

DOI: 10.7672/sjgs2025170125

核电工程自扩底锚栓研发与应用*

李智斌^{1,2}, 隋春光³, 徐国祯³, 赵杰¹, 贺海勃¹, 蔡佳庆⁴, 田红芬⁵, 刘军财⁵

(1. 中国电子工程设计院股份有限公司, 北京 100142; 2. 鞍钢中电建筑科技股份有限公司, 北京 100142;
3. 中国核电工程有限公司, 北京 100084; 4. 中核混凝土股份有限公司, 陕西 西安 710016;
5. 法施达(天津)智能科技有限公司, 天津 301800)

[摘要] 由于核工程建设安全等级具有特殊性, 故研发核电工程用自扩底机械锚栓, 用于开裂和非开裂混凝土中的中重型结构构件或非结构构件的锚固连接。建立自扩底机械锚栓数字化检测系统, 通过100%安装紧固扭矩的数字化方式, 保证锚栓扩底套管安装精确, 避免人为因素导致的安装质量不合格。通过数字化检测拉拔承载力, 确保安装质量可靠。经过多项试验研究, 结合工程实践可知, 该自扩底机械锚栓通过机械锁键作用实现高承载力连接, 具有良好且稳定的机械、防腐、抗震、抗疲劳、抗冲击性能, 且安装简便、耐久性好、可靠性高, 适用于核电、桥梁、隧道、高速公路等大型工程固定和连接中。

[关键词] 核电工程; 混凝土; 锚栓; 锚固; 试验

[中图分类号] TU74

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)17-0125-07

Development and Application of Self-expanding Bottom Anchor Bolt in Nuclear Power Engineering

LI Zhibin^{1,2}, SUI Chunguang³, XU Guozhen³, ZHAO Jie¹, HE Haibo¹, CAI Jiaqing⁴,
TIAN Hongfen⁵, LIU Juncan⁵

(1. China Electronics Engineering Design Institute Co., Ltd., Beijing 100142, China; 2. Ansteel & CEEDI Architecture Technology Co., Ltd., Beijing 100142, China; 3. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100084, China;
4. China Nuclear Concrete Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710016, China; 5. Fashida (Tianjin) Intelligent Technology Co., Ltd., Tianjin 301800, China)

Abstract: Due to the special nature of the safety level of nuclear engineering construction, self-expanding mechanical anchor bolts for nuclear power engineering have been developed, for anchoring and connecting medium and heavy structural and non-structural components in cracked and non-cracked concrete. A digital detection system for self-expanding mechanical anchor bolts has been established. By digitally measuring the installation torque at 100%, the installation accuracy of the anchor bolt's expanding sleeve is ensured, avoiding installation quality issues caused by human factors. Through digital detection of the pull-out bearing capacity, the installation quality is guaranteed to be reliable. Through multiple experimental studies and engineering practices, it is known that this self-expanding mechanical anchor bolt achieves high bearing capacity connections, through mechanical locking keys, and has good and stable mechanical, anti-corrosion, seismic, anti-fatigue, and anti-impact performance. It is also easy to install, has good durability, and high reliability, and is suitable for use in the fixation and connection of large-scale projects, such as nuclear power, bridges, tunnels, and highways.

Keywords: nuclear power project; concrete; anchor bolt; anchorage; testing

0 引言

由于核工程建设安全等级的特殊性, 对机械锚栓制作原材料、产品性能、试验检验、品质管理、体系认证等均提出很高的要求。机械锚栓是非标准

* 核工程土建先进设计建造技术联合实验室项目: 核工程机械锚栓开发与应用研究(KY23011)

[作者简介] 李智斌, 研究员, E-mail: lizhibin_bj@126.com

[收稿日期] 2024-11-12

件产品,无统一的尺寸、材料和工艺要求,不同类型锚栓有不同的锚固作用机理,同一款锚栓在不同条件的混凝土中承载力不同,故很难直接使用某特定物理参数对锚栓产品质量进行评定。现阶段,建成并投入运营的中国核电站机械锚栓用量大,需针对国产化核电用机械锚栓开展研发工作,以提高我国机械锚栓工厂化、工业化,确保核电工程施工质量。为此,研发核工程用自扩底机械锚栓,用于开裂和非开裂混凝土中的中重型结构构件或非结构构件锚固连接。自扩底机械锚栓扩张件上带硬质金刚石刀刃,可边锤击边旋转,安装锚栓的同时完成扩底,并将扩张件嵌入扩底锚栓。

1 自扩底机械锚栓设计

自扩底机械锚栓根据被锚固物的安装类型分为P、T形(见图1)。P形为先置式安装,即先安装自扩底机械锚栓,再放置被锚固物;T形为后置式安装,即先放置被锚固物,再安装自扩底机械锚栓。自扩底机械锚栓由螺杆、扩底套管、抗震压环、连接套管、螺母、垫片和防松圈等部分组成。

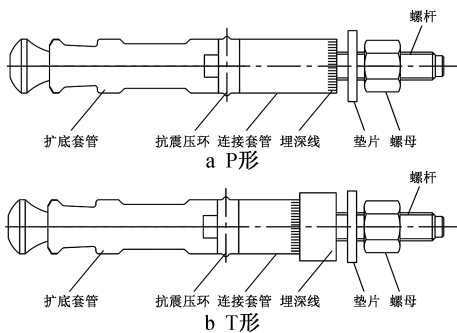


图1 自扩底机械锚栓外形与构造

Fig.1 Shape and structure of self-expanding mechanical anchor bolts

扩底刀头采用3点金刚石进行360°磨削,更能保证扩底部位紧密贴合,使扩底接触面受力均匀,切入混凝土的深度离散性更小。分体式套管可根据被锚固物孔径、厚度进行定制,套管无豁口设计,

从而提高抗弯、抗剪性能。将分体套管中间增设减震压环,不仅提升抗震能力,且有效阻止潮湿、腐蚀气体进入,延长锚栓使用寿命。在扩底刀头处设置应力释放槽,有效排出扩底时产生的粉尘。

通过螺母和平垫的弧形设计,解决钻孔不垂直时轴向力不稳的难题,保证安装倾斜时螺栓处于最佳受力状态。防松垫圈通过增加摩擦力和机械锁定,减少螺栓连接松动可能导致的连接件间预紧力不足的情况,降低疲劳风险,均匀的应力分布能够提升抗疲劳性能。采用高标准的多元合金共渗复合涂层防腐技术,并于中性盐雾中通过2 400h试验。

常用的自扩底机械锚栓型号如表1所示。

2 自扩底机械锚栓性能

2.1 极限拉拔与抗剪承载力

核工程用锚栓绝大部分为开裂混凝土,故在0.8mm厚开裂混凝土上测试自扩底机械锚栓基本性能,混凝土强度等级为C30、C60,极限拉拔承载力、极限抗剪承载力实测值分别如表2、3所示。M10、M12、M16、M20锚栓对应锚孔直径分别为20、22、30、37mm,锚孔深度分别为107、135、203、266mm,有效锚固深度分别为100、125、190、250mm,安装紧固扭矩分别为50、80、120、300N·m。

2.2 抗震性能

自扩底机械锚栓可形成螺杆拉断的延性破坏,故参考JG/T 160—2017《混凝土用机械锚栓》,开展自扩底机械锚栓抗震性能试验研究,其抗震性能如表4所示。由表4可知,自扩底机械锚栓在地震作用下的位移较小,锚固性能良好,满足核电工程抗震要求。

2.3 极限安装扭矩性能

通过极限安装扭矩性能试验,测评施加的安装扭矩超过规定值后锚栓是否能够正常工作。在非开裂高强度C60混凝土中,将轴力测量仪(穿心压

表1 常用自扩底机械锚栓型号

Table 1 Common types of self-expanding mechanical anchor bolts

型号	钻孔直径×深度	有效锚固深度	螺杆长度	螺牙直径	被锚固物厚度	扩底套管长度	P形连接套管长度	T形连接套管长度
CEEDI P/T10×150-20	20×107	100	150	M10	20	80	20	40
CEEDI P/T10×160-30	20×107	100	160	M10	30	80	20	50
CEEDI P/T12×190-30	22×135	125	190	M12	30	100	25	55
CEEDI P/T12×210-50	22×135	125	210	M12	50	100	25	75
CEEDI P/T16×275-40	30×203	190	275	M16	40	150	40	80
CEEDI P/T16×295-60	30×203	190	295	M16	60	150	40	100
CEEDI P/T20×360-50	37×266	250	360	M20	50	190	60	110
CEEDI P/T20×410-100	37×266	250	410	M20	100	190	60	160

mm

表 2 极限拉拔承载力实测值

Table 2 Measured value of ultimate tensile bearing capacity

项目		锚栓等级			
		M10	M12	M16	M20
破坏形式		钢材破坏	钢材破坏	钢材破坏	钢材破坏
拉拔承载力平均值/kN	C30 混凝土	53.1	72.6	140.6	224
	C60 混凝土	52.8	71.9	139.2	227
拉拔承载力变异系数	C30 混凝土	0.03	0.04	0.02	0.03
	C60 混凝土	0.02	0.02	0.02	0.02
滑移系数最小值	C30 混凝土	1	0.98	1	1
	C60 混凝土	1	0.98	1	1

表 3 极限抗剪承载力实测值

Table 3 Measured value of ultimate shear bearing capacity

项目		锚栓等级			
		M10	M12	M16	M20
破坏形式		钢材破坏	钢材破坏	钢材破坏	钢材破坏
抗剪承载力平均值/kN	P 形(螺纹处)	37.8	51.4	98.4	154
	T 形(套管处)	77	102	198	316
抗剪承载力变异系数	P 形(螺纹处)	0.03	0.04	0.03	0.03
	T 形(套管处)	0.02	0.03	0.03	0.03

表 4 抗震性能

Table 4 Seismic performance

项目		锚栓等级			
		M10	M12	M16	M20
破坏形式		混凝土锥体破坏	混凝土锥体破坏	钢材破坏	钢材破坏
变幅脉动拉伸荷载性能	抗拉承载力平均值/kN	41.6	59.4	139	224
	抗拉承载力变异系数	0.02	0.03	0.02	0.02
	抗拉刚度变异系数	0.16	0.13	—	—
	滑移系数最小值	1	0.97	1	1
	锚栓位移/mm	0.64	0.58	0.29	1.29
破坏形式		钢材破坏	钢材破坏	钢材破坏	钢材破坏
变幅往复剪切荷载性能	抗剪承载力平均值/kN	36.9	50.8	94.2	148
	抗拉承载力变异系数	0.02	0.02	0.02	0.03
	锚栓位移/mm	3.28	4.02	2.96	3.06
破坏形式		混凝土锥体破坏	混凝土锥体破坏	钢材破坏	钢材破坏
裂缝变幅往复开合拉伸性能	抗拉承载力平均值/kN	42.8	60.2	138	226
	抗拉承载力变异系数	0.05	0.04	0.02	0.02
	抗拉刚度变异系数	0.24	0.19	—	—
	滑移系数最小值	1	1	1	1
	锚栓位移/mm	1.29	1.56	1.42	1.74

力传感器)和穿心球铰作为被锚固物穿入锚栓,在螺母上均匀施加安装扭矩,直至 ≥ 1.3 倍的规定安装扭矩。通过垫片和球铰的传力作用,传至轴力测量仪上的压力相当于螺杆所受拉力。通过扭矩与螺杆拉力关系曲线,评估试验过程中的锚栓锚杆钢材是否屈服。如果1.3倍扭矩对应的螺杆拉力未达到钢材屈服拉力,且螺母可正常拧松,则认为锚栓正常工作。如果锚杆钢材所受拉力达到或超过屈服拉力,或螺母不能正常拧松,则认为锚栓不能正常工作,该性能试验失败。

自扩底机械锚栓极限安装扭矩性能试验结果如表5所示,由表5可知,其极限安装扭矩性能良好。

表 5 极限安装扭矩

Table 5 Ultimate installation torque

项目	锚栓等级			
	M10	M12	M16	M20
混凝土强度等级	C60	C60	C60	C60
1.3倍锚栓规定安装扭矩/(N·m)	65	104	156	390
检测结果	未破坏	未破坏	未破坏	未破坏

2.4 抗疲劳性能

将基准荷载 $\pm 30\%$ 振幅进行200万次疲劳试验,疲劳后的残余承载力 ≥ 3 倍基准荷载值。自扩底机械锚栓抗疲劳性能如表6所示,其抗疲劳性能良好。

表 6 抗疲劳性能

Table 6 Fatigue resistance performance

项目	锚栓等级			
	M10	M12	M16	M20
最大疲劳荷载/kN	13	15.6	20.8	28.6
最小疲劳荷载/kN	7	9.4	11.2	15.4
基准荷载/kN	10	12	16	22
振幅/kN	3	3.6	4.8	6.6
频率/Hz	3	3	3	3
疲劳次数/万次	200	200	200	200
疲劳试验后样品状态	无破坏	无破坏	无破坏	无破坏
疲劳试验后承载力/kN	52.7~	71.9~	140.6~	225~
	53.1	72.7	142.2	230

2.5 抗冲击性能

核工程中的冲击荷载较少见,且膨胀螺栓固定构件(二次钢平台、支吊架、托盘)、相关支承物(电缆、管道等)基本未考虑冲击作用,从构件安全协调性、荷载发生概率等方面考虑,膨胀螺栓本体不需具备原位抗冲击性能,因此对金属螺杆开展标准夏比 U 形缺口冲击试验,以评估钢材冲击韧性,衡量钢材抗脆断性能。自扩底机械锚栓螺杆抗冲击性能如表 7 所示,由表 7 可知,其抗冲击性能满足要求。

表 7 螺杆抗冲击性能

Table 7 Shock resistance performance J

冲击能量	锚栓等级			
	M10	M12	M16	M20
-20℃	76~81	90~94	78~90	72~79
常温	112~126	104~125	127~140	119~126

2.6 耐火性能

按照 GB/T 9978.1—2008《建筑构件耐火试验方法 第 1 部分:通用要求》规定的标准时间-升温曲线进行耐火试验,结果如表 8 所示。经过 180min 耐火试验,自扩底机械锚栓未发生断裂,仍具备承载能力,且在对应规定的拉拔力作用下,未发生失效破坏。继续施加对应极限拉拔力后,混凝土开裂,自扩底机械锚栓未发生破坏,耐火性能满足要求。

表 8 耐火性能

Table 8 Fire resistance performance kN

项目	锚栓等级			
	M10	M12	M16	M20
荷载	1.0	1.5	2.0	3.0
规定拉拔力	24	30	36	45
极限拉拔力	30	41	64	94

2.7 安装工艺敏感性

当混凝土试块强度等级为 C30、裂缝宽度为 0.3mm 时,自扩底机械锚栓安装工艺敏感性如表 9 所示,安装间距和边距如表 10 所示,安装工艺参数如表 11 所示。

2.8 抗腐蚀性

对复合涂层、热浸镀锌涂层、电镀锌涂层进行中性盐雾试验,研究自扩底机械锚栓的抗腐蚀性。结果表明,经 2 400h 中性盐雾试验后,自扩底机械锚栓涂层基本完好无损,整体评级为 7 级;热浸镀锌涂层在 400h 后出现大量白锈,900h 后出现大量红锈;电镀锌涂层在 120h 后出现大量红锈。表明在同样的环境中,复合涂层抗腐蚀性优于热浸镀锌涂层和电镀锌涂层,且对环境无污染。

3 自扩底机械锚栓数字化检测系统

自扩底机械锚栓数字化检测系统由智能拉拔检测仪、智能扭矩检测仪、收发装置和锚固检测数据智能管理云平台组成。智能拉拔检测仪用于检测锚固件抗拉承载力,确保锚固件满足设计力值。智能扭矩检测仪用于检测锚固件的扭矩,确保锚固件安装扭矩达到设计扭矩值。检测仪与专用收发装置协同工作,实时记录拉拔检测值和扭矩检测值,可选择生成数字图片及视频影像,确保检测数据真实性、可追溯性,以及锚固件质量评价的可靠性。通过锚固检测数据档案,可方便进行数据管理、核查、使用。

3.1 智能拉拔检测仪

1) 便携式拉拔仪

便携式拉拔仪适用于 M10, M12, M16, M20 锚

表 9 安装工艺敏感性

Table 9 Installation process sensitivity

项目	M10 锚栓		M12 锚栓		M16 锚栓		M20 锚栓	
	规定值	实测值	规定值	实测值	规定值	实测值	规定值	实测值
抗拉承载力平均值/kN	≥46.4	52.6	≥67.4	72.2	≥125	139.8	≥203	227
抗拉承载力变异系数	≤0.05	0.02	≤0.05	0.02	≤0.05	0.03	≤0.05	0.03
滑移系数最小值	≥0.80	1.00	≥0.80	0.98	≥0.80	1.00	≥0.80	1.00
钻头直径/mm		20.50		22.50		30.50		37.50
钻孔深度/mm		107		135		203		266
安装深度/mm		100		125		190		250

表 10 安装间距和边距

Table 10 Installation spacing and edge distance

mm

项目	型号			
	P/T 10×100	P/T 12×125	P/T 16×190	P/T 20×250
有效埋深	100	125	190	250
临界间距	300	375	570	750
临界边距	150	187.5	285	375
最小间距/边距	100/80	125/100	190/150	250/200
最小边距/间距	80/100	100/125	150/190	200/250
最小基材厚度	180	200	270	350

表 11 安装工艺参数

Table 11 Installation process parameters

项目	型号			
	P/T 10×100	P/T 12×125	P/T 16×190	P/T 20×250
钻孔直径/mm	20	22	30	37
锚板开孔直径/mm	12/21	14/23	18/32	22/40
钻孔深度/mm	107	135	203	266
紧固扭矩/(N·m)	50	80	120	300
螺母尺寸/mm	17	19	24	30

栓、螺栓、钢筋等连接件间的抗拉拔性能测试中。该仪器具有以下特点:①体积小、仅重 1.9kg、测试快、数值准;②数字记录、无线传输、数字存储、单机控制、支持持续追溯;③坚固耐用,功耗低,工作温度为 $-15\sim 50^{\circ}\text{C}$,电池寿命长;④通信控制和测量方式为蓝牙,通过蓝牙与数据中心连接,拉力为 $0\sim 100\text{kN}$,拉拔力值实时在手持显示设备(IDC)上显示,并自动存储;⑤IDC 内含专用 APP,实现测试数值的自动存储,并自动生成测试报告;⑥APP 内含录像及拍照功能,测试时可生成影音文件,与测试报告同时存储;⑦具有专利弧形底座设计,锚固件倾斜 45° 以下均可进行拉拔测试;⑧无须拆卸螺母,快速拉拔。

2) 轻快式拉拔仪

轻快式拉拔仪适用于 M16, M20, M24 锚栓的拉拔力检测中,可快速拉拔既有线路,由油压泵及拉拔头组成,拉拔头为铝合金航空铝材质,通过高压油管与油泵相连,油泵有手压、脚踏或电动增压方式。该仪器拉力为 $0\sim 100\text{kN}$,工作温度为 $-25\sim 55^{\circ}\text{C}$,功率为 750W ,具有以下特点:①拉拔头外径只有 8cm ,适合小间距及小边距的锚固拉拔试验;②拉拔头质量小,适合高空作业;③拉拔速度快,可不卸螺母及固定物,直接拉拔;④内置高灵敏芯片,可无线传输试验数据;⑤内置蓝牙,可与 IDC 连接;⑥拉拔头可更换。

3) 功能型拉拔仪

功能型拉拔仪具有如下形式:①力位移拉拔仪,适用于 M24 及以上锚栓中,可同时检测力值、位移

值,能够生成力-位移检测曲线,拉力为 $0\sim 250\text{kN}$,工作温度为 $-25\sim 55^{\circ}\text{C}$,检测功率为 800W ,检测时间 $\geq 1\text{min}$;②敏捷型拉拔仪,适用于 M24 及以上锚栓,可实现快速拉拔,拉力为 $0\sim 250\text{kN}$,工作温度为 $-25\sim 55^{\circ}\text{C}$,检测功率为 800W ,检测时间 $\leq 30\text{s}$;③持荷型拉拔仪,适用于 M24 及以上锚栓,能够设定保持时间,并在设定时间内每隔 30s 自动记录力值,拉力为 $0\sim 250\text{kN}$,工作温度为 $-25\sim 55^{\circ}\text{C}$,检测功率为 800W ,检测时间 $\geq 2\text{min}$ 。

3.2 智能扭矩检测仪

智能扭矩检测仪由仪器本体及 IDC 组成,仪器全身采用航空铝制作,总重 1.03kg ,体积小、携带方便。仪器可充电,测量精度达 $0.01\text{N}\cdot\text{m}$,工作温度为 $-15\sim 50^{\circ}\text{C}$,适用于 M10, M12, M16, M20 锚栓中。该仪器具有多种测量模式,可根据需求修改追加内容,通过蓝牙无线传输,数据永久储存。通过检测螺母扭矩,可大幅度降低工程损失。

3.3 系统软件

通过专用 APP 数字化记录项目、检测人员及检测单位与相关单位的信息等,通过实时拍照与录像,生成多媒体资料,用于质量追溯。APP 将采集的数据生成不可修改的 PDF 格式文件,同时支持数据上传。通过云服务器部署软件,能够在云端实时掌握监测数据及项目进度。

3.4 数字化检测流程

智能拉拔力检测设备和智能扭矩检测设备的检测方法相同,数字化检测流程如图 2 所示。

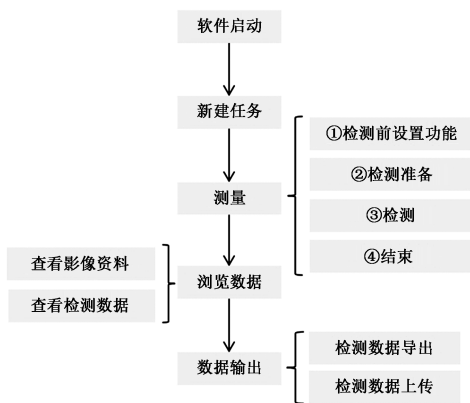


图2 数字化检测流程

Fig. 2 Process of digital detection

4 自扩底机械锚栓施工

1) 确定钻孔位置

根据锚栓位置安装图和钢筋实际位置,在混凝土表面标出钻孔理论中心位置。

2) 钢筋探测

使用混凝土透视仪确定钢筋位置和深度,且在混凝土结构面上标出钢筋位置,对较大面积混凝土进行网格状扫描,在300mm深度范围内定位钢筋,在扫描仪显示探测结果,再被传至分析仪上做进一步评估。

3) 钻孔

按规定直径使用无振动静力金刚石钻头钻孔,孔深取决于锚栓型式。使用带限位功能的电锤安装对应双刃钻头,在现场标记位置或预留孔位置钻孔,应控制孔径、孔深、垂直度等。若在钻头上标识钻孔深度,不应包含钻头前端锥体部分。在混凝土构件上应避免配筋、裂缝,孔位需满足规定的最小边距与最小间距要求。钻孔直径应满足锚栓对应钻孔孔径,孔径偏差 $\leq 1\text{mm}$ 。

4) 清孔

利用小型空压机或气筒及毛刷等工具进行清孔(见图3),以确保孔底、孔内无明显杂质。

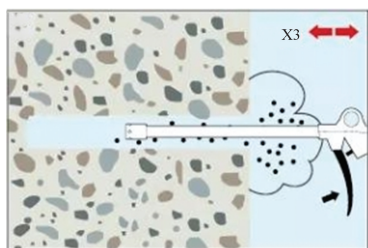


图3 清孔过程示意

Fig. 3 Process of hole cleaning

5) 螺杆安装

将P形自扩底机械锚栓的螺杆置入钻孔内部,

连接安装杆,非转动状态下将螺杆推至孔底(见图4),禁止采用锤子敲击。将T形自扩底机械锚栓的螺杆置入钻孔内部前,需要安装固定物。

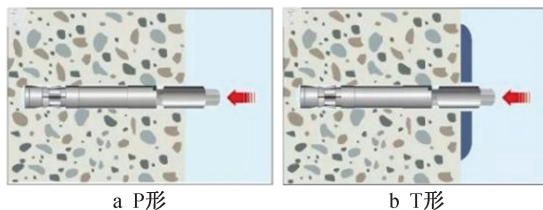


图4 自扩底机械锚栓安装

Fig. 4 Installation of self-expanding mechanical anchor bolts

6) 初次扩底

使用电锤安装工具杆,启动电锤后工具杆带动螺杆边锤击边旋转3~5s,完成初次扩底(见图5),扩底过程中,电锤禁止由孔底向孔外方向上下移动。

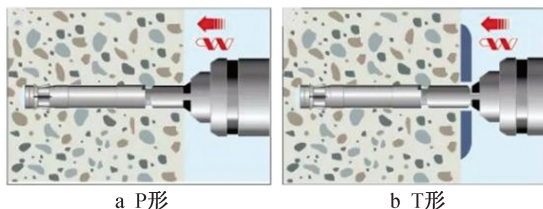


图5 自扩底机械锚栓初次扩底

Fig. 5 Initial expansion of self-expanding mechanical anchor bolts

7) 安装连接套管

取出安装杆,将连接套管安装在螺杆上(见图6)。

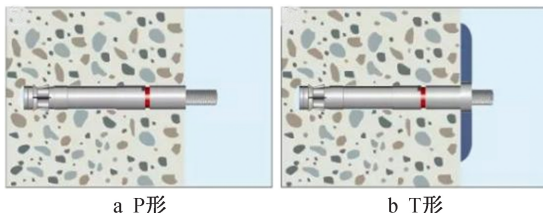


图6 自扩底机械锚栓安装连接套管

Fig. 6 Installation of connection sleeves for self-expanding mechanical anchor bolts

8) 安装被锚固物

初次扩底完成后,将P形自扩底机械锚栓安装被锚固物及垫片螺母,而T形自扩底机械锚栓仅安装垫片螺母,再对照相关型号锚栓,使用数字化扭矩仪施加安装扭矩,实现精准扩底,完成安装(见图7)。

5 结语

研发的核工程用自扩底机械锚栓采用国产原材料及配套工艺加工制作,其生产工艺成熟,质量

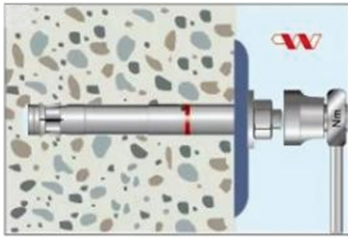


图7 安装被锚固物

Fig. 7 Installation of the anchored object

保证体系完善,具有良好且稳定的机械、防腐、抗震、抗疲劳、抗冲击性能,相关技术指标满足应用要求。采用数字化检测系统,保证了锚栓安装后的承载力与扭矩,确保检测数据的真实性、可追溯性。

自扩底机械锚栓承载力高,能够承受较大的拉力、剪切力,承载力主要源于锚栓机械锁键作用,可在混凝土基材中产生强大的摩擦力、剪切力,确保固定工程稳定;安装简便,不需要特殊工具和专业技能,安装过程中仅需将锚栓插入混凝土基材钻孔中,利用扳手或钳子等工具固定即可,缩短施工周期,降低成本。所用金属材料具有良好的耐腐蚀性、耐久性,在正常使用条件下使用寿命可达几十年,满足长期固定工程需求;可靠性高,不易松动或脱落;适用范围广,可应用于桥梁、隧道、高速公路等大型工程的固定、连接中。

参考文献:

- [1] 中国建筑科学研究院有限公司. 混凝土结构后锚固技术规程:JGJ 145—2013 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
China Academy of Building Research. Technical specification for post-installed fastenings in concrete structures: JGJ 145—2013 [S]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2013.
- [2] 中国建筑科学研究院有限公司. 混凝土用机械锚栓:JG/T 160—2017 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.

China Academy of Building Research. Mechanical anchors for use in concrete:JG/T 160—2017[S]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2017.

- [3] 上海核工程研究设计院. 核电厂核安全相关混凝土结构后锚固技术规程:NB/T 20414—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2017.
Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute Co., Ltd. Technical requirements for post-installed components of nuclear safety related concrete structures in nuclear power plants: NB/T 20414—2017[S]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2017.
- [4] 李莹,杨波,王琴,等. JG/T 160—2017《混凝土用机械锚栓》的性能试验和评定[J]. 工业建筑,2020,50(5):102-108.
LI Y, YANG B, WANG Q, et al. Development of testing and evaluation of JG/T 160—2017 mechanical anchors for use in concrete [J]. Industrial construction, 2020, 50 (5): 102-108.
- [5] 董世民. 机械锚固锚栓性能及评价方法[J]. 工程质量,2004(11):20-26.
DONG S M. Bolt performance and evaluation method of mechanical anchor [J]. Construction quality, 2004 (11): 20-26.
- [6] 严勇. 机械锚栓系统在设备基础安装上的应用[J]. 建材世界,2014,35(5):136-138, 146.
YAN Y. Application of mechanical anchor system in equipment foundation installation [J]. The world of building materials, 2014, 35 (5): 136-138, 146.
- [7] 陈家晖,江微. 后锚固锚栓的抗震性能设计[J]. 建筑结构, 2019, 49(S1):833-836.
CHEN J H, JIANG W. Seismic performance design of post-anchored bolt [J]. Building structure, 2019, 49 (S1): 833-836.
- [8] 唐潮,石朝花. 锚栓的锚固长度及构造要求[J]. 钢结构, 2014,29(5):25-28.
TANG C, SHI C H. Anchorage length and construction requirements of anchor bolts [J]. Steel structure, 2014, 29 (5): 25-28.