

对回火焊道标准化研究的几点思考

司佳鑫, 吕晓春, 安洪亮, 马一鸣, 靳彤

(哈尔滨焊接研究院有限公司, 哈尔滨 150028)

摘要: 依据 ASME 标准第 IX 卷、III 卷和 XI 卷和法国 RCC-M 标准第 IV 卷中关于回火焊道焊接技术的规定, 从工艺评定和实施应用两个方面对国外先进工业标准进行介绍。在此基础上结合国内外相关研究进行分析和总结, 可以发现国外先进工业标准中的条例有其合理性, 但是部分条例过于保守, 使得修复成本增加。此外, 回火焊道工艺评定中的变素均为对热循环条件产生影响的因素。为引进国外先进工业标准和促进国内回火焊道焊接技术的发展, 应当深入研究相关条例。

关键词: 回火焊道; 焊接修复; ASME 规范; RCC-M 规范

中图分类号: TG455

0 前言

核电设备因服役环境恶劣, 使得部件常在达到设计寿命前失效, 通常采用可避免使用焊后热处理的回火焊道焊接技术修复, 在国外已被广泛应用于核电设备受损部件的修复^[1-3]。美国机械工程师协会 (ASME) 于 2000 年将回火焊道焊接技术列入 ASME 标准中, 可按照第 IX 卷“焊接和钎焊评定标准”^[4]的要求进行工艺评定, 按照第 III 卷“核设备组件建造规则”^[5]的要求进行建造过程中的修复, 按照第 XI 卷“核电厂部件在役检查规则”^[6]的要求进行服役部件的修复, ASME 标准中关于回火焊道焊接技术的规定是其焊接方面的一个重要特色。近十几年来, ASME 标准每隔两年更新一次, 从不同版本来看, 回火焊道焊接技术还在一直更新发展。此外, 法国 RCC-M 第 IV 卷 S7600“焊接修复”^[7]中也将回火焊道焊接技术列入其中, 与 ASME 规范不同的是, RCC-M 中要求对服役设备进行应力分析。

文中依据 ASME 标准第 IX 卷、第 III 卷、第 XI 卷以及 RCC-M 标准第 IV 卷中关于回火焊道焊接技术的规定, 从工艺评定和实施应用中两个方面进行了介绍, 在此基础上结合国内外同行的相关研究成果对标准中的条例进行分析和总结, 如工艺评定中的变素、可修复缺陷的许可面积、焊材保存、焊前预热和焊后检测等, 为引进国外先进工业标准和促进国内回火焊道焊接技术的

发展提供参考。

1 回火焊道的工艺评定要求

1.1 第 IX 卷

ASME 第 IX 卷第 II 章“焊接工艺评定”QW-290 节从焊接工艺规程、焊接方法、焊接变素、试件准备和试验、返修焊等方面, 列出了评定回火焊道工艺应满足的要求。

首先依据焊缝类型对焊接工艺规程 (WPS) 进行基本工艺评定, 当通过焊缝评定并满足建造规范的其他要求后, 再进行回火焊道工艺评定; 各类型焊缝评定和回火焊道工艺评定可在同一个试件上进行; 对通过以上所有评定的工艺, 当一个或多个回火焊道的重要变素或补充重要变素改变时, 需要对改变的工艺重新评定。

规定回火焊道焊接仅限于 SMAW, GTAW, SAW, GMAW (包括 FCAW), LBW 和 PAW 方法, 而且除了单面坡口焊缝及 QW-290.6 中规定的返修焊缝, 禁止使用手工和半自动 GTAW 和 PAW 方法。当进行返修焊时, 手工和半自动 GTAW 或 PAW 方法的焊接工艺规程应基于自动 GTAW 或 PAW 的焊接工艺评定报告编制, 并按照 QW-300 的要求评定焊工, 此外, 需要证明焊工具有按照 WPS 参数熔敷完整焊缝的能力。评定不同焊接方法的回火焊道工艺时, 依据力学性能指标, 选择 QW-250 节和表 QW-290.4 中的重要变素、补充重要变素和非重要变素评定。

要求评定用试件的尺寸应能制备足够的力学性能试样, 形状可以是坡口焊缝、带缺陷的平板和熔敷层等,

收稿日期: 2018-08-21

doi: 10.12073/j.hj.20180821001

施焊时至少熔敷两层焊缝,熔深应满足取样要求,焊趾距试件相应侧边缘至少 76 mm。当硬度作为评定指标时,要求以维氏 10 kg 方法测量焊缝、HAZ 和母材的硬度,并根据接头类型指出了测量位置、间距及各区域测量点数;当韧性作为评定指标时,取样位置、试验温度和阈值应当由建造规范或设计规程提供;此外,应按照 QW-451 要求进行弯曲试验。

1.2 第Ⅲ卷和Ⅺ卷

尽管第Ⅸ卷对回火焊道工艺的评定进行了严格的要求,但实际应用时,为保证修复质量,第Ⅲ卷和第Ⅺ卷分别从建造和在役检查方面进一步提出了要求。

评定用母材与待修复部件应具有相同的 P No. 和 Group No. 号,第Ⅲ卷和第Ⅺ卷进一步对热处理状态进行了要求;第Ⅲ卷规定评定用母材的热处理时间和温度不应低于待修复母材;第Ⅺ卷规定,若对评定材料进行热处理时,热处理温度和时间不能超过待修复母材。

考虑到受损部件的服役环境,第Ⅲ卷规定,若修复区中子辐照大于 10^{19} nvt $E_0 > 1$ MeV 时,应控制焊缝金属 Cu 含量不大于 0.10%;第Ⅺ卷中指出若受损部件在压力环境中服役,评定过程也应在压力条件中进行;若修复区存在妨碍焊工操作的障碍时,第Ⅲ卷和Ⅺ卷均要求评定时应模拟实际条件施焊。

此外,第Ⅲ卷中规定的焊接方法为低氢型 FCAW, GMAW 和 SMAW,第Ⅺ卷中仅局限于冷丝自动 GTAW 和低氢型 SMAW,若评定用试件为板材,焊缝的轴向方向应平行于轧制方向;第Ⅲ卷和第Ⅺ卷中均要求进行冲击试验,以评定回火焊道工艺。

2 回火焊道的实施应用

2.1 建造过程中的修复

ASME 第Ⅲ卷 NB-4622.9“回火焊道焊接修复”中规定,对于已进行最终热处理的核 1 级部件中的缺陷,允许对其进行无需焊后热处理的修复。

NB-4622.9(a)对回火焊道工艺提出了基本要求。单个缺陷的许可修复表面积不能超过 $3\,230\text{ cm}^2$,修复深度不能超过母材厚度的 $1/3$ 。修复前,应对待焊区域进行磁粉检测或液体渗透检测;修复后,待焊缝冷至室温 48 h 后再进行最终无损检测。当采用 FCAW 和 GMAW 方法施焊时,除镍基合金 F-No. 43 或 A-No. 8 外,要求 FCAW 采用满足“H4”要求的低氢型焊丝,打开包装的焊丝超过 4 h 未使用,应当从送丝机拆下按要

求保存;当采用 SMAW 方法施焊时,焊条去除包装后,应当置于 $105\sim 175\text{ }^\circ\text{C}$ 保温;除镍基合金 F-No. 3 或 A-No. 8 外,焊条应当选用低氢型(H4)并满足湿度(R)要求,去除密封包装的焊条在大气中暴露时间超过规定时间时,应当报废,或按照要求重新烘焙以除去水分。采用 SMAW 或 FCAW 方法施焊时,对于 P-No. 1 材料焊缝修补后,焊缝区应在 $230\sim 290\text{ }^\circ\text{C}$ 温度下保温至少 2 h,对 P-No. 3 材料保温应至少 4 h。

NB-4622.9(b)对 P-No. 1 或 P-No. 3 母材与 A-No. 1,2,10,或 11 焊缝金属的修复进行了规定。要求对第二层(回火焊道层)进行磁粉或液体渗透检测;对焊缝及周围至少 100 mm 的母材进行无损检测前,需要打磨焊缝表面移除余高;此外,需要对修复区域进行超声检测。

NB-4622.9(c)对修复 P-No. 1 或 P-No. 3 母材表面的 P-No. 8 或 P-No. 43 熔敷层进行了规定。当缺陷去除后余下的焊缝金属距熔敷层/母材熔合线厚度大于 3 mm 时,可进行 SMAW 或 GTAW 方法修复;当熔敷层不足 3 mm 或不使用 SAMW 和 GTAW 工艺时,进行了如下补充规定:要求缺陷在母材内的深度不能超过 6 mm 或母材厚度的 10%(取小值),当缺陷深度超过此值时,对熔敷层修复前应先按照 NB-4622.9(b)修复母材。可使用 A-No. 8 焊材修复 P-No. 8 熔敷层,使用 F-No. 43 焊材修复 P-No. 8 或 P-No. 43 熔敷层。对于焊缝及周围至少 100 mm 范围内的区域,应采用液体渗透方法进行检测。

NB-4622.9(d)对异种材料对接焊缝的修复进行了规定,其中异种接头指堆焊 A-No. 8 或 F-No. 43 过渡层的 P-No. 1 或 P-No. 3 母材与奥氏体不锈钢或镍基母材的连接,接头如图 1 所示。当缺陷去除后,堆焊层/母材熔合线处 A-No. 8 或 F-No. 43 焊缝厚度仍大于 3 mm 时,可采用 SMAW 或 GTAW 方法修复;当 A-No. 8 或 F-No. 43 焊缝金属厚度不足 3 mm,或采用 SMAW 或 GTAW 之外的焊接方法时,进行了如下补充规定:要求缺陷深度不能超过接头厚度的一半;如果缺陷深入 P-No. 1 或 P-No. 3 母材,但轴向方向的修复深度不超过 10 mm 时,对母材的修复仍可按照修复异种材料的要求进行;当缺陷轴向方向的深度超过 10 mm 时,在修复 A-No. 8 或 F-No. 43 焊缝金属前,需按照 NB-4622.9(b)修复母材;当母材表面熔敷的焊缝超过 5 mm 时,应对熔敷金属进行一次除氢处理,之后直至修复完成前可不再进行除氢处理;对焊缝及周围至少 100 mm 范围内的母材进行液体渗透检测;修复过程中应进行射线检

测,如果可行,应进行超声检测;对于部分熔透焊缝,若射线检测和超声检测难以有效实施,当修补焊缝达到 5 mm 厚时,在除氢处理之后需要进行一次液体渗透检测,随后每熔敷 5 mm 厚焊缝均需要进行液体渗透检测,可不进行除氢处理;而当缺陷深度未超过 5 mm 时,修复完成后随即进行液体渗透检测。

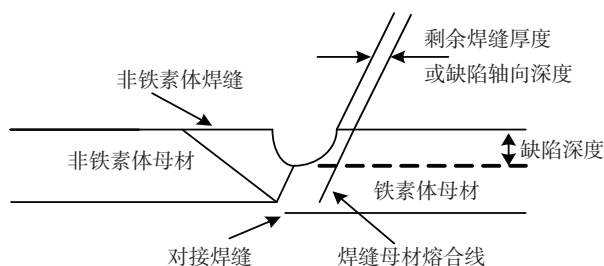


图1 建造过程异种接头修复示意图

2.2 在役检测部件的修复

ASME 第XI卷“核电厂部件在役检查规则”针对缺陷修复,在 IWA-4600 节将回火焊道焊接技术列为修复方法,指出应按照接头类型制定工艺。在 IWA-4610 节对回火焊道工艺提出了基本要求,主要包括温度监测、工艺评定和缺陷移除及检测等方面。

IWA-4620 对 P-Nos. 1 和 P-Nos. 3 母材及同种焊缝缺陷的修复工艺进行了规定,单个缺陷修补后焊缝的表面积不能超过 $325\,000\text{ mm}^2$,焊缝深度不大于母材厚度的一半,如图 2 所示。修复过程中,可利用喷丸控制焊缝和 HAZ 变形;对最后一道焊缝进行表面检测后,可利用喷丸降低表面残余应力,但应再次检测表面。采用 SMAW 方法修复时,应选用满足低氢型(H4)和湿度(R)要求的焊条,焊条使用之前应处于真空或密封包装或置于 $110\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温炉内保存,规定了各牌号焊条在空气中暴露的许可时间,不允许使用经过再次加热或烘焙的焊条;对修复区及周围 1.5 倍板厚或 125 mm 区域(取小值)进行预热并维持最低 $175\text{ }^{\circ}\text{C}$,控制最大层间温度为 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$;完成焊缝修复后,应当进行 $230\sim 290\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的焊后除氢处理,对 P-No. 1 材料至少 2 h,对 P-No. 3 材料至少 4 h。采用自动冷焊丝 GTAW 方法修复时,对修复区及周围 1.5 倍厚度或 125 mm 区域(取小值)进行预热并维持最低 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$,控制最大层间温度为 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$;焊后除氢处理与 SMAW 方法相同。修复前,需要进行表面检测;修复过程中在第一层打磨之后,需要进行磁粉检测,如果不进行最终的体积检测,应对每一层焊缝进行磁粉检测;修复后,当焊缝冷至室温后,应进行体积

和表面无损检测;此外,去除监测预热温度的热电偶并打磨,再进行表面检测。

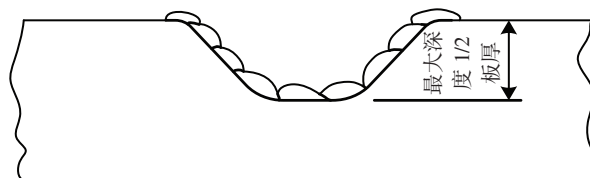


图2 母材及同种材料焊缝缺陷

IWA-4630 对连接 P-No. 8 或 P-No. 43 母材与 P-Nos. 1 和 3 母材的异种接头焊缝的修复工艺进行了规定。要求母材上的修复表面积不能超过 $325\,000\text{ mm}^2$,修补焊缝深度不能超过接头厚度的一半,如图 3 所示。修复异种接头焊缝,仅限于缺陷移除后,铁素体母材与非铁素体焊缝熔合处仍保留不超过 3.2 mm 厚的非铁素体熔敷层;若缺陷深入铁素体母材,但深度小于 9.5 mm 时,仍可按照异种接头工艺修复母材。对喷丸、焊接工艺和焊后检测的要求与 IWA-4620 基本相同,因接头不同存在如下改变:应使用 A-No. 8 焊材修复 P-No. 8 与 P-No. 1 或 P-No. 3 接头,使用 F-No. 43 焊材修复 P-No. 8 或 P-No. 43 与 P-No. 1 或 P-No. 3 的接头;当熔敷焊缝厚度超过 5 mm 时,对焊缝区域进行一次焊后除氢处理,随后焊接过程可在室温中进行,并控制层间温度低于 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$;未对去除热电偶后的表面检测做出要求。

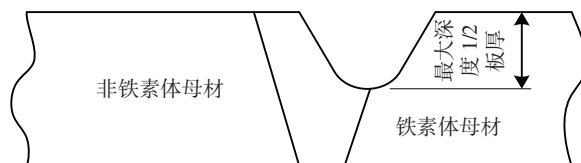


图3 异种材料焊缝缺陷

IWA-4640 对在 P-Nos. 1 和 P-Nos. 3 母材上熔敷奥氏体不锈钢或镍基金属堆焊层的接头修复工艺进行了规定。要求铁素体母材暴露深度不超过 3 mm,单个缺陷修补后焊缝的表面积不能超过 $325\,000\text{ mm}^2$,修补焊缝在铁素体母材内的深度不能超过 6 mm 或母材厚度的 10%(取小值),如图 4 所示。焊接工艺和焊后检

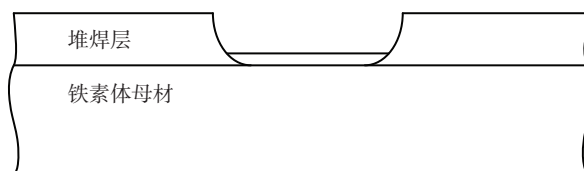


图4 堆焊层缺陷

测与 IWA-4630 要求基本相同,仅减少了 SMAW 修复后除氢处理的时间,对 P-No. 1 母材应为最低 2 h。

在 RCC-M 第Ⅳ卷 S7600“焊接修复”中,将可免除焊后热处理的修复技术列入其中,其要求主要包括可修复缺陷尺寸、母材、焊材选择及使用、缺陷去除方法、预热、热输入、焊后除氢和缺陷检测等方面。与 ASME 相比较,RCC-M 中仅列出了 SMAW 方法的回焊道工艺,并要求对修复区域进行应力分析,而且,RCC-M 中的规定多为原则性的,在实施过程中有待于进一步探索。

3 讨论及思考

3.1 工艺评定

回火焊道工艺通过严格控制热输入和焊道位置实现,因此,影响热循环条件的因素均应作为工艺评定的变素。

第Ⅸ卷 QW-402. 23 中规定,若试件厚度小于 38 mm,在背面增加冷却介质时,由于改变了热循环条件,需要对这一变化进行工艺评定;当试件达到一定厚度时,若增加冷却介质不再改变热循环条件,则不需要评定。

QW-409. 29 规定,当熔敷金属厚度未达到 5 mm 时,对于 P-No. 1 和 P-No. 3 金属,若相邻回火焊道层间的热输入比差异大于 20%,对于其它 P-No. 金属大于 10%时,需要进行工艺评定。秦建等人^[8]研究了热输入对 SA508-3 钢热影响区尺寸的影响,当焊接电流由 100 A 增大至 260 A 时,热影响区尺寸由 2.40 mm 增至 6.41 mm,熔深由 0.89 mm 增至 2.21 mm,可见回火焊道工艺中应当严格控制热输入。而当熔敷金属超过 5 mm 后,可以认为后层焊道的热循环不会再次恶化母材热影响区。

QW-410. 61 规定了回火焊道距焊趾的水平距离 S 的容许范围,规定其不能超过 ± 1.5 mm,或通过测量不同距离 S 时的硬度或冲击值确定合适的 S 范围。秦建等人^[9]研究了距离 S 对 SA508-3 钢焊趾位置显微硬度的影响,认为对试验用焊接参数的焊趾距离 S 应当控制在 2~2.8 mm。可见,依据试验结果确定距离 S 的范围更加合理。

QW-410. 63 指出,当回火焊道层的搭接率为 25%~75%时,工艺评定中可不考虑搭接率。秦建等人^[10]研究了不同搭接量对回火焊道焊后组织和性能的影响,当搭接量控制在 40%~60%时,焊道形状平直,组织分布均匀,有利于实现回火焊道工艺。刘京^[11]在制

定激光修复 P20 模具钢的回火焊道工艺时,依据熔宽和回火区宽度建立了确定最优搭接量的数学模型,预期的最优搭接量为 62%~76%。

应当指出,当第Ⅸ卷的新版本发布后,应按照最新版本评定工艺,对已通过旧版本评定的工艺不要求重新评定;第Ⅸ卷中关于回火焊道的评定要求仅在建造规范要求时采用,如第Ⅲ卷和第Ⅺ卷要求按照 QW-290 节评定回火焊道工艺,而第Ⅰ卷和第Ⅷ卷未要求。

3.2 实施应用

为控制修复后焊接接头的残余应力^[12],第Ⅲ卷和第Ⅺ卷对可修复缺陷的最大表面积进行了规定。有研究^[13]针对反应堆压力容器内壁缺陷的修复问题,分别进行表面积为 65 000 mm² 和 325 000 mm² 的修复,借助有限元方法分析焊后残余应力,结果表明增大修复面积会增多环向残余压应力的分布区域,并未恶化残余应力状态。因此,在新版本标准中,已将缺陷最大修复面积由 65 000 mm² 更新为 325 000 mm²。

为控制修复区域的氢含量,第Ⅲ卷和第Ⅺ卷中明确要求了焊条在空气中暴露的许可时间。有研究表明^[2],对超过许可暴露时间的“H4R”焊条,其熔敷金属的扩散氢含量仍满足低于 4 mL/100 g 的要求,这与 GTAW 方法的扩散氢水平相当,由此,认为标准中关于焊条暴露许可时间的要求过于保守。

为使得冷裂纹具有足够的生成时间,第Ⅲ卷要求焊缝冷至室温后,至少经过 48 h 后再进行无损检测;第Ⅺ卷要求修复前需要进行预热。有研究指出^[12-14],修复中采用预热温度低于 150 ℃ 的 GTAW 工艺时,后层的热作用使氢具有更多时间逸出焊接接头,氢含量不足以产生冷裂纹,同时有利于使热影响区形成马氏体组织,经过随后的回火可形成韧性良好回火马氏体,缓慢冷却也可降低焊接接头热应力,因此,认为标准中关于预热和焊后检测的要求过于保守。在第Ⅺ卷中,对进行预热的 SMAW 和 GTAW 回火焊道工艺已不要求修复区域冷至室温停留 48 h 后再进行无损检测,并增补了可在环境温度下进行的回火焊道工艺,在满足相关要求后,预热温度可低至 10 ℃,同时不要求焊后除氢处理。

可见,为保证修复后焊接接头质量,第Ⅲ卷和第Ⅺ卷从缺陷尺寸、焊材、焊接工艺和检测等方面,对回火焊道工艺提出了严格要求,但是部分条例过于保守,这将增加操作难度、经济成本和人员受辐照时间,但可以发现,随着标准的版本更新,相关条例在逐步完善。

4 结束语

(1) 在国际先进工业标准中,对回火焊道焊接技术的工艺评定和实施应用进行了规定,这对工程应用具有极其重要的参考价值。

(2) 回火焊道工艺通过严格控制后层焊道尺寸和热输入实现,因此,影响热循环条件的因素均应当作为工艺评定的变素。

(3) 国际先进工业标准中的一些条例过于保守,如预热、焊材保存和焊后检测等,这将增加修复难度和成本。但可以发现,相关条例在逐步地完善和更新。

参考文献

- [1] 吕晓春,秦建,杜兵,等. 回火焊道焊接技术的研究进展[J]. 焊接, 2014(7): 16-21.
- [2] Sutton B. Welding and repair technology center: shielded metal arc temperbead welding: 3002005536[R]. Electric Power Research Institute, Palo Alto, USA, 2015.
- [3] Couch D. Welding and repair technology center: temperbead welding guidance: 1022879 [R]. Electric Power Research Institute, Palo Alto, USA, 2011.
- [4] ASME. ASME boiler and pressure vessel code, section IX, qualification standard for welding and brazing procedures, welders, brazers, and welding and brazing operators[S]. ASME, New York, USA, 2017.
- [5] ASME. ASME boiler and pressure vessel code, section III, division 1, rules for construction of nuclear facility components[S]. ASME, New York, USA, 2017.

- [6] ASME. ASME boiler and pressure vessel code, section XI, rules for inservice inspection of nuclear power plant components[S]. ASME, New York, USA, 2017.
- [7] AFCEN. RCC-M, section IV, design and construction rules for mechanical components of PWR nuclear islands[S]. AFCEN, French, 2007.
- [8] 秦建,吕晓春,杜兵,等. 回火焊道焊接技术中焊接接头几何尺寸影响因素的分析[J]. 焊接学报, 2014, 35(6): 17-20.
- [9] 秦建,吕晓春,杜兵,等. SA508-3 钢焊趾部位回火焊道技术研究[J]. 焊接, 2014(7): 37-40.
- [10] 秦建,李世乾,张汇文,等. SA508-3 钢回火焊道技术焊道搭接量的分析[J]. 焊接, 2017(3): 48-51.
- [11] 刘京. P20 模具钢的双层回火激光熔敷修复技术研究[D]. 上海:上海交通大学硕士学位论文,2013.
- [12] Gandy D W. Ambient temperature preheat for machine GTAW temperbead applications: GC-111050[R]. Electric Power Research Institute, Palo Alto, USA, 1998.
- [13] Peterson A. Evaluation of large area temperbead repair for pressure vessels: 1003541 [R]. Electric Power Research Institute, Charlotte, USA, 2002.
- [14] Findlan S, Frederick G. Repair and replacement applications center: temperbead welding applications: 1013558[R]. Electric Power Research Institute, Palo Alto, USA, 2006.

第一作者简介: 司佳鑫,1993 年出生,硕士研究生;主要从事焊接修复工艺相关方面的研究工作。

通信作者简介: 吕晓春,1978 年出生,研究员;主要从事低合金钢焊接材料与工艺、钎焊标准化等方面的研究工作。

[上接第 59 页]

低合金高强度结构钢,由于其成分和组织的特点,热输入在一定范围内的变化对其强度的影响不是很大^[1]。因此,根据焊接效率、综合力学性能情况进行焊接热输入的合理选用才能够得到优质的焊接接头。

3 结论

(1) 在热影响区较宽的范围内硬度处于较高水平。过热区中出现的大量马氏体组织是热影响区存在明显淬硬现象的主要原因。

(2) 随着热输入的减小,晶粒尺寸减小,热影响区的硬度有下降趋势,但还是远高于母材及焊缝区。打

底焊道的热影响区硬度低于焊缝及母材,存在焊后软化现象,焊接时需尽量避免过大的焊接热输入。

(3) 考虑焊接接头的强度、冲击韧性及焊接效率,焊接热输入控制在 12 kJ/cm 可得到比较理想的焊接接头及较高的生产效率。

参考文献

- [1] 杨涤心,孙远方. S890 低合金高强度结构钢焊接性能的研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39(17): 180-182.

第一作者简介: 韩振仙,1984 年出生,工程师;长期从事液压支架用高强钢的焊接工艺研究。