

林肯电气 HDT 和 HyperFill™ 高效焊接技术介绍

1、背景

近年来，中国工程机械行业迅猛发展，各大工程机械制造商面临进一步增效降本的压力，而提高熔敷速度（Deposition Rate）是焊接生产缩短制造周期、降低制造总成本的重要途径之一。目前焊接行业内，高效焊接技术层出不穷，但真正得以稳定工程应用的较少。

林肯电气，立足于丰富工程实践经验，开发出针对工程机械行业常用中厚板的单焊接系统高效焊接技术。

林肯电气(LINCOLN ELECTRIC COMPANY)作为全球领先的焊接产品及焊接解决方案提供者，125年来一直致力于帮助客户企业改善焊缝质量、提升焊接生产效率、解决焊接难题。在管道行业，STT®打底工艺享誉全球，配合自保护药芯焊丝填充盖面，为我国西气东输工程提供了解决方案；在制管行业，使用波形控制的埋弧焊接电源，确保了多丝埋弧的稳定性，极大提升了直缝管和螺旋管焊接制造效率，在制管行业得到广泛应用；使用波形控制的气体保护焊逆变焊接电源，通过特有波形实现各个板厚、材质和焊接位置的焊接，针对特殊应用，发挥高焊接速度或低稀释率优势。

2、焊接系统论及技术演化规律简述

焊接系统是一个复杂、整体的系统，各子系统独立工作又互相影响，以实现稳定的传热和传质。从硬件上，焊接系统是送丝、送气、导电回路、控制等系统的关联组合，更微观看，是热、力、质各个微系统的协调组合，其主要涉及焊接设备、焊接材料、焊枪三个模块。子系统发展的不均衡性，是影响整个系统进步的关键，例如：一个小小的导电嘴，可能使几十万价格的焊接工作站问题频出；子系统之间的不协调性，可能使几个优秀的子系统组合达不到预期的整体效果，例如：我们不能用碳钢脉冲模式焊接不锈钢焊丝，即使是优秀的焊接电源和不锈钢焊丝。我国潘际銮院士最早主张以系统论方法研究焊接过程，寻找各系统间相互联系，建立稳态平衡方程，进行系统整体分析和控制。在其著作《Arc Welding Control》一书中建立了弧焊控制系统整体模型。从技术演化规律来看，子系统发展不均衡性是固有规律，子系统协调性是演化必然，系统功能的简单、稳定遵循其理想度提升法则。

对于气体保护焊焊接系统，为改进其功能性，近十几年来有向复杂系统演化趋势，例如双丝焊、双丝间接弧焊等焊接方法的出现，但除林肯电气等全球性焊接公司外，能稳定应用于生产的并不多。时至今日，多丝焊接系统之间的热、

力、质并未完美耦合。因此，单焊接系统仍是最稳定的焊接方案。

3、高效单焊接系统解决方案

工程机械行业存在大量的中厚板焊接制造，熔敷速度的提升显得尤为重要。随着自动化水平的提升，寻求灵活、简单、高效、稳定的焊接工艺匹配是其最主要追求。在焊接行业，林肯电气从系统论出发，优化匹配各个子部分，针对中厚板焊接研发出了单系统高效焊接解决方案。在此选择两种经典单系统焊接方案进行介绍。

3.1、HDT 高效焊接（波形控制+特殊金属粉芯+焊枪的 HDT）解决方案

对于传统单丝 MAG 焊，当焊接电流提高至一定值时，熔滴过渡频率增加，形成“液流束”。在固-液表面张力、电磁力和电弧斑点力等作用下，产生旋转喷射过渡^[1]，其电弧不稳、飞溅较大，不能用于生产。开始产生旋转喷射过渡的焊接电流，称为第二临界电流，第二临界电流与焊丝伸出长度和保护气体成分密切相关。图 1 所示^[2]，为 ϕ 1.2 毫米低碳钢焊丝，在 80%Ar/20%CO₂ 和 98%Ar/2%O₂ 保护气体下的第二临界电流。

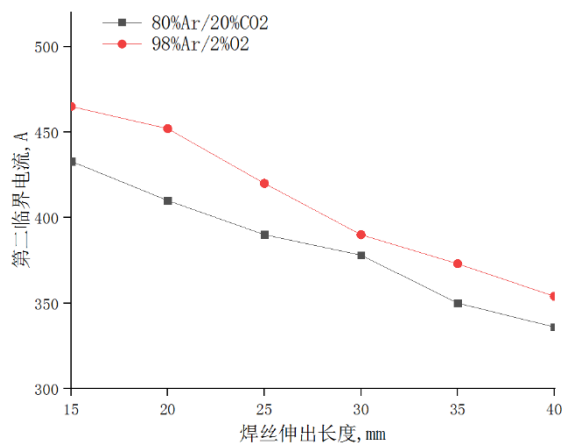


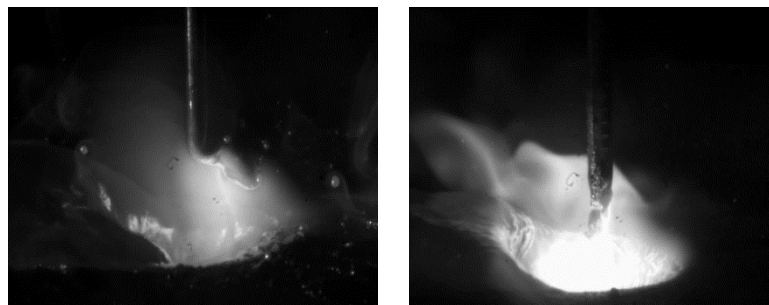
图 1 细丝大电流 MAG 焊的第二临界电流值（低碳钢）

林肯电气 HDT 使用机器人单丝焊接系统，考虑各个子部分的影响，使其获得更稳定的综合表现。其中包括：带波形控制的大暂载率逆变焊接电源(700A@100%)、独特的电源外特性设计和波形设计、桶装特殊配方金属粉芯焊丝和高暂载率水冷焊枪。 如图 2 所示。



图 2 HDT 焊接系统

林肯电气 HDT 与传统单丝焊区别之一为使用特殊配方的金属粉芯焊丝。由于金属粉芯焊丝“○形加金属粉填充”式的焊丝截面及大电流配方，焊丝熔化方式与实心焊丝不同，其喷射过渡不易形成窄细的液流束，即使在 35 毫米焊丝伸出长度时，仍具有较高的第二临界电流，在该电流范围内，可以满足工程上大幅提升熔敷速度的要求。图 3 为 φ 1.4 毫米实心焊丝与 φ 1.4 毫米金属粉芯焊丝大电流焊接过程的高速摄像片段。



a) 实心焊丝，旋转射流过渡 b) 金属粉芯焊丝，轴向喷射过渡

图 3 实心焊丝与金属粉芯焊丝大电流焊接熔滴过渡对比
(φ 1.4 毫米低碳钢焊丝，80%Ar/20%CO₂)

同时，焊丝配方中合金元素的调配，可在大焊接电流下保证其优异的力学性能。另外，为改善单丝大电流熔池可控性，林肯焊接电源 Power Wave[®] S700 配备有专门的“HDT”焊接波形。该波形使用特殊的电源外特性和高反馈速率，可使其在相对低的焊接电压下维持稳定的焊接过程。

焊枪作为整个焊接系统中重要的一环，对焊接过程稳定性有着直接的影响。HDT 焊枪的设计，不仅考虑焊枪整体使用寿命，还关注焊接过程中导电嘴温升对焊接过程稳定性的影响。

在各部分优化的基础上，HDT 可得到高达 21 公斤/小时的熔敷速度。传统单丝实心焊丝 ϕ 1.2、1.4 毫米、1.6 毫米的熔敷速度上限分别约为 6.5、10、12 公斤/小时。HDT 与之相比，分别为其 3.2 倍、2.1 倍和 1.7 倍。图 4 为 ϕ 1.2 毫米实心焊丝和 ϕ 1.6 毫米 HDT 船形焊角焊缝熔敷速度对比。同样 12 毫米焊脚的焊缝，同等焊接时间下， ϕ 1.2 毫米单丝完成长度为 120 毫米， ϕ 1.6 毫米 HDT 完成长度为 270 毫米，后者是前者的 2.25 倍。



a) ϕ 1.2 毫米实心, I=315A



b) ϕ 1.6 毫米 HDT, I=650A

图 4 ϕ 1.2 毫米单丝和 ϕ 1.6 毫米 HDT 熔敷速度对比

3.2、HyperFill™高效焊接（波形控制+单电弧双丝+焊枪的 HyperFill™）解决方案

林肯 HyperFill™是一种单系统双丝焊接工艺，与传统单丝焊相比，焊接回路相同，所不同为使用两根直径相同的焊丝同时送进。焊接过程中，两根焊丝共用一个特殊设计的双孔导电嘴，焊丝尖端共电弧，产生单熔滴过渡到熔池，因此两根焊丝之间不存在电弧干扰，过程稳定，仍旧为简单的单丝焊接系统。焊接过程表现与双丝对比如图 5 所示。



a) HyperFill™



b) 传统单丝

图 5 HyperFill™与传统单丝焊接过程

如前所述，林肯电气拥有从设备到焊材，及至焊接配件的全面焊接产品和焊接技术，因此有能力，也更关注整个焊接系统的匹配性，从而优化、稳定焊接过程。为此，林肯电气专门研发了针对双丝单电弧单熔滴过渡形式的专有脉冲波形，降低 HyperFill™工艺喷射过渡的平均电流，增大适用的参数窗口；设计单路径

双丝送丝系统，使系统紧凑；配备专有焊枪，确保其大参数下可用性。林肯电气不仅是该焊接技术的发明者，更把该技术推向稳定和成熟。

显然的，双丝可以承载更高的焊接电流，并且双细丝相对于同截面粗丝具有更大的熔化速度，因此，HyperFill™工艺具有高熔敷速度和高熔敷效率的双重优势。配备林肯 Power Wave® S500 焊接电源，采用 1.0 毫米直径焊丝，可获得 9 公斤/小时的熔敷速度，配备 Power Wave® S700 焊接电源，采用 1.2 毫米直径焊丝，熔敷速度可达 12 公斤/小时。

另外，由于双丝共电弧和熔滴，HyperFill™双丝电弧弧根面积大，电弧宽度得以扩展，相对单丝焊接，极大降低了电弧压力。该特性将带来以下优势：

1) 熔池可控性好

传统单丝焊大电流手工时，电弧压力大，熔池受力大而扰动剧烈，可控性差；HyperFill™电弧柔和，利于维持熔池的稳定。即使对于自动焊接，稳定的熔池也增加了横焊位置的可操作性。如图 6 所示。

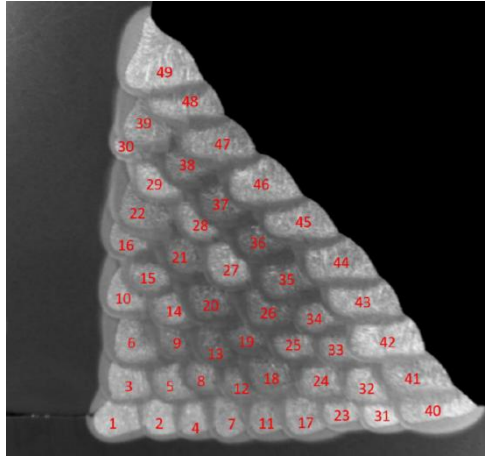
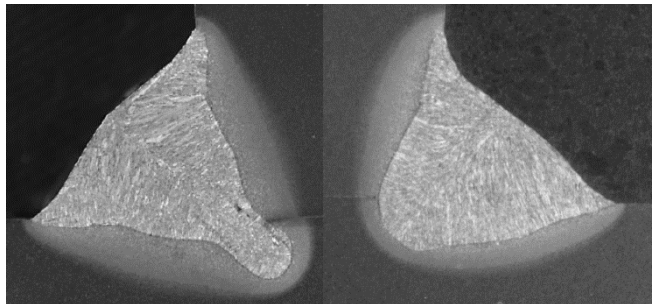


图 6 HyperFill™横焊搭接

2) 避免产生指状熔深，降低裂纹、未熔合、气孔等缺陷倾向。

单丝大电流吹力大，且热量集中，大电流时容易产生指状熔深，不仅不利于气体、杂质的逸出，还容易导致焊缝中心裂纹，当侧壁热量不足时，产生未熔合缺陷。HyperFill™电弧柔和，热量分散，更利于得到平滑的根部轮廓。



a) 单丝

b) HyperFill™

图 5 HyperFill™与传统单丝熔深轮廓

4、总论

林肯电气 HDT 和 HyperFill™工艺为单焊接系统，具有简单、经济、高效的特点，完好匹配于焊接自动化对高效、稳定焊接工艺的需求，是一种理想的焊接制造效率提升解决方案。另外 HyperFill™适用于小电流至大电流全参数范围，也可以用于手工焊，具有较好熔池可控性。HDT 和 HyperFill™焊接工艺为林肯电气近年推出的中厚板焊接解决方案，在全球范围获得广泛应用，不仅适用于工程机械行业，也适用于在造船、钢结构等涉及中厚板焊接的行业。

(作者：林肯电气 张皓月 王秀伟)

参考文献

- [1] 包晔峰，周昀，吴毅雄，楼松年. 大电流 MAG 焊旋转喷射过渡中的熔滴失稳分析[J]. 焊接学报, 2003, 24(6):73-76.
- [2] 殷树言，陈树君，华爱兵. 单丝高熔敷效率 MAG 焊接工艺的研究[J]. 电焊机, 2009, 39(1):73-76.