

浅谈热成形钢焊接飞溅工艺优化研究

刘佳旭 孙祎伟 刘振浩 邹家琪 李文鹏 贾强 李靖 陆超
零跑科技股份有限公司

摘要: 热成形钢焊接飞溅现象对车身产品质量和生产效率会产生严重的影响。焊接时间和焊接压力之间的交互作用在飞溅的控制方面非常关键,通过应用参数优化与自适应控制系统,能够在确保焊点合格率达100%的情况下,把飞溅率成功控制在10%以下,为汽车制造热成形钢的高质量焊接给出了可靠的解决办法。

关键词: 焊接飞溅; 动态电阻检测正交试验; 参数优化; 热成形钢

0 前言

由于汽车在轻量化和安全标准方面持续提高,热成形钢凭借极高的强度(抗拉强度能够达到1500 MPa以上)以及出众的碰撞能量吸收能力,在现代车身结构里已经不可或缺。不过,这种材料也会引发一些制造难题,其中焊接飞溅现象在电阻点焊过程中表现得最为显著。

热成形钢焊接飞溅的研究,目前主要在焊接参数的优化、界面状态的控制以及新型工艺的开发三个方向展开。虽然国内外的学者已经有了一些成果,可是在全面探究飞溅出现原理方面还是有所欠缺。本研究采用多种方式,深入剖析缺陷形成原理,进而制定控制策略,并在实际工况中进行验证。

1 热成形钢焊接特性与飞溅挑战

热成形钢(例如常用的22MnB5这种类型),其焊接特性和它特有的微观组织以及加工工艺有着紧密的联系。其加工工艺包含两个关键阶段,一是要把硼钢坯料加热到900~950℃这个奥氏体化的温度区间内,二是在特殊模具中用冲压和压力处理,通过模具内部冷却系统实现快速淬火(冷却速率 $>27^{\circ}\text{C}/\text{s}$),最终获得板条马氏体主导组织。这一操作使材料具备超高强

度,与此同时也对焊接适应性产生了挑战。

热成形钢与普通低碳钢在焊接特性上有着本质区别,见表1,就热物理性能而言,其电阻率相较于低碳钢高出大概20%,在同样的焊接参数下其产热效率更高;导热性降低15%左右,热量更容易积聚在焊接区域。从冶金学的角度来说,热成形钢在焊接热循环的影响下会经历复杂的相变过程:焊接时的高温会让母材的马氏体回火或者完全奥氏体化,在随后的冷却环节,由于周边冷金属存在“自淬火”效应,会产生硬而脆的新马氏体组织。据相关研究,这一区域的硬度能够达到450~500 HV,为基材硬度的1.2~1.5倍,这使得焊接接头的开裂倾向大幅增加。

2 形成机理和飞溅焊接类型

电阻点焊过程中会出现熔融金属的非预期喷溅现象,即焊接飞溅,这一现象的产生机制和熔核形成动力学联系紧密。按照产生的时间和喷溅方向的不同,飞溅能够被系统地分成前期飞溅、后期飞溅、内飞溅以及外飞溅。基于对这些飞溅类型形成机理的深入理解,制定有效控制策略,见表2。

2.1 前期飞溅的产生机制

在通电开始后的50~150 ms内往往会出现前期

表1 热成形钢与普通低碳钢焊接特性对比

特性参数	热成形钢(22MnB5)	普通低碳钢	差异影响
电阻率/ $\mu\Omega\cdot\text{m}$	0.25	0.15	产热增加,需降低焊接电流
热导率($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	28	45	热积累显著,冷却要求高
马氏体开始温度/ $^{\circ}\text{C}$	380~420	-	自淬火效应明显
焊接热影响区硬度/HV	450~500	180~220	脆性增大,飞溅物更易产生
镀锌层熔点/ $^{\circ}\text{C}$	≈ 420	≈ 420	低于钢材熔点,易引发早期飞溅

表 2 焊接飞溅类型及特征

分类依据	飞溅类型	发生时段	产生机理	典型特征	控制策略
时间序列	前期飞溅	50 ~ 150 ms	界面污染 / 镀锌层汽化	细小颗粒，径向喷溅	预热电流 / 加强清理
	后期飞溅	>150 ms	熔核过度生长	大颗粒，轴向喷溅	降低电流 / 缩短时间
空间位置	内飞溅	全周期	板间杂质或压力不均	隐蔽于板间，超声检测发现	优化压力 / 增加预压时间
	外飞溅	全周期	表面污染或电极磨损	附着于板表面，肉眼可见	电极整形 / 表面处理
过渡模式	爆炸飞溅	随机	短路再引燃	爆发式喷溅	电流斜率控制
	熔池偏飞	中后期	电磁力失衡	定向喷溅	磁场补偿 / 电流波形

飞溅的情况，主要是由于界面状态不正常而造成的局部电流聚集。如果板间存在诸如密封胶残留、氧化膜或者油污等导电性差的物质，那么实际接触面积就会明显变小，局部的电流密度会急剧增加，从而使得钢板在塑性环还没有形成的时候就出现早期熔化的现象。在镀锌钢板焊接过程中，这个情况表现得更为明显：420℃时锌层汽化，产生的蒸气压力达 10 ~ 15 MPa，如果电极压力无法保证板间紧密贴合，蒸气就会突破液态金属的限制从而产生喷溅。

2.2 后期飞溅的形成过程

后期飞溅发生在焊接中后期（通常 >150 ms），与熔核过度生长直接相关。一旦焊接的电流和时长超出临界数值，熔核的直径就会不断增大，直至超出电极压力有效约束的范围（“塑性环”区域）。在此种情况下，液态金属受电磁收缩效应（Pinch 效应）影响而向中心汇聚，从而形成径向压力梯度，超出此压力便会产生内飞溅。同时研究表明，热成形钢焊接时有三种过渡模式，分别为滴状过渡、短路过渡以及射滴过渡。其中，射滴过渡会伴随着很强的等离子流力，这种情况容易让熔池出现偏移从而产生“熔池偏飞”现象。再次引起短路的过程很容易造成“爆炸飞溅”。据实验观测，过渡模式受合金元素含量的显著影响：熔滴表面张力随碳当量增加而提高，这有助于大熔滴的形成，而飞溅形态会被锰、硅等元素通过改变熔体流动性所影响。

3 焊接控制方法和试验检验

热成形钢焊接飞溅的系统性控制，要把参数优化、界面状态管理和先进监测技术融合起来。研究运用多层次实验规划，对各因素影响机制展开定量剖析，同时验证控制举措的有效性。

3.1 动态电阻监测技术

热成形钢焊接过程的动态变化难以被传统恒流控制模式适应，而飞溅识别的直接依据由动态电阻曲线提供。博世力士乐的自适应中频电阻焊系统能够实时

监测电极间电阻的改变，精准地捕捉到飞溅发生时刻。飞溅出现时，动态电阻曲线会有特征性的突然变化：前期飞溅体现为电阻值急剧下降（例如在 90 ms 下降 40% ~ 60%），这表明板间距离骤然增大；而在后期的时候，飞溅会呈现出电阻瞬间归零之后又恢复的情况（就像 550 ms 处会有短暂归零的现象），这一情况表明熔核经历了破裂与自我修复的过程。

3.2 焊接参数优化方法

各焊接参数间有着复杂的交互关系，必须运用科学的试验设计手段来进行优化。针对 1.7 mm 与 1.5 mm 的热成形钢双层板，运用正交试验设计（L25 矩阵）来剖析由电流、时间和压力三个因素各自取五个水平所组合产生的影响，见表 3。

表 3 正交试验设计的因子水平表

水平	焊接电流 /kA	焊接时间 /ms	焊接压力 /kN
1	6.2	300	2.2
2	6.5	400	2.4
3	6.7	450	2.6
4	7.0	500	2.8
5	7.2	600	3.0

方差分析显示，焊接电流对飞溅影响最为显著（贡献率 62%），飞溅率与电流呈指数关系（ $Y=0.38e^{0.72I}$ ， $R^2=0.96$ ）；焊接时间与压力交互效应显著（ $P<0.01$ ），但单独影响较小；电流和时间之间的相互作用显著影响熔化核的直径。电流是飞溅控制的主效应因子这一点经 Pareto 图分析得到了进一步确认，而产热效率会被压力通过改变接触电阻间接影响。

二进制逻辑回归生成的飞溅预测模型为：

Text

$$P(\text{Splash})=1/(1+\hat{e}(-z))$$
, 其中 $z=-8.7+1.2 I+0.003 t-0.8 F$ (I : kA ; t : ms ; F : kN)

经证实，以降低电流为主、调节压力为辅是最佳的飞溅控制路径，模型预测准确率达 92%。最终优化参数组合为： $I=6.7$ kA， $t=501$ ms， $F=2.6$ kN，较初始

参数飞溅率降低 90% 以上。

3.3 界面状态控制技术

针对镀锌层和密封胶引发的界面问题，在初始阶段运用时长为 50 ~ 100 ms 的高电流（8 ~ 10 kA）进行预热，从而达到清除界面杂质的目的。第二步切换到主焊接参数以完成连接。拿焊点 BG-5870-R（板组合为 0.8+1.5+0.7 mm，中间板是热成形钢）来说，其原始飞溅率为 61.54%；预热电流 8 kA/50 ms 时，飞溅仍发生于 360 ms（预热不足）；预热电流提升至 10 kA/50 ms 后，动态电阻曲线平滑，飞溅率降至 <5%；金相分析显示熔核直径扩大 18%，无界面缺陷。

优化电极电压同样重要，焊点 BF-5770-L 的情况下，3.3 kN 压力下的飞溅率为 50%；跌落至 3.0 kN 后，飞溅率降至 27.5%。故建议采用伺服压力系统来进行压力的动态调节：在预压阶段使用高压（3.5 ~ 4.0 kN），从而保证板间能够贴合。介质压降（2.5 ~ 3.0 kN）焊接阶段平衡电阻要求压力处理过程中的高压再生促进熔融核密度。

3.4 正交试验验证结果

基于优化参数组合（ $I=6.7$ kA, $t=501$ ms, $F=2.6$ kN）进行 30 组重复试验，结果显示：平均飞溅率从 85% 降至 7.5%（标准差 $\pm 2.1\%$ ）；焊点合格率 100%，熔核直径 $4.8\sqrt{t}$ （ t 为最薄板厚），满足行业标准；剪切强度提升 22%，达到 22.4 kN，断裂模式均为韧性断裂；电极寿命延长 3 倍，因飞溅减少降低了电极粘附。

热成形钢焊接中质量与飞溅的矛盾被该优化方案成功解决了，这证明在不损害连接强度的条件下，通过科学的参数匹配能够有效地控制飞溅。

4 工程用例和影响分析

某自主品牌 SUV 车身生产线应用了此研究成果，这条生产线采用了 28 个以上的热成形钢部件，有 1236 处焊点对飞溅比较敏感。研究对比时发现，原有工艺的飞溅率平均能达到 45%，最高可至 78%，这使得单台车需要额外花费 32 min 返工，对产能提升造成了严重的阻碍。

4.1 参数优化实施效果

在侧围总成工位推行优化方案：焊接电流从 7.0 kA 降至 6.7 kA（降幅 4.3%）；焊接时间从 600 ms 调整为 550 ms（降幅 8.3%）；焊接压力从 3.3 kN 微调至 3.0 kN（降幅 9.1%）；增加预热程序（9 kA/80 ms 清除镀锌层）。

改进后效果显著：该工位飞溅率从 61.2% 降至 8.7%；超声波检测显示熔核直径保持（ 4.2 ± 0.3 ）mm（标准要求 ≥ 4.0 mm）；电极修磨频次从每 500 点提升至 2000 点；单台车该工位节拍缩短 5.3 min。

4.2 自适应焊接系统应用

博世力士乐 PSI63CO.177L1 自适应中频电阻焊系统在门盖生产线得以应用，从而达成飞溅实时控制：动态电阻监测，每 5 ms 采集电阻值，与标准曲线比对；飞溅预判与补偿，当检测到异常电阻陡降（飞溅前兆）时，系统在下一周波自动降低电流 5% ~ 8%；质量闭环控制，焊接结束后评估电阻曲线特征，自动微调后续焊点参数。

三个月系统运行数据显示：飞溅率稳定控制在 $5.2\% \pm 1.8\%$ （原工艺 38.5%）；因飞溅导致的返工成本降低 82%；焊点强度不合格率趋近于零。

5 结语

汽车轻量化进程不断加快的情况下，热成形钢的应用占比会持续增加。本研究给出的飞溅控制策略与工艺优化方案，为汽车制造业突破了这一关键瓶颈问题，与此同时，也为下一代智能焊接系统的开发确立了技术基础。未来，热成形钢焊接借助材料、工艺和数字技术的深度融合，会朝着零缺陷、自适应、高柔性的方向不断发展。

参考文献

- [1] 胡桂云，杜春平. 正交试验优化汽车点焊焊接飞溅的研究 [J]. 热加工工艺, 2020, 49(21): 117-122.
- [2] 喻红梅，周红梅，王钰寒，等. 低合金高强钢焊丝熔滴过渡形态及飞溅分析研究 [J]. 成都工业学院学报, 2024, 27(3): 10-14.
- [3] 翟尚荣，乔晓城. 热成型钢在白车身焊接中的质量控制方法研究 [J]. 汽车与驾驶维修, 2025, (4): 88-91.
- [4] 曹小兵，沈先福，吴强，等. 热成型钢电阻点焊熔核机理及焊接变形研究 [J]. 焊接技术, 2025, 54(2): 22-27.
- [5] 谢吉普. 热成型钢点焊焊接性及参数对力学性能影响的研究 [J]. 汽车实用技术, 2024, 8(24): 130-134.
- [6] 李军正，代金龙，杨丽，等. 热成型钢焊接接头的组织及力学性能 [J]. 焊接技术, 2025, 52(4): 33-35.