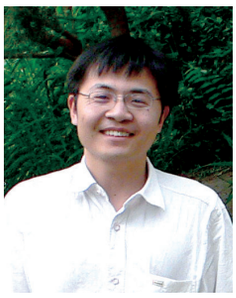


# HD–Pulse超低飞溅焊接技术在工程机械领域的应用研究

李德明　吴月　孟国强　王彩凤

【摘要】通过重点介绍一种高速焊接技术在工程机械领域的应用研究，并进行多方面的工艺试验、数据收集分析及工艺评定，体现了HD–Pulse富氩超低飞溅焊接技术的优越性，在工程机械焊接领域具有较好的应用推广价值。

**关键词：**工程机械；焊接技术；HD–Pulse；超低飞溅

## 1. 概述

近年来，$CO_2$气体保护焊以熔深大，焊接效率高，综合使用成本低等特点被工程机械企业广泛采取，尤其是大型结构件多为中厚板，该种焊接方法受环境影响较小，对工件组对精度质量要求不太敏感，很少影响焊接质量。然而，随着人们对焊接要求的不断提高，$CO_2$气体保护焊由于其自身为大熔滴过渡的特点（见图1），大熔滴落入熔池会导致液态金属的频繁溅出，影响其焊缝成形质量。由此而产生的熔敷率低（约80%），焊接飞溅大（13%～15%），造成焊丝等辅料的利用率较低、修磨工作量大等问题制约着其进一步发展，也一直困扰着构件焊接技术的提升。

基于此，焊接领域相关研究人员从没有间断对先进焊接技术、焊接设备和气体保护介质的研究和试验，也取得了突破性的进展，如二元/三元混合气保护焊的出现，从一定程度上解决了这一难题。目前使用最广的为富氩混合气体，效果明显优于$CO_2$气体保护焊，是焊接低碳钢的一种比较理想的保护气体。

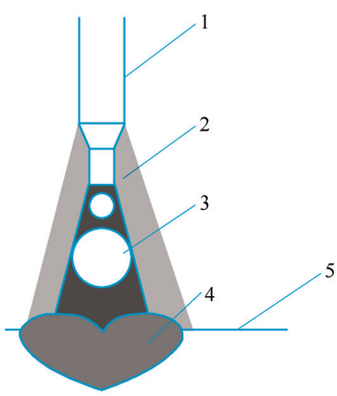



**图1　$CO_2$焊接原理**

1.焊丝 2.电弧 3.熔滴 4.熔池 5.工件

预热温度、层间温度、焊后热处理、热输入等措施，从而能够获得具有优良综合力学性能的焊接接头，制定了切实可行的Q690D复杂箱体的焊接工艺，达到了焊接工艺评定合格的要求，圆满完成了防爆控制柜产品的加工。通过对比两种焊接工艺，优化改进焊接参数，不仅积累了低合金高强钢的焊接经验，而且为我公司以后高端的高强结构箱体、棚构机等产品的加工提供了技术支撑。

**参考文献：**

[1] 王庆伟，秦昱新.风电结构件用Q345E钢的焊接工艺研究.金属加工(热加工)，2016（6）：5-4.

作者简介：王际博等，豫西工业集团河南江河机械有限责任公司。

MW 20161122

**2. 混合气体焊接技术**

通过我公司在关键结构件焊接领域的实施效果来看，富氩混合气体保护焊接技术较原$CO_2$气保焊具有较明显优越性。

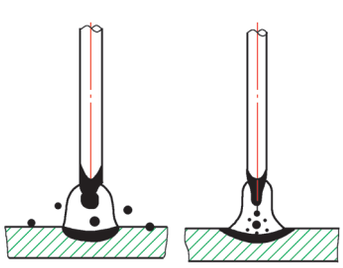
具体体现在以下几个方面：

（1）力学性能和表面成形大幅提升 $CO_2$在电弧中容易分解成CO和$O_2$，分解的气体在高温下与焊丝中Mn、Si等元素反应，导致焊接时Mn、Si大量损失，损失率大约在40%以上。采用富氩混合气体比纯$CO_2$的氧化相对要低得多，由于$CO_2$成分的减少，焊丝中的元素得以熔入到熔池中去，这样势必增强了焊缝的力学性能，抗拉强度和韧性都得到了相应的加强。试验证明，采用80% Ar+20%$CO_2$的混合气焊接，元素的损失大约为纯$CO_2$保护气的一半；同样，由于富氩混合气中含氧百分比的减少，使焊缝表面的氧化物也大大减少，焊缝表面也就比纯$CO_2$保护气焊接的表面光滑得多了，如图2所示。因此，富氩混合气在焊接的力学性能和表面成形上都比纯$CO_2$气体表现要好得多。

（2） 焊接飞溅得到大幅降低 采用纯$CO_2$焊接一般不易产生喷射过渡，由于它使焊丝在焊接中产生的熔滴较大，所以在熔滴摆脱表面张力向下落入焊池过程中受到一个向上的电磁力的作用；另外由于熔滴大，电磁力不平衡地作用于熔滴上，这样大量的熔滴在下落中便掉落到了焊池外边或溅出熔池液态金属，所以便产生了大量的飞溅，如图3a所示。

富氩混合气可以产生喷射过渡，它使焊丝熔滴变得越来越来细小（见图3b），细小的熔滴下落时，作用在熔滴上的电磁力比大熔滴平衡的多，这样大量的小熔滴便会掉到熔池中去，飞溅的产生便会大大的减少。由于飞溅的减少，使焊接工人用不着经常停下来清理焊嘴，也用不着专门用工人去清理焊缝上的飞溅，所以富氩混合气焊接可大大提高焊接的生产效率。

图2 混合气体焊接外观



（a）大熔滴过渡 （b）喷射过渡

图3 熔滴过渡形式对比

综上所述，可见$CO_2$与氩气的混合，使两种气体在焊接时的优势得到了充分的发挥，同时又避免了各自的劣势，氩气成分改善了焊接表面的质量，减少了$CO_2$带来的飞溅；而$CO_2$成分又有使电离弧的稳定性得到了增强，因此使用富氩混合气焊接减少的飞溅是纯$CO_2$气体焊接望尘莫及的。

（3）综合经济成本也出现略微下降 有人认为富氩混合气焊接质量好，但成本太高，不宜大量推广使用，实际上这样的理解是不全面的。由于焊丝占有了焊接成本的一半以上，富氩混合气虽然成本增加了25%，但减少了15%的焊丝成本，同时因飞溅的减少，清理飞溅而发生的劳动力也随之降低约80%，所以富氩混合气焊接成本比纯$CO_2$焊接成本降低5%以上。由此可见，富氩混合气焊接不仅提高了焊接质量和焊接效率，而且降低了焊接成本，适合在低碳钢焊接上大量使用。

然而，在中厚板实际的焊接过程中，我们发现富氩混合气体焊接对前期组对工序和精度要求较高，现有组对保证能力导致生产效率明显不足，需要设计精度更高的专用组对工装，否则会成为生产瓶颈；同时因其对板材表面锈蚀比较敏感，时常影响焊接产品质量。为了更好地解决上述问题，结合目前业内最新研究成果，采取一种先进的HD-Pulse脉冲无飞溅技术，开展对工程机械用中厚板件进行高速焊接工艺试验，并对该技术进行工艺评定，验证其焊接性能。

**3. HD-Pulse超低飞溅焊接技术**

（1）工艺试验方案 根据市场技术调研，试验设备采用某知名品牌500A多用途焊机，该焊机拥有世界领先的焊接电源融合性的MTS控制技术和SP控制技术，大幅降低焊接飞溅使MAG焊接

飞溅锐减，尤其是“HD-PULSE焊接法”实现了中厚板焊接的高速高品质和超低飞溅的焊接需要。

根据GB/T 985.1－2008和产品图样要求，试验焊丝类型为ER50—6，$\phi$1.2mm镀铜盘装焊丝，工艺试板材质为Q460C，规格260mm×200mm×16mm，钝边2mm，60°V形坡口，沿用上述经济性较好的混合气体（80%Ar+20%$CO_2$）；焊接方法采取普通富氩焊、富氩高脉冲焊两种；焊接方式为V形坡口单面焊双面成形，焊接方向平行轧制方向。

（2）工艺参数　试板焊接组装间隙为2~3mm，V形坡口焊接接头反面可加陶瓷衬板，适当采取反变形进行控制焊接变形，坡口表面及附近（两侧20mm范围）清除水、锈、油污和其他杂质，防止产生气孔，具体焊接参数如表1所示。

通过多批次普通富氩和高脉冲工艺试板焊接试验，并对现场进行全程跟踪，发现脉冲焊接弧光较普通气保焊弧光较强，但高脉冲在同等热输入时弧光强度低于普通脉冲。通过高速影像可以看出，富氩脉冲焊为连续射流过渡，无明显熔池飞溅现象，受电磁影响，电弧呈明显钟罩状，如图4所示。

通过焊后工艺试板，可以看出脉冲焊接不仅可以控制焊缝成形，使焊缝外观质量非常美观，同时鲜有飞溅（见图5）。另外在同样的焊接操作参数下，高脉冲焊接比普通脉冲焊接更能减少焊接烟尘的产生。因此，相比投资硬件设备来改善焊接操作环境，采用脉冲焊接具有附带减少环境污染的优势。

### 4. 试验数据收集分析

（1）力学性能检测　按照GB/T 985.1－2008要求制作拉伸冲击试验，检测数据及试验现场情况如图6、图7所示；同时对比$CO_2$气体保护焊、富氩混合气体焊、普通脉冲焊等各参数试验结果，得出结论如下。

首先，所有工艺试验结果均符合或优于国家相关标准，$CO_2$焊接参数不适合富氩混合气体焊接。

其次，综合力学性能HD-Pulse＞Pulse＞80%Ar+20%$CO_2$＞$CO_2$，HD-Pulse力学性能提升明显：屈服强度提升了5.82%，抗拉强度提升了4%，-29℃冲击

表1　焊接参数

| 焊丝型号 | 焊接方法 | 焊道 | 焊接电流/A | 混合气流量/L·min$^{-1}$ | 焊接速度/cm·min$^{-1}$ | 层间温度/℃ | 备注 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ER50—6 $\phi$1.2 | 普通富氩 | 打底 | 220~240 | 25 | 30 | 100~150 | 采取一元化参数设计，电压可微调±2V |
| | | 填充+盖面 | 280~300 | 30 | 35 | | |
| | 高脉冲 | 打底 | 240~280 | 25 | 35 | | |
| | | 填充+盖面 | 300~340 | 30 | 40 | | |

图4　高脉冲焊接工艺试验

图5　高脉冲焊接焊缝外观

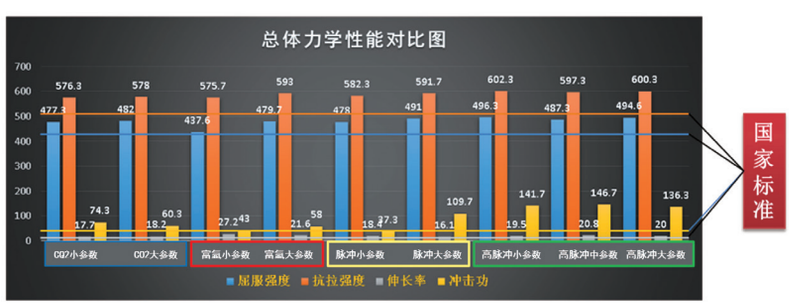



图6　焊接综合性能对比

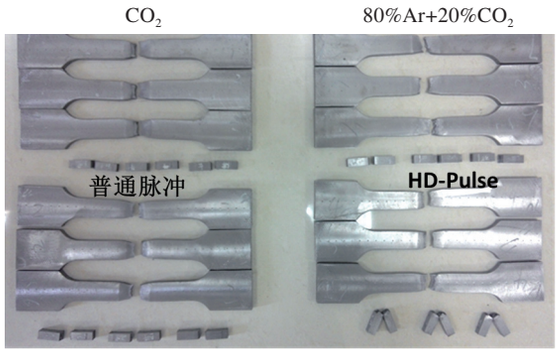


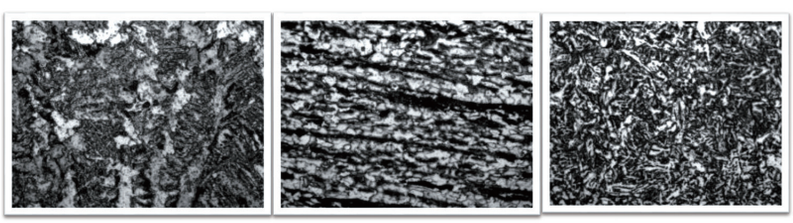

图7　试验后试样

吸收能量提升了138%，韧性最好。

（2）金相组织检测　众所周知，焊接过程是个局部快速加热到高温并随后冷却的过程，整个焊件的温度随时间和空间急剧变化，易形成在时间和空间域内梯度都很大的不均匀温度场，而温度场的分布决定着焊缝区和热影响区的范围，对焊接接头的组织和性能有着直接影响。因此，在焊接冷却之后，要对焊缝进行超声波探伤（UT检测），针对四种焊接方法在无缺陷区域割取样块制作试样，进行剖切腐蚀后通过图8三种金相组织可以看出，焊缝组织为铁素体和贝氏体，组织长大，母材组织为规则轧制铁素体+珠光体层，热影响区为板条贝氏体及少量粒状贝氏体，相比HD-Pulse焊接方式组织性能较好。

（3）焊接飞溅量检测　通过大称重电子天平秤（称重范围200kg/精度1g）分别进行被焊工件、焊丝、飞溅量、焊渣焊豆等相关前后重量的检测，收集相应的数据如表2所示。

根据上述试验数据，按照相关公式进行计算，焊接熔敷率、飞溅率和烧损率如图9所示。由图9可以看出，HD-Pulse超低飞溅焊接熔敷率非常高，达到95%，远远高于混合气体（80%Ar+20%$CO_2$）焊接方式，同时飞溅率和烧损明显减少。通过先进的HD-Pulse技术，可以提高焊接质量，降低焊接总成本，提高焊接效率。



焊缝组织　　母材组织　　热影响区组织

**图8　HD-Pulse试样组织X500**

**表2　相关重量检测数据**　　（kg）

| 焊接类型 | 试件编号 | 焊前称重 | 焊后称重 | 修磨后称重 | 焊丝消耗称重 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 80%Ar+20%$CO_2$焊接 | 01 | 129.145 | 133.25 | 133.133 | 焊前 | 37.23 | 焊后 | 34.65 |
| | 02 | 102.97 | 105.45 | 105.392 | 焊前 | 34.35 | 焊后 | 32.95 |
| | 03 | 129.98 | 134.085 | 133.97 | 焊前 | 32.75 | 焊后 | 30.23 |
| | 04 | 103.605 | 106.115 | 106.013 | 焊前 | 30.1 | 焊后 | 28.72 |
| HD-Pulse高速超低飞溅焊接 | 05 | 131.365 | 135.71 | 135.705 | 焊前 | 178.2 | 焊后 | 176.05 |
| | 06 | 103.525 | 106.19 | 106.186 | 焊前 | 176.05 | 焊后 | 174.63 |
| | 07 | 130.94 | 135.285 | 135.277 | 焊前 | 174.63 | 焊后 | 172.35 |
| | 08 | 102.115 | 104.735 | 104.732 | 焊前 | 172.35 | 焊后 | 170.98 |

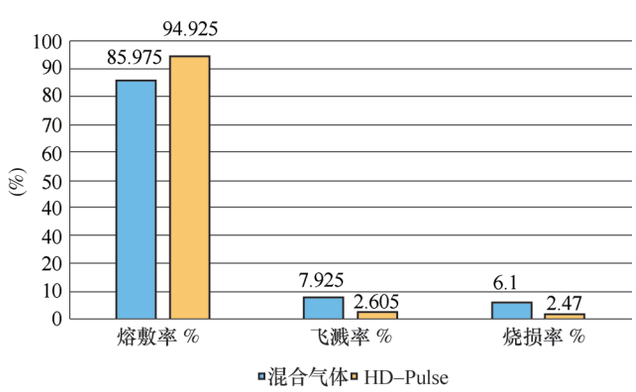



**图9　焊接飞溅率对比**

## 5. 应用展望

通过上述工艺试验研究以及后续在推土机台车方盒焊接的小批量应用，我们可以发现HD-Pulse高速超低飞溅焊接技术相对于目前工程机械企业普遍采取的单纯一元/多元气保焊技术具有熔敷率高、焊缝成形控制好、超低飞溅和焊接烟尘少等优点，尤其是焊接效率高，节约15%左右的焊丝单位用量，同时免于大量的焊后修磨工作，为企业节省了大量的人力物力，熔敷特性优越性明显。

随着中国制造2025装备制造业技术创新的深入推进，工程机械行业也将会出现新的机遇期，未来10年或一段时期企业生产将面临制造智能化、柔性化、自动化高度集成化的应用转型期，其中像HD-Pulse等高效的焊接装备必将被越来越多的工程机械企业所接受，成为应用的重点领域，也必将为企业工艺技术创新做出应有的贡献。

**参考文献：**

[1] 翟浩.工程机械大型结构件焊接自动化柔性生产技术研究[J].山东大学，2015.

作者简介：李德明等，山推国际事业园推土机技术部。

MW 20161122