

无粘结预应力筋用球墨铸铁一体化锚具 锚固体系的研制与应用

李东彬 翟传明 代伟明 曲京辉

(中国建筑科学研究院建筑结构研究所 北京 100013)

摘要:球墨铸铁一体化锚具锚固体系是在总结国内近20年来预应力筋锚具应用基础上针对无粘结预应力筋开发的专用锚具,它的特点是张拉端锚具采用球墨铸铁将垫板与锚环一体化,材料用量少,结构紧凑,锚固可靠;固定端锚具设计为摩擦片式挤压锚,挤压锚制作方便,锚固更为可靠,其性能符合国标GB/T14370-2000的有关要求,同时也适用于2000MPa级预应力筋。此外该锚固体系的最大特点是可以完全实现预应力筋全长封闭。

关键词:球墨铸铁 一体化锚具 全长封闭 无粘结预应力筋 摩擦片式挤压锚

1. 无粘结预应力筋对锚具的要求及现状

无粘结预应力筋预应力的传递始终要依赖锚具,锚具的重要性是不言而喻的。同时,预应力筋在任何位置的腐蚀断裂都将影响其全长范围内结构各跨受力性能,对结构的影响也是致命的。所以无粘结预应力筋要求:①更为可靠的锚具;②更完善的防腐保护体系。埋入混凝土中的挤压锚,因挤压制作时剥去了端头塑料护套,往往在挤压锚垫板孔处预应力钢材外露;张拉端锚具因构造原因封闭保护可靠性不理想,即无粘结预应力筋的锚固区是防水薄弱环节,因而其耐久性成为令人担心的问题。

目前,大量使用的无粘结预应力筋用的张拉端锚具是锚具和垫板分开的分体式锚具。现场使用时,无粘结束与垫板垂直度难以保证,因而影响锚具和预应力筋受力,同时当要求锚头不允许外露于结构时,其穴模深度达100mm以上,对结构削弱较大。

固定端挤压锚具基本以钢丝簧作为摩擦件,钢丝簧又分为圆钢丝和三角钢丝两种。这两种形式的挤压锚都存在以下几方面的问题:钢丝簧一般为高碳钢丝,经淬火提高其硬度,带来钢丝簧脆性大,韧性极差,安装操作时易断裂,同时切断的预应力钢材断口多有毛刺,或散股直径变大等情况,安装操作也较困难,制作损耗较大;圆截面钢丝簧的咬合面积大,所

需挤压力高,且其与钢绞线的咬合面为圆弧接触,锚固能力难以达到标准规定要求;三角钢丝簧挤压锚性能远胜于圆钢丝簧挤压锚,一般性能尚可,但钢丝簧在挤压时全部碎裂,如果套筒与钢绞线的硬度匹配不当,或刻入套筒内过深,刻入钢绞线较浅,易造成预应力筋滑脱;或碎裂的钢丝刻入钢绞线过深,造成母材损伤大,应力集中,锚固效率难以达到理想效果。换言之,这种挤压锚要求挤压套筒与钢绞线之间的严格的硬度匹配关系,同时要严格控制各加工尺寸偏差,否则挤压锚的性能将得不到可靠保证。

2. 无粘结预应力筋锚具的选型及设计

2.1 选型

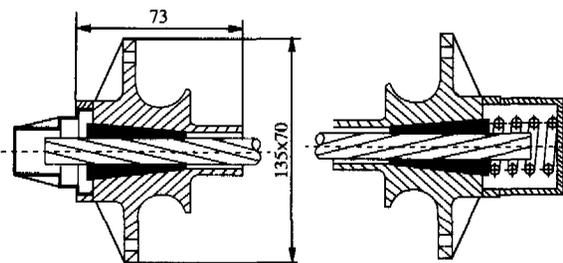
根据以往工程实践经验,并参考国际上先进国家预应力专业公司开发的产品,张拉端和固定端锚具分别采用夹片锚和挤压锚,或两端均采用夹片锚具。同时,为提高挤压锚的技术水平和可靠度,将挤压锚设计为摩擦片式挤压锚,即用一种内外均带丝扣的片状衬套代替原钢丝簧,称为摩擦片;张拉端夹片锚设计为球墨铸铁一体化锚具,将锚环与垫板合二为一,从而大大减少机加工工作量,降低锚具成本,提高技术水平。采用球墨铸铁作为锚具材料的理由,可列举如下几点:①球墨铸铁的材料性质介于灰铸铁与钢材之间,其强度可在

400~900MPa之间进行选择,弹性模量约 $1.3\sim 1.5\times 10^5\text{N/mm}^2$ 之间,显然其强度与常用的锚环材料45号钢或40Cr相当;②虽然其塑性没有钢材好,但其铸造性能优于铸钢,有利于提高铸造质量;③球墨铸铁与钢材的表面摩擦系数较小,有利于自锚锚固。

2.2 一体化锚具的设计

(1) 夹片设计 夹片设计为两片式或三片式夹片,长度43mm,大头直径27mm,斜角7度,齿形为细牙倒锯齿形,尾部释放锥角为2度,齿形高度为0.3mm。

(2) 锚环与垫板一体化铸件的设计 采用铸造的方法将锚环与垫板合二为一,由于锚环受力较复杂,将垫板与锚环连成整体后其受力情况进一步复杂化。但大致可理解为,锚环部分以环向受拉为主,垫板部分以受弯为主。经初步估算并多次修改后,一体化锚具设计如图1。设计中考虑了锚具的受力,同时也考虑了尽量减小传力时对混凝土的局压应力,并尽量节省钢材。一体化铸件可同时用于张拉端和固定端,仅端头附件有所不同。



(a) 张拉端锚具

(b) 固定端锚具

图1 一体化锚具设计

(3) 球墨铸铁一体化锚具张拉端及固定端锚区构造 无粘结体系要求全封闭保护无粘结筋及锚具。张拉端锚具构造如图2所示。

由图2可知,锚具金属部分除端头外均全部埋入混凝土中,张拉后切除多余钢绞线并用注满防腐油脂的塑料保护帽封严端头;再用微膨胀砂浆将凹槽填实,从而阻断了水气从外界侵入锚具的通道。而端部剥去塑料皮造成的锚具尾部裸露的预应力筋,则用专门的塑料套管重

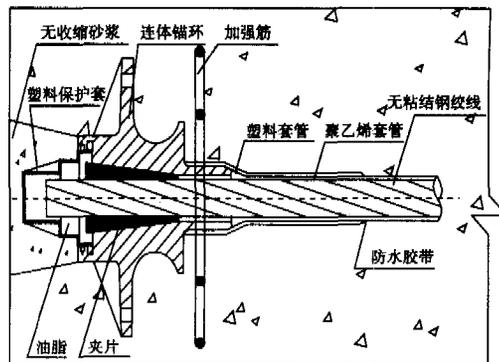


图2 张拉端锚具构造

新予以保护。因此一体化锚具的构造是严密的,形成了端部预应力筋的完全封闭保护体系,同时锚具也可靠地被混凝土封裹,耐久性有了可靠的保证。固定端采用一体化锚具时,锚具预先组装在预应力筋端头,端头有一金属帽,内有油脂及钢丝弹簧,弹簧以一定的力量压紧夹片,当张拉预应力筋时,随着预应力筋纵向移动,夹片将自动跟进,楔紧预应力筋。其余构造与张拉端相同,只是不需要设置张拉凹槽,而直接将锚头埋入混凝土中。

2.3 固定端挤压锚设计

摩擦片材料采用与夹片相同的材料20CrMnTi低碳合金钢制造,表面碳氮共渗处理。摩擦片的内外表面均加工有螺纹,其内外螺纹的齿形高度是不同的。为保证尽量减小对预应力筋损伤面积,提高挤压锚具的效率,内螺纹齿形细而密,齿高也较小,而外螺纹将与较软且强度较低的套筒咬合,所以其螺纹相对粗且螺距较大。摩擦片的厚度为1.5mm,挤压锚的设计及构造见图3。为确保挤压锚具尾部预应力筋塑料护套的连续性,在挤压锚垫板尾部设置一套管过渡,从而确保了挤压锚处预应力筋的完全封闭。

3. 锚具性能试验

3.1 钢绞线物理力学性能试验

为考验所研制的锚具夹持钢绞线的能力,钢绞线选用了 $\phi 15.24$ 、1860MPa级高强钢绞线。其产品标准为GB5224-95,同时为了验证锚具对国内不同厂家产品的适应性,每批试验选用了

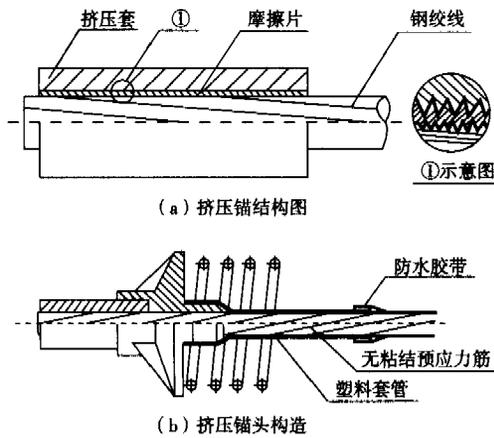


图3 挤压锚设计及构造

不同厂家的产品。此外，也进行了若干组2000MPa级 $\phi 15.24$ 钢绞线的试验。

预应力钢绞线的材料力学性能试验均由国家建筑工程质量检测中心进行。钢绞线的性能均达到标准要求，相应的指标见锚具组装件静力试验结果。

3.2 锚具静载锚固性能试验

该试验的主要目的是综合测试锚具静力工作性能，即锚具效率系数和锚具组装件破断时的总应变。同时考核锚具承受最大负荷的能力，即检查锚具零件经受组装件破坏试验后有无损伤，损伤程度。

试验委托国家建筑工程质量检测中心进行，试验机为AMSler100万能试验机。根据时间的不同，试验执行标准分别为GB/T14370-93及GB/T14370-2000，相应试验结果见表1、表2。

3.3 锚具疲劳及低周荷载试验

试件长度为5.0m，一端为挤压锚，另一端为球墨铸铁一体化锚具，共做三束试件，均一次通过200万次疲劳及50次低周荷载试验，锚具无任何损伤，试验结果合格。

3.4 锚具性能的辅助性试验

辅助性试验包括锚具锚固时的内缩量，阶段锚固并重复张拉等。试验结果十分理想，分级张拉，临时放张锚固，以及在80%理论破断力时的锚固，没出现过滑丝、断丝及不能锚固的情况；自锚时，夹片跟进齐平，回缩量在5mm以内，尤其重复张拉时，夹片反向摩阻力甚小，十分有利于补拉等操作。

表1 AMU15-1型球墨铸铁一体化锚具组装件静力试验结果

序号	钢绞线		锚具组装件		实测极限总应变 ϵ_{apu} (%)	锚固效率系数 η_A
	母材实际破断力平均值 (kN)	极限强度 (N/mm ²)	实测破断力 (kN)	极限强度 (N/mm ²)		
1	270.2	1930	259.0	1850	2.6	0.99
2	270.2	1930	257.6	1840	2.5	0.98
3	270.2	1930	257.6	1840	2.4	0.98
4	270.6	1950	259.0	1850	2.6	0.95
5	270.6	1950	266.0	1900	4.1	0.98
6	270.6	1950	263.2	1880	3.9	0.97
7	264.0	1890	252.0	1800	2.5	0.96
8	264.0	1890	253.4	1810	2.6	0.96
9	264.0	1890	252.0	1800	2.7	0.95
10	264.0	1890	254.8	1820	2.6	0.97
11	264.0	1890	253.4	1810	2.4	0.96
12	264.0	1890	256.2	1830	2.1	0.97
13	268.6	1920	266.1	1900	3.5	0.99
14	268.6	1920	263.2	1880	3.0	0.98
15	268.6	1920	266.1	1900	3.5	0.99
16	268.6	1920	265.1	1890	4.0	0.99
17	268.6	1920	265.1	1890	4.0	0.99
18	268.6	1920	263.7	1880	3.5	0.98
19	268.6	1920	262.2	1870	3.0	0.98
20	268.6	1920	261.7	1870	3.0	0.97
21	268.6	1920	264.2	1890	3.5	0.98
22	268.6	1920	266.6	1900	4.0	0.99
23	268.6	1920	264.6	1890	3.5	0.99
24	268.6	1920	265.1	1890	3.5	0.99
25	287.5	2050	279.3	1995	3.5	0.97
26	287.5	2050	274.4	1960	3.0	0.95
27	287.5	2050	281.7	2010	3.0	0.98
28	287.5	2050	284.7	2030	3.0	0.99
29	287.5	2050	289.6	2070	3.5	1.00
30	287.5	2050	288.1	2060	4.0	1.00
31	287.5	2050	285.6	2040	3.5	0.99
32	287.5	2050	282.2	2020	3.0	0.99
33	287.5	2050	282.2	2020	4.0	0.99

注：序号1~12为2000年以前标准试验结果；13~24为2001年根据GB/T14370-2000标准试验结果；25~33为2001年根据GB/T14370-2000标准试验结果，母材强度2000MPa。

3.5 铸件抗劈裂破坏强度试验

由于采用了球墨铸铁材料，锚环的破坏呈脆性劈裂破坏，为确保锚具工作的可靠性，根据FIP1993《后张预应力体系的验收建议》，铸件劈裂破坏时的强度必须大于钢绞线拉断力的1.3倍，为此专门进行的试验结果见表3。铸件的承载力达410kN以上，为1860N/mm²级 $\phi 15$ 钢绞线标准拉断力260.7kN的1.57倍，完全可以满足钢绞线对锚具的要求。

表2 AMU15-IP型摩擦片式挤压锚具组装件静力试验结果

序号	钢绞线		组装件		极限应变 ϵ_{apu} (%)	效率 系数 η_a
	实测破断力平均值 (kN)	极限应力 (N/mm ²)	实测破断力 (kN)	极限应力 (N/mm ²)		
1	275.9	1970	274.4	1960	3.2	1.00
2	275.9	1970	272.9	1950	3.4	1.00
3	275.9	1970	268.6	1920	2.1	1.00
4	271.3	1940	266.1	1900	3.4	1.00
5	271.3	1940	260.3	1860	2.5	0.99
6	271.3	1940	261.2	1870	4.4	0.99
7	274.2	1960	266.1	1900	3.7	1.00
8	274.2	1960	268.1	1910	3.2	1.00
9	274.2	1960	266.1	1900	3.6	1.00
10	274.4	1960	278.8	1990	3.6	1.00
11	274.4	1960	278.8	1990	3.8	1.00
12	274.4	1960	280.8	2010	3.9	1.00
13	269.7	1930	263.7	1880	3.5	1.00
14	269.7	1930	264.2	1890	4.0	1.00
15	269.7	1930	266.1	1900	4.0	1.00
16	269.7	1930	260.3	1860	3.0	0.99
17	269.7	1930	263.7	1880	4.0	1.00
18	269.7	1930	259.3	1850	3.5	0.99
19	276.3	1970	265.1	1890	2.5	0.99
20	276.3	1970	266.6	1900	3.0	0.99
21	276.3	1970	268.1	1910	3.0	1.00
22	276.3	1970	269.5	1930	3.0	1.00
23	276.3	1970	267.6	1910	3.0	1.00
24	276.3	1970	266.6	1900	3.0	0.99
25	267.3	1910	263.7	1880	4.0	1.00
26	267.3	1910	261.7	1870	4.0	1.00
27	267.3	1910	259.3	1850	3.0	1.00
28	268.9	1920	263.2	1880	3.5	1.00
29	268.9	1920	263.7	1880	3.5	1.00
30	268.9	1920	263.2	1880	4.0	1.00
31	264.8	1890	259.3	1850	4.0	0.98
32	264.8	1890	261.7	1870	4.0	0.99
33	264.8	1890	257.3	1840	3.5	0.97
34	270.7	1930	264.6	1890	4.0	1.00
35	270.7	1930	267.6	1910	3.5	1.00

注：序号1~12为1998年根据GB/T14370-93标准试验结果；13~24为1999年根据GB/T14370-93标准试验结果；25~35为2001年根据GB/T14370-2000标准试验结果。

表3 球墨铸铁铸件抗劈裂强度试验结果

序号	破坏极限荷载 (kN)	破坏形式	序号	破坏极限荷载 (kN)	破坏形式
1	410	劈裂	4	416	劈裂
2	430	劈裂	5	445	劈裂
3	460	劈裂	6	430	劈裂

3.6 试验结论

球墨铸铁一体化锚具静载试验与目前最高强度级别的1860MPa级， $\phi 15.24$ 钢绞线匹配使用时，其效率系数可达95%以上，破断总应变不小于2.0%，达到国标GB/T14370-2000的要求；其动

载试验结果表明，疲劳性能满足标准要求，并能用于地震区。锚具自锚时内缩量少，锚固可靠方便，且重复张拉时，夹片反向摩擦阻甚小，十分有利于两端张拉时补拉端的张拉操作。摩擦片式挤压锚结构合理，现场制作方便，质量容易保证，性能稳定，且完全符合国家标准。

4. 工程应用

4.1 甘家口危改小区南综合楼工程

该工程面积1.8万m²，11层，楼盖为板柱-剪力墙结构，其中东、西区为密肋梁楼盖，板柱结构部分柱网尺寸为8.1m×7.8m，平板厚度为230mm，密肋梁楼盖部分梁断面为150mm×360mm，板厚60mm，周边支撑于剪力墙上，梁及平板均设计为无粘结预应力。原设计采用锚具为夹片式分体锚具，因建筑不允许锚具外露于结构外，不得不在墙、板端及柱等部位设置穴模将锚头含入结构中，其穴模尺寸达100mm×100mm×100mm，对墙体及柱断面削弱较大，一直也是设计人员担心的一个问题。此外由于垫板较薄，很难保证无粘结束与垫板孔的同轴度，给张拉造成困难，也对钢绞线和锚具受力带来不利影响。

我们在该结构的顶部采用了一体化锚具，不仅解决了对结构削弱大的问题，穴模尺寸仅为 $\phi 50\text{mm} \times \phi 70\text{mm} \times 45\text{mm}$ ，而且因其结构的特点很容易保证无粘结束与垫板的同轴度，张拉也较方便有利；同时锚区局部加强配筋也大大简化了，仅用若干U形筋即可，受到设计人员和总包施工人员的欢迎。

4.2 煤科院科研综合楼工程

该工程为六层科研楼，总面积为8000m²，在顶层局部抽柱形成了21m跨的大跨，柱距为7m；设计为21m跨有粘结预应力框架和7m跨连续无粘结预应力平板，平板厚度为180mm。无粘结预应力锚具采用了本课题研制的产品，锚头设在平板端部，占用空间小，局压区配筋简单，与模板固定定位可靠，拆模后内部清洁，

(下转第29页)

3. 对5孔扁锚的建议

根据上面分析,我建议:

3.1 在设计方面应注意:

(1) 合理调整各束钢绞线的力臂长度,使其在最不利状态下,也不会因杠杆作用使某些钢绞线的应力值过大。

(2) 锚体应设计成整体式,不能采用焊接(有个别厂家是组焊式)。

(3) 两边槽口内安装钢绞线挤压头处,应设计成槽,起定位作用,防止因滑移而改变力臂长度,或防止钢绞线滑出。

3.2 制造商应认真按设计施工,控制形位尺寸和公差。在出厂使用说明中应提醒用户在使用

时,必须两边轮流张拉。

3.3 对于用户应注意:

(1) 了解锚具的特性,制定可靠的施工工艺;

(2) 扁锚使用的扁形波纹管应适当大一点,以减少阻力,保证张拉伸长量;

(3) 安装张拉都应对钢绞线编号定位,且两边对称张拉,不要先拉一边;

(4) 安装锚具时应做到平整,不要倾斜,防止挤压头从槽口内滑出;

(5) 建议对5孔扁锚采用专用张拉工具,改为同束一次张拉,不要单根张拉。

(上接第6页)

张拉施工较采用分体式锚具时的情况有较大的改善,受到甲方的好评。

5. 结 语

球墨铸铁一体化锚具采用球墨铸铁材料用铸造的方式,把锚环与垫板合二为一,一次铸造成合理的形状,与分体式锚具相比具有如下特点:

(1) 锚具结构合理,材料利用充分,节约材料;

(2) 由于一次铸造成合理的形状,减少了机加工工作量,有利于确保机加工精度;

(3) 局部压力作用下混凝土应力传递较分体式锚具平缓,局部承压安全度得到提高;

(4) 能确保满足无粘结预应力筋全封闭要求;

(5) 能确保预应力筋与锚具轴线重合,有利于张拉锚固及预应力筋的受力;

(6) 穴模深度仅为45mm,对结构削弱小;

(7) 产品成本比分体式锚具节省约20%;

(8) 张拉、补拉、夹片跟进等工艺性能优于分体式锚具。

摩擦片式挤压锚结构合理,现场制作方

便,性能可靠;球墨铸铁一体化锚具技术先进,性能可靠,便于应用,且成本明显低于分体式锚具。该锚具锚固体系的突出优点是对无粘结预应力筋的全长封闭性好。以往使用的锚具在其尾部和端头形成防水薄弱环节,难以保证其密封性,因而其耐久性成为令人担心的问题。该锚具无论尾部还是端头均有严密的防水构造,成功地实现了预应力筋的全长封闭,解决了预应力筋耐久性问题,可以充分利用预应力筋的强度,使结构设计更为合理。

目前开发的球墨铸铁一体化锚具适用于15系列钢绞线。分为张拉端和固定端两种,固定端又分为一体式和挤压式,一体式是将一体化锚具预先装配在钢绞线端头并埋入混凝土中,张拉时夹片会自动跟进并夹紧预应力筋;挤压式采用挤压锚具,其施工方法与现有工艺相同。

该课题已经过专家鉴定,鉴定意见认为:该锚固体系设计合理、选材得当、性能可靠、对无粘结预应力筋的全长封闭性好,很好地解决了锚具对无粘结预应力筋的要求。该锚固体系填补了国内空白,应大力推广。