

大型LNG储罐项目螺柱焊工艺评定标准 选择与应用分析

陈立新¹, 生望²

1. 中国海洋石油工程质量监督化工中心站 山东济南 250000

2. 河北华北石油工程建设有限公司 河北任丘 062552

摘要:近年来,在国内LNG储罐建设工程中,栓钉焊接基本上全部采用螺柱焊形式。螺柱焊具有焊接速度快、全断面焊接、焊接过程人为因素影响小及质量稳定可靠等优点,但在实际应用中,存在责任单位不知如何选择焊接工艺评定标准的问题。为此,将对比不同螺柱焊工艺评定标准,深入分析评定要素特点、适用范围及区别,为项目参建单位选择适用的焊接工艺评定标准提供借鉴和参考,保证栓钉焊接质量满足设计文件及规范要求,以期更好地实现栓钉焊接质量的再现性和可靠性。

关键词: LNG储罐; 螺柱焊; 焊接工艺评定

1 序言

中海油、中石化、中石油、新奥燃气等已建或在建大型LNG储罐工程中,绝大部分采用全容罐,其中主容器采用9%Ni钢、自支撑式圆筒形内罐结构,次容器采用预应力混凝土外罐结构。外罐主要由桩帽、承台、预应力钢筋混凝土罐体、钢筋混凝土包覆钢穹顶及承压环等组成。为保证结构安全和外罐密封性能,外罐内壁防潮衬板预埋件、承压环、钢穹顶蒙皮板、钢质穹顶接管及人孔等部位,全部植焊有规格不等、材质不同的栓钉,其焊接方式采用螺柱焊。钢质穹顶、管嘴、防潮衬板预埋件栓钉焊接分别如图1和图2所示。螺柱焊是指金属螺柱(或类似零件)的端部与工件表面在电弧和外压力共同作用下,熔化的两部分互相熔合的焊接方法。螺柱焊具有焊接速度快、全断面焊接、焊接过程人为因素影响小及质量稳定可靠等优点^[1, 2]。

螺柱焊现场施焊前,责任单位必须拟定焊接工艺、焊接试件并进行检测,实施焊接工艺评定,以保障栓钉焊接质量满足设计文件及规范要求,这就涉及到如何选择适用的焊接工艺评定标准问题。在大型LNG储罐设计文件中,一般规定螺柱焊工艺评

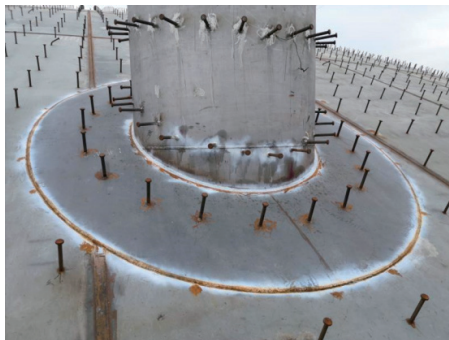


图1 钢质穹顶及管嘴栓钉



图2 外罐防潮衬板预埋件栓钉

定采用NB/T 47014—2011或ISO 14555—2017标准，其中NB/T 47014—2011是参照ASME《锅炉压力容器规范》第IX卷“焊接和钎接评定”编制而成；ISO 14555—2017属于国际通用标准。由于两个标准都具备各自的系统性、权威性，应用广泛，因此国内LNG储罐项目栓钉焊接工艺评定主要采用ISO 14555—2017或NB/T 47014—2011，有利于保证栓钉焊接质量稳定和牢固。但两个标准对于螺柱焊工艺评定要素、覆盖原则、试验项目的规定存在较大差别，因此深入分析两种工艺评定标准的异同与侧重，对参建单位结合工程建设特点，选择适用的螺柱焊工艺评定标准，做好螺柱焊质量控制具有重要意义。在LNG建设工程中，由于最常用的螺柱焊形式为“带陶瓷套圈或保护气体的拉弧螺柱焊”，所以本文将以此为例，对比分析两个标准的差异。

2 主要工艺评定要素及其覆盖范围对比

通过对比材料类别及组合、母材厚度、螺柱横截面积和形状、焊接位置、焊接参数、焊接电源类型、预热温度、焊接方法及焊后热处理类别共9个主要工艺评定要素，分析NB/T 47014—2011和ISO 14555—2017两个标准的差异，发现其中7个方面存在较大差异，2个基本相同，具体情况分析如下。

(1) 材料类别及组合改变 通过材料类别及组合改变，对比NB/T 47014—2011和ISO 14555—2017两个标准的差异，具体分析见表1。从表1可见，NB/T 47014—2011把材料类别改变作为是否重新进行工艺评定的唯一标准，覆盖原则单一；而ISO 14555—2017细分了覆盖要求，但母材类别覆盖范围较宽泛，在实际工程实践中，责任单位应认真分析标准覆盖要求，结合已有螺柱焊工艺评定数据

表1 材料类别及组合改变

项目	NB/T 47014—2011	ISO 14555—2017
评定因素	底板（管）母材类别号与螺柱材料类别号的组合改变，当组合改变时应重新进行焊接工艺评定	螺柱材料：基于ISO/TR 15608—2017材料分类，工艺评定试验覆盖同类别中的所有材料；对于拉弧螺柱焊，螺柱直径 $d \leq 13\text{mm}$ ，类别8或类别10覆盖类别1和组别2.1，反之亦然；类别21覆盖类别22，反之亦然 母材：基于ISO/TR 15608—2017材料分类，某一组的一个钢种工艺评定，适用于该组中具有相同或更低的屈服强度的钢种；类别8或类别10覆盖类别1和类别2，类别21覆盖类别22，反之亦然
覆盖说明	1) 母材或螺柱材料的组别号发生变化，但其类别号不变，则原焊接工艺评定继续有效 2) 当螺柱材料的化学成分与表1中某类别化学成分相同时，该类别号即为此螺柱材料的类别号	1) 当母材和螺柱材料的组合改变时，是否应重新进行焊接工艺评定，关键看母材和（或）螺柱材料变化，是否超出了其覆盖范围 2) 如果母材和（或）螺柱材料类别发生了标准覆盖范围内的变化，虽然母材和螺柱材料的组合发生改变，但原焊接工艺评定仍然继续有效
	组合改变的核心内容是确认材料类别是否发生变化，或是否发生了超出标准覆盖范围外的变化	
备注	材料类别、组别划分见该标准“表1 焊制承压设备用母材分类分组”	材料类别、组别划分应按ISO/TR 15608—2017《焊接-金属材料分类系统导则》执行
	1) 螺柱焊工艺评定执行标准不同，材料分类分组要求则不同，且差别很大，如NB/T 47014—2011“表1 焊制承压设备用母材分类分组”中的母材类别Fe-1，基本上包含了ISO/TR 15608—2017中的母材类别1~3 2) 当采用ISO 14555—2017标准进行螺柱焊工艺评定时，国标材料应比照ISO/TR 15608—2017标准进行划分、归类，必要时，母材和螺柱材料归类分组报告事先应征求有关参建各方同意	

库，再确定是否重新进行工艺评定。

(2) 母材厚度改变 通过母材厚度改变，对比NB/T 47014—2011和ISO 14555—2017两个标准的差异，具体分析见表2。从表2可见，NB/T 47014—2011未对母材厚度提出评定要求；但ISO 14555—2017针对陶瓷套圈和保护气体两种熔池保护方式，细分了评定因素和覆盖范围。

(3) 螺柱横截面积和形状改变 通过螺柱

横截面积和形状改变，对比NB/T 47014—2011和ISO 14555—2017两个标准的差异，具体分析见表3。由表3可以看出，如果螺柱焊工艺评定采用ISO 14555—2017标准，当螺柱焊工艺评定的两个螺柱直径之间跨度较大时，介于二者之间的任一螺柱直径，其焊接电流都需要结合公式计算、现场焊接位置、螺柱材质及工程实践经验等各方面要素综合确定，工程质量可靠性和稳定性只能通过LNG储罐项

表2 母材厚度改变

项目	NB/T 47014—2011	ISO 14555—2017
评定因素	不适用	1) 熔池保护采用陶瓷套圈（代号CF）时，焊接工艺评定试验认可的推荐最小板厚为0.25 <i>d</i> ，但应≥1mm 2) 熔池保护采用保护气体（代号SG）时，焊接工艺评定试验认可的推荐最小板厚为0.125 <i>d</i> ，但应≥1mm
覆盖说明	不适用	1) 当母材厚度小于标准推荐的最小厚度时，应重新进行工艺评定，其目的是防止母材烧穿 2) 对于薄板穿透焊，评定认可所有低于评定时所使用的最大板厚

注：*d*为螺柱直径，单位为mm。

目长时间运行来验证，存在一定质量安全风险。

（4）焊接位置改变 通过焊接位置改变，对比NB/T 47014—2011和ISO 14555—2017两个标准的差异，具体分析见表4。从表4可以看出，NB/T 47014—2011规定不同螺柱焊接位置（平焊、横焊、仰焊）应采用——对应的焊接工艺评定试验结果，不同位置之间严禁覆盖；而ISO 14555—2017规定在其他评定因素不变的情况下，只要通过横焊位置（PC）焊接工艺评定试验，允许应用于其他位置的螺柱焊，显然其覆盖范围非常宽泛。

（5）焊接参数改变 通过焊接参数改变，对比NB/T 47014—2011和ISO 14555—2017两个标准的差异，具体分析见表5。从表5可以看出，NB/T

47014—2011严格控制焊接参数变化范围，仅允许焊接参数在很小范围内变化，非常有利于控制螺柱焊接质量。

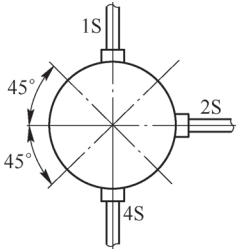
（6）焊接电源类型改变 通过焊接电源类型改变，对比NB/T 47014—2011和ISO 14555—2017两个标准的差异，具体分析见表6。从表6可以看出，NB/T 47014—2011规定，改变电源类型或改变焊枪型号，则必须重新进行焊接工艺评定；而ISO 14555—2017规定，改变电源类型或改变焊枪型号，应采用产品试验方法对螺柱焊接工艺规程进行验证，并要求宏观金相检测；相对于NB/T 47014—2011重新进行工艺评定，ISO 14555—2017采用产品试验验证工艺方式更加复杂，不利于现场工程实践

表3 螺柱横截面积和形状改变

项目	NB/T 47014—2011	ISO 14555—2017
评定因素	改变螺柱焊端部的尺寸和形状，应重新进行焊接工艺评定	1) 一个单独的工艺评定试验，覆盖所有的螺柱形状，但只能覆盖在试验中使用的螺柱直径 2) 两个不同直径的螺柱的工艺评定试验，覆盖两个直径之间的所有直径
覆盖说明	无	对于非合金钢的带陶瓷套圈或保护气体的拉弧螺柱焊，焊接电流估算公式： 1) 螺柱直径 <i>d</i> ≤16mm时，焊接电流 <i>I</i> =80 <i>d</i> 2) 螺柱直径 <i>d</i> >16mm时，焊接电流 <i>I</i> =90 <i>d</i> 3) 通常情况下，不锈钢焊接电流，大约比上述计算结果减小10%

注：*d*为螺柱直径，单位为mm。

表4 焊接位置改变

项目	NB/T 47014—2011	ISO 14555—2017
评定因素	与评定试件相比，增加焊接位置，应重新进行焊接工艺评定	对于带陶瓷套圈或保护气体的拉弧螺柱焊：焊接位置PC可以覆盖PE和PA，焊接位置PE可以覆盖PA，反之则不行；对于焊接位置PC可以使用专用陶瓷套圈
覆盖说明		焊接位置PA、PC、PE是基于国际标准ISO 6947—2011规定，PA：平焊位置，PC：横焊位置，PE：仰焊位置

注：1S对应PA；2S对应PC；4S对应PE。

操作，效率低下。

(7) 关于预热温度 NB/T 47014—2011和ISO 14555—2017两个标准关于预热温度的规定见表7。从表7可以看出，两个标准针对预热温度的评定侧重点完全不同，导致覆盖要求也完全不同。

(8) 焊接方法改变 通过焊接方法改变，对比

NB/T 47014—2011和ISO 14555—2017两个标准的差异，具体分析见表8。

(9) 焊后热处理类别改变 通过焊后热处理类别改变，对比NB/T 47014—2011和ISO 14555—2017两个标准的差异，两者都规定，改变焊后热处理类别，应重新进行焊接工艺评定。

表5 焊接参数改变

项目	NB/T 47014—2011	ISO 14555—2017
评定因素	1) 改变电流种类或极性，应增加冲击初度试件进行试验，重新编制焊接工艺规程 2) 改变焊接电流范围，除SMAW/GTAW外，均改变电弧电压范围，重新编制焊接工艺规程 3) 与评定值相比，改变电弧时间超过±0.1s，应重新进行焊接工艺评定 4) 与评定值相比，改变电流超过±10%，应重新进行焊接工艺评定 5) 与评定变化值相比，提升高度变化超过0.8mm，应重新进行焊接工艺评定	与评定值相比，认可发生在焊接设备供应商推荐的参数范围内变化
覆盖说明	与评定相比，改变电流种类或极性，应参照NB/T 47014—2011冲击取样要求，增加冲击试验；或者重新进行工艺评定试验	1) 实践中，如果焊接参数发生变化，但未超出设备供应商推荐的参数范围，则原焊接工艺评定继续有效 2) 对于带陶瓷套圈或保护气体的拉弧螺柱焊，焊接参数包括焊接电流、焊接时间、提升量、伸长量、极性、减振及接地夹钳的位置和数量

注：电流极性：钢材采用DCEN（直流正接）；铜、铝合金采用DCEP（直流反接）。

表6 焊接电源类型改变

项目	NB/T 47014—2011	ISO 14555—2017
评定因素	1) 改变焊接电源类型，应重新进行焊接工艺评定 2) 改变螺柱焊枪型号，应重新进行焊接工艺评定	变更焊枪或机头，或变更焊接电源类型或其制造商，则在结构焊接之前，需要通过一组产品试验对螺柱焊接工艺规程进行验证。产品试验数量应符合工程合同、设计文件及相关应用标准规定
覆盖说明	无	按照ISO 14555—2017第14.2.2条规定，产品试验要求焊接至少10个螺柱，试验项目包括外观检验（所有螺柱）、弯曲试验（5个）、宏观金相检验（2个，适用于螺柱直径>12mm）。产品试验应覆盖工程所用螺柱直径、母材及设备类型

表7 关于预热温度

项目	NB/T 47014—2011	ISO 14555—2017
评定因素	预热温度比已评定合格值降低50℃以上，应重新进行焊接工艺评定	没有预热的焊接工艺试验合格的焊接工艺规程，同样适用于有预热的焊接工艺规程，反之则不适用
覆盖说明	引申：在其他评定因素不变的情况下，没有预热且评定合格焊接工艺，适用于有预热的焊接工艺，反之则不成立	无

表8 焊接方法改变

项目	NB/T 47014—2011	ISO 14555—2017
评定因素	改变焊接方法，应重新进行焊接工艺评定	
特别说明	当出现下述两种情况时，可以采用SMAW或GMAW焊接方法： 1) 受工作环境、操作位置 and 材料限制或设计文件要求，不能采用自动化的带陶瓷套圈或保护气体的拉弧螺柱焊 2) 采用拉弧螺柱焊，如果焊脚挤出不足360°或外观检查不符合要求，而需要补焊修复时 在ISO 14555—2017标准中，由于仅列举了4种螺柱焊接方法工艺评定要求，所以当采用SMAW或GMAW焊接方法焊接螺柱时，只能基于NB/T 47014—2011标准要求，采用任意厚度的母材向上立焊对接焊缝试件或采用任意厚度的母材角焊缝试件进行焊接工艺评定，评定试件母材类别能够覆盖工程采用的母材及螺柱材料类别	

3 螺柱焊工艺评定试验项目及要求

通过对比焊接工艺评定试验项目及要求，发现两个标准存在的主要差异见表9。

由表9可见，在“温度≤100℃、承受静载”同

等工况条件下，NB/T 47014—2011比ISO 14555—2017增加了拉伸试验至少一个评定项目，细化了不同螺柱材料的断裂强度合格判据，从保证螺柱焊接质量角度而言，增加拉伸试验项目意义重大。

表9 两个标准存在的主要差异

试验项目	NB/T 47014—2011 (适用于承受载荷)		ISO 14555—2017 (适用于承受静载，温度≤100℃)	
	数量	要求	数量	要求
弯曲试验	锤击试验和折弯试验，共计5个	1) 锤击使螺柱上部至少1/4长度贴合到试件底板母材上，然后再使其恢复原状；将已焊好的螺柱弯曲与原位置至少呈15°夹角，然后再使其恢复原状 2) 每一个试件的焊缝和热影响区都不得有肉眼可见的开裂	10个	1) 弯曲角60°（螺柱弯曲与原位置呈60°夹角） 2) 焊缝和热影响区未发现裂纹
拉伸试验	5个（仅用于螺柱无螺纹时）	1) 碳素钢螺柱的断裂强度应≥241MPa 2) 奥氏体不锈钢螺柱的断裂强度应≥207MPa 3) 其他材料的断裂强度应不低于螺柱材料规定最小抗拉强度的一半	不适用	
宏观金相	5个（仅用于母材不是Fe-1类钢材时）	将螺柱电弧焊接头从中间剖开，用10倍放大镜检测，接头的剖面不得有裂纹	不适用	
备注	不承受载荷的螺柱，当采用自动化方式焊接时，不要求进行焊接工艺评定		1) 质量要求及承载要求不同、应用温度不同，试验项目及要求则不同 2) 工程应用标准或设计文件可能要求附加试验项目	

4 结束语

NB/T 47014—2011和ISO 14555—2017作为LNG储罐项目主要采用的螺柱焊工艺评定标准，各有特点和侧重，均可满足螺柱焊工艺评定基本要求。其中NB/T 47014—2011属于承压设备焊接工艺评定专业标准，应用范围最为广泛，其权威性业界公认，特别是螺柱焊接参数认可范围更加苛刻；而ISO 14555—2017属于金属材料螺柱焊通用标准，在第10章专门规定了螺柱焊工艺评定要求和认可范围。通过以上对比分析，笔者认为采用NB/T 47014—2011更有利于焊接参数和焊接质量的管控，其优势集中体现在以下5个方面。

1) 一种螺柱直径对应一份工艺评定试验报告（其他评定因素不变，下同）；对于近几年国内刚刚兴起的超大单体容量LNG储罐建设工程，采取每一种螺柱规格或直径应单独进行螺柱焊工艺评定试验方式，无疑是最为稳妥的技术方案。

2) 螺柱评定位置，必须与现场螺柱焊接位置一一对应。

3) 明确现场改变电流种类或极性时，应增加冲击韧性试验。在LNG储罐低温环境下，螺柱焊冲击

韧性指标是否合格尤为重要。

4) 与评定值相比，NB/T 47014—2011仅允许焊接电流、焊接时间、提升高度等主要参数小范围变化，而ISO 14555—2017认可焊接设备供应商推荐的焊接参数范围内的变化，许可范围非常宽泛，不利于精准控制螺柱焊接质量。

5) 相对于ISO 14555—2017的4种可选螺柱焊接方法，NB/T 47014—2011螺柱焊接方法选择范围很大，而SMAW或GMAW是螺柱焊接必选方法之一，选择NB/T 47014—2011作为螺柱焊评定标准，有利于统一螺柱焊工艺评定要求，便于现场执行和监管。

综上所述，建议LNG储罐项目优先采用NB/T 47014—2011作为螺柱焊工艺评定标准，以更好地实现螺柱焊接质量的再现性和可靠性。

参考文献：

[1] 陈祝年.焊接工程师手册[M].2版.北京：机械工业出版社，2009.
[2] 朱环.大直径螺柱横焊技术研究[J].金属加工（热加工），2020（4）：50-52.

MW 20201226