

# 焊接热输入对TMCP和QT态高强钢接头冲击韧性的影响

崔强<sup>1</sup>, 赵逍<sup>2</sup>, 黄雷<sup>3</sup>, 杨辉<sup>3</sup>, 孙哲<sup>2</sup>, 王彦博<sup>2\*</sup>

(1. 南京钢铁股份有限公司, 南京 210035; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092;  
3. 中国建筑先进技术研究院, 武汉 430070)

**摘要:** 为高强钢在低温环境下的应用提供试验数据和建议, 本文重点围绕焊接热输入和接头母材的不同交货状态这两个关键影响因素, 选取控轧控冷(TMCP)和调质(QT)两种交货状态的20 mm厚Q550D和Q690D高强钢, 分别进行 $1.0 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ 、 $1.5 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ 和 $1.9 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ 三种常见的气保焊焊接热输入的接头制备、韧性试验检测和对比分析, 进行了不同交货状态下对接头母材、焊缝区和热影响区(HAZ)的夏比冲击功及其变化规律, 以及韧脆转变温度的研究。结果表明: 焊接热输入对接头各位置冲击韧性的影响不明显, 而交货状态不同则接头呈现出不同的冲击韧性, 其中QT态钢板焊接接头热影响区的冲击韧性要优于母材和焊材, 而TMCP态钢板焊接接头热影响区的冲击韧性则低于母材和焊材; 对控制工况下的韧脆转变温度的研究表明, 本文所用的高强钢低温敏感性较好。

**关键词:** 高强钢; 对接焊缝; 冲击韧性; 交货状态; 焊接热输入; 热影响区; 韧脆转变温度

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)05-0088-09

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20231120002

## The Effect of Welding Heat Input on the Impact Toughness of High-Strength Steel Joints in TMCP and QT Conditions

CUI Qiang<sup>1</sup>, ZHAO Xiao<sup>2</sup>, HUANG Lei<sup>3</sup>, YANG Hui<sup>3</sup>, SUN Zhe<sup>2</sup>, WANG Yanbo<sup>2\*</sup>

(1. Nanjing Iron & Steel Co., Ltd., Nanjing 210035, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China.; 3. China Construction Institute of Advanced Technology, Wuhan 430070, China)

\*Corresponding author: ybwang@tongji.edu.cn

**Abstract:** To provide experimental data and recommendations for the application of high-strength steels in low-temperature environments, this paper focuses on two key influencing factors: welding heat input and different delivery conditions of base metals. Two types of high-strength steels, Q550D and Q690D with thicknesses of 20mm, were selected in thermo-mechanically controlled process (TMCP) and quenched and tempered (QT) conditions.

收稿日期: 2023-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(52020105004), 上海市科技计划项目(23DZ1202303)

作者简介:

崔强(1972—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事高层建筑、桥梁钢、海洋船舶(工程)钢、水电钢、耐蚀(耐候)钢等新产品研发和工艺技术研究。E-mail: cuiqiang@njsteel.com.cn。

赵逍(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事高强钢焊接方面的研究。

通信作者:

王彦博(1983—), 男, 博士, 教授, 主要从事高强钢结构和高性能组合结构研究。E-mail: ybwang@tongji.edu.cn。

Three commonly used gas shielded welding heat inputs of  $1.0 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ ,  $1.5 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ , and  $1.9 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$  were applied to prepare the joints. The impact toughness tests were conducted, and the results were analyzed and compared. A systematic study was performed on the Charpy impact energy and transition temperature of the base metal, weld metal, and heat-affected zone (HAZ) in butt joints under different delivery conditions. The results indicate that the effect of welding heat input on the impact toughness of various regions of the joints is insignificant, while the delivery condition significantly affects the impact toughness. Specifically, the impact toughness of the HAZ in QT steel joints is superior to that of the base metal and weld metal, whereas in TMCP steel joints, the impact toughness of the HAZ is lower than that of the base metal and weld metal. The study on the ductile-to-brittle transition temperature under controlled conditions suggests that the high-strength steels used in this study exhibit good low-temperature sensitivity.

**Keywords:** high-strength steel; butt welding; impact toughness; delivery condition; welding heat input; heat-affected zone; ductile-to-brittle transition temperature

随着科学技术的发展和水平的提高,建设工程对大跨度结构和高层结构的需求日益增加,对于工程结构的性能以及结构用钢的性能提出了越来越高的要求。高强度结构钢(以下简称“高强钢”)已在国内外多个实际工程中得到应用<sup>[1-3]</sup>。高强钢的合金元素、生产工艺与普通钢不同,焊接热影响区的微观金相结构更易受焊接热输入的影响而改变,甚至影响宏观力学性能<sup>[4,5]</sup>。我国是地震多发国家且有大部分区域地处寒冷地区,在实际的钢结构设计中不仅要关注材料及焊接接头的强度,还应关注其低温冷脆性能。因此,有必要对高强钢焊接接头的冲击韧性开展研究。

目前,高强钢主要的交货状态有控轧控冷型(简称 TMCP)和调质型(简称 QT)<sup>[6]</sup>。目前国内外针对高强钢焊接接头冲击韧性的研究相对较少。王元清等分别针对 Q460C<sup>[7]</sup>和 Q960<sup>[8]</sup>高强钢焊接接头,进行了不同温度下、接头不同位置的冲击韧性研究。研究发现,Q460C 钢焊接接头的焊缝区和热影响区冲击韧性较差,接头整体呈现较明显的低温冷脆性;Q960 钢焊接接头的热影响区冲击韧性要低于焊缝和母材区域,且受钢材厚度和实际强

度的影响。张天会等<sup>[9]</sup>研究了焊接工艺参数对新型低碳贝氏体钢焊接接头韧性和热影响区金相组织变化的影响,结果表明较大的焊接热输入会使焊缝处的冲击韧性明显降低。贾祥才等<sup>[10]</sup>研究了不同生产工艺下高强高韧低合金钢的冲击韧性,发现调质型高强钢的焊接接头冲击韧性相对较好。

本文以 Q550D 和 Q690D 两个强度等级高强钢为研究对象,分别研究在 QT 和 TMCP 交货状态下,采用不同焊接热输入对焊接接头冲击韧性的影响规律,为高强钢焊接接头的结构设计提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

试验采用南钢生产的板厚为 20 mm 的 Q550D 和 Q690D 钢板,分别包括 TMCP 和 QT 两种交货状态,力学性能和化学成分均满足《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591—2018)<sup>[11]</sup>的规定,见表 1。针对 Q550D 和 Q690D 钢板选取了等强匹配焊材,分别为 BHG-2 和 BHG-4M,力学性能和化学成分见表 1。

表 1 试验用钢板的化学成分

Table 1 Chemical components of steel plates in test

材料名称	C/%	Si/%	Mn/%	P/%	S/%	Ti/%	Cu/%	Cr/%	Ni/%	Mo/%	Nb/%	V/%	B/%	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	伸长率/%		
Q550D	QT	0.13	0.26	1.34	0.012	0.001	0.015	0.04	0.24	0.02	0.080	0.024	0.002	0	708	752	19.6	
	TMCP	0.06	0.24	1.56	0.010	0.001	0.015	0	0.19	0.02	0	0	0	0.001	6	675	717	19.0
焊丝 BHG-2	0.06	0.74	1.76	0.008	0.002	0.120	0.06	—	—	0.280	—	—	—	585	657	19.0		
Q690D	QT	0.13	0.25	1.37	0.013	0.001	0.016	0	0.33	0	0.150	0	0	0.001	5	784	819	20.5
	TMCP	0.08	0.25	1.62	0.009	0.001	0.017	0	0.25	0	0.004	0	0	0.001	6	818	839	16.4
焊丝 BHG-4M	0.07	0.57	1.64	0.008	0.001	—	—	—	—	0.28	—	—	—	710	795	22.8		

注:伸长率测试标距为 100 mm。

### 1.2 焊接工艺参数

焊接接头试件加工采用工程中常用的惰性气体保护焊(GMAW)。考虑惰性气体保护焊的常用焊接热输入范围,试验中分别设置了1.0 kJ·mm<sup>-1</sup>、1.5 kJ·mm<sup>-1</sup>

和1.9 kJ·mm<sup>-1</sup>三个焊接线能量参数,以研究焊接热输入对高强钢焊接接头冲击韧性的影响。试件采用X型坡口全熔透焊接,以半自动焊接设备控制每道焊道的焊接热输入。试验的加工现场和坡口尺寸如图1。

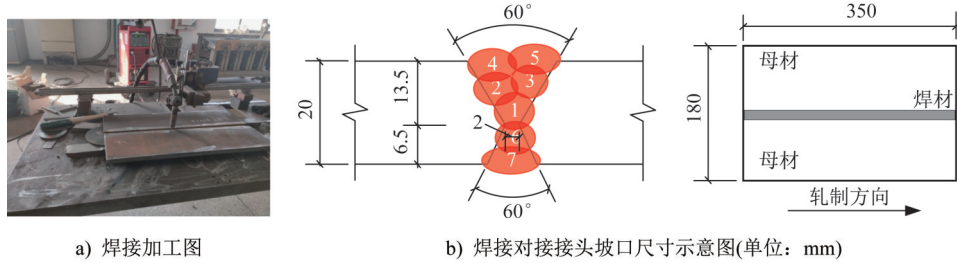


图1 焊接接头加工图

Fig. 1 Butt welded connection

焊接时,每道焊缝的焊接热输入和电流、电压、焊接速度存在以下的定量关系:

$$H = \frac{60UI}{1000S} \quad (1)$$

式中:*I*为电流,*U*为电压,*S*为焊接速度,*H*为焊接热输入。

由于本试验的钢板较厚,需要多道焊接,因此在每道焊接热输入的差异不太大的前提下,采用平均焊接热输入来表征每块板的焊接热输入:

$$H = \frac{1}{N} \sum \frac{60UI}{1000S} \quad (2)$$

式中:*I*为电流,*U*为电压,*S*为焊接速度,*H*为焊接热输入,*N*为焊道数。

对于本试验涉及到的12种焊接组合,对应的实测焊接工艺参数如表2。

### 1.3 冲击韧性试件制备

对焊接的试件进行线切割加工,依照《金属材料 维氏硬度试验 第1部分:试验方法:GB/T 4340.1—2009》<sup>[12]</sup>进行截面硬度打点判断HAZ的宽度范围,结果见参考文献[6],可知HAZ宽度在3~6 mm之间。之后按照《金属材料夏比摆锤冲击试验方法 GB/T 229—2020》<sup>[13]</sup>,制备尺寸为100 mm×10 mm×10 mm的标准试件。基于现有学者的研究<sup>[14-17]</sup>,高强钢焊接对接接头的热影响区范围较小且层次复杂,本试验对同一组焊接接头选取五个不同位置进行-20℃下的冲击韧性试验,包括:焊材(F)、热影响区部位距离熔合线1 mm、3 mm和5 mm处(分别记为R1,R3和R5)和母材(BM-P),HAZ取样位置可以反映热影响区的不同子区域冲击韧性表现。取样位置示意如图2所示。焊接试件分组和取样如表3。通过液氮和无水乙醇作为冷却介质,冷却到指定温度并保温30 min以上再进行冲击,试验装置如图3所示。

表2 焊接工艺参数

Table 2 Welding parameters of butt welded connections

母材交货状态	牌号	电流 I/A	电压 U/V	焊接速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	焊接热输入/(kJ·mm <sup>-1</sup> )
QT	Q550D	270	26.2	390	1.08
		245	27.2	265	1.51
		285	27.9	244	1.95
	Q690D	244	25.1	365	1.01
		250	26.2	260	1.51
		270	28.4	230	2.01
TMCP	Q550D	240	22.0	325	0.97
		285	29.3	333	1.50
	Q690D	290	28.1	260	1.88
		285	25.2	433	0.99
		280	28.5	321	1.49
	310	28.3	279	1.89	

## 2 试验结果

在-20℃下进行冲击韧性试验,每个参数下进行5个平行试件的测试,试验结果去除最大值和最小值后,取剩余3个试件结果的平均值列于表4。观察变异系数σ/μ,除TMCP-Q550在1.5 kJ·mm<sup>-1</sup>热输入下冲击韧性结果离散型较高,σ/μ达到0.21外,其余工况组均在0.15以下。下面分别讨论不同交货状态和焊接热输入因素对焊接接头各区域冲击韧性的影响。

### 2.1 焊接热输入对接头冲击韧性的影响

图4给出了在特定牌号和交货状态下,不同焊接热

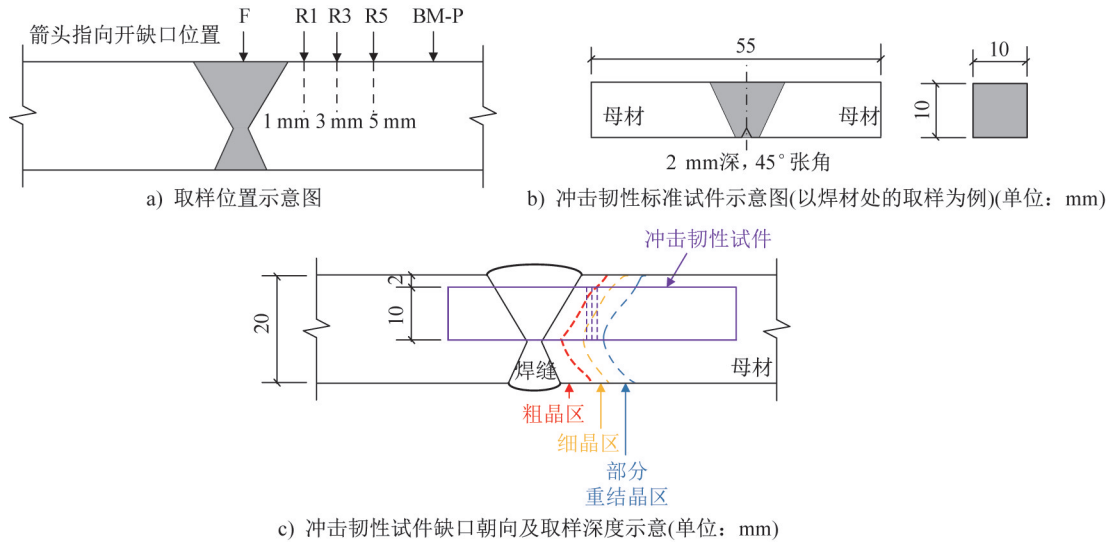


图2 冲击韧性试样加工示意图

Fig. 2 Diagram for manufacturing process of toughness impact specimens

表3 焊接试件分组和取样

Table 3 Grouping and sampling of welding specimens

母材交货状态	牌号	焊接热输入/ (kJ·mm <sup>-1</sup> )	试样位置	每个位置平行试样数
QT	Q550	1.0	BM-P, F, R1, R3, R5	5
		1.5	F, R1, R3, R5	5
		1.9	F, R1, R3, R5	5
	Q690	1.0	BM-P, F, R1, R3, R5	5
		1.5	F, R1, R3, R5	5
		1.9	F, R1, R3, R5	5
TMCP	Q550	1.0	BM-P, F, R1, R3, R5	5
		1.5	F, R1, R3, R5	5
		1.9	F, R1, R3, R5	5
	Q690	1.0	BM-P, F, R1, R3, R5	5
		1.5	F, R1, R3, R5	5
		1.9	F, R1, R3, R5	5
合计				260

注: BM-P 为母材; F 为焊材; R1 为距离融合线 1 mm 处的热影响区, 其余类推。

输入下接头的冲击功结果。可以看出:

(1) 在焊接热输入为 1.0~1.9 kJ·mm<sup>-1</sup> 范围内, 接头各区域在 -20 °C 下的冲击功均不低于 80 J, 说明焊材与母材匹配较好。此外, 在热输入较低 (1.0~1.5 kJ·mm<sup>-1</sup>) 时, t<sub>8/5</sub> 冷却速度较快, 热影响区宽度较窄, 有助于晶粒细



图3 冲击试验机

Fig. 3 Impact test device

化并抑制 M/A 组元的生成, 加之母材本身具有较高韧性, 共同提高了热影响区的低温冲击性能。

(2) 对于 TMCP 态的 Q690 高强钢, 热影响区在 -20 °C 下冲击功随热输入增大而降低。TMCP 态高强钢的成分设计思路为: 采用细晶强化、位错强化和析出强化保证高强度, 低 C 含量 ≤ 0.12%、高 Mn 含量 ≥ 1.60% 减少组织中 M/A 组元和细化基体保证低温冲击韧性, 同时生产工艺中采用低温回火的方式。因此 TMCP 态 Q690 钢组织热稳定性较差, 在一定热输入和热循环下若冲击降低, 接头强度也会降低。TMCP 态 Q550 其成分体系与 TMCP 态 Q690 基本一致, 而回火温度略高于 Q690, 其冲击韧性较高也是对这一理论的印证。

(3) 对于 QT 态的高强钢焊接接头试件, 焊接熔敷金属的冲击功随热输入增大而减小, 但热影响区冲击功与焊接热输入大小无明显变化。这是由于 QT 态采用 C 加 Cr 成分体系 and 高温回火工艺, 其组织控制采用组织强化、固溶强化和析出强化, 焊接热影响区冲击韧性体现出不同于 TMCP 态的优势。

表4 -20℃各工况下冲击韧性试验结果

Table 4 Impact toughness of specimens in different conditions under -20℃

交货状态	牌号	焊接热输入/ (kJ·mm <sup>-1</sup> )	各缺口位置处的冲击功														
			BM-P			F			R1			R3			R5		
			μ/J	σ/J	σ/μ	μ/J	σ/J	σ/μ	μ/J	σ/J	σ/μ	μ/J	σ/J	σ/μ	μ/J	σ/J	σ/μ
TMCP	Q550	1.0				185	5.0	0.03	210	5.3	0.03	221	8.1	0.04	208	19.1	0.09
		1.5	247	6.4	0.03	50	10.6	0.21	227	8.1	0.04	224	9.2	0.04	192	15.1	0.08
		1.9				209	5.0	0.02	198	14.4	0.07	223	3.1	0.01	233	3.1	0.01
	Q690	1.0				135	5.8	0.04	227	2.3	0.01	151	5.0	0.03	206	2.3	0.01
		1.5	241	1.2	0.00	79	3.1	0.04	145	4.2	0.03	156	16.4	0.10	146	22.3	0.15
		1.9				119	8.3	0.07	122	8.0	0.07	122	3.5	0.03	148	3.5	0.02
QT	Q550	1.0				175	6.4	0.04	253	9.9	0.04	247	7.0	0.03	249	3.1	0.01
		1.5	199	4.6	0.02	96	5.0	0.05	210	8.3	0.04	194	17.4	0.09	180	21.2	0.12
		1.9				89	6.4	0.07	249	3.1	0.01	247	3.1	0.01	193	6.4	0.03
	Q690	1.0				135	9.9	0.07	233	11.7	0.05	223	9.9	0.04	222	3.5	0.02
		1.5	171	23.4	0.14	102	5.3	0.05	219	18.6	0.08	213	19.7	0.09	209	22.3	0.11
		1.9				87	3.1	0.04	175	8.1	0.05	241	11.0	0.05	219	5.0	0.02

注:μ为均值,σ为标准差,σ/μ表示变异系数。

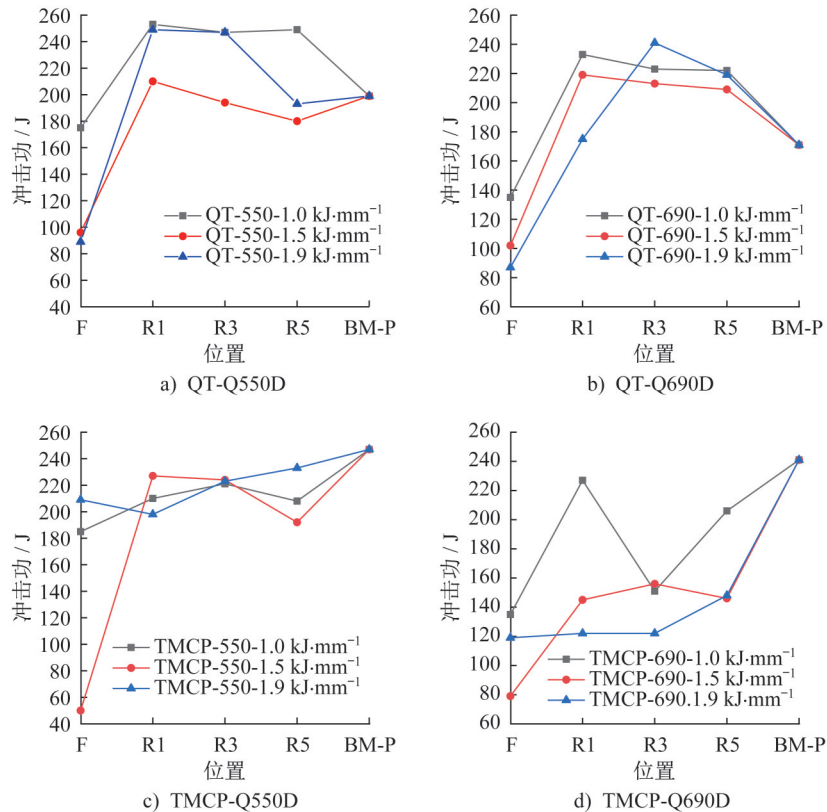


图4 不同焊接热输入下焊接接头不同区域的冲击功

Fig. 4 Impact energy for different parts of butt welded connections under various welding heat input

另外,依据《焊接接头冲击试验方法 GB/T 2650—2008》<sup>[18]</sup>的规定,缺口所在的断裂中心面可能跨越热影响区的多个子区,包括粗晶区、细晶区、部分重结晶区,甚

至延伸至母材区域,如图2c)所示。QT态Q690在R3位置、TMCP态Q690在R1位置,冲击功并未呈现随热输入增大而产生规律变化,还因为焊接热输入升高既影响

HAZ的组织形貌及韧性表现,又影响HAZ的物理宽度。即使在距离熔合线相同位置取样,不同热输入下冲击韧性试件缺口所在中心面跨越的HAZ粗晶区、细晶区、部分重结晶区的占比也会发生变化。

## 2.2 交货状态对接头冲击韧性的影响

图5分别给出了不同牌号高强度钢,在同样焊接热输入下的QT和TMCP接头试样在不同取样位置的冲击

功。可以看出:

(1) 除试件QT 550-1.5  $\text{kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ 外,母材是QT态的焊接接头热影响区的冲击韧性均高于母材本身的冲击韧性,最高可增加41%。试件QT550-1.5  $\text{kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ 的热影响区部分区域冲击韧性下降可达10%。

(2) 母材是TMCP态的焊接接头,其热影响区冲击韧性在不同位置显示出6%~49%的降低,且均低于母材的冲击韧性。

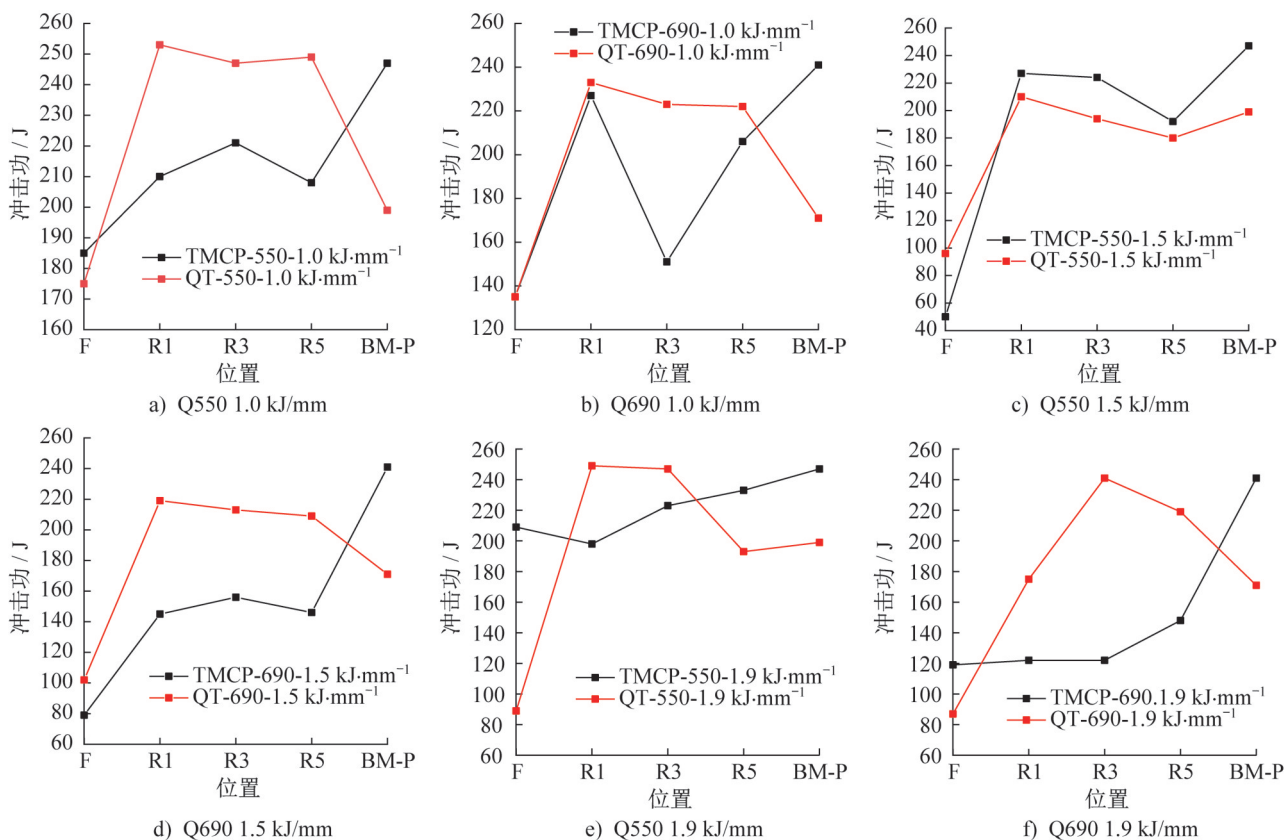


图5 不同交货状态下焊接接头不同区域的冲击功

Fig. 5 Impact energy for different parts of butt welded connections under various manufacturing process

## 3 韧脆转变温度

由于TMCP态高强度钢焊接接头热影响区冲击韧性有明显下降,且低于母材冲击韧性,并成为该种材料薄弱环节,其机理如前所述,而且这一现象随着钢强度提高、低温冲击韧性要求提高和焊接热输入增加而愈加明显,故而在实际工程中应引起重视。鉴于此,本文针对TMCP态Q690D的焊接接头热影响区进行韧脆转变温度研究。焊接热输入取工程常用值1.5  $\text{kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ ,试样缺口位置为距熔合线3 mm处。韧脆转变温度是工程设计中常用来参考作为防范材料脆断的重要指标,当钢材所处的温度低于特定值 $T_k$ 时,材料内部的体心立方和部分密排六方的晶体结构的断裂方式由韧性断裂转变为脆性断裂,即出现了低温脆性现象。这个特定温度值 $T_k$ 即为韧脆转变温度,又

称为冷脆转变温度。因此,韧脆转变温度可以作为一个用于指导设计的直观材料韧性参数。

根据王元清等<sup>[7,8,19]</sup>的研究结果,高强度钢在各个温度下的冲击功与温度关系可以用Boltzmann函数进行拟合,且拟合结果的相关性较好,具有较小的残差。拟合公式如下:

$$A_t = \frac{A_1 - A_2}{1 + \exp\left(\frac{t - T_k}{T_R}\right)} + A_2 \quad (3)$$

式中: $A_t$ 为对应温度 $t$ 的冲击功; $A_1$ 为下平台能; $A_2$ 为上平台能; $T_R$ 为钢材韧脆转变温度区的范围,其值越小材料越容易发生由塑性向脆性的转变。而韧脆转变温度 $T_k$ 越低,代表所测材料的低温韧性越好。将试件分别进行

-60℃、-40℃、-20℃、0℃和20℃下温度冲击韧性试验,各工况有3个试件,结果如表5。

表5 TMCP Q690热影响区R3位置试件的冲击功  
Table 5 Impact energy of the specimen at R3 position in the HAZ of TMCP Q690

温度/℃	冲击功/J			平均值/J
-60	92	84	70	82
-40	96	120	106	107
-20	142	100	102	115
0	140	116	116	124
20	120	138	134	131

回归得到的 Boltzmann 函数拟合曲线如图6所示,相关参数如表6,观察图6拟合曲线的下降段可知韧脆转变温度在-40℃以下时,由于数据有限,无法较好拟合冲击功与韧脆转变温度的关系。

表7将现有文献中已有材料的韧脆转变温度结果与本文研究结果做比对。可以看出,本文研究中所采用

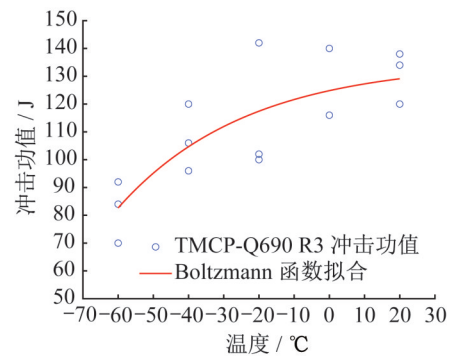


图6 TMCP-Q690热影响区R3位置冲击功拟合曲线  
Fig. 6 Impact energy fitting curve at R3 position of TMCP-Q690 HAZ

表6 韧脆转变温度计算结果

Table 6 Ductile-to-brittle transition temperature

$A_1/J$	$A_2/J$	韧脆转变温度 $T_k/°C$	韧脆转变温度范围 $T_R/°C$
—	135.0	—	36.5

TMCP态Q690D焊接接头热影响区的冲击功相对较高,韧脆转变温度相对更低,有更好的冲击韧性。

表7 现有研究中的韧脆转变温度

Table 7 Existing studies on ductile-to-brittle transition temperature of steels

钢材牌号	质量等级	交货状态	板厚	位置	$A_1/J$	$A_2/J$	韧脆转变温度 $T_k/°C$	韧脆转变温度范围 $T_R/°C$
Q345 <sup>[8, 19]</sup>	—	—	60	BM	0	157.8	-31.3	16.6
			90	BM	0	161.4	-26.1	17.3
			120	BM	0	123.3	-18.1	12.8
			150	BM	0	89.6	-12.1	8.7
Q460 <sup>[7]</sup>	C	QT	—	WM	25.3	53.3	-29.3	14.3
			14	HAZ	11.6	57.2	-20.1	22.9
			—	BM	24.4	58.8	-11.1	3.3
Q690(本文)	D	TMCP	20	HAZ	—	139.8	< -40.0	44.6
			—	WM	46.0	74.5	-13.9	4.8
Q960 <sup>[8]</sup>	—	QT	14	HAZ	25.0	62.8	-12.7	6.2
				BM	27.2	81.5	-19.5	5.7

注:“—”表示原文未注明。

## 4 结论

本文分别选用Q550D和Q690D两种级别的20mm厚高强度钢板制作等强匹配的焊接接头,在接头的母材、焊材、热影响区位置选取并制作标准冲击韧性试件,并进行-20℃下的冲击韧性试验。研究了TMCP和QT两种交货状态和1.0 kJ·mm<sup>-1</sup>、1.5 kJ·mm<sup>-1</sup>和1.9 kJ·mm<sup>-1</sup>三种焊接热输入下对焊接接头各位置冲击韧性的影响,并

针对20mm厚TMCP态Q690D高强度钢,设计了从-60℃到20℃的温度冲击韧性试验,来获取其韧脆转变温度。主要得到以下结论:

(1) 高强度钢的交货状态对焊接接头的冲击韧性有显著影响。对于QT态高强度钢,焊接接头在热影响区的冲击韧性要优于母材的冲击韧性;对于TMCP态高强度钢,焊接接头在热影响区的冲击韧性要低于母材的冲击韧

性,在实际工程中需特别注意。

(2) 焊接热输入对焊接接头冲击韧性的影响在试验结果中未呈现明显规律。因为热输入变化会影响冲击韧性试件同一位置中间截面包含的热影响区子区占比。

(3) 对 TMCP 态 Q690D 高强钢焊接接头的不同温度下冲击韧性试验研究表明, TMCP 态 Q690D 高强钢的上平台能较高,达到了和普通钢 Q345 相近的水平,其韧脆转变温度较已有文献中类似材料更低,具有更好的冲击韧性。

综上所述,对接焊缝接头 HAZ 力学行为表现出显著的空间变异性,常规冲击韧性试验所得结果往往反映的是多个热影响区子区的综合效应。建议在后续研究中进一步明确缺口位置对应的具体热影响区子区,以提升试验结果的代表性和针对性。

## 参考文献:

- [ 1 ] ELENI G. Use of high strength steel grades for economical bridge design [D]. Delft: Delft University of Technology, 2012.
- [ 2 ] SHI G, HU F X, SHI Y J. Recent research advances of high strength steel structures and codification of design specification in China [J]. International Journal of Steel Structures, 2014, 14(4): 873-887. DOI: 10.1007/s13296-014-1218-7.
- [ 3 ] 范重, 王喆, 唐杰. 国家体育场大跨度钢结构温度场分析与合拢温度研究 [J]. 建筑结构学报, 2007, 28(2): 32-40. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2007.02.004.  
FAN Zhong, WANG Zhe, TANG Jie. Analysis on temperature field and determination of temperature upon healing of large-span steel structure of the National Stadium [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(2): 32-40. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2007.02.004. (in Chinese)
- [ 4 ] AFKHAMI S, JAVAHERI V, AMRAEI M, et al. Thermomechanical simulation of the heat-affected zones in welded ultra-high strength steels: Microstructure and mechanical properties [J]. Materials & Design, 2022, 213: 110336. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.110336.
- [ 5 ] HO H C, CHUNG K F, HUANG M X, et al. Mechanical properties of high strength S690 steel welded sections through tensile tests on heat-treated coupons [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 166: 105922. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.105922.
- [ 6 ] 王彦博, 孙哲, 赵道, 等. 考虑焊接热影响区软化的高强钢对接接头强度 [J]. 建筑结构学报, 2022, 43(5): 26-35. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.0462.  
WANG Yanbo, SUN Zhe, ZHAO Xiao, et al. Strength of high strength steel butt welded connections with consideration of heat affected zone softening [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(5): 26-35. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.0462. (in Chinese)
- [ 7 ] 王元清, 林云, 石永久. 高强钢 Q460C 对接焊缝低温冲击韧性试验 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(6): 971-980. DOI: 10.11717/j.issn:2095-1922.2015.06.02.  
WANG Yuanqing, LIN Yun, SHI Yongjiu. Experimental study on impact toughness of Q460C high strength steel butt weld under low temperature [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2015, 31(6): 971-980. DOI: 10.11717/j.issn:2095-1922.2015.06.02. (in Chinese)
- [ 8 ] 王元清, 刘希月, 石永久. 960 MPa 高强度钢材及其焊缝低温冲击韧性试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5): 915-919. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2014.05.027.  
WANG Yuanqing, LIU Xiyue, SHI Yongjiu. Experimental study on impact toughness of 960 MPa high-strength steel and its butt weld at low temperature [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(5): 915-919. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2014.05.027. (in Chinese)
- [ 9 ] 张天会. 新型低碳贝氏体钢焊接接头疲劳裂纹扩展可靠性研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.  
ZHANG Tianhui. The reliability study on crack growth of new low-carbon bainitic steel weld joints [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [ 10 ] 贾祥才. 热处理工艺对高强高韧低合金钢组织和性能的影响 [D]. 郑州: 郑州大学, 2012.  
JIA Xiangcai. Effect of heat treatments on microstructure and properties of high strength and high ductility low alloy steel [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012. (in Chinese)
- [ 11 ] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 低合金高强度结构钢: GB/T 1591—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.  
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. High Strength Low Alloy Structural Steels: GB/T 1591—2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018. (in Chinese)
- [ 12 ] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料 维氏硬度试验 第 1 部分: 试验方法: GB/T 4340.1—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration. Metallic Materials—Vickers Hardness Test—Part 1: Test Method: GB/T 4340.1—2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)
- [ 13 ] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法: GB/T 229—2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.  
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Metallic Materials—Charpy Pendulum Impact Test Method: GB/T 229—2020 [S]. Beijing:

- Standards Press of China, 2020. (in Chinese)
- [14] RAN M M, SUN F F, LI G Q, et al. Experimental study on the behavior of mismatched butt welded joints of high strength steel [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 153: 196-208. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.10.003.
- [15] LIU X, CHUNG K F, HO H C, et al. Mechanical behavior of high strength S690-QT steel welded sections with various heat input energy [J]. *Engineering Structures*, 2018, 175: 245-256. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.08.026.
- [16] CHEN C, CHIEW S P, ZHAO M S, et al. Welding effect on tensile strength of grade S690Q steel butt joint [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 153: 153-168. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.10.009.
- [17] PENG Y, ZHANG Y J, ZHAO L, et al. Effect of heat input and heat treatment on microstructure and mechanical properties of welded joint of TMCP890 steel [J]. *Welding in the World*, 2018, 62(5): 961-971. DOI: 10.1007/s40194-018-0587-5.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 焊接接头冲击试验方法: GB/T 2650—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration. *Impact Test Methods on Welded Joints: GB/T 2650—2008 [S]*. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)
- [19] 王元清, 胡宗文, 石永久, 等. 结构钢厚板低温冲击韧性试验研究 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2010, 31(9): 1179-1184. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7043.2010.09.008.
- WANG Yuanqing, HU Zongwen, SHI Yongjiu, et al. Testing the impact resistance of thick structural steel plate at low temperatures [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2010, 31(9): 1179-1184. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7043.2010.09.008. (in Chinese)