

## 机械工程

# 冷金属过渡焊接工艺在矿井掘进设备薄板结构件变形控制中的应用

杨军

国家能源集团神东煤炭集团公司设备维修中心一厂一部

DOI: 10.12238/j pm.v6i12.8632

**[摘要]** 本文所研究的核心，是矿井掘进设备（如掘锚机、连采机以及梭车）薄板结构件在焊接过程当中频繁出现的热变形这一问题，同时重点关注冷金属过渡（CMT）焊接工艺在实际工程里的运用情况。借助深入分析 CMT 工艺所具备的低热量输入这一特性、稳定熔滴过渡的原理，以及它们和设备薄板焊接变形之间存在的内在联系，并且结合矿井设备维修环境下对工艺参数进行的调节、对焊接路线展开的规划，此外利用工装辅助等方式，对该工艺在控制设备薄板结构件变形方面所具备的技术优势，以及达成的路径进行深入探究。经过研究发现，CMT 工艺依靠其低热量输入以及无飞溅熔滴过渡的独特性质，能够有效地降低设备薄板焊接区域产生的温度差异以及残余应力。再配合具有针对性的工艺改进举措，能够极为显著地提高设备薄板结构件焊接之后的尺寸精度以及力学性能，从而为掘锚机、连采机、梭车等矿井掘进设备薄板结构件的维修焊接工作提供有力的技术支持，确保设备的装配精度以及在井下使用时的可靠性。

**[关键词]** 冷金属过渡焊接；矿井掘进设备；薄板结构件；变形控制

## Application of Cold Metal Transition Welding Process in Deformation Control of Thin Plate Structural Components of Mining Excavation Equipment

Yang Jun

Equipment Maintenance Center of Shendong Coal Group Company, National Energy Group, Factory 1,  
Department 1

**[Abstract]** The core of this article is the frequent occurrence of thermal deformation in the welding process of thin plate structural components of mining excavation equipment (such as anchor machines, continuous mining machines, and shuttle cars), while focusing on the application of cold metal transition (CMT) welding technology in practical engineering. Through in-depth analysis of the low heat input characteristic of CMT process, the principle of stable droplet transfer, and the inherent relationship between them and the deformation of equipment thin plate welding, combined with the adjustment of process parameters and the planning of welding routes in the maintenance environment of mining equipment, and the use of tooling assistance, this study explores the technical advantages and achieved paths of this process in controlling the deformation of equipment thin plate structural components. Through research, it has been found that the CMT process, relying on its unique properties of low heat input and no splashing droplet transfer, can effectively reduce the temperature difference and residual stress generated in the welding area of equipment thin plates. Combined with targeted process improvement measures, the dimensional accuracy and mechanical performance of the welded thin plate structural components of the equipment can be significantly improved, providing strong technical support for the maintenance and welding of thin plate structural components of mining excavation equipment such as anchor excavators, continuous mining machines, shuttle cars, etc., ensuring the assembly accuracy of the equipment and the reliability of underground use.

**[Key words]** Cold metal transition welding; Mining excavation equipment; Thin plate structural components; deformation control

## 引言

冷金属过渡 (CMT) 焊接工艺作为一种创新的低热量输入技术,它依靠焊丝的机械回抽,能够达成无飞溅的熔滴过渡效果,如此就可以显著降低焊接热输入。此工艺为矿井掘进设备薄板结构件维修过程中的变形控制,提供了一种具备可行性的解决办法。本文基于矿井设备检修的实际工作场景,对 CMT 工艺的技术特点展开了分析,同时研究了它在设备薄板焊接变形控制方面的应用价值与优化措施,目的是给井下设备维修提供具有实际操作性的技术参考依据。

## 1 冷金属过渡焊接工艺在矿井掘进设备薄板结构件应用中的技术价值

### 1.1 低热量输入特性降低热影响区范围

通常而言,矿井掘进设备的薄板结构件,大多会选用低碳钢以及不锈钢作为材料。像连采机机身护板,经常使用厚度在 1.5 - 2.0 毫米的低碳钢板,而梭车传动箱外壳,则常用 1.2 - 1.8 毫米厚的不锈钢板。一种 CMT 工艺,它借助“焊丝回抽 - 送进”这种协调控制方式,在熔滴和熔池相互接触的那一刻,主动把焊丝回抽,进而达成低温熔滴过渡的效果。与传统的 MIG 焊相比,这种 CMT 工艺能够使热输入减少 30% - 50%。在进行焊接操作的情况下,把电弧电压控制在 12 - 18 伏,让电流稳定保持在 60 - 120 安,如此便能有效降低设备薄板焊接区域热量的积累情况。拿厚度为 1.5 毫米的连采机输送机侧板低碳钢薄板作为例子,运用 CMT 工艺进行焊接时,热影响区 (HAZ) 的宽度可以被控制在 1.2 - 2.0 毫米范围,这可比传统 MIG 焊热影响区 3.5 - 5.0 毫米的宽度小很多。正是因为 CMT 工艺具备这样的特性,所以能够避免设备薄板热影响区和母材在性能上出现过大的差异。比如,掘锚机截割部护板焊接之后,热影响区韧性下降,在井下受到冲击时就容易出现开裂的状况,但是 CMT 工艺就能够降低这类风险。与此同时,CMT 工艺还能减少应力集中,从而确保设备薄板结构件在井下具备良好的抗冲击性能。

### 1.2 稳定熔滴过渡减少焊接缺陷产生

CMT 工艺凭借高精度电流反馈以及焊丝送进控制系统,能够对熔滴过渡的整体过程进行实时的掌控:一旦熔滴跟熔池相接触进而形成短路,该系统就会迅速把电流降低到 10 - 20A,与此同时,驱动焊丝以 50 - 100mm/s 的速率进行回抽,如此,就能够彻底避免传统短路过渡所出现的飞溅问题以及熔池扰动。在对掘锚机液压管路连接板(其材质为厚度 1.0mm 的低碳钢板)加以修复的情况下,运用 CMT 工艺可以实现无飞溅的焊接效果,焊缝表面的平整度能够满足设备密封方面的要求,从而防止因为飞溅而造成密封垫受损;当焊接连采机导向轮支架薄板时,稳定的熔池能够减少气孔、未焊透等各种缺陷的产生,进而保障支架的承载能力,使其符合井下设备重载作业的相关

需求。

## 2 冷金属过渡焊接工艺与矿井掘进设备薄板结构件变形的关联机制

### 2.1 工艺参数对设备薄板焊接变形的影响规律

焊接电流和电压对 CMT 工艺的热输入量以及熔池的形态起着决定性作用,这对设备的薄板变形状况影响十分突出。拿矿井设备经常使用的 1.2mm 镀锌钢板(比如梭车驾驶室外壳)的焊接情况而言:当电流处于 60A 以下的情况下,很容易出现熔深不够、未能焊透的现象,如此一来,就会使得外壳和骨架的连接强度欠佳,在井下受到震动影响时,就容易产生松动情况;而若是电流超过 120A,过高的热输入会造成熔池面积扩大,薄板的局部区域迅速升温,在冷却之后就会出现翘曲变形,进而对驾驶室的密封性能产生影响。与之相匹配的焊接电压需要把控制在 13 - 16V 此范围:若是电压偏高,会让电弧的长度变长,热量分散开来,导致焊缝的成型效果不好,就像掘锚机液压油箱盖板在焊接之后容易出现焊缝凹陷的状况,影响到密封;若是电压过低,就会造成焊丝和熔池发生粘连,破坏了熔滴过渡的稳定性,增加了焊缝出现缺陷的可能性。在实际的维修操作中,将电流设定在 80 - 100A,电压设定在 14 - 15V,这样既能确保熔深达到 0.8 - 1.0mm(满足设备连接强度方面的需求),还能够把薄板的角变形量控制在 0.5 - 1.0°/100mm,是符合掘锚机、连采机等设备的装配精度要求的。

### 2.2 焊接路径与工装对设备薄板变形的约束作用

矿井掘进设备里的薄板结构件大多属于框架式构造,就像掘锚机的铲板框架以及连采机的牵引部框架。要知道,焊接路径的规划对于残余应力的分布和整体变形有着直接的影响。若是采用对称的焊接路径,故此两侧焊缝所产生的应力就能够彼此抵消,进而显著降低整体的变形情况。拿连采机牵引部的矩形薄板框架(材质是 1.5mm 的低碳钢)焊接来举例说明。若是采用单侧连续焊接路径,框架的对角线偏差会达到 2 - 3mm,如此就会使得牵引部件的装配变得困难重重。而若是采用从中心往两侧对称的分段焊接路径,并且把每段焊缝的长度控制在 50 - 80mm 范围,焊接间隔时间控制在 10 - 15 秒,就能够让对角线偏差缩小到 0.8 - 1.2mm,如此便能满足装配精度的要求。

## 3 冷金属过渡焊接工艺在矿井设备薄板变形控制中的工程优化实现

### 3.1 焊接参数的工程化优化调整

#### 3.1.1 基于设备薄板材质的电流电压参数匹配

矿井掘进设备所采用的薄板材料种类繁多,要想找到与之适配的 CMT 工艺电流电压范围,需通过试验来确定。就拿低碳钢板而言,像 Q235 这种材质的掘锚机链条护板、连采机机身护板,当薄板厚度处于 1.2 - 2.0mm 区间时,焊接电流

应设置在 70 - 110A，电压设置为 13 - 16V。在这样的参数设定下，熔滴过渡频率能稳定保持在 60 - 75Hz，熔深达到 0.7 - 1.2mm。如此一来，既能让设备满足承载强度方面的要求，又可以最大程度减少变形量，防止护板和其他部件产生相互干扰的情况。对于铝合金薄板，比如 6061 材质的连采机散热片、梭车油管支架，当其厚度在 1.5 - 2.5mm 时，考虑到铝合金具有导热系数高的特点，就需要把电流提升至 90 - 130A，电压提升到 15 - 18V。同时，要选用氩气与氦气体积比为 8:2 的混合保护气体，以此来增强电弧的热功率，确保熔深达到 1.0 - 1.5mm，进而避免出现未熔合的问题。通过对低电流区间进行精确控制，把变形量控制在可以允许的范围之内，这样就能保证散热片和设备机体紧密贴合，从而保障设备的散热效率。

### 3.1.2 基于设备薄板厚度的焊接速度与脉冲参数设定

若是根据设备薄板的厚度，对焊接速度以及脉冲的相关参数予以优化，故此就能够进一步增强对于变形情况的控制效果。像厚度处于 0.8 - 1.2mm 范围的超薄板，比如梭车驾驶室仪表盘的安装板，此外掘锚机传感器的支架这类薄板，把焊接速度设定在 8 - 10mm/s 的区间，运用高频脉冲的模式，具体而言，脉冲频率控制在 40 - 50Hz，基值电流设定为 30 - 40A，峰值电流设定在 80 - 100A，通过这样的方式，能够减少单位长度的热量输入，进而防止超薄板出现烧穿或者变形的状况，这对于仪表盘、传感器准确安装是一种有力保障。针对厚度在 2.0 - 3.0mm 的中厚薄板，就像连采机牵引部的连接板，以及梭车车架的支撑梁这一类板材，要把焊接速度降低到 5 - 7mm/s，同时将脉冲频率调节至 20 - 30Hz，基值电流设定在 40 - 50A，峰值电流设定为 120 - 140A，这样在保证熔深符合标准的前提下，还能够延长熔池的冷却时间，有效降低应力集中的现象，避免连接板、支撑梁因为应力释放而产生变形，为设备在重载作业时的结构稳定性提供可靠保障。

## 3.2 焊接辅助措施的工程应用

### 3.2.1 预热与后热的温度控制实施

矿井设备里的高强钢薄板（比如掘锚机截割部的耐磨护板以及连采机传动箱的连接板等）容易产生冷裂纹。所以在焊接之前，得进行局部预热操作。预热的温度是依据钢种的碳当量来确定的：若是碳当量处于 0.3%至 0.4%范围，那预热温度就得设定在 80℃到 120℃之间。预热的方式可以选择火焰预热（这种方式适合井下维修时方便携带的需求），也能采用感应预热。预热的区域是焊缝两边，范围在 50 毫米到 80 毫米。要把温度的均匀性控制在  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ，此种做法是为了防止局部温度过高，从而导致变形加剧。在焊接完成以后，还需要开展后热消氢处理工作。处理的温度应保持在 150℃至 200℃，保温时间为 20 分钟到 30 分钟，之后要让它慢慢地冷却到室温。通过这样的

操作，可以减少焊缝中的氢含量，降低出现冷裂纹的风险，与此同时，还能缓解残余应力。就比如掘锚机截割部耐磨护板在焊接之后，通过这种后热处理，就能避免护板在井下受到冲击的情况下发生开裂的情况，进而延长其使用寿命。

### 3.2.2 焊缝返修的工艺规范制定

当矿井设备的薄板焊缝出现缺陷，需要进行返修操作时，鉴于二次热输入容易引发变形的累加情况，必须制定专门针对此情况的 CMT 返修工艺。在开展返修工作之前，要运用角磨机对存在缺陷的区域进行打磨处理。打磨深度应超过缺陷实际深度 0.5 - 1.0mm，打磨宽度为缺陷宽度的 2 - 3 倍，从而形成 U 形坡口，此种做法的目的是防止尖锐边缘造成应力的集中。例如，在梭车车架薄板焊缝进行返修时，U 型坡口能够减少二次焊接过程中的应力叠加现象，进而有效防止车架出现变形。在进行返修焊接作业时，相较于正常焊接，电流要降低 10% - 15%，电压降低 5% - 10%，同时将焊接速度提高 10% - 20%，以此来降低二次热输入量。而且，返修焊缝的长度需要在打磨区域两端各自延长 10 - 15mm，以便确保与原焊缝之间实现平滑过渡。

## 结语

本文重点关注冷金属过渡焊接工艺在矿井掘进设备，比如掘锚机、连采机、梭车等设备的薄板结构件变形控制领域的实际工程运用情况。从技术所具有的价值层面、相关的关联机制层面以及优化的具体实现层面这三个角度，来展开相应的分析探讨。经过研究得出，冷金属过渡（CMT）工艺依靠其低热量输入以及熔滴过渡稳定的特性，能够对设备薄板焊接热循环起到有效的优化作用，同时还可以对残余应力进行合理的调控。并且，若是把基于设备材质和厚度所做的参数适配工作，以及契合井下实际场景的焊接路径规划，此外工装、预热等辅助手段相结合，就能够极大程度地降低设备薄板在焊接过程中产生的变形，能够把变形程度控制在工业生产所允许的范围之内，从而确保设备的装配精度以及在井下作业时的可靠性。

## [参考文献]

- [1]岳彩月，卜峰，罗添元，等。冷金属过渡焊接技术的研究及应用[J]. 城市轨道交通研究，2025，28（02）：112-115.D0I: 10.16037/j.1007-869x.2025.02.023.
- [2]李景乾，菅晓霞，万文轩。基于冷金属过渡焊接的铝合金增材制造工艺研究[J]. 武汉工程大学学报，2024，46（06）：657-662+675.D0I: 10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202207014.
- [3]吕小青，邹文洁，徐连勇。基于 Saber 的 CMT 焊接电源仿真[J]. 焊接学报，2024，45（12）：7-13+44.
- [4]王天琪，靖雯，何俊杰。镁合金 CMT 电弧增材制造成形过程的数值模拟[J/OL]. 天津工业大学学报，1-9 [2025-09-03].<https://link.cnki.net/urlid/12.1341>