

铁素体不锈钢弯管产品制造工艺分析

蒋燕刚
(锦州美联桥汽车部件有限公司 辽宁 锦州 121013)

摘要: 无镍、耐腐蚀性更好、耐更高温度的 4 系列铁素体不锈钢逐渐应用汽车、船舶、石油、化工等行业, 为保证产品可可靠性, 本文根据铁素体不锈钢的特点, 主要论述了弯管产品制造工艺的关键控制点及制造工艺方案。
关键词: 铁素体不锈钢; 弯管; 制造工艺

在汽车行业, 3 系列奥氏体不锈钢焊管被广泛用于废汽再循环的进、排气管路系统中, 随着更加恶劣的应用工况及寿命要求日益提高, 无镍的 4 系列铁素体不锈钢逐渐开始应用于各管路系统的设计与制造中, 且同时要求控制一定的材料成本, 而 4 系不锈钢正好符合这一要求。由于铁素体在行业应用较少, 且具有一定的制造难度, 本文根据实际工作经验, 从化学成份、物理性能、应用工况方面分析、论述了铁素体不锈钢弯管产品的制造工艺开发的难点、关键要求及控制点, 希望能从制造方面为研究者提供一些技术参考。

1 成份、性能、应用工况对比及难点分析

3 系不锈钢焊管已广泛应用于产品的弯管制造, 尤其是 304 不锈钢焊管, 其制造工艺成熟, 产品质量稳定, 已广泛应用于汽车管路系统中, 因此将 4 系铁素体不锈钢 (444) 和 3 系奥氏体不锈钢 (304) 进行化学成份、机械性能、应用工况进行综合对比, 找出铁素体的特点, 分析出其制造难点, 制定合理的制造工艺开发方案, 参见表 1、表 2。

铁素体弯管制造工艺难点 (见图 1)。

- (1) 含碳量较低, 焊接性能较差, 扩口率较低, 焊缝易开裂, 焊接过程稳定性较差。
- (2) 硬度相对较高, 模具相对易磨损。
- (3) 延伸率较低, 弯管过程壁厚减薄量较大, 容易断裂。
- (4) 几乎不含镍, 相对奥氏体不锈钢, 制造过程容易生锈。铁素体不锈钢易生锈原因:
 - (1) 裸露在腐蚀环境中的金属表面发生电化反应或化学反

应, 受到腐蚀。

(2) 焊接时, 高温破坏了表面氧化膜 (富铬氧化膜), 且焊缝区域粗糙度缺陷, 耐腐蚀能力大幅降低。

(3) 几乎不含镍, 耐腐蚀能力下降。

(4) 在潮湿环境或表面有水 (氯离子)、湿气、酸、碱、盐及其它有机物质等造成表面腐蚀生锈, 比如电化学反应。

(5) 表面遭到破坏, 空气或液体中氧原子就会不断渗入或金属中铁原子不断地析离出来, 形成疏松的氧化铁, 金属表面也就受到不断地锈蚀。

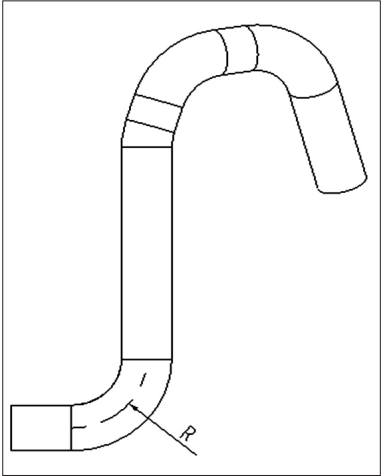


图 1 铁素体弯管制造工艺难点示意

2 制造工艺方案

2.1 焊管原料性能要求

- (1) 钨极氩弧焊管后固溶热处理, 要求达到最优延伸率 35% 左右。
- 参照焊管退火标准温度, 制定核心工艺参数: 加热温度、保温时间、冷却方式、冷却速度、根据 DOE (试验设计法) 方法, 根据具体的热处理设备, 从多组验证参数中, 根据检测结果, 分析、确认并锁定工艺最优热处理参数。

固溶热处理时, 相对 3 系不锈钢, 更容易氧化, 出现变色, 影响产品外观, 应做好相应的保护或酸洗处理。

(2) 扩口率要求 $\geq 30\%$, 通过调整焊接相应电流、焊接速度、钢带对接间隙、钨极高度、钨极角度、焊接高度、焊缝熔深等参数来保证良好焊接性能, 并通过过程参数检测及控制来实现批产的性能稳定。

(3) 焊管防锈、包装要求: 焊接轧辊、冷却过程禁止直接与水接触, 包装运输过程做好防锈, 并注意淋雨防护。

2.2 弯管工艺开发

2.2.1 弯管延伸率计算

表 1 不锈钢化学成份 (单位 %, 未标注范围为最大值)

牌号	焊管标准	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
TP304	ASTMA269	0.08	1	2	0.045	0.03	18-20	8-11	-	-
TP444	JISG4305	0.025	1	1	0.04	0.03	17.5~19.5	1	1.75~2.5	0.035

表 2 不锈钢物理性能和应用工况

牌号	σ_b MPa	σ_s MPa	δ %	扩口 率 %	硬度 HBW	固溶 温度 $^{\circ}\text{C}$	应用工况
TP304	515-1035	≥ 205	≥ 40	≥ 30	≤ 201	1000-1100 $^{\circ}\text{C}$	良好的耐蚀性、耐热性, 低温强度和机械特性; 冲压、弯曲等加工性好
SUS444	≥ 415	≥ 275	≥ 20	≥ 20	≤ 217	700 $^{\circ}\text{C}$ 以上	导热性好, 易于散热。热膨胀少, 焊接变形小。优异的耐氯离子应力腐蚀开裂。

按照弯管中性层不变化原则, 计算外侧弯管拉伸长度。

中性层: 弯曲半径 R 所在的管件中间层面

计算公式: 外侧弧长度 $L = \pi \times 2(R+d/2) \times \text{角度} / 360$

π : 圆周率, R : 弯曲半径, d : 管材直径, 角度: 弯曲角度。

弯管延伸率 = (外侧弧长度 - 中性层弧长度) / 中性层弧长度 $\times 100\%$

2.2.2 断裂或减薄分析

结合管材壁厚、弯管延伸率计算值和最优延伸率 35% 对比, 分析弯管减薄和断裂的风险, 并根据分析结果选取不同的弯管工艺方案, 详见弯管工艺方案。

2.2.3 弯管工艺方案

1、轮模; 2、夹模; 3、导模; 4、芯棒; 5、尾推块; 6、防皱板

弯管过程见图 2。在夹模和轮模的共同作用下, 将管件夹持, 芯棒插入管件内, 在导模和防皱板的压紧下, 导模随管件的弯曲共同围绕轮模转动, 完成弯曲功能。其中, 各部分主要功能如下:

轮模: 核心部件, 管件弯曲旋转中心, 配合夹模夹紧管件。

夹模: 起着夹紧管件的作用。

导模: 配合防皱板, 压紧管件, 在管件弯曲时起着辅助、随动作用。

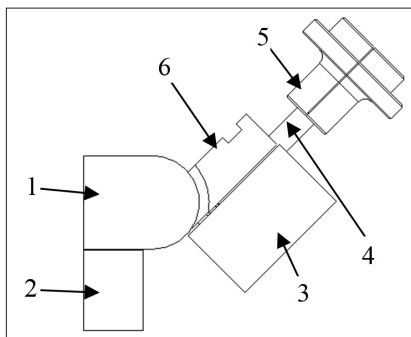


图 2 弯管过程示意图

芯棒: 在弯曲过程中起着内支撑作用, 防止管件变形和塌陷。

尾推: 夹紧管件, 起着旋转管件和助助推作用。

防皱板: 主要作用是防止弯曲过程产生褶皱。

① 如果计算结果弯管理论外侧伸长率大于 30%, 甚至接近 35%, 必须考虑断裂风险, 并采取减薄控制, 增加弯管尾推功能, 通过尾端控制材料流动来减少弯曲减薄量, 当然, 根本解决更应更改产品设计参数

② 如果计算结果弯管理论外侧伸长率小于 30%, 可不考虑断裂风险, 过程进行减薄量控制即可, 无需增加尾推功能。

2.2.4 弯管模具硬度控制

由于铁素体焊管硬度相对较高, 在弯管过程中, 模具磨损较快, 根据产品开发的交付需求情况, 模具淬火硬度至少 55HRC 以上, 材料至少是模具钢, 或更好的耐磨模具材料。

2.2.5 弯管过程速度

弯曲速度过快, 会增加管壁减薄量, 速度过慢, 生产效率降低, 经济效益降低, 要根据实际情况, 调整相应的弯管程度参数, 选用合适参数。

2.2.6 加大拉伸油的使用量

铁体焊管较硬度, 弯曲过程对芯棒磨损更加严重, 应加大拉伸油的使用量, 从而加大润滑效果, 减少摩擦力, 增加冷却效果, 提升模具使用寿命。

2.2.7 弯管焊缝位置控制

通过上料时焊缝位置摆放或自动焊缝识别功能, 确保整个弯管过程焊缝位于弯曲的侧面, 从而控制弯曲时的焊缝受力情况, 降低焊缝开裂风险。

2.2.8 弯管过程

上料、焊缝位置控制、自动弯管、自动注油、弯管结束, 取料。

2.2.9 减薄量过程控制

由于减薄量检测属于破坏检测, 因此采用批次开工首检和过程参数控制相结合的方式。

2.3 过程防锈工艺开发

2.3.1 模具、检具防锈

合理选用模具材料, 确保在生产过程中模具不生锈, 要选用不易生产锈的模具材料, 严禁与易生产的模具、检具接触, 优先考虑非金属材料, 比如尼龙等。模具入库保管时要进行除锈、抹油的防锈保养, 且不能存放于阴暗、潮湿的地方, 做好模具的防锈管理。

2.3.2 生产过程防锈

生产过程中, 不能使用任何自来水或纯水来替代切削液。过程半成品需在当天内进行周转, 并在两天内完成生产, 转为清洗、烘干状态的成品, 并完成包装。

2.3.3 包装防锈

产品包装时, 在放入包装纸箱之前, 需使用送料袋进行防潮防护, 并进行密封袋口。

尤其是夏季, 必要时可放置干燥剂。整个包装托盘外层需缠绕塑料薄膜, 防止运输过程产品受潮或淋雨生锈。

2.3.4 库存防锈

库房存放点应干燥、通风, 禁止存放于潮湿或清洗区域旁边, 防止潮湿空气造成生锈。

3 铁素体不锈钢应用前景

近几年, 随着应用温度和耐腐蚀能力要求的不断提高, 以及低成本的苛刻要求, 铁素体不锈钢的性能优势脱颖而出, 其焊管的应用市场越来越大, 呈快速上升趋势, 不断被用于汽车、空调、船舶、海水淡化、石油、化工等行业。

市场的需求拉动了从冶炼、轧制到焊管的供应技术发展, 其中焊管目前正处于发展前期, 其技术还不够成熟, 还无法完全满足应用需求, 存在着巨大的发展空间, 正带动着一批企业、技术人员去研究、去探索。铁素体不锈钢技术成熟后, 在低成本的应用推动下, 必将带来巨大的经济效益, 并将迅速在不锈钢领域占领一席之地, 是一个很好的研究、应用课题。

4 结语

铁素体不锈钢目前在国内市场上应用相对较好, 焊接技术还处于初级阶段, 直接影响着产品的生产制造, 过程管控稍不注意, 将带来直接的经济损失, 在应用于优异的性能更高的必价比时, 需要清楚的认识这一点。相对于 3 系常规不锈钢有着优越的耐高温和耐腐蚀性, 但由

(下转第 41 页)

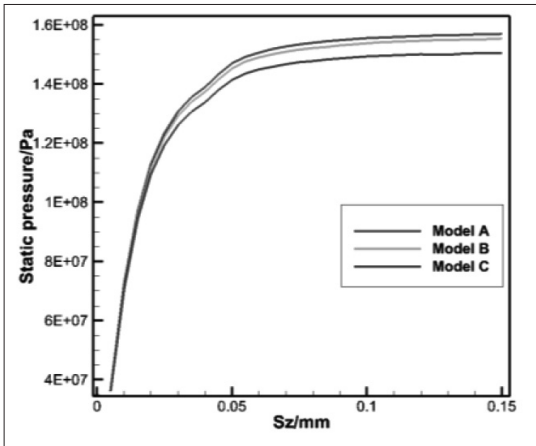


图 10 点 Q 静压分布

下,针阀开启初期,模型 A、B、C 稳压段静压值均有骤降趋势,然后模型 A 和 B 的静压呈逐步上升的趋势,随后模型 A 和 B 静压维持稳定状态,而模型 C 骤降后保持短暂的平缓后静压持续下降。

如图 10 所示,模型 A、B、C 铣扁区域流道尺寸越小,压力室静压值越低。同一铣扁尺寸下,随着针阀开度的增加,静压值先呈平滑上升的趋势,然后慢慢趋于稳定。

2.3 针阀铣扁尺寸对针阀纵向受力的影响

为探究针阀铣扁尺寸对针阀纵向(z 向)受力的影响,选取针阀 z 向受力不为零的面,如图 11 中填充面所示。针阀开启过程中,模型 A、B、C 针阀纵向受力值计算结果如图 12 所示,从图中可以看出,模型 A、B、C 随着针阀开启高度的增加,针阀所受纵向分力呈逐渐上升的趋势,力值增加先快后缓。比较各模型总体受力值大小可以看出,模型 A 最大,模型 B 次之,模型 C 最小。

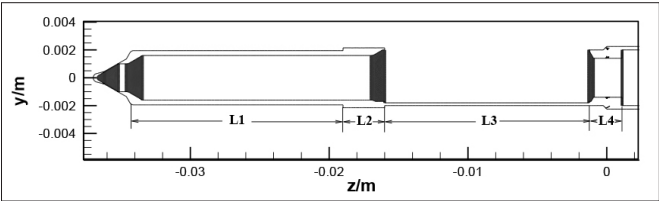


图 11 针阀受力面位置

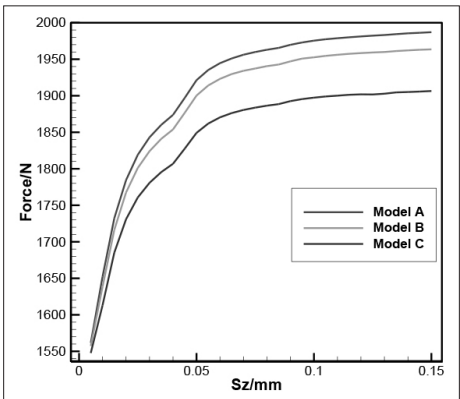


图 12 针阀纵向受力值

3 结语

综合上述分析,可以得出如下结论。

- (1) 针阀升程不同时,针阀铣扁区域尺寸对其上方流场静压值无影响;针阀升程不同时,针阀铣扁区域尺寸对其下方流场静压值不同,将其下方流场分为四部分,每部分的静压分布规律也有所不同,针阀铣扁区域尺寸越小,随着针阀的开启,铣扁区及其下方流场静压值越小。
- (2) 针阀升程相同时,随着铣扁区流道截面减小,压段静压值依次减小;同一铣扁尺寸时,针阀开启初期,稳压段静压值先骤降,然后上升,随后趋于稳定,截面较小的静压下降;铣扁区流道尺寸越小,压力室静压值越低。同一铣扁尺寸时,随着针阀开度增加,静压值先增加,然后趋于稳定。
- (3) 随着针阀开启高度的增加,针阀所受纵向分力呈逐渐上升的趋势,力值增加先快后缓。比较各模型总体受力值大小可以看出,铣扁区流道截面越小,针阀所受竖直分力越小。

参考文献:

[1] 易浩. 针阀式喷油器失效因素研究 [D]. 重庆理工大学, 2019.

[2] 杜善刚, 王承禹, 赵曦. 针阀导向面直径对喷油器宏观特性的影响 [J]. 内燃机与配件, 2013(05):3-5.

(上接第 38 页)

于其无镍(少镍),焊接性能差,焊缝易开裂,易生锈等特点,批产开发时不能按照常规 3 系不锈钢的开发方案进行,开发过程必须高度重视,用细致、认真的态度做好每个工序的相应预防措施。在进行制造工艺开发过程中必须从焊管原料开始控,充分做好人、机、料、法、环、测,重点做好弯管工序伸长率分析和解决方案,严格控制过程防锈,才能确保过程稳定、制造出合格的批量产品。根据实际工作中的一些经历,本文仅从铁素体焊管到弯管应用工艺制造方面进行了分析,相对于整个铁素体不锈钢领域,这只是其中的一个制造实例,希望能为业内提供参考。

参考文献:

[1] 杨晓禹,田一清,毛红奎,等. 热处理工艺对双相不锈钢 S32101 焊接接头力学性能与微观组织的影响 [J]. 热加工工艺, 2020(21).

[2] 黄安琪,李雪峰,高灵清,等. 2205 双相不锈钢晶间腐蚀试验开裂原因分析 [J]. 材料开发与应用, 2019(05).

[3] 查小琴,任永峰,黑鹏辉,等. 双相不锈钢焊接性问题原因及控制 [J]. 材料开发与应用, 2019(05).

作者简介: 蒋燕刚 (1979.12-),男,汉族,陕西商洛人,工程师,研究方向:汽车 EGR 不锈钢管路的零件制造、总成装配、焊接等工艺开发。