

钢桥梁厚板单元无马板对接焊接变形控制工艺研究

白兴海, 张文才

中铁宝桥集团有限公司 陕西宝鸡 721006

摘要: 在钢结构桥梁项目施工过程中的低合金高强钢厚板单元对接时, 对接头特征、焊接方法等焊接变形影响因素进行分析, 通过过程跟踪、工艺方案改进的过程控制, 最终实现工艺措施改进, 使该项目板单元厚板无马板对接时的焊接变形得到了有效控制。

关键词: 厚板; 无马板对接; 单面焊双面成形; 焊接变形

1 序言

北京长安街西延线永定河特大桥外形如图1所示, 钢塔为边截面空间扭曲钢柱, 主桥钢梁为变宽、变高的拱形结构。钢塔、钢梁结构采用Q420qE、Q345qE钢板, 钢塔壁板、钢梁顶板、底板、腹板存在大量的30mm、36mm、40mm、46mm、52mm和56mm厚钢板, 且钢塔壁板、钢梁顶板、底板、腹板均由多块有一定扭曲线型的板单元组成。单块板单元轮廓尺寸也相对较大, 一般为10000mm×14000mm, 重量均在20~35t, 每个板单元均由3块或4块子板单元组成。钢塔、钢梁的节段均需板单元经过子板单元对接后再参与节段整体总拼, 为了保证每个板单元对线型的要求, 制作过程中需有专用的胎型, 将板单元固定在专用胎型上焊接, 从而为保证节段线型精度奠定基础(见图2)。



图1 永定河特大桥外形



图2 扭曲板单元胎架上组焊

2 焊接工艺

由于钢塔壁板单元、钢梁底板单元、外侧腹板单元均属结构外观构件, 需保证板单元接宽后外露面平整, 并尽量保持原始钢板表面, 因此在板单元对接时需采用无马板(以下简称“无马”)对接方法, 避免对钢板表面产生损伤。低合金钢厚板单元对接时, 考虑其钢板厚度较大, 焊缝长度较长, 焊缝质量等级为一级, 焊缝质量要求严, 焊接时大量的熔敷金属填充等问题, 存在极高的焊缝质量风险; 另外, 板单元均具有一定的曲线线型要求, 无法采取多次翻身对称焊接的方式来控制焊接变形。因此, 针对此类厚板单元且要实现无马对接, 则需借助胎型实现。

首先, 组拼前对子板单元对接边进行检查、矫平, 保证其满足对接要求; 其次, 需采取千斤顶和配重块调节对接错台来实现无马组装。为满足板单元对接时一级焊缝质量要求, 面对如此大量的焊缝

填充量,既要保证焊接质量和焊缝一次无损检测合格率,又要提高生产效率,因此首选埋弧焊焊接。另外,为满足板单元对线型的要求,需根据板单元线型制作相应的符合板单元线型趋势的胎型,使板单元在胎型上焊接,以此来满足板单元对线型的要求。由于板单元无法通过多次翻身进行对称施焊来控制变形,故板单元对接坡口形式只能选择单V形坡口。综上所述,板单元对接时采取在专用胎型上焊接,接头形式采取单V形50°坡口,留6mm间隙,焊接工艺采取实芯焊丝气体保护焊打底焊接两层,厚度为8~10mm,采用埋弧焊填充、盖面。

3 实际制作工艺研究

采取上述工艺进行焊接后,板单元均在焊缝处出现较大变形,给后序矫直带来极大难度和挑战。反复火焰矫直不但影响焊缝及母材性能,而且给工期进度带来极大制约。为此,需对工艺执行过程进行原因分析、过程跟踪、数据分析和研究,对工艺措施进行改进,从而解决变形问题。

3.1 影响因素分析

(1) 材料因素 通常来说,焊接材料和母材均为金属制品,金属特有的热物理性能参数和力学性能参数都对焊接变形的产生过程有重要影响,其热属性决定了材料的膨胀和收缩程度。材料的导热系数将直接决定焊接变形,一般导热系数越小,温度梯度越大,会导致材料更加容易变形。热膨胀系数不仅与材料变形相关,而且材料的力学属性会随着温度的变化而改变。通常情况下,较大的弹性模量会存储较大的变形能,所积累的残余应力更容易引起焊接变形^[1]。该项目中所用钢材均为TMCP钢,材质、成分及性能相对均衡,导热系数远小于铜合金或铝合金,因此低合金高强钢焊接时焊接热量引起的温度梯度对焊缝区域的变形影响较大。

(2) 焊接结构因素 焊接结构的设计是焊接变形影响因素中影响最大的、也是最复杂的因素。其总体原则是随拘束度的增加,焊接残余应力增加,而焊接变形则相应减少。焊接时,结构工件本身的拘束度是随着焊接的进行而不断变化的,一般来说,结构非常复杂时,其自身的拘束度在焊接过程中的主导作用将非常显著,且焊接结构越复杂,拘束度越大。因此,需要对为了增加结构刚性而增加

的筋板数量和位置进行优化处理,可适当减小焊接工作量,同时也能对焊接变形有削弱作用^[1]。该项目中板单元对接采用了无马对接,焊缝接头处拘束应力主要来自焊缝自身的变形和焊接应力、约束焊接变形的配重块和千斤顶传递给板块的外力。

(3) 焊接工艺因素 相对于焊接材料和焊接结构等因素来说,焊接工艺对焊接变形的影响要复杂多样。焊接工艺对焊接变形的影响包括焊接方法、焊接电流、电弧电压、构件的拘束度、焊接顺序及焊接胎架的应用等。其中焊接顺序对焊接变形的影响最为显著,一般情况下,改变焊接顺序可以改变残余应力的分布及应力状态,减少焊接变形^[1]。另外,多层焊以及焊接参数也对焊接变形有十分重要的影响。该项目中,厚板板单元采用了实芯焊丝气体保护焊打底焊接,厚度为8~10mm,采用埋弧焊填充、盖面的焊接工艺,因此在打底焊时气体保护焊热输入相对较小,所引起的焊接应力和变形也较小。但当选用埋弧焊时,采用的焊接参数较大,且焊丝直径相对较粗,因此所产生的焊接热输入较大,引起的焊接变形也较大。

(4) 对接焊缝角变形机理 焊接角变形产生的根本原因是焊缝处因焊接热输入而导致横向收缩变形在厚度方向的不均匀分布,使得钢板在两个表面受热程度不同,焊缝及其附近的温度很高,而远处大部分金属不受热,其温度还是室温,这样不受热的冷金属便阻碍了焊缝及近缝区金属的膨胀和收缩^[2]。在温度场和温度梯度影响下,冷却过程中因出现不均匀收缩而产生应力,在这个过程中焊缝金属及焊接热影响区金属由于各种原因可能发生比较复杂的体积变化,会在工件内部形成各种应力,进而对金属体积变化产生影响,最终形成焊接应力和焊接变形^[3]。该项目中板单元对接采用的是单面V形坡口,坡口根部焊缝熔敷金属量少,而坡口上部焊缝熔敷金属量相对较多,焊接热输入量大,会导致焊接接头的上部焊缝收缩变形大,下部焊缝收缩变形小,这样就造成了构件在平面上沿焊缝轴线偏转,即为焊接角变形,平板对接角变形如图3所示。

3.2 过程跟踪及数据汇总

根据以上因素分析,在工艺执行过程中选取有针对性的板单元,对不同厚度板单元焊接时的焊接参数、焊前对接间隙、焊后焊缝处收缩量及焊缝处

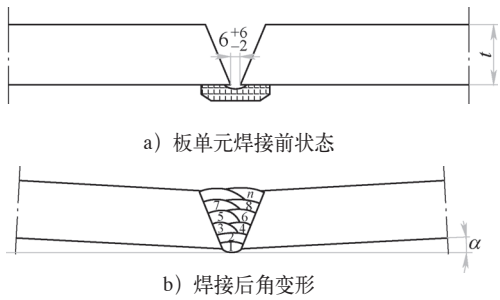


图3 平板对接角变形

角变形进行了跟踪记录（见表1），以此作为工艺措施改进研究的实践依据。

3.3 调整工艺及采取措施

根据表1中数据，为进一步控制厚板板单元无马对接焊接变形，在对焊接工艺进行必要调整的

时，采取其他方面的相应措施。一方面，对埋弧焊的焊接电流、电弧电压等焊接参数尽量采用偏下限值。针对不同板厚，在设置相应焊接收缩量量的同时，焊接前预设焊接反变形量，见表2；另一方面，当板单元完成无马对接保证无错台后，采取分段打底定位焊，保证板块的整体性和稳定性。通过外力施加一定的弹性约束，产生与焊接变形方向相反的应力，即沿焊缝纵向施加配重块，沿板单元长边方向设置弹性卡板，同时将板单元另一长边与胎架固定（见图4），使焊接过程中产生的焊接应力能缓慢释放，从而对焊接变形速率加以抑制，防止在焊接时短时间内产生过大、过快的焊接变形，同时综合降低焊缝内应力。

表1 焊接过程记录数据

板厚 /mm	焊缝长度 /m	打底		填充		对接间隙 /mm	收缩量 /mm	角变形量 /mm
		焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接电流 /A	电弧电压 /V			
30	13~15	260±20	28±2	630±30	30±2	5~7	2~4	40~50
36	12~15	260±20	30±2	650±30	30±2	5~8	3~4	50~70
40	11~14	280±20	30±2	650±30	30±2	6~8	3~4	60~75
46	11~14	290±20	30±2	680±30	30±2	5~8	4~5	70~80
52	10~13	300±20	30±2	680±30	30±2	6~8	4~6	70~85
56	10~12	300±20	30±2	680±30	30±2	7~9	5~6	75~90

表2 焊接参数控制

板厚 /mm	焊缝长度 /m	打底		填充		对接间隙 /mm	收缩量 /mm	预设反变形量 /mm
		焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接电流 /A	电弧电压 /V			
30	13~15	260±20	28±2	600±30	30±2	4~6	2~3	40~50
36	12~15	260±20	30±2	620±30	30±2	4~6	3~4	40~50
40	11~14	280±20	30±2	620±30	30±2	6~8	3~4	50~70
46	11~14	290±20	30±2	640±30	30±2	6~8	4~5	60~80
52	10~13	300±20	30±2	640±30	30±2	6~8	4~5	60~80
56	10~12	300±20	30±2	640±30	30±2	6~8	4~6	70~90

注：同厚度时，收缩量和反变形量根据焊缝长度在对应范围内做适当控制。

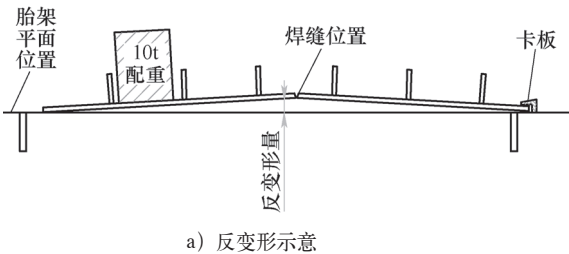
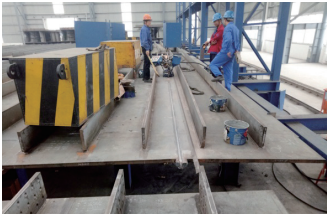


图4 焊接反变形措施

4 结束语

该项目进行低合金高强钢厚板单元无马对接焊接变形控制时，首先，从焊接参数选择上，尽量采用下限值，减少焊缝热输入量，从而在焊接热影

响方面降低焊缝焊接应力；其次，在板块组拼过程中需严格保证板块坡口尺寸和板块间对接间隙，不宜使坡口产生过大焊缝金属填充量和过大的对接间隙；最后，根据不同的钢板厚度和焊缝长度，需在

（下转第80页）

4 分析与讨论

根据ASTM E1150中关于疲劳的定义如下：疲劳是一个在交变应力或者交变应变的条件下从局部开始发生、逐步发展的，会造成金属零部件或者材料结构不可逆改变的形成裂纹或断裂的过程。对于螺栓而言，存在一个交变应力门槛值，只要交变应力低于这个门槛值，则无论循环次数是多少，螺栓都不会发生断裂。其门槛值的应力幅值被称之为“疲劳极限”。螺栓疲劳断裂有两种情况，一种是被联接件没有分离，也就是交变应力幅值小于预紧力；二是预紧力小于交变应力幅值。拧紧螺栓受到外部交变应力作用时螺栓和紧固件的受力分析如图9所示。

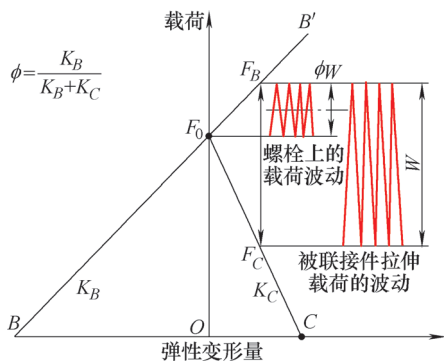


图9 被联接件拉伸交变应力与轴向预紧力间的关系

综上所述，无论外部载荷的大小是多少，连杆螺栓在发动机运转过程中都会受到一个交变应力，螺栓预紧力或轴向力太小是造成螺栓疲劳断裂的原因。影响螺栓预紧力的因素有很多，其中影响预紧力散差大小的主要原因有摩擦系数散差、扭矩散差（拧紧工具）等，而此次断裂螺栓的摩擦系数为0.08~0.14，目标扭矩在35~60N·m。由于两根断裂螺栓的扭矩值都在目标扭矩范围之内，因此推测最大

可能是摩擦系数值不稳定。预紧力小，也就是摩擦系数有可能超出上限。因此，改善疲劳断裂的方法就是对摩擦系数进行更加严格的控制，或者改变螺栓的规格。

5 结束语

针对连杆断裂螺栓失效分析可以得出如下结论：

1) 两根螺栓都属于疲劳断裂，其中最先断裂的1#螺栓为高周疲劳断裂；2#螺栓后断，依次为高周疲劳、低周疲劳，最后为剪切瞬断。

2) 两根螺栓疲劳断裂的最大原因是其摩擦系数超出上限，以及螺纹根部存在比较严重的应力集中。

参考文献：

- [1] 阮建刚. 发动机连杆螺栓断裂失效分析[J]. 上海汽车, 2017 (11) : 60-62.
- [2] 陆刚. 发动机连杆螺栓及其紧固[J]. 金属制品, 2011, 37 (1) : 37-41.
- [3] 陶康宁, 初希, 邹宝诚, 等. 20Cr1Mo1VTiB中压调门螺栓断裂失效分析[J]. 机械设计, 2020 (S2) : 125-127.
- [4] 杨琦, 杨天钧. 35CrMo钢汽车螺栓的断裂失效分析[J]. 锻造技术, 2017 (12) : 2900-2902.
- [5] 王荣. 汽车螺栓断裂失效分析[J]. 理化检验(物理分册), 2005 (9) : 471-474.
- [6] 吴安术. 主汽门螺栓断裂分析[J]. 理化检验(物理分册), 2013, 49 (Z2) : 288.
- [7] 苏倩, 胡春燕. 汽车下摆臂与车架连接螺栓断裂分析[J]. 失效分析与预防, 2019 (6) : 425-428.
- [8] John H. Bickford. An Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints[M]. Third Edition. New York: Marcel Dekker Inc, 1995.

MW 20210215

(上接第76页)

焊接前预设相应的焊接反变形，并采取有效措施降低焊接变形速率，使焊缝处在焊接过程中产生均匀、缓慢的焊接变形。总之，结构钢焊接变形的控制非常重要，一方面能降低焊缝的内应力，提高焊缝的安全性和耐久性；另一方面能有效控制焊接角变形，可避免或减少焊缝区域的火焰矫直，在有效缩短制作周期的同时极大地节约了制造成本。

参考文献：

- [1] 姚行杰. 起重机械结构焊接变形的因素及控制分析[J]. 中国设备工程, 2010 (10) : 150-151.
- [2] 杨志, 周燕. 焊接反变形在施工中的应用[J]. 中国高新技术企业, 2009 (23) : 156-157.
- [3] 杨广臣, 张彦华. 低碳钢高温相变对焊接角变形的影响[J]. 焊接学报, 2010, 31 (8) : 65-67, 116.

MW 20201224