

浅谈波形钢腹板桥梁制作过程中的线形控制

王敏杰 黎自强 苏成中 李平基 曹志宏
中国水电四局（长治）能源装备工程有限公司 山西 长治 046000

摘要：波形钢腹板组合桥梁是一种新型的钢-混凝土桥梁。其充分利用了钢材和混凝土的材料性能，凭借其优异的力学性能、轻量化设计及经济性优势，增加了桥梁的使用年限，已成为现代桥梁工程的重要发展方向，因此具有良好的发展前景。然而，波形钢腹板的线形控制直接影响桥梁整体稳定性和耐久性，是施工中的核心难点。本文以S10凤县至合作高速公路中堡特大桥为工程背景，系统分析波形钢腹板从数控下料到焊接完工全流程的线形控制要点，结合实测数据，提出关键工序的优化措施。通过引入对比实验、误差统计分析及国内外典型案例，进一步验证控制方法的有效性。研究表明：数控下料精度、焊接热变形及胎架的协同控制可将线形误差降低至允许范围以内，显著提升施工质量。本文为同类工程提供了理论依据与实践参考。

关键词：波形钢腹板；线形控制；焊接变形；现场检测；数据计算

1 前言

近年来，波形钢腹板组合桥梁因其材料利用率高、抗震性能优异等特点，在国内外得到广泛应用。据不完全统计，我国已建和在建波形钢腹板桥有149座，其中主跨 $\geq 120\text{m}$ 有45座，成为继日本之后世界上第二个广泛应用波形钢腹板组合桥的国家。然而，波形钢腹板在生产过程中易受材料特性、加工工艺及环境因素影响，导致线形偏差累积，进而引发桥梁应力集中、疲劳损伤等问题^[1]。

波形钢腹板组合体系桥梁作为桥梁发展的一个新突破，它由上部结构、下部结构、墩基础、附属设施4部分组成，是混凝土与钢材结合的一种组合体系结构。相对于一般的钢筋混凝土桥来说，采用了波形腹板钢箱组合梁能够使得混凝土与钢材结合在一起，即很好地利用了混凝土顶底板抵抗弯矩的能力，又充分发挥了钢腹板抵抗剪力的能力。由于波形钢腹板组合桥梁的刚度相对于其他普通混凝土桥梁较低，在生厂、使用过程中的变形相对较大，需要张拉体外预应力用来抵抗载荷作用效应，进而满足桥梁变形要求。因此，在实际生产过程中，波形钢腹板的线形控制尤为重要。在施工过程中，需准确预测桥梁后续的变形，提供精准的预拱度，以抵消制作中较大的施工变形。以S10凤县（陕西）至合作高速公路马坞至西寨段一期工程为背景，系统分析了波形腹板钢箱组合梁数控下料到焊接完工制作全过程中线形变化过程。通过现场检测和数据计算对比分析腹板线形，总结出影响波形腹板线形的主要因素和有效措施，为今后类似桥梁制作提供有效的检验依据。

2 工程概况

桥梁右幅中心桩号为YK89+682.75，桥梁左幅中心桩号为ZK89+688.625，夹角为90度，桥梁采用错幅布设，桥梁上部结构采用波形腹板钢箱组合梁+65mT构，下部结构桥台采用肋板台、柱式台，桥墩采用柱式墩、空心薄壁墩。

中堡特大桥依次跨越白土坡枢纽互通立交集散车道、在建渭武高速公路主线、白土坡枢纽互通立交C匝道、D匝道、国道G212、规划南支一路、迭河、在建岷县迎宾大道三期工程、兰渝铁路、规划南主五路、藏河、规划南次九路、规划滨河西路及县道（后期为规划拓宽的南主四路）。受地形及纵坡限制，采用桥梁跨越整个河川，为了减小对兰渝铁路的影响，跨越兰渝铁路时采用2-65m大跨径的变截面预应力混凝土T构^[2]。箱梁底板宽3m，顶板宽0.7m，顶板设置2%横坡，波形钢腹板钢材为Q355ND，厚度14~18mm，波型采用1600型，波长1600mm、波深220mm（见图1）。

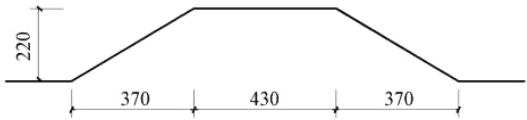


图1 波形钢腹板尺寸示意

2.1 施工环境与技术难点

跨铁路施工：跨越兰渝铁路时需采用夜间窗口期作业，对线形控制精度提出更高要求。

多工序协同：涉及数控下料、压制、组装、焊接等7道工序，误差传递风险显著。

环境温差影响：项目所在地昼夜温差达15℃，导致钢材热胀冷缩变形量波动（实测数据见表1）。

表1 温差对腹板线形影响实测数据

温度 (°C)	膨胀量 (mm/m)	收缩量 (mm/m)
5	0.12	0.10
25	0.18	0.15
35	0.25	0.20

3 波形腹板桥梁线形控制关键因素分析

根据波形腹板桥梁结构特点和梁节段制作需要，波形腹板桥梁单元件划分为顶板单元、腹板单元、底板单元和隔板单元。波形腹板钢箱组合梁制作时最大的重难点是腹板单元线形的控制，通过实际生产制作发现需要从数控下料、波形腹板压制、腹板单元组装、腹板单元焊接、胎架检测，箱梁整垮总拼，总拼焊接7道制作工序来控制波形腹板的整体线形。本文以中堡特大桥左幅第43跨生产制作过程来分析，找出其中最主要的影响因素并提出优化措施。

3.1 数控下料

数控下料是线形控制的首个环节，其误差直接影响后续工序，本项目采用数控等离子切割机，下料前应根据施工图纸编程正确的下料程序，并依据施工图纸找到合适的钢板，确保材质、板厚、尺寸规格、交货状态、钢板表面质量。下料前对弯曲变形严重的钢板需用矫平机进行校平。左幅第43跨共分6节箱梁，每节箱梁有2块顶板，2块波形腹板，1块底板构成。顶板材质Q390NE，板厚20mm，波形腹板材质Q355ND，板厚14和16mm两

种，底板材质Q420NE，板厚18、20和25mm三种。下料完成后遵循“首件必检”原则，首检发现问题时，必须及时寻找原因并解决，不得随意转到下道工序。及时验收尺寸及外观，保证尺寸精度，允许误差长宽为±2mm，对角线为±4mm，最重要的是需测量顶板、底板、腹板线形，从零件长度方向每隔1.6m测量其挠度值，并与施工图纸对比，保证数控下料腹板线形（见图2）。顶板、底板、腹板尺寸及线形测量需做到每块必检，及时发现问题。下料后，按照要求做好标记，工件标记内容包括项目名称、钢板炉号、批号、钢板号、材质、钢板厚度、零件编号、下料日期，保障整个下料过程具有可追溯性^[3]。没有特殊要求，不得随意拼接。拼接下料时要保证整体零件的尺寸，数量，且顶板、底板、腹板拼接长度不应小于1000mm。根据生产制作经验，编程程序准确无误，数控机床精度达标，零件尺寸及线形偏差在规范允许范围内。对左幅第43跨6节箱梁（每节2块顶板，2块腹板，1块底板及其余小零件）的下料数据进行统计，结果显示：

尺寸误差：长度误差±1.2mm（合格率100%），对角线误差±2.5mm（合格率100%）；

线形偏差：顶板、底板、腹板挠度最大误差值为1.8mm（设计要求≤2mm）。

通过优化切割路径（减少拐角停顿）与增加冷却装置，下料效率提升20%，线形合格率提高至99.5%。

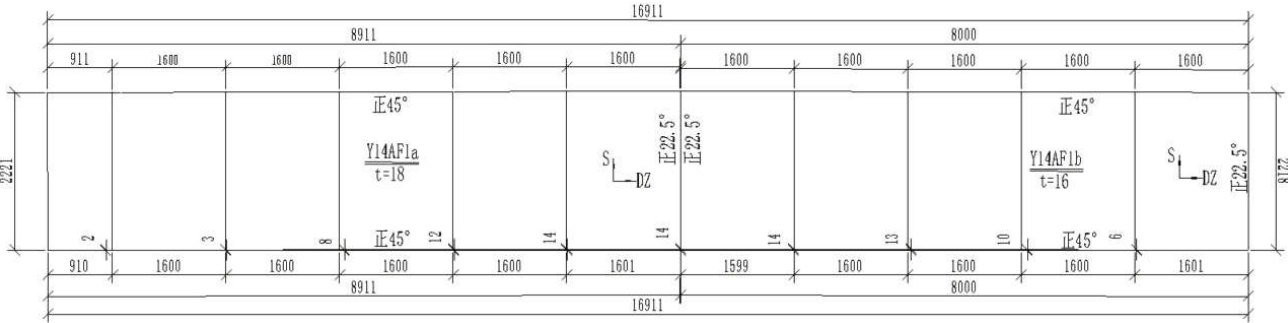


图2 波形腹板施工图

3.2 波形腹板压制

波形钢腹板可以极大的加强钢桥梁的刚度和强度，传统压制工艺依赖人工调模，易导致波长与波深偏差。本项目所采用的5000T框架式波形钢腹板压力机，具有刚性高，精度高，耐磨性强，可靠性高，安全性优越，工作速度快，操作简便等优点，波形腹板成型方法为专用模具压制成型法，对压制方法进行了优化。压制之前必须对钢板进行准确的定位与固定，确保压制后波形腹板与设计一致。事先进行工艺优化，减少钢板残余应

力。压制过程中，注意钢板长度压制方向与定位，确保坡口方向与工艺要求一致，必须考虑到后续工序的加工余量与焊接变形，并考虑到弯曲变形的回弹。需将验收合格的腹板原材料放置在专用模具上面进行压制，压制完成后检查波长、波深、腹板零件总长等尺寸^[4]。

3.3 腹板单元组装

组装前对照图纸，检查各零件的几何尺寸、坡口角度，腹板单元由顶板和腹板零件构成，顶板下料时已按照施工图纸编制程序，控制好平面线形，所以在组装腹

板时需根据顶板线形组装。顶板宽度700mm，腹板波深220mm，腹板中心线与顶板中心线一致，因此顶板长度方向边缘到腹板波峰表面的距离为 $L1 = (700 - 220 - \text{腹板板厚}) / 2$ ，对于14mm的波形腹板， $L1 = 233\text{mm}$ ，16mm的波形腹板， $L1 = 232\text{mm}$ ，18mm的波形腹板， $L1 = 231\text{mm}$ ，顶板长度方向边缘到腹板波谷的距离 $L2 = L1 + 220$ （波深），腹板单元组装完成后只需多点测量 $L1$ 和 $L2$ 尺寸，即可保证腹板单元的平面线形。

3.4 腹板单元焊接

焊接是线形偏差的主要来源。本项目采用埋弧焊和CO₂气体保护焊，具体焊缝焊接方式按照焊接工艺评定试验任务书，做好焊接工艺评定之后方可焊接，埋弧焊接相比CO₂气体保护焊接工艺热输入较大，可以更好的保证焊缝一次探伤合格率。但由于热输入较大，对薄板会产生更大的变形量，最终评定波形腹板单元焊接，对接焊缝采用埋弧焊，角焊缝采用CO₂气体保护焊。由于顶板宽度较窄，腹板厚度较薄，腹板单元焊接完成后整体的焊接变形较大，呈现波浪形，横向收缩与角变形占比较多，明显影响腹板单元的整体线形，因此需采取以下措施减少焊接变形：

焊接前焊缝处理：焊缝位置打磨，彻底清除焊接区

域的铁锈、氧化铁、油污、水分、预处理底漆等有害物质，使表面显露出金属光泽，保证焊缝一次探伤合格率，减少返修量，从而减少焊接变形。

预热法：在焊接前对焊接件进行预热，减少内应力。

焊剂烘焙：埋弧焊剂需经过专用焊剂烘焙箱烘烤后才能用来焊接，每次定量领取当日所需焊剂，剩余焊剂当日需回收至焊材房，做好焊剂领取记录。

引、熄弧板：对接焊缝、全熔透或部分熔透T形接头应在端部连接引、熄弧板，引、熄弧板的材质、板厚和坡口应与所焊的焊件相同。

预加反变形法：根据钢材的性质，预先估计焊修后的变形方向和收缩量，通过机械方法进行预变形。

夹固法：使用刚性夹具紧固焊件，防止焊接时产生变形。

优化焊接参数：焊接前进行焊接工艺评定，确保预热温度、道间温度、焊接电流、焊接电压、焊接速度等参数，焊接时严格按照焊接工艺评定里面的焊接参数进行焊接作业。根据本项目施工特点，对接焊缝采用φ4.0埋弧焊丝，熔透角焊缝采用φ1.2药芯焊丝，其余角焊缝采用φ1.2实心焊丝^[4]，具体焊接参数如下表：

表2 焊接参数表

序号	焊接方法	焊接材料	道间温度（℃）	焊接电流（A）	焊接电压（V）	焊接速度（mm/min）	备注
1	埋弧焊	H08Mn2E	20-250	600±30	34±2	324-468	
2	CO ₂ 气体实心保护焊	ER50-6	20~100	240±20	24±2	324-468	
3	CO ₂ 气体药芯保护焊	T494T1-1C1A	20~100	240±20	24±2	324-468	

整体热矫正：腹板单元焊接完成后采用专用的工装设备进行矫正，以满足整体的拼装要求，将焊缝位置及顶板另一侧中间位置用烤枪加热、烘烤，消除残余应力，进而使腹板与顶板恢复原形，减少焊接变形，矫正后钢材表面不应有明显的凹痕和其他损伤。

热矫正完成后需用钢角尺检验腹板与顶板的垂直度，顶板的平整度，顶板与钢角尺之间的间隙不应大于2mm，否则需要继续矫正直至满足要求，从而保证后面整体总拼时的组装精度^[5]。

3.5 胎架检测

胎架作为钢箱梁总拼基础，是整垮箱梁纵向线形的主要控制点。胎架搭设时，根据胎架所承受的载荷，设计并校核胎架的结构形式和尺寸，胎架搭设材料选用工字钢、槽钢或其他高强度型材，严禁用薄板搭设，保证胎架具有足够的强度、刚度和稳定性，满足支承、定位、固定和操作等工作的需要，不随着总重量的增加而

变形，使用过程中沉降 ≤ 1mm。严格控制其标高，确保误差在2mm以内。胎架使用全站仪定位，胎架标高检测位置为波形腹板位置，每跨共4块波形腹板，每块腹板检测26个点，具体检测值见图3，共检测104个点，其中102个点误差在2mm以内，有2个点误差超过2mm，这两个点需要及时修整标高，整改完成后进行复检，确保误差在2mm以内，保证整个胎架的精度，确保整垮箱梁总拼时的纵向线形满足设计及规范要求。

4 总结

本文通过波形腹板钢箱组合梁实际生产制作过程，从数控下料到总拼焊接各个生产工序可能会影响波形腹板线形的各种因素逐一分析，数控下料、波形腹板压制、腹板单元组装、胎架检测，箱梁整垮总拼，总拼焊接均会影响波形腹板线形，因此各个工序传递之间均需报检，检验合格后方可进入下道工序。其中最主要的影响因素是数控下料几何尺寸、焊接变形，因此每块腹板

均需报检并测量几何尺寸和立面线形，每块腹板单元焊后均需矫正进而控制波形腹板的立面线形。数控下料精度、压制工艺优化及焊接变形控制是线性控制的三大核心；通过伺服压制与反变形预置，可将波长误差控制在±2.0mm以内；焊接参数优化及过程监控能显著提升焊接质量稳定性。

胎架质量验收记录表

单位：中国水电四局（兰州）机械设备有限公司第一分公司										中堡特大桥2标										日期：2023年3月1日																																																						
项目名称					验收执行标准																																																																					
《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650-2020）																																																																										
																														拱度检查情况																																												
横向往复		1					2					3					4					允许误差																																																				
纵向编号	基准值	测量值	设计标高	实际标高	误差值	基准值	测量值	设计标高	实际标高	误差值	基准值	测量值	设计标高	实际标高	误差值	基准值	测量值	设计标高	实际标高	误差值																																																						
1	1030	620	410	410	0	1030	622	409	408	-1	1030	753	279	277	-2	1030	752	279	278	-1	±2																																																					
2	1030	613	415	417	2	1030	612	415	418	3	1030	746	285	284	-1	1030	745	285	285	0																																																						
3	1030	609	421	421	0	1030	609	421	421	0	1030	740	291	290	-1	1030	740	291	290	-1																																																						
4	1030	604	427	426	-1	1030	603	427	427	0	1030	733	297	297	0	1030	733	297	297	0																																																						
5	1030	600	430	430	0	1030	600	430	430	0	1030	730	300	300	0	1030	731	300	299	-1																																																						
6	1030	598	432	432	0	1030	598	432	432	0	1030	730	302	300	-2	1030	729	302	301	-1																																																						
7	1030	604	425	426	1	1030	604	425	426	1	1030	736	295	294	-1	1030	736	295	294	-1																																																						
8	1030	606	424	424	0	1030	607	424	423	-1	1030	736	294	294	0	1030	737	294	293	-1																																																						
9	1030	609	421	421	0	1030	609	421	421	0	1030	739	291	291	0	1030	740	291	290	-1																																																						
10	1030	613	416	417	1	1030	614	416	416	0	1030	744	286	286	0	1030	743	286	287	1																																																						
11	1030	620	410	410	0	1030	620	410	410	0	1030	750	280	280	0	1030	750	280	280	0																																																						
12	1030	629	402	401	-1	1030	629	402	401	-1	1030	756	272	274	2	1030	758	272	272	0																																																						
13	1030	639	392	391	-1	1030	638	392	392	0	1030	768	262	262	0	1030	766	262	264	2																																																						
14	1030	648	381	382	1	1030	650	381	380	-1	1030	779	251	251	0	1030	779	251	251	0																																																						
15	1030	662	368	368	0	1030	662	368	368	0	1030	792	238	238	0	1030	792	238	238	0																																																						
16	1030	677	353	353	0	1030	678	353	352	-1	1030	807	223	223	0	1030	806	223	224	1																																																						
17	1030	694	337	336	-1	1030	694	337	336	-1	1030	822	207	208	1	1030	822	207	208	1																																																						
18	1030	710	320	320	0	1030	710	319	320	1	1030	841	189	189	0	1030	841	189	189	0																																																						
19	1030	730	300	300	0	1030	729	300	301	1	1030	859	170	171	1	1030	858	170	172	2																																																						
20	1030	745	284	285	1	1030	746	284	284	0	1030	877	154	153	-1	1030	877	153	153	0																																																						
21	1030	768	261	262	1	1030	769	261	261	0	1030	898	131	132	1	1030	898	131	132	1																																																						
22	1030	793	237	237	0	1030	792	237	238	1	1030	924	106	106	0	1030	924	106	106	0																																																						
23	1030	818	211	212	1	1030	819	211	211	0	1030	949	80	81	1	1030	950	80	80	0																																																						
24	1030	845	184	185	1	1030	845	184	185	1	1030	978	53	52	-1	1030	978	52	52	0																																																						
25	1030	876	155	154	-1	1030	875	155	155	0	1030	1006	23	24	1	1030	1007	23	23	0																																																						
26	1030	896	132	134	2	1030	895	131	135	4	1030	1030	0	0	0	1030	1030	0	0	0																																																						

图3 左幅43跨胎架验收记录

参考文献

[1]况中华,李鑫奎,伍小平.波形钢腹板连续梁桥施工线形控制分析.上海建工集团工程研究总院.2016.12

[2]杨勃,陈艳茹,李刚,王起才.大跨度波形钢腹板连续梁桥施工控制技术研究.兰州交通大学.2017.5

[3]齐辉,黎念东.某波形钢腹板连续刚构桥施工控制技术.中电建路桥集团有限公司.2020.4

[4]王卫,张建东,段鸿杰,刘朵.国外波形钢腹板组合桥梁的发展与现状.江苏省交通科学研究院.《现代交通技术》2011年第6期.2011.12

[5]周晓夫.大跨径波形钢腹板连续刚构桥合理结构形式与施工技术研究.西南交通大学.2023.5.