

团 体 标 准

T/CCTAS XX—2023

铁路预应力混凝土桥梁智能张拉与压浆施 工技术规程

Technical specification for intelligent tensioning and grouting
construction of railway prestressed concrete bridge

(征求意见稿)

2023 年 9 月

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

中国交通运输协会 发 布

目 次

前 言 II

引 言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 2

4 基本规定 3

5 机具与材料 3

 5.1 智能张拉系统 3

 5.2 智能压浆系统 5

 5.3 材料 7

6 系统检验与校准 7

 6.1 智能张拉系统 7

 6.2 智能压浆系统 8

7 预应力筋智能张拉 8

 7.1 一般规定 8

 7.2 施工准备 9

 7.3 智能张拉 11

 7.4 设备拆除 16

8 管道智能压浆 16

 8.1 一般规定 16

 8.2 施工准备 16

 8.3 智能压浆 17

 8.4 设备拆除 20

9 检测与验收 20

 9.1 张拉质量检测与验收 20

 9.2 压浆质量检测与验收 21

附 录 A （资料性） 预应力智能张拉记录表..... 24

附 录 B （资料性） 预应力智能张拉含倒顶记录表..... 25

附 录 C （资料性） 预应力混凝土管道压浆记录表..... 26

附 录 D （规范性） 后张法预应力筋实测伸长量修正及理论伸长量精确计算..... 28

附 录 E （规范性） 理论压浆量计算..... 31

附 录 F （资料性） 智能张拉设备进场验收单..... 32

附 录 G （资料性） 智能压浆设备进场验收单..... 33

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国交通运输协会新技术促进分会提出。

本文件由中国交通运输协会标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：中国铁路设计集团有限公司、天津市地下铁道集团有限公司、蜀道投资集团有限责任公司、湖南联智科技股份有限公司。

本文件主要起草人：

引 言

为改变当前交通运输行业铁路混凝土桥梁预应力张拉与压浆施工现状，加大智能建造相关技术在工程建设各环节的应用，提升混凝土桥梁预应力施工技术水平与工程质量，编制组进行了广泛调研，并在总结近年来铁路与城市轨道交通领域中预应力混凝土桥梁智能张拉压浆的成功经验以及相关科研成果的基础上，吸纳其中成熟技术和工艺，与现行相关规范标准进行协调后，制定本文件。相较于铁路行业相关规范标准，本文件将智能化预应力施工的装备、施工过程与质量的控制、检测检验标准融为一体，面向于覆盖较为广泛的交通运输行业对智能化预应力施工的需求，以数字化、智能化升级为动力，提高生产效率及施工过程的自动化、远程化、信息化水平为目标，为预应力混凝土桥梁智能张拉压浆质量和安全提供技术支撑和保障。

铁路预应力混凝土桥梁智能张拉与压浆施工技术规范

1 范围

本文件明确了铁路混凝土桥梁预应力智能张拉与压浆施工的术语和定义、设备技术要求、施工过程和质量控制原则。

本文件适用于铁路行业后张法预应力混凝土桥梁的智能化预应力筋张拉与管道压浆施工，城市轨道交通行业相关施工可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 14370-2015 预应力筋用锚具、夹具和连接器
- GB/T 17671-2021 水泥胶砂强度检验方法ISO法
- GB/T 28171-2011 嵌入式软件可靠性测试方法
- GB/T 35014-2018 建筑施工机械与设备 预应力用自动压浆机
- GB/T 7551-2008 称重传感器
- JJF 1305-2011 线位移传感器校准规范
- JJG 391-2009 力传感器
- JJG 621-2012 液压千斤顶
- JJG 860-2015 压力传感器静态检定规程
- CJJT 290-2019 城市轨道交通桥梁工程施工及验收标准
- JB/T 13462-2018 建筑施工机械与设备预应力用智能张拉机
- JG/T 225-2020 预应力混凝土用金属波纹管
- JG/T 319-2011 预应力用电动油泵
- JG/T 321-2011 预应力用液压千斤顶
- JT/T 529-2016 预应力混凝土桥梁用塑料波纹管
- TB 10415-2018 铁路桥涵工程施工质量验收标准
- TB 10424-2018 铁路混凝土工程施工质量验收标准
- TB 10752-2018 高速铁路桥涵工程施工质量验收标准
- TB/T 3193-2016 铁路工程预应力筋用夹片式锚具、夹具和连接器

T/CECS G: J51-01-2020 公路桥梁锚下有效预应力检测技术规程

Q/CR 409-2017 铁路后张法预应力混凝土梁管道压浆技术条件

Q/CR 566-2017 铁路后张法预应力混凝土梁摩阻试验方法

Q/CR 586-2017 铁路预应力混凝土桥梁自动张拉系统

Q/CR 710-2019 铁路桥梁预应力管道自动压浆系统

Q/CR 9207-2017 铁路混凝土工程施工技术规程

Q/CR 9603-2015 高速铁路桥涵工程施工技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 智能张拉系统 intelligent tensioning system

基于物联网、计算机、液压、自动控制等技术，能够实现预应力筋张拉全过程自动控制、分析、判断和数据采集传输的集成设备系统，主要由智能泵站和智能千斤顶组成。

3.2 智能泵站 intelligent hydraulic power unit

由电控装置、液压装置、计算机等主要部件构成，能够根据程序指令自动向千斤顶提供动力的液压泵，是智能张拉系统的核心。

3.3 智能千斤顶 intelligent hydraulic cylinder

智能张拉设备中对预应力筋施加张拉力的装置，集成力传感器或压力传感器进行力值测量，集成位移传感器进行活塞伸长值的测量，并将千斤顶的力值及位移数据反馈给智能泵站的控制系统。

3.4 预应力智能张拉 intelligent tensioning for prestress

采用智能张拉系统，无需人工参与油泵控制及数据测量与记录的预应力张拉施工过程。

3.5 智能压浆系统 intelligent grouting system

基于物联网、计算机、自动控制等技术，能够实现制浆压浆全过程自动控制、分析、判断和数据采集传输的集成设备系统，主要由抽真空设备、制储浆设备、压浆泵及控制设备构成。

3.6 预应力智能压浆 intelligent grouting for prestress

采用智能压浆系统，无需人工参与材料配比、浆液制备、设备控制、数据测量与记录的预应力管道压浆施工过程。

3.7 真空辅助压浆 vacuum aided grouting

对管道进行抽真空后，使其内部产生负压力，从而提升管道浆体密实度的辅助压浆手段。

4 基本规定

- 4.1 智能张拉与压浆施工应积极、稳妥地推广和应用新材料、新技术、新工艺与新设备，保证施工质量，提升作业效率与信息化、智能化水平。
- 4.2 铁路行业预应力智能张拉与压浆前序施工质量应满足 TB/T 10415、TB 10424、TB 10752 的相关要求；城市轨道交通行业智能张拉与压浆前序施工质量应满足 CJJT 290 的相关要求。
- 4.3 预应力工程实施前，应按照 Q/CR 566 确定的测试方法及设计要求对管道摩阻、锚口摩阻及预应力筋回缩量进行实际测定，设计单位根据摩阻测试结果对张拉控制力和理论伸长值进行调整和确认。
- 4.4 智能张拉与压浆施工应满足现行 Q/CR 9207、Q/CR 9603、CJJ/T 290 中的相关要求。
- 4.5 智能张拉与压浆系统的参数信息配置由专人负责，并做好相应的配置和维护工作。
- 4.6 智能张拉与压浆施工队伍由专业化人员组建，管理和作业人员相对固定，施工前应进行技术和安全交底，并完成岗前培训，经考核通过后方可上岗。

5 机具与材料

5.1 智能张拉系统

5.1.1 系统组成

智能张拉系统组成见图1，分为动力子系统、传感子系统、控制子系统和辅助子系统。

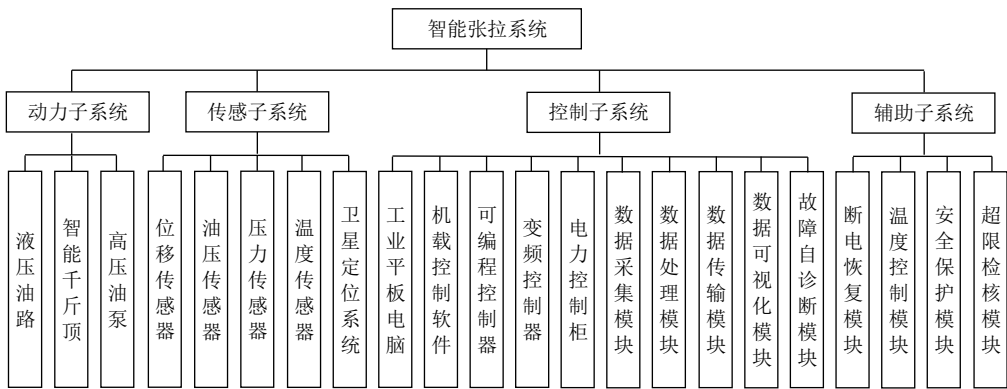


图 1 智能张拉系统组成

5.1.2 动力子系统

- 5.1.2.1 千斤顶公称张拉力额定量程不应小于最大张拉控制力的 1.2 倍，且不宜大于最大张拉控制力的 1.5 倍。

5.1.2.2 千斤顶最大行程宜按预应力筋的伸长量与张拉初始阶段预留行程量之和计算。

5.1.2.3 应根据使用环境温度选用满足国家标准的 L-HM 型抗磨液压油。

5.1.2.4 油压超出额定压力 10%时, 应具备自动溢流保护功能。

5.1.3 传感子系统

5.1.3.1 应同时具备测力传感器与液压传感器, 且液压传感器应安装于智能千斤顶端。

5.1.3.2 力值测量宜采用轮辐式测力传感器, 其高度尺寸不宜大于 150mm; 油压测量宜采用变阻式液压传感器。

5.1.3.3 力传感器额定量程不应小于最大张拉控制力的 1.2 倍, 且不宜大于最大张拉控制力的 1.5 倍, 传感器示值精度误差不大于 0.5%。

5.1.3.4 压力传感器额定量程应满足所使用千斤顶公称油压级别, 且不小于 600bar。

5.1.3.5 位移测量宜采用拉线式位移传感器, 额定量程不小于千斤顶最大行程的 1.2 倍, 示值精度误差不大于 0.5%。

5.1.3.6 温度传感器额定量程为 $-30^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$, 示值精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

5.1.4 控制子系统

5.1.4.1 宜采用两泵四顶的硬件组成模式, 可对各千斤顶单独控制, 满足“双束双端”、“双束单端”、“单束双端”及“单束单端”工况。

5.1.4.2 主、副泵站之间应兼容无线与有线两种通讯方式, 及无线信号增强功能, 工作时由主泵控制副泵运行。

5.1.4.3 控制软件应稳定可靠、界面清晰、易于人机交互操作, 可通过有线或无线方式访问互联网。

5.1.4.4 预设张拉信息后, 可一键启动, 自动完成张拉、持荷、锚固全过程, 可实现自动和手动两种控制模式的转换, 数据可自动记录存储且不可修改, 采集频率不小于 5Hz。

5.1.4.5 输出力值超过工作设定力值 5%时, 应能自动停机。

5.1.4.6 可实现伸长值偏差超限智能预警: 黄色预警时, 做出暂停提示; 橙色预警时, 自动暂停; 红色预警时, 自动停止张拉。

5.1.4.7 具备油温自动调控功能, 正常工作时, 油温可自动控制在 $5^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 之间。

5.1.4.8 具备如下参数化配置与全过程可视化功能:

- a) 张拉参数设置方式应支持自动载入与手动设置双模式;
- a) 张拉过程中应能实时显示张拉力偏差、预应力筋伸长值偏差、不同步率等张拉控制指标, 并自动绘制时间-伸长值、时间-力值、力值-伸长值数据曲线;
- b) 现场连续采集数据应能实时上传至指定平台并实现重播回放;
- c) 可实现数据的查询和导出, 并自动生成张拉报表, 内容及格式见附录 A 与附录 B。

5.1.4.9 锚固过程中，可自动控制回顶油压在预设范围内。

5.1.5 辅助子系统

5.1.5.1 接收和发送信号及时、准确，应配置独立的安全保护接地装置，外接地电阻小于 4 Ω。

5.1.5.2 宜配备张拉台车等配套工装，具备行走及千斤顶自动升降功能。

5.1.5.3 宜配备卫星定位模块，定位精度不大于 2.5m。

5.1.5.4 宜采用具备自动量测功能的配套工装对工具夹片外露量进行采集。

5.1.5.5 宜具备力传感器自动校准功能。

5.1.5.6 具备断电恢复、故障自诊断、回顶保护、荷载复核等辅助功能：

5.1.5.7 发生故障或突然断电时应能自动保存张拉数据，恢复供电后可按断电前状态继续完成张拉；

5.1.5.8 张拉过程中，应能自动分析、判断设备是否出现故障。

5.1.6 其它要求

5.1.6.1 系统应配备安全防范报警装置及急停按钮。

5.1.6.2 工作温度范围宜为-15℃～55℃间，相对工作湿度范围宜低于 85%，且能在露天环境中正常工作，具备 IP56 级防尘、防水的外部保护能力。

5.1.6.3 系统工作电压为 380（1±7%）V AC。

5.1.6.4 系统设备进场后宜进行验收，验收内容及格式见附录 F。

5.2 智能压浆系统

5.2.1 系统组成

智能压浆系统组成见图2，分为制浆储浆子系统、抽真空及压浆子系统、传感子系统、控制子系统、和辅助子系统，同时具备废料收集装置。

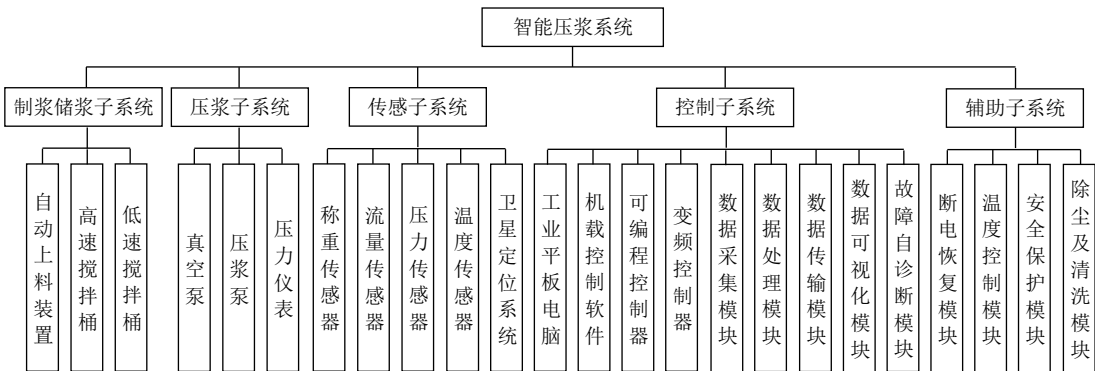


图 2 智能压浆系统组成

5.2.2 制浆储浆子系统

5.2.2.1 高速制浆桶和低速储浆桶的容量应匹配，制浆速度和储浆容量可满足正常压浆作业需求，压浆施工过程中不因缺浆而中断。

5.2.2.2 高速制浆机叶轮转速不低于 1000 r/min，搅拌叶片圆周切线速度不低于 15m/s，低速储浆桶叶轮转速为 50r/min~70r/min。

5.2.2.3 高速制浆桶与低速储浆桶之间应设置过滤网，网格尺寸不大于 3mm×3mm。

5.2.3 压浆子系统

5.2.3.1 采用真空辅助压浆工艺时，真空泵极限负压值不低于 1.0 bar。

5.2.3.2 应选用具有连续作业能力的压浆泵，宜采用单螺杆泵。

5.2.4 传感子系统

5.2.4.1 流量传感器精度等级不低于 0.5 级。

5.2.4.2 称重装置最大允许误差不大于 0.3%，并满足 GB/T 7551 的相关要求。

5.2.5 控制子系统

5.2.5.1 控制软件应具有参数预设、自动抽真空、自动上料、自动计量、称量控制和自动制浆、储浆功能，并能实时显示设备工作地理位置。

5.2.5.2 制浆、压浆参数信息预设完成后，应能一键启动并自动完成压浆全过程。

5.2.5.3 应能实现压浆施工过程的自动和手动控制模式切换。

5.2.5.4 具备自动压浆、压力调整、连续输出和压力保持的功能，可控制进口压力，自动检测进浆量和返浆量，可实现自动补压和持压双控。

5.2.5.5 加压过程中，系统能够及时、准确地指示出管路上的压力值。

5.2.5.6 可实现如下关键参数的设置、显示与校核功能：

- a) 输入水、压浆剂、水泥(或水、压浆料)质量后应能自动计算并显示水胶比，水胶比超出规范允许值时应能进行校核提示；
- a) 搅拌时间超出设定范围时应进行提示；
- b) 压浆压力可根据最高压浆压力和安全压力分别设置；
- c) 应具有超压报警和压浆泵空转报警功能；
- d) 系统应能对稳压时间进行限值设定。

5.2.5.7 压浆过程中应能自动判断预应力管道压浆饱满度。

5.2.5.8 可实现压浆量偏差超限三级智能预警，出现红色预警时，系统自动停止压浆。

5.2.5.9 具备数据自动采集、存储、查询、报表生成及数据上传的功能，报表内容及格式见附录 C。

5.2.5.10 具备自动清洗功能及流程提示。

5.2.6 辅助子系统

5.2.6.1 高速搅拌桶等机械运转部位应设有安全防护装置，控制面板应配备急停旋钮。

5.2.6.2 应配备安全警示标识。

5.2.6.3 系统设备应配置接地保护端子。

5.2.6.4 制浆系统的高速制浆桶和低速储浆桶均应设置排浆口。

5.2.6.5 宜配备具有自行走功能的工装。

5.2.6.6 应配备高压水枪等清洗装置和除尘装置。

5.2.6.7 宜配备卫星定位模块，定位精度不大于 2.5m。

5.2.7 其它要求

5.2.7.1 工作环境温度应为 $0^{\circ}\text{C}\sim+50^{\circ}\text{C}$ 。

5.2.7.2 工作电压为 380V 三相交流电源，电压波动范围 $\pm 7\%$ 。

5.2.7.3 工作频率为 $(50\pm 1)\text{Hz}$ 。

5.2.7.4 预应力智能压浆系统设备进场前应进行验收，验收内容及格式见附录 G。

5.3 材料

5.3.1 混凝土浇筑、预应力筋加工制作及安装应满足 Q/CR 9207、Q/CR 9603、TB 10424、TB 10752、TB 10415 及 CJJ/T 290 的相关要求；进场预应力筋的性能和质量应满足 GB/T 5223 及 GB/T 5224 的相关要求。

5.3.2 预应力锚具、夹具和连接器应满足 GB/T 14370 及 CJJ/T 290 的相关要求，根据预应力筋品种、锚固要求和张拉工艺等配套使用，并按 TB/T 3193 的要求进行限位板槽深、预应力筋直径、工作锚的匹配性试验。

5.3.3 预应力混凝土用波纹管应满足 JG/T 225 及 JT/T 529 相关要求。

5.3.4 压浆材料性能指标应满足 CJJ/T 290、TB/T 3192 及 Q/CR 9207 的相关要求。

6 系统检验与校准

6.1 智能张拉系统

6.1.1 智能张拉系统投入使用前应满足如下要求：

- a) 系统中千斤顶、测力传感器、油压传感器、位移传感器、温度传感器、工业可编程控制器(PLC)、工业平板电脑等主要部件应具备出厂质量检验合格证书，各类传感器应具备经有资质的检定机构配套检定合格后的检定证书。
- b) 宜完成设备与建设单位认可的信息化管理平台间的数据接口调试。

6.1.2 测量性能检验、控制性能检验、长期运行性能检验所用组装件应由智能张拉成套产品、工装配件、夹具和预应力筋组装而成，当系统组装进行检验时，按不小于千斤顶额定力值的 0.8 倍确定所需安装的预应力筋根数，预应力筋受力长度不宜小于 3 m。

6.1.3 智能张拉系统力传感器、压力传感器及位移传感器处于下列情况之一时，应进行校准：

- a) 首次使用前；
- b) 距上次校准时间达到 6 个月时；
- c) 距上次校准使用次数达到 3000 次时；
- d) 张拉设备异常、检修或更换配件后。

6.1.4 液压千斤顶应与智能泵站、控制子系统配套校准，校准周期不超过 3 个月。

6.2 智能压浆系统

6.2.1 智能压浆系统投入使用前应满足如下要求：

- a) 系统中所用的计量器具、仪表、及真空泵、压浆泵、电机等关键部件均应具备出厂质量检验合格证书，各类仪表及传感器应具备经有资质的检定机构配套检定合格后的检定证书。
- b) 宜完成设备与建设单位认可的信息化管理平台间的数据接口调试。

6.2.2 系统所使用的称重传感器、压力传感器应满足 GB/T 7551 及 JJG 860 的相关要求，压力仪表应满足 JB/T 6804 的相关规定。

6.2.3 管道压浆前应对系统设备进行校准，并满足 GB/T 35014 及 Q/CR 710 中相关要求。

6.2.4 高速搅拌桶的称量装置和放浆称量装置具备以下条件之一者，应重新校准：

- a) 距上次校准时间达到 6 个月时；
- b) 距上次校准使用次数达到 5000 个管道；
- c) 设备检修或更换配件后；
- d) 设备出现异常情况时。

6.2.5 智能压浆设备的压力测量装置和流量监测装置具备以下条件之一者，应重新校准：

- a) 距上次校准时间达到 12 个月时；
- b) 设备检修或更换配件后；
- c) 设备出现异常情况时。

7 预应力筋智能张拉

7.1 一般规定

7.1.1 张拉应采用信息化手段进行,宜通过系统设备与信息化管理平台间的数据交互实现全过程管理。

7.1.2 各阶段预应力施加时的混凝土强度、弹性模量和龄期应符合设计要求,同条件养护的混凝土立方体试件抗压强度应符合设计要求。

7.1.3 当环境温度低于 -15°C 时,不宜进行张拉作业。

7.1.4 混凝土梁张拉宜按如下顺序进行:

- a) 集中预制的简支箱梁宜按预张拉、初张拉和终张拉三个阶段进行;
- b) 集中预制的简支 T 梁宜按初张拉和终张拉两个阶段进行;
- c) 悬臂浇筑连续梁、连续刚构宜按先纵向再竖向后横向顺序进行,纵向预应力筋按先腹板再顶板后底板、由外向内左右对称的顺序进行;
- d) 悬臂拼装连续梁、连续刚构宜按先长后短、先边后中、先上后下交错进行。

7.1.5 预应力筋安装在管道中后,应采取适当的方式对外露部分进行保护,后续工程施工中避免预应力筋、管道、锚垫板及锚具损伤和移位。

7.2 施工准备

7.2.1 预应力筋穿束前,应对梁体外观及锚垫板后的混凝土密实性进行检查,并对预应力管道及锚口位置进行清理。

7.2.2 预应力筋张拉前,应根据实测摩阻损失、预应力筋实测弹性模量精确计算所需初拉力、张拉控制力和张拉理论伸长值。

7.2.2.1 管道摩阻测试在实体梁上进行,选择的管道应满足以下要求:

- e) T 梁选择 2 片梁,每片至少 3 个管道,箱型梁至少选择 6 个管道;
- f) 包括 2 种以上弯起角度(含最大弯折角)的管道;
- g) 包含不同直径的管道,直径相同时选择预应力筋根数多的管道;
- h) 连续梁/连续刚构的测试管道长度不宜短于 40m;
- i) 未进行(预)初张的管道。

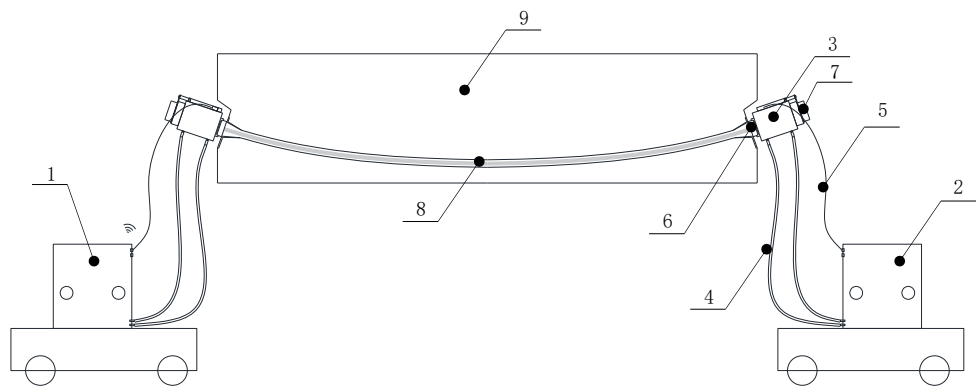
7.2.2.2 锚口摩阻、预应力筋回缩量测试在混凝土试件上进行,选择的锚具应满足以下要求:

- j) 锚具为 1 孔~12 孔的,选择用量最多和孔数最多的锚具;
- k) 锚具为 13 孔~19 孔的,选择 2 种锚具,包括孔数最多的锚具;
- l) 锚具为 20 孔及以上的每种锚具;
- m) 每种锚具测试 3 个,每个测试 1 次;
- n) 全新未使用过的锚具(含夹具)。

- 7.2.3 宜进行梳编穿束，保证预应力筋在管道中平行顺直。
- 7.2.4 应根据需要，搭设安全可靠的张拉作业平台，并设置明显的警戒标志及安全护栏。
- 7.2.5 设备连接与安装由技术人员指导工人进行，安装完成后由技术人员对设备安装效果进行检查，千斤顶、锚具和锚口应位于同一轴线上。

7.2.6 设备安装

7.2.6.1 预制梁智能张拉设备安装方式见图 3。



- 标引序号说明：
- 1—智能张拉仪主机；
 - 2—智能张拉仪从机；
 - 3—千斤顶；
 - 4—液压油管；
 - 5—数据线；
 - 6—工作锚夹具及限位板；
 - 7—工具锚夹具；
 - 8—预应力束；
 - 9—梁体。

图 3 预应力混凝土预制梁智能张拉设备连接示意图

7.2.6.2 现浇梁智能张拉设备安装方式见图 4。

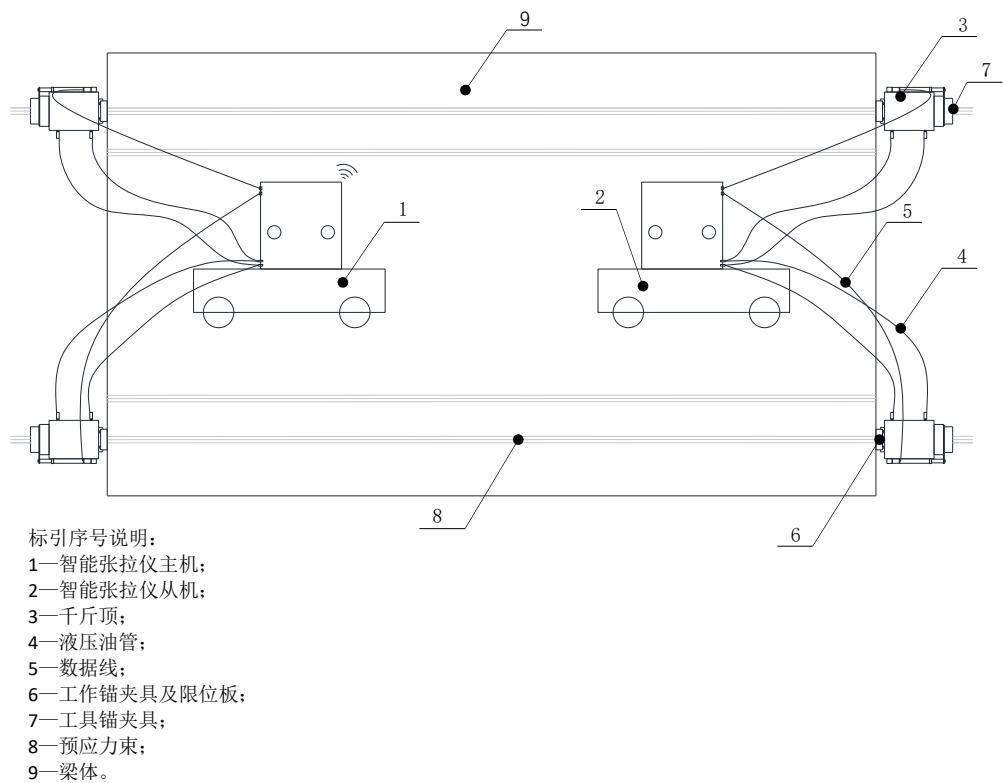


图 4 预应力混凝土现浇梁智能张拉设备连接示意图

7.3 智能张拉

7.3.1 对于包含（预）初张拉阶段的智能张拉，施工工艺流程见图 5。

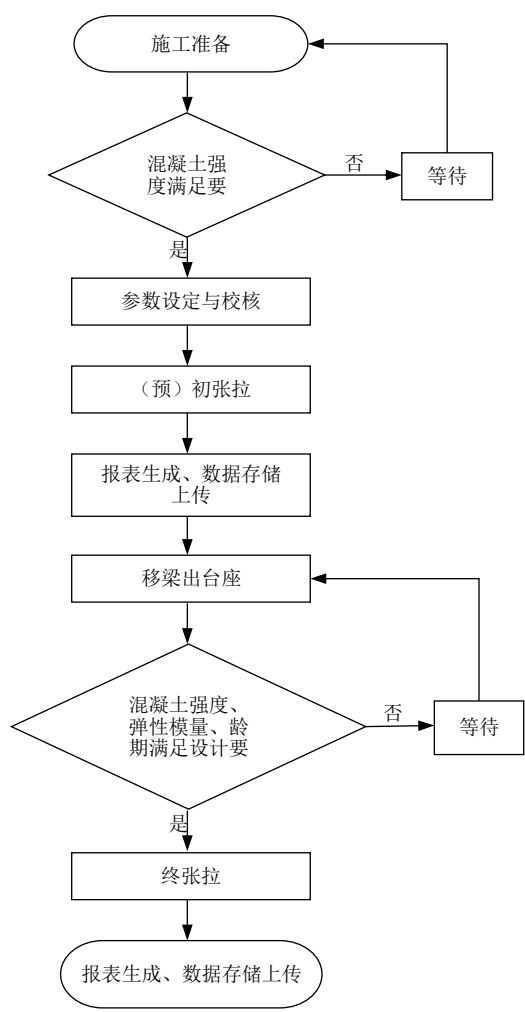


图 5 含（预）初张拉阶段工艺流程图

7.3.2 对于不包含（预）初张拉阶段的智能张拉，施工工艺流程见图 6。

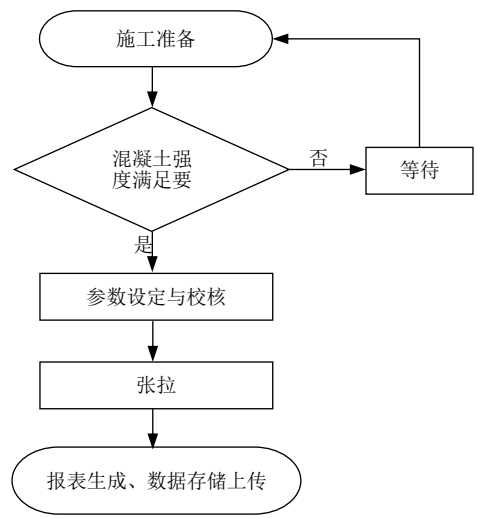


图 6 不含（预）初张拉断工艺流程图

7.3.3 采用夹片式锚具的预应力筋智能张拉工作程序与判断逻辑宜按图 7 所示流程进行：

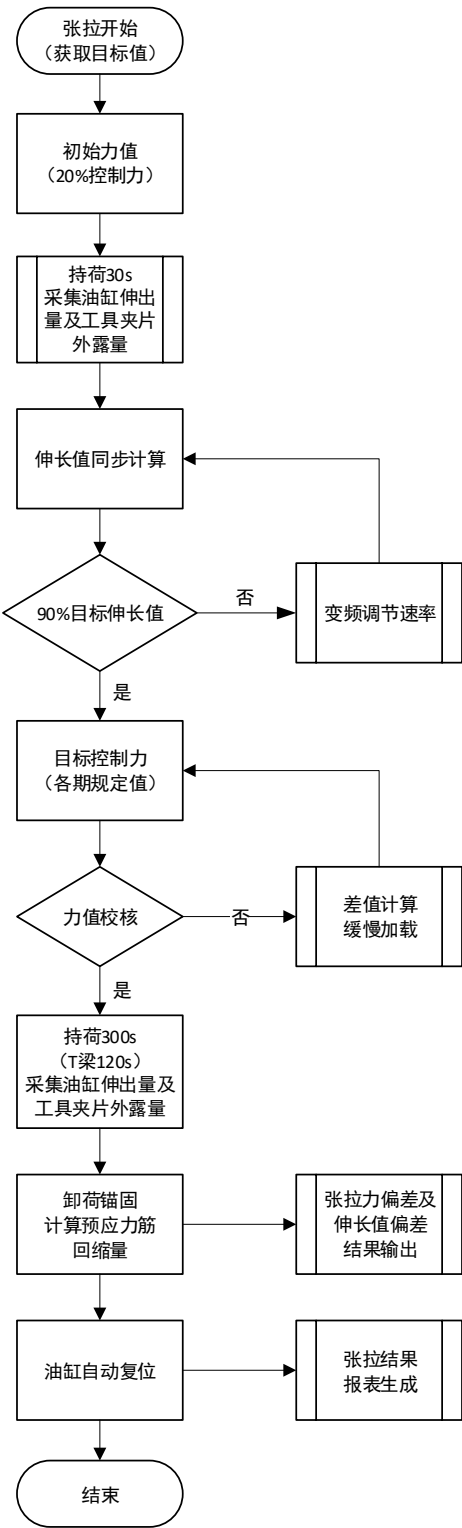


图 7 智能张拉实施程序

7.3.4 智能张拉过程控制宜满足如下要求：

- a) 控制阶段前 90%时，程序采用力值与伸长值双控机制，并实时计算分析，到达理论伸长值的 90% 时自动转换为张拉力控制，实测伸长量修正及理论伸长量精确计算宜按附录 D 执行；
- b) 控制程序通过力传感器反馈实测值智能判断张拉进程，并以压力传感器换算力值进行实时校核，当实测值与换算值偏差大于 5%时进行报警，同时暂定张拉，智能控制流程与逻辑见图 8；

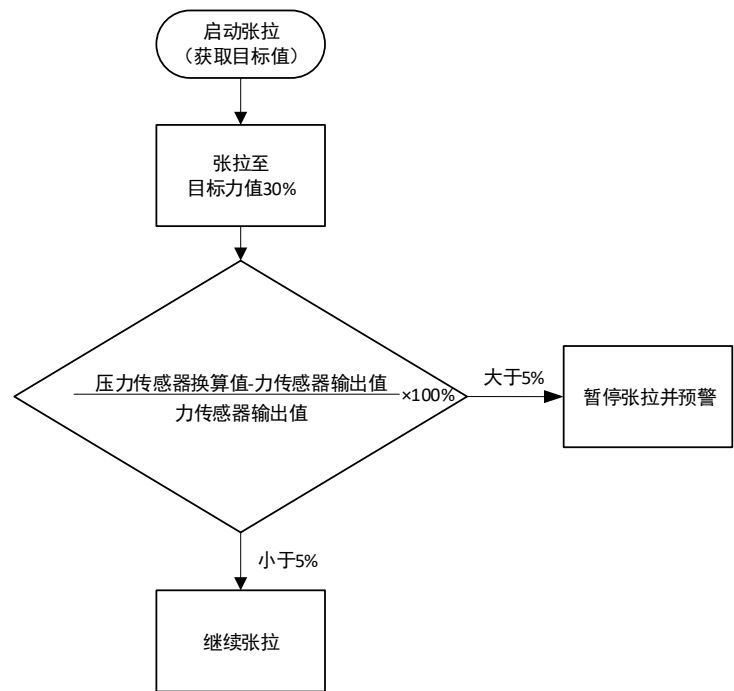


图 8 力传感器与压力传感器校核控制流程

- c) 程序通过预设参数对各千斤顶反馈数据进行分析判断，智能同步调节，加载速度不大于 20kN/s，力值偏差控制在 $\pm 1\%$ 以内，各项间力值同步误差不大于 2%，采用双端张拉工况时，伸长值不同步率控制在 5%内；
- d) 由程序对预应力筋伸长值实时测算，并在伸长值偏差超出 $\pm 6\%$ 时进行分级预警判断，预警规则见表 1。

表 1 伸长值偏差预警规则

伸长值偏差范围	预警级别	预警机制
+ 6% ~ + 10%	黄色预警	系统做出暂停提示
-6% ~ -8%；+10% ~ +12%	橙色预警	系统自动暂停并提示是否继续
超出-8%及+12%时	红色预警	系统自动停止张拉

- e) 张拉过程中程序实时监测油温变化并进行双向智能控制,使液压系统工作在最佳温度区间,油温智能调控流程见图 9。

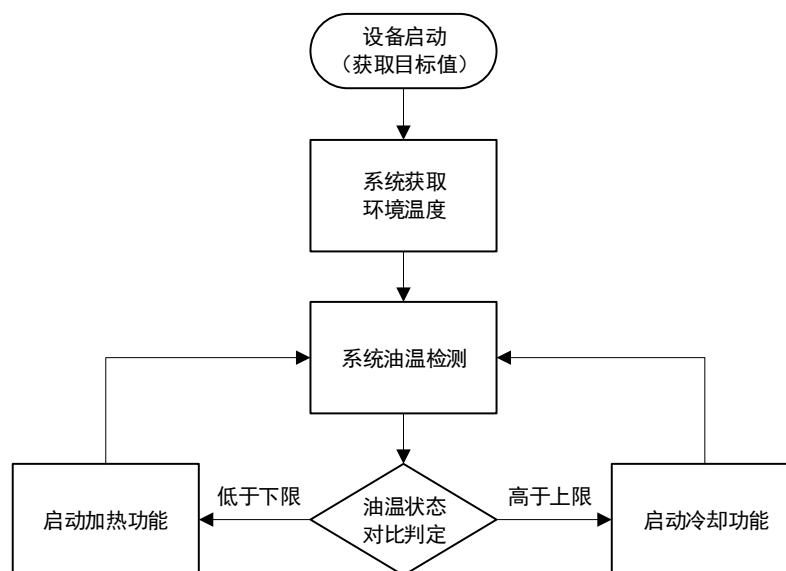


图 9 油温智能调控流程

7.3.5 系统对张拉各项指标变化及运行状态进行实时监控,出现异常情况,立即暂停并做出相关提示,待现场人员查明原因并采取措施予以调整。

7.3.6 锚固结束后夹具顶面应平齐,其相互间的错位宜不大于 2mm,且露出锚具外的高度应不大于 4mm。经检验确认合格后可切割端头多余的预应力筋,切割时应采用砂轮锯,不应采用电弧进行切割,同时不得损伤锚具。

7.3.7 预应力筋切割后的外露长度不小于 30mm,且不小于 1.5 倍预应力筋直径。锚具采用封端混凝土保护,当需长期外露时,应采取防止锈蚀的措施。

7.3.8 张拉完成后,系统自动生成并存储报表且不可更改,宜按相关要求上传数据,并根据电子报表内容及现场要求进行纸质报表的整理,打印后进行审核签认,作为质量管理资料存档。

7.3.9 智能张拉安全施工应遵守如下要求:

- 施工人员进入施工现场,佩戴安全帽,高空作业及悬挑部位作业应系挂安全绳。
- 张拉施工区域一切非工作人员不可进入,宜在千斤顶后端设立金属挡板进行防护,雨天张拉时,架设防雨棚。
- 利用已搭建的脚手架进行作业时,检查管件连接部位是否稳固,铺板是否可靠。

- d) 张拉作业时应平稳均匀,千斤顶后不可站人,如需对情况进行查看,操作人员可位于千斤顶两侧,千斤顶不应超载和超出规定行程使用。
- e) 张拉过程中若发现预应力筋出现滑、断丝现象,需要卸荷重新张拉时,应有专人进行监护,防止作业区域内无关人员靠近。

7.4 设备拆除

7.4.1 张拉结束后依次关闭系统软件、电机、切断电源,拆卸千斤顶、油管。

7.4.2 系统各设备闲置时应妥善存放,宜采取防尘、防水措施进行保护。

8 管道智能压浆

8.1 一般规定

8.1.1 压浆应采用信息化手段进行,宜通过系统设备与信息化管理平台间的数据交互实现全过程管理。

8.1.2 管道压浆宜采用真空辅助压浆工艺。

8.1.3 压浆前,应由实验室完成材料配比试验与设备检验检测,并确定设备额定压力不大 25bar、安全压力不大于 10bar。

8.1.4 应在终张拉完成后 48h 内进行,浆体温度控制在 $5^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 之间,压浆后 72h 内梁体温度不低于 5°C ,环境温度高于 35°C 时,应选择低温时段施工。

8.1.5 宜采用先下层后上层的压浆顺序,浆液搅拌完成至压入梁体的时间不超过 40min,且在压注前和压注过程中连续搅拌。

8.1.6 对于因延迟使用导致流动度降低的浆体,不得通过加水来增加其流动度。

8.1.7 现浇梁工点管道压浆时,设备应布设于梁面,不应放置在低于梁体结构位置进行施工。

8.2 施工准备

8.2.1 穿束前宜先穿入直径略小于波纹管内径的硬质塑料内撑管。

8.2.2 对于具有上弯波纹管结构的预应力管道,宜在管道最高点设置溢浆孔,溢浆孔一般采用直径 25mm 带阀门的镀锌钢管。

8.2.3 预应力筋切割应满足 TB 10424 中相关要求。

8.2.4 预应力筋切割完成后,应采用密封罩或封堵料对锚具缝隙和其它可能漏浆部位进行封堵,待封堵料达到强度后方可压浆。

8.2.5 设备连接及管路接口的安装由技术人员指导工人进行,安装完成后,由技术人员对安装效果进

行检查，确保各设备安装及管线连接正确。

8.2.6 设备安装

8.2.6.1 预应力混凝土预制梁，智能压浆设备应按图 10 所示进行连接。

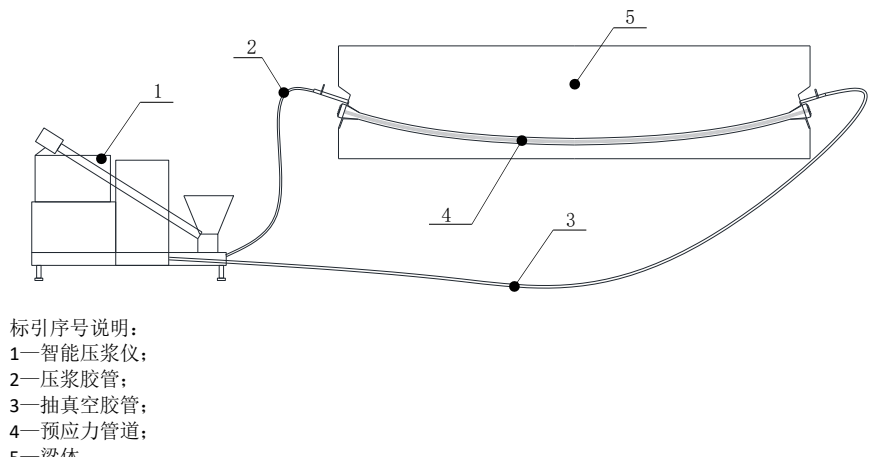


图 10 预应力混凝土预制梁智能压浆设备连接示意图

8.2.6.2 预应力混凝土现浇梁，智能压浆设备应按图 11 所示进行连接。

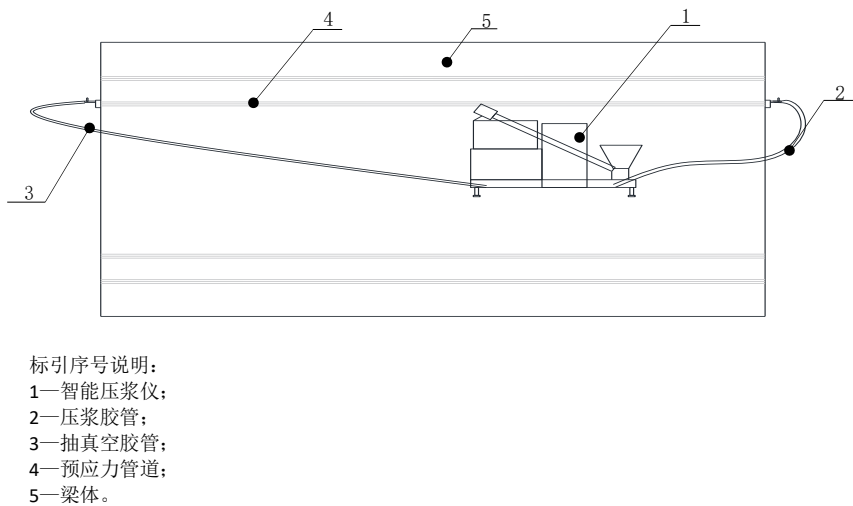


图 11 预应力混凝土现浇梁智能压浆设备连接示意图

8.3 智能压浆

8.3.1 管道智能压浆施工工艺流程见图 12。

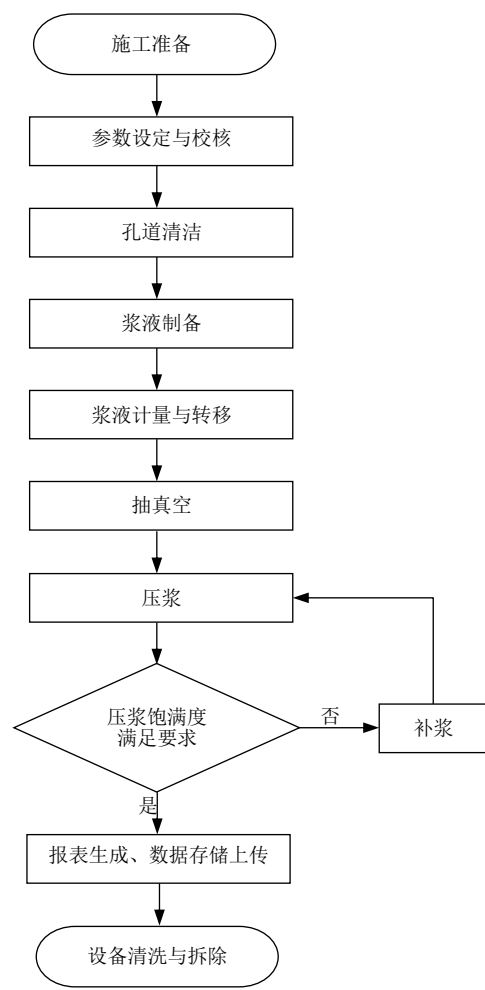


图 12 预应力混凝土现浇梁智能压浆设备连接示意图

8.3.2 浆液制备

制浆量根据现场需求确定，应能满足单孔或多孔压浆所需用量，制备过程宜按如下要求进行：

- a) 程序根据预设参数及制浆流程，自主判断并完成上料与配比，材料称量误差控制在±1%内，水胶比不大于 0.33，流量计与称重传感器测得水量差值大于 5%时自动报警。
- b) 智能制浆工艺宜采用“静态称重、动态添加”方案进行，即经材料各成分含量计算后，完成 90%材料添加，定时搅拌 2min，继续添加剩余 10%，再次定时搅拌 2min 后，完成制浆。
- c) 高速制浆桶中的浆液，每 10 盘进行一次出机流动度检验。
- d) 浆液制备完成，系统进行蜂鸣提示并打开卸料阀，过滤后转移至储浆桶，转移计量误差≤1%。

8.3.3 抽真空

采用真空辅助压浆工艺时，浆液转移完成后，真空泵自动开启，当系统检测管道内负压值稳定在0.6 bar~0.8bar之间时，进行压浆提示，同时压浆端阀门打开。

8.3.4 管道压浆

8.3.4.1 应先排出压浆泵至梁体间管路内的稀浆,当排出的浆液与低速储浆桶中的浆液流动度一致时,开始压浆。

8.3.4.2 浆液应从最低点的管道压浆孔压入。

8.3.4.3 压浆时,程序对压入管道与流出管道的浆液质量进行实时采集计算。

8.3.4.4 压浆时,每孔简支梁或每个现浇梁悬臂节段制作3组 $40\text{mm}\times 40\text{mm}\times 160\text{mm}$ 标准养护试件,进行抗压与抗折强度试验。

8.3.4.5 智能压浆过程控制宜满足如下要求:

- a) 程序根据设定流程对各管道进行连续、缓慢、均匀地压浆,压浆速率为 $20\text{L}/\text{min}\sim 30\text{L}/\text{min}$,并一次完成。
- b) 程序根据预设参数对过程中浆液压力进行监测、判断与控制,纵向或横向管道不宜高于 6bar ,对于超长管道,不宜高于 10bar ;竖向管道宜为 $3\text{bar}\sim 4\text{bar}$ 。
- c) 当程序检测到实际压浆量达到理论压浆量的90%以上时,自动进入保压阶段,以 $5\text{bar}\sim 6\text{bar}$ 的压力稳压不少于 3min ,理论压浆量计算方法宜按附录E执行。
- d) 持压补浆过程中,程序根据监测进浆流量进行判断,当压力不低于 5bar 且流量小于 $2\text{L}/\text{min}$ 时自动停止压浆。
- e) 程序对压浆过程信息进行实时采集、计算、分析,当实测压浆量到达理论值95%到110%之间判定为合格,超出此范围后进行分级预警判断,预警规则见表2。

表2 压浆量分级预警规则

实际压浆量范围	预警级别	预警机制
理论值的90% ~95%或110%~120%	黄色预警	系统做出暂停提示 低于下限值则开始自动补浆
理论值的85% ~ 90%或120% ~ 125%	橙色预警	系统自动暂停并提示是否继续 低于下限值则自动开始自动补浆
超出理论值125%时	红色预警	系统自动停止压浆

8.3.4.6 各管道压浆完成后通过检查孔检查浆液密实情况,如有不实,应进行二次补压浆。

8.3.5 压浆完成后,系统自动生成并存储报表且不可更改,宜按相关要求上传数据,智能压浆记录表格式及内容见附录C。宜根据电子报表内容及现场要求进行纸质报表的整理,打印后进行审核签认,作为质量管理资料存档。

8.3.6 智能张拉安全施工应遵守如下规定:

- a) 施工人员进入施工现场,佩戴安全帽,高空作业及悬挑部位作业应系挂安全绳。

- b) 在压浆施工区域醒目位置设置安全警示牌，避免无关人员进入。
- c) 压浆过程中人员不应正对出浆口进行作业，设备操作人员不可离开控制台，如发现异常应立即暂停，待查明问题并解决后方可继续压浆。
- d) 压浆结束后，对现场及时清理，废弃浆液应集中处理，防止污染。

8.4 设备拆除

8.4.1 压浆结束后宜按如下步骤对设备进行清洗：

- a) 使用清洗装置，冲洗设备外壳、制储浆桶、传感器等位置附着的浆液；
- b) 启动清洗程序，注入清水后高速搅拌，经压浆泵将杂质排出至管道外；
- c) 清洗完成依次关闭控制程序、电机，切断电源，整理管线、清理废料收集装置。

8.4.2 压浆结束后 3h 至 6h 拆除压浆咀并对管件及阀门进行清洗，以备再次使用。

8.4.3 设备使用完毕应妥善保管，宜采取防晒、防水措施进行保护。

9 检测与验收

9.1 张拉质量检测与验收

9.1.1 预应力筋进行张拉前，施工单位应进行同条件养护混凝土试件强度和弹性模量试验，并确认混凝土强度等级、龄期和弹性模量应已满足设计要求。

9.1.2 检查预应力筋的预施应力、张拉或放张顺序和张拉工艺，应符合设计及施工技术方案要求。

9.1.3 锚圈口及喇叭口摩阻（含回缩值）、管道摩阻检测结果应符合表 3 的要求。

表 3 锚圈口及喇叭口摩阻含回缩值和管道摩阻检测指标要求

检测指标	允许偏差（%）
锚圈口及喇叭口摩阻	不大于6%
预应力筋回缩值	0mm~6mm
管道摩阻 μ 、 k	$\pm 10\%$

9.1.4 智能张拉过程中，检查系统设备应能够实时显示当前实测张拉力值、实测伸长量及偏差、不同步率以及“时间-伸长量”、“时间-张拉力”、“张拉力-伸长量”的关系曲线，当接近目标力值时，力值偏差、不同步率、伸长值偏差应满足要求。

- 9.1.5 每一束预应力筋张拉完成后，系统中显示的结果信息（包括：理论伸长量、实测伸长量、伸长量偏差、力值偏差、不同步率等关键指标）应与生成报表中的记录值保持一致。
- 9.1.6 预应力筋的断丝或滑脱数量不应超过预应力筋总数的 5%，且不应位于结构同一侧，每束内预应力筋断丝不超过一丝。
- 9.1.7 宜对张拉端预应力筋内缩量进行抽样检查，检查数量为预应力筋总数的 3%，且不少于 5 束，使用夹片式锚具的预应力筋内缩量不大于 6mm。
- 9.1.8 通过系统数据回看功能，应对已完成张拉的过程数据、曲线图等进行重播回放。
- 9.1.9 智能张拉系统应对历史数据做出统计并与实际完成数量保持一致，张拉完成后生成的数据文件及成果报表均能以加密文件的形式存储于系统中。
- 9.1.10 智能张拉设备的显示界面中能够体现出设备的地理位置信息并记录在数据文件中。
- 9.1.11 张拉过程及结果数据均已按要求上传，上传内容与系统中储存的内容及归档的纸质资料内容一致。
- 9.1.12 张拉完成后的 6h~36h 内宜进行锚下有效预应力检测。
- 9.1.13 预制箱梁、T 梁第一片梁宜进行锚下有效预应力检测，抽样数量应达到总预应力束的 50%，后续抽检比例宜不少于梁片总数的 3%；支架现浇或悬浇连续梁前 5 束预应力筋或者 0#块宜进行锚下有效预应力检测，且应全检，后续抽检比例宜不少于管道数或者阶段的 10%，检测指标见表 4。

表 4 锚下有效预应力检测指标要求

检测指标	允许偏差（%）
锚下有效预应力偏差	±5
锚下有效预应力同束不均匀度	5
锚下有效预应力同断面不均匀度	2

9.1.14 锚下有效预应力检测结果评定为不合格时，应对不合格管道进行重新张拉，并重新进行检测，如继续评定为不合格，则应通过对管道摩阻重新测定、对机具设备进行校准、对施工质量进行全面检查等有效措施予以处治。

9.2 压浆质量检测与验收

9.2.1 制浆过程中，已按照预先设置的水胶比及上料精度完成自动上料操作及搅拌。

- 9.2.2 检查浆液的强度、流动度、凝结时间、泌水率、膨胀率、含气量等试验报告，其性能应符合设计要求和相关标准的规定。
- 9.2.3 检查预应力管道的压浆施工顺序、压浆工艺，应符合设计及施工技术方案要求。
- 9.2.4 压浆过程中，对系统设备实时显示的当前真空压力值、实测浆液压力值、过程压力曲线及水胶比、流动度、实际压浆量、保压压力值、保压时间等信息的完整性、准确性进行检查，压浆最大压力、保压时间、保压压力满足要求；压浆量的实测值与使用公式计算的结果应保持一致，流出管道的浆液经废料称重装置进行精确称量后予以扣除。
- 9.2.5 对压浆全过程进行观察，应满足连续、缓慢、均匀且一次完成的准则，浆液自拌制至压入预应力管道的时间应未超过 40min。
- 9.2.6 压浆时，对浆液温度进行测量，浆液温度应满足要求；压浆过程中及压浆完毕后 3d 内对梁体温度进行检查，应不低于 5℃。
- 9.2.7 每一管道压浆完成后，系统中结果信息（包括：浆液温度、初始流动度、水胶比、各项上料误差、实际压浆量、保压压力等关键指标）完全，可通过数据回放检查过程的完整性及数据的真实性，系统实测结果值应与生成报表中的记录值保持一致。
- 9.2.8 系统应能对历史数据做出统计并与实际相符，对数据文件及成果报表的真实性和加密性进行检查。
- 9.2.9 系统显示界面中能够体现出设备的地理位置信息并记录在数据文件中。
- 9.2.10 压浆结果数据信息均已按要求进行上传，上传内容与系统中储存的内容及归档的纸质资料内容一致。
- 9.2.11 预制箱梁、T 梁第一片梁宜进行管道压浆质量检测，抽样管道数量需达到 50%，后续抽检比例宜不少于总数的 3%；支架现浇或悬臂浇筑梁前 5 个管道或者 0#块宜进行管道压浆质量检测，所选管道全部检测，后续抽检比例宜不少于管道数或各节段的 10%，检查项目及指标见表 5。

表 5 预应力管道压浆控制要求

项 目	规定值
浆液材料水胶比	不大于 0.33
压浆压力	竖向管道不大于 4bar；纵、横向管道不大于 6bar，持压压力 5bar~6bar，最大压力不超过 10bar。
实际压浆量	理论压浆量的 95%~110%

项 目	规定值
浆液材料水胶比	不大于 0.33
持压时间	50m 以内的压浆管道为 5min；50m~80m 的压浆管道为 5min~8min；80m 以上的压浆管道持压时间至少为 10min。

注：此项为全检，通过打印记录表和原始数据查看。

9.2.12 预应力管道压浆完成后，宜委托具有相应资质及检测能力的第三方检测机构对预应力管道压浆质量进行检测。预应力管道压浆质量宜采用无损方法检测。管道压浆施工结束 3 天后进行管道压浆质量检测，所抽取梁体结构或管道不得提前进行封端，检测完成后再进行封端或者移梁安装。

9.2.13 压浆施工饱满度判定标准见表 6。

表 6 压浆施工质量饱满度判定标准

梁体长度/m	优良	合格	不合格
≤10	90%	85%~90%	≤85%
(10, 20]	90%	82.5%~90%	≤82.5%
(20, 30]	92%	85%~92%	≤85%
(30, 40]	94%	88%~94%	≤88%
≥40	95%	90%~95%	≤90%

9.2.14 饱满度不合格的预应力管道应做二次补压浆处理。

附录 A
(资料性)
预应力智能张拉记录表

工点				单位工程						施工单位												
				隶属标段						监理单位												
图号				工程实体				浇筑日期				混凝土强度 (MPa)				管道摩擦 μ						
类型				跨度 (m)				张拉日期				混凝土弹模 (GPa)				管道偏差 k						
预应力筋厂家				钢绞线卷号				钢绞线强度 (MPa)				台车/千斤顶/序号				校验日期						
锚/夹具厂家				锚/夹具型号				环境温度 (°C)														
张拉设备厂家				张拉设备编号				设备出厂日期														
张拉顺序	钢束编号	限位板槽深 /mm	钢绞线直径 /mm	钢绞线实际弹模 /GPa	千斤顶序号	初始阶段 (0.2 σ_k)				控制阶段 (1 σ_k)				锚固阶段 (回油至 10kN)		工作夹片外露 /mm	锚外钢绞线伸长值 /mm	计算伸长值 /mm	实际伸长值 /mm	伸长值偏差 / $\leq$ 6%	伸长值不同步率 / $\leq$ 5%	张拉偏差 / $\leq$ 1%
						设计力 /kN	张拉力 /kN	油缸伸长 /mm	工具夹片外露 /mm	设计力 /kN	张拉力 /kN	油缸伸长 /mm	工具夹片外露 /mm	油缸伸长 /mm	钢绞线回缩 / $\leq$ 6mm							
滑丝断丝情况												处理情况										
操作人员				技术负责人				质量检测员						监理工程师								

说明	1. σ_k —钢绞线设计张拉力；2. 锚固阶段(回油至 10kN)一回油至千斤顶力值为 10kN 时；3. 锚外钢绞线伸长值—工作锚至工具锚间钢绞线在 $0\sim 1.0\sigma_k$ 时的伸长量。
----	--

附 录 B
(资料性)
预应力智能张拉含倒顶记录表

工点									单位工程							施工单位															
									隶属标段																		监理单位				
图号									工程实体													浇筑日期				混凝土强度 (MPa)				管道摩擦 μ	
类型									跨度 (m)							张拉日期				混凝土弹模 (GPa)				管道偏差 k							
预应力筋厂家									钢绞线卷号							钢绞线强度 (MPa)				台车 /千斤顶 /序号				校验日期							
锚/夹具厂家									锚/夹具型号							环境温度 (°C)															
张拉设备厂家									张拉设备编号							设备出厂日期															
张拉顺序	钢束编号	限位板槽深 /mm	钢绞线直径 /mm	钢绞线实际弹模 /GPa	千斤顶序号	初始阶段 (0.2 σ_k)				控制阶段 (0.5 σ_k)				初始阶段 (0.5 σ_k)				控制阶段 (1.0 σ_k)				锚固阶段(回油至 10kN)		工作夹片外露 /mm	锚外钢绞线伸长值 /mm	计算伸长值 /mm	实际伸长值 /mm	伸长值偏差 / $\leq 6\%$	伸长值不同步率 / $\leq 5\%$	张拉力偏差 / $\leq 1\%$	
						设计力 /kN	张拉力 /kN	油缸伸长 /mm	工具夹片外露 /mm	设计力 /kN	张拉力 /kN	油缸伸长 /mm	工具夹片外露 /mm	设计力 /kN	张拉力 /kN	油缸伸长 /mm	工具夹片外露 /mm	设计力 /kN	张拉力 /kN	油缸伸长 /mm	工具夹片外露 /mm	油缸伸长 /mm	钢绞线回缩 / $\leq 6\text{mm}$								
滑丝断丝情况																处理情况															
操作人员									技术负责人								质量检测员								监理工程师						

说明	1. σ_k —钢绞线设计张拉力；2. 锚固阶段(回油至 10kN)—回油至千斤顶力值为 10kN 时；3. 锚外钢绞线伸长值—工作锚至工具锚间钢绞线在 $0\sim 1.0\sigma_k$ 时的伸长量。
----	--

附 录 C
(资料性)
预应力混凝土管道压浆记录表

梁场名称						单位工程				施工单位									
						隶属标段				监理单位									
图号						梁编号				终张日期						管道类型			
梁型						跨度(m)				压浆日期						环境温度(℃)			
水泥生产厂家						水泥规格				水泥批次				真空压力表检定日期					
压浆剂生产厂家						压浆剂规格				压浆剂批次				称重传感器检定日期					
压浆设备厂家						压浆设备编号				设备出厂日期				压力表检定日期					
制浆阶段								压浆阶段											
制浆盘号	浆液温度(℃)	配合比				初始流动度(s)	水胶比	压浆顺序	管道编号	真空压力(bar)	开始时间(hh:mm:ss)	结束时间(HH:mm:ss)	压浆时间(s)	保压压力(bar)	保压时间(s)	理论压浆量下限(kg)	理论压浆量上限(kg)	实际压浆量(kg)	备注
		总重(kg)	水泥误差(%)	压浆剂(料)误差(%)	水误差(%)														
1								1											
2								2											
3								3											
4								4											
5								5											
6								6											

自检意见		突发情况						处理情况		
监理意见		操作人员		技术负责人		质量检测员			监理工程师	

附录 D
(规范性)

后张法预应力筋实测伸长量修正及理论伸长量精确计算

D.1 预应力智能张拉的过程控制应根据预应力混凝土梁类别对应参照 TB 9207、Q/CR 9603 及对应设计要求进行。后张法预应力筋实测伸长值应从张拉至初始阶段目标力时开始进行测量，当未涉及多行程倒顶工况时，预应力筋实测伸长值 ΔL_A 可按照式 (1) 计算：

$$\Delta L_A = L_1 + (L_{2E} - \Delta L_3) - \Delta L_4 \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

L_1 — 初始阶段推算伸长值根据从初始阶段持荷完成至控制阶段持荷开始范围内预应力筋伸长值与力值发展线性关系进行推算；推算方法可参照式 (2) 进行计算：

$$L_1 = \frac{\text{控制阶段持荷开始时油缸伸长量} - \text{初始阶段持荷结束时油缸伸长量}}{1 - \frac{\text{初始阶段目标力值}}{\text{控制阶段目标力值}}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

- L_{2E} — 控制阶段由初应力至目标控制应力阶段持荷完成后油缸伸出量；
- ΔL_3 — 工具夹片的实测回缩值；
- ΔL_4 — 其它需要扣除的压缩值；

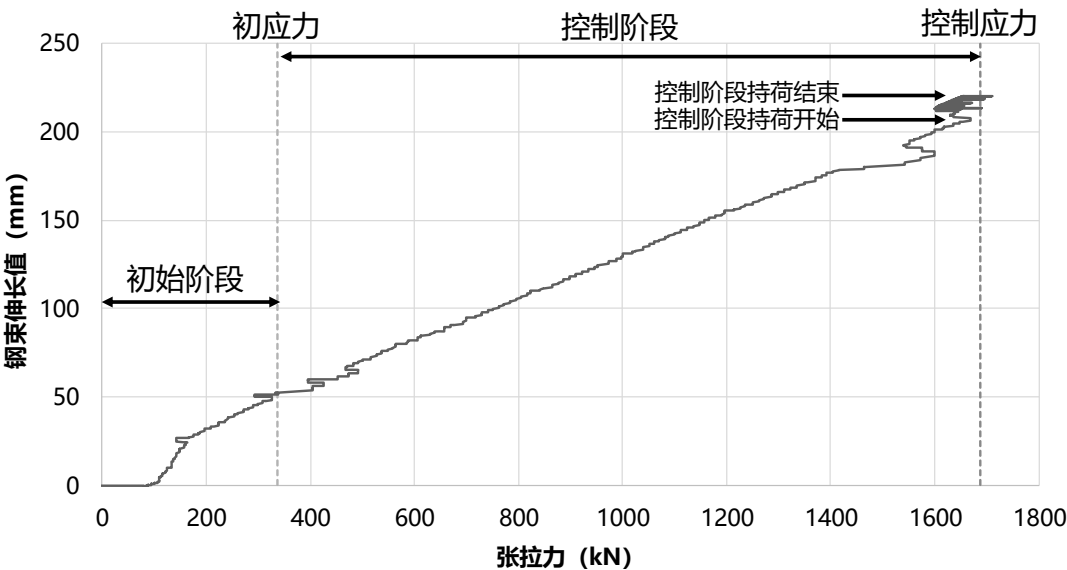


图 D.1 预应力筋张拉过程 力值-伸长量 曲线

D.2 当涉及多行程倒顶工况时，预应力筋实测伸长值 ΔL_B 可按照式 (3) 计算：

$$\Delta L_B = \Delta L_A + \sum_{i=1}^n [(L_{2E}^i - L_{1E}^i - \Delta L_3^i) - \Delta L_4^i] \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- ΔL_A — 第一行程实测伸长值采用式 (1) 中计算结果；
- L_{1E}^i — 后续第 i 行程初始阶段持荷完成后即到达前一行程目标力值时的油缸伸出量；

L_{2E}^i — 后续第 i 行程控制阶段持荷完成后即到达本行程目标力值时的油缸伸出量；

ΔL_3^i — 后续第 i 行程初始阶段至控制阶段的工具夹片实测回缩值；

ΔL_4^i — 后续第 i 行程其它需要扣除的压缩值。

D.3 张拉锚固阶段预应力筋回缩量可按式 (4) 进行计算：

$$L_h = L_k - L_o - L_q \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

L_k — 控制阶段持荷结束时千斤顶活塞伸出量；

L_o — 千斤顶泄压至 10kN 时活塞伸出量；

L_q — 锚固阶段千斤顶工作长度内预应力筋回缩值。

D.4 预应力筋理论伸长量应根据预应力筋受力状态分段计算，其计算方式按下式 (5) 进行计算：

$$\Delta L_C = \Delta L_5 + \Delta L_6 \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

ΔL_5 — 工作锚之间的预应力筋理论伸长量；

ΔL_6 — 工作锚至工具锚之间的预应力筋理论伸长量。

D.5 式 D.5 中工作锚之间的预应力筋理论伸长量 ΔL_5 应采用实测预应力筋弹性模量和管道摩阻系数，若包含多个直线段和曲线段，则应分段计算后进行累加。对于任意直线段或曲线段的预应力筋理论伸长量 ΔL_5^i 可按式 (6) 进行计算：

$$\Delta L_5^i = \frac{\bar{P}_i x_i}{E_p A_p} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

$\bar{P}_i$ — 预应力筋的平均张拉力；

x_i — 预应力筋的计算长度；

A_p — 预应力筋的截面积；

E_p — 预应力筋的实测弹性模量。

预应力筋的平均张拉力 $\bar{P}_i$ 可按式 (7) 计算：

$$\bar{P}_i = \frac{P_i}{kx_i + \mu\theta_i} [1 - e^{-(kx_i + \mu\theta_i)}] \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

P_i — 预应力筋的张拉力；

x_i — 预应力筋的计算长度；

θ_i — 预应力筋的曲线段管道切线夹角 rad，对于直线段 $\theta_i=0$ ；

k — 实测管道每米局部偏差对摩擦的影响系数；

μ — 实测预应力筋与管道壁之间的摩擦系数。

D.6 工作锚至工具锚之间的预应力筋理论伸长量 ΔL_6 应采用实测预应力筋弹性模量，对预应力筋的两

端分别按式（8）进行计算。

$$\Delta L_6 = \frac{FL_0}{E_P A_P} \dots\dots\dots (8)$$

式中：

- F — 预应力筋的锚外张拉力设计值；
- L_0 — 未张拉状态下工作锚至工具锚间的预应力筋实测长度；
- A_P — 预应力筋的截面积；
- E_P — 预应力筋的实测弹性模量。

D.7 预应力筋的伸长量偏差按式（9）进行计算。

$$\delta_s = \frac{\Delta L_{\text{实测}} - \Delta L_{\text{理论}}}{\Delta L_{\text{理论}}} \times 100\% \dots\dots\dots (9)$$

D.8 预应力筋的两端伸长量不同步率按式（10）进行计算。

$$\frac{\Delta L_{A\text{端}} - \Delta L_{B\text{端}}}{\Delta L_{\text{实测}}} \times 100\% \dots\dots\dots (10)$$

附 录 E
(规范性)
理论压浆量计算

E.1 每延米预应力管道压浆需填充浆液的体积按式（1）进行计算：

$$V = \Pi \cdot D \cdot D/4 - A_g \cdot n \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- V — 每延米预应力管道内需填充浆液体积；
- D — 波纹管内径；
- A_g — 单根预应力筋截面积；
- n — 预应力筋根数。

E.2 预应力管道压浆的理论进浆量按式（2）进行计算：

$$M = \rho \cdot V \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- M — 预应力管道理论进浆质量；
- ρ — 浆液密度。
- V — 预应力管道内需填充浆液体积。

附 录 F
(资料性)
智能张拉设备进场验收单

序号	项目	指标要求	是否满足	备注
1	制造商资质	准入厂商		
2	型式检验报告	相同设备型号		法定授权单位
3	软件测试报告	使用软件版本		
4	校准证书	正式校准证书		
5	双力传感器	精度均不低于 0.5 级		
6	平台接口调试情况	能够实时上传		
7	设备位置信息	实时更新, 2.5m 范围内		
8	设备显示	主、副泵都能显示关键信息		
9	功能项	油温控制、张拉速率控制、张 拉力自我诊断、位移测试精 度。		
验收人	监理单位		建设单位	

附 录 G
(资料性)
智能压浆设备进场验收单

序号	项目	指标要求	是否满足	备注
1	制造商资质	准入厂商		
2	型式检验报告	相同设备型号		法定授权单位
3	软件测试报告	使用软件版本		
4	校准证书	正式校准证书		
5	压力传感器	精度均不低于 1.0 级		
6	称重传感器	精度均不低于 0.5 级		
7	平台接口 调试情况	能够实时上传		
8	设备位置信息	实时更新，2.5m 范围内		
9	功能大项	自动上料、自动抽真空、自动 计算压浆量、自动放料		
验收人	监理单位		建设单位	