

双圈环绕无粘结预应力混凝土衬砌 施工技术及数据统计

顾 寅

【摘要】 黄河小浪底水利枢纽工程排沙洞采用双圈环绕无粘结预应力混凝土衬砌结构,是国内首次运用。本文概述了该结构特点,重点介绍了混凝土衬砌预应力施工技术,并对预应力张拉资料进行统计分析的尝试。

【关键词】 双圈环绕 无粘结 衬砌 施工技术 数据统计

黄河小浪底水利枢纽工程是国家重点建设项目,部分利用世界银行贷款建设的工程。工程建设中采用众多的先进技术。柳州欧维姆工程有限公司(简称工程公司)与水电十四局联合承担了排沙洞的双圈环绕无粘结预应力混凝土衬砌工程。本文除总结预应力施工技术和施工工艺外,还对排沙洞预应力混凝土衬砌(含设计方、承包方、监理方)资料进行汇编,并对预应力张拉资料进行统计分析的尝试,期望能将此项技术含量高的预应力新结构、新技术较全面的记录下来。

1 排沙洞结构概况

小浪底水利工程设有3条排沙洞,按1级建筑物设计。每条排沙洞长约1100米,是枢纽泄水建筑物中进水口高程最低的建筑物,担负着水库排沙、泄洪和保护发电洞的进水口不被泥沙淤堵及调节水库下泄流量的任务,是泄水建筑物中运用较为频繁的隧洞。为了满足排沙洞内水压力高、外水压力低及高水头、高含沙、高流速的运行要求,在洞身所处山体较弱的条件,即在灌浆帷幕至出口渐变段之间,采用双圈环绕无粘结预应力混凝土衬砌结构。

2 双圈环绕无粘结预应力混凝土衬砌结构

3条排沙洞共计182块(含2块生产试验段)

预应力混凝土衬砌施工段,总长2169m,共设置4368束预应力筋,每束预应力筋由8根无粘结预应力钢绞线分内外两层绕两圈布置,两层钢绞线间距为130mm,沿洞轴向每米布置2束预应力筋,间距500mm。钢绞线两端头交汇二锚具槽内,待混凝土浇筑并达至设计强度后,安装环锚锚具,用专用张拉机具张拉预应力筋并锚固。

排沙洞内径为 $D=6.5\text{m}$,预应力混凝土衬砌采用C40混凝土,厚度为0.65m。锚具槽布设在隧洞下半圆中心线两侧各 45° 的位置,沿洞轴线间距为0.5m。见图1。

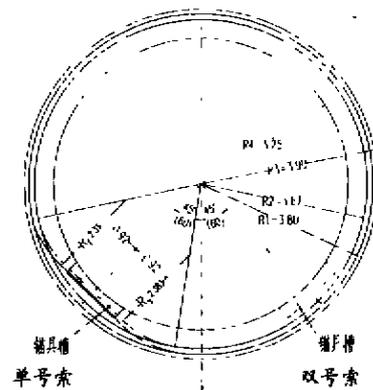


图1 双圈环绕无粘结预应力
混凝土衬砌结构示意图

预应力系统包括:预应力筋、锚具和张拉设备。

顾 寅: 柳州市欧维姆工程有限公司工程师

2.1 预应力筋选用无粘结预应力钢绞线, 技术指标:

规格: $\mu - 1 \times 7$ 标准型 - 15.7 - 1860 - II
GB/T 5224 - 1995

公称直径: $d = 15.7\text{mm}$

公称面积: $A_g = 150\text{mm}^2$

标准强度: $f_{pk} = 1860\text{MPa}$

破坏荷载(单根): $F_{pk} = 279.0\text{kN}$

弹性模量: $E_g = 1.8 \times 10^5\text{MPa}$

2.2 锚具选用 DSI-OVM.HM15-8 型环锚锚具。其主要技术指标为:

锚具组装件静载锚具效率系数: $\eta_A \geq 0.95$

预应力筋自由段的总伸长率: $\epsilon_u \geq 2\%$

锁定时钢绞线在锚具内的回缩量: $\Delta S \leq 6\text{mm}$, 每侧 3mm。

2.3 张拉设备技术指标

2.3.1 千斤顶主要技术指标为:

(a) 张拉千斤顶选用 DSI 体系的 HOZ950/100 型前卡式千斤顶, 其主要技术参数为:

理论张拉荷载: 971.88kN

张拉活塞面积: 161.98cm²

额定压力: 600bar

活塞行程: 200mm

(b) 放张¹千斤顶选用 YDC240Q 型前卡式千斤顶, 其主要技术参数为:

理论张拉荷载: 238kN

张拉活塞面积: 47.71cm²

额定压力: 50MPa

活塞行程: 200mm

2.3.2 油泵主要技术指标为:

(a) 张拉油泵选用 DSI77-159A 型电动油泵, 其主要参数为:

额定工作压力: 600bar

工作流量: 1 L/min

电机功率: 2 KW

(b) 放张油泵选用 ZB4-500 型电动油泵, 其主要参数为:

额定工作压力: 50MPa

工作流量: 1 L/min

电机功率: 2 KW

2.4 偏转器与限位板

偏转器为高强材料制作的一种两片两孔的圆弧过渡的变角张拉工具, 摩阻损失小于 8%; 限位板是限制工作夹片位移量的工具, 它可确保工作夹片的位移量和锚固时钢绞线的回缩量, 每套张拉机具需 4 件限位板。如图 2。

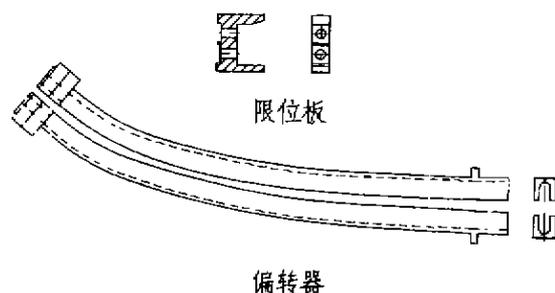


图2 偏转器与限位板

3 双圈环绕无粘结预应力混凝土衬砌施工工艺

主要工艺流程图, 见图 3。

预应力施工工艺:

3.1 施工准备

3.1.1 对张拉千斤顶及油表进行配套率定, 提出率定书(包括率定曲线), 并根据率定书及预应力筋设计张拉荷载计算出相应的油压表压力值;

3.1.2 按每块混凝土衬砌施工段所需的锚具(包括锚板、夹板、夹片、防腐用 PE 套管和橡胶板)、偏转器、限位板、防腐油脂等材料准备好;

3.1.3 根据锚具槽的角度搭设张拉台车, 并备好电源。

3.2 预应力筋准备

施工技术

3.2.1 分清张拉端(即上端)钢绞线和固定端(即下端)钢绞线,按施工规范在锚具槽内固定端的钢绞线上作标记,保证其与张拉端钢绞线

的搭接长度不小于110cm,用角磨机将钢绞线从标记处切断,并打磨钢绞线的端部;

3.2.2 固定端钢绞线切割完成后,按技术要

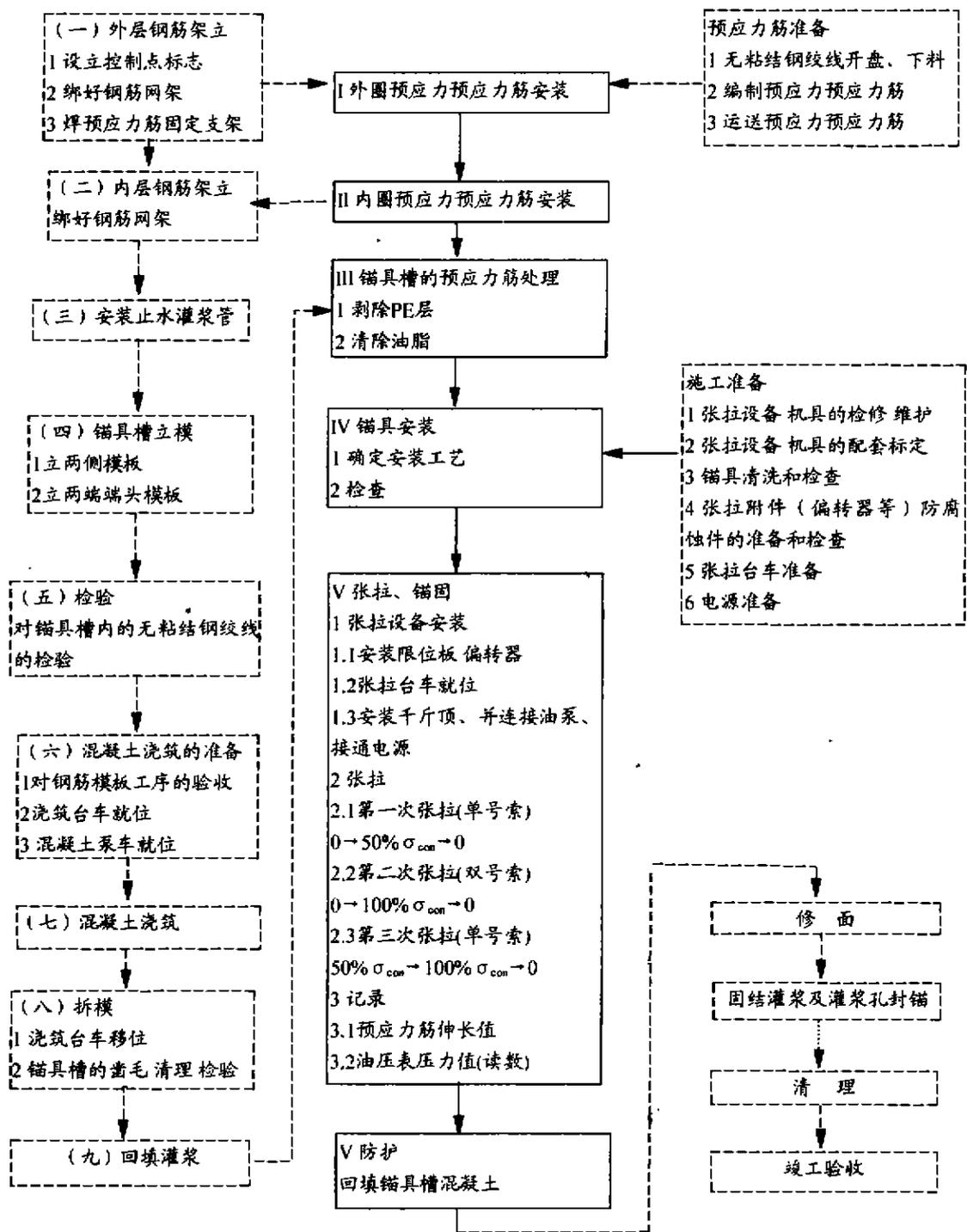


图3 主要工艺流程图

施工技术

求, 在每根张拉端和固定端钢绞线相应位置作PE护套切割标记, 用专用PE切割剪将无粘结钢绞线的PE护套从标记处剪断并剥除; 用纱布擦去预应力筋上的防腐油。

3.3 锚具安装

3.3.1 将备好的锚板、夹板、夹片、防腐用PE套管和橡胶板擦干净;

3.3.2 在张拉端与固定端的钢绞线上装上相应的黑色套管、夹板、橡胶板;

3.3.3 防腐附件的安装经检查正确后, 将锚板安装到钢绞线上, 固定端的外露钢绞线最短长度控制在3~5mm, 在夹片外锥面涂上防腐油脂, 装到锚板张拉端与固定端相应的锥孔内, 后用夹片专用锤将夹片敲平、打紧;

3.3.4 每段衬砌块的锚具安装完成后, 要认真检查每一个锚具槽内所安装的部件是否正确、到位。如防腐附件、夹片等是否有少装漏装; 夹片是否打紧、平齐; 钢绞线位置是否正确、有否交叉等。如有不正确、不到位的情况, 应在纠正后方可进行后续工序的施工。

3.4 张拉、锚固

3.4.1 设备安装, 依次安装限位板、偏转器, 将张拉台车就位, 用活动葫芦吊装千斤顶就位于待张拉锚具上方张拉台车上; (注: 偏转器在安装前应在滑槽内涂上润滑剂, 以降低摩擦); 连接千斤顶、油泵和电源等。

3.4.2 张拉

全面检查各部件的安装正确性, 在确保无误后方可进行后面的施工操作。张拉荷载以应力控制为主, 伸长值校核为辅的控制方法。张拉时应以100Pa/min的缓慢匀速进行。当实测伸长值与理论伸长值相差大于10%或小于-5%时, 应立即停止张拉, 查明原因、处理妥当后方可继续进行。

3.4.2.1 预应力筋的张拉荷载和张拉顺序

根据设计技术规范, 预应力筋的控制张拉应力 (σ_{con}) 为钢绞线标准强度的75%, 即控制张拉荷载为1674KN; 为避免相邻的两束预应力筋间的张拉荷载相差过大, 或能使衬砌的混凝土出现裂缝, 所以规定预应力筋的张拉按以下顺序进行, 见图4、图1。每一块预应力混凝土衬砌施工段布设24束预应力筋, 分为单号12束, 双号12束。张拉分三次完成。

第一次 单号 0 → 10% σ_{con} (静停) → 50% σ_{con} (静停5min) → 0
第二次 双号 0 → 10% σ_{con} (静停) → 100% σ_{con} (静停5min) → 0
第三次 单号 50% σ_{con} (静停) → 100% σ_{con} (静停5min) → 0

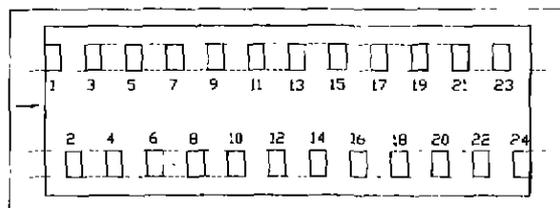


图4 一块预应力混凝土衬砌施工段的张拉顺序图

3.4.2.2 做好各预应力筋张拉的伸长值测量和油压表读数的记录和锚板位移值的记录。

3.5 防护

锚头与预应力筋的防腐保护是后张无粘结预应力混凝土结构设计与施工的重要内容, 防腐保护的效果好坏是预应力结构应用成功与否的直接影响因素, 如果防腐保护质量差, 有可能产生钢绞线因长期腐蚀而损坏, 导致应力损失过大或失效。从而影响到排沙洞的工程质量与正常运行。预应力筋防腐施工是一个精细的工作, 为了保证预应力筋防腐保护的效果与质量, 必须严格按照防腐操作工艺来执行。

3.5.1 张拉完成后, 用手提砂轮切割机将张拉好的预应力筋多余长度部分割除;

3.5.2 将锚具和钢绞线表面擦干净;

3.5.3 安装锚头及钢绞线的防腐附件;

施工技术

3.5.4 在防腐用PE套管内灌注防腐油脂,直至每一个灌满为止;接口用防腐胶带缠绕密封。

3.5.5 锚具槽混凝土回填

3.5.5.1 用高压风、水吹干净锚具槽;

3.5.5.2 在槽壁周围涂刷混凝土粘结剂;

3.5.5.3 在锚具槽内回填无收缩混凝土,回填时应用振动泵振捣,以使无收缩混凝土回填密实,应用的添加剂应是对预应力钢绞线无害的;

3.5.5.4 锚具槽回填无收缩混凝土收浆后应进行湿养,以防止后期混凝土表面产生塑性干燥裂缝和新老混凝土结合面拉开。

4 双圈环绕无粘结预应力混凝土衬砌预应力

张拉工程量 (见表1)

5 预应力张拉质量评定

张拉荷载以应力控制为主,伸长值校核为辅的控制方法。根据规范要求,预应力筋张拉的理论计算伸长值与预应力筋张拉实测伸长值之间相差应在大于-5%与小于10%之内。

5.1 预应力筋设计应力、张拉荷载计算,计算参数见表2。

钢绞线设计控制应力 $\sigma_{con}=0.75f_{pk}=1395\text{MPa}$

千斤顶处的应力 $\sigma_1=(1-1.01\%)\sigma_{con}$

$=1380.3\text{MPa}$

锚具处的应力 $\sigma_2=(1-1.01\%-7\%)\sigma_{con}$

表1 预应力混凝土衬砌预应力筋部分工程及设计参数表

衬砌段总量		单块衬砌段		每束预应力筋索长度m				工程量(净用量)			
块段	长度m	长度m	预应力筋数	内圈	47.1	平均	47.9	预应力筋总数	锚具(套)	钢绞线量t	
180.0	2169	12.05	24	外圈	48.7			4320	4320	1936.8	
设计参数						材料					
张拉荷载		伸长值mm			名称	规格					
张拉荷载K N	压力表读数 bar	钢绞线	锚块移动量	锚具	OVM (HM) 15-8(T)						
1674.0	520.0	291.5	142.5	钢绞线	$\mu-1 \times 7$ 标准型 15.7-1860-II GB/T5224-1995						
说 明	分洞号工程量				由工程公司完成的工程量						
	洞号	桩号	衬砌段		洞号	段数号	段数	长度	预应力筋束数		
			段数	总长度(m)	I [#]	16-61	46	554.3	1104		
	I [#]	258.650-969.600	59	710.95	II [#]	15-68	54	650.7	1296		
	II [#]	237.600-969.600	60	723.00	III [#]	14-62	49	590.45	1176		
	III [#]	215.550-950.600	61	735.05	完成量		149	1795.45	3576		
	合计		180	2169.00	完成量占总工程量百分数%	82.8%					

表2 计算参数表

μ	K	R	千斤顶摩阻	偏转器摩阻	L_0	L/2
0.05	0.0007	3.735m	1.01%	7%	0.91m	24.9m
L	E_g	σ_{con}	σ_1	σ_2	压力表读数	张拉荷载
47.9m	$1.8 \times 10^5 \text{MPa}$	1395MPa	1380.3MPa	1283.26MPa	50 MPa	1674MPa

施工技术

$$=1283.26\text{MPa}$$

每束预应力筋设计张拉荷载 $P_0=1674.0\text{KN}$

千斤顶处的设计张拉荷载 $P_1=(1-1.01\%)P_0$
 $=1657.1\text{KN}$

锚具处设计张拉荷载 $P_2=(1-1.01\%-7\%)P_0$
 $=1539.9\text{KN}$

5.2 预应力筋理论伸长值计算

预应力筋理论伸长值 ΔL 分为三段计算，第一段预应力筋从千斤顶前端夹具到环锚锚具之间直线段，其伸长值为 ΔL_1 ，第二段预应力筋从环锚锚具为起点环绕一周的圆弧线段，其伸长值为 ΔL_2 ，第三段预应力筋环绕第二周的圆弧线段，其伸长值为 ΔL_3 。计算参数见表2。计算公式如下：

$$\Delta L_1 = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2) L_0}{E_k}$$

$$\Delta L_2 = \int_{L_1}^{\frac{1}{2}L} \sigma_2 e^{[-(\frac{\mu}{R} + k)(x-L_1)]} dx$$

$$\Delta L_3 = \int_{\frac{1}{2}L}^L \sigma_2 e^{[-(\frac{\mu}{R} + k)(L-x)]} dx$$

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3 = 291.5\text{mm}$$

5.3 实测伸长值统计表及频数直方图 (见图5)

5.4 预应力筋理论伸长值与实测伸长值比较 (见表4)

从图5与表3、表4可知，(a)数据离散性小 $\sigma=0.0128\sim 0.0232$ ，张拉质量较高，工艺水平

表3 实测伸长值统计表

计算伸长值	291.5 mm												
实测伸长值	267.22	272.77	276.76	280.75	284.74	288.73	292.72	296.71	300.70	304.69	308.68	312.67	316.66
分组范围mm	272.76	276.75	280.74	284.73	288.72	292.71	296.7	300.69	304.68	308.67	312.66	316.65	320.65
组中间值mm	269.99	274.76	278.75	282.74	286.73	290.72	294.71	298.70	302.69	306.68	310.67	314.66	318.66
差值mm	-21.51	-16.74	-12.75	-8.76	-4.77	-0.78	3.21	7.20	11.19	15.18	19.17	23.16	27.16
误差率%	-7.38	-5.74	-4.37	-3.01	-1.64	-0.27	1.10	2.47	3.84	5.21	6.58	7.95	9.32
频数	8	20	72	130	226	419	512	554	339	96	17	1	0
百分数%	0.33	0.84	3.01	5.43	9.44	17.50	21.39	23.14	14.16	4.01	0.71	~0.04	0.00
张拉率%	5.64	5.74	5.82	5.90	5.99	6.07	6.15	6.24	6.32	6.40	6.49	6.57	6.65

表4 计算伸长值与实测伸长值比较表

计算伸长值 $\Delta L_{计}$ mm		291.5			
实测伸长值 $\Delta L_{实}$ mm	项目	采集总数	最大值	最小值	允许误差范围 (1-0.05)-(1+0.10) $\Delta L_{计}$
	数据数(件)	2394 ^①			2366
	实测值(mm)		310.51	267.97	276.93~320.65
	差值(mm)		19.01	-23.53	-14.58~29.15
	总数据数%		0	1.17	98.83

稳定；(b) 预应力筋实际张拉荷载满足技术规范要求。

6 安全

施工时应严格遵守施工安全规程。因双圈环绕无粘结预应力混凝土施工有其特点，在安全生产上应有专门性防护措施。预应力张拉时，施工人员与衬砌块（预应力筋）在同一立面上，若混凝土存在质量问题（如裂缝等），张拉时就有可能发生砼崩塌等不安全事故。所以在张拉时在张拉段内禁止非工作人员进入，对工作人员应该设置安全防护棚。小浪底排沙洞工程中采用张拉台车上搭盖防护棚。

7 结论

小浪底水利枢纽工程排沙洞的双圈环绕无粘结预应力混凝土衬砌在我国是第一例。从设计、施工、管理上都比较严格，采集数据上也做到科学和及时，经过这次资料汇编及分析，各项技术指标都达到了设计要求，确保了整个工程的质量。

注：

① 放张用于释放预应力筋中过高的应力或更换预应力筋及事故处理等。

② 统计的2394束预应力筋是分三步张拉，其余1182束张拉分四步，因千斤顶倒行程次数增多，影响到测量（伸长值）的准确性，故未做统计。

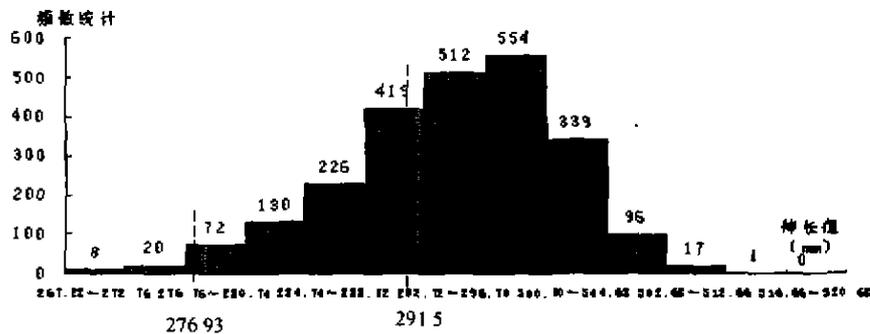


图5 频数直方图

我厂成为广西区首批重点出口企业

为加快广西对外开放，扩大出口，改善出口商品结构，推进科技兴贸战略，全面提高外经贸发展质量和水平，促进我区整体出口实绩跨上新台阶。自治区外经贸厅决定2001年在全区首次择优扶持四十家有基础、有优势、有前景的企业作为我区重点出口生产企业予以政策扶持。

作为扶持的企业，应具备如下四个条件：

1、有进出口权；2、出口规模较大，年出口额达到300万美元以上，近几年出口保持稳定发展，且出口产品结构符合自治区工业产业结构调整方向，符合自治区重点支持的出口产品范围；3、

产品具有市场竞争优势，出口产品科技含量高、附加值高，有发展潜力，市场前景广阔；4、信誉好，守法经营，近3年内没有骗汇、骗税，走私等违法行为。

区外经贸厅对重点出口生产企业，将在出口补贴，开拓国际市场、提高产品质量、出口配额等方面给予扶持。

经有关部门确认，我厂达到所要求的各项条件，被列为2001年自治区首批重点出口生产企业，这将有力地促进我厂产品拓展国际市场。

(杨金秀)