

镍-钢复合板设备焊接裂纹及优化工艺

阮鑫¹, 张利锋¹, 王成君², 朱朝鱼², 哈健牛², 苑三思²

(1.河北化工医药职业技术学院, 河北石家庄 050031; 2.河北特种装备安装工程公司, 河北石家庄 050031)

摘要: 结合近几年现场试验与施工实践, 分析研究了镍-钢复合板设备、性能、焊接裂纹及其产生原因, 以及防止消除其缺陷、优化制造施焊质量的工艺措施。为提高焊接一次合格率及返修成功率, 总结出1套优化工艺方案。

关键词: 镍-钢复合板; 特点性能; 焊接裂纹; 优化工艺

中图分类号: TG457 **文献标识码:** B

1 概述

在化学工程的设备制造安装中, 镍-钢复合板由于成本低廉、耐腐蚀性好而得到越来越多的应用。但由于在焊接施工中受地区、季节、保护条件等环境的影响, 常易出现质量问题。在众多的焊接缺陷中, 焊接裂纹危害性最大, 且占一定的比例(返修难度亦较大)。由于有些设备需运到施工现场进行组对焊接, 其焊缝相对较多, 焊缝集中, 加之卷制与现场组对焊接产生的多向应力, 致使焊缝的裂纹问题甚为突出, 施工环境越差, 钢板厚度越大, 焊接裂纹的敏感性就越大。由于镍与钢具有不同的焊接性能, 其物理化学性能(如热膨胀系数)差异较大, 因此焊接时易产生冷、热裂纹等缺陷。焊接时, 如果基层的碳溶入复层中太多, 会降低复层的耐腐蚀性。因此, 如何保证焊接时不产生焊接裂纹, 同时确保复层的耐腐蚀性成为镍-钢复合板焊接的关键技术问题。

2 焊接裂纹及其形成机理研究

2.1 镍-钢复合板主要性能分析

镍在某些介质中耐腐蚀性非常好, 例如, 镍对碱类介质的耐腐蚀性很强, 对酸性和碱性的有机化合物的耐腐蚀性也很强, 但对亚硫酸、盐酸特别是硝酸的耐腐蚀性较差。镍具有较高的熔点(1455℃)、一定的强度和良好的塑性及加工性能。

镍经过合金化后, 具有良好的耐腐蚀性、耐热性和较高的电阻等特性。因此镍及镍合金既可用于耐热材料, 也可(大部分)作为化学工业的耐腐蚀材料使用。镍和钢可无限固溶, 焊接时, 如果基层的碳溶入复层镍中太多, 会降低复层的耐腐蚀性, 复层的镍元素溶入基层碳钢中太多, 又会使其材质变脆, 焊后易出现裂纹(尤其存在一定的应力时)。

镍与其他金属元素形成合金后, 力学性能和耐腐蚀、抗氧

化性能显著改善, 但热导率和电导率下降。

2.2 焊接裂纹及形成机理探讨

(1) 常见裂纹及其产生原因

设备复层所用的工业纯镍为单相奥氏体组织, 液态凝固过程中不发生相变, 极易与某些元素形成低熔点共晶体, 从而导致热裂纹。裂纹主要为凝固裂纹和多边化裂纹。晶间液膜是引发焊缝凝固裂纹的主要因素。高温时纯镍极易与S, P, B, Pb等元素形成低熔点共晶体(硫化镍为645℃, 磷化镍为880℃), 这些低熔点组织以液态膜的形式残留于晶界区, 在收缩应力的作用下发生开裂。另外, 焊接过程是一个不平衡的冶金过程, 因而易形成大量的空位、位错等晶格缺陷。随着结晶过程的进行, 这些空位、位错逐渐合并、集聚、扩大, 最后形成多边化晶界, 在一定的应力作用下, 很容易形成多边化裂纹。纯镍材料的热导率低、电阻系数大, 焊缝和热影响区有过热倾向。若焊接参数及工艺不合理, 施焊时易促使粗大晶粒的产生。纯镍材料的晶粒一旦粗化后, 很难用热处理的方法来消除。焊接过程中, 应尽量减小焊缝的热输入, 同时向熔池中添加足量的Al, Ti等细化晶粒的合金元素, 可防止纯镍焊接的晶粒粗化。

(2) 弧波裂纹及其形成机理探索

焊缝弧波裂纹发展到一定程度即为弧波断裂。总的来看, 它是由于材料经过多次大幅不均匀加热与冷却的热循环剧烈变化波动作用, 引发并促成此类裂纹的产生。

这是近年来通过多次的镍材设备、管道焊接试验、操作实践和观察探索发现的一种新裂纹(不属于常见金属焊接裂纹, 如热裂纹、冷裂纹、再热裂纹、应力腐蚀裂纹与层状撕裂裂纹等类型范畴, 其囊括的范围更广)。它多发生在厚壁设备、管道的多层多道焊焊缝区域上(主要在熔合区附近)或焊缝修补之处。其特征是: 裂纹区域材质性能发生变化(尤其是塑性、韧性降低), 晶粒松弛, 晶格扭曲, 有局部硬化现象。有时裂纹旁边伴有若干更细微裂纹。它的产生滞后性强, 其隐蔽性、

危害性比其他类型裂纹更大(多数如此,尤其材料到了危险的临界或近临界状态时,温度稍有变化即刻开裂)。形成机理目前仍在研究之中。

笔者认为,由于镍材焊缝处多次反复加热与冷却,一是应力不断扩张、收缩,致使焊缝疲劳开裂;二是加热过程中晶粒不断长大(有时连续有时断续,但多为波段式、脉冲式变化),从而使显著长大的粗化晶粒间松弛、脆弱;加之焊缝处经若干次快速冷却,低熔共晶物逐渐析出、积聚、延伸,出现薄弱边缘而致裂。此外,焊缝的多次热循环及相变,促使杂质偏析且晶界处的数量增多,塑性及韧性下降亦极易开裂。总之,焊接弧波裂纹是若干因素综合作用的结果。消除其中的不利因素,对防止此类裂纹的产生都是有利的。由此可看出,它确实有别于常说的热疲劳裂纹,及早弄清其形成机理和防范措施,对于设备的安全施工与运行是十分迫切和必要的。

实际上,它常与其他几种破坏方式联合的相互作用,对设备造成严重损伤(有时是突然的致命性的事故)。仅从焊接工艺角度看,适度控制焊接的最高加热温度、加热速度、高温停留时间和冷却速度,以及尽量减少焊缝区的加热与冷却频率和次数,是必须注意的问题。镍-钢复合板设备在制造焊接过程中,对接焊时严禁采用大锯齿形及其相类似的横向摆动焊枪施焊法。

3 若干优化工艺措施

3.1 焊接方法的选用

根据复层纯镍的物理、化学性能和特点,现场多采用TIG焊。焊丝的正确选择是保证纯镍焊接质量的关键。为了保证焊缝与母材等强,原则上采用与母材化学成分相同的纯镍材料,一般要求焊丝中有害杂质越少越好。

氩气的纯度直接影响到纯镍焊缝的硬度和韧性,对焊接裂纹的产生也有明显影响。氩气的纯度低,其杂质的成分就多,尤其 H_2 的含量,如果含 H_2 在0.001 mL/L以上,相对湿度>5.0%,露点在-40℃以上,就容易在焊缝中引起脆化,产生裂纹。所以,要求纯镍焊接用的设备中,镍-钢复合板板材为N6/Q235A((3+12)mm),镍材选用的焊丝牌号为N48K4H(日本进口),各种化学性能及技术指标与N6材质接近,基层Q235A选用E4303焊条, $\phi 2.5\sim 3.2$ mm。复层焊接时,选用纯度不低于99.99%的氩气保护,钨极选用铈钨极,规格为 $\phi 2.0\sim 3.0$ mm。

3.2 主要焊接工艺及技术措施

(1) 焊接设备及其辅助器具 设备施焊前应进行评定,然后根据此焊接工艺评定在正式施焊前组织参加焊接的焊工进行适应性试验,以保证正式焊接中获得较好的质量。此外,焊接复层时需做好以下几方面工作:选用合适的钨极氩弧焊机,并最好带高频或高压引弧装置;施焊中严禁采用划擦引弧法;选

用精确的氩气流量计以控制气体流量;送气软管应用塑料管;复层所用清理工具只能用于镍,在使用前应清洗干净。

(2) 焊道层数的确定 在中、厚壁设备的焊接中,应采用多层焊,但根据多年试验和经验表明,层数过多易带来负面影响,主要是焊缝区受到焊接热循环作用次数过多易导致性能劣化,引发弧波裂纹。事实是,在保证材料晶粒度细小及应力较小的前提下,尽可能地减少焊道层数。对于镍-钢复合板设备,一般按下式选取焊道层数: $n=S/md$ (d 为焊丝或焊条直径,mm; S 为设备壁厚,mm;根据经验修正系数通常取 $m=0.8\sim 1.2$)。

(3) 坡口加工与清理 镍-钢复合板的坡口加工宜采用机械加工,加工面应光滑。亦可采用等离子弧切割,切割后,应用机械方法切除断面及热影响区的缺陷或裂纹,严禁将切割的熔渣落在复层上。采用等离子弧切割时,复层应朝上。加工完的坡口应进行外观检查,不得有裂纹和分层,否则应进行修补。

在切割过程中,不得使其过热而变色,在坡口内外表面不小于20 mm范围内用砂轮和不锈钢丝刷打磨出金属光泽,然后用刮刀修整坡口的毛刺和钝边,之后再打磨光滑,避免在清洗时挂丝。清洗质量的好坏会直接影响到焊接裂纹的产生,清洗不好时,会在母材及焊丝表面上生成一层灰白色的吸气层,导致焊接裂纹和气孔的产生,因此复层清洗时要注意以下几点:①先用 $w(HF)2\%\sim 4\%+w(HNO_3)30\%\sim 40\%$ 的酸洗液清洗,再用清水冲洗干净并吹干,临焊前用丙酮或酒精擦洗;②焊丝在酸洗后一般需要进行脱氢处理,焊前再用丙酮脱脂;③严禁使用氧化物脱脂;④清洗时不得戴橡皮手套,以免橡皮和脱脂溶剂发生反应使焊缝产生气孔;⑤清洗后的焊口必须立即焊接,不宜久放(不得超过4 h),否则需按前面步骤重新清洗。

(4) 焊接顺序与方案选择 从多次试验的结果可知,先焊基层,再焊过渡层,最后焊接复层,这样既可以避免复层重复受热,同时也可减少由于复层溶入碳钢而使其材质变脆,避免焊后产生裂纹。焊接基层时,不得将基层金属沉积在复层上。镍-钢复合板焊接质量的好坏,最关键的是过渡层的焊接。焊过渡层时,为了减少基层的碳钢部分金属溶入复层中,以保证焊缝金属的耐腐蚀性能不致降低,焊接过渡层应采用热源集中、温度高、热影响区窄的氩弧焊,这样有利于减小基层熔合比,以保证复层的耐腐蚀性。同时在焊接复层前,先在焊缝中靠近基层处用镍含量较高的焊丝焊接过渡层,避免基层的碳过多溶入复层中。在焊接过渡层时焊接热输入小一些为宜,以防止基层金属过量溶入过渡层中。

焊接操作过程中,焊丝与焊件之间的夹角一般为 $15^\circ\sim 20^\circ$,焊枪略向前倾斜,与工件间夹角为 $75^\circ\sim 85^\circ$,使氩气更多地保护熔池前受热的区域,焊枪移动要均匀,直线运枪,不作横向

摆动 (或小幅摆动)。

(5) 焊接工艺参数的确定 纯镍焊接时,既要防止焊缝在电弧热的作用下产生粗晶组织,又要避免在焊后冷却时被大气污染出现脆化组织,所以对施工环境、焊接区域内的保护至关重要。为保证保护效果,焊接时尽量采用大直径喷嘴,喷嘴与焊口距离适当缩小以加强保护,钨极伸出长宜短,以不妨碍看到熔池为限。氩气流量大小对保护效果有着相当大的影响,过大的流量不容易形成稳定的气流层,反而在保护区内形成紊流,使有害气体侵入熔池。另外,过大的气流使熔池冷却速度加快,焊缝表面易出现裂纹。过小的气流达不到保护效果,所以保护气的流量一定要适中。要在保证焊缝熔合良好的前提下,选择相匹配的焊接工艺参数,表1为某设备的焊接工艺参数。

表1 镍-钢复合板设备的焊接工艺参数

焊道、焊层	焊接方法	填充材料		焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /(cm·min ⁻¹)	氩气流量 /(L·min ⁻¹)
		牌号	直径/mm				
打底	SMAW	E4303	3.2	60~90	6~12	3~8	—
填充	SMAW	E4303	3.2	80~100	11~15	4~10	—
盖面	SMAW	E4303	3.2~4	90~120	12~18	5~12	—
过渡层	GTAW	Ni-1	2	80~100	10~20	4~10	12~18
复合层	GTAW	Ni-1	2	90~120	10~20	5~12	12~18

(6) 焊缝质量检验及缺陷返修 所焊设备焊缝表面应成形良好,不允许存在表面裂纹、未熔合、飞溅性熔渣及表面气孔等缺陷。焊缝处强度、咬边、错边量应控制在设计规定所允许的范围内。射线探伤在外观质量检验合格后进行,探伤结果按 JB 4730—1994规定进行评定。

在施工过程中,如发现焊缝保护不佳,应停止焊接。如产生裂纹,亦应即刻清除、返修,以免裂纹延伸,修补裂纹时要注意以下事项:①用着色方法检查出裂纹及其两终端,用合金钻头在终端处打止裂孔,将裂纹及其两侧用聚酯磨光片打磨,清除裂纹及其两侧表面氧化层。打磨应间断进行,以免局部区域温度升高而导致母材被污染。②再用着色法检查,确认裂纹彻底清除干净后,对止裂孔和打磨处进行清洗。③焊接方法和工艺参数与正式焊接时相同。④补焊时一定要控制层间温度,每一层焊完都必须进行必要的着色检查和清洗。

4 其它注意事项

(1) 设备组对时应以复合层为基准,以防错边量过大影响焊接质量,错边量通常应控制在 ± 1 mm以内,且长度不得超过该焊缝长度的5%。在装配过程中,严禁在复层表面引弧和在复层上焊接工卡具,如确实需要,只需加在基层钢板翼侧,并采用与基层钢板相同材料卡具,选用相同牌号的焊条。去除辅助板时,应防止损伤基层金属,焊接修补处应打磨光滑。

(2) 设备上安设人孔和接管时,应选用相应牌号的焊接材

料进行施焊,使接近的断面及焊缝应有4 mm堆焊层。焊接时,应根据评定结果编制的焊接工艺指导书及技术措施去施焊。

(3) 焊接环境应符合以下要求:环境温度不低于5℃。焊条电弧焊时,风速应 < 5 m/s;钨极氩弧焊时,风速应 < 5 m/s。空气相对湿度应 $< 80\%$ 。焊接场所应有防风、雨、雪的措施。焊接设备应处于完好状态,焊工使用的小型工具、劳保防护服应配备齐全、干燥清洁。

(4) 复层氩弧焊时应保持设备稳定,防止钨极与焊件或焊丝接触造成夹钨,当出现夹钨时,应消除缺陷后方可继续施焊。施焊时要严格控制焊后的冷却速度,通常为50~200℃/s。

(5) 各工序工作分工明确,落实到人。要合理安排和控制焊接质量、焊接检验与施工进度之间的关系,并及时反馈焊缝质量检验评定结果,对焊缝出现的缺陷认真查找原因,提出预防措施并予以谨慎修复。

(6) 焊工、检验人员均要严把质量关。每次施焊结束时,应及时关闭焊机电源,并检查操作场地,确认无火灾事故隐患后方可离开现场。

5 结论

在某工程中焊接了2台镍-钢复合板设备,按要求进行100%射线探伤,采用上述方法与技术取得良好效果(焊缝一次合格率为96.2%,其它裂纹等缺陷经返修一次后全部达到要求)。由此可见:①正确使用与母材匹配的焊接材料是防止产生各类裂纹的重要措施。另外,高纯度的氩气及合适的气体流量对获得良好焊缝外观质量,防止焊接裂纹等缺陷至关重要。②纯镍复层焊接前对坡口周围及焊丝表面进行严格的清洗,是不可或缺的工序,杜绝了有害气体侵入,防止产生气孔、裂纹等焊接缺陷。此外,合适的焊接热输入可避免晶粒粗大,减小裂纹倾向。③镍、钢复合板焊接一定要注意减少基层熔合比及保持过渡层的化学成分,从而保证焊缝的耐腐蚀性。

参考文献:

- [1] 朱方鸣. 化工机械制造技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [2] 张麦秋. 化工机械安装修理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [3] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册 (第2版 第2卷)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [4] 刘云龙. 焊工技师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [5] 邹广华, 刘强. 过程装备制造与检测[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [6] 魏康民. 机械制造技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [7] 曾乐. 现代焊接技术手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1993.
- [8] 冯兴奎. 过程设备焊接[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [9] 阮鑫, 任丽静, 王成君. 镍材设备焊接缺陷及质量控制[J]. 压力容器, 2005, 22(5): 32~34.