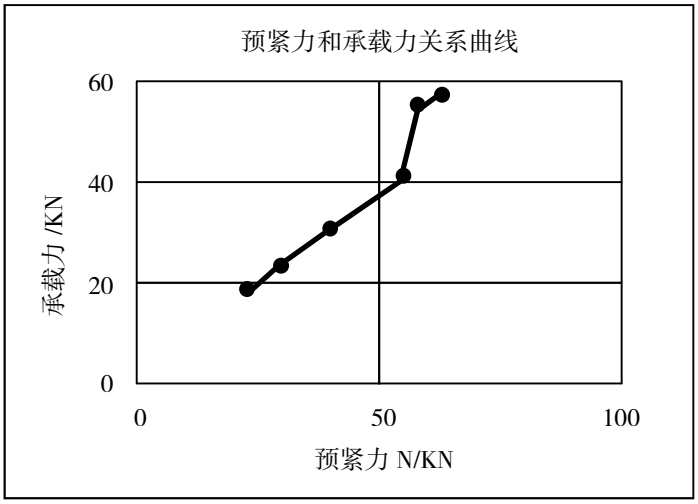

图 3 CFRP 复合材料预紧力齿连接接头承载力随预紧力的变化曲线

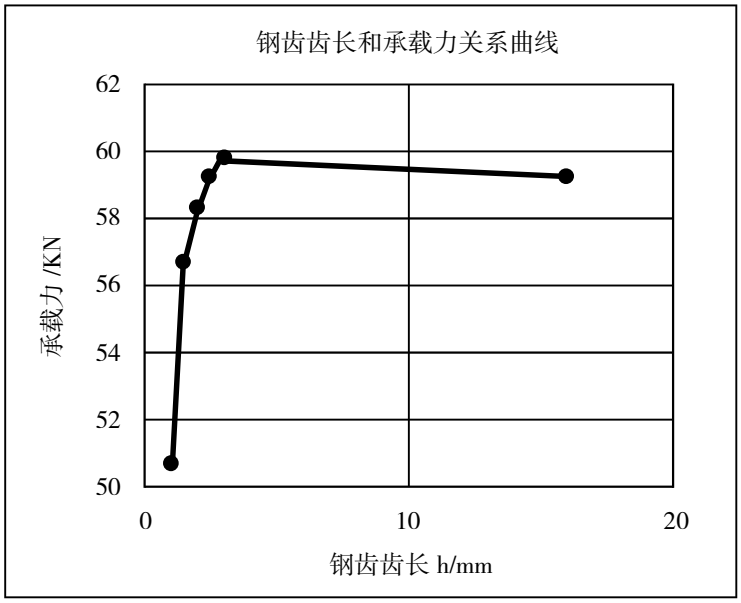

图 4 钢齿齿长与极限承载力关系曲线

表现于曲线的初始阶段，这主要是基于试块和夹具的滑动。从这一结果可以得知，具有典型的特征存在于预紧力齿连接的荷载－位移曲线：当负荷在升至极限值后突然减弱，与此同时试块纤维拉断破坏以及剪切破坏为主要的破坏模式，但改变了预紧力和钢齿的齿长对荷载－位移特征并没有任何的影响。

2.3 CFRP 复合材料预紧力齿连接接头极限承载力

试验所得复合材料预紧力齿连接承载力 Pu 平均值，连接强度 σ 和破坏模式。

连接强度 σ 计算公式为：

$$\sigma=Pu/dt$$

式中：d 为复合材料板宽，为 20mm；t 为复合材料板厚，为 13mm。

3 CFRP 复合材料预紧力齿连接接头承载力影响因素

3.1 预紧力

如图 3 所示，为 A 组接头极限强度与预紧应力之间的变化规律。实验表明：在 55Mpa 内条件下，随着预紧力的增加，节点的承载量随着预应力的增加而升高，而在 55MPa 以上的预紧力下，即使继续增加，其

承载量也保持不变。

3.2 钢齿齿长

如图 4 所示为 B 组随钢齿齿长变化接头最终承载力的变化。研究发现，在某一特定的范围，随着钢齿长度的增加，其极限承载力将得到提高，钢齿齿长 h 在 1.0mm~1.5mm 范围内，影响较大，曲线斜率较大，提高的幅度大，接头极限承载力随钢齿齿长增加而提高的速度快；钢齿齿长 h 在 2.0mm~3.0mm 范围内，曲线斜率相对较小，故增长幅度相对较小；但当钢齿齿长大于 3.0mm 时，曲线斜率接近 0，即便是钢齿齿长增至 16mm，接头承载力也依然几乎不改变。

由此可知，有效齿长的存在对于承载力的作用。随着齿长的增加，只在有效齿长连接承载力的增加才会发生，当齿长大于有效齿长度时，连接承载力将不再改变，再增加齿长只会存在对材料的浪费，并不能有效利用材料。

4 结论

针对 CFRP 的预紧力齿连接接头，我们进行了深入细致的研究，最终我们得出了如下几条结论：

1. 破坏模式与预紧力大小无任何关联，复合材料预紧力齿连接接头与钢齿齿长相关的破坏大抵可分为以下三种类型：

（1）钢齿弯剪破坏。

（2）钢齿具有明显的弯曲变形和剪力失效。

（3）钢齿无明显弯剪变形且复合材料齿发生剪切破坏。

2. 具有典型的特征存在于预紧力齿连接的荷载 - 位移曲线，即荷载逐步升至极值后会突然出现减弱，与此同时试块纤维拉断破坏以及剪切破坏为主要的破坏模式。

3. 复合材料预紧力齿连接接头连接有着杰出的性能，其最大连接强度可达 227.69MPa。

（1）在 55Mpa 内条件下，随着预紧力的增加，节点的承载量随着预应力的增加而升高，而在 55MPa 以上的预紧力下，即使继续增加，其承载量也保持不变，接头连接强度会趋向某个值，无显著变化。

（2）如果钢齿齿长较小，则钢齿齿长的增加会对单齿的极限承载能力造成一定的影响，齿长越大，其承受能力就越强，从而使其逐渐增大，但是随着钢齿长度的增大，其对连接承载力的影响会逐渐变得稳定。

4. 本文试验仅对不同钢齿齿长的单齿试件进行研究，对于涵盖载荷的分配等方面的复合材料多齿连接，所得结论和规律尚需进一步探讨。

参考文献：

[1] 刘风雷，刘丹．复合材料结构用干涉单面螺纹抽钉紧固系统连接技术 [J]. 航空制造技术 ,2010,52(23):76-78.
[2] 沈帆．复合材料销钉连接的研究 [D]. 武汉：武汉理工大学 ,2011.
[3] 刘亚文，宋建国，马毓，等．胶层厚度对双搭接胶连接接头承载力的影响分析 [J]. 玻璃钢 / 复合材料 ,2012,38(02):20-24.
[4] KIMKS,YOOJS,etal.Failure m-ode and strength of unidirectional composite single lap bonded joints with different bonding methods[J].Composite Structures,2006(72):477-485.
[5] 马毓，李飞，赵启林，等．复合材料构件机械连接接头破坏模式与机理 [J]. 解放军理工大学学报 ,2010,11(06):658-663.
[6] 马毓，江克斌，赵启林．制作工艺对复合材料胶 - 螺混合连接接头传力机理及承载力的影响分析 [J]. 机械强度 ,2011,33(01):99-105.
[7] 李飞．复合材料新型连接技术及在桁架中的应用研究 [D]. 南京：解放军理工大学博士学位论文 ,2012.
[8] Zhang D.Z Q. H Y.Flexural properties of a lightweight hybrid FRP-aluminum modular space truss bridge system[J].Composite Structures,2014,108(feba):600-615.
[9] Li F,Zhao Q L,Gao Y F,et al.A prediction method of the failure load and failure mode for composite pre-tightened tooth connections based on the characteristic lengths[J].Composite Structures,2016(154):684-693.
[10] Deng A Z,Zhao Q L,Li F,et al.Research on bearing capacity of single tooth to composite pre-tightened teeth connection[J].Journal of Reinforced Plastics & Composites,2013,32(21):1603-1613.
[11] 赵启林，高一峰，李飞．复合材料预紧力齿连接技术研究现状与进展 [J]. 玻璃钢 / 复合材料 ,2014(12):52-56.
[12] 苗大胜．纤维增强树脂基复合材料组合空间桁架桥连接技术和结构性能研究 [D]. 南京：解放军理工大学 ,2013.
[13] 徐龙星．复合材料预紧力齿连接承载力计算方法与试验研究 [D]. 南京：解放军理工大学 ,2014.
[14] 徐龙星，程营，陈立，等．拉压状态下预紧力齿连接接头承载力和剪应力分布规律研究 [J]. 玻璃钢 / 复合材料 ,2015(06):23-28.
[15] 高一峰．碳纤维复合材料预紧力齿连接破坏模式及设计方法研究 [D]. 南京：解放军理工大学硕士学位论文 ,2015.