

特殊大型目字形梁焊接技术开发研究

孙炼彬¹, 戴为志¹, 齐云轩², 李成龙¹, 徐志强², 付大量¹, 赵伟伟¹

1. 浙江精工钢结构集团有限公司 浙江绍兴 312000

2. 北京建工集团有限责任公司 北京 100055

摘要: 对某国家重点工程第一次采用的高强、高拘束度厚板特殊大型目字形梁的焊接及变形控制措施进行了详细的阐述。从工程方案的设计开始, 进行了一系列的分析研究, 制定了有针对性的技术措施, 并在实践中认真执行, 取得了钢结构变形小、无任何裂纹产生, 以及焊缝一次合格率为100%的成果。工程取得的成功经验对类似工程施工过程有一定的借鉴参考作用。

关键词: 高强钢; 目字形梁; 焊接技术; 变形控制; 裂纹控制

Development and research on welding technology for special large mesh shaped beams

SUN Lianbin¹, DAI Weizhi¹, QI Yunxuan², LI Chenglong¹, XU Zhiqiang², FU Daliang¹, ZHAO Weiwei²

1. Zhejiang Jinggong Steel Structure Group Co., Ltd., Shaoxing 312000, Zhejiang, China

2. Beijing Construction Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100055, China

Abstract: This project is a national key project, this paper describes in detail the welding and deformation control measures of the special large type beam with high strength and high lycium beam thickness used for the first time in China, starting from the design of the project scheme, a series of analysis and research were carried out, and specific technical measures were formulated and carried out in practice. The results show that the steel structure has little deformation, no cracks and 100% pass rate of weld. The successful experience of the project and the protective measures adopted in the limited space operation can be used for reference in the construction process of similar projects.

Keywords: high strength steel; mesh beam; welding technology; deformation control; crack control

1 工程概况

北京某工程钢柱最大板厚100mm, 钢梁最大板厚120mm, 总用钢量约为21000t, 主要采用Q390C钢, 占总用钢量的70%。

在B楼地下有3根转换梁, 顶标高为-2.800m, 底标高为-4.800m; 结构形式为目字形钢梁, 梁宽800mm, 梁高2000mm, 最大板厚为120mm, 材质为Q390C钢; 钢柱底标高为-20.170m, 且为劲性结

构, 劲性柱中间有4层混凝土梁相连, 整个结构全部为固接框架; 柱顶的3个转换梁与劲性柱全部为一级熔透焊, 下部结构的强拘束与上部的钢梁厚板对接焊形成了强烈对比, 也是本文研究的主要内容。

(1) 钢梁焊接节点结构十分复杂, 拘束度很高 钢梁分为2个焊接施工区(A区和B区, 见图1), 两侧卡板同时焊接。

劲性钢柱截面为1100mm×1100mm×100mm×

第一作者: 孙炼彬, 高级工程师, 一级建造师, 主要研究方向为钢结构现场安装及焊接技术, E-mail: lianbinsun@163.com。

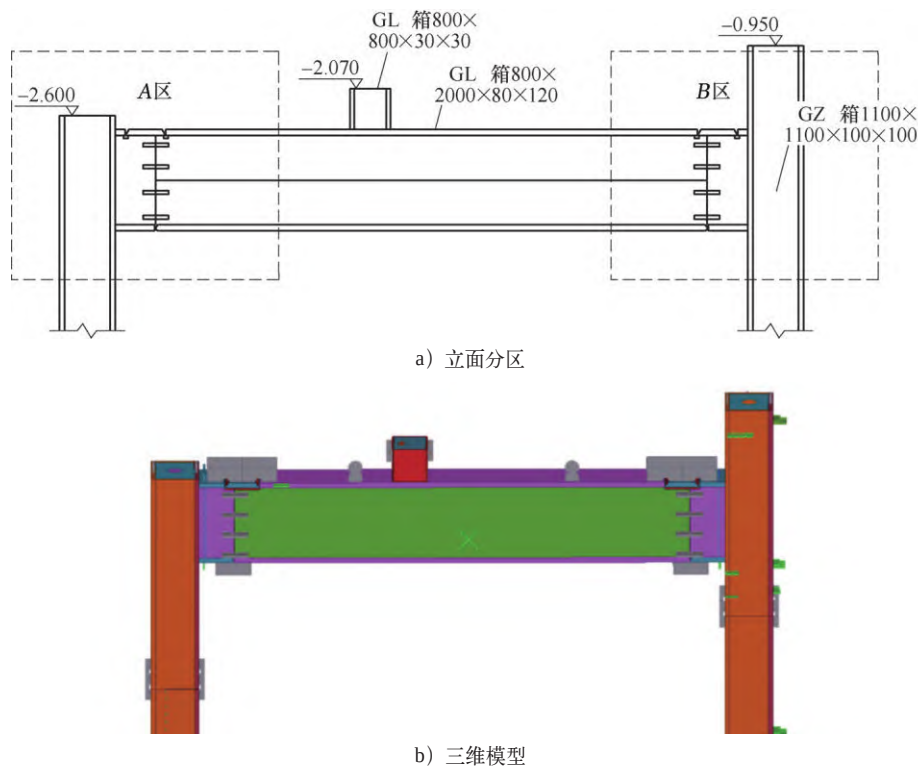


图1 立面分区示意及三维模型

100mm，北侧柱顶标高为-2.600m，南侧柱顶标高为-0.950m、柱底标高为-4.900m。梁为转换梁，梁顶跨中1/3处有向上钢柱，钢柱截面为800mm×800mm×30mm×30mm，在梁安装过程中800mm高钢柱牛腿在出厂前已经和钢梁进行了焊接。但这种特殊结构的刚度很大，焊接时会产生很

高的拘束度，极易产生焊接裂纹。
(2) 特殊大型目字形梁节点采用Q390C高强度钢 不同板厚Q390C高强度钢化学成分及力学性能见表1、表2。
待殊大型目字形梁节点均为厚板焊接，上下翼缘板厚为120mm，腹板厚度为80mm，内部加劲板

表1 不同板厚Q390C高强度钢化学成分及CEV

板厚/mm	化学成分（质量分数，%）															CEV (%)
	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Cu	Mo	B	N	
120	0.17	0.37	1.50	0.016	0.0018	0.049	0.034	0.037	0.004	0.03	0.01	0.01	0.007	—	—	0.42
80	0.16	0.37	1.49	0.016	0.0011	0.037	0.011	0.004	0.004	0.04	0.01	0.01	0.004	—	—	0.41
60	0.16	0.31	1.50	0.018	0.0017	0.034	0.031	0.002	0.019	0.09	0.03	0.02	0.011	0.0006	0.0024	0.43

表2 不同板厚Q390C高强度钢力学性能

板厚/mm	力学性能			
	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率 (%)	弯曲180° , d=3a
120	428	583	22.5	合格
80	467	604	22	合格
60	490	629	23	合格

厚度为60mm，钢梁高度为2m。该节点为国内首次采用，结构复杂，焊接难度极高，焊接接头如图2所示。

牛腿及钢梁对接焊接均采用坡口全熔透焊缝，焊接质量等级为一级。一级焊缝的合格等级应符合GB/T 11345—2023《焊缝无损检测超声检测技术、

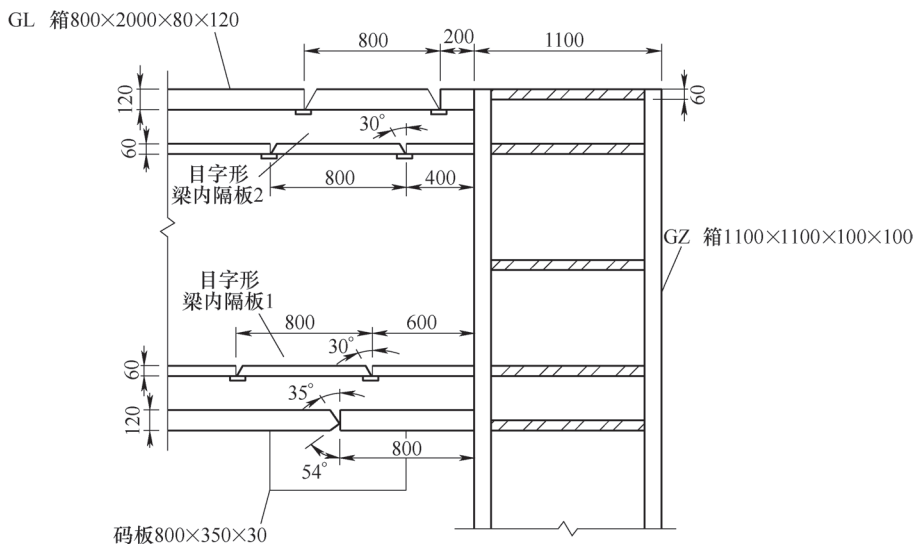


图2 特殊大型目字形梁焊接接头示意

检测等级和评定》) B级检测的Ⅱ级以上要求。

2 工程难点

根据设计特点, 特殊大型目字形梁节点是有限空间的封闭节点, 场地狭窄, 焊接可达性极差。开始仅从焊接角度考虑, 在腹板开设人孔进入内部焊接。由于空间狭小, 目字形梁的下翼板平焊及内部隔板的焊接过程都在箱体内进行, 困难很大。采用 CO_2 气体保护焊进行焊接, 在焊接过程中箱体内会产生 O_2 不足及 CO 超标的现象, 因此, 现场有限空间作业的焊接方案必须保证作业人员安全。

在刚性大、拘束度很高的情况下焊接, 如果措施不当, 就很容易产生焊接裂纹, 特别是采用了Q390C高强钢, 更没有返工的可能, 由此决定了高强厚板大型目字形梁节点焊接技术的特殊性。

3 方案研究

为制定本工程的焊接方案, 采取了以下措施。

1) 经过多方比较, 否定开设人孔方案, 按照焊接应用技术理论, 重新制定方案。首先, 虽然在箱梁腹板上开设人孔的确可以进行焊接, 但增加了焊缝数量, 导致焊缝的截面积增加, 使焊接应力、应变增加, 从而使产生焊接裂纹的危险增加。其次, 操作空间并没有扩大, 仍要按从下向上的顺序焊接。更重要的是, 焊后还要封堵人孔, 形成嵌入式焊缝, 其难度高, 焊接质量很难保障, 容易形成隐患。因此, 采用了开顶盖、重新设计焊接顺序, 从下向上焊接的方案。

2) 将钢梁分为2个焊接施工区(A区和B区), 依照钢结构系统合龙技术, 两侧卡板同时焊接。设计特殊大型目字形梁节点的坡口和焊接顺序, 牛腿翼缘板按阶梯设置, 从下向上按顺序(退行)焊接。

3) 设计有利于控制焊接质量的坡口形式。为了减少焊接应力、应变, 采用小坡口焊接技术, 焊接坡口为 30° , 以减小焊缝截面积。钢梁腹板采用K形坡口, 钢梁上翼缘、中翼缘采用单边坡口, 间隙8mm, 如图3、图4所示。

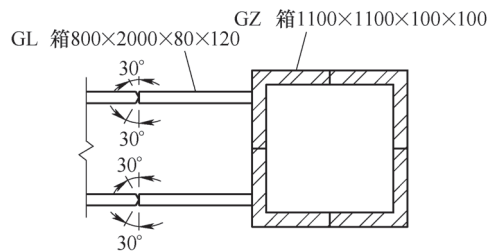


图3 钢梁腹板坡口设置

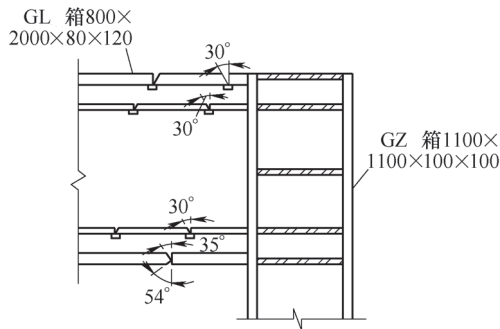


图4 钢梁翼缘板坡口设置

钢梁下翼缘采用X形坡口, 仰焊为 $t/3$, 平焊为

$2t/3$ (t 是板厚), 如图5所示。新型坡口设计是为了使焊接接头焊接残余应力及变形均匀, 提高节点的可靠性, 对于刚度很大、拘束度很高的厚板节点尤为重要。

从理论上分析, 双坡口熔透焊缝应尽可能做到板材中心两边焊缝成形系数 ϕ ($\phi = B/H$, 其中 B 为焊缝宽度, H 为焊缝深度) 基本相等, 如图5所示。

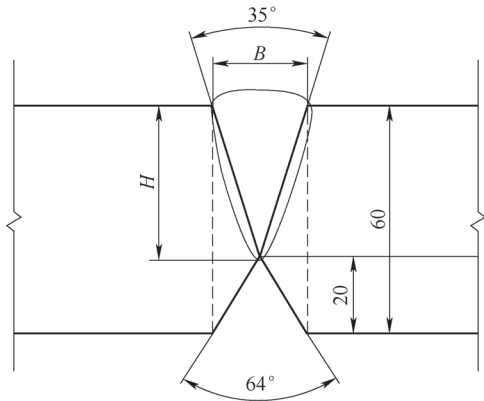


图5 全熔透 (CJP) 坡口焊缝成形系数控制

由图5可知, 该坡口纠正了原标准图集 (GB/T 985.1—2008《气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口》) 两边不等宽的错误设计 (即无论板厚薄, 一律采用平面 45° , 底面 64° 两边宽窄不一的坡口设计), 而是采用投影和直尺丈量的方法保证板材两边坡口宽窄一致。

具体作法是: 在确定平面坡口后, 由平面坡口向对岸 (底面) 投影 (也可以用直尺在对岸量出等宽), 然后连接大面坡口的顶端。这类坡口是专门为全熔透碳弧气刨工艺设计的。

在焊接过程中, 平面焊接完成后, 底面碳弧气刨清根到板的中心 (允许稍微超过中心线一点), 然后进行仰焊。这样焊接接头两边的宽度和深度几乎相等, 那么焊缝成形系数 ϕ 也就基本相等。同原来宽窄不一的设计相比, 由于焊缝两边截面积几乎相同, 焊接变形和焊接残余应力也几乎相同, 那么焊接变形和焊接残余应力的影响就大大降低。

4 工程焊接技术

根据焊接工艺顺序, 下面对该工程所用焊接技术逐一进行阐述。

4.1 预热温度

预热可以控制焊接冷却速度, 减少或避免热影响区中淬硬马氏体的产生, 降低热影响区硬度, 并

有助于氢从焊接接头的逸出, 同时预热还可以降低焊接应力; 在高强钢厚板焊接接头中, 预热可以有效地减少焊缝冷却过程中的温差, 控制 $t_{8/5}$ (800℃冷却到500℃的时间), 防止裂纹的产生。

确定预热温度, 以厚板120mm为例进行试验研究, 对预热温度进行计算^[1]。根据预热温度经验公式, 得出Q390C高强钢预热温度计算结果见表3。

受化学成分影响的碳当量 $CEV_{化}$ 计算公式为

$$CEV_{化} = C + Mn/9 + Cr/9 + Ni/18 + Mo/13$$

受板厚 δ 影响的碳当量 $CEV_{厚}$ 计算公式为

$$CEV_{厚} = 0.005\delta CEV_{化}$$

总的碳当量 $CEV_{总}$ 总计算公式为

$$CEV_{总} = CEV_{化} + CEV_{厚}$$

焊接预热温度 T_0 可根据经验公式计算, 即

$$T_0 = 350 (CEV_{总} - 0.25)^{1/2}$$

表3 Q390C高强钢预热温度计算结果

厚度/mm	$CEV_{化}$ (%)	$CEV_{厚}$ (%)	$CEV_{总}$ (%)	T_0 (计算)/℃	T_0 (实际)/℃
120	0.343	0.2058	0.5488	191.3	150
80	0.33	0.132	0.462	161.15	120
60	0.34	0.102	0.442	153.36	110

因为Q390C高强钢的强度比Q460钢小两个等级, 结合工程实际, 将板厚120mm的 Q390C高强钢的预热温度适当降低到板厚110mm的Q460E钢斜Y形坡口焊接裂纹试验不产生裂纹的最低预热温度150℃, 其余厚度的预热温度也适当降低^[2]。经过焊接工艺评定检测证实, 表3的实际预热温度完全满足焊接需要。

4.2 焊接工艺评定主要项目

(1) 试件设计 依据GB 50661—2011《钢结构焊接规范》的有关规定, 并根据我公司相关项目施工经验, 拟定焊接工艺评定项目见表4。本工艺评定共计3项。

表4 拟定焊接工艺评定项目

材质	板厚/mm	焊接位置	焊接工艺	工艺评定项目
Q390C钢	60	O	GMAW	1
		F、H、V	GMAW	1
Q390C钢	40	H	GMAW	1

焊接工艺评定使用的坡口形式及尺寸如图6所示。焊接预热110℃, 道间温度保持100℃左右, 焊后保温2.5h缓冷。

(2) 焊接材料确定 采用的焊接材料及设备见表5。

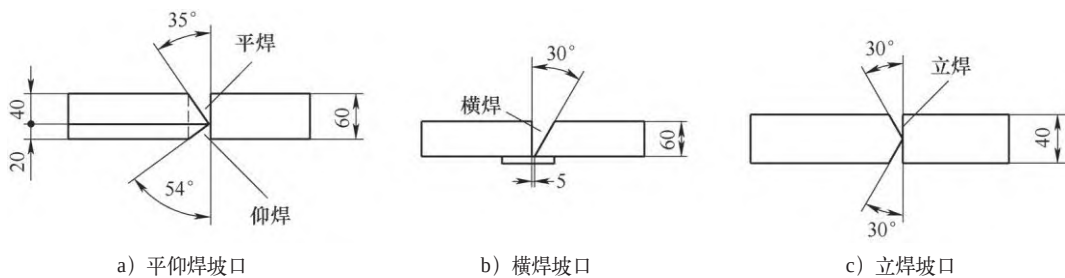


图6 GMAW坡口形式

表5 焊接材料及设备

焊接方法	焊接材料牌号	焊接材料规格 ϕ /mm	焊接设备
CO ₂ 气体保护焊	THQ-50C	1.2	NVC-50011a

根据焊接应用技术理论和相关参考资料，确定Q390C高强钢的配套焊接材料为THQ-50C（ER50-6）。由于这是原Q355钢的常用焊接材料，引起了一些质疑，认为该材料强度稍低，因此有必要进行技术分析。

对于焊缝金属强度选择问题，传统观念及有关规定大多主张“等强配比”或“超强配比”，认为焊缝强度高一些更为安全。但“低强配比”焊接材料并不意味着焊接接头强度一定低于母材，这是因为理论上的强度配比不等于焊接接头实际的强度配比。

在工程中通常是按产品样本规定的熔敷金属名义保证值（或焊接材料标称强度）选择焊接材料。事实上焊缝金属的实际强度往往超出熔敷金属的保证值。按名义强度选择的低强焊接材料，实际所得到的焊缝强度未必低强。考虑冶金因素、熔合比（稀释率）和力学上的拘束强化效果，高强钢焊缝的实际强度可能远远高出熔敷金属的名义保证值。

因此，选用“低强配比”的焊接材料，焊接接头实际强度未必低强，可能等强，甚至稍许超强；而按“等强配比”选择焊接材料则可能造成超强过多的效果，造成焊缝金属韧性和抗裂性下降。

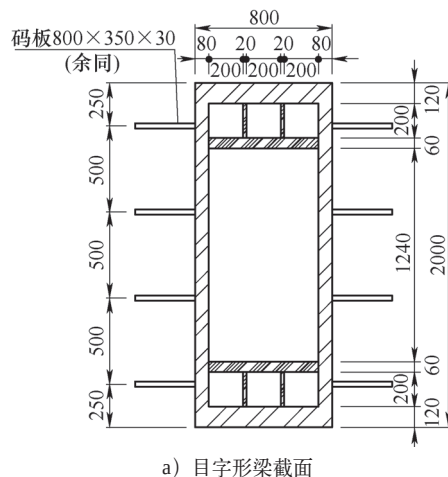
通过焊接试验，结果十分理想，证实了技术分析的准确性。

焊后24h经外观及超声波检测合格后，按GB 50661—2011要求进行了力学性能试验。结果表明，接头抗拉强度高于母材标准下限值；弯曲合格；接头各区0℃冲击吸收能量 $\geq 34\text{J}$ ，证明各项性能符合设计要求。

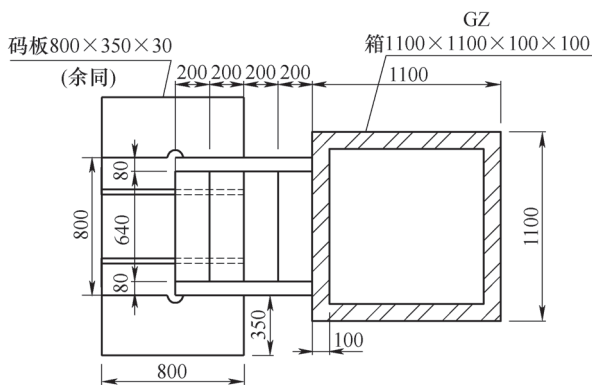
4.3 焊接变形控制

为了有效控制焊接变形，梁两端设计10块尺寸

为 $800\text{mm} \times 350\text{mm} \times 30\text{mm}$ 码板，梁底2块，腹板每侧各4块，码板可以增加焊缝区域的拘束度，防止焊接变形。钢梁安装校正后，采用合龙方式对称焊接，对整个钢梁进行约束，如图7所示。



a) 目字形梁截面



b) 钢柱及牛腿俯视图

图7 钢梁码板布置示意

4.4 焊接热输入控制

焊接热输入是对焊接质量影响最大的焊接参数。Q390C高强钢在焊接过程中，需要限制热输入的上限，避免焊缝及热影响区晶粒粗大，同时还必须限制热输入的下限，否则过快冷却，扩散氢来不及逸出，在拘束大的环境中，容易引起冷裂纹。

焊接热输入包含3个参数：焊接电流、电弧电

压、焊接速度。GMAW、FCAW-G焊接电流的变化可以由送丝速度反映出来。如果说焊接热输入的确
定取决于焊接性，那么在一定情况下，焊接参数如何组合，则主要取决于工艺性，即操作过程的稳定性和良好的成形等。对于GMAW、FCAW-G而言，要求焊接速度与送丝速度匹配良好。

目前，最科学、最适用的技术就是多层多道错位焊接技术。该技术的实质就是控制焊接热输入量。高强钢的部分高强度是在热轧工艺中采用加速冷却将能量储存在位错组织中而获得的，这一能量在高温下可以释放，这样就会导致在焊接条件下产生存在于临界温度区间和亚临界温度区间的加热区，甚至在缓慢冷却的粗晶区的加热区中，形成硬度比母材金属低的区域，即软化区。软化会使接头的强度降低。

高强钢减少焊接热影响区停留时间，可获得优良的焊接接头质量。高强钢焊接不宜摆动，正确的操作方法就是采用多层多道错位焊接技术。该技术在F、H、O位置焊接，手法上不允许摆动，焊接厚度要明确规定，以限制焊缝的热输入量，一般规定：GMAW、FCAW-G每一道焊接厚度不超过5mm（通常为3~5mm）；SMAW用 A_v 值（1根焊条所焊焊缝的长度与焊条长度的比值）来确定每一道的焊接厚度，通常 $A_v \geq 0.6$ ，如图8所示。

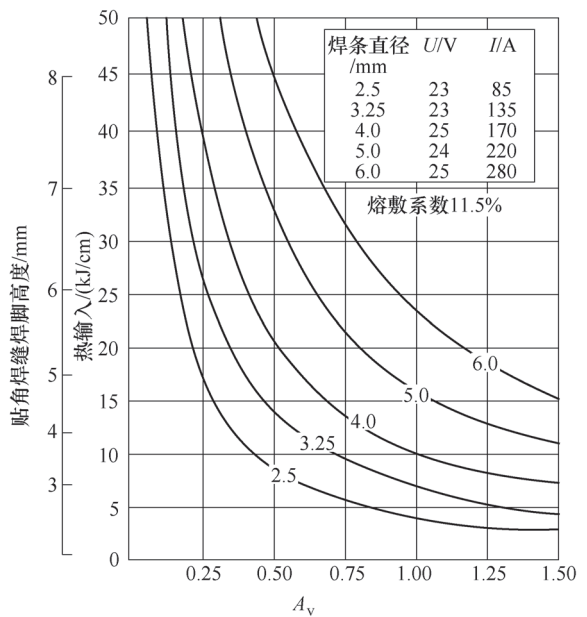


图8 A_v 值原理图

在V位置允许摆动，但限制摆幅：SMAW允许

摆动宽度为焊条直径的3倍；GMAW、FCAW-G允许摆动15~20mm。

多层多道错位焊接技术就是在多层多道焊接技术的基础上，加入焊接接头每一道次错位连接，即接头不在一个平面内，通常错位50mm以上。

这种技术特别适合于高强钢厚板的焊接。根据焊缝每一道的成形，可以准确地判断焊接热输入是否适当，凡是符合多层多道错位焊接技术参数的焊缝成形，焊接热输入都是适当的。实际中采用的多层多道错位焊接技术见表6。

表6 多层多道错位焊接技术

部位	焊接位置	焊道顺序
下翼缘	仰焊 (O)	
腹板	立焊 (V)	
中间隔板 上翼缘	平焊 (F)	

摆动运条在热影响区高温停留时间长，热输入增加，导致晶粒粗大，影响焊接接头的力学性能，特别是冲击性能显著下降；摆动运条由于对焊缝两侧反复加热和冷却，反复对根部焊缝和填充金属加载，影响了焊接接头的综合性能；直线运条可使高温在热影响区停留时间短，对焊缝没有反复加载的作用，同时可有效防止偏析；屈服强度超过400MPa的高强钢必须采用多层多道错位焊接技术，才能使焊接接头获得良好的综合性能。

4.5 焊接顺序确定

(1) 节点设计, 焊缝错开 使热影响区组织对结构危害降到最低的有効办法首先是从设计阶段入手, 错开焊缝, 使热影响区组织不在同一受力平面内, 牛腿预留程阶梯性设计。

(2) 统一合龙, 单侧焊接 钢梁安装完成后, 两侧卡板同时焊接, 对钢梁两侧相对进行约束, 而对于焊缝的强大拉力还处于相对自由状态, 避免因两侧同时焊接而产生拉应力形成的裂纹。

钢梁分为2个焊接施工区 (A区和B区), 两侧卡板同时焊接。每个焊接施工区域布置一个焊接施工班组, 保证每个班组的焊机数量与焊工人数相同, 焊接电流、电弧电压相同, 焊接速度尽量一致, 卡板焊接完成后, 开始焊接单侧接头。

针对钢梁的单个接头, 采用两人对称施焊, 要求保证焊接速度一致, 焊接电流、电弧电压等参数相同, 待焊缝温度冷却至常温时方可进行另一端的焊接。

(3) 腹板先焊, 自下而上 对于单个接头, 在编排焊接顺序时, “先焊内后焊外”是一个误区, 特别是在厚板焊接过程中, 如果先焊内部隔板再焊外部腹板, 此时腹板成为环焊缝的约束, 形成焊缝金属强大的拉应力场。就像斜Y形坡口焊接裂纹试验一样, 焊缝极有可能在焊接过程中出现裂纹。

钢梁采用先对称焊接腹板, 腹板焊接完成后, 再自下而上依次焊接下翼板、内部隔板1与隔板2, 最后焊接上部盖板, 钢梁焊接顺序如图9所示。

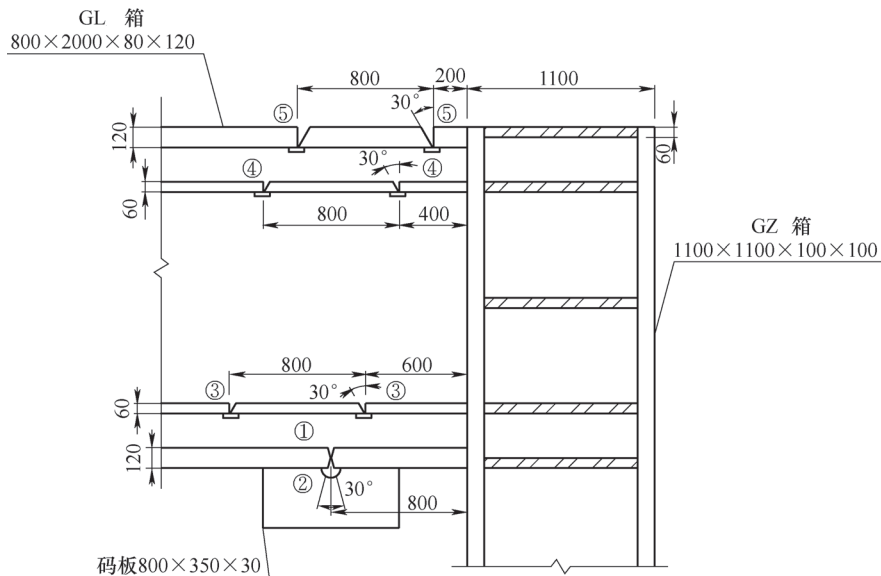


图9 钢梁焊接顺序示意

注: ①~⑤代表焊接顺序。

4.6 确保焊缝的一次合格率为100%

因为Q390C是典型的高强钢, 所以具有高强钢的一切特殊性。从理论上分析, 在Q390高强钢的焊接过程中, 由于各类元素及化合物熔点、沸点上的差别, 因此在高温区停留的时间不同; 微合金元素及其化合物气化在高温区停留的时间相对较长, 气化较Fe及Fe的化合物充分, 焊接过程中, 除焊接材料中水分蒸发外, 金属元素和熔渣中各种成分在电弧高温下也会蒸发形成蒸气。沸点越低的物质越容易蒸发, 各类元素沸点如图10所示。从图10可看出, 金属元素Zn、Mg、Bb、Mn的沸点较低。因

此, 在熔滴形成和过渡过程中最易蒸发。氟化物也因沸点低而易于蒸发。微量元素损失的程比Fe及Fe的化合物气化损失高得多, 这是一种比例失调的损失; 对焊接而言, 是多次进行相同或相似的热循环。分析认为, 热循环次数越多, 比例失调也就越严重 (工程实践中称微合金元素烧损)。

实践证明, 高强钢焊接接头一次焊接成功的焊缝比返工后的焊缝综合指标要好很多。完全可以这样理解: 高强钢焊接接头的强度、细化晶粒等指标同钢材的微合金元素密切相关。焊接热循环会造成合金元素的损失, 同时晶粒度变大, 因此多一次热

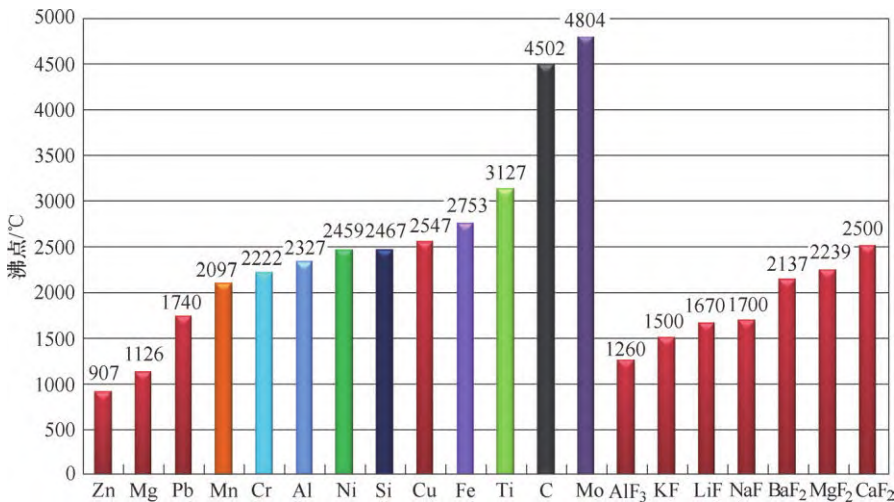


图10 各类元素沸点

循环，合金元素的损失就会增加，对焊接接头质量不利，必然降低焊接接头的综合性能。根据Q390C高强钢的这一特性，Q390C高强钢厚板焊接接头尽量避免返工，从而保证焊接接头的焊接质量。

4.7 保温消氢避免冷裂纹

Q390C高强钢具有淬硬倾向，是产生冷裂纹的危险性因素之一。冷裂纹具有3大特点：隐蔽性极强的延迟性（容易大规模暴发）；降低焊接接头的脆性转变温度，低温下易产生脆断；裂纹扩展后减少构件的断面尺寸，降低承载能力。

对于淬硬倾向高的Q390C高强钢，由于塑性变形能力低、金属中容易在缺陷处产生应力集中，诱发延迟裂纹不仅所需的临界应力低，而且临界氢含量也低，所以裂纹倾向大，本工程必须考虑焊后保温消氢处理，其原理如图11所示。

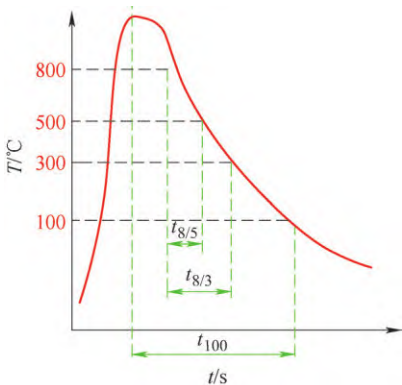


图11 消氢处理原理

t_{100} 是焊缝中扩散氢逸出的时间，理论上越长越好，如果采用加大焊接热输入的方式来延长 t_{100} ，那么 $t_{8/5}$ （800℃冷却到500℃的时间）、 $t_{8/3}$ （800℃冷

却到300℃的时间）同时延长，焊缝及热影响区晶粒会变粗大，焊接接头的综合性能变差，降低了质量指标，得不偿失。但在焊接完成后重新加热到250℃后保温缓冷，可以延长 t_{100} ，同时又不影响 $t_{8/5}$ 、 $t_{8/3}$ ，而且还能使扩散氢充分逸出，从而消除氢致裂纹（冷裂纹）的产生^[3]。

消氢热处理加热温度应达到250~350℃，在此温度下保温时间依构件板厚而定，应为每2mm板厚0.5h，且 ≥ 1 h，然后使之缓慢冷却至常温^[4]，见表7。

表7 Q390C高强钢消氢热处理工艺参数

厚度/mm	后热温度/℃	保温时间/h
120	250	2.5
80	250	2
60	250	1.5

5 结束语

- 1) 钢梁焊接过程中因严格按制定的焊接工艺执行，其焊后的结构几何参数都达到了预期效果，焊后未引起明显结构变形及焊缝开裂现象。
- 2) 焊接时采用CO₂气体保护焊，焊缝美观，腹板没有起鼓，局部不平度均在规范要求内。
- 3) 内部质量检查中，一类焊缝共计86.4m，使用焊丝900kg，一次性合格率达到100%。

随着绿色建筑行业的蓬勃发展，以及高层、超高层、框架式钢结构的大面积的应用，大型目字形梁会时常出现于工程中，此焊接方案的成功实施，证明其可在类似钢结构现场施工中推广应用。

（下转第88页）

连接和拆卸,可以满足现场长焊缝的连续焊接。设备具有位置传感功能,能够自动检测焊缝的具体位置、钢板厚度、根部间隙及坡口角度等信息^[5]。焊接数据库存储有各种焊接位置和坡口形式的工艺数据,能够根据板厚、坡口形式和焊接位置自动匹配焊接参数,包括焊接电流、电弧电压、焊接速度、摆动幅度、摆动频率、焊缝层数及焊道排布等。焊接过程中通过电弧跟踪及时修正局部焊接轨迹的偏移。机器人总体智能化程度高,操作界面友好,便于操作,能有效减少工人的劳动强度,提高焊缝质量。



图7 桥位环焊缝机器人焊接

试验过程中也发现节段间环缝采用机器人焊接存在的问题。当背面贴陶瓷衬垫的横位对接焊缝打底焊道焊接时,由于陶瓷衬垫不导电,衬垫与液态金属不浸润,横位焊接时熔池在重力作用下向下流动,电弧控制难度很大,机器人无法在焊接过程中根据熔池情况自动调整动作,很容易出现断弧情况,因此无法直接采用机器人焊接,需要人工进行打底焊,后续填充、盖面焊道采用机器人焊接。另外,由于内外壁板间空间狭小,且密集分布着加劲肋、圆柱头焊钉和钢筋,不具备在内侧进行马板定位的条件,焊接在钢壳外侧的马板阻碍机器人连续施焊,因此也需要先人工进行打底焊。人工打底时

要注意焊缝外观,应使焊缝表面平顺,焊缝厚度均匀一致,否则应进行打磨,以免影响对机器人的自动检测和焊接稳定性。

6 结束语

1) 索塔钢壳焊接工艺评定试验采用的自动化焊接设备和工艺,焊接的接头力学性能满足标准要求。

2) 通过采取板单元机器人反变形船位焊接、合理安排焊接顺序、采用先进的小型机器人焊接设备、制定合适的焊接参数等措施,能有效提高钢壳塔的焊接质量。

3) 受钢壳塔复杂工况的限制,部分焊缝在尽量采用机器人焊接的同时辅以人工焊接,可以取得更好的效果。

参考文献:

- [1] 席刚. 斜拉桥钢壳混凝土索塔的质量控制[J]. 福建建材, 2017 (5): 67-69, 87.
- [2] 张永江, 徐向军, 张续彬, 等. 曲线形双层索塔钢壳焊接工艺研究[J]. 焊接技术, 2023, 52 (5): 61-64.
- [3] 瓦强林, 姜红, 罗永贵, 等. 机器人焊接技术在钢桥制造中的运用[J]. 今日制造与升级, 2023 (12): 67-70.
- [4] 戴为志, 俞海涛, 王继文, 等. 钢结构焊接机器人的现状及发展方向[J]. 金属加工 (热加工), 2021 (12): 7-12.
- [5] 马晓健, 范军旗. 小型焊接机器人在港珠澳大桥制造中的应用[J]. 金属加工 (热加工), 2015 (22): 33-34.

MW 20240815

(上接第83页)

参考文献:

- [1] 曾乐. 现代焊接技术手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1993.
- [2] 戴为志, 刘景凤. 建筑钢结构焊接技术“鸟巢”焊接工程实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [3] 戴为志, 孔建平. 国家体育场(鸟巢)钢结构安装

工程焊接质量控制的有效途径[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构焊接规范: GB 50661—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

MW 20240608