生产实践

DOI:10.16525/j.cnki.cn14-1167/tf.2026.07.079

家电用薄带钢 TIG 焊焊穿原因分析及全流程控制

程千磊

(河北钢铁集团邯钢公司邯宝冷轧厂，　河北　邯郸　056000)

摘　要:家电用薄规格热镀锌带钢(厚度 0.5~1.2 mm)因成型性能优良,广泛应用于冰箱、洗衣机等家电结构件,但 TIG 焊接过程中焊穿缺陷频发,严重制约生产效率。鉴于此,通过现场跟踪、缺陷统计及工艺试验,系统分析焊穿关键诱因,结合量化数据提出全流程控制方案。结果表明:焊接热输入不合理(占比 42%)、板带对中间隙超标(占比 35%)、切边质量缺陷(占比 18%)及运输磕碰(占比 5%)是主要原因;通过优化焊接参数窗口、将拉矫延伸率控制在 0.8%~1.2%、调整纵剪剪刃间隙为带钢厚度的 5%~8%、增大切边余量至 8~12 mm 等措施,焊穿缺陷率由改进前的 8.3% 降至 1.1%,成材率提升 7.2 百分点,有效保障了连续生产顺行。

关键词:家电用薄带钢;TIG 焊接;焊接烧穿;工艺优化;质量控制

中图分类号:TG 444+.74　　文献标识码:A　　文章编号:1672-1152(2026)07-0241-03

0　引言

家电用薄规格热镀锌带钢(厚度 0.5~1.2 mm)凭借其优异的冲压成型性、耐蚀性及表面质量,成为冰箱侧板、洗衣机箱体等家电结构件的核心原材料,2023 年国内市场需求量超 1 200 万 t,产品附加值较普通带钢高出 15%~20%。在终端加工流程中,TIG 焊(钨极惰性气体保护焊,Tungsten Inert Gas Welding)因电弧集中、焊缝成形美观等优势,成为薄带钢对接成型的首选工艺[1-3]。但由于带钢厚度薄、热容量小,焊接过程中易出现焊穿缺陷。据某家电企业统计,该缺陷导致的生产线停机时间占比达 23%,成材率降低 6%~8%。

目前国内外研究多聚焦于单一参数对焊穿的影响:汲生鹏等[4]通过视觉检测技术实现焊缝成形实时监控,但未涉及板形与切边质量的耦合影响;韩晓辉等[5]优化了不锈钢薄板焊接参数,但未针对家电用镀锌带钢的表面特性与加工流程提出全链条解决方案。本文结合邯钢邯宝冷轧厂 2022 年 10 月—2023 年 3 月的生产数据(涉及 5 个钢种、8 种规格,累计产量 1.2 万 t),系统分析焊穿产生的多因素耦合机制,提出钢厂-外协-用户协同的控制方案,为同类产品质量提升提供技术支撑。

1　现场生产与缺陷统计

家电用镀锌薄带钢从钢厂出厂后,经仓储、运输至外协厂及终端用户,典型加工流程为:开卷→纵剪切边→横切→冲压/卷圆成型→TIG 对接焊→后续工序。在对接焊接过程中,当焊接参数匹配不合理、带钢对接间隙不均时,极易在焊缝位置出现局部熔池过烧、孔洞、塌陷等焊穿缺陷(见图 1),直接导致焊缝强度不足、气密性不达标及生产线停机。

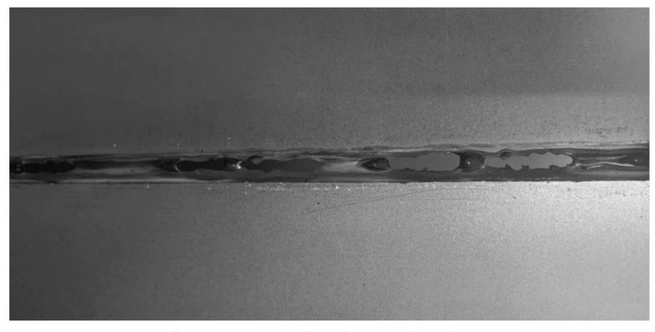


图 1　镀锌家电板焊穿

1.1　生产流程

家电用薄带钢典型加工流程为:钢厂热镀锌生产→仓储运输→外协厂纵剪(切边余量 5~10 mm)→终端用户开卷→卷圆成型→TIG 对接焊(焊接电流 15~35 A,焊接速度 3~8 mm/s)→后续工序。本次研究跟踪了 3 家终端用户的生产过程,涉及带钢规格为:厚度 0.5 mm、0.8 mm、1.0 mm、1.2 mm,材质为 DC01、DC03、SPCC,镀锌层质量 80~120 g/m^2。

1.2　缺陷统计与特征

统计期间共发现焊穿缺陷 1 008 处,缺陷率 8.3%。其中 0.5 mm 规格带钢焊穿率 12.7%,0.8 mm 规格焊穿率 7.5%,1.0 mm 规格焊穿率 4.2%,1.2 mm 规格焊穿率 2.1%,呈现厚度越薄焊穿风险越高的规律。焊穿缺陷主要表现为三种类型:局部熔穿孔洞(占比 63%),孔径 0.3~2.5 mm;焊缝塌陷(占比 27%),塌陷深度 0.1~0.5 mm;连续烧穿(占比 10%),长度 5~30 mm(见图 2)。通过焊缝截面分析,焊穿区域均存在熔池过烧、晶粒粗大现象,部分伴随锌蒸汽气孔。

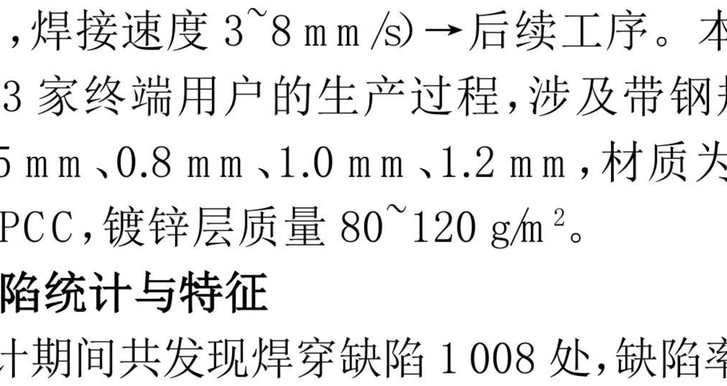


图 2　板带对接出现缝隙

收稿日期:2026-03-11

作者简介:程千磊(1988—),男,安徽舒城人,毕业于辽宁科技大学,工学学士学位,工程师,主要从事带钢连续热镀锌生产及表面质量控制工作。

2　焊穿原因量化分析

2.1　焊接热输入不合理

焊接热输入不合理占比42%（核心诱因占比，下同）。TIG焊单位长度热输入公式为：

$$E=UI\eta/v.$$

式中：E为单位长度焊缝热输入，J/mm；I为焊接电流，A；U为电弧电压，V；η为热效率系数，TIG焊取0.6~0.7；v为焊接速度，mm/s。

通过正交试验得出不同厚度带钢的合理热输入范围（见表1）：当热输入超出上限10%时，焊穿率显著上升；超出20%时，焊穿率达50%以上。现场调研发现，3家用户中2家未按厚度调整参数，如0.5 mm带钢仍采用0.8 mm规格的25 A电流，导致热输入超标33%，焊穿率达18.2%。此外，焊机老化导致的电流波动（±2 A）会使热输入波动±8%，进一步加剧焊穿风险。

表1　不同厚度带钢合理焊接工艺窗口

带钢厚度/mm	焊接电流/A	焊接速度/(mm/s)	电弧电压/V	合理热输入/(J/mm)
0.5	15~18	6~8	8~9	11~15
0.8	18~22	5~7	8~9	14~18
1.0	22~26	4~6	9~10	16~20
1.2	26~30	3~5	9~10	18~22

2.2　板带对中不良形成局部间隙

板带对中不良形成局部间隙占比35%。在焊接工艺中，带钢的对接质量直接影响成品的强度与外观。对接焊的核心工艺指标要求带钢对接间隙严格控制在≤0.1 mm的范围内，以确保焊缝的均匀性与致密性。然而，在实际生产过程中，当对接间隙超出标准，特别是超过0.15 mm这一临界值时，焊接缺陷的发生率将显著增加，其中焊穿率会骤升至25%以上，严重影响产品合格率与生产效率。通过对大量焊接缺陷样本的分析，发现对中不良是导致上述间隙超标的核心诱因。带钢边部浪形是导致对中间隙的主要因素，这种几何形状的不规则性使得带钢在进入焊接机时无法实现理想的直线对齐。统计数据清晰地显示：当边浪高度＞2 mm时，对接间隙超标率高达78%，几乎成为必然的焊接隐患。浪形产生的关键工序通常位于拉矫阶段，拉矫工艺参数的设定直接决定了板形的平直度。具体而言，当拉矫延伸率＜0.6%时，由于矫正力度不足，边浪消除率仅45%，无法有效改善板形；而当延伸率过度增加至＞1.5%时，虽然边浪可能被消除，但极易因应力分布不均而产生新的中浪缺陷，造成矫枉过正。邯钢的长期生产实践数据表明，将拉矫延伸率精确控制在0.8%~1.2%的理想区间内，可以实现最佳的板形控制，此时带钢边浪高度能稳定维持在≤1 mm的水平，从而保证焊接合格率达到92%。

2.3　切边质量缺陷

切边质量缺陷占比18%。在纵剪工序中，剪刃的几何参数匹配度至关重要。若剪刃间隙与重叠量匹配不当，极易导致带钢边部出现塌边与毛刺等物理缺陷。以0.8 mm DC03带钢为例，分析剪刃参数对切边质量的影响，结果如表2所示。具体来说，当剪刃间隙大于带钢厚度t的10%时，金属剪切过程中的撕裂效应加剧，导致塌边深度＞0.1 mm，这种边部变形在对接时会直接形成局部间隙。同时，若毛刺高度＞0.2 mm，带钢对接面将无法紧密贴合，导致间隙超标概率高达65%。此外，切边余量的设定也对边部质量有显著影响，当切边余量＜6 mm时，由于带钢边部强度不足，材料在剪切过程中容易发生变形，导致切边缺陷的发生率较余量在8~12 mm的标准区间时高出3倍，进一步加剧了对中难度。

表2　剪刃参数对切边质量的影响

剪刃间隙/mm	剪刃重叠量/mm	塌边深度/mm	毛刺高度/mm	切边合格率/%
0.04(5% t)	0.15	≤0.05	≤0.1	0.2~0.3
0.08(10% t)	0.15	0.08~0.12	0.1~0.2	82.3
0.12(15% t)	0.15	0.12~0.18	0.2~0.3	61.5

2.4　运输磕碰

运输磕碰占比5%。带钢在转运过程中，由于吊装操作不当或运输车辆颠簸，边部容易与硬物发生磕碰，从而产生深度在0.3~1.0 mm的凹坑或翘曲缺陷。这些机械损伤会直接影响后续卷圆成型的质量，导致对接间隙超标，进而使焊穿率较无磕碰带钢高出4倍。统计数据显示，采用防护套包装的带钢磕碰率仅为1.2%，而未使用防护包装的磕碰率则高达8.7%。

2.5　其他因素

除上述主要因素外，还存在一些次要因素。例如，带钢表面锌层厚度不均，当差值大于30 g/m^{2}时，局部过多的锌蒸汽会干扰焊接过程，导致熔池不稳定；此外，钨极损耗也会产生影响，当钨极直径磨损超过0.2 mm时，电弧会变得分散，降低焊接集中度。这些因素虽然对焊穿的影响相对较小，但仍需在生产中加以关注。

3　全流程控制措施及效果

3.1　针对钢厂端的工艺优化与控制措施

1）优化拉矫工艺：通过精细化调整拉矫机参数，将拉矫延伸率精准控制在0.8%~1.2%的合理区间内，同时配合光整机的轧制力调整至120~150 kN，这一系列措施使得带钢边浪的合格率显著从85%提升至96%。

2）规范切边参数：依据带钢厚度的具体情况，动态调整剪刃间隙（控制在5% t~8% t范围内）以及重叠量（设定在0.12~0.18 mm），并统一将切边余量设定为8~12 mm，此举使切边缺陷率由原来的12%大幅降低至3.5%。

3)强化包装防护:引入更为严密的包装方案,采用聚乙烯防护套搭配瓦楞纸进行双重包装,使得带钢在运输和存储过程中的边部磕碰率从 7.5% 显著降至 1.1% 。

3.2　针对终端用户端的工艺改进与控制措施

1)建立分级参数库:按照表 1 所列参数,精准匹配焊接电流与焊接速度,并配备高精度的数字式焊机(确保电流波动控制在±0.5 A 以内),从而使热输入的控制精度提升至±3% 。

2)增设对中检测装置:采用先进的激光对中装置,对对接间隙进行实时监控(确保间隙≤0.1 mm),一旦发现超标情况即自动停机进行调整,有效避免焊接偏差。

3)优化预处理流程:对于存在轻微磕碰的带钢,先采用机械修边的方式去除深度≥0.3 mm 的表面缺陷,经过修整后再进入后续的焊接工序,保证焊接质量。

3.3　综合实施效果与经济效益分析

在 2023 年 4—9 月期间, 上述措施在 3 家终端用户处得到推广应用。在此期间,累计生产家电用薄带钢达 1.5 万 t,取得了显著成效。焊穿缺陷率由 8.3% 大幅下降至 1.1% ,其中 0.5 mm 规格的薄带钢焊穿率更是从 12.7% 降至 2.3% ,因故障导致的生产线停机时间减少了 82% ,成材率由 91.2% 提升至 98.4% 。通过这一系列技术改进,实现了直接经济效益超过 300 万元 /a,显著提升了产品质量和生产效率。

4　结论

1)家电用薄带钢 TIG 焊焊穿的核心诱因是焊接热输入不合理(42%)与板带对中不良(35%),其次为切边质量缺陷(18%)和运输磕碰(5%),缺陷发生率随带钢厚度减小而显著升高。

2)通过钢厂 - 外协 - 用户全流程协同控制:优化拉矫与切边工艺、建立分级焊接参数库、强化包装防护与对中检测,可将焊穿缺陷率控制在 1.5% 以下。

3)0.5~1.2 mm 规格带钢的最优工艺窗口为:拉矫延伸率 0.8% ~1.2% 、剪刃间隙 5% t~8% t、焊接热输入 11~22 J/mm ,该参数组合可实现焊缝成形与生产效率的最优平衡。

参考文献

[1]　宝华.我国家电用钢主要品种的市场现状及供求分析[J].电器制造商,2001(2):1-2.

[2]　周慧春.高品质家电用钢生产技术研究与应用[D].唐山:华北理工大学,2019.

[3]　胡晓红.家电行业钢材需求趋势[J].新材料产业,2008(7):32-35.

[4]　汲生鹏,闫志鸿,刘嘉,等.基于深度学习的薄板 TIG 焊焊缝成形视觉检测[J].热加工工艺,2022,51(3):1-5.

[5]　韩晓辉,高瑞全,肖雪峰.不锈钢城轨车辆波纹板与侧顶板搭接焊接工艺[J].热加工工艺,2013,42(7):169-170.

Cause Analysis and Full Process Control of TIG Welding Penetration of Thin Strip Steel for Household Appliances

Cheng Qianlei

(Hanbao Cold Rolling Plant, HBIS Group Hansteel Company, Handan Hebei 056000, China)

Abstract: Thin gauge hot-dip galvanized strip steel (thickness 0.5~1.2 mm) for household appliances is widely used in structural components such as refrigerators and washing machines due to its excellent formability. However, welding through defects occur frequently during TIG welding, which seriously restricts production efficiency. In view of this, through on-site tracking, defect statistics, and process testing, the key causes of welding penetration are systematically analyzed, and a full process control plan is proposed based on quantitative data. The results showed that unreasonable welding heat input (42%), excessive gap between plates and strips (35%), quality defects of cutting edges (18%), and transportation collisions (5%) were the main reasons. By optimizing the welding parameter window, controlling the straightening elongation rate at 0.8% ~1.2% , adjusting the longitudinal shear blade clearance to 5% ~8% of the strip thickness, and increasing the cutting margin to 8~12 mm, the welding through defect rate decreased from 8.3% before the improvement to 1.1% , and the yield rate increased by 7.2 percentage points, effectively ensuring smooth continuous production.

Key words: thin strip steel for household appliances; TIG welding; welding burn through; process optimization; quality control

(上接第 240 页)

[3]　马鸣图,吴宝榕.双相钢 - 物理和力学冶金[M].北京:冶金工业出版社,1988.

[4]　杨海根,王军.DP600 级热轧双相钢的开发[J].冶金丛刊,2008(6):10-13.

Development of Hot-rolled Dual Phase Steel DP600 for Spokes

Cheng Yang, An Ruidong, Wei Yangen, Wang Ting

(Shougang Jingtang Iron & Steel United Co., Ltd., Tangshan Hebei 063200, China)

Abstract: In order to fully utilize the cooling capacity of Shougang Jingtang 2 250 mm hot rolling mill, a C-Si-Mn-Cr-Mo system composition design was adopted, and a three-stage cooling method of water cooling-air cooling-water cooling was successfully developed to produce hot-rolled dual phase steel DP600 for spokes. By rational composition design and cooling after rolling, a dual phase structure of ferrite and martensite can be obtained, which meets the requirements of steel for spokes.

Key words: biphasic; spoke; DP600; fatigue