

焊管焊接工艺评定标准对比分析

甘正红¹, 宋文杰¹, 宋文盛¹, 赵 虎², 邢艳亮³, 张坤鹏⁴

(1. 江苏德创制管有限公司, 江苏 兴化 225700; 2. 江苏港程锅炉有限公司, 江苏 张家港 215600;
3. 河北省特种设备监督检验研究院唐山分院, 河北 唐山 063000;
4. 番禺珠江钢管(连云港)有限公司, 江苏 连云港 222006)

摘 要: 为了准确开展焊管焊接工艺评定, 从母材分类、评定厚度、坡口形式、试件形式、焊接热输入、焊接电特性、焊接材料、保护气体、预热、焊后热处理、焊接技术措施、试样检测与试验、工艺规程与工艺评定记录等方面对国内外焊管常用焊接工艺评定标准和规范进行了详细对比, 探讨了各标准和规范之间的差异, 重点分析了各标准中变素的认可范围以及焊管焊接工艺评定中存在的问题, 可为焊管制造企业的焊接工艺人员进行焊接工艺评定提供参考和借鉴。

关键词: 焊管; 焊接工艺评定; 标准; 焊接工艺规程; 焊接工艺评定记录; 变素; 对比分析

中图分类号: TG441

文献标识码: B

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2023.01.008

Comparison and Analysis of Welding Procedure Qualification Standard for Welded Pipe

GAN Zhenghong¹, SONG Wenjie¹, SONG Wensheng¹, ZHAO Hu², XING Yanliang³, ZHANG Kunpeng⁴

(1. Jiangsu Dechuang Manufacturing Pipe Co., Ltd., Xinghua 225700, Jiangsu, China;
2. Jiangsu Gangcheng Boiler Co., Ltd., Zhangjiagang 215600, Jiangsu, China; 3. Hebei Special Equipment and Inspection
Institute Tangshan Branch, Tangshan 063000, Hebei, China; 4. Panyu Chu Kong Steel Pipe (lianyungang) Co., Ltd.,
Lianyungang 222006, Jiangsu, China)

Abstract: In order to accurately evaluate the welding procedure of welded pipe, the common welding procedure evaluation standards and specifications for welded pipe at home and abroad are compared in detail from the aspects of base metal classification, evaluation thickness, groove form, specimen form, welding heat input, welding electrical properties, welding materials, protective gas, preheating, post welding heat treatment, welding technical measures, sample detection and test, process specification and process evaluation record, etc. The differences among various standards and specifications are discussed, and the recognition scope of variables in standards and the problems existing in the welding procedure qualification of welded pipe are emphatically analyzed, which can provide references for the welding process personnel of welded pipe manufacturing enterprises to carry out the welding procedure qualification.

Key words: welded pipe; welding procedure qualification; standard; welding procedure specification; welding procedure qualification record; welding variables; comparison and analysis

焊管焊接工艺评定是为验证拟定焊接工艺的正确性而进行的试验过程及结果评价, 焊接工艺通常由焊管制造厂制定, 评定记录在购方需要时应提交, 因此焊接工艺评定过程必须严谨。然而, 有些焊管厂的焊接工艺人员对焊接工艺评定流程不够熟悉, 对工艺评定标准理解不够透彻, 易造成焊接工艺评定数据丢失或不准确, 甚至焊接工

艺评定记录内容不全面、不完整, 结论不准确, 导致焊接工艺评定不能充分覆盖焊管产品的焊接。

焊管的主要用途一般有两类, 一类是作为承压类特种设备使用, 如石油化工天然气管道、锅炉和压力容器等; 另一类是作为钢结构使用, 如高层建筑、体育场馆、桥梁、海洋结构、电力杆塔等。焊管的用途不同, 其生产用钢板或钢带的

化学成分和强度的要求也不同，焊接工艺和评定要求也不一致。焊接工艺评定中的因素包括重要因素（重要变素）、补加因素（附加重要变素）和次要因素（非重要变素），假如任一重要因素的变化超出了认可范围，则要对工艺进行重新评定，而不同标准在焊接工艺评定过程中重要因素又有所不同，如果在评定中不加注意会出现不能覆盖的问题。本研

究对焊管不同焊接工艺评定标准的差异和特点进行了对比分析，以期帮助焊接工艺人员理解和使用标准。

1 国内外焊管焊接工艺评定常用标准

目前国内外焊管常用的焊接工艺评定标准和规范见表1。

表1 国内外现行有效的焊接工艺评定主要标准规范

序号	标准编号	标准名称
1	ASME IX—2021	焊接、钎接和粘接评定
2	NB/T 47014—2011	承压设备焊接工艺评定
3	AWS D1.1/D1.1M—2020	钢结构焊接规范
4	GB/T 50661—2011	钢结构焊接规范
5	CCS—2021	材料与焊接规范
6	ISO 15614-1:2017	金属材料焊接工艺规程及评定——焊接工艺评定试验 第一部分 钢的弧焊和气焊以及镍和镍合金的弧焊

注：ISO 15614-1：2017 中等级1是基于ASME卷IX的要求，等级2是基于本标准前一版本要求，本研究以等级2进行分析对比。

2 焊管焊接工艺规程与焊接工艺评定记录的关系

2.1 焊接工艺规程

焊接工艺规程（WPS），是指对特定焊接接头采用的材料、焊接方法、操作和各种参数的规定。WPS文件规定了焊接的所有要素，是直接指导焊工从事焊接工作的指令性文件，任何焊接工作只有按WPS的规定进行，才有可能保证产品的焊接质量。

2.2 焊接工艺评定记录

焊接工艺评定记录（PQR），是焊接工艺评定后期的一个结果记录，是记录焊接试件的真实条件，用于验证和评定焊接工艺方案的正确性。评定记录不直接指导生产，是焊接工艺卡的支持文件，同一焊接工艺评定记录可作为几份焊接工艺卡的依据，最终由单位技术负责人、监理或购方代表签字认可。PQR是通过焊接工艺评定试验（WPQT）得来的，其目的在于：①对拟出的预焊接工艺规程（PWPS）进行检验，确定是否具有可操作性、合理性；②焊接材料选用是否正确、焊接工艺参数是否合适；③证明工厂的设备、人员等技术状态的良好性，有能力从事技术规范和标准要求的焊接工艺，

能获得合乎标准要求的焊接质量。

2.3 WPS与PQR的关系

母材与焊材的焊接性能是焊接工艺评定的基础，WPS必须经过WPQT证实其正确性和合理性，经过WPQT这一过程产生的PQR，是原则性的文件，所有内容一经认可，即具有法定效力，用于指导编制焊接用WPS，然后根据WPS转换编制具体的焊接工艺卡，用于焊管焊接，所有的焊接要素不能超出WPS的范围，否则监理或购方代表可以不接受该工艺，焊管不能生产或需重新评定。

WPQR文件中需要将母材质保书、焊材质保书、检验报告等资料作为附件资料。

3 焊接工艺评定的目的和程序

焊接工艺评定的目的是考察不同焊管材料在拟定的焊接工艺下焊接接头的性能，以及焊接工艺因素变更后焊接接头性能变化情况。焊接工艺评定必须在焊管生产前完成，也就是说必须保证用于焊管制造的焊接工艺是经过评定并且正确的。

焊接工艺评定的程序一般可分为以下步骤：提出工艺评定项目、编制预焊接工艺规程、焊接试板（管）进行检验及性能试验、编写工艺评定

记录、编制焊接工艺规程或焊接工艺卡以指导焊管现场焊接等。

4 焊接工艺评定因素（认可范围）

4.1 工艺评定因素的设定

焊管焊接方法主要采用焊条电弧焊（SMAW）、埋弧焊（SAW）、熔化极气体保护焊（GMAW和FCAW）及其组合，本研究主要针对各标准中以上焊接方法的工艺评定因素进行对比分析。焊接工艺评定因素主要有母材、坡口、焊接材料、焊接热输入、预热和热处理、保护气体、电特性、技术措施等，工艺评定因素又可认为是焊接工艺评定的认可范围。焊接工艺评定的重要因素是指影响焊接接头抗拉强度和弯曲性能的焊接工艺因素；补加因素是指影响焊接接头冲击韧性的焊接工艺因素，当规定进行冲击试验时，需要增加补加因素；次要因素是指对要求测定的力学性能无明显影响的焊接工艺因素。当变更任何一个重要因素时，都需要重新评定；当增加或变

更任何一个补加因素时，则可按增加或变更的补加因素增焊冲击韧性试板（管）进行试验；当变更次要因素时不需要重新评定，但需要重新编制焊接工艺规程。工艺评定因素性质的确定为焊接工艺因素改变是否重新进行焊接工艺评定提供了准则，这样就可以避免每个焊接工艺参数的改变都要重新评定，从而减少不必要的工作，而不同标准中的重要因素要求又有所不同，需要认真分析对待。因此在进行焊管焊接工艺评定时，应充分考虑选用标准下焊接工艺评定的认可范围，以适当减少评定的数量和充分覆盖焊管产品的焊接。

4.2 母材类别

作为工艺评定中的重要因素，不同标准对母材进行了不同的分类分组，主要依据是钢板的化学成分、力学性能和焊接性能。母材分组是为了减少焊接工艺评定的数量。一般标准均规定，改变焊管母材的分组需重新进行评定。GB/T 50661和CCS标准对焊管母材常用的Q+T和TMCP交货状态的材料严格规定了覆盖要求，要特别注意。各标准对母材的分类及具体覆盖范围见表2。

表2 母材的分类及评定覆盖范围

标准编号	材料分组	评定的母材覆盖范围
ASME IX	母材在表QW-422中给出。对焊管采用材料标准如A387、A572、A515、A516、A517、A671、A672、A691、API 5L等给出了不同的类别号（P-No.）和/或组号（S-No.）。	覆盖范围见表QW-424。一个P-No.加相同的P-No.，适用于相同的P-No.内的母材，母材类别号改变需重新评定。对于ASME其他卷或规范要求冲击试验评定的材料，在P-No.下再指定组号，组别号改变需重新评定。
NB/T 47014	根据金属材料的化学成分、力学性能和焊接性能对母材进行分类。GB/T 9711—2017标准中的钢级L245～L555在类别Fe-1中，组别分别在Fe-1-1～Fe-1-4中。	母材类别号改变，需要重新评定；母材组别号改变，也需重新评定（其他规定除外）。
AWS D1.1	根据母材强度级别分为四个组别。标准中表6.8给出了采用PQR评定的表5.3和表6.9所列及未列的钢材。	对I、II、III、IV组钢未按表6.8评定的母材或母材组合的变化。对于有CVN的要求，组别的变化，评定的最小厚度为T或16 mm（取小值）。
GB/T 50661	标准中表4对母材按照屈服强度级别分为I、II、III、IV类钢材。	不同类别钢材的评定结果不得互相替代；I、II类钢高级别可替代低级别（相同供货状态）；III、IV类钢不得相互替代；Q+T和TMCP与其他供货状态的不能互相替代；耐候钢与非耐候钢不得互相替代；国产和国外钢材不得相互替代。
CCS	根据材料强度分成不同的等级，常用焊管的牌号有AH32、DH36、EH36、DH690、EH690等。	相同强度级别的钢材，适用韧性等级相同或较低的钢材；屈服强度≤390 MPa的钢，适应强度级别相同或者低两个级别的钢材（对Q+T钢材，仅适应强度级别相同或者低一个级别的钢材）；采用热输入大于50 kJ/cm的焊接方法，仅覆盖韧性等级相同强度低一个级别的钢材；Q+T和其他交货状态的不能相互覆盖；正火、热轧和控轧交货状态的可覆盖TMCP，但反之不能覆盖。
ISO 15614.1	按照ISO15608对材料的化学成分和力学性能进行分类；如一个母材属于两组或两组，应归较低分组。	在标准表3中给出了评定的认可范围。分组系统未覆盖的各种母材组合需要单独的焊接工艺评定，对于化学成分和力学性能相近的材料可以互相认可。

4.3 母材厚度

母材金属和焊缝金属的厚度在一定程度上决定了焊接接头的性能。不同标准对母材厚度的评定范围进行了不同的规定，不同厚度的焊接试件评定合格可以覆盖一定的厚度范围。对于焊管普

遍采用的多丝焊自动焊接和半自动焊接，确定的焊接电流、电压、速度和热输入范围可适用一定的壁厚范围，在该范围中，应适当选择几个点进行试验，以评定整个方案。各标准评定合格的母材厚度覆盖的工件厚度范围见表3。

表3 母材评定厚度的覆盖范围

标准编号	评定厚度覆盖范围
ASME IX	母材评定厚度的范围在表QW-451中：试件厚度(T)为1.5~10 mm,适用焊件范围1.5 mm~ $2T$ ；试件厚度10~38 mm,适用焊件范围5 mm~ $2T$ ；试件厚度>38 mm,适用焊件范围5~200 mm。熔敷焊缝金属厚度(t)的评定最大厚度为 $2t$ 。对于单道焊或多道焊,其中任一焊道的厚度大于13 mm,厚度的增加超过试件评定厚度的1.1倍,需重新评定。
NB/T 47014	标准在6.1.5条和表7、表9以及表10中对试件母材厚度(T)评定后覆盖的焊件母材厚度最小值和最大值进行了规定,同时规定了适用的焊件焊缝金属厚度(t)有效范围。除其他规定外,一般适用的最大厚度为 $2T(2t)$ 。
AWS D1.1	当试板公称厚度(T)为 $3\leq T<25$ mm时,覆盖的母材公称厚度是 $3\text{ mm}\sim 2T$ ；当 $T\geq 25$ mm时,最小是3 mm,最大不限制。没有规定熔敷金属厚度的评定要求。
GB/T 50661	评定合格的试件厚度(t) ≤ 25 mm,适用工程厚度范围 $3\text{ mm}\sim 2t$ ；试件厚度 $25\text{ mm}<t\leq 70\text{ mm}$ 时,适用厚度范围 $0.75t\sim 2t$ 。
CCS	试件厚度 $3\text{ mm}<t\leq 2\text{ mm}$,单道焊认可范围为 $(0.7\sim 1.1)t$,多道焊为 $3\text{ mm}\sim 2t$ ；试件 $12\text{ mm}<t\leq 100\text{ mm}$,单道焊的认可范围 $(0.7\sim 1.1)t$ (当热输入超过50 kJ/cm,认可的厚度上限是 t)，多道焊为 $0.5t\sim 2t$ (最大150 mm)。
ISO 15614.1	试件厚度 $3\text{ mm}<t\leq 2\text{ mm}$,单道焊评定范围为 $0.5t$ (最小3 mm)~ $1.3t$,多道焊为 $3\text{ mm}\sim 2t$ ；试件厚度 $12\text{ mm}<t\leq 100\text{ mm}$,单道焊评定范围为 $0.5t\sim 1.1t$,多道焊为 $0.5t\sim 2t$ 。熔敷金属厚度(s)覆盖最大 $2s$ 。

4.4 坡口形式

改变坡口形式是否需要重新进行评定，不

同的标准有不同的规定。各标准对坡口形式的规定见表4。

表4 各标准对坡口形式的规定

标准编号	坡口形式
ASME IX	改变接头坡口设计和根部间隙以及取消衬垫均属于非重要变素,不需要重新评定
NB/T 47014	改变坡口形式、根部间隙以及增加或取消衬垫均属于次要因素,不需要重新评定。
AWS D1.1	改变坡口类型(如单面V形改双面V形)；任何类型的坡口改为直边坡口(I形)或直边坡口改为其他坡口；任何超过相关条款规定公差的变化,如减小坡口角度、减小根部间隙、增加钝边,以上需要重新评定。
GB/T 50661	焊接接头坡口形式、尺寸等应符合本规范附录A的规定。
CCS	焊缝坡口形式、装配应符合WPS中的规定,以草图的形式表示坡口情况,如坡口大小,装配间隙和留根的大小。
ISO 15614.1	无要求,但需给出接头设计/结构和尺寸的草图或参考相应的标准。

4.5 焊接位置及试件形式

焊管的焊接位置和评定位置基本都在平焊位置，不同标准对平焊位置的缩写符号不一致，有的用“F”，有的用“G”，在编写WPS和PQR时应注意。焊接工艺评定应根据产品的结构形式选择合适的焊接试件形式，各标准均规定焊件形式为全焊透板对接。GB/T 9711—2017和API SPEC 5L 2018标准附录D补焊工艺规定：试验焊缝可在钢带、钢板或钢管上进行。中石油企业标准CDP-NGP-S-

PL-003—2020-1《输气管道工程钢管通用技术规格书》附录K制管焊接工艺评定规定：制管的焊接工艺评定应在制管用钢板或者钢管上进行试验。在钢板或钢带上进行焊接取样与在钢管上进行焊接取样是有区别的，在钢板或钢带上焊接取样，材料没有变形，力学性能没有变化；在钢管上取样，因钢板经过弯曲变形，焊缝力学性能可能会发生变化。因此焊管焊接工艺评定在选择评定试件形式时，应考虑钢板或钢管上的性能差异。

4.6 焊接热输入

焊接热输入 $E=IU/h$ ($\Sigma IU/h$), 焊接热输入综合了焊接电流、电弧电压和焊速三个参数。焊接热输入过大, 导致焊缝和热影响区的冲击韧性降低和变差, 因此对于有冲击要求的焊接工艺评定, 如超出规定值, 均需重新评定。WPS中采用最大焊接电流和电压以及最小焊速焊接工艺评定试件, 才能保证评定完成后WPS所给电流、电压和焊速

值的全范围均可用于焊管的焊接。WPQR中的焊接电流、电弧电压和焊速应是试板(管)施焊时的焊接电流、电弧电压和焊速的实际值, 是一个定值, 而不是一个范围。有些焊管企业的WPQR上的焊接电流、电弧电压和焊速只写一个范围, 这是不正确的。另外, 对于焊管多丝埋弧焊的焊接线能量的确定则是把各焊丝的焊接热输入功率求和。各标准对焊接热输入的规定见表5。

表5 焊接热输入(线能量)的规定

标准编号	焊接热输入
ASME IX	增加热输入属于附加重要要素(每种方法热输入或单位长度熔敷金属体积增量超过PQR记录值, 则需重新评定; 高于上转变温度的PWHT, 则不需重新评定)。
NB/T 47014	增加线能量或单位长度焊道的熔敷金属体积超过评定合格值属于补加因素。
AWS D1.1	需要进行冲击试验时, 热输入或单位焊缝长度内熔敷的焊缝金属体积超过评定范围(焊后进行奥氏体晶粒细化热处理的情况除外), 则需重新评定。
GB/T 50661	焊接热输入应根据被焊材料的焊接性制定。
CCS	热输入量的适用范围为认可试验值的 $\pm 25\%$, 但上限最高不超过55 kJ/cm, 如超过50 kJ/cm, 其使用上限为不超过认可试验值的10%。
ISO 15614.1	当要求冲击试验时, 认可的热输入上限可比试件焊接使用热输入大25%; 有硬度要求时, 认可的热输入下限可比试件焊接使用热输入小25%。超过以上变化需重新评定。若焊评试验采用高低两个热输入进行, 则其中间的所有热输入的使用不需重新评定。对于焊件方法111, 热输入的确定可以基于每根焊条熔敷长度。

4.7 焊接电特性

焊接电特性(电参数)是工艺评定中一个比较重要的因素。各标准对电特性的变化做了不同的规定, 尤其是电流、电压、焊接速度的

改变各不相同, 电特性参数被看作是补加的重要参数, 它主要对接头的冲击韧性产生较大的影响。表6分别列出不同标准的电特性的变化覆盖范围。

表6 电特性的变化覆盖范围

标准编号	电特性
ASME IX	对于GMAW(FCAW), 从熔滴弧、喷射弧或脉冲弧焊接改变为短路弧焊接或反之, 属于重要要素, 需重新评定。交流改为直流, 或反之; 在采用直流焊接时, 从电极接负极(正极性)改为电极接正极(反极性), 或反之; 属于附加重要要素。改变电流、电压、焊接速度和摆动参数范围属于非重要要素。
NB/T 47014	对于GMAW(FCAW), 从喷射弧、熔滴弧或脉冲弧改变为短路弧, 或反之; 属于重要因素, 需重新评定。改变电流种类或极性属于补加因素。改变焊接电流范围, 除SMAW外改变电弧电压范围属于次要因素。
AWS D1.1	改变每一种直径焊丝的电流(增加或减少量 $>10\%$), 其中SMAW的电流值超出制造商推荐值范围。改变电流类型(DC或AC)或极性(直流的正极或负极)。对于GMAW, 改变熔滴过渡模式。对于GMAW和FCAW, 将输出从CV改为CC。对于SAW/GMAW/FCAW, 改变每一种直径焊丝的电压(增加或减少量 $>7\%$); 改变每一种直径焊丝的送丝速度(增加或减少 $>10\%$; 改变焊接速度(增加或减少 $>15\%$, 其中对于SAW, 增加或减少 $>25\%$)。以上变化均需重新评定。
GB/T 50661	对于SMAW: 直流焊条的电流极性改变; 焊接实际采用的电流值、电压值的变化超出焊条产品说明书的推荐范围。对于GMAW: 焊接实际采用的电流值、电压值和焊接速度变化分别超过评定合格值的10%、7%和10%; 实心焊丝气体保护焊时熔滴颗粒过渡与短路过渡的变化。对于SAW: 焊接电流种类和极性的改变; 焊接实际采用的电流值、电压值和焊接速度变化分别超过评定合格值的10%、7%和15%。以上变化均需重新评定。
CCS	电流种类(直流、交流和脉冲)和极性(正极性、反极性)变化应重新进行焊接工艺认可。
ISO 15614.1	认可范围针对焊接工艺评定试验中所使用的电流种类(交流、直流和脉冲电流)和极性; 对于焊接方法111, 不要求冲击试验时, 交流适合于直流(两个极性均可)。

4.8 焊接材料

焊接材料（填充金属）包括焊条、气体保护焊焊丝（实心或药芯）、埋弧焊焊丝和焊剂等，按材料类别、强度等级、合金成分等进行归类。焊管的焊接工艺评定，一般是按照熔敷金属强度和冲击吸收功来选择焊接材料。选用焊接材料应保证焊缝金属的力学性能高于或等

于母材规定的限值，或符合文件规定的补充技术条件，对于抗 H₂S 焊管，其耐腐蚀性能不应低于母材的相应要求。埋弧焊用焊丝和焊剂，如果焊管是经焊后热处理的，所用焊丝和焊剂质保书上熔敷金属的力学性能不一定要求也是焊后热处理达到的。各标准对焊接材料的规定见表 7。

表 7 焊接材料的规定

标准编号	焊接材料		
	SMAW	SAW	GMAW/FCAW
ASME IX	改变焊条类别号属于附加重要变素。	焊剂-焊丝型号、合金焊剂成分、合金元素成分、焊剂类型的改变；增加、取消或改变附加填充金属；回用重渣等属于重要变素，需要重评。改变直径、焊剂牌号和焊丝类别号属于非重要变素。	填充金属制品形式、合金元素成分的改变；增加、取消或改变附加填充金属属于重要变素，需要重评。改变焊丝类别号属于附加重要变素。改变焊丝直径属于非重要变素。
	从表 QW-432 中某一 F-No. 改变为任何其他的 F-No.，或改变为表中未列出的任何其他填充金属需要重评。从表 QW-442 中某一 A-No. 改变为另一 A-No. 需要重评（A-No.1 和 A-No.2 互相认可）。		
NB/T 47014	焊条直径改为大于 6 mm 属于补加因素（高于上转变温度的热处理除外）。当规定进行冲击试验时，用非低氢型药皮焊条代替低氢型药皮焊条属于补加因素。	Fe-1 类钢材埋弧多层焊时，改变焊剂类型（中性焊剂、活性焊剂）；改变混合焊剂的混合比例；焊缝金属合金元素的含量、增加、取消附加填充金属或改变其体积变化超过 10% 属于重要因素，需要重新评定。改变焊丝直径属于次要因素。	焊缝金属合金元素的含量、增加、取消附加填充金属或改变其体积变化超过 10%；实芯焊丝、药芯焊丝、金属粉之间的变更属于重要因素，需要重新评定。改变焊丝直径属于次要因素。
	变更填充金属类别号需重新评定（用强度级别高代替强度级别低的类别填充金属焊接 Fe-1 和 Fe-3 类母材时除外）。		
AWS D1.1	增加填充金属强度类别；由低氢改为非低氢焊条；改变焊条类别不属于 AWS A5.1 或 A5.5 的有关规定；直径增加 0.8 mm。以上改变，需重新评定。	改变焊丝-焊剂类别；改变焊丝-焊剂类别不属于 AWS A5.17 或 A5.23 的有关规定；焊丝公称直径的增加；焊丝数目的改变。对于有冲击要求时，焊丝-焊剂分类的变化，或者未按 AWS 规范分类的焊丝或焊剂品名的改变，或者是改用粉碎的焊剂。以上改变，需重新评定。	增加填充金属强度类别。焊丝数目的改变。改变焊丝类别不属于 AWS A5.18 或 A 5.28 有关规定以及 AWS A5.20 或 A 5.29 有关规定。对于 FCAW，焊丝类别改变；直径的减小。对于 GMAW，直径的增加和减小。当有冲击要求时，对于 FCAW，焊丝制造商或制造商商标或焊丝类型的变化。以上改变，均需重新评定。
	对于有冲击要求时，AWS A5.X 焊条（焊丝）分类或 A5.X 规范未涵盖的焊缝金属或填充金属分类的变化。		
GB/T 50661	焊条熔敷金属抗拉强度级别变化；由低氢型焊条改为非低氢型焊条；焊条规格改变。以上变化均需重新评定。	焊丝规格改变；焊丝与焊剂型号改变；添加与不添加冷丝的改变。以上变化均需重新评定。	实心焊丝与药芯焊丝的变换；焊丝型号改变；焊丝直径改变。以上变化均需重新评定。
CCS	除热输入超过 50 kJ/cm 的工艺外，焊接材料的适用范围为与试验所用焊接材料相同等级（包括后缀）者。		
ISO 15614.1	只要满足热输入的要求，允许改变焊接材料的尺寸；当不需要冲击和硬度试验时，焊接材料尺寸没有限制。只要焊接材料根据适当的国际标准中的名称，具有相同的力学性能、相同类型的覆盖物或药芯、相同的公称化学成分和相同或低的氢含量，改变可不重新评定。当要求 -20℃ 冲击试验时，对于 111、114、12、136 和 132 焊接方法，需限制制造厂的商标名称。		

4.9 保护气体

对于 GMAW 和 FCAW 焊接工艺，使用不同种类、不同配比的气体，焊接的电弧特性、熔深特性、熔滴过渡方式、焊缝成型以及焊缝性能都不同，选择合适的保护气体种类及配比对

焊接质量具有重要作用。各标准对保护气体的变化做了不同的规定，尤其是对保护气体的类型、气体的成分、混合比例以及流量的改变都进行了相应的规定。各标准对气体的规定及变化覆盖范围见表 8。

表8 保护气体的变化覆盖范围

标准编号	保护气体
ASME IX	从某一种单一保护气体改变为另一种单一保护气体;从单一保护气改变为混合保护气或反之;改变混合保护气的规定百分比组成;保护气体的增加或者取消属于重要变素,需要重评。改变流量属于非重要变素。
NB/T 47014	改变单一保护气体种类;改变混合保护气体规定配比;从单一保护气体改用混合保护气体或反之;增加或取消保护气体属于重要因素。保护气体流量改变超出规定范围属于次要因素。
AWS D1.1	从一种保护气体改为任何其他保护气体或混合气体;改变混合气体百分比;或取消保护气体;改变保护气体的流量(增加>50%、减小>20%);将保护气体改为AWS A5.18、A5.28、A5.20、A5.29、A5.36未涵盖的气体。以上改变需重新评定。
GB/T 50661	单一保护气体种类的变化;混合保护气体的气体种类和混合比例的变化;保护气体流量增加25%以上或减少10%以上。以上变化均需重新评定。
CCS	保护气体成分或者混合气体的混合比变化不超过CCS规范的表2.5.1.3或表2.9.2.4分组范围。
ISO 15614.1	保护气体认可仅局限于焊接工艺试验所使用的公称成分的保护气体;CO ₂ 含量的公称成分变化量在±20%的偏差是允许的;对任何气体成分的增加或减少,其变化量最大不超过0.1%,不需重新评定。

4.10 预热、层间温度

预热温度和层间温度应根据钢种的化学成分、接头拘束状态、热输入大小、熔敷金属含氢量水平及所采用的焊接方法等综合因素确定或进行焊接试验。有的标准明确规定了不同材质和厚度的预热温度要求,有的标准则通过焊接试验进行确定。部分焊管企业对焊接工艺评定记录中的预热温度和层间温度不够重视,有的干脆不填写,甚至随意填写数字,根据焊接工艺评定标准,预热

温度应填写试板(管)施焊时预热温度最低值,而层间温度则填写试板(管)施焊时最高值,才是正确的填写方法。另外按照各标准进行焊接工艺评定时,需要特别注意各参数的范围值,现场焊接时很容易超出评定范围,例如AWS D1.1中预热温度和层间温度降低大于155℃时,需要重新评定,这在焊管车间现场较难监控,应尽可能使用配有自动记录仪的履带式热电偶感应加热器加热。各标准对预热和层间温度的规定见表9。

表9 预热温度和层间温度的规定

标准编号	预热温度、层间温度
ASME IX	预热温度降低超过55℃属于重要变素;层间温度提高超过55℃属于附加重要变素;改变预热保持时间属于非重要变素。
NB/T 47014	预热温度比已评定合格值降低50℃以上属于重要因素;道间最高温度比经评定记录值高50℃以上属于补加因素。
AWS D1.1	预热温度降低>15℃;道间温度降低>15℃均需要重新评定。对于有冲击试验要求,预热和道间温度在已评定的最大预热/道间温度增加56℃以上,需要重新评定。
GB/T 50661	不同钢材最低预热温度应符合表7.6.2的要求;焊接中最低道间温度应不低于预热温度;静载荷结构最大层间温度不宜超过250℃;周期载荷或者Q+T的不宜超过230℃。
CCS	预热温度应不低于认可试验时所使用的预热温度;道间温度应不高于认可试验所使用的道间温度。
ISO 15614.1	从WPQR记录的预热温度降低超过50℃需要重新评定;最大层间温度超过50℃需要重新评定。

各标准均规定预热温度比评定值降低一定温度是重要因素,需要重新评定。焊接预热的目的是为了降低焊接接头的冷却速度,延长 $t_{8/5}$ (焊接接头从800℃冷却到500℃所需要的时间),从而减少焊管的淬硬倾向,同时有利于焊缝金属中氢的逸出,防止产生冷裂纹。焊管预热温度是根据钢板的化学成分等因素或焊接性试验确定,降低预热温度则有可能出现裂纹,导致焊管失效,同时预热温度会影响冷却速度进而影响抗拉强度。因此预热温度比评定值降低一定温度是重要因素,

而不是补加因素。相反层间温度提高一定温度为补加因素,提高层间温度有可能使冲击韧性降低,所以列为补加因素。

4.11 焊后热处理

焊管是否进行焊后热处理一般根据钢材的强度和化学成分以及标准的规定。焊管的焊后热处理一般有以下几种:后热消氢(脱氢)处理、消除应力退火、正火、正火+回火和调质处理(Q+T)。各标准对焊后热处理的规定见表10。

表 10 焊后热处理规定

标准编号	焊后热处理
ASME IX	增加或取消焊后热处理需要重新评定;焊后热处理温度降低至下转变温度之下或升高至上转变温度之上需要重新评定。
NB/T 47014	改变焊后热处理类别需重新评定。当要求冲击试验时,焊后热处理的保温温度或保温时间范围改变需重新评定。施焊结束后至焊后热处理前,改变后热温度和保温时间属于次要因素。
AWS D1.1	增加或取消焊后热处理需要重新评定。对于有冲击试验要求时,PWHT 温度和/或时间范围的变化,需重新评定。
GB/T 50661	当要求进行焊后消氢热处理时,应符合下列规定:消氢热处理的加热温度应为 250 ~ 350 ℃,保温时间应根据工件板厚按每 25 mm 不小于 0.5 h 且总保温时间不得小于 1 h 确定,达到保温时间后应缓冷至常温。当设计或合同文件对焊后消除应力有要求时,应符合 JB/T 6046 的规定。
CCS	认可试验时需要进行焊后热处理或时效处理,则生产中也应进行相应的焊后热处理或时效处理。
ISO 15614.1	增加或取消焊后热处理需要重新评定;认可的温度范围为焊接工艺试验使用保温温度的±20 ℃;取消焊后消氢处理或增加焊后消氢处理的温度或保温时间,需重新评定。

4.12 技术措施

焊管焊接的工艺技术措施包括焊接方法;单丝焊接、双丝及三丝以上的多丝焊接;单面焊双面成型、双面焊;单道焊、多层多道焊;加衬垫或清根焊接等。各标准均规定,改变焊接方法需要重新进行工艺评定。另外工艺评定时需合理设置焊接参数和工艺技术措施,以便焊管实际生产时能将焊接参数控制在评定范围内。关于每面单道和多道的焊接工艺问题,有的焊管企业进行焊接工艺评定时,每面两道

(即内焊和外焊各两道)焊接,但在焊管生产时,改为内焊一道,外焊三道,总道数不变,仍为四道,这种做法是不对的,在评定时应尽可能地采用一面单道焊(内焊一道),一面多道焊(外焊多道)或两面均多道的焊接方式。不同标准的技术措施或技巧规定见表 11。从表 6 和表 11 可以看出,对于现在焊管企业普遍使用的多丝埋弧焊,AWS D1.1 标准对于焊接电特性的规定较为详细,对多丝埋弧焊各参数变化的工艺控制较为严格。

表 11 技术措施规定

标准编号	技术措施
ASME IX	对于 SMAW,改变每面多道焊为每面单道焊;对于 SAW 和 GMAW(FCAW),改变每面多道焊为每面单道焊以及单丝和多丝转换属于附加重要要素(高于上转变温度的 PWHT 除外)。其他变化均属于非重要要素。
NB/T 47014	由每面多道焊改为每面单道焊属于补加因素(经高于上转变温度的焊后热处理不作为补加因素);对于 SAW 和 GMAW(FCAW),机动焊、自动焊时,单丝焊改为多丝焊或反之属于补加因素(经高于上转变温度的焊后热处理不作为补加因素)。其他变化均属于次要因素。
AWS D1.1	取消衬垫或背面清根(但不包括增加衬垫或背面清根要求);对于有 CVN 冲击要求,每一面多道焊改为每一面单道焊和对于机械化焊接或自动焊接,摆动变化量超过±20%(SMAW 除外)。另外对于 SAW,电弧纵向和横向间距的变化>10%或 3 mm(取大值)、并联焊丝的角度方位增加或减小 10°以上;对于机械化或自动化 SAW,平行于焊接方向的角度变化超过 3°;对于机械化或自动化 SAW,垂直于焊接方向的角度变化超过 5°。以上均需重新评定。
GB/T 50661	对于 SMAW:多道焊和单道焊的改变;清焊根改为不清焊根。对于 GMAW:多道焊和单道焊的改变;清焊根改为不清焊根;焊炬摆动幅度超过评定合格值的±20%。对于 SAW:多丝焊与单丝焊的改变;清焊根改为不清焊根。以上均需重新评定。
CCS	认可的多道焊工艺不能应用于单道焊;对多种焊接方法组合的焊接工艺,认可后仅适应于与试验相同顺序的组合焊工艺,否则需重新评定。焊接接头型式的适用范围见表 3.1.4.13,分双面焊和单面焊以及清根和不清根及带衬垫和不带衬垫。
ISO 15614.1	当要求冲击或硬度试验时,对于给定的方法,不允许将多道焊改为单道焊(或者是每侧一道),反之也不可以,否则需重新评定。对于 SAW:焊丝数目的改变;增加或取消冷丝或热填充丝;焊接填充材料与电极的比例变化超过±10%;焊接工艺评定用焊剂限制制造厂、商标和名称;焊剂从重碎渣使用,以上改变需重新评定。对于 GMAW(FCAW):对于填充焊丝和焊条,短路过渡仅局限于认可的短路过渡形式;使用射流、脉冲或颗粒过渡仅认可相应的射流、脉冲或颗粒过渡;送丝系统仅局限于认可的焊接工艺试验时的送丝系统(例如单丝或者多丝),以上改变需重新评定。

5 焊接工艺评定试件的检验

焊接工艺评定试件的检验与结果评价,应与焊接工艺评定目的紧密相连。对焊管进行焊接工艺评定的目的是为了得到焊接接头力学性能和弯曲性能符合标准的焊接工艺。焊接工艺评定试件检验项目一般要求检验力学性能(拉伸、冲击)和弯曲性能。除ASME IX外,各标准均要求进行外观检查 and 无损检测。

文献[14]对焊管不同标准和规范的焊接工艺评定试件的试验项目、试样取样与制备、试验过程、试验结果验收要求进行了详细的对比,读者可自行参考。

6 补焊工艺评定标准

国内外焊管产品基础标准主要有GB/T 9711—2017和API 5L 2018,这两个标准的附录D.2是关于补焊工艺评定要求的,附录D.2.2专门规定了补焊工艺的重要变素,其中的重要变素与本研究中对分析对比的各标准的变素既有相同点也有不同点。D.2.3规定了补焊工艺评定的力学性能试验,同时也规定由制造商选择,可用ISO 15614-1或ASME第IX部分规定的力学性能试验代替D.2.3的相应规定。文献[15]分析了三个焊管补焊焊接工艺评定标准,对焊缝补焊评定的焊接条件、力学性能取样及验收标准方面进行了分析探讨,可供参考。

7 焊接工艺评定中存在的其他问题

(1) 评定的时间问题。PWPS的时间不可能比PQR晚,WPS的时间不可能比PQR早。

(2) PQR编制问题。如厚壁钢管多层多道焊时焊接工艺规程上焊缝层/道示意图只标层号,不标焊道序号,更有甚者,示意图只画焊层,不画焊道(注意区分焊道与焊层的概念)。焊接工艺评定记录中的工艺参数不是如实记录,只标范围。

(3) 关于外单位焊接工艺的输入问题,国内WPS/PQR都是不能引进也不能转让。例如NB/T 47014—2011规定:焊接工艺评定应在本单位进

行,由本单位操作技能熟练的焊接人员使用本单位设备焊接试件。所以国内的焊接人员不容易理解WPS可以被任意焊管厂家直接使用而不需要做焊接工艺评定,而在美国的标准体系下这样做是可以的。

(4) 对需要热处理的焊管产品缺少热处理的焊接工艺评定项目。

(5) 对有冲击试验要求的材料,PQR中未按要求计算和填写最大热输入。

8 结束语

由于焊管的使用领域不同、工艺质量要求不同,焊接工艺评定的标准也不一致。各标准在母材类别、评定厚度、坡口要求、试件形式、焊接热输入、焊接电特性、焊接材料、保护气体、预热、焊后热处理、焊接技术措施等评定认可范围方面既有相同点也有不同点,因此在实际评定过程中应重视标准的使用,严格避免标准的混用,同时在焊管焊接过程中需要严格执行焊接工艺评定中的相关参数,不得超出范围。

焊接是焊管生产中的重要工艺之一,焊接质量与诸多因素息息相关,例如焊接方法、焊接材料、焊接技能、焊接工艺、焊材管理等。用评定合格的焊接工艺施焊,不表示焊接的焊管质量都合格,因此还需要加强对焊管焊接和生产过程的全面质量控制以及对焊缝的质量检验检测。

参考文献:

- [1] 美国焊接学会. 钢结构焊接规范: AWS D1.1/D1.1M—2020[S]. Miami: AWS, 2020.
- [2] ASME锅炉及压力容器焊接、钎接和粘接委员会. 锅炉和压力容器规范 第IX卷 焊接、钎接和粘接评定: ASME BPVC. IX—2021[S]. 北京: 中国石化出版社, 2021.
- [3] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. 承压设备焊接工艺评定: NB/T 47014—2011[S]. 北京: 国家能源局, 2011.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构焊接规范: GB/T 50661—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [5] ISO技术委员会. 金属材料焊接工艺规程及评定—焊接工艺评定试验第一部分: 钢的弧焊和气焊以及镍和镍合金的弧焊: ISO 15614-1: 2017[S]. [s.l.]: ISO, 2017.

(下转第58页)