**中国工程建设标准化协会标准**

**混凝土筒仓预应力施工标准**

**Standard for prestressed construction of concrete silos**

**（征求意见稿）**

（提交反馈意见时，请将有关专利连同支持性文件一并附上）

**前 言**

根据中国工程建设标准化协会《2022年第一批协会标准制定、修订计划》（建标协字【2022】13号）的要求，制定本标准。编制组经过深入调查研究，认真总结实践经验，参考有关国内和国外的先进标准，并在广泛征求意见的基础上指定本标准。

本标准共分11章，主要内容包括：材料机具、构造要求、施工计算、施工管理、制作及安装、张拉灌浆及封锚、体外预应力加固施工等。

本标准的某些内容可能直接和间接涉及专利，本标准的发布机构不承担这些专利的识别责任。

本标准由中国工程建设标准化协会预应力工程专业委员会归口管理，由江苏新筑同创土木工程有限公司负责解释。在使用中如发现需要修改或补充之处，请将意见和资料寄送至解释单位。（地址：南京市江北新区浦滨路150号14栋，邮编210013，电话：025-83464880）。

主编单位：江苏新筑同创土木工程有限公司

南京理工大学

参编单位：

主要起草人：

中国工程建设标准化协会

年 月 日

**目 次**

[1 总则 1](#_Toc156809082)

[2 术语 2](#_Toc156809083)

[3 基本规定 4](#_Toc156809084)

[3. 1 施工管理 4](#_Toc156809085)

[3. 2 施工技术 4](#_Toc156809086)

[3. 3 施工质量与安全 4](#_Toc156809087)

[3. 4 施工配合 5](#_Toc156809088)

[4 材料 6](#_Toc156809089)

[4. 1 预应力筋 6](#_Toc156809090)

[4. 2 锚具 7](#_Toc156809091)

[4. 3 成孔材料 8](#_Toc156809092)

[4. 4 孔道灌浆材料 8](#_Toc156809093)

[4. 5 封锚材料 9](#_Toc156809094)

[5 施工设备及机具 10](#_Toc156809095)

[5. 1 下料机具 10](#_Toc156809096)

[5. 2 安装机具 10](#_Toc156809097)

[5. 3 张拉与灌浆机具 10](#_Toc156809098)

[6 构造要求 12](#_Toc156809099)

[6. 1 预应力筋（孔道）布置 12](#_Toc156809100)

[6. 2 锚固节点布置 12](#_Toc156809101)

[6. 3 耐久性及其它构造 12](#_Toc156809102)

[7 施工计算 14](#_Toc156809103)

[7. 1 下料长度 14](#_Toc156809104)

[7. 2 张拉力 14](#_Toc156809105)

[7. 3 预应力损失 14](#_Toc156809106)

[7. 4 锚固区局部承压 18](#_Toc156809107)

[7. 5 张拉伸长值 18](#_Toc156809108)

[7. 6 分批张拉验算 19](#_Toc156809109)

[8 制作及安装 21](#_Toc156809110)

[8. 1 下料及制作 21](#_Toc156809111)

[8. 2 预应力筋孔道留设 21](#_Toc156809112)

[8. 3 锚垫板安装 21](#_Toc156809113)

[8. 4 钢绞线穿束 22](#_Toc156809114)

[8. 5 质量验收 22](#_Toc156809115)

[9 张拉 24](#_Toc156809116)

[9. 1 张拉方案 24](#_Toc156809117)

[9. 2 张拉顺序 24](#_Toc156809118)

[9. 3 张拉 24](#_Toc156809119)

[9. 4 质量验收 25](#_Toc156809120)

[10 灌浆及封锚 26](#_Toc156809121)

[10. 1 孔道灌浆准备 26](#_Toc156809122)

[10. 2 灌浆 26](#_Toc156809123)

[10. 3 锚具保护 27](#_Toc156809124)

[10. 4 质量验收 28](#_Toc156809125)

[11 混凝土筒仓预应力加固 29](#_Toc156809126)

[11. 1 一般规定 29](#_Toc156809127)

[11. 2 施工措施 29](#_Toc156809128)

[附录A 常用钢绞线力学性能表 30](#_Toc156809129)

[附录B 常用锚具规格表 31](#_Toc156809130)

[附录C 常用波纹管选用表 32](#_Toc156809131)

[附录 D 常用电动油泵性能参数表 33](#_Toc156809132)

[附录 E 常用千斤顶参数表 34](#_Toc156809133)

[本标准用词说明 35](#_Toc156809134)

[引用标准名录 36](#_Toc156809135)

[附：条文说明 37](#_Toc156809136)

**Contents**

[1 General Provisions 1](#_Toc156809082)

[2 Terms 2](#_Toc156809083)

[3 Basic Requirements 4](#_Toc156809084)

[3. 1 Construction Management 4](#_Toc156809085)

[3. 2 Construction Technology 4](#_Toc156809086)

[3. 3 Construction Quality and Safety 4](#_Toc156809087)

[3. 4 Construction Cooperation 5](#_Toc156809088)

[4 Materials 6](#_Toc156809089)

[4. 1 Prestressed Tendons 6](#_Toc156809090)

[4. 2 Anchorages 7](#_Toc156809091)

[4. 3 Ducts 8](#_Toc156809092)

[4. 4 Grouting Materials 8](#_Toc156809093)

[4. 5 Anchor sealing Materials 9](#_Toc156809094)

[5 Construction Equipment and Machines 10](#_Toc156809095)

[5. 1 Cutting Machines 10](#_Toc156809096)

[5. 2 Install Equipments 10](#_Toc156809097)

[5. 3 Tensioning and Grouting Machines 10](#_Toc156809098)

[6 Construction Requirements 12](#_Toc156809099)

[6. 1 Layout of Prestressed Tendons (Ducts) 12](#_Toc156809100)

[6. 2 Layout of Anchorage Zone 12](#_Toc156809101)

[6. 3 Durability and Others 12](#_Toc156809102)

[7 Construction Calculation 14](#_Toc156809103)

[7. 1 Length of Prestressed Tendons 14](#_Toc156809104)

[7. 2 Tensioning Force 14](#_Toc156809105)

[7. 3 Loss of Prestress 14](#_Toc156809106)

[7. 4 Local Compression of Anchorage Zone 18](#_Toc156809107)

[7. 5 Elongation value of Prestressed Tendons 18](#_Toc156809108)

[7. 6 Check Calculation for Batched Tensioning 19](#_Toc156809109)

[8 Fabrication and Installation 21](#_Toc156809110)

[8. 1 Cut and Fabricate 21](#_Toc156809111)

[8. 2 Installation of prestressed Tendons (Ducts) 21](#_Toc156809112)

[8. 3 Installation of Anchor Plate 21](#_Toc156809113)

[8. 4 Cable Threading 22](#_Toc156809114)

[8. 5 Quality Acceptance 22](#_Toc156809115)

[9 Tensioning Prestressed Tendons 24](#_Toc156809116)

[9. 1 Tensioning Schemes 24](#_Toc156809117)

[9. 2 Tensioning Sequence 24](#_Toc156809118)

[9. 3 Tensioning 24](#_Toc156809119)

[9. 4 Quality Acceptance 25](#_Toc156809120)

[10 Grouting and anchor sealing 26](#_Toc156809121)

[10. 1 Grouting Preparation 26](#_Toc156809122)

[10. 2 Grouting Operation 26](#_Toc156809123)

[10. 3 Anchorage Protection 27](#_Toc156809124)

[10. 4 Quality Acceptance 28](#_Toc156809125)

[11 Prestressed Reinforcement of Existing Concrete Silos 29](#_Toc156809126)

[11. 1 General Provision 29](#_Toc156809127)

[11. 2 Construction Measures 29](#_Toc156809128)

[Appendix A Mechanical Properties of Common Steel Strand 30](#_Toc156809129)

[Appendix B Specification of Common Anchorage 31](#_Toc156809130)

[Appendix C List of Ducts Selection 32](#_Toc156809131)

[Appendix D Performance of Common Pump 33](#_Toc156809132)

[Appendix E Parameters of Common Jack 34](#_Toc156809133)

Explanation of Wording in this [Standard 35](#_Toc156809134)

[List of Quoted Standards 36](#_Toc156809135)

[Addition: Explanation of Provisions 37](#_Toc156809136)

# 1 总则

**1. 0. 1** 为了使混凝土筒仓工程的预应力施工做到安全可靠、经济合理、技术先进、确保质量，制定本规程。

**1. 0. 2** 本标准适用于采用后张法预应力混凝土仓壁的圆形新建及既有筒仓加固工程施工。

**1. 0. 3** 混凝土筒仓工程预应力施工应由具有相应能力和类似工程业绩的预应力专业工程承包单位承担，预应力施工深化设计图纸及施工组织设计应提交设计单位审查。

**1. 0. 4** 混凝土筒仓工程预应力施工，除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关设计、施工、材料等标准的规定。

# 2 术语

**2. 1. 1** 预应力筋 prestressing tendon

可施加预应力的单根或成束高强度低松弛钢绞线。本标准中的预应力筋特指高强度低松弛钢绞线。

**2. 1. 2** 有粘结预应力筋 bonded prestressing tendon

张拉后通过在预留孔道中灌浆与混凝土粘结的一种预应力筋。

**2. 1. 3** 无粘结预应力筋 unbonded prestressing tendon

表面涂防腐润滑脂并包塑料护套，张拉后与周围混凝土不粘结的一种预应力筋。

**2. 1. 4** 缓粘结预应力筋 retard-bonded prestressing tendon

表面涂缓粘结剂及固化剂并包带肋的塑料护套，张拉后逐渐固化并与周围混凝土粘结的一种预应力筋。

**2. 1. 5** 后张法 post-tensioning method

先浇筑混凝土后张拉预埋的预应力筋，并用锚具永久固定在构件或结构的两端，使构件或结构内产生预压应力的施工方法。

**2. 1. 6** 锚具 anchorage

后张法预应力构件或结构中，为保持并传递预应力筋的拉力，在预应力筋的两端用于夹持预应力筋的永久性锚固装置。

**2. 1. 7** 锚固区 anchorage zone

从预应力构件或构件端部锚具下局部高应力扩散到正常压力的区段。筒仓结构中，通常在锚固区设置扶壁柱。

**2. 1. 8** 应力松弛 stress relaxation

预应力筋张拉后其应力随时间逐步降低的现象。

**2. 1. 9** 张拉控制应力 control stress for tensioning

预应力筋张拉时在张拉端所施加的应力值。

**2. 1. 10** 预应力损失 prestressing loss

预应力筋张拉过程中和张拉后，由于材料特性、结构状态及张拉工艺等因素引起的预应力筋应力降低的现象。预应力损失包括：摩擦损失、锚固损失、弹性压缩损失、应力松弛损失和混凝土收缩徐变损失等。

**2. 1. 11** 有效预应力 effective prestress

扣除所有预应力损失后，可在预应力筋中保持的拉应力值。

**2. 1. 12** 体外预应力筋 external prestressing tendon

布置在结构构件截面之外的预应力筋，通过锚固支座及转向装置将预应力传递到结构上，通常用于既有结构的加固工程中。

**2. 1. 13** 预应力混凝土筒仓 prestressed concrete silo

采用后张法预应力混凝土仓壁的独立或连体布置的平面为圆形的储存散料的直立容器。

**2. 1. 1****4** 仓壁 wall of silo

筒仓与贮料直接接触且承受贮料侧压力的仓体竖壁。

**2. 1. 15** 扶壁柱 [buttress](javascript:;)

筒仓中用于环向预应力筋分段张拉锚固的支座，一般设置在仓壁外侧。

# 3 基本规定

## 3. 1 施工管理

**3. 1. 1** 混凝土筒仓中的预应力工程施工应由预应力专项工程企业承担，预应力专项工程企业的能力要求应符合《预应力专项工程企业能力评价标准》T/CSCS048要求，并应建立相应的质量管理体系。

**3. 1. 2** 预应力专项工程企业的项目机构设置和人员组成，应满足预应力施工技术及管理的需要。项目负责人应具有建造师执业资格，项目技术负责人应具有中级以上职称。

**3. 1. 3** 预应力张拉、灌浆操作人员应经过培训，具备相应的专业知识和操作技能，并取得中国钢结构协会的预应力甲级能力认定证书专项企业所颁发的上岗证书。

**3. 1. 4** 预应力张拉、灌浆过程的施工数据应详细记录，操作人员和见证人员应签字，做到可查阅、可追溯。预应力专项工程企业应组织施工全过程的资料编制、收集、整理和审核，并应及时存档、备案。

## 3. 2 施工技术

**3. 2. 1** 混凝土筒仓预应力施工前，预应力专项工程企业应根据预应力筋类型和仓壁混凝土施工方法及条件，确定合适的预应力筋施工方案，并应做好各项准备工作。

**3. 2. 2** 采用新工艺、新材料或符合以下特点的预应力筒仓工程，当无可靠经验及类似工程业绩时，施工前应组织专家论证。

**1** 直径70m以上；

**2** 四个以上的连体筒仓的新建或加固工程；

**3** 其它特殊情况。

**3. 2. 3** 预应力施工应采取有效的半成品及成品保护措施。

## 3. 3 施工质量与安全

**3. 3. 1** 预应力工程各工序的施工，应在前一道工序质量检查合格后进行。

**3. 3. 2** 在预应力工程施工过程中，应及时进行自检、互检和交接检，其质量不应低于现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 及本标准的有关规定。

**3. 3. 3** 预应力工程施工过程中应对隐蔽工程进行验收，对锚固区节点和张拉、灌浆工序应加强质量检查或进行测试，并作详细记录，必要时应留存影像资料。

**3. 3. 4** 预应力工程所使用的材料和机具，应符合国家现行有关标准、设计文件的规定。

**3. 3. 5** 预应力材料进场时，应对其规格、型号、外观和质量证明文件进行检查，并应按本标准的有关规定进行验收。

**3. 3. 6**  预应力材料进场后，应按种类、规格、批次分开贮存与堆放，贮存与堆放条件不应影响材料品质。

**3. 3. 7** 预应力工程施工前，预应力专项工程企业应制订检测和试验计划，经监理单位批准后实施。

**3. 3. 8** 预应力筋、锚具等主要材料的进场验收的抽样方法、抽样数量应符合国家现行有关标准的规定。当满足下列条件之一时，其检验批容量可扩大一倍：

**1** 获得第三方认证的产品；

**2** 同一厂家、同一品种、同一规格的产品，连续三批均一次检验合格。

**3. 3. 9** 预应力工程施工中的安全文明施工措施应符合国家现行有关标准的规定。

## 3. 4 施工配合

**3. 4. 1** 筒仓结构施工组织设计应考虑合理的预应力施工时间、操作空间和相应的安全施工保证措施。

**3. 4. 2** 预应力工程施工应与筒仓结构施工的其它工种紧密配合，合理安排总体施工顺序。

**3. 4. 3** 筒仓的施工及使用过程中，均不得扰动或损坏预应力筋及其两端的锚具。

**3. 4. 4** 当预应力筋的位置与普通钢筋、预埋件等产生冲突时，应优先保证预应力筋的位置。

**3. 4. 5** 采用滑模施工时，滑模平台应考虑预应力筋堆放位置及施工荷载。扶壁柱两侧张拉槽口模板应专门设计，穴模的制作与埋设应和预应力锚具类型匹配。

**3. 4. 6** 采用双排脚手架作为张拉平台时，仓壁混凝土施工时应在扶壁柱相应部位留设预埋件。

# 4 材料

## 4. 1 预应力筋

**4. 1. 1** 筒仓工程中的预应力筋宜采用高强度低松弛钢绞线，钢绞线的种类应根据结构受力特点、环境条件以及施工方法等选用。

**4. 1. 2** 钢绞线的规格和力学性能必须符合现行国家标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224的规定。常用钢绞线的规格和力学性能见附录A。

**4. 1. 3**  钢绞线的品种、直径和强度等级应按设计要求选用。当需要代换时，应进行专门计算，并经原设计单位审核后方可实施。钢绞线的代换应符合下列规定：

**1** 同一品种同一强度级别、不同直径的钢绞线代换后，钢绞线的截面面积不得小于原设计截面面积；

**2** 同一品种不同强度级别或不同品种的钢绞线代换后，钢绞线的受拉承载力不得小于原设计承载力；

**3** 钢绞线代换后，总张拉力或总有效预应力不得小于原设计的要求；

**4** 钢绞线代换后，构件中的钢绞线布置应满足设计规范和构造要求；代换后的锚固体系有变动时，应重新验算锚固区的局部受压承载力。

**4. 1. 4** 钢绞线进场时，每一合同批应附有质量证明书，每盘应挂有标牌。在质量证明书中应注明预应力筋品种、强度级别、规格、重量和件数、执行标准号和检验结果。

**4. 1. 5** 钢绞线进场验收应符合下列规定：

**1** 钢绞线的外观质量应逐盘检查，钢绞线表面不得有油污、锈斑或机械损伤，允许有轻微浮锈；钢绞线的捻距应均匀，切断后不松散；

**2** 钢绞线的力学性能应按批抽样检验，每一检验批重量不应大于60t；从同一批中任取3盘，在每盘中任意一端截取1根试件进行拉伸试验；当有一项试验结果不符合现行国家标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224的规定时，则该盘钢绞线为不合格品；再从同一批未经试验的钢绞线盘中取双倍数量的试件重做试验，如仍有一项试验结果不合格，则该批钢绞线判为不合格品，也可逐盘检验取用合格品；在钢绞线的拉伸试验中，同时测定弹性模量，但不作为交货条件。

**4. 1. 6** 无粘结预应力钢绞线进场验收应符合下列规定：

**1** 钢绞线的力学性能必须按本规程第4.1.5条的要求进行复检；

**2**  无粘结预应力钢绞线的外观质量应逐盘检查，润滑脂用量和护套厚度应按批抽样检验，每批重量不大于60t，每批任取3盘，每盘各取1根试件。检验结果应符合现行行业标准《无粘结预应力钢绞线》JG 161的规定。

当厂家提供近期的型式检验报告，并经观察认为涂包质量有保证时，可不作油脂用量和护套厚度的抽样复验。

**4. 1. 7**  缓粘结预应力钢绞线进场验收应符合下列规定：

**1** 钢绞线的力学性能必须按本规程第4.1.5条的要求进行复检；

**2** 缓粘结预应力钢绞线的外观质量应逐盘检查，缓粘结剂固化时间应按批抽样检验，每批重量不大于60t，每批任取3盘，每盘各取1根试件。检验结果应符合现行行业标准《缓粘结预应力钢绞线》JG/T 369的规定。

**4. 1. 8** 涂层钢绞线进场验收应符合下列规定：

**1** 钢绞线的力学性能必须按本规程第4.1.5条的要求进行复检；

**2** 环氧涂层钢绞线规格和涂层性能应符合《环氧涂层七丝预应力钢绞线》GB/T 21073或《单丝涂覆环氧涂层预应力钢绞线》GB/T 25823的规定；

**3** 镀锌钢绞线规格和涂层性能应符合《预应力热镀锌钢绞线》GB/T 33363的规定。

## 4. 2 锚具

**4. 2. 1**  锚具应根据预应力筋品种、锚固要求和张拉工艺等选用。张拉端锚具宜采用夹片式单孔锚或夹片式群锚，固定端宜采用挤压锚具。既有筒仓体外预应力加固宜采用游动锚具。

**4. 2. 2** 夹片锚具不宜预埋在混凝土中作为固定端；既有筒仓体外预应力加固工程中承受低应力或动荷载的夹片锚具应安装防松装置。

**4. 2. 3** 预应力筋用锚具的性能应符合现行国家标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/ T 14370的规定。

锚具的规格和尺寸可按附录B选用。

**4. 2. 4** 张拉端锚具应满足分级张拉、补张拉和放松拉力等张拉工艺的要求。

**4. 2. 5** 锚具进场时，每一批应附有产品质量证明书，锚具进场验收应符合下列规定：

**1** 外观检查：从每批中抽取10%且不应少于10套锚具，检查外观质量和外形尺寸；锚具表面应无污物、锈蚀、机械损伤和裂纹。当有一套表面有裂纹时，应逐套检查；

**2** 硬度检验：对硬度有严格要求的锚具零件，应进行硬度检验。对常用锚具每批中抽取2％且不少于3套，对新型锚具应从每批中抽取5％且不少于5套。当有一个零件硬度不合格时，应另取双倍数量的零件重做试验，如仍有一个零件不合格，则应对该批零件逐个检验；

**3** 静载锚固性能试验：应从同一批中抽取6套锚具，与符合试验要求的预应力筋组装成3束预应力筋-锚具组装件，每束组装件试验结果必须符合本规程第4.2.3条的规定。当有一束组装件不符合要求时，应取双倍数量的锚具重做试验，如仍有一束组装件不符合要求，则该批锚具判为不合格品。静载锚固性能试验不应超过2000套为一个检验批，如果厂家提供的单孔锚具和群锚的夹片是通用产品，可采用单孔锚的静载试验考核夹片质量。当锚具用量小于1000套的工程，如供货方提供有效的试验报告，可不做静载锚固性能试验。

## 4. 3 成孔材料

**4. 3. 1** 有粘结预应力成孔用管材宜采用镀锌金属波纹管和塑料波纹管。金属波纹管和塑料波纹管的规格可按附录C选用。

**4. 3. 2** 金属波纹管和塑料波纹管的规格和性能应符合现行行业标准《预应力混凝土金属波纹管》JG/T 3013和《预应力混凝土桥梁用塑料波纹管》JT/ T 529的规定。

**4. 3. 3** 波纹管进场时每一合同批应附有质量证明书，进场验收应符合下列规定：

**1** 波纹管的内径、波高和壁厚等尺寸偏差不应超过允许值；

**2** 金属波纹管的内外表面应清洁、无油污、无锈蚀、无孔洞、无不规则的褶皱，咬口不应有开裂或脱扣；

**3** 塑料波纹管的外观应光滑、色泽均匀，内外壁不允许有隔体破裂、气泡、裂口、硬块和影响使用的划伤。

## 4. 4 孔道灌浆材料

**4. 4. 1** 孔道灌浆材料可采用水泥净浆或专用预应力孔道灌浆料。

**4. 4. 2** 孔道灌浆用水泥宜采用普通硅酸盐水泥，其质量应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB 175的规定。

**4. 4. 3** 孔道灌浆料的质量及应用技术应符合相关现行国家或行业标准。

**4. 4. 4** 孔道灌浆用水泥和孔道灌浆料进场时应附有质量证明书，并做进场复验。

## 4. 5 封锚材料

**4. 5. 1** 封锚材料可采用混凝土或细石混凝土，宜掺入适量的膨胀剂，其性能应满足相关国家标准的规定。

**4. 5. 2** 封锚混凝土的强度等级不得低于原结构混凝土强度等级。

# 5 施工设备及机具

## 5. 1 下料机具

**5. 1. 1** 钢绞线的切断应采用砂轮切割机，不得采用电焊、氧-乙炔气等切割。

**5. 1. 2** 钢绞线固定端的挤压锚具应采用专用的挤压机，挤压模和挤压机应配套使用。

**5. 1. 3** 钢绞线放盘宜采用专用放线盘，有粘结钢绞线放线盘出口宜设置锥形防护罩。

## 5. 2 安装机具

**5. 2. 1** 钢绞线或波纹管的支架钢筋应采用钢筋切断机切断，采用钢筋弯曲机制作成形。

**5. 2. 2** 钢绞线或波纹管支架钢筋及锚垫板、螺旋筋固定宜采用交流电焊机。

**5. 2. 3**  钢绞线穿束宜采用钢绞线穿束机或卷扬机。

## 5. 3 张拉与灌浆机具

**5. 3. 1** 张拉设备由穿心式千斤顶、电动油泵及配套的油管、压力表、限位板、工具锚组成。所选用的张拉设备应能满足重复张拉、持荷的性能。

**5. 3. 2** 单根钢绞线张拉时应采用前卡式千斤顶，整束钢绞线张拉时宜采用相应吨位的穿心式千斤顶。

**5. 3. 3** 电动油泵的额定油压不应小于千斤顶的额定油压。压力表的精度不应低于1.6级，量程不宜小于千斤顶额定油压的1.2倍。

**5. 3. 4** 压力表与千斤顶应配套标定，标定时，千斤顶的活塞运行方向应与实际张拉工作状态一致。标定期限不应超过半年。当发生以下情况时，应重新标定：

**1** 千斤顶更换油封；

**2** 压力表碰撞损坏或失灵；

**3** 更换压力表；

**4** 张拉伸长值异常或钢绞线拉断。

**5. 3. 5** 孔道灌浆设备由搅拌机、压浆机、配套组件及检测仪器组成，真空辅助灌浆应配备真空泵，真空泵应能达到0.1MPa的负压力。

**5. 3. 6** 搅拌机宜选用高速灰浆搅拌机，储料桶应具有缓慢搅拌的功能。

**5. 3. 7** 压浆机可选用柱塞式、挤压式、螺杆式等不同工作原理的压力灌浆设备。压浆机的工作压力不宜小于1.0 MPa，扬程不小于灌浆高度要求。

**5. 3. 8** 采用电动吊篮作为张拉平台时，电动吊篮的额定载重量应满足张拉施工荷载要求，其篮筐的长度应超过扶壁柱宽度2m以上。

# 6 构造要求

## 6. 1 预应力筋（孔道）布置

**6. 1. 1** 预应力孔道的内径宜比钢绞线束的外径大6~15mm，孔道截面面积宜取钢绞线束净面积的3.0~4.0倍，当钢绞线后穿束时宜取大值。

**6. 1. 2** 预应力孔道（束）应置于仓壁外侧竖向钢筋的内侧，孔道的净间距和保护层应符合下列规定：

**1**  水平方向的净间距不宜小于孔道（束）外径的1. 5倍；

**2** 竖直方向的净间距不宜小于孔道（束）外径的3倍和150mm的大者；

**3**  从孔道（束）外侧算起的混凝土保护层厚度不应小于50mm。

**6. 1. 3** 成束的各根无粘结预应力筋宜全长平行排布，应全长绑扎成束，无分散。

**6. 1. 4** 当仓壁上有门洞或检修孔时，被孔洞阻断的预应力筋可绕过洞口铺设。预应力筋（孔道）至洞口的距离不宜小于 150mm，水平偏移的曲率半径不宜小于6.5m，洞口四周应配置构造钢筋加强。

**6. 1. 5** 预应力束或孔道的支架间距不宜大于1.2m，支架应能限制预应力束或孔道在浇筑混凝土时移位。

## 6. 2 锚固节点布置

**6. 2. 1**  张拉端锚具的最小间距应满足配套的锚垫板尺寸和张拉用千斤顶的安装要求。锚垫板边缘至构件边缘的距离不应小于50mm。锚固区的锚垫板尺寸、混凝土强度、截面尺寸和间接钢筋配置等必须满足局部受压承载力要求。

**6. 2. 2** 内埋式固定端的位置应位于不需要预压应力的截面外，且不宜小于100mm。对多束预应力筋的内埋式固定端，宜采取错开布置方式，错开的距离不宜小于300mm，且距构件边缘不应小于 40mm。

**6. 2. 3** 无粘结预应力筋张拉端宜单根锚固，并采用钢板作为锚垫板。当采用群锚配套铸铁锚垫板时，应保证锚垫板内混凝土的密实度。

**6. 2. 4**  扶壁柱宜设置在仓壁外侧，扶壁柱的宽度应满足锚固区布置要求，扶壁柱的长度应按计算确定。

## 6. 3 耐久性及其它构造

**6. 3. 1** 无粘结预应力筋和锚具的防护应符合结构耐久性要求。对于不同环境类别条件下的防腐要求，可参照《混凝土结构设计规范》GB 50010第10.3.13条执行。

**6. 3. 2**  灌浆孔宜设置在孔道端部的锚垫板上，灌浆孔直径不宜小于 20mm。较长孔道的中部宜泌水（排气）孔，间距宜根据试验或工程经验确定。

绕过仓壁洞口处的曲线孔道高差大于0. 5m时，宜在孔道波峰处设置泌水管或在波底处设置灌浆管。

**6. 3. 3** 筒仓预应力筋的张拉宜在底板、廊道等水平构件施工前进行，或采取构造措施避免水平构件对仓壁的约束。

# 7 施工计算

## 7. 1 下料长度

**7. 1. 1** 仓壁内的预应力筋的下料长度*L*可按下列公式计算：

**1** 两端张拉：

 （7. 1. 1-1）

**2** 一端张拉：

 （7. 1. 1-2）

式中： *l* ——锚垫板-锚垫板之间的长度；

*l*1——锚具厚度（mm）；

*l*2——千斤顶长度（含工具锚）。

## 7. 2 张拉力

**7. 2. 1** 预应力筋的张拉力*P*j应按下列公式计算：

（7. 2. 1）

式中： *σ*con——张拉控制应力（N/mm2）；

*A*p——预应力筋的截面面积（mm2）。

当预应力筋需超张拉时，张拉控制应力不应大于0.8*f*ptk。锚具下口建立的最大预应力值不宜大于0.7*f*ptk。

**7. 2. 2** 预应力筋中建立的有效预应力值*σ*pe，可按下列公式计算：

 （7. 2. 2）

式中： *σl*——各项预应力损失之和。

## 7. 3 预应力损失

**7. 3. 1** 预应力筋与孔道壁之间的摩擦引起的预应力损失*σl*2，宜按下列公式计算：

 （7. 3. 1-1）

当(*κx*+*μθ*)≤0.2时，*σl*2可按下列近似公式计算：

（7. 3. 1-2）

式中： *κ*——考虑孔道每米长度局部偏差的摩擦系数，可按表7. 3. 1选用；

*x*——张拉端至计算截面的孔道长度（m）；

*μ*——预应力筋与孔道壁之间的摩擦系数，可按表7. 3. 1选用；

*θ*——张拉端至计算截面曲线孔道部分切线的夹角的夹角之和（rad）。



1——张拉端 2——计算截面

**图7. 3. 1 孔道摩擦损失计算**

对直线段与曲线段组成的孔道，应分段计算孔道摩擦损失。

对按抛物线、圆弧线变化的空间曲线束，孔道长度取空间曲线弧长，夹角之和可按下式计算：

 （7. 3. 1-3）

式中： *α*v、*α*h——按抛物线、圆弧线变化的空间曲线预应力筋在竖直、水平投影所形成

抛物线、圆弧线的弯转角。

**表7. 3. 1 预应力钢绞线的摩擦系数**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 孔道成型方式 | *κ* | *μ* |
| 预埋金属波纹管 | 0.0015 | 0.25 |
| 预埋塑料波纹管 | 0.0015 | 0.15 |
| 无粘结预应力钢绞线 | 0.0040 | 0.09 |
| 缓粘结预应力钢绞线 | 0.0060 | 0.12 |

注：**1** 采用多孔夹片锚具和变角张拉装置时，尚应考虑锚口处的附加摩擦损失，其值可根据厂家参数或实测数据确

定。

**2** 对重要的预应力工程，应在现场测定实际的孔道摩擦损失。

根据张拉端拉力*P*j与实测固定端拉力*P*a产可按下列公式分别算出实测的*μ*值和跨中拉力*P*m：

 （7. 3. 1-3）

 (7. 3. 1-4)

当实测孔道摩擦损失值偏大时，可采取超张拉措施。

**7. 3. 2**  张拉端锚固时预应力筋内缩引起的预应力损失值*l*1，可按预应力筋线形分别计算。

**1** 直线预应力筋的锚固损失，可按下式计算：

 (7. 3. 2-1)

式中： *a——*张拉端锚固时预应力筋的内缩值，可按表7. 3. 2取用。当采用游动锚具时，

按表内数值的1/2取值；

*l——*张拉端至固定端距离；

*E*p*——*预应力筋的弹性模量。

**表7. 3. 2 张拉端预应力筋的内缩值a（mm）**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 夹片式锚具  （φs15.2mm） | 有顶压时 | 5 |
| 无顶压时 | 6~8 |

**2** 扶壁柱端部为直线与圆弧曲线相切的预应力筋（图7. 3. 2-1）的锚固损失，可按下式计算：



1——张拉端 2——计算截面



**图7. 3. 2-1 直线与圆弧曲线相切预应力筋的预应力损失*σ*l1**

当*x* ≤ *l*1 时：

 （7. 3. 2-2）

当*l*1<*x* ≤ *l*f 时：

 （7. 3. 2-3）

反向摩擦影响长度*l*f（m）可按下列公式计算：

 （7. 3. 2-4）

 （7. 3. 2-5）

 （7. 3. 2-6）

式中： *r*——圆弧形曲线预应力筋的曲率半径（m）；

*l*1*——*张拉端起点切点的直线段水平投影长度（m）。

**3** 对无壁柱游动锚具预应力筋布置：

 （7. 3. 2-7）

反向摩擦影响长度*l*f （m）可按下列公式计算：

 （7. 3. 2-8）



1——张拉端 2——计算截面



**图7.3.2-2 游动锚具预应力筋的预应力损失*σ*l1**

**7. 3. 3** 钢绞线的应力松弛引起的预应力损失*σl*4，按下列规定计算：

当*σ*con ≤ 0.5*f*ptk时，取*σ*l4 = 0；

当*σ*con ≤ 0.7*f*ptk时，

 （7. 3. 3-1）

当0.7*f*ptk < *σ*con ≤ 0.8*f*ptk时，

 （7. 3. 3-2）

**7. 3. 4**  由于混凝土收缩和徐变引起的混凝土筒仓预应力筋应力损失值*σl*5，按下式计算：

 （7. 3. 4-1）

式中： *σ*pc——受拉区预应力筋合力点处的混凝土法向应力；

*f'*cu ——张拉时的混凝土立方体抗压强度；

*ρ* ——仓壁截面预应力筋和非预应力钢筋的总配筋率：*ρ* =(*A*p+*A*s)/*A*n。

受拉区预应力筋合力点处的混凝土法向应力*σ*pc计算时，预应力损失值仅考虑混凝土预压前的锚固损失*σ*l1和孔道摩擦损失*σ*l2，非预应力钢筋中的应力*σ*l5值应取为零；*σ*pc值不得大于0.5*f'*cu。

由于混凝土收缩和徐变引起的预应力损失还应符合以下规定：

**1** 当结构处于年平均相对湿度低于40%的环境下，*σl*5值应增加30%；

**2** 当采用泵送混凝土时，宜根据实际情况考虑混凝土收缩、徐变引起预应力损失值的增大；

**3** 当需要考虑与时间相关的混凝土收缩、徐变及钢筋应力松驰预应力损失值时，可按混凝土结构设计规范GB50010附录E进行计算。

## 7. 4 锚固区局部承压

**7. 4. 1** 预应力锚固区的局部受压承载力可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的有关规定验算。

**7. 4. 2** 采用铸铁锚垫板的张拉端布置及张拉时混凝土的强度应满足厂家产品手册参数要求。

## 7. 5 张拉伸长值

**7. 5. 1** 预应力筋的张拉伸长值Δ*L*cP，可按下列公式计算：

 （7. 5. 1-1）

 （7. 5. 1-2）

式中： *P*m——预应力筋的平均张拉力，取张拉端拉力*P*j与计算截面扣除孔道摩擦损失后

的拉力平均值，按公式（7. 5. 1-2）计算；

*L*p——预应力筋的实际长度；

*A*p——预应力筋的截面面积；

*E*p——预应力筋的弹性模量。

**7. 5. 2** 对多曲线段或直线段与曲线段组成的曲线预应力筋，张拉伸长值应分段计算后叠加：

 （7. 5. 2）

式中： *l*i——第*i*段预应力筋长度；

*σ*i1、*σ*i2——分别为第*i*段两端预应力筋的应力。

**7. 5. 3** 预应力筋的张拉伸长值，应在建立初拉力后进行测量。实际伸长值Δ*L*oP可按下列公式计算

（7. 5. 3）

式中： Δ*L*oP1——从初拉力至最大张拉力之间的实测伸长值；

Δ*L*oP2——初拉力以下的推算伸长值可用图解法或计算法确定；

*a*——千斤顶体内的预应力筋张拉伸长值；

*b*——张拉过程中工具锚和固定端工作锚楔紧引起的预应力筋内缩值。

c——张拉阶段构件的弹性压缩值。

## 7. 6 分批张拉验算

**7. 6. 1** 当仓壁内的单束预应力筋根数较多且仓壁厚度较小时，预应力筋张拉前应进行分批张拉验算。

**7. 6. 2** 当仓壁内表面混凝土轴向拉应力大于混凝土轴心抗拉强度标准值时，预应力束应分批张拉。

**7. 6. 3** 单束预应力筋张拉时，仓壁内表面混凝土轴向拉应力*σ*inner可按下式估算：

（7. 6. 3）

式中： *σ*inner——仓壁内表面混凝土轴向拉应力（10-3N/mm2）；

*N*p——单束预应力筋总张拉力（kN）；

*r*——筒仓半径（m）；

*h*——仓壁厚度（m）。

# 8 制作及安装

## 8. 1 下料及制作

**8. 1. 1** 预应力筋应在平坦洁净的场地上采用砂轮切割机下料。

**8. 1. 2**  预应力筋固定端挤压锚具制作时，在挤压模内腔及挤压套外表面涂润滑油，挤压力应符合产品说明书的规定。

**8. 1. 3**  无粘结预应力筋的吊装应采用柔性吊装带，不得采用钢丝绳。

## 8. 2 预应力筋孔道留设

**8. 2. 1** 金属波纹管或塑料波纹管安装前，应在仓壁竖筋上标出预应力筋的标高位置，并点焊钢筋支架。支架间距：对金属波纹管宜为1.0~1.2m，对塑料波纹管宜为0.8~1.0m。波纹管安装后，应与钢筋支架可靠固定。

**8. 2. 2** 波纹管接长时，可采用大一号波纹管作为接头管。接头管的长度宜取管径的3~4倍，且不应小于300mm。接头管的两端应采用粘胶带密封。

**8. 2. 3** 灌浆管或泌水管与波纹管连接时，应在波纹管上开洞，覆盖海绵垫和塑料弧形压板并与波纹管扎牢，再用增强塑料管插在弧形压板的接口上，且伸出仓壁外表面不宜小于500mm。

**8. 2. 4**  混凝土浇筑时，应采取通孔、抽动预应力筋等措施防止预应力筋孔道漏浆堵塞。

## 8. 3 锚垫板安装

**8. 3. 1** 锚垫板宜在穿束或孔道铺设前完成，安装位置应符合设计或厂家产品手册参数要求。

**8. 3. 2** 锚垫板应采用辅助钢筋与仓壁竖筋可靠连接，螺旋筋应紧贴锚垫板并对中固定。扶壁柱的箍筋可适当调整间距避让锚垫板安装位置。

**8. 3. 3** 有粘结张拉端锚垫板末端与波纹管连接处应采用防水胶带密封。锚垫板的喇叭口、灌浆孔应在浇筑混凝土前采用发泡剂或其它材料填充。

**8. 3. 4**  有粘结张拉端采用凹入式时，应采用有底穴模并与锚垫板面紧贴安装。当先穿钢绞线时，应在穴模底面开孔。

## 8. 4 钢绞线穿束

**8. 4. 1** 钢绞线的穿束方法应根据结构特点、施工条件和工期要求等选择在浇筑混凝土前或浇筑混凝土后穿入孔道。

**8. 4. 2** 钢绞线可采用人力、穿束机单根穿束。对超长束、特重束宜采用卷扬机整束牵引，钢绞线束的前端应装有专用牵引头或穿束网套。

**8. 4. 3** 预应力筋从张拉端穿出的长度应满足张拉设备的操作要求。

**8. 4. 4** 混凝土浇筑前穿入孔道的钢绞线，应采取防止锈蚀措施。

**8. 4. 5**  无粘结预应力筋铺设应符合下列规定：

**1** 无粘结预应力筋铺设前，对护套轻微破损处应采用防水聚乙烯胶带进行修补。每圈胶带搭接宽度不应小于胶带宽度的1/2，缠绕层数不应少于2层，缠绕长度应超过破损长度30 mm。严重破损的无粘结预应力筋不得使用。

**2** 无粘结预应力筋张拉端的锚垫板可固定在端部模板上，或利用短钢筋与四周钢筋焊牢。锚垫板面应垂直于预应力筋中心线。

当张拉端采用凹入式做法时，可采用木穴模或钢穴模。

**3** 无粘结预应力筋固定端的锚垫板应事先组装好，按设计要求的位置可靠固定。

**4** 对扶壁柱交叉部分的两束无粘结预应力筋应上下交错通过，不得分散穿插。

## 8. 5 质量验收

**8. 5. 1** 预应力筋的制作质量应符合下列规定：

**1** 预应力筋的下料长度应满足张拉要求；

**2** 固定端挤压锚具成型后钢绞线外端应露出挤压头不应小于1 mm。

**8. 5. 2** 预应力筋的安装质量应符合下列要求：

**1** 钢绞线的品种、级别、规格与数量必须符合设计；

**2** 施工过程中应避免电火花损伤钢绞线；受损伤的钢绞线应予更换；

**3** 预应力孔道的规格、数量、位置，灌浆孔、排气兼泌水管等应符合设计和施工要求；

**4** 锚固区埋件和加强筋应符合施工详图的要求；

**5** 预应力筋束形（孔道）控制点的竖向位置偏差应符合表8.5.2的规定，并做出检查记录；

**表8. 5. 2 预应力筋束形（孔道）控制点位置允许偏差（mm）**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 束形（孔道）部位 | 径向 | 竖向 |
| 允许偏差 | ±10 | ±30 |

**注：束形控制点的竖向位置偏差合格点率应达到90％，且不得有超过表中数值1.5 倍的尺寸偏差。**

**6**  预应力孔道或无粘结预应力筋应铺设顺直，端部锚垫板应垂直于孔道中心线；

**7** 预应力孔道或无粘结预应力筋的定位应牢固，孔道接头应密封良好；

**8** 内埋式固定端的锚垫板不应重叠，锚具与锚垫板应贴紧；

**9** 波纹管或无粘结预应力筋护套应完好，局部破损处应采用防水胶带修补。

# 9 张拉

## 9. 1 张拉方案

**9. 1. 1** 张拉前的准备应符合以下要求：

**1** 预应力筋张拉设备和仪表应满足预应力筋张拉的要求，且应定期维护和标定；

**2** 预应力筋张拉时，混凝土强度应符合设计要求；当设计无具体要求时，不应低于设计混凝土强度等级的100%且混凝土龄期不宜小于12天；

**3** 锚具安装前，检查锚垫板后的混凝土密实性，同时将锚垫板端面混凝土残渣和喇叭管内的填充物清理干净；

**4** 锚具安装时锚板应与锚垫板限位槽口对中，夹片应敲紧且缝隙均匀；

**5** 预应力筋张拉前，应计算所需张拉力、压力表读数、理论伸长值，并确定张拉顺序和方法。

## 9. 2 张拉顺序

**9. 2. 1** 筒仓预应力张拉宜按照自下而上或自上而下的顺序隔圈张拉，同一圈的各段预应力束应同步张拉。

**9. 2. 2** 同一环内分段搭接布置的各段预应力筋应同时张拉。

**9. 2. 3** 洞口及其它局部加强束的张拉应遵循对称原则，在洞口部位断开锚固的预应力筋应隔束张拉。

## 9. 3 张拉

**9. 3. 1** 筒仓预应力筋应两端张拉，局部加强短束可一端张拉。采用两端张拉时，宜两端同时张拉，也可一端先张拉，在另一端补张拉。

**9. 3. 2** 有粘结预应力筋应采用相应吨位的千斤顶整束张拉。对整束布置的无粘结预应力筋，可采用小型千斤顶逐根张拉。

**9. 3. 3** 预应力筋的张拉步骤：从零加载至初拉力，测量伸长值初读数，再以均匀速度加载至终拉力。

初拉力宜取终拉力的10%~20%，预应力筋张拉至终拉力时，测量伸长值终读数。

对整束布置单根张拉的无粘结预应力筋，实际伸长值可取单根张拉伸长值的平均值。

**9. 3. 4** 采用应力控制方法张拉时，应校核预应力筋张拉伸长值。实际伸长值与计算伸长值的偏差不应超过± 6％。如超过允许偏差，应查明原因并采取措施后方可继续张拉。

**9. 3. 5** 单束钢绞线根数较多时，应根据单环预应力筋张拉时仓壁内侧竖向拉应力验算结果，采取分阶段张拉的方法。

**9. 3. 6**  预应力筋张拉过程中，应对张拉力、压力表读数、张拉伸长值、异常现象等做出详细记录。

## 9. 4 质量验收

**9. 4. 1** 预应力筋张拉质量应符合下列规定：

**1** 预应力筋张拉时，仓壁混凝土强度应符合设计要求；

**2** 预应力筋的张拉力、张拉顺序和张拉工艺应符合设计及施工技术方案的要求；

**3**  预应力筋张拉伸长实测值与计算值的偏差不应超过 ± 6％，其合格点率应达到95%，且最大偏差不应超过± 10％；

**4**  预应力筋张拉锚固后实际建立的预应力值与设计规定检验值的相对偏差不应超过± 5％；

**5** 预应力筋张拉过程中应避免断裂或滑脱。如发生断裂或滑脱，其数量严禁超过同一截面上预应力筋总根数的3％，且每束钢绞线不超过1根；

**6** 锚固阶段张拉端钢绞线的内缩值，应符合设计要求和本规程表7. 3. 2的规定；

**7** 钢绞线锚固后，夹片顶面应平齐，其错位不宜大于2mm，且不应大于4mm；

**8**  筒仓预应力筋张拉后，应检查扶壁柱附近及仓壁内侧有无开裂、崩裂现象。如出现有害裂缝或损伤，应会同设计单位处理。

# 10 灌浆及封锚

## 10. 1 孔道灌浆准备

**10. 1. 1** 孔道灌浆前的准备应符合以下要求：

**1** 筒仓预应力筋张拉完毕并经检查合格后，应尽早灌浆；

**2** 灌浆前应全面检查预应力孔道、灌浆孔、排气孔、泌水管等是否畅通。对预埋管成型的孔道不得用水冲洗孔道，必要时可采用压缩空气清孔；

**3** 灌浆设备的配备必须确保连续工作条件，根据灌浆高度、孔道长度、形态等条件选用合适的灌浆泵。灌浆泵应配备计量校验合格的压力表。灌浆前应检查配套设备、输浆管和阀门的可靠性。在锚垫板上灌浆孔处宜安装单向阀门。注入泵体的水泥浆应经筛滤，滤网孔径不宜大于2mm。与输浆管连接的出浆孔孔径不宜小于10mm；

**4** 灌浆前，对锚具夹片空隙和其他可能漏浆处需采用高标号水泥浆封堵，待封堵料达到一定强度后方可灌浆。

**10. 1. 2** 孔道灌浆用水泥浆性能应符合下列规定：

**1** 水泥浆应采用普通硅酸盐水泥或硅酸盐水泥和水拌制，水胶比不宜大于0.40，拌制后3h自由泌水率宜为0％，且不应大于1％，泌水应在24h内全部被水泥浆吸收；

**2** 水泥浆中氯离子含量不应超过水泥重量的0.06%；

**3** 水泥浆中宜掺入改善浆体性能的外加剂，掺外加剂后，水泥浆的水胶比应相应降低；

**4** 水泥浆的可灌性以流动度控制：采用流淌法测定时应为130~180mm，采用流锥法测定时应为12~18s；

**5** 水泥浆应采用机械拌制，确保灌浆材料搅拌均匀。

**10. 1. 3** 浆体搅拌的操作顺序为：首先加入80%~90%的水，开动搅拌机，加入全部外加剂或灌浆剂，再加入全部的水泥，搅拌2min后加入剩余的水，继续搅拌2min。

## 10. 2 灌浆

**10. 2. 1** 灌浆前，搅拌均匀后应检测浆体的流动度，灌入前保持低速搅拌。任何情况下，不得额外加水以提高浆体的流动性。

**10. 2. 2** 灌浆顺序宜先灌下层孔道，后灌上层孔道。灌浆应缓慢连续进行，不得中断，并应保持排气通畅。浆体自拌制完成至灌入孔道的延续时间不宜超过40min。当发生孔道阻塞、串孔或中断灌浆时，应及时冲洗孔道或采取其他措施后重新灌浆。

据情况采取相应的措施。

**10. 2. 3** 水平孔道的灌浆的最大压力不宜超过0.6 MPa，竖向孔道不宜超过0.4MPa，超长孔道不应超过1.0 MPa。孔道的出浆口排出与进浆口浓度相同浆体时，关闭出浆口阀门，再继续加压至0. 5~0.7MPa，稳压1~2min后封闭灌浆孔。

**10. 2. 4** 当孔道直径较大或检查发现灌浆不饱满时，可采用下列措施：

**1** 二次压浆法：二次压浆的间隔时间可为30~45min；

**2** 重力补浆法：在孔道最高点或锚垫板处400mm以上，连续不断补浆，直至浆体不下沉为止。

**10. 2. 5** 竖向的孔道灌浆应自下而上进行，并应设置阀门，阻止水泥浆回流。为确保其灌浆密实性，应在孔道的顶端持续进行重力补浆，直至浆体液面稳定。

**10. 2. 6** 对超高的竖向预应力孔道，宜采用多台灌浆泵接力灌浆，从前置灌浆孔灌浆直至后置灌浆孔冒浆，后置灌浆孔方可续灌。

**10. 2. 7** 当室外温度低于5 ℃时，孔道灌浆应采取抗冻保温措施。当室外温度高于35 ℃时，宜在夜间进行灌浆。水泥浆灌入前的温度不应超过30 ℃。

**10. 2. 8** 孔道灌浆应填写施工记录，标明灌浆日期、水泥品种、强度等级、配合比、灌浆压力和灌浆情况。

**10. 2. 9**  真空辅助灌浆应符合以下规定：

**1** 真空辅助灌浆除采用传统的灌浆设备外，还需配备真空泵及其配件等；

**2**  真空辅助灌浆的孔道应具有良好的密封性；

**3** 孔道灌浆时，在灌浆端先将灌浆阀、排气阀全部关闭。在排浆端启动真空泵，使孔道真空度达到-0.08~-0.1MPa并保持稳定，然后启动灌浆泵开始灌浆。在灌浆过程中，真空泵应保持连续工作，待抽真空端有浆体经过时关闭通向真空泵的阀门，同时打开位于排浆端上方的排浆阀门，排出少许浆体后关闭。

## 10. 3 锚具保护

**10. 3. 1** 钢绞线锚固后的外露部分宜采用机械方法切割。钢绞线的外露长度不宜小于其直径的1.5倍，且不宜小于30mm。

**10. 3. 2** 锚具封闭前应将周围混凝土冲洗干净、凿毛，对凸出式锚头应配置钢筋网片。

**10. 3. 3** 锚具封闭保护宜采用与构件同强度等级的细石混凝土，也可采用微膨胀混凝土。

**10. 3. 4** 无粘结预应力筋锚具封闭前，无粘结筋端头和锚具夹片应涂防腐蚀油脂，并套上塑料帽，也可涂刷环氧树脂。

**10. 3. 5** 对处于二类、三类环境条件下的无粘结预应力筋与锚具部件的连接以及其他部件之间的连接，应采用密封装置或采取连续封闭措施。

## 10. 4 质量验收

**10. 4. 1**  孔道灌浆的质量应符合下列要求：

**1** 孔道内的水泥浆应饱满、密实，当有疑问时，可采用无损探测或钻孔检查；

**2** 施工中水泥浆的配合比不得任意更改，其水灰比和泌水率应符合本规程第10.1 .2条的规定；

**3** 孔道灌浆工艺应符合第10.2条的规定；

**4** 水泥浆试块采用边长为70.7mm的立方体试模制作，标准养护28d的试块抗压强度不应小于30MPa。

**10. 4. 2** 当灌浆试块抗压强度不满足上述要求，经原设计单位核算确认能够满足结构安全性能，可予以验收。

**10. 4. 3** 锚具封闭保护措施应符合设计要求。当设计无具体要求时，应符合下列规定：

**1** 无粘结预应力筋端头和锚具夹片应达到密封要求，对处于二类、三类环境条件下的无粘结预应力筋及其锚固系统应达到全封闭保护状态；

**2**  封锚混凝土应密实、无裂纹，混凝土强度符合设计要求；

**3** 外露的锚具及预应力筋保护层厚度不应小于：一类环境时20mm，二a、二b类环境时50mm，三a、三b类环境时80mm。

# 11 混凝土筒仓预应力加固

## 11. 1 一般规定

**11. 1. 1** 既有混凝土筒仓加固前，应进行安全性鉴定，并依据鉴定结果以及《既有建筑鉴定与加固通用规范》GB 55021进行加固设计。

**11. 1. 2** 采用体外预应力技术进行加固的混凝土筒仓原仓壁混凝土强度不宜低于C30。采用扩大截面并配置预应力筋进行加固时，原仓壁混凝土强度不宜低于C25。

**11. 1. 3** 体外预应力筋宜分段搭接布置，接头位置应错开。预应力张拉应在仓壁裂缝、混凝土缺陷修复完成后进行。

**11. 1. 4** 体外预应力筋的张拉控制应力值*σ*con不宜超过0.65*f*ptk，且不应小于0.4*f*ptk；当要求部分抵消由于应力松弛、摩擦、钢筋分批张拉等因素产生的预应力损失时，张拉控制应力限值可提高0.05*f*ptk。

**11. 1. 5** 筒仓结构加固的体外预应力筋宜采用无粘结环氧涂层钢绞线或其它涂层钢绞线。

## 11. 2 施工措施

**11. 2. 1** 筒仓结构加固体外预应力筋单根布置时宜采用单孔夹片锚具；2根平行集中布置时宜采用游动锚具；3~5根平行集中布置时宜采用扁锚。预应力筋的布置间距应依据计算确定，且不应小于锚具布置的空间要求。

**11. 2. 2** 预应力筋锚固区应设置在仓壁外侧，锚固块应与仓壁混凝土可靠连接，张拉应在锚固块两侧对称进行。

**11. 2. 3**  游动锚具的各根预应力筋应同步张拉，锚固区应沿仓壁环向错开布置。

**11. 2. 4** 连体筒仓采用体外预应力加固时，穿过连接部位的预应力孔道应避开原有钢筋，当无法避免时应会同设计单位采取措施进行补强。

**11. 2. 5** 体外预应力筋张拉后宜在其外侧粉刷抗裂砂浆或喷涂防火涂料等保护措施。锚固区的封闭应按照本规程10. 4. 2条的规定进行封闭。

# 附录A 常用钢绞线力学性能表

**表A.1 常用钢绞线常规力学性能表**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 钢绞线结构 | 钢绞线  公称直径  *D*n/mm | 公称抗拉  强度  *R*m/MPa | 整根钢绞  线最大力  *F*m/kN  ≥ | 整根钢绞线最大力的最大值  *F*m,max/kN  ≤ | 0.2%屈服  力*F*p0.2/kN  ≥ | 最大力  总伸长率  (*L*0≥500 mm)  *A*gt/%  ≥ | 应力松弛性能 | |
| 初始负荷相当于实际最大力的百分数/% | 1000h应力松弛率  *r*/%  ≤ |
| 1×7 | 15.20  (15.24) | 1470 | 206 | 234 | 181 | 对所有规格 | 对所有规格 | 对所有规格 |
| 1570 | 220 | 248 | 194 | 3.5 | 70  80 | 2.5  4.5 |
| 1670 | 234 | 262 | 206 |
| 9.50  (9.53) | 1720 | 94.3 | 105 | 83.0 |
| 11.10  (11.11) | 128 | 142 | 113 |
| 12.70 | 170 | 190 | 150 |
| 15.20  (15.24) | 241 | 269 | 212 |
| 17.80  (17.78) | 327 | 365 | 288 |
| 18.90 | 1820 | 400 | 444 | 352 |
| 15.70 | 1770 | 266 | 296 | 234 |
| 21.60 | 504 | 561 | 444 |
| 9.50  (9.53) | 1860 | 102 | 113 | 89.8 |
| 11.10  (11.11) | 138 | 153 | 121 |
| 12.70 | 184 | 203 | 162 |
| 15.20  (15.24) | 260 | 288 | 229 |
| 15.70 | 279 | 309 | 246 |
| 17.80  (17.78) | 355 | 391 | 311 |
| 18.90 | 409 | 453 | 360 |
| 21.60 | 530 | 587 | 466 |
| 9.50  (9.53) | 1960 | 107 | 118 | 94.2 |
| 11.10  (11.11) | 145 | 160 | 128 |
| 12.70 | 193 | 213 | 170 |
| 15.20  (15.24) | 274 | 302 | 241 |

# 附录B 常用锚具规格表

**表B.1 常用锚具规格表 (单位：mm)**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 规  格  尺  寸 | | YJM15-2 | YJM15-3 | YJM15-4 | YJM15-5 | YJM15-6  YJM15-7 | YJM15-8 | YJM15-9 | YJM15-10 | YJM15-12 |
| 垫  板 | *A* | 105 | 135 | 155 | 170 | 200 | 210 | 220 | 235 | 260 |
| *E* | — | 90 | 106 | 120 | 140 | 165 | 165 | 165 | 195 |
| *C* | 90 | 100 | 110 | 135 | 155 | 160 | 180 | 200 | 200 |
| *D* | 50 | 53 | 58 | 63 | 73 | 78 | 83 | 88 | 93 |
| 管  道 | *F* | 40 | 45 | 50 | 55 | 65 | 70 | 75 | 80 | 85 |
| 锚  板 | *G* | 85 | 85 | 95 | 105 | 125 | 135 | 145 | 155 | 165 |
| *H* | 50 | 50 | 50 | 50 | 55 | 60 | 60 | 65 | 65 |
| 螺  旋  筋 | *I* | 130 | 160 | 190 | 210 | 220 | 260 | 260 | 280 | 310 |
| *J* | 35 | 40 | 45 | 45 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| *K* | 10 | 10 | 10 | 12 | 14 | 14 | 14 | 14 | 16 |
| *L* | 140 | 160 | 200 | 200 | 250 | 275 | 275 | 300 | 325 |
| 圈数*n* | 4 | 4 | 4.5 | 4.5 | 5 | 5.5 | 5.5 | 6 | 6.5 |
| 注：1. QMV型圆形夹片式锚具主要适用于强度2000 MPa及以下级别钢线，夹片为两片四分式；  2. 垫板尺寸按C40混凝土设计。 | | | | | | | | | | |

**注：不同厂家的锚具尺寸参数可能略有不同，上表中的参数仅供参考。**



# 附录C 常用波纹管选用表

**表C.1-1 常用金属波纹圆管规格表**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 管内径 | | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 | 80 | 85 | 90 | 95 | 100 | 105 | 110 | 115 | 120 |
| 允许偏差 | | +0.5 | | | | | | | | | | | | | +1.0 | | | |
| 壁厚 | 标准型 | 0.25 | | 0.30 | | | | | | | | | | | | | | |
| 增强型 | — | | | | | | 0.40 | | | | 0.50 | | | | | | |

**表C.1-2 常用塑料波纹圆管规格表**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 管内径 | 50 | 60 | 75 | 90 | 100 | 115 | 130 |
| 管外径 | 63 | 73 | 88 | 106 | 116 | 131 | 146 |
| 允许偏差 | ±1.0 | | | ±2.0 | | | |
| 壁厚 | 2 | | | 2.5 | | | |
| 注：壁厚偏差+0.5 mm，不圆度6%。 | | | | | | | |

**表C.2 常用波纹管选用表**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 预应力筋根数 | | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| **12.7 | 先穿 | 40 | 45 | 50 | 55 | 55 | 60 | 60 | 65 | 65 | 70 | 70 | 75 | 75 | 80 | 80 | 85 | 85 |
| 后穿 | 40 | 50 | 55 | 60 | 60 | 65 | 65 | 70 | 70 | 75 | 75 | 80 | 80 | 85 | 85 | 90 | 90 |
| **15.2  **15.7 | 先穿 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 | 75 | 80 | 80 | 85 | 85 | 90 | 90 | 96 | 96 | 102 |
| 后穿 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 | 80 | 80 | 85 | 85 | 90 | 90 | 96 | 96 | 102 | 102 | 108 |
| **21.6  **21.8 | 先穿 | 60 | 70 | 75 | 85 | 90 | 96 | 102 | 108 | 114 | 120 |  |  |  |  |  |  |  |
| 后穿 | 65 | 75 | 80 | 90 | 96 | 102 | 108 | 114 | 120 | 126 |  |  |  |  |  |  |  |
| **28.6 | 先穿束 | 85 | 96 | 108 | 114 | 126 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 后穿束 | 90 | 102 | 114 | 120 | 132 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 注1：上述管径与预应力束规格的对应关系可根据工程实际情况进行必要的调整。  注2：表中未列出的预应力束规格与管径的对应关系可根据工程应用经验由供需双方协议确定。 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

# 附录 D 常用电动油泵性能参数表

**表D.1 ZB4-500型电动油泵技术性能**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 柱  塞 | 直径 | mm | 10 |  | 电  动  机 | 型号 | Y100 L2-4 | |
| 行程 | mm | 6.8 | 功系 | kw | 3 |
| 个数 | z | 2×3 | 转数 | r/min | 1420 |
| 油泵转数 | | r/min | 1420 | 出油嘴数 | | z | 2 |
| 理论排量 | | mL/r | 3.2 | 用油种类 | | 液压油L-HM32或L-HM46 | |
| 额定油压 | | MPa | 50 | 油箱容量 | | L | 42 |
| 额定排量 | | L/min | 2×2 | 质量 | | kg | 120 |
|  | |  |  | 外形(长×宽×高) | | mm | 745×494×1052 |

**注：根据环境温度，本油泵应采用L-HM32或L-HM46液压油。**

# 附录 E 常用千斤顶参数表

**表E.1 常用千斤顶参数表**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 项目 | | 单位 | YDC240QX | YCW100B | YCW150B | YCW250B |
| 额定油压 | | MPa | 50 | 51 | 50 | 54 |
| 张拉活塞面积 | | ×10-2m2 | 0.4771 | 1.908 | 2.98 | 4.592 |
| 张拉力 | | kN | 240 | 973 | 1492 | 2480 |
| 回程活塞面积 | | ×10-2m2 | — | 0.777 | 1.38 | 2.802 |
| 张拉行程 | | mm | 200 | 200 | 200 | 200 |
| 穿心孔径** | | mm | 18 | 78 | 120 | 140 |
| 质量 | | kg | 20.5 | 65 | 108 | 164 |
| 外形尺寸  * P*×*L*P | | mm×mm | 110×573 | 214×370 | 285×370 | 344×380 |
| 最小工作  空间*L*B | | mm | 1000 | 1220 | 1250 | 1270 |
| 最小工作  空间*L*C | | mm | 70 | 150 | 190 | 220 |
| 钢绞线  预留长*L*A | | mm | ＞200 | ＞570 | ＞570 | ＞590 |
| 适用  锚具 | 13系列 | 孔 | 1 | 4~6 | 7~9 | 12~17 |
| 15系列 | 孔 | 1 | 3~5 | 6~7 | 8~12 |

**



# 本标准用词说明

1　 为了便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

     1） 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

     2） 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

     3） 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

     4） 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2　 标准中指定应按其他有关标准、规范执行时，写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

# 引用标准名录

1 《混凝土结构设计规范》GB 50010

2 《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204

3 《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224

4 《无粘结预应力钢绞线》JG 161

5 《缓粘结预应力钢绞线》JG/T 369

6 《环氧涂层七丝预应力钢绞线》GB/T 21073

7 《单丝涂覆环氧涂层预应力钢绞线》GB/T 25823

8 《预应力热镀锌钢绞线》GB/T 33363

9 《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/ T 14370

10 《预应力混凝土金属波纹管》JG/T 3013

11 《预应力混凝土桥梁用塑料波纹管》JT/ T 529

12 《通用硅酸盐水泥》GB 175的规定。

13 《预应力孔道灌浆剂》GB/T 25182

14 《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119

15 《铁路后张法预应力混凝土梁管道压浆技术条件》TB/T 3192

16 《公路桥涵施工技术规范》JGT/T F50

17 《既有建筑鉴定与加固通用规范》GB 55021

# 附：条文说明

中国工程建设标准化协会

混凝土筒仓预应力施工标准

CECS \*\*\*：202\*

**条文说明**

**制定说明**

《混凝土筒仓预应力施工标准》CECS \*\*\*：\*\*\*\*，经中国工程建设标准化协会\*\*\*\*年\*月\*日以第\*\*\*号文公告批准、发布。

本标准制定过程中，编制组进行了充分的调查研究，总结了近年来我国混凝土筒仓预应力施工的实践经验和研究成果，借鉴了有国际标准和国外先进标准，开展了多项专题研究，与国家标准及其他相关标准进行了协调。

为了便与广大施工、监理、设计、质监、学校等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定，本编制组按标准条文顺序制定了本标准的条文说明，对条文规定的目的、依据及执行中需要注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与标准正文同等的发了效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

**目 次**

[1 总则 41](#_Toc156813717)

[2 术语 42](#_Toc156813718)

[3 基本规定 43](#_Toc156813719)

[3. 1 施工管理 43](#_Toc156813720)

[3. 2 施工技术 43](#_Toc156813721)

[3. 3 施工质量与安全 44](#_Toc156813722)

[3. 4 施工配合 44](#_Toc156813723)

[4 材料 46](#_Toc156813724)

[4. 1 预应力筋 46](#_Toc156813725)

[4. 2 锚具 46](#_Toc156813726)

[4. 3 成孔材料 47](#_Toc156813727)

[4. 4 孔道灌浆材料 47](#_Toc156813728)

[4. 5 封锚材料 47](#_Toc156813729)

[5 施工设备及机具 48](#_Toc156813730)

[5. 1 下料机具 48](#_Toc156813731)

[5. 2 安装机具 48](#_Toc156813732)

[5. 3 张拉与灌浆机具 48](#_Toc156813733)

[6 构造要求 49](#_Toc156813734)

[6. 1 预应力筋（孔道）布置 49](#_Toc156813735)

[6. 2 锚固节点布置 49](#_Toc156813736)

[6. 3 耐久性及其它构造 50](#_Toc156813737)

[7 施工计算 52](#_Toc156813738)

[7. 1 下料长度 52](#_Toc156813739)

[7. 2 张拉力 52](#_Toc156813740)

[7. 3 预应力损失 52](#_Toc156813741)

[7. 4 锚固区局部承压 52](#_Toc156813742)

[7. 5 张拉伸长值 53](#_Toc156813743)

[7. 6 分批张拉验算 53](#_Toc156813744)

[8 制作及安装 54](#_Toc156813745)

[8. 1 下料及制作 54](#_Toc156813746)

[8. 2 预应力筋孔道留设 54](#_Toc156813747)

[8. 3 锚垫板安装 54](#_Toc156813748)

[8. 4 钢绞线穿束 55](#_Toc156813749)

[8. 5 质量验收 55](#_Toc156813750)

[9 张拉 57](#_Toc156813751)

[9. 1 张拉方案 57](#_Toc156813752)

[9. 2 张拉顺序 57](#_Toc156813753)

[9. 3 张拉操作 57](#_Toc156813754)

[10 灌浆及封锚 59](#_Toc156813755)

[10. 1 孔道灌浆准备 59](#_Toc156813756)

[10. 2 灌浆 60](#_Toc156813757)

[10. 3 锚具保护 61](#_Toc156813758)

[10. 4 质量验收 61](#_Toc156813759)

[11 混凝土筒仓预应力加固 62](#_Toc156813760)

[11. 1 一般规定 62](#_Toc156813761)

[11. 2 施工措施 62](#_Toc156813762)

# 1 总则

**1. 0. 1** 本标准制定的混凝土筒仓结构预应力施工要求，是为了保证筒仓结构的施工质量和施工安全，并为预应力施工工艺提供技术指导，使工程质量满足设计文件和相关标准要求。混凝土筒仓结构预应力施工还应贯彻节材、节能和保护环境等技术经济政策。本标准主要依据我国预应力技术研究成果、常用施工工艺和工程实践经验，并参考国际先进标准制定而成。

**1. 0. 2** 本条规定了本标准的适用范围。主要是以储存水泥、煤炭、粮食、矿粉等散料的大直径、大容量的圆形混凝土筒仓的新建和加固工程。其它承受环向力的圆形混凝土结构，如LNG全容罐、核岛安全壳、圆形水池等结构参照本标的相关条文时，还必须遵循各自行业内的专业标准规定。

**1. 0. 3** 本条强调了混凝土筒仓结构预应力施工的企业能力要求。预应力筋作为筒仓结构中最重要的受力筋，替代了大量的普通钢筋，仓壁中有效预应力的建立是结构成败的关键所在。因此混凝土筒仓结构中的预应力施工必须由专业的预应力技术企业承担。

预应力筋及锚固体系的选用、施工设备、锚固区布置、张拉顺序等工艺参数是建立有效预应力的关键，预应力专业施工单位必须在施工前编制深化设计与施工组织设计文件，并提交设计单位审查、确认，确保施工工艺满足设计要求。

**1. 0. 4** 本标准总结了近年来我国混凝土筒仓结构工程预应力施工的实践经验和研究成果，提出施工管理和过程控制的基本要求，并与其它相关标准进行了衔接和协调，执行时尚应满足相关国家标准的要求。当设计文件对预应力材料、施工有不同于本标准的专门要求时，应遵照设计文件执行。

# 2 术语

本标准中的术语的定义依据混凝土筒仓结构的特点及本标准的适用范围进行了适当调整或删减。

# 3 基本规定

## 3. 1 施工管理

**3. 1. 1** 住建部于2015年取消了预应力专业承包资质，为规范预应力专项工程企业行为，本条提出了混凝土筒仓结构预应力施工企业能力要求的具体参照标准。中国钢结构协会对不同水平的预应力专项工程企业展开了能力评价工作，并发布了《预应力专项工程企业能力评价标准》T/CSCS 048。该标准将预应力专项工程企业能力等级分为甲级、乙级。甲级企业可承担各类预应力工程的施工。乙级企业可承担单项合同额不超过企业注册资本金5倍、直径不大于25m的混凝土筒仓结构的预应力工程。

**3. 1. 2** 本条提出预应力施工管理及施工技术人员的执业资格和能力要求，是为了把控预应力施工过程工艺质量，防止出现因以包代管导致的质量管理失控现象。

**3. 1. 3** 预应力张拉、灌浆操作人员的技能和经验与施工质量直接相关。虽然不属于建设部规定的特殊工种序列，但是张拉和灌浆操作专业性强，不经过相当长时间的培训和实践难以掌握。在纳入建设主管部门管理之前，考虑到培训企业的能力，暂时将预应力张拉、灌浆操作人员的培训工作放在具备相应能力的企业来完成。

**3. 1. 4** 预应力张拉、灌浆属于不可逆的隐蔽工程，施工数据的准确性关系到最终的施工质量，需要建立见证制度。具体操作人员应对操作质量承担责任，要求全过程记录数据，并经操作人员、见证人员签字，存档。

## 3. 2 施工技术

**3. 2. 1** 筒仓结构的特点、总体施工顺序、仓壁施工工艺、预应力体系等对预应力施工的要求有所不同，预应力张拉顺序和时机对仓壁、底板、顶板等结构也可能产生不同程度的影响。故施工前应根据具体工程的特点来编制施工方案，组织预应力施工。

**3. 2. 2**  大直径的混凝土筒仓采用预应力是一种高效的技术手段，国外起步较早且多采用后张有粘结预应力体系。上世纪80年代以来，我国也在大量的混凝土筒仓中应用，主要采用无粘结预应力体系。近年来出现的缓粘结预应力体系、非金属预应力筋等新型材料，其施工工艺亦会有所不同。为保证结构安全和施工质量，本条对一些情况特殊的工程提出专家论证的要求。

**3. 2. 3** 混凝土浇筑前预应力孔道的密封完好性必须保证，需要二次施工的外露在结构外的张拉工作段钢绞线、灌浆（泌水）孔损坏了也不可恢复，包括张拉锚固后的锚具都必须得到有效的保护。

## 3. 3 施工质量与安全

**3. 3. 1** 预应力材料、安装、张拉、灌浆、切筋及封锚工序必须按照《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204填写检验批验收表格进行验收。

**3. 3. 2**  本标准可做为《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204补充，对该标准没有涉及或明确要求的质量标准应按照本标准的要求执行。

**3. 3. 3**  预应力筋安装、张拉和灌浆是预应力施工的关键工序，必须严格验收确保施工质量符合设计及规范要求。必要时应对孔道摩擦损失进行测试，并依据测试结果调整张拉力以满足设计要求。

**3. 3. 4** 本条要求预应力材料的种类和性能、张拉灌浆机具的类型和能力应满足设计要求。

**3. 3. 8** 对于获得第三方产品认证机构认证的预应力工程材料和同一厂家、同一品种、同一规格的预应力工程材料连续三次进场检验均一次检验合格时，可以认为其产品质量稳定，本规范规定可以放宽其检验批容量，这样不仅可节省大量的检验成本，同时鼓励和促进企业生产并提供质量有保证的产品，对工程质量提高和社会成本的降低均有积极意义。

## 3. 4 施工配合

**3. 4. 1** 预应力施工是筒仓结构施工中的关键工序，必须予以重视。不提前考虑预应力施工的时间和空间要求很难保证施工质量和安全。

**3. 4. 2** 钢筋绑扎、模板安装、混凝土浇筑和预应力筋安装的紧密相关，施工前应根据仓壁施工工艺确定各工种的施工顺序。

**3. 4. 3** 仓壁内的插筋、洞口加强钢筋、预埋件、脚手架和塔吊扶墙等施工时应注意保护预应力筋或孔道。后置埋件应先探明并避开预应力筋或锚具位置。

**3. 4. 5** 滑模施工对施工组织要求高，必须事前计划，以保证滑模作业的连续性。

扶壁柱两端的预应力筋需要外露一段长度以满足张拉的需要。为保证滑模正常进行，必须对该处的模板系统进行专门设计。通常是在锚具范围留设一定宽度的滑槽，采用可调整长度的短木模替代并按照锚具类型制作相应尺寸的穴模与短木模配合使用。

**3. 4. 6** 为方便施工，提高劳动效率，筒仓预应力筋的张拉平台一般采用电动吊篮。在大风环境等特殊条件下不能采用电动吊篮作为张拉平台的，宜在扶壁柱处搭设独立的双排脚手架，脚手架的连墙件应在仓壁施工时预埋。

# 4 材料

## 4. 1 预应力筋

**4. 1. 1** 通常情况下宜选用常用型号的普通钢绞线，以方便匹配相应规格的锚具，经济性好。体外预应力筋或腐蚀环境条件下等宜选用带涂层的普通钢绞线。

**4. 1. 5** 依据现行国家标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224，钢绞线的弹性模量不是交货条件，在钢绞线力学性能检测的同时宜同时测定弹性模量是为了提高张拉理论伸长值计算的准确性。目前的试验方法或部分实验室的检测条件得到的钢绞线弹性模量结果也可能有些偏差，张拉时实际伸长值偏差较大时，应考虑到弹性模量偏差的影响。

**4. 1. 6** 无粘结钢绞线的力学性能和普通钢绞线相同，现行行业标准《无粘结预应力钢绞线》JG 161对钢绞线的外包油脂和护套质量亦有规定。但目前国内无粘结钢绞线生产厂家的质量参差不齐，而且多数地区并不具备外包油脂和护套质量的检测参数和能力，因此要求厂家提供型式检验报告作为验收的依据。

**4. 1. 7** 缓粘结钢绞线进场验收时应按照《缓粘结预应力钢绞线》JG/T 369的规定，留置样品以对照换粘结剂的固化时间。

## 4. 2 锚具

**4. 2. 1** 夹片式锚具锚固可靠，施工工艺简单，近年来在国内外的预应力工程中被普遍采用。对混凝土筒仓工程中的一些不需要两端张拉的短束预应力筋可采用挤压式锚具作为固定端内埋于混凝土内。既有筒仓体外预应力加固工程中，由于配筋量小，可采用布置灵活且不要设置扶壁柱的游动锚具。

**4. 2. 2** 水泥浆进入夹片锚具的缝隙后，张拉时易滑脱，除非采取可验证的有效措施，否则不得做为内埋式固定端使用。夹片式锚具张拉力较低，且处于动载状态下其夹片容易松脱，故要求张拉后安装防松装置限制夹片向外移动。

**4. 2. 4** 目前符合国家标准的夹片式锚具一般都具有可重复锚固的性能。需要放松后重新张拉的钢绞线应更换新的夹片。

**4. 2. 5** 锚具的性能主要是检验锚具的锚固效率系数，锚具的硬度没有国家统一的标准，进场验收时硬度指标也是参照厂家提供的产品参数。对硬度有要求的锚具零件通常指夹片锚具的夹片，根据工程经验，夹片的硬度一般不宜低于HRC20。

锚具的静载锚固性能试验较为复杂，对检测机构的要求较高，且试验费用高、周期长，使用前应根据情况提前进行试验。

当同一个工程有多种规格的夹片式锚具时，可选取具有代表性的规格进行，例如3~12孔，可选取7孔，13~19孔，可选取15孔。如果厂家的单孔锚具和群锚的夹片是通用产品，也可采用单孔锚的静载试验考核夹片质量。

## 4. 3 成孔材料

**4. 3. 1** 采用波纹管作为预应力孔道的优点是钢绞线与孔道的接触面积大幅减少，摩擦系数降低。现行行业标准《预应力混凝土金属波纹管》JG/T 225虽然没有淘汰非镀锌低碳钢带制作的波纹管，但因为不镀锌的波纹管容易生锈，实际工程中目前已经极少采用。因为制作工艺的不同，塑料波纹管密封性能更好，摩擦系数更低。值得注意的是，塑料材质对气温变化较为敏感，在极端温度条件下，其使用性能可能会大幅降低。

## 4. 4 孔道灌浆材料

**4. 4. 1**~**4. 4. 4** 后张法有粘结预应力孔道灌浆的主要作用一是保护孔道内的钢绞线不锈蚀，二是握裹钢绞线与周围混凝土形成整体，提高构件的抗弯极限承载能力，同时降低两端锚具的压力。据此，对孔道灌浆提出密实度和强度要求。传统的灌浆材料是水泥净浆，依据现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204要求，水泥净浆已经不能满足其指标要求，必须在水泥净浆中掺入适量的外加剂。近年来为提高现场配置水泥浆质量的稳定性，成品的预应力孔道灌浆料或灌浆剂也被广泛采用。

## 4. 5 封锚材料

**4. 5. 1** 封锚的作用是保护张拉端部的锚具、锚垫板不被水、空气侵蚀，因此封锚材料应能保证密实度，一般采用原结构同类材料，也可适量掺入膨胀剂。当洞口尺寸较小，如在单根布置的无粘结筋张拉端位置处，可采用细石混凝土或水泥砂浆。

# 5 施工设备及机具

## 5. 1 下料机具

**5. 1. 1** 本条是指在钢绞线下料制束过程中的切断。钢绞线属于高碳钢，局部受高温后骤冷会导致金属变脆易断。采用电焊、氧-乙炔气切割容易产生钢绞线表面损伤，切割后的钢绞线的端头变形也会影响后期的张拉操作。

**5. 1. 2** 不同厂家生产的挤压套、挤压模尺寸可能存在微小差异，挤压力也有所不同，因此要求必须配套使用。

**5. 1. 3** 出厂的钢绞线盘由于盘径小，释放时的弹力较大，容易发生伤人事故。有粘结钢绞线放线盘出口设置锥形防护罩有利于安全保障，且钢绞线弹出顺畅不宜紊乱。

## 5. 2 安装机具

**5. 2. 3** 钢绞线穿束机适用于单根推穿，卷扬机适用于整束牵引，应根据设计特点和现场条件合理选择。

## 5. 3 张拉与灌浆机具

**5. 3. 2** 单根或整束布置的无粘结钢绞线均可单根张拉，有粘结钢绞线应采用相应吨位的穿心式千斤顶整束张拉。

**5. 3. 3** [压力表](http://www.zh817.com/htmlstyle/secondclass_3339247_1.html)的精度一般分为0.1、0.16、0.25、0.4、1.0、1.6、2.5、4.0八种不同精度等级，其中0.4以下精度等级属于精密压力表，其他则属于一般常用压力表等级。预应力工程常用的是Y-60、Y-100两种普通压力表，精度一般为1.6级。要求压力表的量程不宜小于千斤顶额定油压的1.2倍也是基于工程经验的规定。

**5. 3. 6** 高速搅拌（1000~1500r/min）有利于分散水泥和外加剂颗粒，增加浆体的流动性。灰浆搅拌机的储浆桶具有缓慢搅拌的功能是为了防止水泥浆在灌入前产生沉淀离析现象。

# 6 构造要求

## 6. 1 预应力筋（孔道）布置

**6. 1. 1** 预应力孔道的内径主要是按照穿束的难易程度来选择，没有硬性规定，孔道较长、曲线包角大、后穿钢绞线的以选择较大一号的。近年来，由于钢绞线穿束机的普遍应用，孔道内径有所减小。法国通用技术规范29：CCTG第65-A分册，要求孔道截面面积不小于2.5倍钢绞线净面积；美国《混凝土筒仓设计和施工标准》ACI 313 要求孔道面积不小于2倍钢绞线净面积。

**6. 1. 2** 预应力孔道竖直方向的净距不宜小于孔道外径的3倍是参考美国《混凝土筒仓设计和施工标准》**ACI 313**第**6.4.3**条规定。孔道竖向净距的要求主要是考虑了仓壁扶壁柱处的张拉端布置的空间和局部承压承载力要求。束是指集束配置的无粘结钢绞线。对采取错开锚固等其它措施满足张拉端布置空间和局部承压要求的情况可不受此条的限制，但最小净距应满足混凝土的浇筑要求，即不小于粗骨料最大粒径的1.25倍。

预应力孔道的最小保护层厚度，《混凝土结构工程施工规范》GB50666对预制构件、现浇混凝土梁的梁侧、梁底以及抗裂等级不同分别为30~60mm。美国《混凝土筒仓设计和施工标准》**ACI 313**第**6.4.**7条规定不少于40mm。考虑筒仓仓壁中预应力孔道位于外侧竖向钢筋的内侧，因此最小保护层厚度可以提高至50mm。

**6. 1. 3** 无粘结预应力筋集束布置时要求各根尽量全长平行排布是为了降低张拉时的摩擦损失，实际施工时很难做到，或者说完全做到全长平行排布的成本较高。通过张拉伸长值对比可以反映两者差异不明显。要求全长绑扎成束无分散是施工控制的基本要求。

**6. 1. 4** 对于高度不大（不大于1m）的门洞，预应力筋绕过布置是常见的做法，与洞口上下紧邻的预应力筋应保持一定的距离，并形成合适的弧度。洞口高度较大时，预应力筋（孔道）绕过施工难度大，宜在洞口两侧断开锚固，并采取局部加强措施。

**6. 1. 5** 预应力束或孔道的支架是在混凝土浇筑前用于支撑和保持预应力筋的空间位置，其直径和间距分别与预应力束的重量和伸直性相关。支架本身应能足够承担预应力筋自身的重力和混凝土浇筑时的冲击力，限制间距是主要为了保证预应力束不会有竖直方向的下挠，预应力束全长波浪形态将会增大张拉时的摩擦损失，1.2m是基于工程经验确定的，适当考虑了滑模施工工艺中提升千斤顶的布置间距。

## 6. 2 锚固节点布置

**6. 2. 1**  工程实践中经常出现的张拉端局部承压破坏事故一般都是因为锚具布置不合理或混凝土浇筑不密实导致的。因此必须按照锚具厂家产品的参数要求，从构造上限制锚具的布置间距及锚垫板至结构边缘的距离。同时，锚下钢筋的设置、张拉时混凝土强度也应该满足产品设计参数要求。

**6. 2. 2** 内埋式固定端一般用于可一端张拉的短束，在筒仓工程设计中不常见。

**6. 2. 3** 无粘结预应力筋的特点是每根钢绞线都有一个塑料孔道，在张拉和使用阶段，钢绞线均可在注满油脂的塑料孔道内自由滑动。推荐单根张拉锚固一是考虑施工操作简单，二是考虑系统的独立性，张拉出现问题时，可单独更换钢绞线或锚具。

筒仓工程中常采用集束布置的无粘结预应力筋，为了提高效率将多根钢绞线锚固在一块锚垫板上，锚具可以采用单孔锚具，也可采用群锚。当采用铸铁锚垫板时应当注意两点，一是保证各根钢绞线的排列与锚具的孔位对应，二是保证锚垫板喇叭口内的混凝土浇筑密实。

**6. 2. 4**  扶壁柱是用于筒仓仓壁环向预应力束搭接锚固的支座，因为预应力筋一般布置在仓壁偏外侧位置，将扶壁柱设置在外侧可降低摩擦损失，还方便施工操作，使用过程中张拉端不会被物料磨损。扶壁柱的宽度（这里指厚度，与仓壁厚度对应。）是根据预应力筋的根数按照锚具布置的构造要求来确定，长度（沿圆周方向）是依据张拉力的大小计算确定的。

## 6. 3 耐久性及其它构造

**6. 3. 1** 无粘结预应筋在施工和使用阶段钢绞线在护套内都是可全长滑动的，两端的锚具始终要求承担全部拉力，这就对无粘结预应力系统的耐久性防护提出了更改的要求。对于筒仓中内埋的无粘结预应力系统，主要是两端的锚具防腐、防火措施。

**6. 3. 2** 筒仓工程中的预应力孔道一般是水平放置的包角180°或120°的圆形孔道，灌浆孔一般设置在孔道两端的锚垫板上。对于孔道中间排气孔的间距，《混凝土结构工程施工规范》GB50666要求不宜大于30m是基于梁类构件的多波曲线孔道制定的，筒仓仓壁通常采用滑模工艺施工，在孔道中部设置排气孔难以保证留设的质量。工程实践中的LNG全容罐、核岛反应堆等超长的水平孔道均未留设中间排气孔。因此，当有可靠工程经验能保证灌浆密实时，对于筒仓仓壁中的水平孔道的排气孔可以放宽要求。

筒仓仓壁洞口周围的一些绕过洞口的曲线孔道，其竖向高差较大时可能会存在局部浆体不密实的情况，因此要求在此处单独设置排气（泌水）孔或灌浆孔，以便二次补浆。当采用真空辅助灌浆工艺进行孔道灌浆时可不此条限制。

**6. 3. 3** 筒仓结构中的底板、中心椎体、顶板、廊道等与仓壁相连水平构件会对仓壁产生约束作用。当设计没有采取断开、简支等措施时，应根据具体情况选择合理的施工顺序来避免影响仓壁有效预应力的建立或因强约束导致张拉时仓壁产生裂缝。

# 7 施工计算

## 7. 1 下料长度

**7. 1. 1** 钢绞线的下料长度分结构内的曲线长度和张拉工作长度，并适当考虑余量。张拉工作长度是由张拉方式及选用千斤顶的参数决定的。

## 7. 2 张拉力

**7. 2. 1** 张拉控制应力应按照设计文件要求确定，预应力筋的截面面积应依据相关产品的国家标准。超张拉后的最大控制应力限制是依据《混凝土结构设计规范》GB 50010及《混凝土结构工程施工规范》GB50666给出的。锚具下口建立的最大预应力限值考虑了锚口损失和锚固损失。

## 7. 3 预应力损失

预应力损失计算是预应力施工计算的重要内容，本标准中，各项损失的主要计算公式依据《混凝土结构设计规范》GB 50010规定，并根据筒仓结构的特点进行了适当的调整。

其中，预应力分批张拉损失对于筒仓结构来说量值较小，施工时一般不予考虑。

**7. 3. 1** 对于空间曲线的包角按照个方向上投影简单叠加计算将冒估摩擦损失值，公式7. 3. 1-3是《混凝土结构设计规范》GB 50010给出的空间包角计算方法。表7. 3. 1中缓粘结钢绞线的摩擦系数是依据《缓粘结预应力混凝土结构技术规程》JGJ 387，其余均按照《混凝土结构设计规范》GB 50010给出。

**7. 3. 2**  表7. 3. 2中夹片锚具的张拉内缩值是指常用的*φ*15.2mm钢绞线，*φ*17.8mm、*φ*21.6mm等大直径钢绞线的内缩值应按照锚具厂家参数或试验确定。有顶压是指增加了千斤顶卸载前顶紧夹片过程的主动锚固张拉工艺。常规的张拉则是采用限位板控制夹片向张拉方向位移，张拉到控制应力后直接卸载，夹片随卸载过程自动锚固，也就是无顶压工艺。

公式7.3.2-8为采用游动锚具时反向摩擦影响长度计算公式，该公式考虑了游动锚具的锚固机理，将将游动锚具的内缩值按照50%考虑。

## 7. 4 锚固区局部承压

**7. 4. 1**~**7. 4. 2** 《混凝土结构设计规范》GB 50010中关于锚固区的局部受压承载力的计算公式适用于采用钢板锚垫板的计算。对于铸铁锚垫板，不能直接套用规范公式进行计算，应从张拉端锚具布置构造尺寸以及张拉时混凝土强度的控制来保证。

此外，我国现行的行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG3362对锚固区的局部受压承载力的计算进行了详细的规定。

## 7. 5 张拉伸长值

**7. 5. 1**~**7. 5. 3** 预应力筋的张拉伸长值的计算主要是要考虑到曲线孔道摩擦损失以及扣除固定端夹片的楔入、工具锚的回缩等非弹性伸长。

公式7.5.3中张拉阶段构件的弹性压缩值*c*一般可忽略。

本标准给出的孔道摩擦系数*k、μ*的值是以工程经验为基础的平均值，随着材料本身质量的提升和施工工艺的改善，摩擦损失可能会有所降低，因此对重要的工程可按实测数据进行调整。

## 7. 6 分批张拉验算

**7. 6. 1**~**7. 6. 3** 在筒仓仓壁张拉施工阶段，单环预应力张拉将引起较大的仓壁次弯矩，使仓壁内表面沿高度方向产生拉应力。因此本条的是为了验算单环预应力张拉引起的仓壁内表面混凝土轴向拉应力，防止仓壁内表面张拉后形成连续分布的环向裂缝。

单环预应力作用下内表面混凝土轴向拉应力计算较为复杂，具体计算可参见《环形高效预应力混凝土技术与工程应用》第4.2节。本条公式7.6.1是偏安全考虑的简化公式，可作为施工阶段验算判别是否需要分批张拉的依据。也可以作为特定壁厚下，单环预应力配筋根数的上限参考值。

# 8 制作及安装

## 8. 1 下料及制作

**8. 1. 1** 下料场地要求平坦洁净是为了提高下料长度的精确度和防止钢绞线被泥沙污染而增加穿束的难度。

**8. 1. 2**  挤压锚具的挤压力没有统一规定，制作时应依据各产品厂家的说明书参数来控制。正常制作的挤压锚具的锚固能力需要通过静载锚固试验来判定。

**8. 1. 3** 无粘结预应力筋的塑料护套容易损坏，成盘的无粘结钢绞线重量大，采用钢丝绳吊装会出现大范围的破损。

## 8. 2 预应力筋孔道留设

**8. 2. 1** 塑料波纹管的纵向刚度较金属波纹管差，因此采用塑料波纹管时支架的间距应适当加密防止出现波浪状态。波纹管安装后应与支架绑扎是为了防止波纹管在浇筑混凝土的过程中上浮或者径向位移。

**8. 2. 2** 波纹管产品一般是6m定长以方便运输，连接用接头管的最小长度依据《预应力混凝土用金属波纹管》JG/T 225从200mm增加至300mm。连接的要点是被连接的两根管道要顶紧，接头管应旋至两管中间位置。接头的两端还应密封，塑料波纹管的配合不如金属波纹管严密，接头管两端宜采用热缩胶带密封。

**8. 2. 3** 本条要求是为了保证泌水管安装后孔道的密封性能，降低直接安装泌水管对波纹管破坏的可能性。泌水管伸出仓壁的长度要求是为了确保二次补浆的效果，依据工程经验制定的。

**8. 2. 4** 混凝土浇筑时孔道内渗入水泥浆将产生严重的后果，故要求对于先穿束的孔道，应在浇筑混凝土的过程中来回抽动钢绞线，防止渗入的水泥浆固化。对于后穿束的孔道，要求制作相应规格的通孔器来回拉动，以确保后期钢绞线能全部顺利的穿入孔道。

## 8. 3 锚垫板安装

**8. 3. 1** 锚垫板的安装是预应力安装工序中的重要内容，安装质量将影响到整个孔道系统的密封性能和锚固区的局部承压承载能力。在孔道或穿束前安装有利于精确锚垫板定位和固定。

**8. 3. 2** 扶壁柱内的锚垫板两侧宜配置两根构造竖筋方便锚垫板固定。要求螺旋筋紧贴锚垫板内侧并对中固定是为了保证局部承压承载力。扶壁柱内的箍筋的间距难以和锚垫板位置匹配，安装时应根据锚垫板位置上下移动箍筋位置，保证张拉空间要求。

**8. 3. 3** 本条是为了保证张拉端部的密封，防止水泥浆堵塞，降低后期清理的难度，减少张拉时的摩擦损失。

**8. 3. 4** 有底穴模的整体性好，浇筑混凝土及模板提升时不易变形，有利于保证张拉洞口的预留质量。

## 8. 4 钢绞线穿束

**8. 4. 1** 有粘结钢绞线的穿束分为先穿和后穿两种方式。后穿主要是为了避免钢绞线在张拉前可能发生的表面锈蚀，这是由自钢绞线穿入孔道至张拉的时间长短决定的。筒仓工程中一般为水平孔道，雨水不会进入孔道内部，只要对两端的外露段钢绞线做好保护，短时间内钢绞线一般不会锈蚀。再者，滑模施工的筒仓没有外脚手架，后期的高空穿束难度较大，因此正常情况下，应在滑模阶段先穿入钢绞线。

**8. 4. 2** 钢绞线的穿束方法应在施工前确定。采用人力穿束效率低，钢绞线根数多时穿束难度较大；采用钢绞线穿束机单根穿束方便快捷，筒仓高度不大时不需要提前下料。整束牵引穿束效率高，但是需要有穿束平台布置卷扬机、整理钢绞线，还需要按照钢绞线的根数制作加工牵引头，一般用于根数特别多时或者滑模平台上的多根无粘结钢绞线穿束。

**8. 4. 3** 在滑模平台上采用先穿束的，扶壁柱两侧外露钢绞线的长度要尽量平齐，在满足张拉要求的前提下，应尽量短些。这样有利于平台槽口的布置。

**8. 4. 4** 本条主要指外露段的钢绞线，可采用防水材料包裹绑扎，防止上部混凝土浇筑时溅落的水泥浆污染和张拉前被雨水淋湿而生锈。

**8. 4. 5** 无粘结钢绞线在装卸、吊运、下料，穿束的过程中可能被刮碰造成塑料护套局部破损，一般来说只要采用防水胶带按要求包裹后是不影响使用的。

扶壁柱搭接交叉的两束无粘结钢绞线分散穿插会造成交叉点部位钢绞线分布散乱，占用较大的空间。

## 8. 5 质量验收

**8. 5. 1** 固定端挤压锚具成型后钢绞线外端长度要求是为了避免因挤压操作不当造成钢绞线末端凹入挤压套内部而影响锚固效果。

**8. 5. 2** 预应力束（孔道）在仓壁中位置允许偏差之前尚无明确标准规定。预应力筋的位置主要涉及两个指标：一是每米高度内预应力筋的根数；二是预应力筋宜布置在仓壁截面中心线的外侧。考虑到仓壁内的预应力筋的受力特点，这两个指标对仓壁受力的影响都不如受弯构件的位置偏差敏感，故本条参考LNG全容罐技术说明文件制定预应力束在仓壁内的位置偏差要求，相对梁类构件适当放宽了预应力筋位置偏差要求。

**6** 预应力筋的曲线应光滑连续，尽量平缓是为了尽量降低孔道摩擦损失，提高有效预应力。预应力筋与锚垫板应保持垂直是为了保证张拉时的预应力筋受力均匀，防止钢绞线在锚口处因折角处的剐蹭而出现断丝情况。

**7** 浇筑混凝土时应由专人负责跟踪检查，对脱落的支架或发生位移的孔道应及时进行恢复。孔道的接头包括波纹管的接头和波纹管与锚垫板的接头。

**8** 埋置在混凝土内的固定端锚垫板应水平分散或前后错开布置，锚垫板的重叠会导致锚固端混凝土局部承压破坏。挤压锚具应与锚垫板紧贴是为了防止张拉时挤压锚后的混凝土被压碎并产生非弹性位移。

# 9 张拉

## 9. 1 张拉方案

**9. 1. 1** 为确张拉满足设计要求，张拉前的准备工作非常重要。首先应根据设计特点配备合适的张拉设备、仪表。结构混凝土强度应满足张拉要求，张拉端的清理应满足锚具安装要求。张拉伸长值、张拉顺序、张拉程序等技术参数应事前确定。

## 9. 2 张拉顺序

**9. 2. 1** 采用隔圈张拉的顺序符合筒仓配筋的特点，这样既可以减少张拉设备移动的次数，又可以降低单环张拉引起的次内力效应。

**9. 2. 2** 为降低孔道摩擦损失，仓壁中每环预应力筋一般都是根据单根预应力筋的长度分段搭接锚固的。在扶壁柱的一侧张拉会使扶壁柱产生很大的剪力以及扶壁柱与仓壁交接处的混凝土拉应力，可能引起开裂的情况，故要求同一环的预应力筋应同时张拉。

**9. 2. 3** 洞口及其它局部加强的预应力筋应在周围通长筋张拉完成后进行，以避免加强筋张拉引起的局部应力集中而产生开裂现象。

## 9. 3 张拉操作

**9. 3. 1** 两端同时张拉对张拉人员、设备的配备要求高，尤其是大直径筒仓的分段较多时。从最终张拉效果上来看，一端先张拉另端补张拉的方式和两端同时张拉没有实质的差异。因此，本条放弃了两端必须同时张拉的传统观念，以降低施工投入。

**9. 3. 2** 孔道内的多根钢绞线单张拉时会互相影响，其影响程度随钢绞线的扭绞情况随即变化，整体张拉可有效避免因扭绞造成的附加预应力损失，确保有效预应力的建立。当孔道直径大、钢绞线数量特别多时（19根以上），钢绞线在孔道内的松紧程度不一致可能导致整体张拉时各根钢绞线的张拉力差异较大，因此整束张拉前宜单根预紧至同一张拉力，如张拉控制应力的20%。

**9. 3. 3** 初拉力的设置是为了过滤掉初始状态钢绞线存在非弹性伸长，以准确测量张拉实伸长值。初拉力的大小宜根据钢绞线的长度和工程经验确定，原则上短束可以取低值，长束可适当增加。

整束布置单根张拉的无粘结预应力筋，单根钢绞线的伸长值仍需满足伸长值的偏差要求，不得以单根钢绞线的实际伸长代替整束。

**9. 3. 4** 采用应力控制的原因是压力表读数相对直观、更精确。伸长值的影响因素较多，实际伸长可能会有一些偏离，然而，在某些如孔道堵塞、摩擦异常、仪表损坏、钢绞线弹性模量偏差等特殊情况下，压力表读数虽然正常，但是会出现实际伸长严重偏短或超长的情况，所以要求以应力控制的同时校核实际伸长值，主要目的是为了查明实际伸长值偏差的原因，然后再采取相应的措施。如是因为弹性模量、孔道摩擦系数的偏差原因导致的伸长值普遍性偏差，可按实际参数重新计算理论伸长值。如常见的无粘结钢绞线张拉伸长值偏长的现象主要是因为采用的摩擦系数偏大导致的，必要时应进行现场摩擦损失测试。

**9.3.5** 根据环拉力的大小和设计习惯，不同筒仓配置的单环钢绞线的根数可能差异很大。本标准第7.6条给出了单环预应力筋张拉时仓壁内侧竖向拉应力的估算公式，可用来判别是否需要采取分阶段张拉的方案。

# 10 灌浆及封锚

## 10. 1 孔道灌浆准备

**10. 1. 1** 孔道灌浆是后张有粘结预应力技术中的一项重要工序。张拉后的预应力筋处于高应力状态，对腐蚀很敏感，同时两端的锚具承担了全部拉力，因此应尽早灌浆保护预应力筋以提供预应力筋与结构混凝土之间的粘结。饱满、密实的灌浆是保证预应力筋防腐和提供足够粘结力的重要前提。

传统的预应力孔道灌浆是普通压力灌浆，自塑料波纹管孔道应用以来，真空辅助压浆技术也在一些重要中应用。真空辅助压浆技术对孔道的密封性能要求较高，但是其浆体的密实度有大幅提高。实际上，金属波纹管孔道也完全可以应用真空辅助压浆技术。

孔道灌浆是一项连续性的工作，需要根据工程特点提前制定灌浆方案，并按照方案做好材料机具准备、孔道检查密封等各项准备工作。

**10. 1. 2** 孔道灌浆一般采用素水泥浆。普通硅酸盐水泥、硅酸盐水泥配置的水泥浆泌水率较小，是很好的灌浆材料。水泥浆中掺入外加剂可改善浆体的稠度、减少泌水率、增加膨胀率和强度。

1 水灰比是指水泥和水的质量比，0.45是采用水泥净浆进行压力灌浆常用的水灰比，可满足可灌性和强度要求。现行的《混凝土结构工程施工规范》GB50666要求最大水灰比0.45。美国交通部《后张预应力筋安装和灌浆手册》FHWA-NHI-13-026规定最大水灰比0.45，现行的《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204条文删除了最大水灰比的限制，而提高了水泥浆的性能要指标要求，主要是泌水率不超过1%，且24小时内被浆体吸收。这个指标不掺外加剂的水泥净浆难以满足，因此，实质上是对灌浆质量提高了要求。《铁路后张法预应力混凝土梁管道压浆技术条件》TB/T 3192 要求水胶比（水灰比的新提法）不大于0.33，《公路桥涵施工技术规范》JGT/T F50要求水胶比0.26~0.28，《预应力孔道灌浆剂》GB/T25182要求水胶比不大于0.4。因此，为提高浆体性能，保障灌浆质量，综合以上标准规定并结合《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204性能要求，本条要求水灰比不大于0.40。

**10. 1. 3** 规定浆体的搅拌顺序主要是为了保证外加剂能在浆体中均匀分布。搅拌时间是按照1000r/mim的高速搅拌机测定的，如采用低速搅拌机，搅拌时间应适当延长。

## 10. 2 灌浆

**10. 2. 1** 水泥浆灌入孔道前需要按照流淌法或流锥法检测可灌性。保持持续低速搅拌是为了防止水泥浆沉淀离析。额外加水会严重影响浆体的性能，如果浆体流动性差应检查配合比或者计量操作误差，并重新搅拌。

**10. 2. 2** 先下后上的顺序是为了避免出现串孔冒浆和漏灌的情况，不是严格的技术要求。每个孔道的灌浆操作应一次完成，以确保将孔道内的空气全部排出。遇到停电、设备故障、堵孔等特殊情况必须中断时，应根据情况采取相应的措施。

**10. 2. 3** 灌浆压力一般为0.5~0.7 MPa，由于浆体的重力作用，竖向孔道宜适当降低。超长的孔道的灌浆压力会有所增加，控制最大压力主要是防止灌浆管机连接部位过载爆管。孔道的出浆口排出与进浆口浓度相同浆体时持压片刻是为了把多余的水泌出孔道。

当发生孔道阻塞、串孔或中断灌浆时，应及时冲洗孔道或采取其他措施重新灌浆。

**10. 2. 4** 二次压浆法主要用于大直径的水平孔道，二次压浆的时间既要考虑浆体的初凝时间，又要让已经灌入孔道的浆体充分泌水。重力补浆法主要用于锚垫板区域或曲线孔道的高点浆体不饱满的情况。用于重力补浆的浆体宜稍稠，补浆的液面高度超过锚垫板或孔道高点以上可以保证浆体的缓慢下沉和收缩导致的局部不饱满。

**10. 2. 5** 竖向孔道从低点灌入水泥浆可排出全部的空气，防止出现不密实的情况，和曲线孔道要求从低点灌入同理。在孔道顶部进行重力补浆是保证竖向孔道灌浆密实的重要措施。

**10. 2. 6** 接力灌浆方案应在灌浆前确定，并按照孔道长度或高度在合适的部位设置一个或多个接力灌浆孔，所有灌浆孔必须安装阀门。

**10. 2. 7** 灌浆的环境温度宜在5 ℃~35℃。高温下的水泥浆将因水分蒸发稠度迅速增大而丧失可灌性。低温条件下灌浆可能导致浆体在孔道内结冰膨胀而出现结构开裂现象，因此必须在气温低于5℃灌浆时应按照冬季施工做好预案。

**10. 2. 8** 孔道灌浆属于隐蔽工程，目前还没有非常有效的实体检测方法，所以验收主要依据旁站检查和资料记录。

**10. 2. 9** 真空辅助灌浆是在传统的压力灌浆同时增加了孔道抽真空的措施，形成压力推送和负压吸入的浆体流动状态。真空辅助灌浆速度快，搅拌后的浆体留置时间更短，对浆体流动度的要求也随之降低，因此可以降低一定的用水量。实践证明，采用真空辅助灌浆的孔道内浆体密实度、充盈度均有大幅提升，条件允许时应优先选用，尤其是超长、大曲率、竖向的孔道。

## 10. 3 锚具保护

**10. 3. 1** 张拉后锚具外多余的钢绞线优先采用小型砂轮切割机切除。有困难时也可采用氧乙炔切割，但必须对锚具采取湿布包裹等降温措施，切割部位尽量远离锚具。

**10. 3. 2**~**10. 3. 5** 张拉端锚具处于扶壁柱的边缘，容易被雨水侵蚀，因此封闭保护对提高结构耐久性非常重要，尤其是完全依靠两端锚具传力的无粘结预应力体系，应给予足够的重视。锚具封闭的关键是封闭材料的密实度和防水性能，特殊部位的保护应进行专门设计或按照设计文件要求封闭。

## 10. 4 质量验收

**10. 4. 1** 孔道灌浆的质量指标主要是密实度、充盈度和强度。前两个指标不便于检查，所以一般是通过控制水灰比、泌水率等浆体性能指标和灌浆操作工艺过程。必要时，还应进行实体试验来验证现场条件下的灌浆密实度、充盈度。

浆体中氯离子含量引用《预应力孔道灌浆剂》GB/T25182标准。

孔道灌浆外加剂宜采用符合《预应力孔道灌浆剂》GB/T25182标准的预应力灌浆剂，具体参量和水胶比应按照产品技术参数确定。

浆体的可灌性是以浆体的稠度来衡量的，流淌法和流锥法是两种国内常用的现场检测方法：流淌法采用流动度仪测定标准量浆体的流淌的距离；流锥法是采用流锥仪测定标准量浆体的流动时间。两种方法的指标数据均是基于工程经验给出的，数值越大代表浆体的流动性越好。

**10. 4. 2** 灌浆试块的强度是依靠现场留置灌浆试块试验来反映的，由于灌浆实体强度难以实体检测，试块的的强度受制作、养护、试验等多个因素影响，一旦试块强度不满足标准要求可能导致工程质量难以验收的情况，因而本条提出由设计单位根据具体情况进行复核的补救办法。

# 11 混凝土筒仓预应力加固

## 11. 1 一般规定

**11. 1. 1** 本条依据《既有建筑鉴定与加固通用规范》GB 55021第1.0.3条规定，既有混凝土筒仓的鉴定与加固，应遵循先检测、鉴定，后加固设计、施工与验收的原则。

**11. 1. 2** 本条依据《混凝土结构设计规范》GB 50010 第4.1.2条规定预应力混凝土构件的混凝土强度不应低于C30。混凝土强度低于C30的筒仓仓壁应采取扩大截面的方法进行加固，新增截面内宜配置预应力筋。新老混凝土需要植筋连接作为共同工作的措施，《既有建筑鉴定与加固通用规范》GB 55021第6.9.1条规定，采用植筋技术进行锚固时，原结构混凝土强度不得低于C20。

**11. 1. 3** 需要加固的筒仓一般混凝土强度可能偏低，所以张拉控制应力不宜太高，以避免张拉时锚固区混凝土因局部承载力不足而破坏。限制张拉控制应力的下限主要是为防止锚具的夹片在往复荷载作用下出现松动而退出工作。

**11. 1. 4** 既有筒仓的加固工程中，钢绞线紧贴在仓壁外侧，张拉时钢绞线和仓壁摩擦力较大，采用无粘结钢绞线可以大幅降低摩擦力。带涂层的钢绞线可以提供多重防腐保护，提高加固后结构的耐久性。

## 11. 2 施工措施

**11. 2. 1** 筒仓结构加固体外预应力筋的锚固方式有两种：一种是设置后锚固的扶壁柱做为支座传递张拉力，单根布置时可采用单孔夹片锚具；多根平行布置时可采用扁锚，但每束不应超过5根钢绞线；另一种是采用游动锚具，不需要设置扶壁柱，一般为2根钢绞线集中平行布置。首尾项相连的预应力筋锚固在同一块游动锚具上，张拉时锚具产生少量的滑动后形成自平衡

**11. 2. 2** 对设置锚固块或扶壁柱搭接锚固的预应力筋张拉，两侧对称张拉可大幅降低张拉时锚固块与仓壁连接处的剪力。

**11. 2. 3** 同一块游动锚具上的钢绞线同步张拉时为了保证锚具上下两端的平衡。将锚具沿仓壁环向错开布置可使仓壁有效预应力均衡。

**11. 2. 4** 为有效形成环形预应力作用，预应力筋必须穿过筒仓的连体部位，此处开孔时有可能损伤原有的库壁钢筋，因此加固前应根据具体情况进行专门设计。

**11. 2. 5** 体外预应力筋外侧采取一定的防护措施可提高加固后结构的耐久性。