

焊接应力对桥式起重机箱形梁承载能力的影响

陈本华

(广东省佛山市公盈控股有限公司, 广东佛山 528000)

摘 要:该文提出了桥式起重机箱形梁焊接时产生的残余应力对其承载能力的影响问题。通过对纵向残余应力的分布、计算分析以及对箱形梁二次变形的计算分析, 文章认为焊接应力对箱形梁承载能力的主要影响是降低了上盖板的屈服强度, 造成箱形梁下挠, 并提出用二次变形减小焊接残余应力的工艺措施。

关键词:箱形梁; 焊接应力; 桥式起重机

中图分类号:TH 215 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2006)02-0049-03

0 前言

桥式起重机箱形梁焊接时会产生残余应力, 这对其承载能力主要有两方面的影响: 在下盖板的焊缝处, 载荷弯曲拉应力和残余拉应力叠加产生拉伸塑变而引起下挠; 在上盖板的非焊接区, 载荷弯曲压应力和残余应力叠加危害上盖板的稳定而降低其承载能力。由于箱形梁上的上外载荷应力主要是沿梁长的纵向应力, 故影响箱形梁承载能力的主要是残余应力中的纵向应力, 横向应力的影响可以忽略不计。

1 纵向残余应力的分布

在钢板上施焊, 残余应力的分布如图1。如把它看作箱形梁的横向焊接, 则由(a)图可知, 它除了在焊缝旁边很小区域内产生较大的横向残余拉应力外, 在远处只产生很小的横向残余压应力; 由(b)图可知, 它只能在焊缝两侧很小的区域内产生不太大的垂直于焊缝方向的残余拉、压应力。

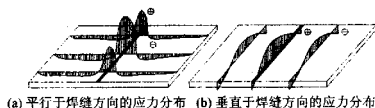


图1 焊缝周围的残余应力的分布

我国桥梁的箱形梁下盖板处一般无横向焊缝, 而上盖板横向焊缝两端的纵向残余压应力又被纵向上腰缝的残余应力抵消, 故对上盖板屈服无甚影响。因此在讨论上述的纵向残余应力对上下盖板承载能力的影响时, 可以忽略横向焊缝的作用, 仅考虑由四

条纵向腰焊缝造成的纵向残余应力, 它在沿梁全长各横截面上的分布是近乎相等的。图2中给出了箱形梁横截面上纵向残余应力的分布图, 在焊接热塑性区有接近屈服极限的拉应力, 在其余部分约有 $10 \sim 90 \text{ N/mm}^2$ 的压应力。

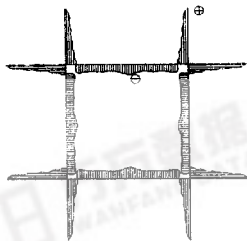


图2 箱形梁纵向残余应力分布

2 纵向残余应力的计算

残余应力的理论计算十分复杂, 实验测定也很困难, 特别是桥式起重机主梁上设置了许多隔板和加筋, 使问题更加复杂。由上述假定, 忽略了横向应力和横向焊缝的影响, 就可将问题大大简化, 便于分析计算。

当几块板汇交于一条焊缝时, 如图3, 则每块板的拉伸塑性区宽度 c 都相等, 其面积为

$$F_c = c \cdot \sum_1 t_i = \frac{12000P \cdot A_w}{\sigma_s} \quad (\text{mm}) \quad (1)$$

式中: P ——工艺过程效率, 见表1

A_w ——充填焊缝的金属截面积(mm^2)

t_i ——汇交于焊缝的各板厚度(mm)

σ_s ——屈服极限(N/mm^2)

箱形梁纵加筋的断续焊接可按下式计算:

$$F'_{cs} = \frac{L_w}{L_w + L_m} \quad (2)$$

收稿日期: 2006-02-28

作者简介: 陈本华, 男, 广东人, 资产经营部部长, 从事技术管理工作。

式中: L_w ——焊接长度

L_w ——间断长度

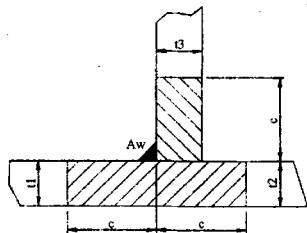


图3 焊缝塑性区宽度

表1 焊接工艺过程效率

| 工艺过程 | P |
|---------------------|------|
| 埋弧焊 | 0.9 |
| CO ₂ 保护焊 | 0.85 |
| 手工焊 | 0.8 |

将焊接塑性区假想为嵌在箱形梁上的预拉力钢筋截面,可用平衡条件求得它在截面上造成的压力的弯曲应力。当箱形梁截面 F 上下对称且不计纵筋影响时,纵向残余应力为:

$$\sigma = \frac{4F_s - \sigma_s}{F - 4F_s} = \frac{\sigma_s}{\frac{F}{4F_s} - 1} \quad (3)$$

由式(1)可见,每焊缝造成的塑性区面积 F_s 与箱梁的截面尺寸无关,仅与附加焊接的面积成正比(当截面抗弯刚度较大时),故对焊脚相同的各种规格的桥式起重机主梁 F_s 几乎都相等。又由式(3)可知,由于 F_s 一定,且 F 远大于 $4F_s$,故 σ_s 几乎与 F 成反比。表2中列出了几种规格的箱形梁的焊接残余压应力(焊脚都为6 mm)。如考虑纵筋的影响,则压应力的值还要大些。由表2可见,吨位和跨度越大(即主梁截面面积越大)则残余压应力 σ_s 越小,最大截面的 σ_s 最小,约略大于 10 N/mm^2 ,最小截面的 σ_s 最大,约略大于 80 N/mm^2 。

表2 几种规格的桥式起重机主梁截面上的焊接残余压应力

| 主梁规格 (t×m, 中级) | 截面积 $F(\text{cm}^2)$ | 残余压应力 $\sigma_s(\text{N/mm}^2)$ | 埋弧焊 | CO ₂ 焊 | 手工焊 |
|-------------------|-------------------------|---------------------------------|-------|-------------------|-----|
| 10×19.5 | 190 | 49.34 | 46.07 | 42.88 | |
| 20×19.5 | 240 | 37.46 | 35.07 | 32.73 | |
| 30×19.5 | 292 | 29.95 | 28.09 | 26.26 | |
| 50×19.5 | 398 | 21.27 | 19.99 | 18.72 | |
| 20×19.5 | 186 | 50.62 | 47.26 | 43.97 | |
| 20×19.5 | 210 | 43.78 | 40.94 | 38.15 | |
| 20×19.5 | 270 | 32.73 | 30.68 | 28.66 | |
| 20×19.5 | 318 | 27.23 | 25.55 | 23.90 | |
| 5×19.5 | 120 | 88.77 | 82.1 | 75.79 | |
| 100×19.5 | 624 | 13.14 | 12.38 | 11.61 | |

上述算法可估计残余应力的大致数量和变化趋势,但由于焊接工艺和操作技术不同,式(1)中的系数还要由实验修正,以适应各厂的生产实际。

3 箱形梁二次变形的计算

构件焊接时的变形叫一次变形,焊接后的构件在受载时产生的塑性变形叫二次变形,它使主梁下挠和上盖板初挠度增大,应当尽量减小其不利影响。

二次变形的产生(见图4),是由于下盖板两条腰焊缝处的拉伸塑性区在加载时已不再能承受弯曲拉应力,外载荷仅由其余部分承担,形心上移且惯性矩变小,塑性区发生了拉伸塑变;而卸载时却是整个截面按弹性卸载,因此产生残余变形。

设: J_1 , J_2 和 C_1 , C_2 分别为加载、卸载时的截面惯性矩和曲率变化, L 为箱形梁长度,则:

$$\text{加载时 } C = \frac{M(x)}{EJ}, \text{ 卸载时 } C_e = \frac{M(x)}{EJ_0}$$

$$\text{残余曲率 } C_r = C - C_0 = \frac{M(x)}{EJ_0} \left(\frac{J_0}{J} \right) - 1 \quad (4)$$

距左支座距离为 a 处下挠量为^[3]:

$$F = a \int_0^L C_r dx - a \int_0^L C_0 dx - \frac{a}{L} \int_0^L C_r x dx + \int_0^L C_r x dx \quad (5)$$

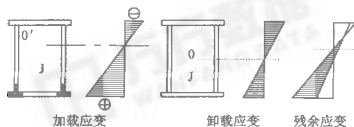


图4 焊接箱形梁受载时残余变形的产生

如欲求桥式起重机由额定载荷(不包括小车自重)引起的二次变形,则 $M(x)$ 应为该集中载荷在梁长 L 上移动时在 x 处的截面产生的最大弯矩,弯矩包络图为一抛物线,设 M_{\max} 为跨中最大弯矩,则:

$$M(x) = \frac{4M_{\max}}{L^2} (-x^2 + Lx) \quad (6)$$

将式(6)代入式(4),式(4)再代入式(5),可得集中移动载荷引起二次变形的跨度中点挠度:

$$f = \frac{5M_{\max}}{48EJ_0} L^2 \left(\frac{J_0}{J} - 1 \right) \quad (7)$$

当截面上下对称时,

$$f = \frac{5}{24Eh} \sigma_{\max} L^2 \left(\frac{J_0}{J} - 1 \right) \quad (8)$$

同理可求出跨度中点固定集中载荷引起的“二次变形”为:

$$f = \frac{1}{6Eh} \sigma_{\max} L^2 \left(\frac{J_0}{J} - 1 \right) \quad (9)$$

由上式可见, f 与集中载荷产生的最大弯曲应力 σ_{max} 成正比, 与跨度 L 的平方成正比, 随着惯性矩增大而减小(惯性矩增大时 $\frac{J_0}{J} - 1$ 减小)。

例如: 求 19.5 × 20 t(中级)桥式起重机(埋弧焊)在额定载荷下运行引起的二次变形。

$$M_{max} = \frac{100 \times 19.50}{4} = 487.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

由式(1)求得 $F_0 = 8.1 \text{ cm}^2$, 又可得 $J = 364\,366 \text{ cm}^4$, 而 $J_0 = 407\,243 \text{ cm}^4$ 。代入式(7), 可得跨度中下挠量为:

$$f = \frac{5 \times 487.5 \times 19.50^2}{48 \times 2.1 \times 10^8 \times 407\,243 \times 10^{-4}} \times \left(\frac{407\,243}{364\,366} - 1 \right) \\ = 2.66 \times 10^{-3} \text{ m} = 2.66 \text{ mm}$$

这种情况是比较接近的, 如用 CO_2 气体保护焊, 则下挠量还要略小些。

为了验证二次变形的挠度公式, 我们进行了实验。模型工字梁长 1200 mm, 翼缘宽 100 mm, 厚 3 mm, 腹板高 240 mm, 厚 2 mm, 各梁上焊有间距和数量不同的纵横加筋, 翼缘的断续焊缝在腹板两边交错连接, 可视为一条连续焊缝, 焊角为 3 mm × 3 mm ~ 3 mm × 3.5 mm, 固定集中载荷作用在梁的跨度中点。将由式(9)计算所得的理论值与实验值比较, 得表 3。

表 3 二次变形的理论值和实验值对比

| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\sigma_{max} (\text{N/mm}^2)$ | 115.7 | 115.7 | 115.7 | 115.7 | 115.7 | 115.7 |
| $f_{理} (0.01 \text{ mm})$ | 22.1 | 22.1 | 22.1 | 22.1 | 22.1 | 22.1 |
| $F_{实} (0.01 \text{ mm})$ | 19.2 | 15.9 | 17 | 19.3 | 15.4 | 18 |
| 序号 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| $\sigma_{max} (\text{N/mm}^2)$ | 120.5 | 120.5 | 120.5 | 120.5 | 120.5 | 120.5 |
| $f_{理} (0.01 \text{ mm})$ | 29.1 | 23 | 23 | 23 | 26.5 | 29.1 |
| $F_{实} (0.01 \text{ mm})$ | 19.2 | 20.1 | 16.8 | 18.9 | 23.4 | 26.2 |

由表 3 可见, 实验值和理论值比较接近, 但都偏小些, 这在加载小时表现得更明显。其原因在于试件焊好后放置了一年时间, 经过时效, 焊接应力已经减小。实验还表明二次变形的大小几乎与横筋的数量、间距和焊脚无关(纵筋为点焊可不计), 而受纵向翼缘焊缝焊脚尺寸影响较大, 证明了本章开始时忽略横向焊缝影响的假定是合理的。在实验中还可看到对称截面的梁在两个方向上的二次变形近乎相等, 可互相抵消。我们的实验和在大连起重机厂的调查都证明了二次变形的下挠量是很小的。它可以一次或几次完成, 其大小随载荷和跨度的增大而增大, 随截面惯性矩的增大而减小。因此, 我们用预上拱预超载的方法, 就能使二次变形在出厂前完成, 而不至于在使用中下挠; 二次变形不是造成桥架下挠

的主要原因, 也不能解释主梁逐年下挠的现象, 它对箱形梁承载能力的影响是不大的。

4 用双二次变形减小焊接残余应力

由表 2 可知, 在箱形梁截面上约有几十 N/mm^2 残余压应力。它在上盖板处和外载荷的弯曲压应力叠加而增大了上盖板负荷, 降低了其屈服强度, 这是残余应力对箱梁承载能力的主要影响。

为了减小残余应力, 本文提出一种简单易行的工艺措施: 在桥梁焊完上腰缝、尚未焊下腰缝时(已点焊), 用重锤加载使之达到许用应力以完成桥架主梁向上的二次变形, 向下的二次变形则在试车或使用完成。这样, 两次方向相反的双二次变形本身的不利影响, 减小上盖板和腹板上部的初挠度, 而且还能大大减小整个梁截面上的残余应力。

焊接箱梁初次加载、卸载后, 原来分布着残余应力 σ 的截面上的应力变为

$$\sigma = \sigma_{残} + \sigma_{卸} \quad (10)$$

但对于截面下部的拉伸塑性区, 其残余应力已达 σ , 而不能再受加载拉应力, 即 $\sigma_{卸} = 0$, 故 $\sigma = \sigma$, $-\sigma$ 卸载后的应力大大减小; 同样, 反方向的加载、卸载又可使截面上部的 $\sigma_{卸} = 160 \text{ N/mm}^2$, 则 $\sigma = 80 \text{ N/mm}^2$, 把 σ 代入(3)式中的 σ_s , 可知双二次变形使截面上的残余应力降为原来的 1/3, 显著地提高了上盖板承载能力。

5 结束语

综上所述, 可得如下结论:

(1) 影响箱形梁承载能力的主要是纵向的焊缝和残余应力, 横向的焊缝和残余应力可以忽略不计。

(2) 二次变形量值很小, 且可一次基本完成, 它对箱形梁承载能力的影响不大, 不是引起桥架下挠的主要原因。

(3) 箱形梁截面上约有 10~90 N/mm^2 的残余压应力, 大大降低了上盖板的屈服强度, 这是焊接应力对箱形梁承载能力的主要影响。

(4) 二次变形和残余压应力对梁承载能力的不利影响可以用双二次变形的工艺措施大大减少。

由本文结论和我们对于箱形梁上盖板有初挠度时的极限承载能力的研究以及腹板有初挠度时与盖板间应力重分配的研究可知: 箱形梁上诸多初始缺陷的影响都集中于其主要受力部件上盖板, 降低了它的屈服强度, 从而影响了整个梁的承载能力, 这是造成箱形桥架下挠的主要原因。