

深水导管架S420高强钢焊缝金属扩散氢来源及关键影响因素分析

武晓刚, 王金生, 马丽, 毕晓健, 李黎霞

海洋石油工程股份有限公司 天津 300452

摘要: 深水导管架S420高强钢焊缝延迟裂纹因其隐蔽性而对导管架结构强度和使用安全造成极大危害, 因此需要严格控制导管架结构焊缝质量。焊缝金属扩散氢含量是造成延迟裂纹的主要原因之一。为了研究深水导管架S420高强钢焊接过程施工环境要素(环境温度、湿度、风速和焊接材料暴露时间)与工艺参数(焊接热输入和预热温度)对焊缝金属扩散氢含量的影响规律, 采用药芯焊丝气体保护焊(FCAW-G)和埋弧焊(SAW)工艺, 在不同的模拟环境中对S420高强钢开展不同焊接材料扩散氢含量测试, 重点研究施工过程中扩散氢来源及实际施工组合工况与焊缝金属扩散氢含量之间的内在联系。通过分析深水导管架S420高强钢焊缝金属扩散氢来源及关键影响因素, 从降低扩散氢含量角度提出了有效的预防措施, 以减小深水导管架焊接延迟裂纹的产生概率。

关键词: 深水导管架; S420高强钢; 环境要素; 焊接工艺; 扩散氢

Analysis of diffusion hydrogen source and key influencing factors of deep-water jacket S420 high strength steel weld metal

WU Xiaogang, WANG Jinsheng, MA Li, BI Xiaojian, LI Lixia

Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300452, China

Abstract: The delayed crack of S420 high strength steel in deep-water jacket is very harmful to the strength and safety of jacket structure because of its concealment. Therefore, it is necessary to strictly control the weld quality of jacket structure. The diffusion hydrogen content in weld metal is one of the main causes of delayed cracks. In order to study the influence of construction environment factors (ambient temperature, humidity, wind speed and welding material exposure time) and process parameters (welding heat input and preheating temperature) on the diffusion hydrogen content of weld metal during the welding process of S420 high strength steel for deep-water jacket, this paper used flux-cored wire gas shielded welding (FCAW-G) and submerged arc welding (SAW) processes to test the diffusion hydrogen content of S420 high strength steel in different simulated environments. The internal relationship between the source of diffusion hydrogen during construction and the actual construction combination conditions and the diffusion hydrogen content of weld metal was studied. By analyzing the source and key influencing factors of diffusion hydrogen in the weld metal of S420 high strength steel for deep-water jacket, effective preventive measures

通信作者: 王金生, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋油气工程焊接技术方面的研究, E-mail: wangjsh14@cnooc.com.cn。

were proposed from the perspective of reducing diffusion hydrogen content to reduce the probability of delayed cracks in deep-water jacket welding.

Keywords: deep-water jacket; S420 high strength steel; environmental factors; welding process; diffusion hydrogen

1 序言

焊接裂纹是深水导管架建造过程中最为严重的焊接缺陷,一直以来都是海洋工程焊接质量控制的重点与难点。在深水导管架S420高强钢建造过程中一旦出现焊接裂纹,必须分析其产生原因并制定有效的对应措施来避免焊接裂纹的出现,以获得致密无缺陷的焊接接头^[1]。深水导管架焊接过程中具有孕育期的冷裂纹称为延迟裂纹,这类裂纹可能在焊后数小时、数天或更长的时间内出现,对深水导管架结构强度和使用安全危害极大。延迟裂纹通常是由于过大的拘束应力、敏感的微观组织及焊缝中扩散氢含量等综合作用产生的焊接裂纹^[2]。其中,焊缝金属扩散氢含量又是造成延迟裂纹的主要原因之一。

焊接过程是一个极其复杂的非稳态过程,环境条件、焊接母材、焊接材料、焊接方法、焊接参数、预热温度及焊后热处理都会对焊缝金属的扩散氢产生很大的影响^[3-5]。为了研究深水导管架S420高强钢焊接过程施工环境要素(焊接材料暴露时间、环境温度和湿度)和焊接工艺(焊接热输入和预热温度)对焊缝金属扩散氢含量的影响规律,本文采用药芯焊丝气体保护焊(FCAW)和埋弧焊(SAW)工艺对S420高强钢开展不同焊接材料在不同模拟环境工况中的扩散氢含量测试分析,重点研究实际施工组合工况和焊接工艺与焊缝金属扩散氢含量之间的关联性大小与内在联系,并从降低扩散氢含量角度提出了有效的预防措施,以减小深水导管架焊接延迟裂纹的产生概率。

2 焊缝金属扩散氢来源分析

2.1 焊缝金属中氢的分类及来源

在焊接电弧的高温作用下,焊接过程中母材、焊接材料、保护气体及周围环境中的氢将分解成 H 、 H^+ 或 H^- 的形式并溶解于熔池中。这些氢原子或氢离子并不占据焊缝金属晶格的结点位置,而是一部分进入到晶格的间隙中与之形成间隙固溶体。由

于其半径非常小,所以这部分氢可以在晶格的间隙中进行自由扩散,称之为扩散氢^[6]。另一部分氢则聚集在焊缝金属晶格的缺陷或夹杂物边缘空隙中,并相互结合为半径较大的氢分子。这部分氢不能在晶格间隙中自由扩散,故称为残余氢。一般焊缝金属中扩散氢较多而残余氢含量很少,且在300℃以下的焊接区内残余氢的总量基本保持不变。因此,焊缝金属扩散氢对焊接接头的危害最大,极易引起氢致裂纹。

深水导管架S420高强钢焊缝金属中氢的来源主要有以下几个方面^[7, 8]。

- 1) 在焊条药皮、埋弧焊剂和药芯焊丝的药粉中,含有大量的有机物、白泥、水玻璃和长石等材料,都不同程度地含有结晶水、吸附水及溶解的氢。
- 2) 焊接周围环境中的水分及氢。
- 3) 气体保护焊过程中保护气体所含的水分及氢。
- 4) 焊丝和母材表面的杂质,如油污、铁锈及焊丝表面的润滑剂等。
- 5) 焊接母材中的氢。

2.2 焊缝金属中氢的溶解与扩散

氢分解成原子和离子并溶解进入到深水导管架S420高强钢焊缝金属中的途径与焊接方法有直接关系。当使用气体保护焊实心焊丝时,氢通过气相和液态熔池的界面溶入金属;电渣焊时,氢会先进入到渣层中,然后溶入到金属中;当采用药芯焊丝气体保护焊和焊条电弧焊时,氢既可以通过气相和液态熔池的界面溶入金属,同时也会通过熔渣进入金属^[9, 10]。此外,氢在不同焊缝组织中具有不同溶解度和扩散系数。而且,氢的扩散系数也会随着温度的变化而发生改变。氢在焊缝金属中的扩散行为及分布与焊缝组织、应力-应变场、氢的浓度梯度和晶体缺陷等因素有关,其中缺陷是造成扩散氢测试结果波动的主要原因之一^[11, 12]。

3 试验方法

单道G-BOP试验使用的母材为适用于深水导管架焊接、厚度为50mm的S420高强钢板。为了分析不同焊接方法和焊接材料在不同施工环境、焊接工艺条件下的扩散氢含量,分别开展了FCAW和SAW焊接工艺测试,其中FCAW工艺对应的焊接材料标准分类号分别为有缝药芯焊丝E81T1-Ni1M和无缝药芯焊丝E81T1-Ni1M-H4,采用80%Ar+20%CO₂作为保护气体;SAW工艺对应的焊丝、焊剂标准分类号为F8A4/F7P4-ENi1-Ni1。

焊接熔覆金属扩散氢测试主要过程如下:首先,对熔覆金属扩散氢测试用S420高强钢焊接试块在650℃保温1h进行预去氢处理。然后,用无水乙醇去除试板中的铁锈和油污后对焊接试板组对。根

据焊接工艺要求开始焊接试板,将焊接材料用电弧焊方法在试样上熔覆一条线状焊缝,焊后立即将试样进行水冷,然后将其放入液氮罐中保温2min。将熔覆金属试样放入收集器中,用氩气清洗、填充和密封,加热至400℃,然后冷却至室温,收集气体35min,并用气相色谱仪进行分析。

焊后熔覆金属的扩散氢测试过程如图1所示。根据ISO 3690:2018《Welding and allied processes-Determination of hydrogen content in arc weld metal》开展焊接熔覆金属扩散氢测试,通过气相色谱法测量熔覆金属的扩散氢含量(HD)。扩散氢测试设备采用德国布鲁克扩散氢分析仪G4 PHOENIX,分辨率为0.01mL/100g。

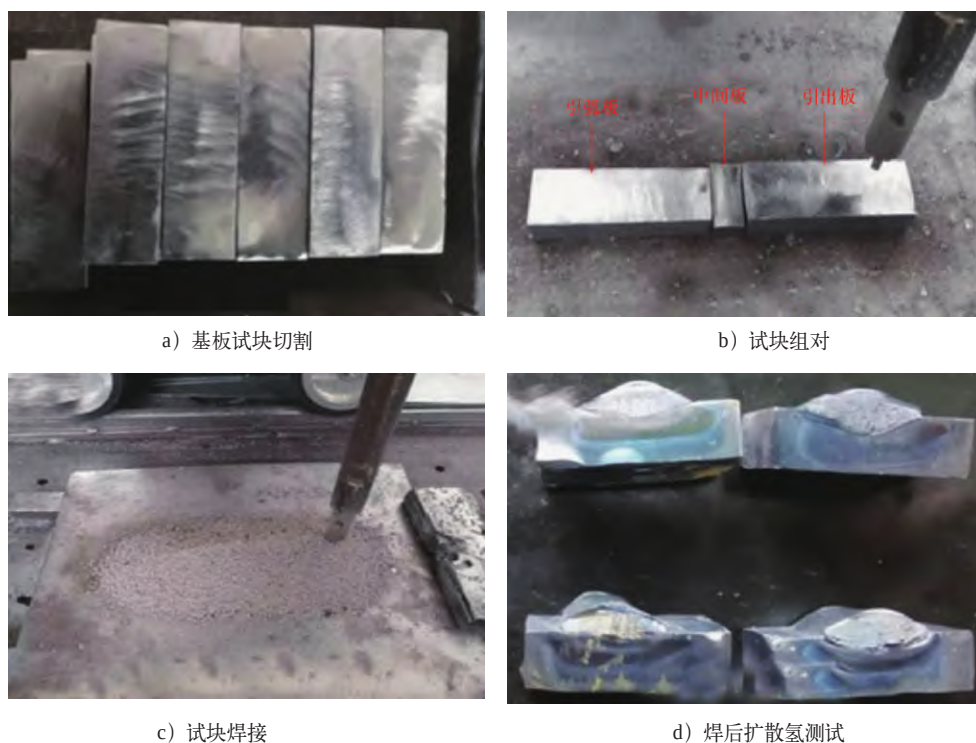


图1 焊后熔覆金属的扩散氢测试过程

4 施工环境对焊缝金属扩散氢含量的影响与关联性

4.1 焊接材料暴露时间对焊缝扩散氢含量的影响

考虑到FCAW采用的药芯焊丝和SAW采用的焊剂在环境中暴露会出现吸潮现象,从而导致熔覆金属的扩散氢含量增加。因此,为了明确焊接材料暴露时间对熔覆金属扩散氢含量的影响,开展了焊接

材料暴露时间的梯度试验,暴露时间分别为:0h、6h、12h、24h、48h和72h。测试环境为常温、常湿环境(温度25℃、湿度30%)。

焊接材料不同暴露时间的熔覆金属扩散氢含量见表1。将表1中数据绘制成柱状图(见图2)进行对比分析可知,有缝FCAW和SAW在一定的温度、湿度中熔覆金属的扩散氢含量随焊接材料暴露时间

延长急剧增加，SAW焊丝、焊剂暴露12h，扩散氢含量增加近1倍；而无缝FCAW熔覆金属扩散氢含量无显著增加。对比有缝药芯焊丝和无缝药芯焊丝熔覆金属扩散氢含量的变化规律，并结合扩散氢的来源分析可知，有缝药芯焊丝在环境中暴露导致其吸潮引入的氢是导致焊缝金属中扩散氢含量大幅增加的关键。同样地，SAW焊剂在一定的温度、湿度中

随暴露时间延长，扩散氢含量也迅速增加。焊剂在环境中暴露导致其吸潮引入的氢是导致焊缝金属中扩散氢含量大幅增加的主要原因。因此，在实际施工过程中，应加强对有缝药芯焊丝和埋弧焊剂的管控，防止有缝药芯焊丝和焊剂在长时间暴露在施工环境中。对长时间暴露后的有缝药芯焊丝和焊剂需严格执行烘干工艺，以除去其中的氢。

表1 焊接材料不同暴露时间的熔覆金属扩散氢含量（温度25℃、湿度30%）

焊接方法	焊丝牌号	暴露时间/h					
		0	6	12	24	48	72
		扩散氢含量/（mL/100g）					
FCAW-有缝药芯焊丝	E81T1-Ni1M	4.0	5.2	5.7	6.9	7.0	7.3
FCAW-无缝药芯焊丝	E81T1-Ni1M-H4	1.2	1.5	2.3	2.5	2.8	2.9
SAW	F8A4/F7P4-ENi1-Ni1	4.32	6.53	8.18	9.22	9.64	10.23

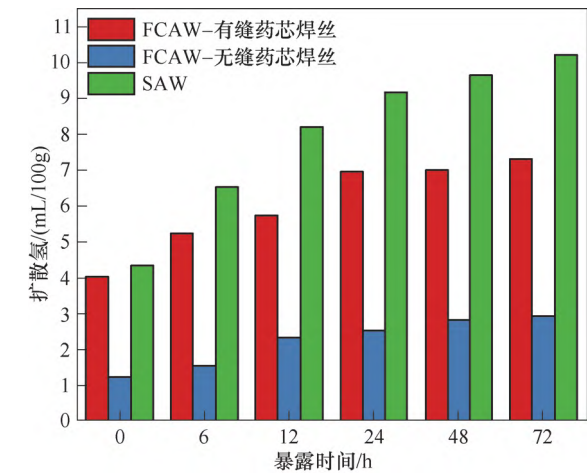


图2 焊接材料暴露时间与熔覆金属扩散氢含量的关系（温度25℃、湿度30%）

4.2 环境温度和湿度对焊缝扩散氢含量的影响

深水导管架S420高强钢在实际焊接过程中，难免会出现雨季、冬季和夜间施工，以及其他组合工况和恶劣天气，这些施工环境因素都会对焊缝金属中的扩散氢含量有较大影响^[13]。因此，分别测试了不同焊接材料和焊接试板在不同环境温度和湿度组合工况下暴露后焊接熔覆金属的扩散氢含量。环境温度和湿度组合包括低温高湿环境（温度：0℃、10℃；湿度：95%），常温常湿环境（温度：25℃；湿度：30%），高温高湿环境（温度：38℃；湿度：95%）。基于焊接材料不同暴露时间

的扩散氢含量测试结果，焊接材料和焊接试板在不同温度和湿度环境中充分暴露时间统一为24h。有缝、无缝FCAW和SAW在不同温度和湿度组合环境中暴露后焊接熔覆金属扩散氢含量见表2，将表2中数据绘制成柱状图（见图3）进行对比分析可知，在低热输入为1.0～1.3kJ/mm时，无缝药芯焊丝在不同温度与湿度组合工况下，均未出现扩散氢显著增加的现象，扩散氢含量均在H3以下。对于有缝药芯焊丝，低温高湿（10℃、95%）环境下扩散氢的含量大于高温高湿（38℃、95%）环境。虽然低温高湿环境下药粉吸潮的程度弱于高温高湿环境，但低温高湿环境焊接时不仅氢的扩散慢，不利于熔池和焊缝金属中扩散氢的逸出，而且其电弧稳定性差导致潮湿环境中的氢更容易进入熔池。当温度、暴露时间和热输入等条件一定时，有缝药芯焊丝熔覆金属的扩散氢含量随着环境湿度的增加而明显增加。这主要是因为环境湿度的增加会明显增加水汽中的氢进入熔覆金属中的概率。而在其他环境条件一定的前提下，熔覆金属扩散氢含量随着环境温度的升高并没有显著增加。施工环境湿度对熔覆金属扩散氢含量的影响显著高于温度。SAW熔覆金属扩散氢含量：常温常湿环境<低温高湿环境<高温高湿环境，但是扩散氢含量的差距较小，其主要原因是SAW时氢通过熔渣进入熔池和焊缝金属。而SAW焊

剂吸潮速度：高温高湿环境>低温高湿环境>常温常湿环境。

表2 不同环境温度和湿度组合工况下熔覆金属的扩散氢含量

焊接方法	焊丝牌号	温度 /℃	湿度 (%)	热输入 / (kJ/mm)	扩散氢 / (mL/100g)
FCAW-有缝药芯焊丝	E81T1-Ni1M	0	95	1.20	10.21
		10	95	1.16	10.02
		10	95	2.87	10.39
		25	30	1.02	6.92
		25	60	1.18	8.56
		25	95	1.07	9.96
		25	30	2.53	6.74
		38	95	1.15	9.28
FCAW-无缝药芯焊丝	E81T1-Ni1M-H4	0	95	1.20	1.18
		10	95	1.09	1.1
		10	95	2.56	1.6
		25	30	1.01	2.12
		25	30	2.63	2.21
		38	95	1.08	1.13
SAW	F8A4/F7P4-ENi1-Ni1	10	95	1.9	10.15
		25	30	1.9	10.02
		25	30	3.5	9.56
		38	95	1.9	10.41
		38	95	3.5	10.13

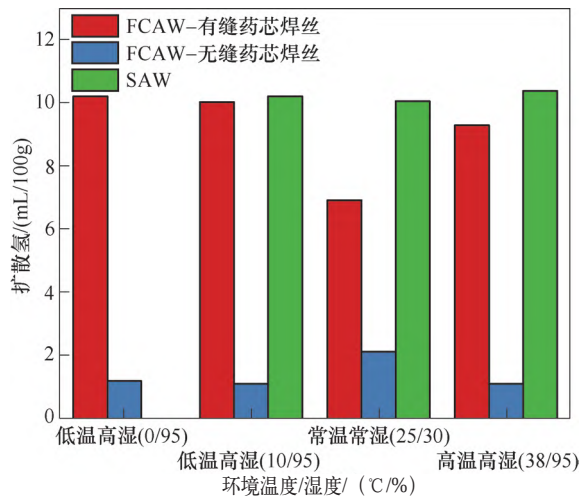


图3 不同环境温度和湿度组合工况与熔覆金属扩散氢含量的关系

4.3 风速对焊缝扩散氢含量的影响

焊接过程中合理的保护气体流量可以有效隔绝更多空气中的水汽，从而起到保护熔池的作用，使焊缝扩散氢含量降低。为了分析风速对熔覆金属扩散氢含量的影响，选取有缝药芯焊丝E81T1-Ni1M和无缝药芯焊丝E81T1-Ni1M-H4作为对比，测试在无风、风速小和风速大3种环境下的焊缝扩散氢含量。焊接环境为低温高湿环境（10℃/95%），焊接热输入为1.20kJ/mm。不同风速下熔覆金属的扩散氢含量见表3。将表3中数据绘制成柱状图（见图4）进行对比分析可知，在无风环境下，两种药芯焊丝熔覆金属的扩散氢含量均较低，但无缝药芯焊丝熔覆金属的扩散氢含量显然更低；但当焊接环境有风时，药芯焊丝熔覆金属的扩散氢含量迅速升高，当风速大时，焊接熔覆金属中出现明显的气孔，扩散氢含量显著增加。即使是无缝药芯焊丝随着风速的增加，扩散氢含量也显著升高。有风环境对药芯焊丝气体保护熔覆金属的影响较为显著，主要是由于有风环境会严重影响保护气体的保护效果，导致保护气体无法有效隔绝空气中的氢进入熔池和焊缝金属，尤其在潮湿环境下，电弧周围的水分增加使更多的氢原子或离子进入到熔覆金属中，扩散氢含量必然迅速增加。施工环境中风速对扩散氢的影响最为显著。考虑到药芯焊丝气体保护焊焊接过程中风速对保护气体的保护效果有较大影响，因此当施工环境中 有风时必须采取防风措施。

表3 不同风速下熔覆金属的扩散氢含量

焊接方法	温度 /℃	湿度 (%)	热输入 / (kJ/mm)	风速	扩散氢 / (mL/100g)
FCAW-有缝药芯焊丝	10	95	1.2	无风	4.67
				风速小	7.25
				风速大	12.38（气孔）
FCAW-无缝药芯焊丝	10	95	1.2	无风	1.4
				风速小	4.98
				风速大	8.65（气孔）

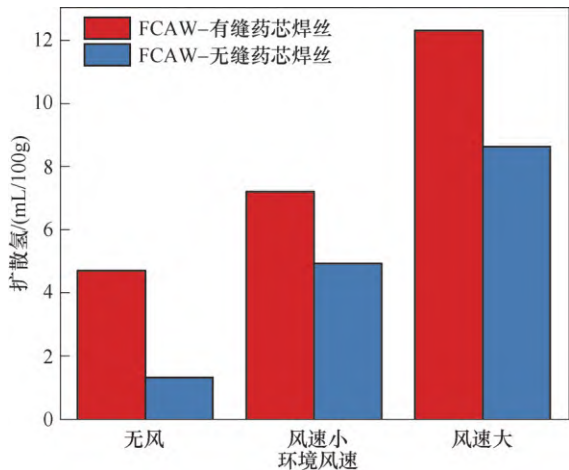


图4 环境风速对熔覆金属扩散氢含量的影响

5 焊接工艺对焊缝金属扩散氢含量的影响与关联性

5.1 焊接热输入对焊缝扩散氢含量的影响

为了分析焊接热输入对深水导管架S420高强钢焊接熔覆金属扩散氢含量的影响,根据表2中的测试结果,选取环境因素(温度和湿度)一定、热输入不同的有缝、无缝FCAW和SAW熔覆金属的扩散氢含量进行对比分析,结果如图5所示。在低温高湿环境(10℃/95%)下,有缝、无缝药芯焊丝随着焊接热输入的降低熔覆金属扩散氢含量呈现下降的趋势,但是扩散氢含量随着热输入的降低下降幅度较小。在常温常湿环境(25℃/30%)下,有缝、无缝药芯焊丝在低热输入条件下的熔覆金属扩散氢与高热输入条件下的扩散氢含量并无明显差别,最大相差量不超过0.2mL/100g。这一结果与低温高湿环境下热输入对扩散氢含量的影响规律基本一致,即焊

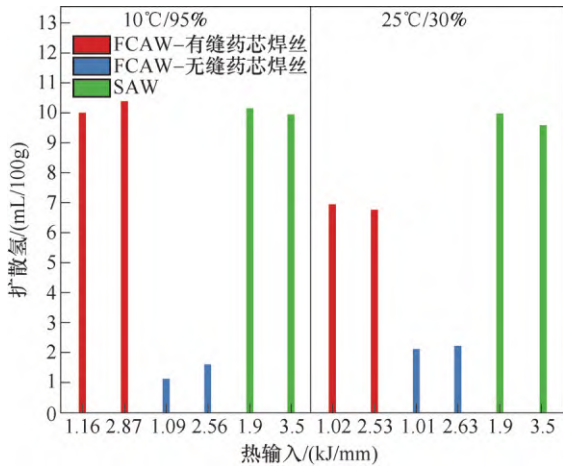


图5 热输入对熔覆金属扩散氢含量的影响

接热输入对药芯焊丝熔覆金属扩散氢含量的影响并不显著。在低温高湿和常温常湿环境下,高热输入时SAW熔覆金属的扩散氢含量均略低于低热输入,但二者的扩散氢含量相差不大,表明热输入对埋弧焊熔覆金属扩散氢含量的影响非常有限。因此,在实际的施工过程中通过调整焊接热输入来控制扩散氢含量的作用很有限。在焊后阶段可采取焊后热处理去除焊缝中的扩散氢。

5.2 预热温度对焊缝扩散氢含量的影响

在焊前阶段影响焊缝扩散氢含量的主要因素为预热温度,预热温度越大则熔池内氢逸出的多,预热温度过低或者未达到焊接工艺要求则往往使得焊缝扩散氢含量偏大。测试前将药芯焊丝和焊接试板置于低温高湿环境(10℃/95%)暴露24h,焊接热输入为1.20kJ/mm。不同预热温度下熔覆金属的扩散氢含量见表4。将表4中数据绘制成柱状图(见图6)进行对比分析可知,随着预热温度的升高,两种药芯焊丝熔覆金属的扩散氢含量均呈下降趋势,其中

表4 不同预热温度下熔覆金属的扩散氢含量

焊接方法	预热温度 /℃	湿度 (%)	热输入kJ /mm	扩散氢 / (mL/100g)
FCAW-有缝药芯焊丝	10	95	1.20	10.18
	50			9.32
	150			8.91
FCAW-无缝药芯焊丝	10	95	1.20	7.15
	50			6.62
	150			6.29

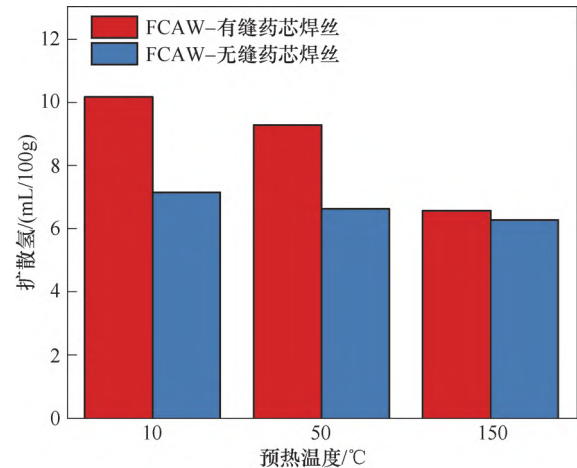


图6 不同预热温度对熔覆金属扩散氢含量的影响

有缝药芯焊丝的效果尤为显著。焊接试板预热一方面有利于除去试板中的水汽,降低扩散氢含量,另一方面有利于加速焊缝金属中氢的扩散,有利于氢的逸出,降低扩散氢含量。因此,在实际的施工环境中,通过调控预热温度,对于降低焊缝金属的扩散氢含量有一定效果。

6 熔滴过渡对焊缝金属扩散氢含量的影响与关联性

熔滴过渡是指在电弧热作用下,焊丝端部的熔化金属形成熔滴,受到各种力的作用从焊丝端部脱离并过渡到熔池的全过程。药芯焊丝气体保护焊接时,熔滴过渡稳定性对于焊缝金属的扩散氢含量有较大的影响。为了分析药芯焊丝在不同施工环境中熔滴过渡和电弧形态稳定性,选取有缝药芯焊丝E81T1-Ni1M与无缝药芯焊丝E81T1-Ni1M-H4进行对比试验,并采用高速摄影采集熔滴过渡过程。测试前将药芯焊丝和焊接试板置于常温常湿环境(25℃/30%)暴露24h。

高速摄影采集的有缝、无缝药芯焊丝焊接熔滴过渡过程如图7所示。由图7可知,两种药芯焊丝的焊接熔滴过程均为射滴过渡形式,其中无缝药芯焊丝焊接熔滴过渡过程稳定,电弧形态呈钟罩状,熔滴过渡时无突然破裂,飞溅少,电弧保护效果好。而有缝药芯焊丝焊接熔滴过渡过程波动较大,伴随突然破裂,飞溅大,电弧形态在熔滴过渡时变化较大,电弧保护效果不佳。在施工环境中,当有缝药芯焊丝在环境温度和湿度暴露后,药芯焊丝中的药粉受潮,在焊接过程中受潮的药粉和金属丝在电弧热的作用下熔化过渡到熔渣中的氢含量增加,引起最终焊缝扩散氢含量增加。此外,药粉受潮导致熔

滴过渡过程和电弧形态不稳定,一方面导致空气中的氢进入熔池,增加扩散氢的含量;另一方面,电弧不稳定和飞溅大会导致焊缝中的夹杂物等缺陷增加,缺陷的增加将作为氢陷阱增加焊缝金属中的溶氢量,也会导致焊缝扩散氢含量增加。此外,熔滴过渡和电弧不稳定引起夹杂物增多,对于焊缝金属中针状铁素体的形核也有一定的影响。

7 焊缝金属扩散氢含量的控制方法

1) 根据实际焊接条件和环境,优选低氢焊接材料(如无缝药芯焊丝)和低氢的焊接方法(如气体保护焊)。

2) 焊接材料使用前应按照规定烘干,领取焊接材料应装保温桶。

3) 药芯焊丝尽量当天一次性使用完毕,否则需采取适当的保护措施保存,以减少与空气中水汽接触,在第二天再次使用前应检查其状态。

4) 严格控制氢的来源,清除工件坡口和焊丝表面的铁锈和油脂等。

5) 对金属及其两侧75mm范围内进行烘干处理,避免水汽的吸附。

6) 在空气相对湿度超过90%及下雨、下雪环境中,需采取隔离保护措施,否则不得施焊。

7) 当施工环境中存在有风的情况时,必须采取防风措施。

8) 严格按照焊接工艺评定给出的焊接参数范围控制热输入,若热输入过大,则将导致晶粒粗大,形成淬硬的马氏体,降低焊接接头的韧性。

9) 可通过合理选择焊前预热、焊后缓冷、后热消氢及焊后热处理等方式来降低扩散氢含量,并改善焊缝热影响区组织,从而防止延迟裂纹的产生。

8 结束语

1) 在常温常湿环境下,随焊接材料暴露时间延长,有缝药芯焊丝熔覆金属的扩散氢含量逐渐增加直至趋于稳定,SAW熔覆金属的扩散氢含量显著增加(可达10mL/100g),而无缝药芯焊丝熔覆金属扩散氢含量始终较低(超低氢水平H3以下)。有缝药芯焊丝和SAW焊剂在一定温度、湿度环境长时间暴露中吸潮是导致其扩散氢含量大幅增加的关键环节。

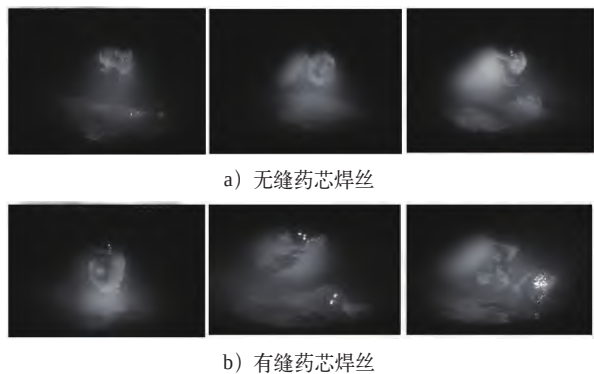


图7 有缝、无缝药芯焊丝焊接熔滴过渡过程

2) 有缝药芯焊丝在低温高湿环境下, 熔覆金属扩散氢含量大于高温高湿环境, 施工环境湿度对熔覆金属扩散氢含量的影响显著高于温度。而SAW熔覆金属扩散氢含量呈现常温常湿环境<低温高湿环境<高温高湿环境。

3) 有缝、无缝药芯焊丝随着风速的增加, 熔覆金属扩散氢含量均呈现急剧增加的规律, 而且当风速大时熔覆金属中甚至出现明显气孔。施工环境中风速对焊缝金属扩散氢含量的影响最为显著, 因此在现场施工时必须采取防风措施。

4) 对于有缝FCAW, 施工环境因素中风速的影响最为显著, 其次是焊接材料暴露时间、环境湿度和环境温度; 而对于无缝FCAW, 焊接材料暴露时间、环境湿度和温度的影响较小。对于恶劣施工环境工况, 可以考虑采用无缝药芯焊丝, 以降低焊缝金属中扩散氢含量。对于SAW, 焊剂暴露时间对扩散氢含量的影响最为显著, 其次为环境湿度, 环境温度的影响最小。

5) 有缝药芯焊丝在施工环境中暴露引起的药粉吸潮, 不仅会导致药粉中过渡到熔渣中的氢含量增加, 还会引起焊接过程熔滴过渡不稳定和电弧波动等, 从而导致电弧保护效果不佳, 使环境中的氢易进入熔池和焊缝金属中, 最终导致扩散氢含量增加。

6) 在不同温度、湿度组合工况下, FCAW和SAW的热输入对扩散氢含量的影响并不显著。随着预热温度的升高, 有缝与无缝药芯焊丝FCAW焊缝金属的扩散氢含量均呈下降趋势。在高湿环境中施工, 可以考虑通过适当提高预热温度来降低焊缝金属的扩散氢含量。

参考文献:

- [1] 钱伟方. 多丝埋弧焊焊缝裂纹解析[J]. 宝钢技术, 2013 (1) : 19-23.
- [2] 李广一. 船体焊缝延迟裂纹的产生原因及预防措施[J]. 广东造船, 2018, 37 (6) : 43-45.
- [3] 王艳, 王心悦, 徐燕铭, 等. 预热温度对深水导管架高强钢S420焊缝延迟裂纹的影响[J]. 金属加工 (热加工), 2025 (3) : 70-75.
- [4] 孔祥峰, 邹妍, 张婧, 等. 焊缝金属中扩散氢的形成及控制研究进展[J]. 钢铁, 2015, 50 (10) : 77-84.

- [5] 王征, 桂赤斌, 王禹华. 高强度钢焊缝金属氢控制研究进展[J]. 焊接, 2008 (2) : 7-10.
- [6] 王晓东, 文九巴, 魏金山. 低合金高强度焊接结构钢扩散氢的研究进展[J]. 洛阳工学院学报, 2002, 23 (2) : 16-19.
- [7] 冯素英, 杨涛, 陈玉刚. 药芯焊丝熔敷金属中扩散氢影响因素分析[J]. 金属制品, 2020, 46 (6) : 59-63.
- [8] 克西格达拉. 埋弧焊中的氢对焊缝质量的影响[J]. 农业技术与装备, 2010 (14) : 21-21.
- [9] 李兴霞, 崔国明, 吴金杰. 空气湿度和钢板初始温度对高强钢熔敷金属扩散氢含量的影响[J]. 热加工工艺, 2012, 41 (17) : 156-158.
- [10] 孙咸. 焊缝金属强度匹配与扩散氢的关系[J]. 电焊机, 2019, 49 (11) : 7-16.
- [11] 陈爱志, 杨欢, 薛钢, 等. 钢焊接接头中氢的溶入与扩散行为研究进展[J]. 材料开发与应用, 2015, 30 (2) : 9-14.
- [12] 孙咸. 埋弧焊焊缝组织与扩散氢的关系[J]. 电焊机, 2017, 47 (11) : 1-8.
- [13] 余巍, 张京海, 易传宝, 等. 环境条件对熔敷金属中扩散氢含量的影响[J]. 材料开发与应用, 1999 (1) : 10-13.

(收稿日期: 20241206)