引用格式：邓瑞婷，李然，姚建宇，等. 不锈钢与碳钢焊接工艺及焊缝力学性能研究现状[J]. 工业建筑，2026，56(3)：87-92. DENG Ruiting，LI Ran，YAO Jianyu，et al. Research Status of Welding Processes and Mechanical Properties of Welded Joints Between Stainless Steel and Carbon Steel [J]. Industrial Construction，2026，56(3)：87-92 (in Chinese). DOI：10. 3724/j. gyjzG23102106

不锈钢与碳钢焊接工艺及焊缝力学性能研究现状*

邓瑞婷[1]　李　然[1]　姚建宇[2]　郑宝锋[2]　舒赣平[2]

（1. 石家庄铁道大学土木工程学院，石家庄　050043；2. 东南大学土木工程学院，南京　211189）

摘　要　在日益复杂的工程应用场景下，工程中存在大量不锈钢与碳焊接需求。但不锈钢与碳钢的合金含量和物理性能的差异会引起不同程度的焊缝质量问题，现行规范大多不允许两者焊接，工程需求与规范规定之间存在矛盾。总结了国内外学者对不锈钢与碳钢焊接工艺、金相组织及接头力学性能等开展的试验研究与分析，结果表明：当选择合理焊接工艺时，不锈钢与碳钢的焊接接头可拥有良好的力学性能；焊接接头受拉破坏通常发生在碳钢与焊缝的热影响区附近；由于不锈钢与碳钢电位差异，焊接接头是腐蚀环境下最薄弱部分。现有研究多关注对接焊缝的金相组织等微观行为，对不同焊接接头种类、焊接接头的宏观力学性能与设计方法、焊接接头的耐腐蚀性能及防护措施研究较少。

关键词　不锈钢；碳钢；焊接接头；力学性能；设计方法；耐腐蚀性

Research Status of Welding Processes and Mechanical Properties of Welded Joints Between Stainless Steel and Carbon Steel

DENG Ruiting[1]　LI Ran[1]　YAO Jianyu[2]　ZHENG Baofeng[2]　SHU Ganping[2]

(1. *School of Civil Engineering*, *Shijiazhuang Tiedao University*, *Shijiazhuang* 050043, *China*; 2. *School of Civil Engineering*, *Southeast University*, *Nanjing* 211189, *China*)

Abstract: In increasingly complex engineering application scenarios, there is a high demand for welding stainless steel to carbon steel. However, differences in alloy content and physical properties between stainless steel and carbon steel often lead to various weld quality issues. Moreover, most current codes and standards do not permit welding these two materials together, creating a contradiction between engineering needs and specifications. The experimental studies and analyses conducted by scholars worldwide on the welding process, metallographic structure, and mechanical properties of stainless steel-carbon steel joints were summarized. The results indicate that with a proper welding process, such welded joints can achieve satisfactory mechanical properties. Tensile failure usually occurs in the heat-affected zone near the carbon steel side of the weld. Due to the potential difference between stainless steel and carbon steel, the welded joint becomes the weakest part in corrosive environments. Existing research focuses more on microstructural behavior and other microscopic aspects of butt welds, while studies on types of welded joints, macroscopic mechanical properties and design methods, as well as corrosion resistance and protective measures for welded joints, remain relatively limited.

Keywords: stainless steel; carbon steel; welding joint; mechanical properties; design method; corrosion resistance

* 国家自然科学基金项目(52278152)。

第一作者：邓瑞婷，硕士研究生，dengruiting_zyl@163. com。

通信作者：郑宝锋，博士，主要从事不锈钢结构研究，101012279@seu. edu. cn。

收稿日期：2023-10-21

© 2026 工业建筑

0 引 言

随着时代的发展,工程应用场景日趋复杂,结构在承载力、耐腐蚀性和经济性等方面面临更高的要求,单一金属材料已经很难满足所有工程使用要求[1]。为了提高材料的利用率、节约成本,常选择多种不同的金属材料,并进行焊接。如电站锅炉中采用T91和TP347H钢,适应各部分不同的功能及环境要求[2];我国高速列车吊耳结构中存在大量奥氏体不锈钢和不同碳钢的焊接[3]。

不锈钢是一种绿色高性能材料,有利于我国实现"双碳"目标[4],且强度和耐腐蚀性良好;碳钢价格低廉,应用较广,但耐腐蚀性较差。在工程上常常将不锈钢与碳钢焊接,如"合肥桥"的钢桥面采用Q345q-D/321不锈钢复合钢板,解决了钢桥面的防腐问题,提高使用寿命[5];核电、幕墙、扶梯、灯杆、避雷针等不锈钢结构也常与主体钢结构或混凝土结构中的预埋件焊接[6]。

由于不锈钢与碳钢的化学成分和物理性能[7]存在差异,焊接时容易产生焊缝成形不良、裂纹等缺陷,影响焊接质量[8],异种钢焊接接头出现早期失效的概率约为同种钢焊接接头的3~5倍[9],故大多规范不允许将不锈钢与碳钢焊接,导致工程上没有可依据的规范。CECS 410:2015《不锈钢结构技术规程》[10]第8.3.4条"不锈钢构件不应与普通碳素钢预埋件进行焊接";GB 55006—2021《钢结构通用规范》[11]第4.3.3条"不锈钢构件不应与碳素钢及低合金钢构件进行焊接";*Specification and Qualification of Welding Procedures for Metallic Materials-Qualification by Adoption of a Standard Wwelding Procedure Specification*(ISO 15612: 2018)[12]第4.2.3条规定"不允许不锈钢与碳钢焊接"。

然而,随着钢结构的发展以及市场对于结构性能的更高要求,不锈钢与碳钢焊接接头的性能及设计受到各行各业的广泛关注。本文主要综述了国内外对不锈钢与碳钢焊接的研究成果及发展现状,并对研究现状进行了总结和建议。

1 不锈钢与碳钢焊接的焊接工艺

实际工程中,金属材料焊接性通过含碳量的高低判断[13]。根据GB 50661—2011《钢结构焊接规范》[14]计算碳当量(*CEV*),*CEV*越高,其焊接性就越差。除此之外,金属间化学成分的差异也会影响焊接过程,当不同的金属材料在液态和固态都能无限或有限互溶时可形成较好的焊接连接;若在液态或固态都完全不互溶,或者溶解度极小,则不能形成真正的焊接连接,这时需要引入第3种金属组成过渡层(图1)来实现[15]。DL/T 752—2010《火力发电厂异种钢焊接技术规程》[16]第6.3条要求过渡层的厚度应不小于5 mm。

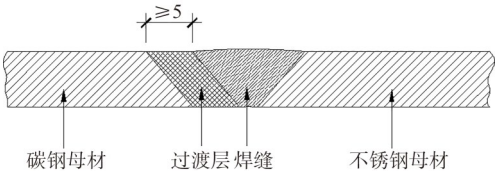


图1 焊接接头结构组成 mm

Fig. 1 Welded joint configuration

不锈钢与碳钢常使用手工电弧焊(SMAW)、气体保护焊(GTAW、GMAW)、电渣焊(ESW)、埋弧焊(SAW)、激光焊等[17]焊接工艺,其中SMAW、GTAW、GMAW可有效改善不锈钢与碳钢焊接接头的力学性能[18]。焊接电流I一般根据焊材的直径参照经验计算式($I=Kd$)获得,其中d为焊条直径、K为经验系数,与焊条直径有关,焊条直径则根据板厚选择。如表1所示,*Arc Welding and Cutting-Nonconsumable Tungsten Electrodes-Classification*(ISO 6848-2015)[19]给出了不同电极直径对应的电流范围。焊接时采用多层多道焊、小电流、较快的焊接速度,减少热输入,可保证焊接均匀[20]。

表1 电极直径与近似电流范围选择

Table 1 Electrode diameters and approximate current range selection

电极直径/mm	直流电/A			交流电/A		
	负极(钨合金)	正极		50%(+)/50%(-)		30%(+)/70%(-)钨合金
		钨合金	纯钨	纯钨	钨合金	
0.25	≤15	不适用	不适用	≤15	≤15	≤15
0.50	2~20	不适用	不适用	2~20	2~20	2~20
1.00	10~75	不适用	不适用	25~60	25~75	25~80
1.50	45~150	10~20	10~20	45~80	40~100	40~115
2.00	60~200	15~25	15~25	60~130	60~130	60~150
2.50	75~230	17~30	17~30	70~130	65~150	60~175
3.00	80~290	20~35	20~35	80~140	70~160	70~210
4.00	100~400	35~50	35~50	95~170	85~210	85~310
5.00	130~550	50~70	50~70	100~240	90~300	95~340

选择合适的焊接材料,调整焊缝的组织成分,是获得优异焊接接头的关键之一。焊条中的Cr、Ni等合金元素可有效改善接头性能。根据母材及焊

条的化学成分和熔合比，计算铬当量（Cr_{eq}）和镍当量（Ni_{eq}），利用图 2 所示舍夫勒组织图预测焊缝的化学组成及组织特征[15]，确保满足实际工程需要。不同强度的碳钢和低合金钢或不锈钢进行焊接时，规范[10,21]中推荐采用低匹配原则。DL/T 752—2010[16]第 5.1 条规定“异种钢焊接接头的焊接材料选择宜采用低匹配原则，即不同强度钢材焊接，选择适于低强度侧钢材的焊接材料”。Khorrami 等[22]发现奥氏体填充金属可以显著提高不锈钢与碳钢焊接接头的力学性能，规范推荐的焊条大多为合金含量较高的奥氏体或镍基焊接材料，而在实际工程中为降低成本大多选择奥氏体不锈钢焊条 A307（E309）。

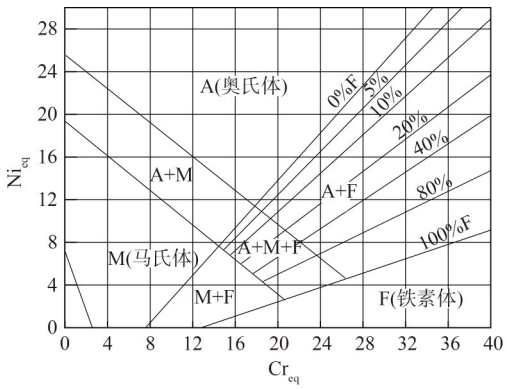


图 2　舍夫勒组织[7]

Fig. 2　Schaeffler diagram

2　不锈钢与碳钢焊接接头金相组织缺陷

不锈钢与碳钢焊接接头的力学性能与焊缝的微观组织有紧密联系。铁素体含量增加有利于避免产生裂纹并提高耐点蚀能力[23]，但含量过高则会使接头力学性能或耐腐蚀性能降低。研究表明，当焊缝为奥氏体+（5%~15%）δ 铁素体的双相组织时，接头性能较好且各种裂纹倾向性不大[24]。

不锈钢与碳钢焊接时，由于 C 含量差异及焊缝内 Cr 元素对 C 的吸引，会在碳钢侧出现碳迁移层。碳迁移层的产生会增加熔合区脆性断裂的倾向[25]并降低接头耐腐蚀性[26]。熔合区的形成主要与母材和焊缝之间化学成分和物理性能差异有关。熔合区内组织分布不均匀，韧性较差，容易产生冷、热裂纹，是焊接接头中最薄弱的环节，所以必须严格控制碳迁移程度和熔合区宽度。黄本生等[27]在分析 Q345/316L 焊接时发现，Ni 元素可以减弱 Cr 等碳化物形成元素对碳的亲和力且选择与母材化学成分相似的焊条有利于控制熔合区宽度，故选择 Ni 含量高且化学成分与 316L 相似的 ER309 焊条，可得到碳迁移程度和熔合区宽度较小的焊接接头。在实际生产中，通常在保证熔合比的条件下适当增加焊接电流以减小碳迁移层宽度。

3　不锈钢与碳钢焊接接头力学性能

3.1　不锈钢与碳钢焊接接头的硬度

硬度与相变和溶质合金元素相关[28]。焊缝和热影响区在焊接过程中经热处理发生相变，硬度增大，故在不锈钢与碳钢焊接接头中焊缝的硬度普遍大于两侧母材，且不锈钢的硬度大于碳钢。

由于碳迁移层中碳含量的变化，焊接接头碳钢侧（脱碳层）和焊缝区（增碳层）的硬度会发生骤变。如图 3 和图 4 所示[25]，焊缝侧的增碳层会使硬度增加，碳钢侧的脱碳层会使硬度降低，这种现象几乎在所有的不锈钢与碳钢焊接接头中都会出现。

除此之外，热影响区的硬度受热输入影响浮动较大，热输入的增加会导致晶粒粗化或铁素体转化为奥氏体，硬度降低。如图 4 所示，赵勇桃等[29]发现 316 侧热影响区受热输入的影响，硬度降低至母材以下。杨莉[30]分析两种不同的焊接工艺（GTAW、GMAW）对 2205/Q345R 接头硬度的影响时发现，近熔合线区使用 SMAW 得到的接头比使用 GTAW 的接头硬度大，因为使用 GTAW 的焊缝高温区加热时间长，焊缝处大量的铁素体转变为奥氏体，导致硬度降低。

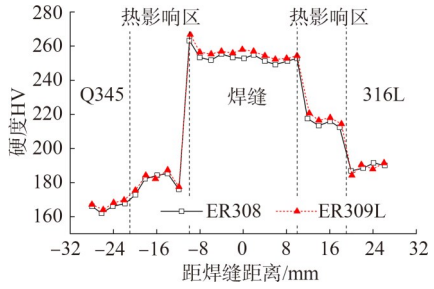


图 3　Q345/316L 焊接接头显微硬度分布[25]

Fig. 3　Microhardness distribution of the Q345/316L welded joint

3.2　不锈钢与碳钢焊接接头的拉伸性能及断口形貌

拉伸性能是焊接接头的力学性能之一。EJ/T 1027.6—1996《压水堆核电厂核岛机械设备焊接规范 异种钢的焊接》[31]中规定“在室温和设计温度下，对接接头的抗拉强度和焊缝金属的抗拉强度及屈服强度至少等于较低强度母材的规定值”。大多数

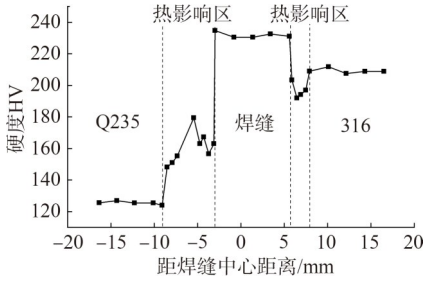


图4 Q235/316异种钢焊接接头显微硬度分布[25]

Fig. 4 Microhardness distribution of the Q235/316 welded joint

试验表明,不锈钢与碳钢焊接后接头的抗拉强度大于碳钢,断口均发生在碳钢一侧,韧性断裂。

焊接接头抗拉强度与焊缝中的组织分布状态、合金元素含量以及晶粒的大小等相关。不锈钢与碳钢焊接后接头强度略有增加,主要原因[26,29]有以下3点:1)焊缝区的显微组织由奥氏体和铁素体组成,并呈现相互交错、方向各异的分布,使焊缝与不锈钢侧的晶界总量增多,阻碍了位错运动;2)铁素体的存在和焊缝中的Cr、Mo等合金元素起到细化奥氏体晶粒的作用,提高了焊缝强度;3)焊缝中的合金元素会扰乱晶格排序并使晶格畸变,阻碍位错运动,起到固溶强化的作用。此外焊缝组织分布越均匀、晶粒越细小,抗拉强度越高[32]。

腐蚀后焊接接头强度会急剧下降。Verma等[33]将DSS2205/316L焊接试件放入含Cl^-的高腐蚀性环境中进行腐蚀试验,并对腐蚀后试样进行拉伸试验,发现腐蚀后的试件强度明显低于未腐蚀试件,且塑性急剧下降,延性断裂转变为解理断裂。

3.3 不锈钢与碳钢焊接接头抗弯性能

焊接接头弯曲试验通常有面弯和背弯两种方式。EJ/T 1027.6—1996[31]中规定"弯曲后在焊缝和热影响区拉伸面上不允许出现大于3 mm的任何方向单个开口缺陷,隔离层区不允许出现大于1.5 mm的任何方向单个开口缺陷"。经国内外学者试验可知,大部分的焊接接头在弯曲试验中未出现开裂现象,具有良好性能。弯曲时奥氏体对焊接接头的弯曲性能影响较大[30],奥氏体相间分布的等轴晶,可提高焊缝区的塑性。

3.4 不锈钢与碳钢焊接接头冲击韧性

EJ/T 1027.6—1996[31]中规定"焊缝金属和奥氏体母材的热影区的冲击韧性大于60 J/cm^2,低合金钢母材热影响区的冲击韧性为不小于母材规定值"。奥氏体含量越高,组织分布越均匀,韧性越强[34]。

焊接时碳元素或合金元素进入焊缝并溶于奥氏体,抑制晶界脆化或奥氏体生长,细化晶粒,提高焊缝金属的韧性,但焊缝中碳元素的扩散、合金元素的迁移和脆硬组织的形成,又会降低焊缝金属的韧性,导致焊缝金属低于热影响区及母材[35]。

4 不锈钢与碳钢焊接接头的局部腐蚀

化学成分的组成和含量是影响腐蚀行为的重要因素,Cr等合金元素可以提高钝化膜的稳定性且能提高Fe-Cr合金的耐蚀性;Mo和N可以提高抗点蚀能力;Ni可以降低Fe和Cr的整体溶解速率等。σ相会消耗Cr元素,并形成贫铬层,降低耐腐蚀性[24]。

不锈钢与碳钢焊接接头由于元素稀释等原因,耐腐蚀性降低,成为最薄弱部分。接头腐蚀后,在拉伸残余应力和化学腐蚀的共同作用下,强度降低并产生裂纹或锈蚀,此时焊接接头的位置会变得非常危险。且焊缝腐蚀的本质是电化学腐蚀,局部锈蚀现象发展趋势大,需重视焊缝的腐蚀形态和防腐。

4.1 电化学腐蚀

不锈钢具有优良的耐腐蚀性能,但当其与其他钢材焊接后,接近焊缝处的钝化膜被破坏,且两种金属会由于电位差的存在发生电偶腐蚀,导致焊接接头耐腐蚀性降低。极化曲线中自腐蚀电流越小,自腐蚀电位越高表明材料的耐蚀性越好。杨莉[30]通过NaCl溶液模拟海水和工业溶液进行电化学腐蚀试验,由图5可知,采用E2209焊条的接头拥有优异的耐腐蚀性能,采用E309Mo焊条的接头耐蚀性能次之,采用E309焊条的接头最差。同时,焊缝的耐腐蚀性远低于不锈钢母材。

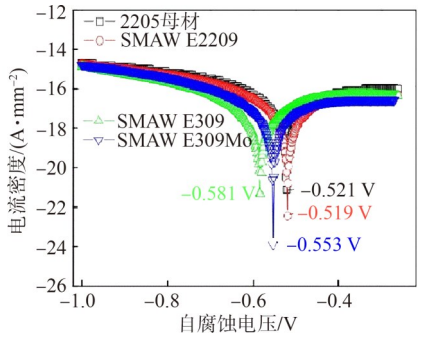


图5 母材及焊缝极化曲线[30]

Fig. 5 Base metal and weld metal polarization curves

4.2 点 蚀

点蚀是发生在金属表面小而深的局部腐蚀,是

不锈钢常见的腐蚀破坏类型之一，尤其是在含有氯离子的介质中更易发生点蚀[36]。在工程中通过计算耐点蚀当量（*PREN*）来预测耐腐蚀性：*PREN*=%Cr+3.3(%Mo)+16(%N)，*PREN*越低，耐点蚀性能越差。但此公式只能反映母材和焊缝处合金含量与耐点蚀性能关系，而对于熔合线与II型边界间的狭窄区域，即使合金元素变化也无法用公式判断其耐点蚀性能。Verma等[33]对S22053/S31603接头进行动态电位极化试验，发现S22053母材的点蚀电位（E_{Pit}）和自腐蚀电压（E_{corr}）均高于S31603不锈钢和焊缝，由于S31603的*PREN*低，耐点蚀性能差，奥氏体中出现凹坑。

4.3　晶间腐蚀

晶间腐蚀是危害性较大的一种腐蚀，它可减弱晶粒间的结合力，使力学性能下降。晶间腐蚀产生的主要原因是晶界形成了贫铬层，贫铬层在腐蚀介质的作用下会失去耐腐蚀能力。规范中常采用失重法测定焊缝金属的耐晶间腐蚀性能。杨莉[30]对使用3种不同焊条焊接得到的焊接接头抗晶间腐蚀性能进行研究，发现E2209、E309Mo、E309的腐蚀速率为0.4082、0.4244和0.4558，其耐腐蚀性排序为：E2209>E309Mo>E309。3种接头腐蚀速率都较低，晶间腐蚀不明显。此外非破坏性双环电化学电位动力学再活化（DL-EPR）试验也可测量晶间腐蚀，敏化度（%DOS）越低，说明耐晶间腐蚀性能越好。Verma等[33]发现316L和2205的敏化度均低于焊缝，对于焊缝而言，采用高热量输入的接头敏化度小于低热量输入接头。

4.4　防腐措施

为提高异种钢焊接焊缝的耐久性，规范中给出最常用的措施是防腐涂装。*Structural Stainless Steel*: *Design Guide* 27[37]中提到，将碳钢一侧的防腐涂料延伸涂装到不锈钢一侧，如图6所示延伸长度不小于2 inch（约50 mm）；EN 1993-1-4[38]中为确保不锈钢与碳钢焊接焊缝的耐久性，延伸长度规定至少75 mm。除此之外，对于紧固件连接，为了防止不同金属在电解质中发生电化学反应，EN 1993-1-4[38]规定需将不锈钢与其他金属通过电隔离以防止发生电化学腐蚀，其中电隔离可通过在接头两侧使用绝缘垫圈和衬套或在非不锈钢部件上涂抹保护涂层实现。

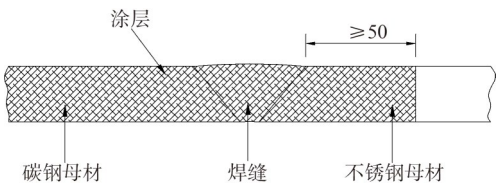


图6　防腐涂料涂装示意[38]　mm

Fig. 6　Schematic diagram of anti-corrosion coating

5　总结与展望

1）不锈钢和碳钢之间可以焊接。根据母材选择合适的焊接工艺和焊条，可得到良好的焊接接头。焊材和焊接工艺可参考DL/T 752—2010《火力发电厂异种钢焊接技术规程》选择。

2）不锈钢和碳钢焊接后会发生碳迁移现象，碳迁移层的产生会使碳钢与焊缝交界处硬度发生突变，焊接热输入的增大也会使硬度降低；接头拉伸断裂大多出现在碳钢一侧母材或热影响区，其强度主要与合金元素和组织分布相关；弯曲试验中焊缝不会出现裂纹，奥氏体对焊缝韧性影响较大；由于合金元素和碳元素在焊缝处的扩散和迁移，焊缝冲击试验所获得的能量低于母材和热影响区。

3）不锈钢和碳钢焊接后，与两侧母材相比，焊缝处的耐腐蚀性最差。焊缝的耐腐蚀性主要与合金元素（Cr、Ni、Mo等）相关。Cr可以促进钝化膜的生成和稳定且可以防止贫铬层的产生，Mo和N可以增强抗点蚀能力。工程中可采用防腐涂料或绝缘垫圈延缓焊缝腐蚀的发生。

4）目前，关于不锈钢与碳钢之间焊接的相关研究主要集中于对接焊缝的焊接工艺和材料性能等方面，对其他焊缝形式以及力学性能研究较少，没有不锈钢与碳钢焊接接头承载力设计方法及腐蚀后接头承载力的退化规律。不锈钢与碳钢焊接后焊缝的力学和耐腐蚀性能尚需进一步研究。

参　考　文　献

[1]　黄本生，刘记，刘阁，等. 时效处理对Q235/316L异种钢焊接接头组织及性能的影响[J]. 材料热处理学报，2013，34(10)：139-145.

[2]　代小号，陶业成，张曰涛，等. 电站锅炉中马氏体/奥氏体异种钢焊接接头缺陷分析[J]. 热加工工艺，2022，51(13)：157-159.

[3]　李星皓. 两种典型碳钢与304不锈钢MAG焊焊接接头组织与性能研究[D]. 五邑：五邑大学，2023.

[4]　段竹林. 不锈钢建材的低碳发展[J]. 山西冶金，2022，45(2)：88-90.

[5]　张宝刚，齐金朋. 不锈钢复合钢板在铁路钢桥上的应用技术[J]. 钢结构，2013，28(1)：51-55.

[6]　杨大元，罗福盛. 结构常用异种钢焊接材料选择及工程应用

[C]//2013中国钢结构行业大会论文集. 北京:2013:636-645.
[7] 李亚江, 王娟. 异种难焊材料的焊接及工程应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2014.
[8] 黄文剑, 田洪雨, 李加庆. Q345D/Q690D异种钢焊接接头的力学性能[J]. 焊接技术, 2022, 51(8): 37-41.
[9] 张建强, 吴甦, 赵海燕, 等. 10Cr9Mo1VNbN/12Cr1MoV异种钢焊接接头的蠕变损伤及界面失效[J]. 焊接学报, 2002, 23(2): 75-79.
[10] 中国工程建设标准化协会. 不锈钢结构技术规程:CECS 410:2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 钢结构通用规范:GB 55006—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
[12] International Organization for Standardization. Specification and qualification of welding procedures for metallic materials-qualification by adoption of a standard welding procedure specification: ISO 15612:2018[S]. Geneva: ISO, 2018.
[13] 周振丰. 焊接冶金学(金属焊接性)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢结构焊接规范:GB 50661—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
[15] 张其枢. 不锈钢焊接技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
[16] 国家能源局. 火力发电厂异种钢焊接技术规程:DL/T 752—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
[17] 卢东华. 316L不锈钢/Q345钢焊接接头组织与性能研究[D]. 成都:西南石油大学, 2015.
[18] RADHA R M, VISNU K T, RAJESHA S. A study of tensile strength of mig and TIG welded dissimilar joints of mild steel and stainless steel[J]. International Journal of Advances in Materials Science and Engineering, 2014, 3(2):23-32.
[19] International Organization for Standardization. Arc welding and cutting-Nonconsumable tungsten electrodes-Classification: ISO 6848-2015[S]. Geneva: ISO, 2015.
[20] 刘志盛, 刘龙玺, 张成功, 等. Q450NQR1/Q355GNHD异种钢焊接接头的力学性能及腐蚀行为[J]. 热加工工艺, 2022, 51(23): 63-67.
[21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
[22] KHORRAMI M S, MOSTAFAEI M A, POURALIAKBAR H, et al. Study on microstructure and mechanical characteristics of low-carbon steel and ferritic stainless steel joints[J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 608:35-45.
[23] 林晓云. 奥氏体不锈钢焊接接头晶间腐蚀的评定及控制[J]. 试验技术与方法, 2007, 43(5): 236-239.
[24] MOTESHAKKER A, DANAEE I. Microstructure and corrosion resistance of dissimilar weld-joints between duplex stainless steel 2205 and austenitic stainless steel 316L[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(3): 282-290.
[25] 孙占. 核电站中奥氏体不锈钢与碳钢异种钢焊接[J]. 金属加工(热加工), 2011(4): 25-27.
[26] 陈今良, 赖奇, 庞志宁, 等. SAF2507双相不锈钢与Q235碳钢异种金属板材的焊接[J]. 塑性工程学报, 2014, 21(5): 145-149.
[27] 黄本生, 杨江, 卢东华, 等. Q345/316L异种钢焊接接头显微组织结构与力学性能[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(5): 45-51.
[28] WU W Y, HU S S, SHEN J Q. Microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of laser welded dissimilar joints between ferritic stainless steel and carbon steel[J]. Materials and Design, 2014, 65: 855-861.
[29] 赵勇桃, 李波波, 鲁海涛, 等. Q235钢与316不锈钢异种钢焊接接头组织及力学性能的研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(11): 35-38.
[30] 杨莉. 2205双相不锈钢与Q345R钢焊接性研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2013.
[31] 中国核工业总公司. 压水堆核电厂核岛机械设备焊接规范 异种钢的焊接: EJ/T 1027.6—1996[S]. 北京:中国核工业总公司,1996.
[32] 陈今良. 0Cr18Ni9奥氏体不锈钢与Q235碳钢异种金属焊接接头的组织与性能[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(3): 179-184.
[33] VERMA J, TAIWADE R V. Dissimilar welding behavior of 22% Cr series stainless steel with 316L and its corrosion resistance in modified aggressive environment[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 24: 1-10.
[34] 马启慧, 王少刚, 李燕, 等. SAF2205双相不锈钢与16MnR钢焊接接头的组织与性能[J]. 机械工程材料, 2010, 34(6): 17-20.
[35] 李增荣. Q235钢与1Cr18Ni9Ti不锈钢异种钢焊接接头性能的研究[J]. 中国新技术新产品, 2012(21): 21.
[36] 贡志林. 不锈钢/碳钢复合钢板焊接接头耐点蚀性能研究[J]. 广州化工, 2015, 43(13): 117-121.
[37] American Institute of Steel Construction. Structural stainless steel: design guide 27[S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2013.
[38] The European Committee for Standardization. Eurocode 3: design of steel structures-part 1-4: general rules. supplementary rules for stainless steels: EN 1993-1-4: 2015[S]. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization (CEN), 2015.