

关于当前预应力钢绞线硬度与锚具夹片的匹配建议

冯大斌 裴 骥 朱 莹

(中国建筑科学研究院 北京 100013)

摘 要:预应力钢绞线的材质硬度,在中外钢绞线产品标准及预应力结构设计施工规范中都没有规定。事实上它与锚具夹片的硬度必须恰当匹配,掌控适当的硬度才能确保夹片牙齿在锚固时咬入钢绞线表面,夹片的楔入作用才得以实现。近来发现个别工程中夹片对钢绞线的咬合欠佳,引起锚具标准修订组的关注。为此,经调查检验,发现目前生产供产的钢绞线硬度偏高,判断这是锚固不稳定的主因。本文将调研结果予以公布,同时就钢绞线和锚具夹片两方面都提出建议,以供预应力行业各有关方面(业主、设计、施工、产品生产、质检等)注意。

关键词:预应力钢绞线 硬度 锚具夹片

引言

在我国,研究和生产预应力锚具的人员对锚具硬度都十分关注,惟恐硬度偏低会导致失锚。其实,锚具和预应力钢绞线都是预应力体系的组成部分,二者共同工作,各自的技术性能指标都应合格且互相匹配。反映到预应力筋—锚具组装件试验或预应力结构张拉施工时是否顺利,对二者都要进行分析。

锚具的生产控制和产品进场验收,除了外观和尺寸检验外,硬度检验是关键项目。相关标准的规定是“硬度检验按产品零件设计图样规定的硬度值进行检验。”没有提出对钢绞线等预应力筋硬度的匹配要求。对钢绞线的质量控制,除了尺寸外,强度、延伸率和松弛率都很关键;近来发现“硬度”也应特别关注。

国家标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224的历次版本,都没有对产品的硬度进行规定。《预应力筋用锚具夹具和连接器》GB/T 14370对预应力筋的硬度没有提出要求。欧美等国的相关标准亦未及见硬度限制。事实上,锚具夹片硬度和钢绞线硬度是一对极为重要的技术性能指标,它们必须有合适的匹配,不然会对张拉固锚作业产生严重问题。

近来,国家标准GB/T 14370-2007的修订组发现国内使用的钢绞线硬度普遍偏高,某些工程

的预应力张拉锚固出现不稳定现象。为此,修订组希望各锚具生产企业自行检查本单位的锚具夹片管控事宜,也希望钢绞线的生产企业和使用单位对钢绞线的各项技术性能指标予以关注。

1 钢绞线样品概况

我们最近收集了8个钢绞线样品,对其中34根钢丝进行了硬度检测。检测工作是委托杭州浙锚预应力公司试验室进行的,测试仪器为日产FM-700型数字显微镜硬度计。钢丝试件是用金相切割机将钢丝切出一小段,把它镶嵌成试样;钢丝截面要经粗磨、精磨和抛光,使其达到金相分析的标准。全部操作都是按标准进行的。所有测点都分布在 $\phi 5$ 钢丝横截面上,第1测点距边缘0.03mm,其后第8~10号测点的间距均为0.05mm,沿半径方向向中心分布;有10根钢丝还测定了截面中心点的硬度值。该仪器的主示值为维氏硬度(HV),它同时自行换算出洛氏硬度值HRA及HRC。本文按洛氏HRC硬度值列表1,仅将HRA及HV的平均值附列其中。

表1中钢绞线样品的公称直径为 $\phi 15.2\text{mm}$ (8号样品为 $\phi 15.24\text{mm}$),标准抗拉强度均为1860MPa。样品来原如下:

1号样品 — 上海地区某铁路建桥工地提供;

2号样品 — 山西某大型体育馆建设工地提供;

表1 钢绞线显微镜硬度检测值 (HRC)

φ 15.2 1860MPa

测点 序号	测点至 钢丝表 面距离 mm	1号样品				2号样品		3号样品			
		1号 钢丝	2号 钢丝	3号 钢丝	4号 钢丝	1号 钢丝	2号 钢丝	1号 钢丝	2号 钢丝	3号 钢丝	4号 钢丝
1	0.030	51.28	51.86	51.52	51.86	52.25	52.64	52.65	52.24	51.66	51.27
2	0.080	50.30	50.11	51.09	50.30	51.56	53.05	52.64	52.65	53.05	52.44
3	0.130	51.47	49.73	50.89	50.69	51.85	53.05	52.64	51.85	53.05	52.85
4	0.180	50.11	50.50	50.50	50.70	50.31	52.64	51.47	51.66	52.44	52.05
5	0.230	51.09	51.09	50.31	50.30	51.28	51.66	51.28	51.85	51.09	51.28
6	0.280	51.09	50.50	50.11	51.09	50.11	52.44	51.28	51.85	52.05	52.05
7	0.330	51.09	50.11	50.31	50.50	50.50	52.85	50.70	50.89	52.44	52.25
8	0.380	51.28	50.90	50.50	50.70	51.09	51.85	49.92	51.28	51.47	51.85
9	0.430					50.89	52.08	50.50	52.85	51.47	50.31
10	0.480					51.09	51.28	49.92	51.09	50.89	51.28
中心	2.500										
HRC平均值		50.96	50.60	50.65	50.77	51.09	52.35	51.30	51.82	51.96	51.74
HRA平均值		76.27	76.12	76.16	76.19	76.32	76.35	76.45	76.63	76.74	76.60
HV平均值		527.59	522.12	522.89	524.33	529.84	548.62	533.08	541.15	543.39	539.96

测点 序号	测点至 钢丝表 面距离 mm	4号样品							5号样品						
		1号 钢丝	2号 钢丝	3号 钢丝	4号 钢丝	5号 钢丝	6号 钢丝	7号 钢丝	1号 钢丝	2号 钢丝	3号 钢丝	4号 钢丝	5号 钢丝	6号 钢丝	7号 钢丝
1	0.030	50.70	50.30	50.31	50.70	50.50	51.09	49.54	49.73	49.73	48.41	48.03	49.17	49.36	48.99
2	0.080	51.85	50.11	51.28	51.66	52.05	50.11	51.09	49.92	50.89	49.92	49.54	50.11	50.69	49.54
3	0.130	51.85	50.11	51.66	51.09	52.65	51.28	50.30	49.73	49.92	50.11	49.92	49.92	49.73	50.30
4	0.180	51.28	50.31	51.28	50.70	51.47	51.66	50.50	49.73	50.30	49.35	48.99	50.69	51.09	48.60
5	0.230	51.28	50.31	51.09	51.09	52.44	51.66	49.36	48.79	49.73	50.31	49.92	48.99	48.99	48.41
6	0.280	49.92	49.34	50.89	49.92	51.66	51.09	49.73	49.36	50.70	50.30	49.73	48.79	49.36	48.99
7	0.330	50.50	49.54	51.09	51.09	51.85	50.70	49.36	50.50	50.89	50.50	49.17	50.50	51.09	48.79
8	0.380	50.70	50.11	50.89	49.73	52.05	50.11	49.92	49.73	49.36	49.73	49.17	48.60	50.30	49.36
9	0.430	49.92	50.11	49.73	49.73	50.50	49.92	49.92	48.79	50.70	49.54	50.11	48.99	49.92	47.83
10	0.480	51.47	50.11	49.73	50.50	52.25	50.70	49.54	49.36	51.09	49.73	49.54	49.73	49.54	49.36
中心	2.500														
HRC平均值		50.95	50.04	50.80	50.62	51.74	50.83	49.93	49.56	50.33	49.79	49.41	49.55	50.00	49.02
HRA平均值		76.25	75.89	76.19	76.12	76.59	76.21	75.79	75.59	75.99	75.73	75.50	75.56	75.81	75.25
HV平均值		527.45	513.84	525.05	522.39	539.96	525.65	511.90	506.50	518.00	510.00	504.30	506.26	513.12	498.49

测点 序号	测点至 钢丝表 面距离 mm	6号样品		7号样品				8号样品			
		1号 钢丝	2号 钢丝	1号 钢丝	2号 钢丝	3号 钢丝	4号 钢丝	1号 钢丝	2号 钢丝	3号 钢丝	4号 钢丝
1	0.030	47.83	50.89	48.60	48.21	46.27	52.24	51.66	48.60	49.17	49.54
2	0.080	50.30	50.50	50.11	48.79	46.46	52.44	52.64	50.89	49.92	51.28
3	0.130	50.70	51.28	47.83	49.17	49.17	52.85	51.28	51.66	51.66	51.66
4	0.180	50.11	49.92	51.09	47.23	47.23	52.65	51.28	51.09	49.92	48.79
5	0.230	50.50	50.70	49.73	50.30	46.84	52.44	51.47	51.28	50.50	50.50
6	0.280	50.11	50.11	49.73	49.73	47.63	53.44	50.89	51.66	50.50	50.70
7	0.330	49.54	49.73	50.11	49.73	49.73	52.85	51.66	51.28	50.30	50.11
8	0.380	49.36	49.36	49.92	49.92	49.73	53.44	51.28	51.09	50.50	49.73
9	0.430	50.70	51.09	49.92	48.99	47.23	53.05	50.89	50.50	50.30	50.28
10	0.480	50.50	50.11								
中心	2.500	50.11	49.92	48.60	48.79	48.20	53.05	50.50	48.60	51.82	49.17
HRC平均值		49.98	50.33	49.56	49.09	47.85	52.85	51.36	50.67	50.46	50.18
HRA平均值		75.82	76.00	75.59	75.30	74.61	77.25	76.43	76.08	76.04	75.88
HV平均值		512.81	517.94	506.67	499.67	482.70	557.61	533.74	522.97	520.10	515.59

3号样品 — 京石铁路某工地提供;

4号样品 — 江阴华新钢缆有限公司提供;

5号样品 — 江西新余新华金属制品有限公司提供;

6号样品 — 国家建设工程质量监督检验中心提供, 钢绞线原产地为秦皇岛;

7号样品 — 柳州欧维姆机械股份有限公司提供, 钢绞线原产地为江阴华新钢缆有限公司且经过环氧涂包;

8号样品 — 柳州欧维姆机械股份有限公司提供, 钢绞线原产地为日本新日铁公司, 且经过环氧涂包, 由日本安德森技术公司 (ANDERSON TECH. CORP.) 供应。

上列样品有7个来自国内不同地区和部门, 1件来自国外的著名公司, 它们有一定的代表性。

2 对试验结果的分析

2.1 钢丝表面与截面中部的硬度基本一致

预应力筋锚固时, 如果钢绞线的表面硬度偏高, 夹片锯齿形牙尖就不容易咬入钢绞线, 这会影响到锚固的稳定性。为了确切知晓情况, 应准确知道钢绞线硬度偏高的现象。究竟是表面硬度偏高或是整个截面硬度偏高, 这有助于降低钢绞线硬度时采取不同措施。

依据夹片咬入钢绞线的深度, 我们将钢丝表面下0.20mm的深度范围称谓“表面”(别无相关规定)。按表1中第1~4号测点都可算做“表面硬度值”, 第5~10号及中心点都算位在芯部截面。统观34根钢丝试件, “表面”与“芯部”的硬度测定值都没有明显差别。

2.2 钢绞线的硬度范围主要分布在HRC 49~52之间

将表1中34根钢丝的HRC平均值按每0.5度划分区间, 以此统计其出现的频率, 将结果列于表2, 据此绘成的分布曲线如图1所示。

从表2和图1可知, 在34根钢丝实测硬度中, HRC49~52的占91%, 曲线大致呈高斯分布, 峰值在HRC50.5~51之间。此项数据虽然不算很多, 已然显示了钢绞线的现状, 可以作为我国各锚具生产企业确定夹片硬度的依据。

表2 钢绞线的钢丝硬度分布

根数	平均硬度HRC
1	> 47.5~48
-	> 48~48.5
-	> 48.5~49
3	> 49~49.5
7	> 49.5~50
5	> 50~50.5
9	> 50.5~51
3	> 51~51.5
4	> 51.5~52
1	> 52~52.5
1	> 52.5~53

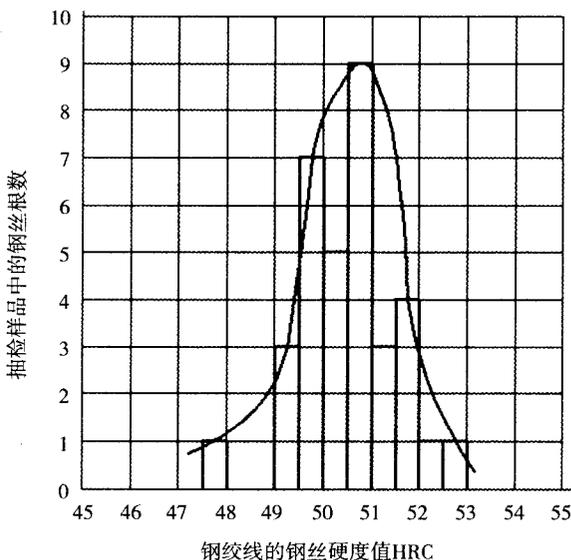


图1 钢绞线的钢丝硬度分布曲线

2.3 锚具夹片的适宜硬度

根据中国建筑科学研究院的经验, 夹片硬度比所夹持的钢绞线硬度高8~10度(以HRC计)时, 在预应力张拉施工时能顺利锚固。据此, 按本文的钢绞线硬度最高值设定为HRC 52时, 夹片硬度应确定为HRC60~62; 工厂热处理时控制硬度范围可稍加放宽, 建议选定HRC58~64。

事实上, 工厂大量生产的夹片, 其硬度值可能符合正态分布曲线。出厂检验均为抽子样检验, 理论上讲会有极少数检验值超标的夹片出厂。生产厂如何提高“保证率”是极为重要的, 必须在材料质量控制、选择高技术设备、采用先进加工工艺和检验方法四个方面做全面努力。

美国PTI《后张预应力体系的验收标准》中,对夹片的制造有较详细的说明,可供我们对美国夹片的了解,也可和我国的夹片进行对比:

“供应商和制造商们制造出许多不同类型的夹片,以适应不同的体系、满足不同的用途。还没有一种标准的夹片能够适应所有体系的用途,但是大多数夹片都有共同的特征。

“一付典型的夹片楔形角为 $5^{\circ} \sim 7^{\circ}$,长度至少为钢绞线直径的2.5倍。制造夹片的材料是低碳钢(AISI 12-L14或11-L17)或合金钢(AISI 86-L20),这两类材料能够满足表面渗碳硬化,而同时保持芯部韧性良好的要求。加工完成后的夹片,在硬层1/3的深度处测量的硬度(或等效硬度)至少应达到58HRC,有效硬层深度至少为0.008英寸(0.20mm),同时保持夹片芯部韧性低于46HRC。”

我国生产夹片的材料是很好的合金结构钢,非常适合碳氮共渗的表面硬化工艺,很容易达到PTI所指的HRC58的硬度,同时还能保持芯部硬度不高于HRC46。我们将表面硬度下限定为HRC58是可以的,难度在于保证都稳定在这一硬度之上。在工程应用中低于HRC58的夹片遇到高于HRC53的钢绞线,这一机率并不等于零,我们只能寄希望于硬度差不要太小。夹片牙齿硬度高于HRC64时,由于脆性增加,也不是最佳状态,我国夹片钢材中的合金元素增加了强度、降低了脆性。中国的夹片硬层取用0.30~0.35mm(不含过渡层)时,已证明锚固效果很稳定。从金属材料学的角度来看,目前我国夹片的选材与工艺是非常适合大规模生产的。

3 关于钢绞线产品硬度及修订标准的意见

表1已显示我国当前钢绞线的硬度范围可圈定为HRC49~52,分布曲线峰值HRC50.5~51。这项数值比我们几年前公认的HRC45要高出5~6度。我国生产1470MPa级钢绞线的时代,公认硬度为HRC42;生产1570~1670MPa级时,钢绞线公认硬度约为HRC45左右;目前产品级别为1860MPa,硬度肯定要提提高,但现在生产设备的技术水平比以往提高许多,如能将硬度略降1~2

度,则对预应力工程施工会很很有好处。如果钢绞线产品的国家标准在下次修订时能够对硬度给予关注,那就不但对中国是项开创性的内容,甚至在国际同类标准中也是首先增加的内容。据悉外国钢绞线产品已在柔韧性方面进行竞争。

从国家建筑工程质量监督检验中心获知,我国近两年生产供应的1860MPa级钢绞线,很多都超过了1960MPa,按锚具国家标准GB/T 14370-2007的规定,这种强度超过一级的钢绞线不得用于1860MPa级锚具的试验。所以工程建设单位也不要采购实际强度超过1960MPa的钢绞线用于按1860MPa级设计的工程结构。国内外建筑、桥梁、铁路各领域的结构设计规范规定的钢绞线最高强度级别都是1860MPa低松弛级,这个级别完全能满足结构的使用要求,没有必要再追求更高的强度。

从施工方面来说,钢绞线的易用性很重要。影响易用性的因素有:开盘后的平直度、硬度、直径大小、切割端钢丝解扭性和盘绕方式。现代的中外标准都开始强调“绕销钉试验”(或称“偏转试验”)。易用性好的钢绞线一定有良好的柔韧性,这种钢绞线的硬度不会太高、直径不会太大、延伸率远比标准规定的3.5%(Agt)要大,它会有良好的“抗切口断裂”的能力和耐疲劳的优良性能。

美国标准ASTM A416规定1860MPa(270级)钢绞线的直径允许公差为 $^{+0.65}_{-0.15}$ mm,中国GB/T 5224标准的允差为 $^{+0.40}_{-0.20}$ mm。但夹片式锚具要求钢绞线的允许公差不大于 $^{+0.20}_0$ mm。国外的钢绞线实物直径偏差常为0~0.10mm,我国标准可考虑将允差进一步缩小,使钢绞线与锚具的尺寸匹配更趋良好。

参考文献

- [1] GB/T 14370-2007预应力筋用锚具、夹具和连接器. 北京: 中国标准出版社, 2008.01
- [2] GB/T 5224-2003预应力混凝土用钢绞线. 北京: 中国标准出版社, 2003.06
- [3] PTI Guide Specification: Acceptance Standards for Post-Tensioning Systems. Post-Tensioning Institute. U.S.A. Sept. 1998