

钢结构多层多道错位焊接技术研究

浙江精工钢结构有限公司 (绍兴 312030) 黄幼仙

【摘要】 为了进一步从理论上研究“多层多道错位焊接技术”，针对该技术争议较大的“运条技术”，我公司进行了试验研究，揭示了该项的真正内涵。

一、概述

随着建筑钢结构工程对钢材强度要求的不断提高，国内高层钢结构中大多采用的Q345钢已经不能满足一些高层钢结构的要求。北京新保利大厦钢结构工程中首次在国内大规模采用了从卢森堡进口的ASTM A913Gr60钢（相当于国内的Q420钢）；国家体育场（鸟巢）结构工程首次采用100mm、110mm厚的Q460E—Z35高强度特厚钢板；即将开始的某工程首次采用了Q390GJC（120mm、150mm）、Q420GJC（120mm、 $\sigma_b > 500\text{MPa}$ ）、Q460GJC（120mm、 $\sigma_b > 550\text{MPa}$ ）钢材。

新钢种的层出不穷，各类高强度建筑结构钢、船板钢、压力容器钢、管线钢、桥梁钢、耐热钢和低温钢等，都会沿着“鸟巢”用Q460E—Z35高强度特厚钢板的研制道路进一步升华，将通过钢液精炼和控轧控冷（TMCP）等先进工艺，向“低碳、微合金化、洁净化、细晶粒化”方向发展，提高钢材的强度和韧性，这将是我国钢铁工业发展的基本技术路线。

“中国2006~2020钢铁科学与技术发展指南”中明确提出，将逐渐稳定生产屈服强度400~800MPa，抗拉强度600~1400MPa级高强度高韧性钢材，以及提高强度1~4倍的所谓21世纪超级钢；随着高强钢和超高强钢的推广应用，将冲击传统焊接设计理念；钢材的不断发展和进化，必将对钢结构焊接技术提出新的更高的要求，而首要的就是迅

速推广“多层多道错位焊接技术”。

二、“多层多道焊接技术”的技术内涵

我公司在国家体育场“鸟巢”钢结构焊接工程中，从焊接技术应用理论上进行论证，加强了理论知识培训的力度，进一步统一了“鸟巢”钢结构高强度、厚板焊接操作手法。

打底焊采用SMAW（焊条电弧焊），主要有两个目的：一是解决GMAW干伸过长影响焊接质量的矛盾，提高打底焊缝成形质量；二是SMAW同GMAW相比较，焊缝稀释率相对较低，这对提高焊缝金属的综合指标比较有利。

填充焊采用GMAW（实芯 CO_2 气体保护焊），主要目的是利用GMAW的高效及熔深相对较大的优点，提高焊接质量和效率。

盖面焊采用FCAW—G（药芯 CO_2 气体保护焊），主要是提高焊缝的表面质量，获得良好的观感效果。

同时规定除立焊以外的所有焊缝不准摆动运条，焊条电弧焊（SMAW）用AV值（一根焊条所焊焊缝的长度除以一根焊条除去焊条头的长度的数值） ≥ 0.6 来控制； CO_2 气体保护焊（GMAW、FCAW—G）每一层的厚度为3~5mm，；立焊允许摆动，但是焊条电弧焊（SMAW）允许摆幅不超过焊条直径的3倍； CO_2 气体保护焊（GMAW、FCAW—G）摆幅为15~20mm；“鸟巢”人把这种适合于低合金高强度钢焊接的规定称为建筑钢结构

焊接技术的“葵花宝典”。

国家体育场“鸟巢”钢结构焊接工程的焊接质量,得到了国内外焊接界的一致好评,充分证明了该技术的先进性和可靠性。

三、高强钢多层多道焊接技术试验研究

为了进一步从理论上研究“多层多道错位焊接技术”,针对该技术争论较大的“运条技术”(不摆动、小摆动、大摆动),我公司进行了研究试验,揭示了该项技术的真正技术内涵。

1. 试验过程

(1) 试验内容 ①选取两组平焊试件,焊缝坡口形式采用MC-BL-2,焊缝间隙为25mm。其中试件 F_1 采用直线形运条法进行焊接;试件 F_2 采用月牙形大摆动运条法进行焊接。②选取两组立焊试件,焊缝坡口形式采用MC-BL-2,焊缝间隙为25mm。其中试件 V_1 采用锯齿形大摆动运条法进行焊接;试件 V_2 采用锯齿形小摆动运条法进行焊接。③试件焊接完毕后,在每件试件上制取两件拉伸试件、6件冲击试件及1件金相试件进行试验,对通过试验所获得的数据进行对比,论证不摆动焊接与大摆动运条法之间的优缺点。

(2) 试验材料 钢材选用Q345C,焊材选用如表1所示。

表1 焊接材料选用

试件编号	焊接方法	焊材牌号	焊条直径/mm	备注
F_1	SMAW	E5015	4.0	组立、焊接
F_2	SMAW	E5015	4.0	组立、焊接
V_1	SMAW	E5015	4.0	组立、焊接
V_2	SMAW	E5015	4.0	组立、焊接

(3) 坡口的制备 为了避免火焰切割对焊接接头性能的影响,采用坡口加工机进行试件的坡口加工,形式如图1、图2所示。

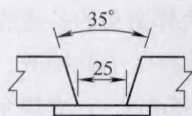


图1 坡口角度

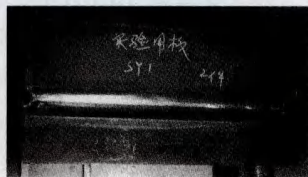


图2 试板的组装

(600 mm × 300 mm × 20mm)

(4) 焊接参数 SMAW焊接参数如表2所示。

表2 焊接参数

试件编号	焊条牌号	焊条直径/mm	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 v/cm·min ⁻¹	热输入量 /kJ·cm ⁻¹ (供参考)
F_1	E5015	4.0	180~190	24~26	25~32	8.10~11.96
F_2	E5015	4.0	180~190	24~26	10~14	18.51~29.64
V_1	E5015	4.0	135~150	16~20	8~12	10.80~22.50
V_2	E5015	4.0	135~150	16~20	16~22	5.89~11.20

(5) 试件组装 试件按图3进行组装,固定支架起固定和支撑作用,可采用定位焊。在试件焊缝坡口两端设置引弧板、引出板。

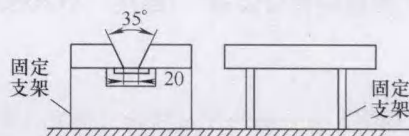


图3 试件组装示意

(6) 试件焊接 焊接时,焊接技师应严格按照试验思路设计的焊接手法进行焊接,以便更好的保证试验的严谨性,操作要领如图4所示。焊接时按要求中规定的焊接参数、焊接手法进行焊接,层间温度控制在150~250℃。

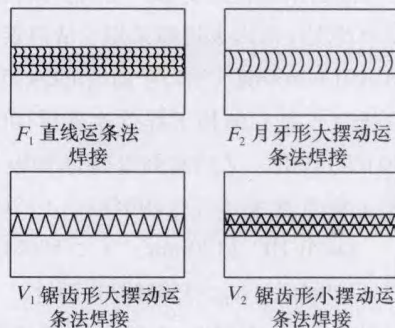


图4 焊接摆动运条法

(7) 试样 焊接试样成形质量如图5所示。

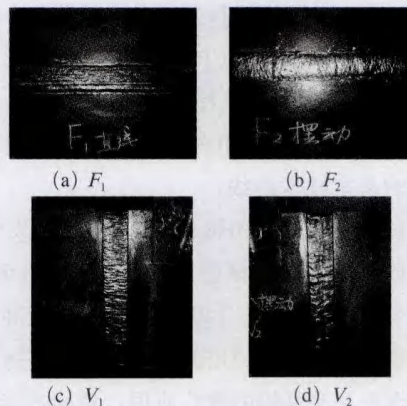


图5 焊接试件

(8) 试件制备 试件的加工尺寸遵照《建筑钢

结构焊接技术规程》(JGJ81—2002) 5.4.1-1条款的规定进行制作, 试件取样数量如表3所示。

表3 试件取样数量

试件编号	拉伸试样/件	冲击试样/件	宏观金相试样/件
F_1	2	6	1
F_2	2	6	1
V_1	2	6	1
V_2	2	6	1

2. 试验结果

(1) 力学性能 拉伸性能、冲击性能如表4、表5所示。 F_1 的抗拉强度比 F_2 高了20.52%, V_2 的抗拉强度比 V_1 高了23.86%。 F_1 的冲击韧性比 F_2 高了85.51%, V_2 的冲击韧性比 V_1 高了53.35%, 随着试件钢材强度增大, 这种差距会更加明显。

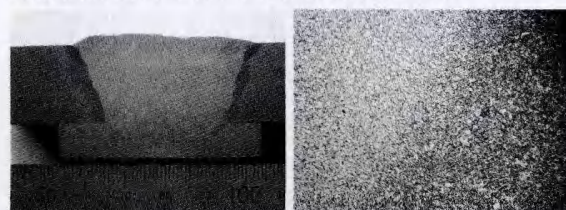
表4 拉伸力学性能 (单位: MPa)

样品编号	技术要求	检测结果 (HAZ)	平均值	比较
100154 (F_1) 直线形运条	≥ 470	558	584	$F_1 - F_2 = 584 - 471.5 = 112.5$
100154 (F_2) 大摆幅运条		610	471.5	
100154 (V_1) 大摆幅运条		456	480	$V_2 - V_1 = 578.5 - 480 = 98.5$
100154 (V_2) 小摆幅运条		487	578.5	
		493		
		467		
		570		
		587		

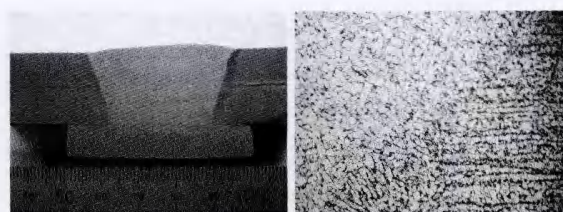
表5 冲击韧性 (单位: J)

样品编号	检测结果	平均值	比较
100154 (F_1) 直线形运条	50 51 55 平均52 56 48 55 平均53	52.5	$F_1 - F_2 = 52.5 - 28.3 = 24.2$
100154 (F_2) 大摆幅运条	26 24 27 平均25.6 26 34 32 平均31	28.3	
100154 (V_1) 大摆幅运条	25 23 25 平均24.3 28 16 22 平均22	23.15	$V_2 - V_1 = 35.5 - 23.15 = 12.35$
100154 (V_2) 小摆幅运条	42 34 33 平均36 38 32 46 平均35	35.5	

(2) 金相组织 F_1 、 F_2 、 V_1 、 V_2 试件的金相照片分别如图6、图7、图8、图9所示。



(a) 宏观金相 (b) 微观金相
图6 F_1 直线运条法

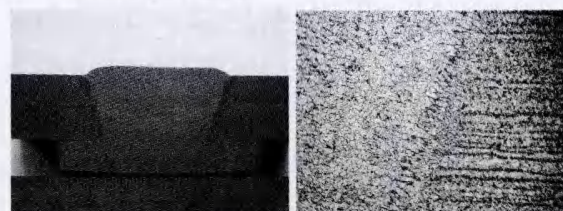


(a) 宏观金相 (b) 微观金相
图7 F_2 月牙形大摆动运条法

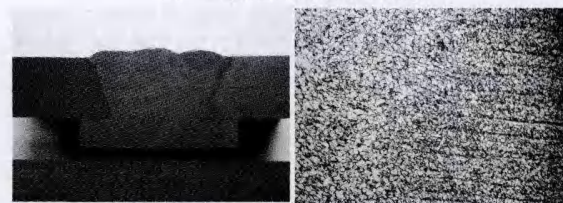
F_1 直线形运条法试件的宏观金相: 采用冷酸法对试样焊缝区域进行宏观金相检验, 经观察焊缝区、熔合线和热影响区均无微小裂纹、气孔、夹渣等缺陷。微观金相, 焊缝区: 由片状铁素体+珠光体组成, 组织均匀分布, 晶粒度等级为10.8。热影响区: 由针状铁素体+珠光体组成, 晶粒度等级为11.5。

F_2 月牙形大摆动运条法试件的宏观金相: 采用冷酸法对试样焊缝区域进行宏观金相检验, 经观察焊缝区、熔合线和热影响区均无微小裂纹、气孔、夹渣等缺陷。微观金相, 焊缝区: 由片状铁素体+珠光体组成, 组织均匀分布, 晶粒度等级为9.8。热影响区: 由针状铁素体+珠光体组成, 晶粒度等级为10.5。

由 F_1 直线形运条法试件和 F_2 月牙形大摆动运条法试件可以看出, 两种试件的焊缝区和热影响区的组织成分相同, 但是 F_2 试件的焊缝区和热影响区的晶粒比 F_1 的粗大, 主要原因是由于直线运条法焊接时热输入较小, 阻止了柱状晶的增长, 且多层多道焊接时, 后道焊缝给前道焊缝进行了多次回火处理, 使晶粒得到细化。



(a) 宏观金相 (b) 微观金相
图8 V_1 锯齿形大摆动运条法



(a) 宏观金相 (b) 微观金相
图9 V_2 锯齿形小摆动运条法

V₁月牙形大摆动运条法试件的宏观金相：采用冷酸法对试样焊缝区域进行宏观金相检验，经观察焊缝区、熔合线和热影响区均无微小裂纹、气孔、夹渣等缺陷。微观金相，焊缝区：由片状铁素体+珠光体组成，组织均匀分布，晶粒度等级为10.3。热影响区：由针状铁素体+珠光体组成，晶粒度等级为10.5。

V₂小摆动运条法试件的宏观金相：采用冷酸法对试样焊缝区域进行宏观金相检验，经观察焊缝区、熔合线和热影响区均无微小裂纹、气孔、夹渣等缺陷。微观金相，焊缝区：由片状铁素体+珠光体组成，组织均匀分布，晶粒度等级为10.7。热影响区：由针状铁素体+珠光体组成，晶粒度等级为11.6。

由V₁月牙形大摆动运条法试件和小摆动运条法试件可以看出，两种试件的焊缝区和热影响区的组织成分相同，但是V₁试件的焊缝区和热影响区的晶粒比V₂粗大，V₂试件的晶粒尺寸较小，晶粒细化均

匀，主要原因是立焊时锯齿形小摆动焊接阻碍了晶粒的长大，晶粒比较细小，后道焊缝使晶粒又得到了充分地细化。

四、结语

(1) 摆动运条HAZ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。

(2) 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热，影响了焊接接头的综合力学性能。

(3) 直线运条可使高温在HAZ停留时间短，对焊缝没有反复加热的作用，同时有效地防止偏析。

实践证明，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”，使焊接接头获得良好的综合力学性能。**MW**

(20120423)

(上接50页)

(11) 突破了冷却液过板循环冷却，变舱内作业为舱外操作，简化了工作程序，提高了生产效率。

四、实船试验数据

现已将液体冷却铜滑块及装置用在30 000t、35 000t、93 000t等散装货船上进行了船体大合拢口焊接。

在30 000t系列散装货船，船体大合拢口中就先后切割、焊接了619.2m，从焊前准备到焊接结束总用时才6192min，仅仅不到10天时间就保质、保量、保节点地完成了切割和焊接。

35 000t散装货船、系列船中共切割、焊接约500m焊缝。且每条焊缝10m，用时约3h，均一次性完成船体大合拢口焊接。

93 000t散装货船HBC、TBC、WBC等四条系列船中共切割、焊接约500m焊缝。且每条焊缝20m，用时约6h，均一次性完成船体大合拢口焊接。

在保证焊枪角度 $\geq 5^\circ$ （摆动器上面刻度），液面距出气口5mm，反面滑块松紧适当的情况下，

不同的板厚焊接电流、电弧电压等焊接参数的变化如附表所示。

焊接参数

名称 板厚/mm	焊接电流 /A	电弧电压 /V	摆幅 /mm	正、背停/mm
10~18	340~360	34~36	—	—
18~22	360~380	36~38	4~6	0.5、0.2
22~28	380~400	38~40	6~9	1.2、0.6
28~32	400~450	40~45	9~11	1.4、0.8

五、结语

在对30 000t、35 000t、93 000t散装货船，船体大合拢口焊接跟踪调查得出：平均焊接10m焊缝，用时约3.65h。所使用的16块滑块无一损坏，经久耐用。

省去了舱内贴衬垫的人员，焊后修补量降低了90%。浮渣少了、中断焊接次数降低了、烧穿少了，返修率降低了，效率提高了3倍之多。

此次革新，对船体大合拢口焊接不但成本低，安装方便，操作简单，而且节能、环保、生产质量好，效率高，具有很好的推广和应用价值。2011年“推广和应用液体冷却铜滑块的研制”项目获国家级QC科技创新成果奖。**MW** (20120520)