

# 法兰克福机场超厚构件焊接裂纹控制技术

舒旭春, 申文志

(浙江杭萧钢构股份有限公司, 浙江 杭州 311203)

**[摘要]** 法兰克福机场空铁中心采用60~80mm S355K2超厚构件,属独特的空间结构,其技术要求高、结构类型多、构件板超厚,异形超厚构件焊接时有很强的焊接裂纹倾向,给工程的焊接施工带来很大难度。通过对焊接构件的结构及技术分析,拟定了控制其焊缝焊接裂纹的一系列措施,并在焊接施工过程中进行试验及优化,最后形成了一套完整可行的控制S355K2超厚构件焊接裂纹的工艺,使构件质量达到德国验收标准的要求。

**[关键词]** 法兰克福机场; S355K2超厚构件; 焊接裂纹; 焊接技术

**[中图分类号]** TU758.162

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1002-8498(2010)08-0133-03

## Welding Crack Control Technology for Extra-thick Members of Frankfurt Airport

Shu Xuchun, Shen Wenzhi

(Zhejiang Hangxiao Steel Structure Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311203, China)

**Abstract:** S355K2 extra-thick members whose thickness is more than 60mm for Airrail Center Frankfurt (ARC) project belong to special space structure with high technical requirement, various structural type and extra thickness. Crack is easy to occur during welding, so welding and crack control is very difficult. Through structural and technical analysis, a series of measurements are made and trial and optimization during welding to control welding crack are done. Finally, a set of feasible technical process to control welding crack for extra-thick S355K2 members is generated, and the quality meets requirements of Germany inspection and acceptance standard.

**Key words:** Frankfurt Airport; S355K2 extra-thick member; welding crack; welding technology

### 1 工程概况

法兰克福机场空铁中心工程项目是欧洲第二大机场——法兰克福机场最大的扩建项目,该工程位于德国法兰克福,与机场候机大厅通过一个长廊相连,空铁中心底层为德国高速铁路ICE大型站台,二层为候车大厅,三层以上为各大功能区,是集交通、办公、酒店、商业零售和餐饮等五大功能于一体的综合建筑,共10层(见图1)。空铁中心是机场连接欧洲各国及各大城市的重要交通枢纽,工程所用材料全部为欧洲标准材料,工程制造及安装完全按照欧洲EN标准及德国标准DIN18800-7进行。



图1 空铁中心效果

Fig.1 Airrail Center Frankfurt

空铁中心工程造型独特、结构复杂、所用材料特殊,其主体结构为结构独特的空间桁架钢结构体系(见图2),其中大截面异形焊接结构占工程总量的80%以上,主体结构材料为欧洲标准材料S355K2,壁厚为20~120mm,以60~80mm的板厚为主,最大单体重量58.48t,构件大部分是结构复杂的钢结构超厚焊接构件。

### 2 结构特点及技术难点

#### 2.1 结构特点

本项目主体为异形——亚形柱梁+桁架空间结构,其异形构件结构特点如下。

1)第1种类型为亚形柱梁构件(见图3) 构件大而厚,截面外形尺寸>500mm,最大板厚120mm,且以

[收稿日期] 2010-06-20

[作者简介] 舒旭春,浙江杭萧钢构股份有限公司副总工程师,高级工程师,浙江省杭州市萧山经济技术开发区 311203,电话:(0571)82645988, E-mail:gy2650@163.com

全焊透结构为主,焊缝的焊接裂纹倾向非常大。

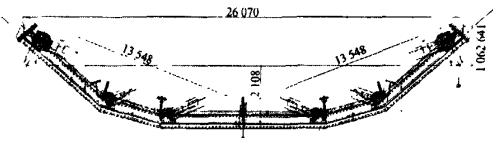


图 2 空间桁架钢结构体系

Fig.2 Steel structure system for truss

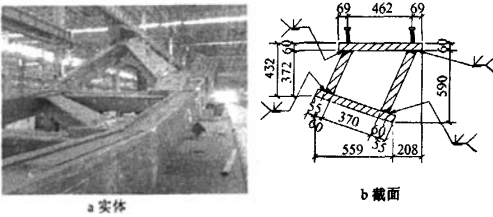


图 3 亚形柱梁示意

Fig.3 The columns and beams

2)第2种类型为叠焊组合结构(见图4),其腹板的叠焊焊缝总厚度达到760mm,单侧焊接造成应力集中,导致焊缝及热影响区的裂纹倾向非常大。

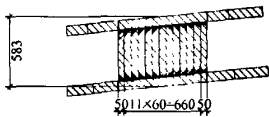


图 4 叠焊组合结构

Fig.4 Overlapping welding structure

3)第3种类型为小角度厚板桁架结构(见图5),由于弦杆与主杆焊接角度非常小,仅29°,板厚达到80mm,拘束度非常大,导致小角度拐角焊接难度非常大,焊缝熔合线及热影响区的裂纹倾向非常大。



图 5 小角度厚板桁架结构

Fig.5 Structure of small angle truss

### 2.2 技术难点

1)本工程所用材料主体为为欧洲标准低合金结构钢 S355K2 钢板,壁厚 20 ~ 120mm,以 60 ~ 80mm 板厚为主,厚度 ≥ 60mm 的钢板约占 60%。厚度 ≥ 60mm S355K2 超厚板焊接时有很强的焊接裂纹倾向。

2)构件焊缝在 -20℃ 试验条件下冲击功  $A_{kv}$  应不低于 40J。这样高的焊缝冲击韧性要求,给构件的焊接

施工工艺及过程控制带来很大难度。

3)超厚构件主要焊缝为全熔透焊缝,同时构件又为空间结构,构件出厂前需进行预拼装,对尺寸精度的要求很高,制定焊接施工工艺时需增加构件拘束度以减少构件变形,而增加构件拘束度又增大了构件的焊接裂纹倾向,对控制焊接裂纹不利。

4)焊缝须 100% 探伤。

### 3 焊接裂纹控制技术

#### 3.1 焊接施工工艺

1)采用富氩混合气体保护焊工艺以增加超厚构件焊缝的冲击韧性值及抗裂性。

2)为保证异形超厚构件较小的焊接变形,规则构件全熔透焊缝采用富氩混合气体保护焊打底并过渡 + 埋弧自动焊过渡并盖面的组合工艺;不规则构件全熔透焊缝采用富氩混合气体保护焊打底并过渡盖面的组合工艺。

3)小角度异形超厚构件桁架拐角焊缝采用低氢焊条手弧焊工艺,以防止出现焊接裂纹。

#### 3.2 焊接材料

1)气体保护焊焊接材料选用 G424MG3S1。

2)埋弧自动焊焊接材料选用 S424ABS3。

3)手弧焊焊接材料选用低氢焊条。

#### 3.3 异形超厚构件全熔透焊接坡口试验确认

由于 60mm 以上的钢板所占比重很大,所以要尽可能减小坡口,减少焊缝的填充量,减少焊接应力和变形以提高效率;另外需要考虑焊枪能够在根部有足够的摆动空间以保证根部焊缝的良好焊接条件。拟定了 3 种不同坡口角度(30°,35°,45°)和 3 种不同间隙(5, 6, 7mm),并进行相互组合试验。经综合比较,异形超厚构件全熔透焊接坡口最终选择 35°坡口角度和 6mm 间隙。

#### 3.4 工艺评定试验方案及试验

##### 1)分析

第 1,2 类超厚构件焊缝为全熔透焊缝,焊接填充量非常大,同时坡口受加工设备的影响只能选择单边 V 形坡口,钢板超厚而且构件焊后变形不易矫正,因而必须附加一些刚性固定导致焊缝的拘束度极大,加上 S355K2 材料等级高,因此,焊缝的开裂倾向非常大。

第 3 类超厚构件焊缝虽为角焊缝,但因构件超厚、桁架角度小、焊缝长度非常短且焊工操作位置狭小,因此,在小角度桁架焊缝位置,焊缝的开裂倾向非常大。

##### 2)工艺评定方案

根据以上材料、结构特点、分析及试验,对各种异形——亚形柱梁 + 桁架空间结构,拟定了以下工艺评定方案:①对亚形柱梁结构超厚构件采用反变形 + 部

分刚性固定+严格控制焊接工艺方案;②对叠焊组合结构超厚构件采用内外局部工装固定+严格控制焊接工艺方案;③对小角度厚板桁架结构超厚构件拐角焊缝采用低氢焊条手弧焊+严格控制焊接工艺方案。

3) 焊接工艺要点 ①焊前严格控制预热温度及层间温度,焊后保温等措施;每一个焊工配备对应温度的测温笔,每一焊接检验员及焊接监督配红外线测温仪;②多层多道焊时,严格控制道间间隙时间不超过8min;③焊工焊接时采用较低的线能量;④制取平板对接及产品模拟试件进行试验。经对上述3组试件焊缝100%的无损探伤检测,均达到了相应的标准要求。

### 3.5 产品试应用

对第1批投产的2个60/80mm亚形柱结构超厚构件、1个叠焊组合结构超厚构件、1个小角度厚板桁架结构超厚构件拐角焊缝进行产品实物焊缝焊接过程全过程跟踪,并对完成后的焊缝在48h后进行了无损探伤检验,结果如下:①2个60/80mm亚形柱结构超厚构件焊接后,焊缝按EN1714标准经100%超声波探伤B级合格,按EN1291标准经100%磁粉探伤1级合格;②一个叠焊组合结构超厚构件第3块板焊接后,焊缝按EN1714标准经100%超声波探伤发现在第1块板根部出现2处焊接裂纹;③一个小角度厚板桁架结构超厚构件拐角焊缝,按EN1291标准经100%磁粉探伤后,发现部分焊缝出现焊接裂纹。

### 3.6 工艺优化

对后两种超厚构件,根据异形超厚构件焊接裂纹及变形情况,对焊接裂纹的原因进行了仔细分析。叠焊组合结构超厚构件的裂纹原因是:构件的焊缝为单侧焊缝,为了防止超标的变形,构件上增加了拘束措施,因而构件有很大的拘束度,第1块板焊接后,构件焊接应力未消除,当焊第2,3块板时,应力的叠加效应引起了第1块板根部的焊接裂纹。

小角度厚板桁架结构超厚构件拐角焊缝焊接裂纹的原因是:板厚引起的构件拘束度非常大,弦杆与主杆焊接角度非常小,普通低氢焊条焊缝不足以抵抗焊缝的开裂,加上焊接位置为横角焊且焊工的准备不足,是造成焊接裂纹的主要原因。

按以下方案进行优化:①对叠焊组合结构超厚构件,采取以下措施:焊接过程中严格控制焊接工艺及参数,采用小电流多层多道焊;层间温度严格控制在250℃以下;焊缝经100%UT及MT合格后,对第1块板焊接后马上进行一次热处理,消除焊接应力;之后两侧各1块板焊接后,焊缝经100%UT及MT合格后进行一次热处理。②对小角度厚板桁架结构超厚构件拐角焊缝,采取以下措施:手弧焊焊接材料改用超低氢特

殊焊条,增强焊缝的抗裂性;对焊工进行专项培训,焊前焊接模拟试件合格后,方可进行产品焊接;垫高构件一端,使焊接位置趋好。

### 3.7 优化结果

对采取工艺优化后的上述两类构件的第1支(批)进行了跟踪,其焊缝焊接裂纹均得到了有效控制或消除,后续大批超厚构件按上述要求进行控制后,全部焊缝探伤通过了相关的欧洲标准并安装就位。

## 4 结语

对于德国法兰克福机场空铁中心钢结构项目,S355K2超厚构件的焊接裂纹控制技术是整个项目中最关键的技术之一,这个项目焊接施工难度在目前德国所有已建的钢结构项目中亦为罕见,经过大量的试验、探索、项目实践及总结,结论如下。

1) 对异形超厚构件来说,合适的坡口既减少焊缝的填充量,又减少焊接应力和变形,降低其焊接裂纹倾向,并能保证超厚构件焊缝的质量及提高生产效率。

2) 对S355K2异形超厚构件,选择合理的焊接工艺并执行严格的过程控制是控制焊接裂纹的关键。

3) 对不同结构的S355K2超厚构件,当采取合适的工艺及附加工艺措施后,其焊接裂纹可得到有效的控制和消除。

### 参考文献:

- [1] 陈伯鑫. 金属焊接性基础[M]. 北京:机械工业出版社,1982. Chen Boli. Basis of welding for metal [M]. Beijing: China Machine Press,1982. (in Chinese)
- [2] 张金昌. 锅炉、压力容器的焊接裂纹与质量控制[M]. 天津:天津科学技术出版社,1985. Zhang Jinchang. Welding crack and quality control for boiler and pressure vessel [M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press,1985. (in Chinese)
- [3] 俞海良,芦凤桂,苏冬梅,等. 热输入对焊缝金属组织性能影响的预测及试验研究[J]. 焊接技术,2008,37(2):57-60. Yu Hailiang, Lu Fenggui, Su Dongmei, et al. Prediction and study of effect of heat input on microstructure and properties of weld metal [J]. Welding Technology, 2008, 37(2): 57-60. (in Chinese)

### 兰渝铁路兰州枢纽单线最长黄土隧道贯通

7月26日上午,兰渝铁路兰州枢纽最长黄土隧道——枣树沟一号隧道贯通。本隧道属于双层集装箱单线隧道。位于兰州市城关区盐场堡街道与青白石乡交界带,地貌属低中山区,地形起伏,隧道为单线中长隧道,隧道全长2 037m。中部位于半径800m的曲线上,线路依次分布在11.7‰,11.2‰,11.7‰的单面坡上;隧道范围内沟谷发育,黄土裸露,交通较为不便,而且地处典型的西北湿陷性黄土地质。采用三台阶七步开挖法施工,保证了隧道施工的安全、质量、环保等重要指标。