

钢板梁翼缘与腹板角焊缝分析与探讨

张剑峰, 李军平

中铁宝桥集团有限公司 陕西宝鸡 721006

摘要: 通过对钢板梁翼缘与腹板角焊缝的连接现状进行了介绍, 针对该结构的细节进行受力分析, 结合国内外项目实例对该焊缝连接形式进行了介绍。针对目前普遍存在过度焊接的不利情况进行分析, 结合疲劳研究成果对该焊缝是否需要熔透焊进行了探讨, 并提出了合理化建议。

关键词: 钢板梁; 熔透焊; 疲劳

1 序言

钢板梁在早期铁路钢桥中应用非常普遍, 形成了跨度24m、32m、40m标准梁图集。从经济性考虑, 单孔钢板梁桥的跨径一般在40m以下, 连续钢板梁桥的跨径可达到60m。钢-混组合梁充分发挥了钢的抗拉性能和混凝土的抗压性能, 同时具有装配化施工便捷的优势, 在国家大力推广公路钢结构桥梁的大背景下得到了迅速发展。中小跨度桥梁广泛选用钢板组合梁的结构形式。

作为主要承载的钢板梁是由翼缘板和腹板通过焊接形成的工形结构, 为典型的受弯构件。目前, 板梁翼缘板和腹板的焊缝连接设计种类较多, 有贴角焊缝连接、部分熔透角焊缝连接、全熔透角焊缝连接, 国内要求全熔透焊接的工程实例较多, 而国外工程中采用贴角焊缝连接, 本文针对该焊缝的现状进行分析和探讨。

2 翼缘板与腹板连接焊缝的作用及计算

正确的焊缝设计是确保结构安全的关键, 应根据接头的受力情况来确定焊缝尺寸。根据荷载情况及梁的跨度、梁高、钢材强度等条件确定主梁截面后, 应根据不同工况对翼缘板与腹板的角焊缝进行计算和验算。

对于钢板梁而言, 通常翼缘抗弯、腹板抗剪; 在梁弯曲时, 相邻截面作用在截面的弯曲正应力存在差值, 因此翼缘和腹板之间将产生水平剪力, 如图1所示。为防止翼缘和腹板之间由于水平剪力的作

用而出现滑移, 需要采用焊缝将翼缘和腹板进行连接, 保证翼缘和腹板共同工作。

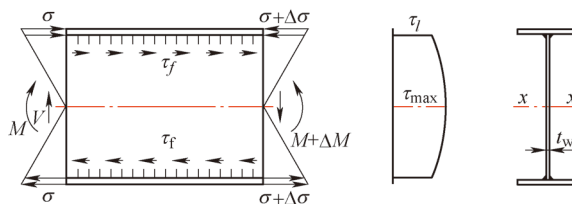


图1 翼缘焊缝的水平剪应力

工形截面梁弯曲剪应力在腹板上按抛物线规律分布, 腹板边缘的竖向剪应力为^[1]

$$\tau = \frac{VS}{I_x t_w}$$

式中 V ——计算截面的剪力设计值 (N);

S ——翼缘截面对梁中和轴的面积矩 (m^4);

I_x ——梁截面惯性矩 (m^4);

t_w ——腹板厚度 (mm)。

根据材料力学剪力互等定理, 在翼缘与腹板连接处的水平剪应力大小为 $\tau_f = \tau$ 。

由此, 所需焊缝的焊脚尺寸为

$$h_f \geq \frac{VS}{1.4 I_x f}$$

式中 h_f ——焊缝焊脚尺寸 (mm);

f ——焊缝的强度设计值 (MPa)。

在美国公路桥梁设计规范中, 规定翼缘对腹板角焊缝的设计可以不考虑平行于焊缝轴向的正应力, 主要还是计算其剪应力和局部压应力。

经过上述计算, 大部分钢板梁结构中腹板与翼

缘采用K10~K12的贴角焊缝即可满足强度要求。对于焊脚尺寸 $K > 12\text{mm}$ 的焊缝，一般在工艺上开坡口，焊接坡口角焊缝，以减小焊缝填充量，同时减小焊接变形。对于支座区域腹板与下翼缘板的焊缝一般做成等强连接，同时设置支座加劲肋来传递支座反力。

对于此类焊缝的疲劳校核，法国巴黎焊接研究所通过大量的试验证明，当T形接头根部未熔透（Ⅲ）处且 $P \leq 0.4t$ 时，承受疲劳载荷的T形接头不会从根部未熔透（Ⅲ）处发生疲劳失效，如图2所示。为此，对于受力上需要采用等强连接的角焊缝，当腹板与翼缘板的连接焊缝可采用全熔透焊或焊缝厚度大于腹板厚度的部分熔透角焊缝时，全熔透连接与等强连接的部分熔透角焊缝既没有强度上的优势，也无疲劳上的优势，应采用部分熔透角焊缝。

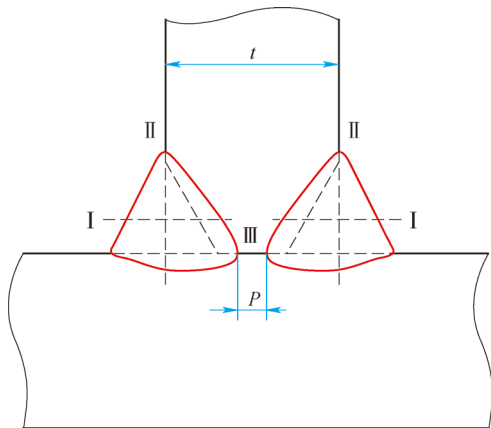


图2 T形接头疲劳裂纹敏感区

20世纪80年代，中国铁道科学研究院对此类焊缝进行了专题研究：“纵梁或上承式板梁上翼缘与腹板角焊缝熔透与否对疲劳性能的影响”，对该研

究进行了大量试验，结果表明，板梁或纵梁上翼缘和腹板的纵向角焊缝，在250kN（25t）特种荷载作用下经500万次应力循环未发生疲劳裂纹，因此认为该角焊缝尺寸只需按法向压应力和焊缝断面剪应力进行验算，无须熔透^[2]。该课题成果应用在国内大型板梁项目上，此类焊缝未出现疲劳裂纹。

3 国内外工程实例

钢板梁翼缘板和腹板的焊缝连接有不开坡口贴角焊缝连接、开坡口部分熔透连接和全熔透连接三种方式，如图3所示。20世纪70年代以来，钢板梁和槽形结合梁广泛应用于铁路桥梁，对于24m、32m、40m梁，翼缘与腹板的焊缝设计均为K8~K12贴角焊缝，工艺上采用埋弧焊，以获得较好的根部熔合效果，如图3a所示。

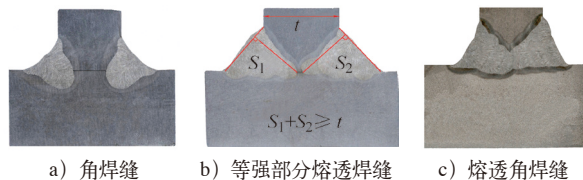


图3 几种翼缘与腹板焊缝示例

近年来，国内钢板组合梁的翼缘与腹板的连接最初多采用熔透焊缝连接，大部分项目在施工过程中，设计院根据受力情况对其进行优化，使其工艺性更合理。例如，国内某35m跨连续组合梁的主梁腹板与翼缘焊缝最初均设计为全熔透角焊缝，在生产过程中焊接变形较大，在对该焊缝进行应力检算后优化为双面K12角焊缝，在工艺上采用埋弧焊进行焊接以获得较大熔深，在支座区设置支座加劲肋传递支反力，如图4所示。

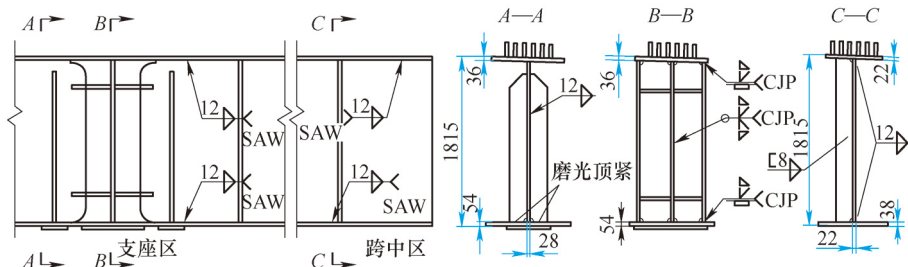


图4 国内某35m跨连续组合梁焊缝示例

在国外的项目中大多采用贴角焊缝，宝桥公司制造一个美国铁路钢板梁，跨度为38m，梁高2.9m，翼板厚度3in（76.2mm），腹板厚度7/8in（22.2mm），其翼缘与腹板的连接焊缝为双面3/8in

（K10）角焊缝，如图5所示。另一个公路钢板组合梁（为多主梁结构），跨度为40m，翼缘板厚31.75mm，腹板厚12.7mm，其翼缘与腹板的连接焊缝设计为双面K8角焊缝，如图6所示。

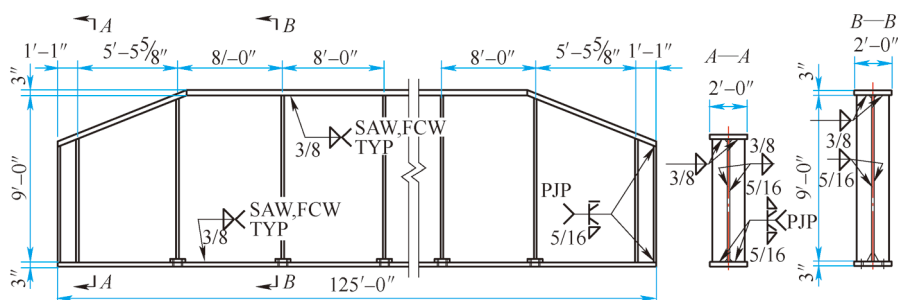


图5 国外某铁路钢板梁焊缝实例 (英制: in)

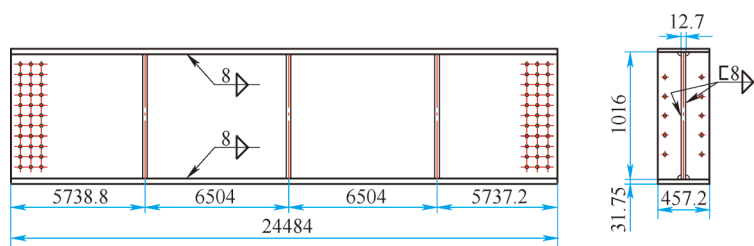


图6 国外某公路组合梁焊缝实例

在日本《铁道构造物等设计标准及解说-钢桥、结合梁桥》中规定,对于腹板厚度 $<15\text{mm}$ 的板梁桥中,翼缘与腹板采用等强的普通角焊缝连接,焊缝的有效厚度之和大于腹板厚度;当腹板厚度 $>16\text{mm}$ 时,等强连接的焊缝尺寸很大,不但经济,还会产生较大的变形和残余应力,需根据应力检算结果确定焊缝尺寸,此时推荐采用开K形坡口的部分熔透角焊缝连接。在日本《钢桥构造细节设计指南》中认为,腹板与翼缘的焊缝剪应力一般较小,应力验算可以省略,可直接按 $t_1 > K \geq \sqrt{2}t_2$ 确定焊脚尺寸,其中 $K \geq 6$, t_1 为腹板厚度(mm), t_2 为翼缘板厚度(mm)。在支点等剪力较大处也可能出

现不能满足受力要求的情况时,需增设加劲肋或加大焊缝尺寸。

4 熔透焊接存在的问题

受国内钢厂热轧H型钢规格限制,对于大型钢板梁均采用焊接制造。翼缘板与腹板的T形角焊缝,如果要熔透焊需要双面操作,在正面焊接完成后翻身,反面焊前清除根部影响熔透的坡口根部尖角区,俗称清根工艺,如图7所示。清根对焊工的操作技能要求较高,清根不好将导致熔透效果变差,焊缝合格率降低,目前的清根工艺普遍采用人工碳弧气刨作业。

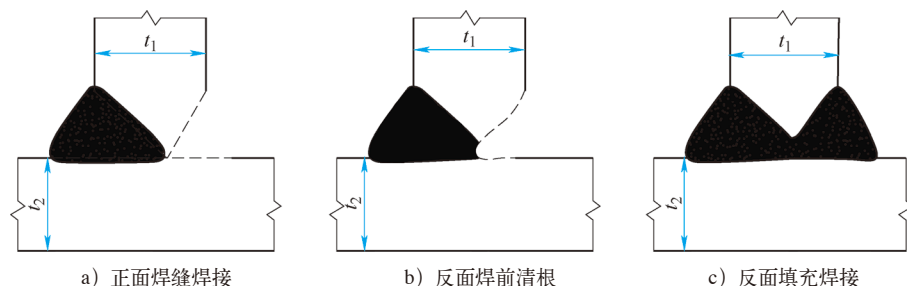


图7 熔透焊缝气刨清根过程

碳弧气刨清根是利用电弧热量熔化金属,熔化的金属在高压风的作用下剥离钢板,形成顺风方向的金属熔化物飞溅和烟尘,焊接作业环境急剧变差,且噪声很大,如图8所示。碳弧气刨时产生大量

的混合烟尘(Fe_3O_4 、Mn、Cu、炭黑等)以及有毒气体(臭氧和氮氧化物),其中因为碳弧气刨所用碳棒都采用沥青作为黏结剂,作业时产生的有毒气体造成较严重的环境污染^[3],不利于操作人员的健康。



图8 气刨清根现场

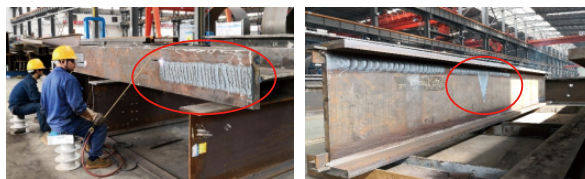
另外, 碳弧气刨作为缺陷清除和反面清根的主要手段, 气刨操作工艺对焊接质量有较大影响, 气刨时应避免夹碳等缺陷的产生, 气刨后要打磨去除渗碳淬硬层及残留熔渣后方可进行焊接。在自动化焊接工序中增加人工气刨操作, 劳动效率低下, 环境污染大, 不利于工业化和自动化生产。

5 过度焊接的危害

对于受弯梁, 腹板与翼缘的连接, 如果采用大填充量的坡口角焊缝和熔透焊缝, 焊后将使翼缘板产生较大的翼缘板角变形(见图9)和梁的竖向弯曲变形。由于钢板梁的钢板厚度和尺寸规格都较大, 所以此类构件一般无法采用机械进行矫正, 目前工厂普遍采用火焰热矫正, 如图10所示。热矫正是通过火焰对钢板进行局部加热, 加热区的钢材受热膨胀, 同时被周围材料限制, 于是产生不均匀的挤压塑性变形, 在冷却过程中高温时产生的塑性变形无法恢复, 于是产生较大的收缩变形, 从而将先前的焊接变形进行矫正的过程。加热区的钢材在冷却过程中又受到周围制约不能自由收缩, 于是又产生加大的残余拉应力。对于厚板的热矫正温度都较高(一般应控制在 $600 \sim 800^{\circ}\text{C}$, 对于高强度钢的温度控制更严格), 加热深度较大, 加热的区域也很宽, 否则矫形效果较差。如果加热温度超过规定值, 则容易产生“过烧”现象, 从而改变钢材性能, 使其性能有一定的降低。



图9 翼缘弯曲角变形示例



a) 翼缘角变形矫正

b) 钢梁弯曲变形矫正

图10 厚板工形熔透焊后热矫形

焊接和热矫正两个热加工工序使结构存在较高的残余应力, 降低了构件的疲劳强度和稳定性。为此, 在焊缝尺寸保证结构安全的前提下, 对焊缝几何尺寸要求宁大勿小的做法并不可取, 会带来不利的影响。

6 结束语

钢板梁上下翼缘与腹板的焊缝及支座区域的焊缝在受力上存在差别, 应根据受力情况合理确定焊缝几何尺寸。

1) 对于钢板组合梁而言, 其与正交异性钢桥面板有本质上的不同, 钢板梁的翼缘板与腹板的连接焊缝疲劳应力较小。在采用普通贴角焊缝(K12以下)不能满足强度时, 推荐采用部分熔透的对接与角接组合焊缝; 不推荐全熔透焊缝, 以利于工厂机械化、自动化生产, 提高焊接质量的稳定性。

2) 下翼缘板与腹板连接焊缝受到由弯曲正应力差值引起的剪应力, 焊接贴角焊缝即可满足要求; 上翼缘板与腹板的焊缝同时承受正应力、剪应力和局部荷载下的压应力, 且正应力和局部压应力为同方向压应力, 根据计算结果可适当加大焊缝尺寸或熔深, 焊接角焊缝或部分熔透的角焊缝即可。

3) 在支点区域下翼缘板与腹板的连接焊缝受力较大, 需要等强连接, 即焊缝有效厚度大于腹板厚度; 在设置支点加劲肋时, 加劲肋应与下翼缘板顶紧焊接或等强焊接。

参考文献:

- [1] 张彦华. 焊接结构设计及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [2] 杨妍曼, 等. 纵梁或上承式板梁上翼缘与腹板角焊缝熔透与否对疲劳性能的影响[R]. 北京: 铁道科学研究院, 1987.
- [3] 中国机械工程学会焊接学会. 中国焊接1994—2016[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.