

输气管道工程热煨弯管标准编制和 设计制造技术分析

张有渝¹ 陈学文²

1. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041;
2. 四川科宏石油天然气工程有限公司, 四川 成都 610051

摘 要: 回顾感应加热弯管标准编制的发展历程并介绍标准的重要内容, 分析感应加热弯管外弧侧壁厚减薄率 C 计算公式的符号含义; 分析感应加热弯管和钢板加热压制组焊弯管成形前后壁厚与应力变化, 指出当前油气输送管道设计规范关于热煨弯管壁厚设计计算存在的分歧, 提出变壁厚弯管和等壁厚弯管概念及其应力分布和壁厚计算方法; 以 ASME B31.3—2010《工艺管道》关于弯管壁厚计算公式的规定和感应加热弯管水压爆破试验启裂口位置实例予以佐证。建议相关设计规范对热煨弯管壁厚计算公式予以修改和完善。以热煨弯管应力分布状态和弯管强度条件下的危险位置为依据, 提出双壁厚弯管概念和结构。

关键词: 输气管道; 热煨弯管; 感应加热; 母管; 环向应力; 壁厚计算; 变壁厚弯管; 等壁厚弯管; 双壁厚弯管; 壁厚减薄率

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2024.04.015

Development of standards and analysis on the design and manufacturing technology for hot bend in gas transmission pipeline engineering

ZHANG Youyu¹, CHEN Xuewen²

1. CPECC Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China;
2. Sichuan Kehong Oil and Natural Gas Engineering Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610051, China

Abstract: Reflecting on the evolution of standards for induction heating bent pipe development, this paper introduced the key aspects of these standards and interprets the symbols in the formula for the wall thickness reduction rate C on the outer arc side of induction heating bent pipes. By analyzing the variation trend of wall thickness and stress before and after pipe bending process for both induction heating bent pipes and steel plate heating pressed welded bent pipes, this paper showed the discrepancies on wall thickness calculation for heating bent pipe in current standards. This paper also provided concepts for variable and constant wall thickness bent pipe, along with their calculation methods for stress distribution and wall thickness. It substantiates these points with cases from ASME B31.3 - 2010 *Process piping* regarding bent pipe wall thickness calculation formula and the location of initiation cracks from hydraulic burst test on induction heating bent pipes. On this basis, this paper suggests revising the bent pipe wall

收稿日期: 2023-10-13

作者简介: 张有渝(1941-), 男, 江苏连云港人, 教授级高级工程师, 主要从事石油化工压力容器和石油天然气压力管道设备及管件、油罐的设计、审定和标准编制工作。E-mail: 1793871635@qq.com

thickness calculation formulae in relevant standards. This paper provides concept and structure for dual wall thickness bent pipe based on the hazardous location under stress distribution and strength condition.

Keywords: Gas transmission pipeline; Hot bend; Induction heating; Main pipe; Circumferential stress; Wall thickness calculation; Bent pipe with variable wall thickness; Bent pipe with constant wall thickness; Bent pipe with dual wall thickness; Wall thickness reduction rate

0 前言

根据设计规范定义,热煨弯管包括感应加热弯管和钢板加热压制组焊成形弯管,这两种工艺制造的弯管都在中国油气输送管道工程不同时期应用了几十年,近30多年来输气管道工程(含气田集输管道工程)使用了感应加热弯管,特别是高压大口径长输管道工程,使用了大口径高钢级感应加热弯管,如L485(X70)、L555(X80)等,设计、制造和施工焊接技术取得了很大进步。但由于试验研究、开发使用时间短,在感应加热弯管设计计算、技术规范、制造工艺、焊接等方面还存在一定的技术问题:设计规范规定的热煨弯管壁厚计算公式不同,对感应加热弯管壁厚检测规定存在歧义,导致油气输送管道工程设计对感应加热弯管壁厚计算方法和公式应用出现分歧,壁厚计算结果不同。

针对上述技术问题,本文从弯管相关的设计规范和制造技术标准分析,热煨弯管相对于母管/直管的壁厚变化和应力变化,提出变壁厚弯管和等壁厚弯管概念,对热煨弯管壁厚设计计算的思路与方法予以分析;建议相关油气输送管道设计规范对感应加热弯管壁厚计算公式予以修改完善;并以弯管环向应力分析为依据,提出了双壁厚弯管的概念和新结构,对相关技术问题予以分析。

1 定义与分析

1.1 定义

电磁感应:“导体回路中的磁通量发生变化时,回路中产生感应电流的现象^[1]。”

感应加热:“当金属处在交变磁场内,在金属内部由于磁力线切割发出涡流而生热的现象^[2]。”

感应加热弯制:“用感应加热方法在钢管圆周形成一条狭窄的环形加热带,在钢管移动的同时,使其持续弯曲的工艺^[3]。”

弯管:“用以在管道中改变介质流动方向,且弯曲半径不小于其母管外径5倍的两端带直段的圆弧形管件^[3]。”

母管:“用于制作弯管的直管^[3]。”

中性面:“母管弯制过程中弯管弧面上壁厚不变而形状改变的截面(为曲面)^[3]。”

过渡区:“位于弯管起弯点或终弯点附近的一段区域,该区域包含从未加热母管的末端延伸至已加热至弯制温度始端的那部份管段^[3]。”

壁厚减薄率:“母管实际壁厚最小值和弯管外弧侧壁厚最小值之差与母管实际壁厚最小值比值的百分率^[3]。”

强度条件:“为了保证结构安全可靠地工作,必须使结构中的工作应力与材料的许用应力之间满足一定关系,这就是强度条件^[4]。”

回转壳体:“指壳体的中面由1根平面曲线绕1根固定轴在空间绕360°而成的^[4]。”

变壁厚弯管:母管采用弯制工艺加工,其横截面壁厚按一定规律变化成不等壁厚的弯管,属于热煨弯管。

等壁厚弯管:原材料钢板经加热压制组焊工艺加工成其横截面壁厚均匀不变化的弯管,属于热煨弯管。

双壁厚弯管:两种不同厚度的原材料钢板经加热压制组焊工艺加工,分别成其内外弧侧不同壁厚但各自均匀不变化的弯管,属于热煨弯管。

1.2 分析

1)母管是感应加热弯管的原料管,是感应加热弯制工艺运行前后的同一根钢管,这根钢管实施弯制工艺前后材料和管径不变,但是钢管形状、尺寸以及材料某些性能和金相组织发生了变化,这些变化是由对弯管的功能要求带来的必然结果。

母管和与弯管相连接的同材质直管是完全不同的概念,母管与感应加热弯管是弯制前后的同一根钢管,而感应加热弯管和与其相连接的同材质直管是两根不同的钢管,这两个不同的概念在设计规范中,应该用于不同的条件,本文将后述。在设计过程中已经发生过因设计规范中这两个概念不清而造成设计不当的情况。

2)壁厚减薄率定义中的母管实际壁厚最小值,应该是在确定母管外弧侧位置后,采用测厚仪通过多点测量确定。

3)感应加热弯管属于变壁厚弯管。钢板划线下料,经加热压制成形,由两瓣组焊而成的弯管属于等壁厚弯管,这种加热压制组焊工艺成形的弯管,曾经在中国输气管道工程,特别是四川气田(含重庆地区)采用感应加热弯管前长期应用。双壁厚弯管是本文新提出来的结构型式。这三类弯管均属于热煨弯管。

2 感应加热弯管标准编制回顾与思考

2.1 弯管的标准构成

有关弯管的标准包括两类:一是输气管道设计规范中包含的对弯管设计、制造相关的技术规定,以满足输气管道工程对弯管的质量要求;二是专门用于弯管的包含设计、制造、检验、标志、运输、储存等内容的产品标准。输气管道设计规范对弯管的规定既是设计、选用弯管应遵循的技术要求,又是弯管产品标准编制的技术依据。弯管产品标准则是弯管设计、制造、检验的依据,是弯管产品合格判定的依据。

虽然伴随着输气管道工程的建设就存在弯管的设计、制造,但是输气管道设计规范和弯管产品标准却不是同时编制产生的,弯管产品标准的编制往往比输气管道设计规范的编制滞后较长时间。因此,弯管设计、制造的技术水平可能要比输气管道工程对弯管的质量要求要滞后一个时期才能达到。美国 ASME B31.8《输气和配气管道系统》自 1955 年独立正式出版^[5]至今已有 69 年,从可查阅到的该规范 1982 年版上即包含有弯管的技术规定,但并无相关的弯管标准,直至 2000 年才有第一版的弯管标准,二者至少相差了 18 年。

2.2 弯管产品标准编制回顾

2.2.1 弯管产品标准第一版的重要作用

输气管道工程弯管产品标准第一版是 SY 5257—91《钢制弯管》(以下简称 SY 5257—91),该标准对规范以及提升热煨弯管的制造技术水平和质量起到了重要作用。

2.2.2 输气管道工程项目上的弯管技术条件

四川气田和川渝城市自 20 世纪 60 年代建设威远—成都输气管道工程至 1979 年已建成通气运行的管道干线 1 087 km,最高设计压力 6.3 MPa,最大管径 720 mm,此后又修建了大量输气管道,形成了川渝天然气管网。其中的弯管在使用感应加热弯管机前,输气管道均采用钢板划线下料、加热压制成型组焊工艺制造的等壁厚弯管,20 世纪 80~90 年代逐渐开始采用感应加热弯制工艺制造弯管,即变壁厚弯管,其弯管制造、检验与验收均按照编制的弯管技术条件执行^[6]。

20 世纪 90 年代初陕京输气管道工程开始建设,四川石油管理局勘察设计研究院拿总设计,建设单位对工程的干线弯管要求采用 X60 级直缝钢管,用感应加热弯制工艺制造、检验与验收,规定弯管在施工现场不允许切割,采用“对号入座”组焊,这些技术要求在国内大型天然气长输管道工程上均属首次,经过设计单位考察分析,感应加热弯管制造单位试制,编制了《陕京输气管道工程线路部份弯管技术条件》用于感应加热弯管的制

造、检验与验收。弯管制造单位经过不断改进弯制工艺,为该工程制造了达到国际先进水平的感应加热弯管^[7-10]。

21 世纪初开始建设的西气东输管道工程使用了大量母管为 X70 级直缝钢管(外径 $D 1\ 016 \times 17.0/20.3/24.4/30.4\text{ mm}$)的感应加热弯管,专门编制了 Q/SY XQ 16—2003《西气东输管道工程用感应加热弯管技术条件》^[11],对感应加热弯管的母管材质、制造工艺、性能要求、检验和试验、保护层、装运等作了全面规定,包括母管采用干线钢管,外弧侧壁厚减薄率计算公式等内容。西气东输管道工程 3 条支干线工程编制了《西气东输管道工程常州—长兴,南京—芜湖,定远—合肥支干线感应加热弯管技术条件》。

陕京二线管道工程感应加热弯管的母管使用 X70 级管线钢管, $D 1\ 016\text{ mm}$,弯曲半径 $R=6D$,分别编制了《陕京二线管道工程用感应加热弯管技术条件》和《弯管技术规格书(站内用)》。

在当时国内外均无输气管道工程感应加热弯管标准的情况下,针对这些高压大口径长输管道工程,首次采用 X60、X70 级管线钢管设计、制造感应加热弯管而编制的工程用技术条件,在技术上发挥了重要的规范和指导作用,保证了弯管质量。

2.2.3 SY/T 5257—2004《油气输送用钢制弯管》编制回顾

中国在高压大口径长距离输气管道工程上,大规模采用控轧控冷工艺制造的管线钢管和感应加热弯管,为感应加热弯管的设计、制造和线路组装焊接积累了一定的经验,在此基础上,参照国际标准 ISO 15590-1:2001 *Petroleum and natural gas industries-Induction bends, fitting and flanges for pipeline transportation systems—Part 1: Induction bends*^[12](以下简称 ISO 15590-1:2001),以非等效采用的方式,修订 SY 5257—91,编制了以感应加热弯制工艺制造弯管的标准 SY/T 5257—2004《油气输送用钢制弯管》^[13](以下简称 SY/T 5257—2004)。

SY/T 5257—2004 的编制既吸纳了国际标准的先进性,也总结了输气管道工程感应加热弯管设计、制造技术,部分如下。

1) 母管材质依据 GB/T 9711《石油天然气工业 管线输送系统用钢管》(以下简称 GB/T 9711)规定了基本质量要求。

2) 规定了弯管内、外弧侧壁厚最小值,这是依据 ISO 15590-1:2001 纳入的。

3) 规定了制造工艺规范(MPS)的定义和完整的 MPS 运作程序;包括其制定程序、内容、评定程序、执行与修改等,这些内容 ISO 15590-1:2001 没有,为保证弯管

制造质量而补充的。对于不能采用取样检测其性能的产品,严格制定和执行 MPS 是非常重要的举措,因此在内容和程序上应尽可能全面。

4) 规定了母管入厂复验的项目,制造弯管的母管不允许有对接的环焊缝,不允许对母管管体进行补焊,也是对母管质量补充或明确规定。

5) 当母管采用直缝钢管时,钢管纵缝应位于弯管中性面附近的内、外弧侧,且距中性面 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 范围内,该规定 ISO 15590-1:2001 没有,这是采用了西气东输工程感应加热弯管技术条件修改补充通知中的规定^[11]。

6) 弯管弯制过程中不应有任何中断停留,否则会导致弯管被购方拒收。这是 ISO 15590-1:2001 中保证弯管性能和几何形状尺寸偏差质量的极其重要的规定,而且保证了购方拒收不合格弯管的权利,避免弯管供需双方在出现这种情况时发生矛盾,更重要的是避免了输气管道运行时的潜在安全风险。如果在标准中取消“导致弯管被购方拒收”的规定,将对输气管道工程运行安全不利。

7) 规定对 L415 或 X60 及以上钢级和处于酸性环境的弯管应进行热处理,这是为保证弯管力学性能而规定的,ISO 15590-1:2001 对此未作明确规定。

8) 弯管坡口应采用机械加工,这是补充规定,保证弯管与线路钢管对口焊接必须的技术要求。

弯管质量包含两方面:一是力学性能、冲击韧性、硬度等;二是几何形状与尺寸偏差的控制。在输气管道工程线路运行中,弯管应与相连接的直管具有等强度,有同等的安全性,所以标准规定弯管应与其母管一样符合 GB/T 9711 要求的质量。该规定是对弯管质量的总体要求,也是弯管产品检验和试验判定合格的依据。

弯管壁厚减薄率 C : 是弯管几何形状和尺寸偏差控制的重要指标,直接影响弯管的强度安全,且可能影响弯管合格性的判定。ISO 15590-1:2001 规定了弯管最小壁厚偏差值,并要求用超声波方法在弯管足够多的位置测定壁厚,但是并未对壁厚减薄率加以定义,亦未规定其计算公式,SY/T 5257—2004 分析了西气东输工程感应加热弯管技术条件关于壁厚减薄率的计算公式^[11],认定该公式的思路和符号取值正确,采用到本标准中,见式(1)。

$$C = (t_1 - t_H) / t_1 \times 100\% \quad (1)$$

式中: C 为弯管壁厚减薄率; t_1 为母管实际壁厚最小值, mm; t_H 为弯管外弧侧最薄处壁厚, mm。

弯管几何形状和尺寸偏差的规定和检测方法: 母管经感应加热弯制工艺加工成弯管,几何形状和尺寸变化非常大,远比压力容器单层内压圆筒复杂; 由于感应加热弯制工艺受到较多的技术因素影响,导致弯管几何形

状和尺寸偏差,进而影响到弯管在线路施工现场的对口组焊质量,涉及管道安全运行,所以应予以详细规定,包括检测方法的具体要求,但是 ISO 15590-1:2001 与其他外国标准类似,在这方面的规定不够全面和详细,SY/T 5257—2004 在 SY 5257—91 的基础上适当予以修改补充,尽可能方便制造单位有章可循和可操作性。

2.2.4 对感应加热弯管分析与思考

2.2.4.1 母管材质不应采用热机械控制工艺(TMCP)制造的线路钢管

线路钢管的化学成分、金相组织、力学性能、韧性等均是按照钢管制成后,即使用于线路工程上,仅是管端要进行环焊缝焊接思路设计的。但是母管经感应加热工艺弯制成弯管的过程中,要经过短时 $800 \sim 1\,000^{\circ}\text{C}$ 高温加热变形,金相组织和力学性能、韧性均要发生变化,高钢级弯管还需进行热处理。线路钢管的冶金设计显然没有考虑弯制工艺的需求,所以用线路钢管作母管是不可能弯制出性能优质的弯管; 更不应采用 TMCP 制造的线路钢管; 这个观点在标准 MSS SP-75—2019 *High-Strength, Wrought, Butt-Welding Fittings* 得到印证。中国在高压大口径长输管道工程建设初期,由于受多种客观因素限制,采用线路钢管作母管是可以理解的,在积累了一定的经验和达到一定的技术水平和装备水平的情况下,则应在机制和管理上规定输气管道工程感应加热弯管的母管由弯管制造单位与管线钢管公司根据弯制工艺进行专项的冶金设计和母管制造。

2.2.4.2 对弯管壁厚最小值的理解

SY/T 5257—2004 第 5.3 条分别规定了弯管外弧侧最薄处壁厚 t_H 和母管实际最小值 t_1 , 该规定源于 ISO 15590-1:2001, 是保证弯管产品强度安全的必要条件。列入该规定的前提条件是采用感应加热弯制工艺制造弯管, 理论是基于母管经感应加热弯制工艺后壁厚的变化规律和环向应力在其横截面上的分布规律; 该规定也是对弯管制造单位正确执行 MPS、避免母管壁厚在弯制过程中发生不符合规律变形的约束。该规定不适用于等壁厚弯管。

2.2.4.3 弯管壁厚减薄率 C 的计算

母管经感应加热弯制工艺制成弯管后, 其外弧侧壁厚经拉伸减薄, 壁厚减薄值应控制在标准规定的减薄率范围内, 才能保证弯管在输气管道工程运行时的强度安全, 因此判定弯管壁厚减薄率 C 是否合格就成了一项重要指标; 式(1)中 t_1 、 t_H 应对母管和弯管进行多点实测取得数据后确定最小值, 而且母管实测壁厚最小值的方位应是其弯制时处于外弧侧承受拉伸减薄的位置, t_1 值不应理解为母管的名义壁厚值, 也不应将式(1)中 t_1 定义为母管名义壁厚, 从钢管标准中去取值, 因为从钢管标

准中取母管名义壁厚与实测母管壁厚最小值之间相差1个钢管壁厚负偏差值,该壁厚负偏差是钢管制造工艺必然存在的,体现在钢管标准中,与母管经感应加热弯制工艺造成的外弧侧壁厚拉伸减薄量没有任何关系,如果在式(1)中定义 t_1 为母管名义壁厚值,那就是将母管壁厚负偏差变成了弯管外弧侧拉伸减薄量,凭空加大了弯管壁厚减薄量,很可能将弯管壁厚减薄率由合格变为不合格,这对弯管制造单位是不公平的判定,笔者曾在某输气管道工程弯管制造中处理过类似问题。

2.2.4.4 用小角度弯管拼接成大角度弯管不合标准

SY/T 5257—2004 规定制造弯管的母管不允许有对接的环焊缝,这是从弯管原材料方面保证其弯制质量的重要措施之一。ISO 15590-1:2001 规定感应弯管不允许环向焊缝,其实质是不论弯制前的母管或是弯制后的产品弯管均不应有环焊缝存在,这是因为存在环焊缝的母管在感应加热弯制工艺实施过程中,环焊缝中的化学成分、金相组织、力学性能、韧性等均不会与母管相同,获得所要求的弯管质量且环焊缝没有经过试验检测评定,在弯管 MPS 中不可能包含环焊缝相关的内容,因此在弯制过程中出现环焊缝是违反标准的;2根弯管产品对接的环焊缝同样不允许,一般需要对接的2根弯管是小角度弯管拼接成大角度弯管,目的可能是为了节省原料管,或是工期较紧,原料管订货困难。但这样拼接的弯管同样不能保证弯管质量,一是因为2根弯管对口处的化学成分、金相组织和性能不可能满足环焊缝的焊接要求;二是因为对口处的几何形状和尺寸偏差不会满足弯管标准规定,因而焊接质量不能保证,更重要的是弯管 MPS 没有提供技术支持,不允许这样实施。笔者在 SY/T 5257—2004 实施后,曾就是否可用2根45°弯管拼接成90°弯管作过咨询答复:这种拼接不符合弯管标准规定。

3 热煨弯管应力分析与壁厚计算

感应加热弯制工艺是近30年来中国输气管道工程热煨弯管制造广泛采用的工艺,其原材料母管一般是管线钢管(近期采用专门订货母管);在采用感应加热弯管机前的20世纪60~80年代,中国输气管道工程的热煨弯管原材料是钢板,采用划线下料,加热压制成型组焊工艺制造弯管。这两种工艺制造的弯管均属热煨弯管,在输气管道工程上功能相同,但在成形过程中壁厚变化完全不同,因此环向应力的变化和弯管强度条件下的危险部位也不相同。导致热煨弯管计算壁厚公式也不相同。为了清晰地对比分析热煨弯管应力分布状况,特别是环向应力的变化和分布,本节将感应加热工艺弯制的弯管与钢板划线下料、加热压制组焊工艺制造的弯管进

行比较分析,并引入与该两种制造工艺相关的变壁厚弯管和等壁厚弯管的概念。

3.1 热煨弯管成形前后的壁厚与应力变化

3.1.1 母管成形为弯管后的壁厚与应力变化

母管定义明确为感应加热弯管的原料管。

壁厚变化:母管是以一条直线为固定轴,又以另一条与固定轴平行且位于同一平面内,距离该固定轴长度为半径的直线绕固定轴旋转360°形成的圆柱形壳体,属于回转壳体中的一种;弯管也是一种回转壳体,它是以过弯管弯曲半径圆心的垂直线为固定轴,以弯管横截面围绕固定轴旋转1个弧度形成的双曲面壳体;回转壳体承受介质内压后,在经向和环向都要发生伸长变形,分别产生经向应力和环向应力^[4]。母管经感应加热弯制工艺加工成弯管后,首先在几何形状和尺寸上发生变化:由直管变成弯管,直管的轴线是直线,弯管的轴线是以弯管弯曲半径为半径的圆弧线;直管的壁厚是等壁厚,即常数,弯管的壁厚是变壁厚,其极端位置包括内、外弧侧和中性面,以母管壁厚为基准进行比较,内弧侧壁厚增厚最大,外弧侧壁厚减薄最大,中性面壁厚无变化,仍等于母管壁厚。实验证实,直管弯曲变形只有经向上的金属流动变形,在圆周方向上不发生金属流动。弯管相对于母管的壁厚变化值可以通过公式计算确定^[14-15]。

应力变化:母管是直管,在介质内压作用下产生的环向应力和经向应力均是常数,即在横截面上各处的环向应力和经向应力分别是同一个值,弯管在介质内压作用下,其横截面上的环向应力是变数,与母管环向应力相比较,内弧侧环向应力增大,中性面环向应力不变,与母管环向应力相等,外弧侧环向应力减小;弯管横截面上的经向应力无变化,仍等于母管的经向应力。弯管相对于母管的环向应力变化值可以通过公式计算确定^[15]。

弯管与母管相比较,在壁厚和环向应力上的综合变化是:外弧侧壁厚减薄,环向应力减小;内弧侧壁厚增厚,环向应力增大;综合结果是内弧侧环向应力略大于外弧侧环向应力,但与母管环向应力差值均很小,这些环向应力值可以通过公式计算确定^[15],感应加热弯管是变壁厚弯管。

3.1.2 钢板热压组焊弯管壁厚与应力变化

四川气田输气管道工程在20世纪60~80年代均采用钢板划线下料、加热压制成型组焊工艺制造弯管,一般在弯管公称直径 ≥ 250 mm即采用该工艺制造;这种弯管的原材料钢板在加热压制成型后厚度仍是均匀的,弯管的壁厚基本等于原材料钢板的厚度(差值为钢板加热氧化减薄量);弯管在介质内压作用下,横截面上的环向应力和与其相连接的同规格同材质的直管环向应力相

比较,内弧侧环向应力增大,中性面环向应力不变,与直管环向应力相等,外弧侧环向应力减小;这种弯管属于等壁厚弯管。它与感应加热弯管相比,其功能同样能完成输气管道工程对弯管的要求,但技术和结构上的差异则非常大,主要体现在:由于制造工艺方法完全不同,所以原材料不同,弯管成形后的原材料厚度变化不同,母管经感应加热弯制工艺加工成弯管后的壁厚由等壁厚变化成了变壁厚;钢板加热压制组焊的弯管的壁厚是等壁厚,与原材料钢板厚度基本相同(未计入钢板入加热炉加热氧化减薄量);在相同设计条件下的这两种弯管,由于弯管制造工艺的不同,导致弯管横截面的壁厚分布不同,弯管在管道介质内压作用下产生的环向应力分布和数值也不同。

3.1.3 分析

1) 热煨弯管制造工艺对弯管壁厚有重要影响,不同的制造工艺导致弯管有不同的壁厚分布状态,进而影响到弯管环向应力的分布和数值。

2) 热煨弯管不同制造工艺的原材料不同,感应加热弯制工艺的原材料母管和产品弯管是同一根钢管;加热压制组焊工艺的原材料是钢板,产品弯管是钢管,二者是不同类型的材料。对热煨弯管环向应力的分析,虽然都以同设计条件的直管环向应力为基准进行比较,但不同制造工艺的热煨弯管用作为基准进行比较的直管是不同的,感应加热弯管以母管为基准,弯管与母管是弯制前后的同一根钢管;加热压制组焊工艺制造的弯管则是以与其相连接的同材质直管为基准,弯管与直管是不同的钢管。

3.2 热煨弯管壁厚设计计算现状

3.2.1 热煨弯管原材料(母管或钢板)设计计算存在的技术问题

1) 母管是感应加热弯管的原料管,线路工程设计对母管要求包括两部分:一是母管材料选择,包含材质和管型;二是母管壁厚的确定。在高压大口径长输管道工程上,母管均选用直缝埋弧焊钢管,母管材质应考虑弯制工艺参数进行冶金设计,而不是简单采用线路钢管作母管;母管壁厚包括计算壁厚和附加厚度(包括弯管外弧侧拉伸减薄量等)。

2) 采用划线下料、加热压制组焊工艺制造弯管的原材料是钢板,线路工程设计对钢板要求包括两部分:一是钢板材质和交货状态;二是钢板厚度的确定。钢板厚度包括成形为弯管后,在介质内压作用下的计算壁厚和附加厚度(包括钢板下料后进入加热炉的氧化减薄量等)。

3) 热煨弯管原料管/板厚度设计计算应遵循的依据是油气输送管道工程设计规范,现状是中国油气输送管道工程热煨弯管广泛采用感应加热弯制工艺制造,同类

型介质输送管道设计规范对弯管壁厚计算存在不同的规定,而且规定的条文内容不够明确,导致油气输送管道工程弯管壁厚设计计算结果不一致,这种状况已存在较长时期,因此有必要探讨和解决下述技术问题:弯管计算壁厚公式的理论依据,应采用何种计算壁厚公式在强度条件下是经济合理,油气输送管道设计规范对弯管壁厚计算公式的规定。

3.2.2 母管壁厚 t_1 和壁厚减薄率 C

感应加热弯管标准规定了弯管壁厚减薄率是弯管尺寸偏差控制的重要指标,关系到弯管在管道工程运行中的强度安全。据了解,式(1)中 t_1 的定义和取值有不同的理解:一种认为应定义为母管实际壁厚最小值,该值应通过对母管确定为外弧侧部位测厚然后确定;另一种认为应定义为母管名义壁厚,则不需要对母管进行壁厚测定。这两种不同的理解导致弯管产品壁厚减薄率的计算和偏差评定不同,后者可能导致弯管壁厚减薄率不合格,因此有必要对该技术问题进行探讨并取得一致观点。

3.3 热煨弯管计算壁厚

3.3.1 制造工艺对热煨弯管原材料和结构的影响

输气管道工程对热煨弯管的功能要求决定了弯管的几何形状,设计条件基本决定了弯管的材质和尺寸,在上述前提下的弯管制造工艺则是对弯管最重要的影响因素,影响到弯管原材料的选用、壁厚变化状态,进而影响到弯管环向应力分布状态和数值大小,决定了弯管危险部位和采用的计算壁厚公式。这一系列的相关影响中,关键在于制造工艺对弯管成形过程中壁厚的变化状态,壁厚发生有规律变化的弯管是变壁厚弯管,感应加热弯管即属于变壁厚弯管;壁厚基本不发生变化(差值为钢板入加热炉氧化减薄量)的弯管是等壁厚弯管、钢板划线下料、加热压制组焊工艺制造的弯管即属于等壁厚弯管。

以母管/直管应力均布为基准,分析热煨弯管在介质内压作用下的应力变化,对环向应力:弯管内弧侧环向应力增大,中性面环向应力不变,外弧侧环向应力减小;径向应力数值则无变化且均布;弯管应力的这种变化和分布规律,与弯管的制造工艺无关;弯管制造工艺影响壁厚分布状态,则会改变弯管不同部位环向应力数值大小和随后一系列影响。

3.3.2 热煨弯管计算壁厚分析

1) 弯管环向应力与壁厚的计算均以母管或直管为基准,求解出弯管环向应力与壁厚变化的系数,进而得出弯管环向应力和壁厚值,这些增大或减小的变化系数在不同的标准或文献中给出了大同小异的公式和名称,本文分别定为环向应力增强系数和缩减系数^[16-17]、壁厚

增大系数和减小系数。

2) 弯管相对于母管/直管的环向应力增强系数和缩减系数,以及变壁厚弯管壁厚增大和减小系数均有公式确定,这些系数是弯管弯曲半径 R 和弯管外直径 D 之比的函数^[17]。因此,弯管任意位置的环向应力值和壁厚值均可用公式计算确定,但一般在弯管设计时仅需要确定极端位置即弯管内弧侧和外弧侧环向应力与壁厚。

3) 等壁厚弯管。原料板经加热压制组焊工艺制成的弯管横截面是等壁厚,决定壁厚值的弯管危险部位是内弧侧,内弧侧的环向应力最大,该部位的弯管计算壁厚应是直管壁厚与壁厚增大系数乘积^[15],有的油气输送管道设计规范规定用这样的公式计算弯管计算壁厚。等壁厚弯管的名义壁厚应是计算壁厚与附加厚度之和,然后按钢板标准圆整到钢板公称厚度,附加厚度至少应包括原材料钢板进入加热炉氧化减薄量和腐蚀裕量(若为酸性天然气)。

4) 变壁厚弯管。感应加热弯制工艺制造的弯管横截面是变壁厚,即弯管不同部位的壁厚不同值,属于变壁厚弯管。虽然弯管在介质内压作用下内弧侧环向应力增大,外弧侧环向应力减小,但由于弯制过程中的母管壁厚变化,环向应力增大的内弧侧壁厚也增大,环向应力减小的外弧侧壁厚也减小,综合的结果则是变壁厚弯管的内弧侧环向应力比外弧侧环向应力略大一点,但相差甚微,变壁厚弯管内外弧侧环向应力值均有公式计算确定^[15],基本与母管环向应力等值。

变壁厚弯管强度条件下的危险部位并不是完全按照环向应力值决定,而是综合考虑弯管在弯制工艺下造成的弯管圆度偏差导致的附加弯曲应力,并经弯管水压爆破试验多次证实(见后述),危险部位在外弧侧^[15]。变壁厚弯管外弧侧计算壁厚公式即是直管计算壁厚公式^[18],有的油气输送管道工程设计规范即是采用变壁厚弯管计算壁厚公式决定母管计算壁厚。变壁厚弯管名义壁厚应是计算壁厚与附加厚度之和,然后按钢管标准圆整到钢管公称壁厚,附加厚度至少应包括壁厚拉伸减薄量和腐蚀裕量(若为酸性天然气)。

5) ASME B31.3—2010《工艺管道》(以下简称 ASME B31.3—2010)对热煨弯管计算壁厚的规定。弯管在输送管道、工艺管道和能量传递管道如动力管道等工程中应用广泛,不同类型的压力管道虽然功能不同,但弯管的结构型式和应力分析相同,不同类型压力管道规范对弯管计算壁厚的规定是可以借鉴的;ASME B31.3—2010对弯管最小壁厚(最小壁厚系该规范用词,即计算壁厚)明确规定采用直管壁厚计算公式与考虑弯管内弧侧,外弧侧环向应力增强和缩减系数的壁厚计算公式确定^[18];该规范的规定也经过了修订,此前 ASME B31.3 规定弯

管最小壁厚仅采用直管壁厚公式计算确定^[19],后考虑到采用钢板压制组焊工艺制造的等壁厚弯管结构环向应力分布与壁厚之间的强度协调关系,将弯管最小壁厚公式补充修改成了 ASME B 31.3—2010 的规定^[16]。

6) 感应加热弯管水压爆破试验启裂口位置是变壁厚弯管确定环向应力危险部位的实验证据,根据笔者参与或查阅资料了解,感应加热弯管水压爆破试验启裂口位置影响因素较多,但主要因素仍是强度失效破裂,启裂口位置大致可归纳为三种:一是在弯管外弧侧或中性面附近;二是发生在弯管直段上;三是达到计算爆破压力后,弯管未发生破裂,试验结果符合感应加热弯管标准规定,但均无启裂口发生在弯管内弧侧的实例。

3.4 油气输送管道设计规范热煨弯管壁厚计算修改建议

3.4.1 设计规范弯管壁厚计算存在的问题

1) 未规定弯管壁厚计算公式适用条件,规范中弯管壁厚计算公式均不能适用于热煨弯管所有结构型式,在某些条件下应用,可能出现弯管壁厚偏大而过于安全或弯管壁厚偏小而不满足强度条件要求的情况,存在潜在的安全风险。

2) 弯管壁厚计算公式中的弯管名词用语不规范,不符合同一规范的术语规定。

3) 没有明确规定热煨弯管名义壁厚应如何确定。

上述问题导致油气输送管道工程热煨弯管设计在技术上不统一,且存在技术上不合理、经济上浪费的问题。

3.4.2 规范修改建议

1) 针对同类规范对热煨弯管壁厚计算有不同规定的现状,在规范修改前宜召开技术会议,论证弯管结构及其应力分析与壁厚计算等技术问题,为规范条文确定理论基础。

2) 补充热煨弯管各种壁厚的定义。

3) 明确热煨弯管壁厚计算公式的适用条件。

4) 明确规定热煨弯管计算壁厚与名义壁厚计算公式和设计步骤,可以参考 GB/T 150—2011《压力容器》关于内压圆筒计算厚度与名义厚度规定的做法,以提升规范的严谨性及方便设计人员对热煨弯管壁厚的设计计算。

4 双壁厚弯管理论依据与结构及制造工艺

4.1 理论依据

在油气输送管道介质内压作用下,热煨弯管横截面上的环向应力相对于母管/直管环向应力均布状态改变为非均布状态,外弧侧环向应力减小,内弧侧环向应力增大,中性面环向应力不变,与母管/直管环向应力相同;弯管环向应力减小或增大的分界面位于中性面,在热煨弯管内外弧侧的极端位置是环向应力减小或增大的最大值位置^[15],根据前述,等壁厚弯管危险部位在内

弧侧极端位置,其计算壁厚按该位置环向应力值确定,显然这样计算壁厚对于环向应力减小的外弧侧,从强度条件来判定是浪费,根据外弧侧环向应力分布状态,环向应力减小最少的部位是在临近中性面的位置,在中性面环向应力减小值为0,所以可将外弧侧的计算壁厚取为直管计算壁厚,从强度条件判定是安全的。这样形成了由两种厚度构成的双壁厚弯管,内弧侧计算壁厚按直管计算壁厚与壁厚增大系数乘积确定,外弧侧计算壁厚按直管计算壁厚确定,两种壁厚分界面位于中性面。

双壁厚弯管虽然由两种壁厚构成,但内弧侧和外弧侧壁厚分别是不同厚度的等壁厚,应属于等壁厚弯管类型,环向应力与壁厚的计算均应按等壁厚弯管确定。

4.2 结构与制造工艺

4.2.1 结构

双壁厚弯管结构是由内弧侧和外弧侧两瓣在中性面位置组焊构成。两瓣材质应为相同钢板,结构除应符合理论依据的要求外,还应考虑弯管制造工艺各种因素影响和弯管现场施工组焊的要求。

为方便管道现场施工组焊的对口质量要求,双壁厚弯管两端应带有一定长度的直段钢管,与弯管在弯管制造单位对焊后再作为弯管产品出厂。直段钢管材质和壁厚与线路钢管的材质与壁厚相同。

4.2.2 制造工艺的构思

双壁厚弯管结构与材质均与制造工艺相关,并受其影响。双壁厚弯管制造工艺方案是将两种厚度的钢板采用传统的划线下料、加热压制组焊工艺制造弯管,制造工艺中的重要环节是钢板选材,加热压制和纵缝组焊。由于弯管内外侧两瓣壁厚不同,应以外径为基准,弯管外表面对齐,壁厚较厚的内弧侧半圆4个侧面端部壁厚均应削边,与弯管外弧侧半圆壁厚齐平。与钢板加热压制成形、组焊焊接、热处理工艺相关的装备和工装模具以及制造工艺参数等,均需试验取得成功数据并逐步改进再确定。

4.3 分析思考

4.3.1 技术经济意义

双壁厚弯管依据应力分析理论在结构上可行,但能否成为一种新型弯管结构用于管道工程上,有待于试验研究和工程上技术经济的实践检验,关键在于实用价值和制造工艺的效率,目前思考该结构热煨弯管技术经济意义是:弯管在介质内压作用下的环向应力分布和壁厚在技术上既安全,又更趋合理。

弯管材料用量因外弧侧壁厚减薄而减少,起到节省材料和工程投资的作用,还可以减少管道施工现场环焊缝焊接工程量。对于高压大口径长输管道工程用弯管,其原材料可以采用管线钢板而省去卷管费用,可以通过

技术经济比较进行分析判断。

对于不宜采用感应加热弯制工艺的其他类型或其他金属压力管道弯管,双壁厚弯管减少材料用量或有一定的经济价值。

4.3.2 待探索的技术经济问题

双壁厚弯管作为一种新结构,虽然可以借鉴等壁厚弯管制造的成熟技术和经验,但是采用控轧控冷工艺生产的管线钢板制造弯管的技术较为生疏,有较多的技术经济问题和装备需要探索和试验研究,至少包括:控轧控冷工艺生产的管线钢板性能的适应性;适用于管线钢板划线下料、加热压制成形的工艺与装备研发及其经济性;双壁厚弯管经向焊缝焊接技术与焊材;综合技术经济评价等问题^[20]。

5 结论

1)输气管道工程设计规范是设计和选用感应加热弯管的依据,也是弯管产品标准编制的依据;弯管产品标准是规范弯管制造与保证弯管质量符合设计规范要求的标准。

2)感应加热弯管壁厚减薄率计算公式中母管壁厚应是实测的母管壁厚最小值,而不是母管名义壁厚。

3)输气管道工程线路与站场用热煨弯管,按其原材料和成形工艺划分为变壁厚弯管和等壁厚弯管两类,感应加热弯管属于变壁厚弯管,钢板加热压制成形组焊的弯管属于等壁厚弯管,它们共同点是均为双曲面回转壳体,承受介质内压后的应力状态和分析方法相同,但在原材料、成形工艺、弯管环向应力分布与横截面壁厚分布状态不同,弯管壁厚计算公式不同。建议相关油气输送管道设计规范修改热煨弯管壁厚计算公式与补充其适用条件,并明确规定热煨弯管壁厚设计计算要求和步骤。

4)双壁厚弯管是一种新结构热煨弯管,属于等壁厚弯管类型,应力分析与壁厚计算均是明确的,双壁厚弯管原材料钢板、成形工艺与工装设备、适用性、综合技术经济评价等问题还有待进一步探讨。

参考文献:

- [1] 上海市高等工业学校物理学编写组. 普通物理学(初稿)上册[M]. 上海:上海教育出版社,1959.
Physics Editorial Group of Shanghai Industrial School. General physics (1st volume) [M]. Shanghai: Shanghai Educational Publishing House, 1959.
- [2] 杨明洲,方家厚. 中频弯管技术的应用[J]. 锻压技术, 1988, 13(5):24-27.
YANG Mingzhou, FANG Jiahou. Application of medium frequency bending of pipe technology [J]. Forging &

- Stamping Technology, 1988, 13 (5): 24-27.
- [3] 国家能源局. 油气输送用钢制感应加热弯管: SY/T 5257—2012[S]. 北京: 石油工业出版社, 2013.
- National Energy Administration. Steel bends for oil and gas transmission: SY/T 5257—2012 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [4] 范钦珊. 压力容器的应力分析与强度设计[M]. 北京: 原子能出版社, 1979.
- FAN Qinsan. Stress analysis and strength design for pressure vessel [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1979.
- [5] 张有渝, 李平利, 袁勇, 等. 输气管道与工业管道技术上的区别和对策[J]. 天然气与石油, 2020, 38(2): 32-38.
- ZHANG Youyu, LI Pingli, YUAN Yong, et al. Technical differences and countermeasures between gas pipelines and industrial pipelines [J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38 (2): 32-38.
- [6] 张有渝. 四川输气管道弯管力学性能探讨[J]. 天然气与石油, 1999, 17(3): 1-4.
- ZHANG Youyu. Exploration on elbow mechanical properties of Sichuan gas pipeline [J]. Natural Gas and Oil, 1999, 17 (3): 1-4.
- [7] 张有渝, 曹润苍. 大口径长输管道用弯管的设计与制造[J]. 油气储运, 1996, 15(1): 48-51.
- ZHANG Youyu, CAO Runcang. Design and manufacture of bended pipe for large diameter and long distance pipe [J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 1996, 15 (1): 48-51.
- [8] 张有渝, 叶卫江. 陕京输气管道弯管与管件设计概况[J]. 天然气工业, 1998, 18(6): 86-87.
- ZHANG Youyu, YE Weijiang. Design of bended pipe and fittings of Shaanxi-Beijing natural gas pipeline [J]. Natural Gas Industry, 1998, 18 (6): 86-87.
- [9] 张有渝. 陕京输气管道弯管尺寸极限偏差探讨[J]. 油气储运, 1998, 17(6): 34-37.
- ZHANG Youyu. Discussion on the size deviation of Shaanxi-Beijing natural gas pipeline bended pipe [J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 1998, 17 (6): 34-37.
- [10] 张有渝. 陕京输气管道弯管力学性能[J]. 油气储运, 1999, 18(3): 35-37.
- ZHANG Youyu. Mechanical properties of Shaanxi-Beijing natural gas pipeline bended pipe [J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 1999, 18 (3): 35-37.
- [11] 中国石油天然气股份有限公司西气东输管道分公司. 西气东输管道工程用感应加热弯管技术条件: Q/SY XQ 16—2003[S]. 北京: 中国石油天然气股份有限公司西气东输管道分公司, 2003.
- West-East Natural Gas Pipeline Branch of PetroChina Company Limited. Technical conditions for induction heating bent pipes of West-East natural gas pipeline: Q/SY XQ 16—2003 [S]. Beijing: West-East Natural Gas Pipeline Branch of PetroChina Company Limited, 2003.
- [12] ISO. Petroleum and natural gas industries-Induction bends, fittings and flanges for pipeline transportation systems-Part1: Induction bends: ISO 15590-1: 2001 [S]. Oslo: ISO, 2001.
- [13] 石油管材专业标准化委员会. 油气输送用钢制弯管: SY/T 5257—2004[S]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 15.
- TC355/SC9. Steel bend for oil and gas transmission: SY/T 5257—2004 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 15.
- [14] 李林业. 弯管管壁减薄量的计算[J]. 锻压机械, 1991, 6: 12-13.
- LI Linye. Calculation of bended pipe wall thickness reduction [J]. Forging & Stamping machinery, 1991, 6: 12-13.
- [15] 李之光, 蒋智翔. 锅炉受压元件强度标准分析[M]. 北京: 技术标准出版社, 1980.
- LI Zhiguang, JIANG Zhixiang. Analysis on the strength standardization of boiler pressure part [M]. Beijing: Technique Standardization Press, 1980.
- [16] 查尔斯·贝赫特IV. 工艺管道 ASME B31.3 实用指南[M]. 陈登丰, 秦叔经, 丁伯民, 等, 译. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- CHARLES B. Process Piping: The complete guide to ASME B31.3 [M]. CHEN Dengfeng, QIN Shujing, DING Bomin, et al, trans. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [17] 潘家华, 郭光臣, 高锡祺. 油罐及管道强度设计[M]. 北京: 石油工业出版社, 1986.
- PAN Jiahua, GUO Guangchen, GAO Xiqi. Strength design of oil tank and pipe [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1986.
- [19] 唐永进. 压力管道应力分析[M]. 北京: 中国石化出版社, 2003.
- TANG Yongjin. Stress analysis of pressured pipe [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2003.
- [18] ASME. 工艺管道: ASME B31.3—2010[S]. 北京: 中国石化出版社, 2010.
- ASME. Process piping: ASME B31.3—2010 [S]. Beijing: China Petrochemical Press, 2010.
- [20] 刘迎来, 李平全. 感应加热弯管的生产技术现状与发展[C]//中国石油天然气集团公司管材研究所石油管力学和环境行为重点实验室. 石油管工程应用基础研究论文集. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- LIU Yinglai, LI Pingquan. Technique status and development for induction heating bent pipe production [C]//Key Laboratory of Petroleum Tube Mechanics and Environmental Behavior, Research Institute of CNPC Pipeline and Pipe Materials. Proceedings of basic research on oil pipe engineering application. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.