

窄间隙焊接工艺研究及在缸筒上的应用

王相亭¹, 王永康²

1. 安徽淮海实业发展集团有限公司 安徽淮北 235000

2. 安徽省矿业机电装备有限责任公司 安徽淮北 235037

摘要: 主要介绍窄间隙MAG焊接系统在解决厚壁管件窄坡口焊接难题上的突破, 它不仅可以将坡口宽度控制在12mm以内, 节省焊接材料, 控制焊接质量, 还可以优化焊缝晶粒组织, 使焊缝金属的强度得到改善, 焊缝成形美观, 提高焊缝品质。

关键词: 窄间隙; MAG自动焊接工艺; 焊接质量

Research on narrow gap welding process and its application on cylinder barrel

WANG Xiangting¹, WANG Yongkang²

1. Anhui Huaihai Industrial Development Group Co., Ltd., Huaibei 235000, Anhui, China

2. Anhui Mining Electromechanical Equipment Co., Ltd., Huaibei 235037, Anhui, China

Abstract: This article mainly introduces the breakthrough of narrow gap MAG welding system in solving the problem of groove welding of thick walled pipe fittings. It can control the groove width within 12mm, save welding materials, and control welding quality. At the same time, it can optimize the grain structure of the weld seam, improve the strength of the weld metal, make the seam beautiful, and improve the quality of the weld seam.

Keywords: narrow gap; MAG automatic welding process; welding quality

1 序言

近几年, 随着国内液压支架生产规模的不断扩大, 立柱作为液压支架主要组成部件, 其焊接工艺及生产设备也亟需优化和提升。由于受焊枪结构的限制, 液压支架立柱缸筒与缸底传统焊接坡口一般为40°~60°单边或双边V形坡口, 只能通过焊枪的摆动来带动电弧的摆动, 以便熔透坡口两侧。因焊枪直径较大, 故需要较大的坡口空间。采用这种大角度坡口, 一是焊丝、气体消耗量大, 焊接工时高; 二是焊接过程中焊缝热输入量大, 在焊缝两侧形成大面积的热影响区, 工件力学性能下降, 影响

产品质量。

根据市场调研, 国内采用窄间隙熔化极活性气体保护电弧焊MAG自动焊接工艺, 与传统工艺相比, 窄间隙焊接是采用焊丝的左右弯曲、焊丝参数波状弯曲特性, 带动电弧摆动, 从而熔透坡口两侧, 可实现一层一焊道焊接^[1]。由于采用这种特殊的导电嘴宽度窄, 故需要的坡口宽度较窄, 能够提高焊接效率, 减少焊接材料, 降低成本, 并能有效减小热影响区, 提高焊缝质量。

液压支架立柱中缸壁厚一般为25~35mm, 焊接量相对较大, 为减少焊丝消耗量, 提高焊接效

第一作者: 王相亭, 高级工程师, 主要研究方向为机械设计及其自动化, E-mail: jcwxt@163.com。

率，拟对窄间隙焊接工艺技术进行试验研究，应用到中缸与其中缸底的焊接中。本文主要使用27SiMn缸筒材质，进行窄间隙焊接试验，确定焊接参数，焊后对焊缝进行外观检查、无损检测、力学性能试验，并对焊缝及热影响区金相组织进行观察，验证焊接方法及焊接参数的可行性。

2 窄间隙焊接材料及工艺方法

2.1 焊接母材的性能

焊接母材为27SiMn钢缸筒与缸底，缸筒壁厚30~50mm；工件管径为150~600mm；工件长度为600~2800mm；工件最大重量约2000kg。缸底壁厚约50mm，工件管径为150~400mm，工件最大重量约50kg。27SiMn钢是一种中等强度和中等韧性的合金结构钢，其主要化学成分见表1。

表1 27SiMn的主要化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	M ₁₂
0.24 ~ 0.32	1.10 ~ 1.40	1.10 ~ 1.40	≤0.035	≤0.035	≤0.30	≤0.30	≤0.30	≤0.15

由表1可知，该钢种 $w_C=0.24\% \sim 0.32\%$ ，这使得27SiMn钢具有良好的焊接性和可加工性。Si是27SiMn钢主要的合金元素之一，Si不仅可以提高钢的强度和硬度，还可以增强其耐热性和抗磨损性能；Mn不但对提高钢的强度和塑性非常有益，Mn还可以帮助消除钢中的气泡和其他夹杂物，从而提高其质量和可靠性；P是一种易磨损元素，但其在27SiMn钢中的含量很低，一般 $w_P \leq 0.035\%$ 。这样可以防止钢在高温和高强度条件下发生脆性断裂。S会导致缸筒脆性和裂纹敏感性增加，在27SiMn钢中，一般控制 $w_S \leq 0.03\%$ ，以确保钢的韧性和耐久性。27SiMn钢中包含多种合金元素，这些元素的共同作用，使27SiMn钢在水中临界淬透直径达8~22mm，具有良好的力学性能（见表2）。由此可知，27SiMn钢具有很好的冷变形塑性、焊接性、耐磨损性，可加工性良好，使其成为高端装备制造领域的首选优质材料之一。

表2 27SiMn钢力学性能

试样尺寸/mm	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率(%)	断面收缩率(%)	冲击吸收能量/J
φ16×165	≥980	≥835	≥12	≥40	≥39

2.2 焊接设备主要技术参数

窄间隙MAG电控箱输入电源：交流电压380V，电源频率50Hz，视在功率1kVA，主轴箱旋转输出转速为0.05~1r/min（无级可调），焊接速度为200~300mm/min。适用焊丝直径为1.2mm，适用工件管径150~600mm，适用工件长度600~2800mm。密封气体的种类：80%Ar+20%CO₂；密封气体的流量：1次密封气体流量为15~25L/min、2次密封气体流量为35~45L/min^[2]。

2.3 焊接材料

采用焊丝牌号为ER80S-G，直径为1.2mm，化学成分及力学性能分别见表3、表4。富氩气体保护，具有优良的焊接工艺性能，焊道精致美观，其熔敷金属具有良好的抗大气腐蚀性能、抗裂性能及塑性。

表3 焊丝的主要化学成分（质量分数）（%）

C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	Cr
≤0.10	1.20 ~ 1.60	≤0.60	≤0.020	≤0.025	0.20 ~ 0.50	0.20 ~ 0.60	0.30 ~ 0.90

表4 焊丝的力学性能

试样尺寸/mm	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率(%)	-40℃冲击吸收能量/J
φ16×165	≥550	≥450	≥22	≥60

2.4 焊接工艺的确定

（1）焊接方法 缸筒壁厚一般在30~50mm，坡口间隙为8~11mm，坡口加工和组对精度要高，一般宽度差控制在1mm内。采用多层焊，每层焊道数目尽量相同，通常为一道或两道，焊接电流和焊接速度匹配要合理，每道焊缝金属的厚度约为3mm，采用实心焊丝，保护气体多用混合气体，如Ar+CO₂气体。一次保护气体的流量不要太大，否则容易引起紊流，产生气孔。焊丝和导电嘴的弯曲方向应根据上侧焊道和下侧焊道位置的不同进行相应变化，保证侧壁母材的熔合。焊丝落点要准确，焊丝干伸长不宜过长，电弧要集中。焊接过程中仔细观察，发现成形不良时，要及时进行处理。

（2）焊接结构设计 为保证窄间隙MAG焊工艺实现，首先结合国内外窄间隙焊接的坡口结构形式，改变传统的坡口形式，采用具有极小坡口面角度的V形或U形坡口，如图1、图2所示。

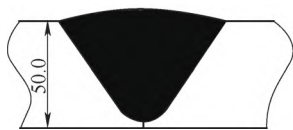


图1 原坡口结构

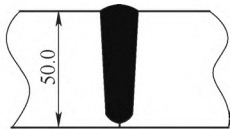


图2 窄间隙坡口结构

(3) 焊接工艺顺序 以窄间隙MAG焊接机头为核心，配以焊接操作机、滚轮架、弧焊整流器、保护气体和焊剂系统等装置，在集中控制系统的协调控制下，可完成液压体等环形焊缝的自动窄间隙焊接。

工作顺序：上件→卡盘夹紧→组对（不定位焊）→顶紧尾座顶紧→焊枪小车行走→焊枪位置微调→焊接（自动清理药皮及焊渣）→焊枪小车行走→下件。采用窄间隙MAG焊接， $\phi 1.2\text{mm}$ 实心焊丝，多层单道焊。控制系统以PLC为核心，对焊接电源、窄间隙机头及机床动作进行一体控制，焊接过程连续。

(4) 焊接参数 窄间隙MAG焊接工艺对上述坡口多层环焊，缸筒与缸底组对如图3所示。组对条件满足间隙 $<0.2\text{mm}$ 、错边量 $<0.5\text{mm}$ 要求。经过反复试验调整得到 $\phi 320\text{mm}$ 立柱中缸与缸底焊接参数，见表5。

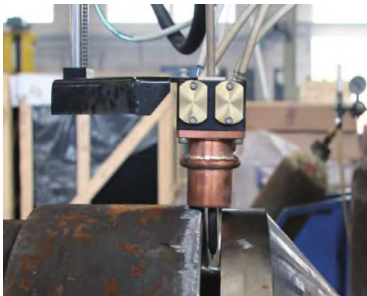


图3 缸筒与缸底组对

表5 立柱中缸与缸底窄间隙MG焊接参数

焊层	焊接速度 / (r/min)	左摆幅度 /mm	右摆幅度 /mm	摆动频率 / (mm/s)	提升幅度 /mm	后移幅度 /mm	焊接电流 /A	电弧电压 /V
第1层	0.40	0.0	0.0	40	4.0	0.0	280	30
第2层	0.40	0.0	0.0	40	4.0	0.0	280	30
第3层	0.40	0.0	0.0	40	4.0	0.0	280	30
第4层	0.33	12.0	12.0	40	4.0	0.0	280	30
第5层	0.31	12.0	12.0	40	4.0	0.0	280	30
第6层	0.30	12.0	12.0	40	4.0	0.0	280	30
第7层	0.27	12.0	12.0	40	4.0	0.0	280	30
第8层	0.24	12.0	12.0	40	4.0	0.0	280	30

3 结果与分析

3.1 液压缸MAG窄间隙焊缝硬度检测

液压缸MAG窄间隙焊接后焊接接头温度降至常

温时进行硬度检测，为了有效评价上述焊接工艺的可行性，对焊接接头的焊缝、母材、热影响区进行了硬度检测，液压缸窄间隙焊接后硬度检测位置如图4所示，检测结果见表6。



图4 液压缸MAG窄间隙焊接接头硬度检测位置

表6 液压缸MAG窄间隙焊后硬度检测结果 (HBW)

编号	检测值					平均值
1	268	262	254	273	263	264
2	254	243	262	266	243	253
3	264	253	272	262	254	261
4	253	267	246	259	261	257
5	254	245	259	249	246	250
6	265	245	248	253	254	253
7	192	195	201	204	199	198
8	193	197	206	210	209	203
9	203	186	206	207	212	202
10	256	246	243	262	259	253
12	262	267	254	262	251	259

依据设计要求，27SiMn钢母材硬度为240~280HBW，焊缝硬度为180~240HBW，焊接后，焊缝、母材、热影响区硬度均符合标准要求。

3.2 液压缸MAG窄间隙焊缝金相组织分析

液压缸MAG窄间隙焊接后对焊接接头的母材、焊缝、热影响区进行金相组织分析，如图5所示。从图5可看出，其金相组织均匀，未见裂纹等焊接缺陷^[3]。

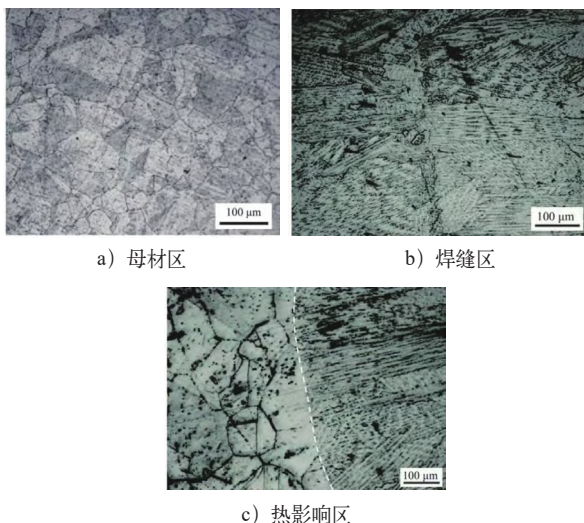


图5 液压缸MAG窄间隙焊接接头金相组织

3.3 液压缸MAG窄间隙焊缝力学性能试验结果

按照GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》，室温拉伸试验在SHT4605型6t微机控制电液伺服万能试验机上进行，试验结果见表7。从表7可看出，焊缝抗拉强度分别为650MPa、642MPa，满足设计文件规定要求。

表7 液压缸MAG窄间隙焊缝力学性能试验结果

编号	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)
1	491	650	15
2	481	642	13.6

3.4 焊缝超声波检测结果

根据GB/T 11345—2023《焊缝无损检测 超声检测 技术、检测等级和评定》，对焊缝冷却到室温后进行检测^[4]。结果显示，焊缝表面无气孔、夹渣、弧坑裂纹及电弧擦伤等缺陷，符合NB/T 47013.1—2015《承压设备无损检测 第1部分：通用要求》2级合格。

3.5 液压缸MAG窄间隙自动焊优势

(1) 焊接速度快 完成 $\phi 320$ mm立柱中缸与缸底的焊接，焊丝填充量减少30%以上（见表8），用气量减少约25%，焊接工时约为26min，而普通焊接工时为35min，焊接效率提升25.7%。

表8 液压缸MAG窄间隙焊缝焊丝体积占比

普通焊缝体积 /mm ³	窄间隙焊缝体积 /mm ³	窄间隙焊缝体积减少占比 (%)
374454.7	257658.1	31.19%

(2) 成形好 焊接完成后的焊缝表面成形如图6所示。从试验结果看，焊缝无明显缺陷，通过优化

焊接参数，可使焊缝宽度均匀，无焊瘤、烧穿、咬边等缺陷，总体焊缝成形良好。



图6 液压缸MAG窄间隙焊缝成形

4 结束语

1) 采用MAG窄间隙自动焊工艺，可实现立柱、“三大件”的窄间隙焊接及相应壁厚缸筒的焊接，获得成形均匀、美观的焊缝。

2) 根据图样的工件壁厚，确定焊接层道数，确定不同焊接层的焊接参数并自动切换，即不同层次的焊接电流、摆动宽度、焊枪提升高度等可通过编程控制。

3) 为保证窄间隙坡口内两侧壁均匀受热而熔透，焊丝被送达坡口前进行了预先弯曲，焊丝在坡口内左右摆动，确保两侧壁完全熔透，从而保证了焊接质量。窄间隙液压缸坡口形式狭窄，热输入也相对降低，在焊缝两侧的热影响区也相对较小，热影响区晶粒细小，抗冲击及抗疲劳性能提高显著。

4) 采用MAG窄间隙自动焊工艺，焊接效率显著提高。因为窄间隙焊坡口变小，焊丝、保护气体及设备耗电都随之降低，所以采用单层单道焊接形式，焊接工时大大降低。

参考文献：

- [1] 徐望辉. 空间多位置摆动电弧窄间隙MAG焊熔滴过渡与焊缝成形研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2015.
- [2] 张广龙，李新伟，邵明涛. 管道窄间隙全位置自动焊工艺参数调试[J]. 焊接技术，2018，47（9）：54-56.
- [3] 许科华，朱飞. 焊接热输入对焊接接头金相组织的影响[J]. 现代冶金，2015，43（5）：10-15.
- [4] 魏国庆. 焊接工艺参数对焊缝质量的影响[J]. 工业技术，2015（7）：41.