

电铆焊工艺在薄板焊接上的应用

许永辉 苏广宇 候兴华

(中车齐齐哈尔车辆有限公司,黑龙江 齐齐哈尔 161002)

摘要 对电铆焊技术在薄板焊接结构制造中的应用进行了系统研究,通过电铆焊的系列焊接工艺试验及焊接工艺评定试验,优化了电铆焊的焊接工艺参数,验证了电铆焊工艺的合理性,提出了适合于薄板蒙皮结构的最合理加工孔参数及焊接工艺参数。其电铆焊工艺的变形程度明显小于塞焊工艺,可以显著降低焊接变形,大大减少工件的矫平工作量,保证了结构件的外观质量,提高了车辆的商品化程度。

关键词: 电铆焊 焊接工艺参数 焊接变形 蒙皮结构

中图分类号: TG447

0 前言

近年在铁路货车产品方面,为增大车体容积,减轻车体自重,提高运能,在其侧墙、端墙、棚顶等部件的结构上采用框架+薄板蒙皮结构的轻量化设计。其中端墙、棚顶设计上是框架与蒙皮薄板采用段焊连接,侧墙是框架与蒙皮薄板采用段焊和塞焊方式连接。这些部件由于焊接后产生较大的焊接变形,需要进行框架整体矫正,外侧蒙板需要进行钢板的烤火矫平,矫平工作量非常大,而且效果不是十分理想,增加了制造工作量和制造成本。

在铁路货车产品的推出及应用推广的过程中,不仅车体的设计是产品成功的关键,其产品的制造工艺及制造质量,尤其产品的外观质量和商品化程度对客户需求的影 响也至关重要。为此,文中对电铆焊技术在薄板焊接结构制造中的应用进行了系统研究,探索电铆焊焊接工艺方面的技术要素和经验,以期解决铁路货车车体的外观质量和商品化的技术难题。

1 电铆焊工艺简介

1.1 电铆焊工艺的技术特点

电铆焊工艺是利用特种焊机具有的焊接时间延时和定量调节功能,通过设计、制作特殊的焊枪工具,在薄板焊接结构上实现焊接的一种新的工艺方法^[1]。其原理是将两张叠放在一起的薄钢板,开孔或不开孔,从单面利用电弧熔透上板,电弧接着熔透下层钢板的一

部分而形成焊点,从而进行部件的有效连接,电铆焊工艺示意图如图1所示。

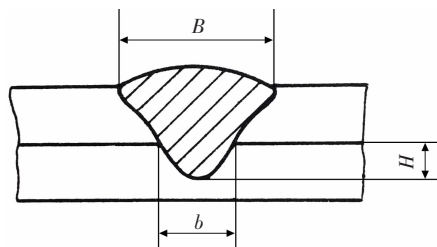


图1 电铆焊工艺示意图

1.2 电铆焊工艺的应用特点

电铆焊最适用于薄板框架式结构的焊接,从薄板一侧进行引弧焊接,而板后面的框架部分一般比蒙板厚度大;但铁路货车的部件产品连接方式正好相反,是从框架向蒙板方向焊接,而且蒙板厚度比框架的厚度小,要求连接的焊缝要有一定强度,并且蒙板表面的平面度和美观度又要求比较高。因此,铁路货车的部件产品的电铆焊焊接有其特殊性,也增加了应用难度。

2 电铆焊工艺的技术研究

鉴于电铆焊工艺本身的特点以及它的适用性,结合铁路货车的结构特点^[2],对电铆焊工艺进行了下列焊接技术试验及研究。

2.1 试验材料

试验材料为 Q345NQR2(即原 09CuPCrNi-A),其抗拉强度 ≥ 480 MPa;焊接材料为 ER50-6 焊丝,焊丝直径为 1.2 mm,其抗拉强度 ≥ 500 MPa。

2.2 电铆焊工艺试验

2.2.1 不加工孔的电铆焊工艺试验

不加工孔的电铆焊工艺对比试验所用试板规格为 $150\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, 在不开孔的情况下, 进行电铆焊接。不加工孔的电铆焊工艺试验数据见表 1。焊

接后观察及测量表面焊点的直径及背面热影响区的直径, 在不开孔的情况下, 板上的连接点直径约为 $1.6 \sim 2.4\text{ mm}$ 之间, 扭转撕裂的力度较小, 说明电铆焊的连接强度不大。

表 1 不加工孔电铆焊工艺试验数据

试板编号	板厚组合 δ/mm	焊接电流 I/A	焊接时间 t/s	焊点数	组对间隙 b/mm	表面焊点 直径 d_1/mm	背面 热影响区直径 d_2/mm	连接点 直径 d_3/mm	扭转撕裂 力度
1	2+2	300	0.5	4	0.2	9.0	14.0	1.60	较小
1	2+2	300	0.5	4	0.2	9.5	12.0	1.65	较小
1	2+2	300	0.5	4	0.1	9.8	11.0	1.70	较小
1	2+2	300	0.5	4	0	9.8	13.0	1.70	较小
2	2+2	300	0.6	4	0.1	10.0	13.0	2.00	较小
2	2+2	300	0.6	4	0.2	10.6	11.0	1.90	较小
2	2+2	300	0.6	4	0.2	10.5	12.5	2.00	较小
2	2+2	300	0.6	4	0.1	10.0	11.5	2.10	较小
3	2+2	300	0.8	4	0.5	12.5	13.5	2.30	较小
3	2+2	300	0.8	4	0	13.0	13.1	2.30	较小
3	2+2	300	0.8	4	0	13.0	13.3	2.20	较小
3	2+2	300	0.8	4	0.3	12.9	12.9	2.20	较小
4	2+2	300	1.0	4	0.2	12.9	13.6	2.20	小
4	2+2	300	1.0	4	0.1	13.4	13.2	2.20	小
4	2+2	300	1.0	4	0.2	13.4	13.5	2.32	小
4	2+2	300	1.0	4	0.1	13.7	14.0	2.38	小

2.2.2 不同直径加工孔的电铆焊工艺试验

不同直径加工孔的电铆焊工艺试验试板规格为 $160\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 与 $160\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 板厚组合, 孔的直径分别为 5 mm , 6 mm , 7 mm 。不同直径加工孔的电铆焊工艺试验典型试件照片如图 2 所示。不同直径加工孔的电铆焊工艺试验数据见表 2。



图 2 不同直径加工孔的电铆焊工艺试验典型试件照片

在上述试验的基础上, 可以观察到孔的直径为 5 mm , 6 mm , 7 mm 时电铆焊的表面都存在不同程度的缩孔现象, 这是由于焊接时间没有调整好, 或者操作手法问题, 当焊丝没有完全熄弧的情况下, 过早提起焊枪的缘故。另外, 也可以观察到孔的背面也存在不同程度的烧穿和熔凸情况。随着孔的直径的增大, 这种情况发生的多(例如直径 7 mm 的情况)。因为孔增大后, 需要延长焊接时间, 以补充填充的铁水数量, 但同时加大了背面烧穿和熔凸情况。对照 5 mm 和 6 mm 加工孔的焊点表面和背面质量, 可以看到 6 mm 加工孔的表面和背面质量比 5 mm 加工孔的质量好, 而且实际焊接时操作相对容易一些。

2.2.3 电铆焊与塞焊试件的焊接变形对比试验

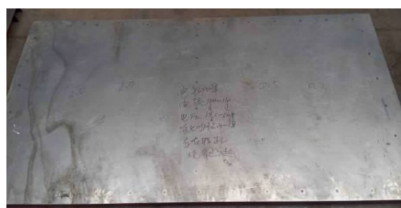
两组焊接变形对比试验均采用框架加蒙皮结构, 电铆焊与塞焊试件如图 3、图 4 所示。按产品设计要

表2 不同直径加工孔的电铆焊工艺试验数据

试板编号	板厚组合 δ/mm	焊接电流 I/A	焊接时间 t/s	焊点数	加工孔直径 d_0/mm	表面焊点 直径 d_1/mm	背面热影响区 直径 d_2/mm	表面 成形	背面 成形
1	3+2	100	1.8	4	5	9.0	9.7	有缩孔	平整
1	3+2	100	1.8	4	5	8.7	9.1	平整	平整
1	3+2	100	1.8	4	5	9.1	9.6	平整	平整
1	3+2	100	1.8	4	5	9.4	10.0	有缩孔	平整
2	3+2	115	2.0	4	6	10.0	9.6	有缩孔	平整
2	3+2	115	2.0	4	6	10.1	9.8	平整	平整
2	3+2	115	2.0	4	6	10.0	9.7	平整	平整
2	3+2	115	2.0	4	6	10.0	9.9	平整	平整
3	3+2	100	2.4	4	7	12.2	13.5	有缩孔	似烧穿
3	3+2	100	2.4	4	7	11.9	13.3	平整	有熔凸
3	3+2	100	2.4	4	7	11.7	13.5	平整	平整
3	3+2	100	2.4	4	7	12.1	13.4	有缩孔	似烧穿



(a) 电铆焊试件(正面)



(b) 电铆焊试件(背面)

图3 电铆焊试件焊接变形试验



(a) 塞焊试件(正面)



(b) 塞焊试件(背面)

图4 塞焊试件焊接变形试验

求,电铆焊试验是在框架上钻6 mm孔,塞焊试验是在框架上钻10 mm孔,孔间距为150 mm。框架材质为09CuPCrNi-A,板材质为05CuPCrNi。两种试验均先进行框架的焊接,框架焊接完成后进行矫正,保证框架与板接触一面的平面度在1 mm以内,然后分别进行框架与板的塞焊和电铆焊。塞焊与电铆焊的焊接顺序必须完全一致。焊后对两种试验板的平面度进行精确测量,对比同位置平面度的变化情况。焊接完成后,等待试板冷却,利用标尺对试板焊接变形进行测量,取各个方向最大值汇总。

由于电铆焊变形量比较小,在整个试板的各个方向上找出4个变形量最大点,最大点的变形量为2.4 mm,最小点变形量为0.2 mm。相对来讲,塞焊的变形量较大,在整个试板上找出10个最大点,普遍变形量为4~5 mm,只有两点的最小变形量为2 mm。因此可以看出,采用电铆焊工艺焊接可以明显降低焊接变形,只需对个别变形量较大的点进行局部火焰矫正即可,可以大大减少矫平工作量^[3]。

2.2.4 电铆焊焊接工艺评定试验

由于目前国家没有关于电铆焊的相关焊接工艺评定标准,因此参照与电铆焊类似的电阻焊焊接工艺评定标准进行 $\phi 6$ mm加工孔的电铆焊工艺评定。相关的焊接工艺评定有下列几项:剪切试验,交叉拉伸试验,机械撕裂试验,宏观金相试验。试验内容、试件规格、数量及焊接规范参数见表3。

2.2.4.1 剪切试验

在 $\phi 6$ mm加工孔进行无脉冲电铆焊的情况下,焊点的剪切破坏发生在焊点上(图5),其破坏力需要1.1

表3 电铆焊焊接工艺评定试验数据

序号	试验内容	规格 /mm × mm × mm	组别	加工孔直径 d_0 /mm	焊接电流 I/A	焊接时间 t/s	数量
1	剪切试验	138 × 60 × 2	2-1 ~ 2-11(无脉冲)	6	110	2.0	11
1	剪切试验	138 × 60 × 2	3-1 ~ 3-11(有脉冲)	6	195	0.8	11
2	交叉拉伸试验	150 × 50 × 2	2-1 ~ 2-11(无脉冲)	6	110	2.0	11
2	交叉拉伸试验	150 × 50 × 2	3-1 ~ 3-11(有脉冲)	6	195	0.8	11
3	撕裂试验	150 × 60 × 2	2-1 ~ 2-12(无脉冲)	6	110	2.0	11
3	撕裂试验	150 × 60 × 2	3-1 ~ 3-12(有脉冲)	6	195	0.8	11
4	宏观试验	50 × 30 × 2	2-12 ~ 2-13(无脉冲)	6	110	2.0	2
4	宏观试验	50 × 30 × 2	3-12 ~ 3-13(有脉冲)	6	195	0.8	2

~1.2 kN,而且电铆焊的时间短(2 s),热输入小,焊点表面成形比较圆滑,类似于圆滑的铆钉头,高度仅0.6 mm;由于实际产品结构上,焊点不存在剪切作用,只起外表连接作用,而且不承受较大的连接力,因此其试验的破坏力对于连接强度的要求来说足够。



(a) 电铆焊试件(A面)



(b) 电铆焊试件(B面)

图5 电铆焊试件剪切试验

在 $\phi 6$ mm加工孔进行有脉冲电铆焊的情况下,焊点的剪切破坏也是发生在焊点上,其破坏力需要1.2~1.3 kN,而且电铆焊的时间更短(0.8 s),但由于增加了焊接电流。因此,热输入比无脉冲情况下要大,焊接点比无脉冲情况下要大,其焊点表面成形比较平滑,高度为0.1 mm。

2.2.4.2 交叉拉伸试验。

在 $\phi 6$ mm加工孔进行无脉冲电铆焊的情况下,焊点交叉拉伸的破坏发生在开孔板上,但不是热影响区,焊点呈柱状拉出,母材受到破坏,而焊点无破坏(图6),其破坏力需要0.9~1.2 kN(由于这种破坏的断面面积无法计算,所以无法计算出焊点的强度数据),从

破坏的状态来看,说明其焊点的强度比母材强度高,而且电铆焊的焊点表面成形比较圆滑。

在 $\phi 6$ mm加工孔进行有脉冲电铆焊的情况下,焊点交叉拉伸的破坏也是发生在开孔板上,但不是热影响区,焊点也是呈柱状拉出,其破坏力需要0.9~1.4 kN,热输入比无脉冲情况下要大,焊点比无脉冲情况下要大,其焊点表面成形比较平滑。



(a) 电铆焊试件(正面)



(b) 电铆焊试件(侧面)

图6 电铆焊试件交叉拉伸试验

2.2.4.3 撕裂试验

在 $\phi 6$ mm加工孔进行无脉冲电铆焊的情况下,焊点的撕裂破坏发生在开孔板上,但不是热影响区,焊点呈柱状拉出,母材受到破坏,而焊点无破坏(图7),其破坏力需要0.57~0.7 kN,电铆焊的焊点表面成形比较圆滑。

在 $\phi 6$ mm加工孔进行有脉冲电铆焊的情况下,焊点的撕裂破坏也是发生在开孔板上,但不是热影响区,

焊点也是呈柱状拉出,其破坏力需要 0.6 ~ 0.65 kN。

2.2.4.4 宏观金相试验

从断面熔合可以看出:图 8a 中 $\phi 6$ mm 加工孔无脉冲电钎焊与图 8b 的有脉冲电钎焊的焊核比较适中,熔合也比较好,焊核增高不大;分析其晶粒度为 5 ~ 6 级,组织较好,为贝氏体 + 铁素体。



(a) 电钎焊试件未加工孔板侧



(b) 电钎焊试件加工孔板侧

图 7 电钎焊试件撕裂试验



(a) 电钎焊试件(无脉冲)



(b) 电钎焊试件(有脉冲)

图 8 电钎焊试件宏观金相试验

3 结论

(1)通过 2 mm 厚的不加工孔的电钎焊试验可以看出,焊点的连接强度比较小,对于要求一定强度的货车产品而言,不加工孔的电钎焊工艺是不适合的。

(2)通过不同孔径(5 mm,6 mm,7 mm)加工孔的电钎焊对比试验可以验证,在零件上加工 $\phi 6$ mm 孔进行电钎焊是可行的,其焊点成形比较好。

(3)通过 $\phi 6$ mm 加工孔电钎焊与 $\phi 10$ mm 加工孔塞焊的对比试验可以验证,在相同结构、相同面积情况下,电钎焊工艺的变形程度明显小于塞焊工艺,是塞焊工艺变形量的 1/5 ~ 1/10,可以显著降低焊接变形,大大减少工件的矫平工作量。

(4)通过剪切、十字拉伸、撕裂及宏观金相等工艺评定试验可以验证, $\phi 6$ mm 加工孔的电钎焊工艺为最优化工艺,焊接质量良好,焊点强度满足结构要求。焊接时焊机设定为有脉冲和无脉冲均可以得到良好的焊接成形。

通过采用上述系列研究的成果及电钎焊的最佳工艺参数,公司进行了货车产品的结构件焊接,其焊缝成形良好,焊接后仅需对很少的操作不良的焊点进行打磨;最主要的是大大减小了结构件的焊接变形,部件的板面不需要再进行烤火矫平,仅需进行较少的焊接变形矫正即可以达到设计要求,显著地降低了矫正工作量;同时,保证了结构件的外观质量,提高了车辆的商品化程度。

参考文献

- [1] 周昭伟,任大成,陈裕川,等. 焊工手册[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [2] 黄毅. 铁路货车运行品质影响因素分析及安全保障技术体系完善[J]. 中国铁路,2016(5): 38-44.
- [3] 周欢,孙丽萍. 搭接接头焊接角变形产生的原因分析[J]. 大连交通大学学报,2008,29(5): 87-90.

作者简介: 许永辉,1964 年出生,大学本科,教授级高级工程师。主要从事铁路货车制造的焊接自动化、焊接工艺方法、焊接设备、焊接结构等方面的研究,已发表论文 7 篇。