

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2022.12.10

ISO/TR 17671-2 标准与高强钢焊接预热温度的确定

何珊珊, 钱 强

机械工业哈尔滨焊接技术培训中心, 黑龙江 哈尔滨 150046

摘 要: 国内外可焊接的典型低合金高强钢材料均存在随强度及板厚的增加, 焊接时有产生冷裂纹的倾向, 焊前进行适当预热是预防冷裂纹的重要措施。ISO/TR 17671-2 标准给出低合金高强钢在焊接工艺制定上的指导建议, 通过经验公式能方便快捷地确定焊接预热温度; 以屈服强度为 690 MPa 级低合金高强钢为例, 采用 ISO/TR 17671-2 标准中的方法预估焊前预热温度, 并与经焊接工艺试验确定的预热温度进行对照, 二者基本一致。生产企业可根据实际情况决定是否采用此经验公式来确定低合金高强钢焊接预热温度。

关键词: ISO/TR 17671-2 标准; 低合金高强钢; 冷裂纹; 预热温度; 经验公式

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2022)12-0085-06

ISO/TR 17671-2 and Determination of Preheating Temperature for High-Strength Steel

HE Shanshan, QIAN Qiang

Harbin Welding Training Institute, Harbin 150046, China

Abstract: For the typical low-alloy high-strength steel materials that can be welded at home and abroad, there is a tendency to produce cold cracks during welding, with the increase of strength and plate thickness. Proper preheating treatment before welding is an important measure to prevent cold cracks. ISO/TR 17671-2 gives guidance and suggestions on the preparation of welding procedures for low-alloy high-strength steels. The welding preheating temperature can be easily and quickly determined by the empirical formula. The low-alloy high-strength steel with yield strength of 690 MPa is taken as an example in the paper, the welding preheating temperature is estimated using the method described in ISO / TR 17671-2. Compared with the preheating temperature determined by the welding process test, the preheating temperature value is basically consistent. The manufacturer can determine whether to use this empirical formula to determine the welding preheating temperature of low-alloy high-strength steel according to the actual condition.

Keywords: ISO/TR 17671-2; low-alloy high-strength steel; cold crack; preheat; empirical formula

引用格式: 何珊珊, 钱强. ISO/TR 17671-2 标准与高强钢焊接预热温度的确定[J]. 电焊机, 2022, 52(12): 85-90.

Citation: HE Shanshan, QIAN Qiang. ISO/TR 17671-2 and Determination of Preheating Temperature for High-Strength Steel[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(12): 85-90.

0 前言

ISO/TR 17671^[1]系列标准给出了金属材料在焊接工艺制定上的指导建议, 为初步制定焊接工艺提供便利。此系列标准包括四个部分, 第一部分是一般原则介绍, 第二部分是铁素体钢的电弧焊焊接推

荐工艺指南, 第三部分是不锈钢的电弧焊焊接推荐工艺指南, 第四部分是铝合金的电弧焊焊接推荐工艺指南; 涉及铁素体类钢、不锈钢及铝合金三类材料。其中铁素体类钢主要指碳钢碳锰钢、低合金高强钢、抗蠕变钢及低温钢, 这些钢种均具有可焊性。

ISO/TR 17671 的第二部分给出了铁素体钢(铁

* 收稿日期: 2022-02-24 修回日期: 2022-11-20

作者简介: 何珊珊(1982—), 女, 硕士, 国际焊接工程师, 主要从事国际焊接资质人员培训工作。

素体不锈钢除外)的焊接工艺指导建议,尤其是预估焊接预热温度的方法。低合金高强钢属于铁素体类钢种,是焊接常用钢种之一,具有较高的强韧性。这类高强钢的使用能够实现减轻结构自身重量,但随着强度增加及板厚增加,产生淬硬组织倾向增大,使其焊接时产生冷裂纹的风险加大。针对此类高强钢焊接的工艺制定及预防冷裂纹方面国内外学者做了分析和研究^[2-10],其预防冷裂纹的关键措施之一是焊前适当预热,但采用焊接试验法确定预热温度的工作量和成本较高。因此 ISO/TR 17671-2 给出了低合金高强钢预防冷裂纹方便可行的工艺措施,可作为初步制定焊接工艺的指南。

1 国内外典型低合金高强钢及焊接性特点

1.1 国内外典型低合金高强钢

低合金高强钢也称细晶粒结构钢,国际标准、欧洲标准及国家标准在这类钢种的生产要求上基本一致,即在化学成分上具有低碳、含微量合金元素及低杂质等特点。供货状态主要是正火轧制、热

机械轧制及调质处理等几种方式。按照不同标准生产的钢种能够获得相似的力学性能,如表1所示,但由于技术及各地资源等因素的不同,钢材在加工性能上还存在一定差异。

按照国际标准 ISO630 第三部分和第四部分的要求供货的钢材为低合金高强钢;按照欧洲标准 EN10025 第三部分、第四部分和第六部分的要求供货的钢材属于低合金高强钢;按照我国标准 GB/T1591(2018)要求供货的钢材属于低合金高强度结构钢,按照 GB/T 16270(2009)要求供货的钢材属于高强度结构用调质钢板;按照 GB/T 34560.3(2018)要求供货的钢材属于细晶粒结构钢,按照 GB/T 34560.4(2017)要求供货的钢材属于淬火+回火高屈服强度结构钢板。

上述标准中说明的各类钢种均属于低合金高强钢品种,均可采用焊接方式进行加工制造,但不同品种钢的焊接性有一定差异。

1.2 低合金高强钢的焊接性

合金元素的添加使得低合金高强钢焊接接头的淬硬性增大,若冷却速度较快,热影响区易形成淬硬组织,有产生冷裂纹的倾向。碳当量是反映钢

表1 国内外典型低合金高强钢对照

Table 1 Comparison of domestic and foreign typical low alloy high-strength steel

标准	化学成分及含量(除铝元素以外,其余为max)/%																供货方式	屈服强度 /MPa
	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Mo	Cu	N	B	Zr	Al _{min}		
ISO630-3 (2012)	0.22	0.65	1.8	0.035	0.030	0.06	0.22	0.06	0.35	0.85	0.13	0.6	0.027	—	—	0.015	热轧、正火轧制 及热机械轧制	245~460
ISO630-4 (2012)	0.22	0.86	1.8	0.030	0.017	0.07	0.14	0.07	1.60	2.1	0.74	0.55	0.016	0.006	0.17	0.01	调质处理	460~960
EN10025-3 (2019)	0.22	0.65	1.8	0.035	0.030	0.06	0.22	0.06	0.35	0.85	0.13	0.6	0.027	—	—	0.015	正火轧制	275~460
EN10025-4 (2019)	0.18	0.65	1.8	0.035	0.030	0.06	0.14	0.06	0.35	0.85	0.23	0.6	0.027	—	—	0.015	热机械轧制	275~500
EN10025-6 (2019)	0.22	0.88	1.8	0.030	0.017	0.07	0.14	0.07	1.60	4.1	0.74	0.55	0.016	0.006	0.17	0.02	调质处理	460~960
GB/T1591 (2018)	0.24	0.55	1.8	0.035	0.035	0.05	0.13	0.05	0.30	0.8	0.20	0.4	0.015	0.004	—	0.015	热轧、正火轧制 和热机械轧制	355~690
GB/T16270 (2009)	0.20	0.80	2.0	0.025	0.015	0.06	0.12	0.05	1.50	2.0	0.70	0.5	—	0.005	—	0.015	调质处理	460~960
GB/T34560.3 (2018)	0.20	0.60	1.7	0.030	0.025	0.05	0.20	0.05	0.30	0.8	0.10	0.4	0.025	—	—	0.015	正火、正火轧制 及热机械轧制	355~690
GB/T34560.4 (2017)	0.25	0.80	2.0	0.025	0.015	0.08	0.14	0.05	1.60	4.0	0.70	0.8	—	0.006	0.15	0.015	调质处理	460~1 300

中化学成分对淬硬程度的影响。当碳当量值小于 0.4 时,焊接性良好;当碳当量值在 0.4~0.6 之间时,在一定条件下焊接;当碳当量值大于 0.6 时,焊接性较差。因此,碳当量值增大,其冷裂倾向加大。随着低合金高强钢强度的提高及板厚的增加,碳当量也增加,如果冷却速度过快,将形成淬硬组织。如 EN10025-3 正火细晶粒结构钢 S460N,当材料厚度在 63 mm 以下时,碳当量最大值为 0.53;材料厚度大于 100 mm 时,碳当量最大值达 0.55;N10025-6 调质细晶粒结构钢 S690Q 板厚在 50 mm 以上时,碳当量最大值可达 0.7 以上。

因此,随着强度增加、板厚增大,碳当量增大、产生冷裂纹倾向加大。对于强度较高的品种其碳当量值较大,焊接时应控制冷却速度,避免产生淬硬组织。焊前预热是方便可行的减小冷却速度的方法,是预防冷裂纹的主要工艺手段。

2 ISO/TR 17671-2 标准简介

ISO/TR 17671-2(2002)是铁素体钢的电弧焊推荐工艺指南,给出了除铁素体不锈钢外所有铁素体钢产品的手工、半机械化、机械化及自动化电弧焊的指导,并以附录形式给出铁素体钢焊接可能产生的问题及解决措施。共介绍六方面内容:附录 A 氢致裂纹、附录 B 接头设计细节、附录 C 可能产生的有害现象、附录 D 热影响区硬度和韧性变化、附录 E 结晶裂纹及附录 F 层状撕裂。附录 A 中给出了避免氢致裂纹指导建议,A.2、A.3 及 A.4 分别给出不同类型的铁素体钢焊接工艺方法,其中 A.2 和 A.3 方法适合的母材有非合金钢、细晶粒钢及低合金钢,A.2 适合钢种主要合金成分含量要求见表 2,根据经验和数据主要是针对碳锰型钢。A.3 适合钢种主要合金成分含量要求见表 3,根据经验和数据主要是针对低合金高强度钢。A.4 描述的方法适用于抗蠕变钢和低温钢。

表 2 A.2 适合钢种主要合金成分含量要求(质量分数,%)

Table 2 Requirements of alloy composition for A.2 (wt. %)							
C	Si	Mn	Cr	Cu	Ni	Mo	V
0.05~0.25	<0.8	<1.7	<0.9	<1.0	<2.5	<0.75	<0.20

表 3 A.3 适合钢种主要合金成分含量要求(质量分数,%)

Table 3 Requirements of alloy composition for A.3 (wt. %)					
C	Si	Mn	Cr	Cu	Mo
0.05~0.32	<0.8	0.5-1.9	<1.5	<0.7	<0.75
Nb	Ni	Ti	B	V	
<0.06	<2.5	<0.12	<0.005	<0.18	

3 依据 ISO/TR 17671-2 标准预估预热温度

3.1 预估预热温度的步骤

低合金高强钢焊接接头产生冷裂纹主要受母材和焊缝金属的化学成分、板厚、焊缝金属氢含量、焊接过程中的热输入以及应力水平等因素的影响。生产中针对冷裂纹采取的主要工艺措施是焊前预热,因此预热温度的确定十分关键。预热温度过低,仍然存在冷裂纹的危险;预热温度过高,对接头性能又会产生不利影响。ISO/TR 17671-2 标准的附录 A 中 A.3 描述的方法给出了母材成分、板厚、扩散氢含量、热输入等因素与预热温度的关系。因此根据实际产品的具体情况结合关系曲线可以计算焊接需要的预热温度,如果要确定不预热焊接是否可行,也可以根据相互之间的关系,调节其他影响因素来确定。

(1)根据母材成分确定预热温度。

影响钢冷裂行为的化学成分可以用碳当量 CET^[1]来描述,使用的碳当量公式如下:

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}$$

碳当量对预热温度影响较大。碳当量增大,淬硬倾向加大,冷裂纹倾向加大,通过预热减缓冷却速度,避免产生淬硬组织。碳当量 CET 和预热温度 T_p 之间的线性关系如图 1 所示,由图 1 可知,碳当量增加约 0.01%,预热温度就会升高约 7.5 °C。因此,已知材料的碳当量 CET,可以确定预热温度 T_{pCET} 。

(2)根据板厚确定预热温度。

随着板厚的增加,冷却速度加快,因此要控制冷却速度避免产生淬硬组织产生。根据板厚 d 与预热温度 T_p 之间的关系曲线(见图 2)可知,材料越薄,预热温度对其影响越大,随着材料厚度的增加,影

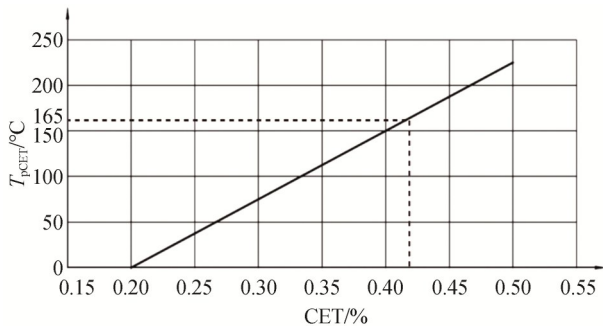


图1 预热温度与碳当量CET的关系

Fig. 1 Relationship between preheating temperature and CET

响逐渐减小,当板厚在 60 mm 以上时,几乎没有影响。因此,已知材料厚度,结合图2可以确定预热温度 T_{pd} 。较厚的板会使焊接预热温度有所提高。

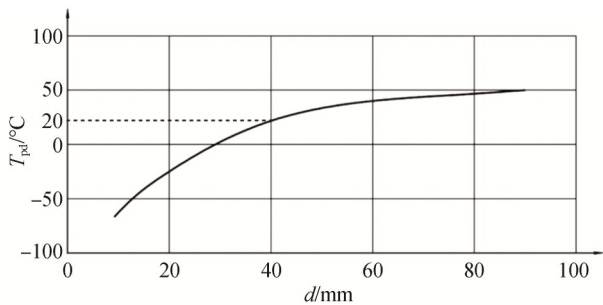


图2 预热温度与板厚d的关系

Fig. 2 Relations between preheating temperature and the plate thickness (d)

(3)根据扩散氢含量确定预热温度。

ISO 3690中确定了焊缝金属扩散氢含量HD对预热温度的影响,如图3所示。HD增加,预热温度 T_{pHD} 也需增加,实际生产中尽可能采用低氢型焊材。

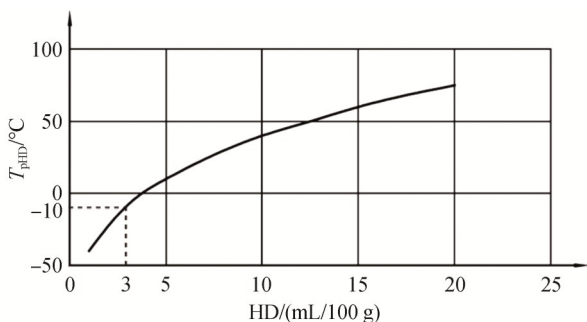


图3 预热温度与焊缝金属扩散氢含量的关系

Fig. 3 Relations between preheating temperature and weld metal hydrogen content, HD

(4)根据热输入确定预热温度。

预热温度与热输入的关系曲线如图4所示。可以看出,适当增加热输入 Q 可以降低预热温度 T_{pQ} 。

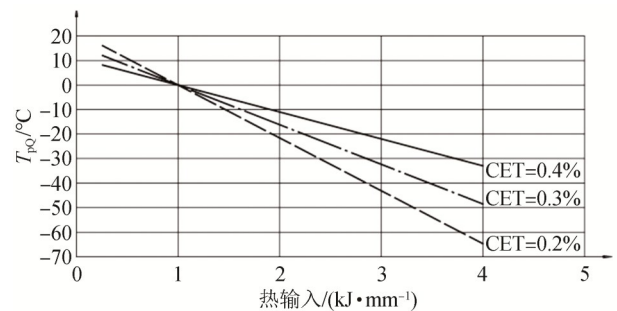


图4 预热温度与热输入的关系

Fig. 4 Relations between preheat temperature and heat input

综合以上因素影响,以碳当量 CET 为特征的化学成分、板厚 d 、焊缝金属扩散氢含量 HD 和热输入 Q ,预热温度可用以下经验公式计算: $T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ}$ (°C),其确定预热温度具体步骤见图5。

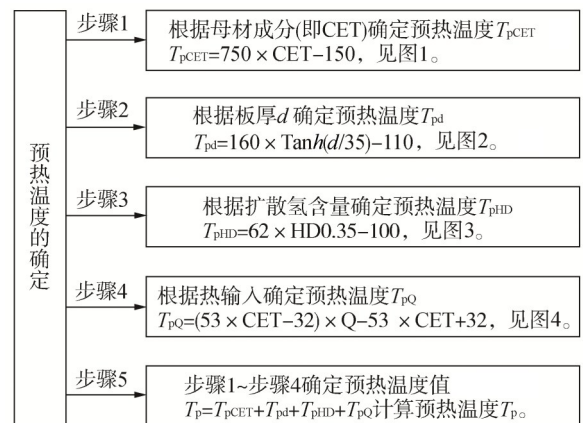


图5 确定预热温度步骤

Fig. 5 Determine the preheating temperature step

3.2 ISO/TR 17671-2 标准预估 Q690 焊接预热温度

以文献[11]选用的湘潭钢铁集团的 Q690D-Z25 钢为例,预估其预热温度。该钢种的碳当量 0.42%,厚度 40 mm,采用焊条电弧焊,选取 LB-80L 型极低氢型焊条,焊接参数为:电流 190 A,电压 25 V,焊接速度 145 mm/min。现依据 ISO/TR 17671-2 标准中的方法预估预热温度,具体步骤为:第一步,根据碳当量 0.42% 与预热温度的关系可知, T_{pCET} 约为 165 °C;第二步,根据板厚 40 mm 与预热温度的关系可知, T_{pd} 约为 20 °C;第三步,因选用的是极低氢型焊条,扩散氢含量小于 3 mL/100 g,由图3可知,无需增加预热温度甚至预热温度可以再适当低一些, T_{pHD} 约为 -20 °C;第四步,焊接方法为焊条电弧焊,根据焊接参数计算出热输入,约为 2 kJ/mm,查找图

5 热输入与预热温度的关系可知,在此热输入下预热温度可以适当降低, T_{pQ} 约为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

综合以上数据,文中选用钢种 Q690D 根据公式 $T_p=T_{pCET}+T_{pd}+T_{pHD}+T_{pQ}$ 计算的预热温度约为 $155\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。与文献[12]中经过焊接试验得出的数据预热温度至少为 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相似。

4 依据工艺试验确定预热温度的对比实例

以国产低合金高强钢典型钢种 Q690D 为例。其对应的欧洲标准牌号为 S690Q 或者 S690QL 及国际标准牌号为 S690QD,供货方式为调质处理,最低屈服强度不低于 690 MPa ,被广泛应用于煤矿机械、工程机械方面,如液压支架、港口起重机、平板运输车等。针对 Q690 焊接冷裂纹,近年来已有一些相关研究。如我国自主研制的“蓝鲸”全回转起重船主臂架主要采用 30 mm 厚度的 Q690 钢,焊接时存在冷裂纹倾向,试验从 $165\sim 195\text{ }^{\circ}\text{C}$ 共 20 个不同预热温度进行分析,得出采用 TWE-110K3 药芯焊丝+MAG 焊接时的最低预热温度为 $165\text{ }^{\circ}\text{C}$,可避免产生冷裂纹^[11]。文献[11]分别在不预热、预热 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、预热 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、预热 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 四种条件下进行焊接裂纹试验,分析裂纹情况,得出最低预热温度为 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。谭震国^[14]研究了风电行业和核电站配套的履带吊部分用低合金高强钢 Q690D 的焊接性能,为防止冷裂纹,焊前预热温度控制在 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。文献[16]介绍了海洋起重机之一桅杆式起重机采用低合金高强钢 S690QL,其结构厚度为 65 mm ,根据板厚、拘束度及低氢焊材的选择,确定焊接预热温度为 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$;根据图 3 可知,厚度增加其预热温度差别不大,材料厚度为 40 mm 和厚度为 80 mm ,其预热温度差约为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,又因产品采用埋弧焊工艺,其热输入相对大一些,根据图 5 可知,预热温度可以低一些,因此,文献中的结构虽然厚度较厚,但不需要更高的预热温度。文献^[17]海上吊机产品主要受力部件拨杆使用 S690QL 钢管,尺寸为 $\varnothing 406\text{ mm}\times 25\text{ mm}$,试验研究得出其焊前预热温度在 $100\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。Knut Partes 等^[18]对大功率激光焊接 6 mm 厚 S690QL 预热

温度进行了分析,采用维氏硬度法测定不预热、预热 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的焊接接头性能,其结论为不预热时焊接接头最大硬度为 407 HV_{10} ,随着预热温度增加其硬度值随之下降,当预热温度为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其最大硬度值为 325 HV_{10} ,而材料的初始硬度为 285 HV_{10} ,因此,为了避免产生淬硬组织,需要预热。文献[19]建议 S690QL 材料的焊前预热温度为 $150\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (厚度为 15 mm 时为 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$),避免产生冷裂纹,但不建议温度高于 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$,因为可能会导致力学性能下降。文献[20]通过试验得出 S690QL 为了避免冷裂纹,给出预热温度为 $150\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。同样使用屈服强度为 690 MPa 的低合金高强钢种,因不同产品的厚度不同,结构形式不同,工艺参数不同,导致焊前预热温度有一些差异,但总体上,屈服强度为 690 MPa 的低合金高强钢焊前均需要预热,针对此类低合金高强钢焊接工艺的制定及确定焊前预热温度主要采取焊接工艺试验及直接的裂纹实验法进行分析,这种方法能够准确评价其焊接性及制定焊接工艺,但增加了工作量及成本。

5 结论

ISO/TR 17671-2 标准给出了与焊接性有关的因素并总结出相应规律,为材料焊接工艺制定提供了指导建议。为低合金高强钢焊接工艺的制定,尤其是焊前预热温度的确定,提供了有效途径。以屈服强度为 690 MPa 的低合金高强钢为例,采用 ISO/TR 17671-2 标准中的方法进行预热温度的预估,并与文献中经过工艺试验确定的预热温度进行对比,其预热温度值有高度的一致性。因此,低合金高强钢在初步制定工艺时,按照 ISO/TR 17671-2 标准中的方法进行预热温度的预估,可以避免直接通过大量的焊接试验确定,既可以节约时间又能够降低成本。也可以将计算得出的数据作为编制 pWPS 的依据,企业可以依据实际情况确定使用。

参考文献:

- [1] ISO/TR 17671-2: 2002 Welding-Recommendations for welding of metallic materials- Part 2: Arc welding of ferritic steels[S].

- [2] 周昕. 工程机械中的低合金高强钢焊接技术[J]. 电焊机, 2010, 40(5): 187-189.
ZHOU X. Welding technology of high strength low-alloy steel in construction machinery[J]. Electric Welding Machine, 2010, 40(5): 187-189.
- [3] 戴为志, 李华, 何乔生, 等. 高强钢焊接前沿技术的开发研究[J]. 电焊机, 2014, 44(5): 42-49.
DAI W Z, LI H, HE Q S, et al. Development of advanced technology on high strength steel welding[J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(5): 42-49.
- [4] 高有进, 王乘, 徐宗林. 屈服强度 900 MPa 级高强钢焊接工艺[J]. 焊接学报, 2007, 28(9): 103-107.
GAO Y J, WANG C, XU Z L. Welding of high strength steel with yield strength of 900 MPa[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(9): 103-107.
- [5] 帅朋, 高珊, 吴志生, 等. 高强钢焊接研究现状[J]. 焊接技术, 2016, 45(6): 1-4.
SHUAI P, GAO S, WU Z S, et al. Research status of high strength steel welding [J]. Welding Technology, 2016, 45(6): 1-4.
- [6] 孙建新. 高强钢焊接结构的潜在风险分析[J]. 电焊机, 2014, 44(5): 132-135.
SUN J X. Analysis of potential risks in high-strength steel welded structures[J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(5): 132-135.
- [7] Yun P, Wang A, Xiao H, et al. Effect of Interpass Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Weld Metal of 690 MPa HSLA Steel[J]. Materials Science Forum, 2012, 706-709: 2246-2252.
- [8] 李锁牢, 李明辉. 特高压输电铁塔用 Q420 低合金高强钢焊接性能研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(9): 228-230.
LI S L, LI M H. Study on Weldability of HSLA Steel Q420 for Ultra High Voltage Transition Tower[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(9): 228-230.
- [9] Winarto, Priadi D. Effect of Preheating and Buttering on Cracking Susceptibility and Wear Resistance of Hardfaced HSLA Steel Deposit[J]. quarterly journal of the Japan Welding Society, 2013, 31(4): 202-205.
- [10] Lobanov L M, Mikhoduj L I. Problems of Welding and Strength of High-Strength Steel Structures[C]. International conference on HSLA steels, 2000: 423-429.
- [11] 郭萍萍, 阮家顺, 王简. Q690 高强钢的焊接工艺及其应用研究[J]. 焊接技术, 2019, 48(9): 72-74.
GUO P P, RUAN J S, WANG J. Study on Welding Technology and Application of Q690 High Strength Steel[J]. Welding Technology, 2019, 48(9): 72-74.
- [12] 董达善, 俞翔栋, 黄婉娟, 等. Q690 高强钢厚板 MAG 焊焊接工艺[J]. 电焊机, 2015, 45(4): 123-126.
DONG D S, YU X D, HUANG W J, et al. Study on MAG welding process for the thick plate of Q690 high-strength steel[J]. Electric Welding Machine, 2015, 45(4): 123-126.
- [13] 韩振仙, 李超, 柳国强, 等. Q690D 低合金高强结构钢焊接工艺研究[J]. 焊接技术, 2019, 48(8): 54-58.
HAN Z X, LI C, LIU G Q, et al. Study on Welding Process of Q690D Low Alloy High Strength Structural Steel[J]. Welding Technology, 2019, 48(8): 54-58.
- [14] 谭震国, 潘霖. Q690D 低合金高强钢焊接性能研究[J]. 重工与起重技术, 2010(4): 21-23.
TAN Z G, PAN L. Study on Weldability of Q690D Low Alloy High Strength Steel[J]. Heavy Industrial Hoisting Machinery, 2010(4): 21-23.
- [15] 孙凌鹏, 王海东. Q690D 高强度焊接结构钢的焊接工艺研究[J]. 江苏船舶, 2020, 37(4): 36-38.
SUN L P, WANG H D. Research on Welding Process of Q690D High-Strength Welded Structural Steel[J]. Jiangsu Ship, 2020, 37(4): 36-38.
- [16] 付伟龙. S690QL 高强钢横埋弧焊工艺研究及硬度降低方法[J]. 金属加工(热加工), 2018, (9): 41-43.
FU W L. Study on submerged arc welding process of S690QL high strength steel and method of hardness reduction[J]. MW Metal Forming, 2018(9): 41-43.
- [17] 樊铭林, 程尚华. S690QL 高强钢焊接工艺的研究[J]. 现代焊接, 2013(8): 39-41.
FAN M L, CHENG S H. Study on Welding Process of S690QL High Strength Steel [J]. Modern Welding Technology, 2013(8): 39-41.
- [18] Knut Partes, Malte Schmidt, Sven Gorny. Prediction of Preheating Temperatures for S690QL High Strength Steel Using FEM-Simulation for High Power Laser Welding[J]. Lasers in Manufacturing and Materials Processing, 2020, 7(2): 177-189.
- [19] D. Arsić. Evaluation of weldability and selection of the optimal welding technology of S690QL high strength steels [D]. Faculty of Engineering, Kragujevac, 2013.
- [20] Nikolić R R, Arsic D, Lazic V, et al. Application of the S690QL class steels in responsible welded structures [J]. Materials Engineering-Materiálové inžinierstvo, 2013(20): 174-183.