核电用S220GD型镀锌钢板等离子弧焊接技术

程定富　朱平

【摘要】本文在研究S220GD型镀锌钢板的施焊难点以及焊接时容易产生的各种缺陷的基础上，开发出了一种在焊前不需要清除焊接区域镀锌层的镀锌钢板等离子弧焊接工艺，经焊接工艺评定和在核电安装中的实际应用，表明该焊接工艺所获得的S220GD型镀锌钢板焊接接头质量稳定可靠，生产效率高，降低了核电安装成本。

关键词：等离子弧焊；镀锌钢板；焊接工艺

1. 概述

AP1000核电的通风管道（以下简称“风管”）中使用了大量的热镀锌钢板，单面镀锌层厚度约20μm，风管由镀锌钢板折边后焊接而成，存在大量的直纵缝的焊接，且不允许使用钎焊，要求完全焊透。然而，镀层锌的熔点为420℃，沸点为907℃，电弧刚接触到镀锌层时，锌即迅速氧化，产生锌蒸气，影响焊接电弧的稳定性，非常不利于焊接。目前核电建造安装中使用常规熔化焊方法，如钨极氩弧焊、焊条电弧焊和熔化极气体保护焊，均难以在不去除镀锌层的前提下对镀锌钢板进行焊接。

目前多数要求熔焊的镀锌钢板的焊接，均使用机械打磨先去除待焊部位及两侧的镀锌层后，再使用手工/自动钨极氩弧焊、焊条电弧焊或熔化极气体保焊进行焊接，焊接前的打磨工作量大，劳动强度高，且打磨产生的锌粉尘污染整个作业环境，不利于劳动者健康。

本文以AP1000核电风管中使用的S220GD+Z-M-140/140型镀锌钢板材料为研究对象，研究了焊接前不除锌的镀锌钢板等离子弧焊工艺，并通过焊接工艺试验及焊后接头性能检测，验证了等离子弧焊工艺焊接镀锌钢板的可行性。

2. 镀锌钢板焊接性分析

（1）镀锌层 S220GD+Z-M-140/140属于结构钢热钝镀锌材料（熔融锌液中锌含量不小于99%），镀锌层厚度约20μm。镀锌层在自然条件下凝固，通过特殊的控制处理得到的肉眼不可见的细小锌花结构，其表面一般经过平整矫形处理。

（2）化学成分及力学性能S220GD+Z化学成分及力学性能分别如表1和表2所示。

（3）焊接难点及预防措施S220GD+Z为碳素结构钢外镀一层锌，结构钢本身焊接性良好，且焊接工艺成熟，但表面的镀锌层在焊接过程中，坡口表面及边缘处的镀锌层在电弧热高温作用下，极容易产生氧化、蒸发、熔化，从而对焊接电弧及熔池产生影响，易产生焊接裂纹、气孔、夹渣（锌或氧化锌）等缺陷。由于锌的蒸发，钢板表面会挥发出大量的白色烟尘，锌蒸汽对人体有刺激、伤害作用，所以焊接时必须考虑烟尘的处理。

缺陷产生原因及预防措施：

第一，焊接气孔。主要原因分析：首先，镀锌板焊接过程中，坡口及两侧的锌挥发形成锌蒸气，在锌蒸气膨胀过程中并未及时扩散排出，由保护气体带入

表1 S220GD+Z化学成分（熔炼分析）（质量分数） （%）

元素	C	Si	Mn	P	S
含量	≤0.20	≤0.60	≤1.70	≤0.10	≤0.045

表2 S220GD+Z力学性能

指标	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%
要求值	≥220	≥300	≥20

焊缝熔池，则易形成焊缝内部或表面气孔；其次，由于使用单道焊接，同时要求完全焊透，等离子弧焊接速度快，熔池凝固速度快，焊缝截面深宽比大，气体不易逸出；再次，镀锌层表面吸附的水分、有机物及其他污染物，在焊接高温条件下所分解产生的各种气体，都会对焊缝金属产生有害气孔有直接的影响。

预防措施：①合理选择的等离焊接参数，使用合适的焊接速度、焊接电流及离子气及保护气的流量，并合理调节等离弧长度等保证焊缝中气体充分逸出。②焊接前清理钢板待焊部位及两侧上的水、油、渍等污染，保持工件及焊接环境干燥。③在等离焊枪周围设置吸气除尘通道，以减少镀锌层的急剧气化而产生的蒸气。

第二，焊接裂纹。原因分析：在焊接过程中，若锌熔化成液态进入熔池，液态锌会浮在熔池表面或聚集在焊缝根部，因锌在铁中具有较大的固溶度，液态锌会沿晶界深入侵蚀焊缝金属，低熔点锌在晶界形成“液体金属脆化”，同时锌与铁可形成金属间脆性化合物，这些脆性相使得焊缝金属塑性降低，易导致产生裂纹。

预防措施：调节使用合理的焊接速度和电弧高度，并使用合理的气体流量，保证在待焊部位熔化前，表面锌层锌可以完全蒸发，且锌蒸气可被吸除，或被保护气体赶出而不进入熔池。

第三，焊接熔穿。原因分析：①焊接过程中焊接电流过大或送丝不及时。②等离子气流量过大，熔深过大，甚至直接形成小孔效应，同时焊接速度又过大时，无足够的金属及时填充。③组对时，错边量过大。

预防措施：①调节合适的焊接电流及焊接速度，设置合适的起弧与开始送丝之间时间差，防止起弧时熔穿。②设置合适的离子气流量，保证电弧为稳定的熔透型等离子弧。③保证钢板组对时的间隙及错边量在工艺允许的范围内。

第四，根部未熔合。原因分析：①焊接参数过小，焊接速度过快或等离子气过小，导致熔深浅，而造成背面未熔合。②焊接过程中，送丝位置处理熔池上方，在电弧弧柱中央，减弱电弧的穿透能力。

预防措施：使用适当焊接参数及等离子气体流量，同时调整好焊丝的送给位置，使处理焊接前方，贴近熔池的边缘位置，不阻挡焊接电弧。

第五，焊接夹渣。原因分析：焊接过程中，由于锌氧化而形成的氧化锌（ZnO），氧化锌的熔点较高约1800℃以上，若其混入熔池，在焊接过程中工艺参数偏小时，熔池停留时间短，氧化锌来不及浮出表面，将引起ZnO夹渣，同时由于Zn成为增氧剂，会使焊缝形成FeO-MnO或FeO-MnO-SiO_2低熔点氧化物夹渣。

预防措施：在焊枪周围设置吸尘装置，及时吸除将氧化后的锌及产生的白色漂浮物，同时可以减小锌蒸气压力，加快锌蒸气的扩散排出。

3. 焊接工艺的制定

（1）焊接方式选择 试验选用的镀锌钢板厚度为2.7mm，在保证焊接质量要求的同时，考虑焊接工艺容易使用并实现单面焊接双面成形等因素，选择使用熔透型等离子弧焊接工艺，即在焊接过程中，减少离子气流量，并扩大喷嘴孔道直径，降低等离子弧的压缩程度和穿透能力，只熔透工件，但不产生小孔效应的等离子弧焊方法。焊接熔池的形成主要借助离子弧传导，熔透深度通过调整焊接电流、焊接速度等能量参数进行控制，等离子弧焊基本不受电弧长度变化的影响，可达到高焊接质量要求。

试验的焊接选择使用自动行走机构夹持等离子焊枪，以实现机动化焊接。

（2）焊材的选用 根据焊接试板厚度，若不填充丝会造成焊接完成后焊缝表面下凹而低于母材，难以满足产品要求，故使用带填充丝的焊接工艺。按照钢材成分及强度匹配原则进行选择焊

丝，选择与S220钢成分及强度相匹配的AWS A5.18 ER70S-6焊丝，焊丝直径越细，越有利于焊接成形。

（3）气体　离子气和保护气均选择使用纯度≥99.99%的氩气，氩气电离电压相对较低，容易引弧；且其热导率小，而且是单原子气体，高温时不易分解吸热，故焊接时电弧热损失较少，电弧也较稳定；同时氩气比空气重（约重25%）作为保护气时，不易漂浮散失，保护效果好；并且在惰性保护气中成本相对较低。

（4）坡口选择　根据熔透型等离子弧焊接工艺的特点，试板厚2.7mm，较薄，适合使用不开坡口，无间隙组对。这样不仅焊接量小，且节省填充金属，同时可节省打磨坡口时间。

（5）焊前清理　为防止产生气孔夹渣，故焊前清理很有必要。焊前应用钢丝刷或干净白布清理待焊母材端面及两侧25mm范围内的油污、水以及其他杂质，以降低气孔、夹渣及裂纹的倾向。

（6）焊接参数　试验使用DML-03焊接电源进行，电源额定电流为300A。

焊接参数依据各参数对焊成形的影响（见前述）、试板厚度和经验数据进行设定。

首先根据焊接试板厚度，确定焊接电流应在115～140之间，选择喷嘴孔径为3.2mm，钨极尺寸为ϕ5.0mm，钨极内缩4mm，调节喷嘴至工件高度4～6mm，保护气体控制在12～20L/min。

离子气控制在0.5～2.5L/min，观察焊接过程中熔池被离子气吹出人凹陷深度或背面熔合情况来确定最终离子气流量；焊接速度在260～380mm/min，通过焊接过程中焊缝宽度、焊缝背面成形情况确定。

其次，送丝速度以焊接速度参照进行调节，最终根据焊缝余高及成形情况确定。

最终焊接电流、离子气、焊接速度三个主要参数的相互匹配通过焊接试验根据焊缝成形进行确定。

4. 焊接工艺验证

（1）焊材的选用　选择使用AWS A5.18标准中的ER70S－6焊丝，规格为ϕ1.0mm。焊丝成分和力学性能分别如表3和表4所示。

（2）施焊　根据风管预制焊接接头形式，使用对接试验，在平焊位置（1G）进行焊接验证等离子弧焊接工艺，试验焊接时环境温度为23～27℃，相对湿度在45%～70%之间。

将镀锌钢板用剪板机剪切成尺寸为500mm×150mm×2.7mm规格的钢板进行组对、焊接，组对前，打磨去除I形坡口端面的锈、污等，并使用钢丝刷或干净的布清理坡口两侧25mm范围内的水、油、污等。

使用氩弧焊在试板的两端部进行无间隙点固，保证错边量不超过0.5mm，在点固组对完后，将试板水平固定在焊接工作台上，如图1所示。

调节焊机、自动行走机构上的相关焊接参数，并设定好送丝速度，焊接参数如表5所示。

调节焊枪中心对正焊缝，调节焊枪高度（即压缩喷嘴至工件的高度）在4～6mm之间，同时调节焊接送入位置，贴近工件并处于熔池前端（见图2），确保焊丝不伸入电弧中，以免影响电弧的穿透性。

开启焊机维弧，启动主弧，同时开始自动行走及送丝，进行焊接，焊接过程观察焊接电弧长度，并根据焊接情况进行调节，保证前后焊接一致，如图3、图4所示。

焊接使用单道直线焊，正面及背面成形分别如图5和图6所示。

（3）接头质量检测　第一，无损检测：①按照AWS D9.1进

表3　ER70S－6化学成分(质量分数)　（%）

化学成分	C	Mn	Si	P	S
标准含量	0.06~0.15	1.40~1.85	0.80~1.15	≤0.025	≤0.035
化学成分	Ni	Cr	Mo	V	Cu
标准含量	≤0.15	≤0.15	≤0.15	≤0.03	≤0.50

注：任何在填充金属上的镀层铜加上填充金属本身的铜总含量不超过0.50%。

表4　ER70S－6力学性能

指标	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率（%）
要求值	≥400	≥480	≥20

注：离子气及保护气均为纯度≥99.99%的氩气。

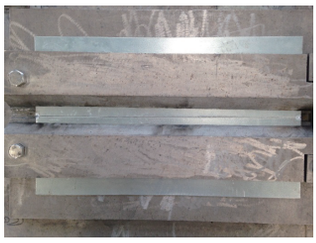


图1　焊接试件组对、固定

行外面目视检测（VT），结果无未熔合、背面未焊透、裂纹、表面气孔、夹渣等缺陷，焊缝余高在2mm以内，满足标准要求。②按照ASME V进行射线检测（RT），检测结果未发现可见显示。

第二，力学性能检测：参照ASME IX进行接头的室温缩载面拉伸试验和弯曲试验，检测结果如下：①缩截面拉伸试验：两件拉头缩截面拉伸试样强度分别为408MPa和409MPa，断裂位置均位于母材，检测结果说明焊缝强度高于母材。②弯曲试验：进行面弯和背弯试验，在弯曲180°后，包括焊缝及热影响区的受拉面均无裂纹产生，也无因气孔、夹渣等引起的缺口产生，结果合格。

第三，金相检测：首先，宏观检测。焊缝截面在10×下进行检测未发现焊接缺陷存在，如图7所示。

其次，微观检测。微观先后在200×和500×观察检测，未发现有微观裂纹及异常组织存在，母材组织为铁素体，焊缝和热影响区为珠光体+铁素体，图8为接头200×金相照片。

第四，镀锌层烧损宽度：使用微观检测，测量镀锌钢板在使用等离子弧焊接后，焊缝两侧

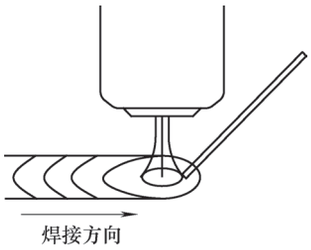


图2　送丝位置示意

镀锌层烧损、蒸发的宽度，试验先测量母材上镀锌层的厚度，实测镀锌层厚度为20～26μm，再测量从焊缝边缘至镀锌层厚度均匀等于母材上镀锌层厚度点的距离，实测正面焊缝每侧镀锌层烧损、蒸发宽度为13.2～14.1mm，背面焊缝每侧镀锌层烧损、蒸发宽度为11.3～12.1mm。图9和图10为镀锌层测量的微观照片。

（4）焊接中的问题及解决措施　实际焊接过程中，压缩喷嘴至工件的高度对焊接成形影响较大，当高度变化较大时，易出现成形不均匀，甚至出现背面未焊透的情况出现。分析主要由于使用的熔型等离子弧焊，虽电弧长度对于熔透的影响作用不明显，但离子气流量相对较小，压缩喷嘴直径不变的条件下，压缩喷嘴距离工件越高，离子气对熔池的吹力变小，使得整个电弧的穿透能力下降。针对此问题，解

图3　焊枪及送丝位置调节

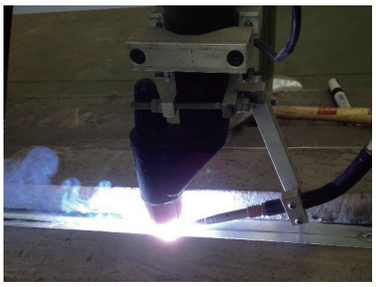


图4　试板焊接

表5　焊接参数

焊接电流/A	缓升时间/s	缓降时间/s	维弧电流/A	焊接速度/mm·min^{-1}	送丝速度/cm·min^{-1}	保护气/L·min^{-1}	离子气/L·min^{-1}
130	0.4	0.7	20	300	210	15	1.9

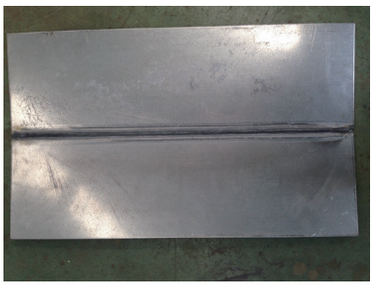
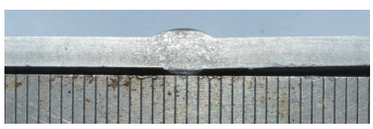


图5　焊接正面成形

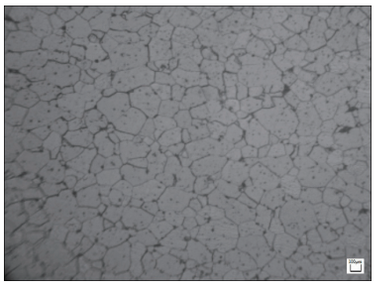
图6　焊接背面成形



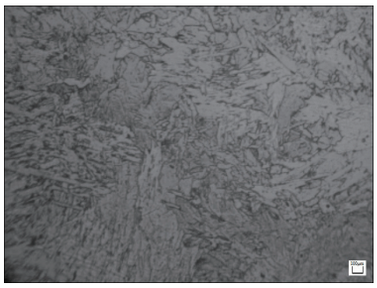
2.7mm镀锌板接头

3.5mm镀锌板接头

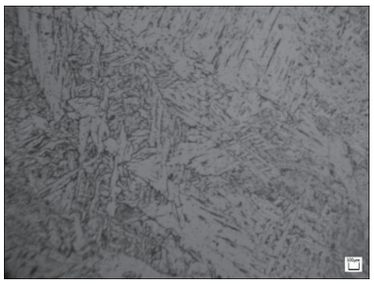
图7　焊缝截面宏观照片



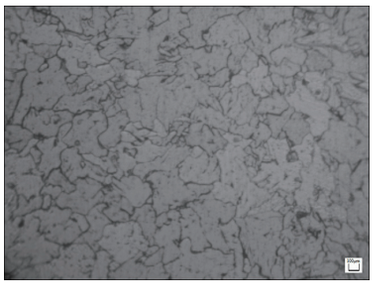
（a）母材区



（b）焊缝区



（c）焊缝区



（d）热影响区

图8　焊接背面成形

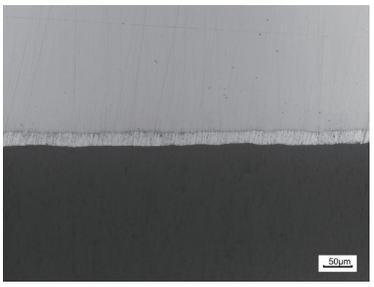


图9　母材区镀锌厚度

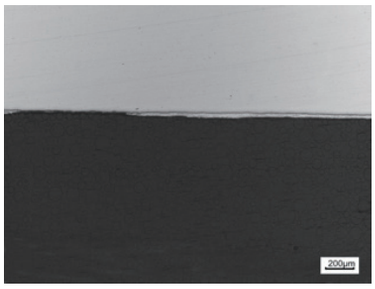


图10　锌层烧损边界区域

决措施如下：①焊接前调整焊枪和工件的相对位置，使得焊枪行走轨道与工件表面平行。②焊接过程中手动实时上下调节焊枪位置，保证压缩喷嘴至工件的高度不出现较大变化。③在焊枪上安装电弧跟踪系统装置，进行自动上下调节，保证压缩喷嘴至工件的高度在整个焊接过程中一致。以上三种方式均可很好地解决焊接中出现的问题，其中措施③最容易保证焊接质量，在自动焊接中最容易实施。

当组对间隙超过0.5mm时，易出现熔穿的情况，焊接组对时，应保证组对间隙在要求范围内。

（5）焊接要点总结　①焊件在组对时，应保证组对间隙和错边均≤0.5mm。②焊接过程中，应保证压缩喷嘴至工件的距离在4～6mm内保持不变，以保证焊缝成形的均匀。③焊接起弧、熄弧与送丝、行走的开始和停止之间应有一定的时间差（0.3～1s），保证起弧点处和收弧点处完全熔合。

5. 工艺应用前景

使用等离子弧焊接工艺进行焊接镀锌钢板，需要配合自动行走机构或自动纵缝焊接工装，实现自动化等离子弧焊接，在保证焊接质量的前提下，可以提高焊接自动化，提高焊接效率，同时可改善镀锌钢板材料焊接环境，减少对焊工身体的损伤。

本工艺不仅可以在AP1000核电风管预制中使用，其他核电项目中的镀锌风管也可以应用，同时对于其他用途且需要焊接的镀锌钢板材料均可使用等离子弧焊接工艺进行焊接，等离子弧焊接工艺在镀锌钢板焊接具有很好的应用前景。

6. 结语

使用等离子弧焊接工艺焊接S220GD型热镀锌钢板，可以获得力学性能优良的焊接接头，且该焊接工艺极易推广至其他型号的镀锌钢板焊接。

此焊接工艺下焊接镀锌板，焊缝两侧的镀锌层烧损少，焊后对焊缝补漆防腐的宽度小，且焊后对焊缝表面清理容易，只需轻刷或轻微打磨即可将焊缝表面清理干净。

焊接效率高，无需开坡口，且无需在焊接前磨除焊接区域的镀锌层，无缝隙组对后即可焊接。

使用自动等离子弧焊，可使焊接过程中产生的烟尘、锌蒸气及氧化锌等有害物远离操作焊工，可有效地改善镀锌钢板焊接环境，保护焊工的健康。

作者简介：程定富等，中国核工业第五建设有限公司。

MW 20171026