

# 芜湖长江大桥钢梁焊接接头性能研究

陈鹏, 陈建彬

(西南交通大学 材料科学与工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:**对芜湖长江大桥用钢 14MnNbq 的焊接接头进行了试验研究。重点分析了其焊接线能量、层间温度变化对焊接接头-30℃冲击韧性的影响,利用光学显微镜和电子显微镜观察接头组织,并分析研究了其中存在的夹杂物及其对焊接接头性能的影响。结果表明:中小线能量焊接,层间温度在 80℃~200℃变化时,焊接接头-30℃冲击韧性好;线能量超过 40 kJ/cm 时,焊接接头冲击韧性明显下降;其中存在大量的硫化物,这些非金属夹杂物数量多,分布极不平均,导致焊接接头低温冲击韧性值离散度大,数值偏低。

**关键词:**焊接线能量;层间温度;冲击韧性;非金属夹杂

**中图分类号:** TG457; TG407

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-2303(2009)10-0021-03

## Study on performance of welded joints in Wuhu Yangtze River Bridge

CHEN Peng, CHEN Jian-bin

(College of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In this paper the welded joints of 14MnNbq alloy steel in Wuhu Yangtze River Bridge are tested and researched, and focus on the effect of welding heat input and interpass temperature on the impact toughness of the welded joints -30℃ temperature. The microstructure of the welded joints is observed under the optical microscope and the effect of the non-metallic inclusion in the alloy steel on the mechanical properties of welded joints is discussed and analyzed. The result shows that the value of the welded joints is better at the condition of medium or small heat input at 80℃~200℃ interpass temperature and the impact toughness decreases greatly when heat input exceeds 40 kJ/cm and there are a lot of sulfide inclusions in the alloy steel. These non-metallic inclusions badly dispersed in the alloy steel are harmful to the mechanical properties of welded joints. Their existence will decrease the impact toughness of the welded joint at low temperature, and increase the discreteness of the measured data.

**Key words:** welding heat input; interpass temperature; impact value; non-metallic inclusions

## 0 前言

芜湖长江大桥是我国目前已建成的最大公路铁路桥,首次全面选用 14MnNbq 作为其钢梁用钢,控制 C, S, P 含量,加入适量 Nb,通过正火处理,保证其具有高的韧性和强度以及较好的焊接性。芜湖桥钢梁为桁架结构,主要结构为弦杆,大部分为箱型梁,小部分为工型梁,全焊结构。主要焊缝为对接焊缝和角焊缝,这也是制造过程中质量的关键。在 14MnNbq 钢焊接接头生产和试验中发现:焊缝各项性能指标稳定,满足文献[1]要求;而焊接热影响区(HAZ)-30℃低温冲击功值离散程度大,多层焊对接

头  $A_{kv}(-30℃)$  最高、最低值分别为 250 J 和 12 J,其接头性能非常不稳定,出现了不少低于文献[1]要求的冲击值,易造成隐患。为此,对 14MnNbq 钢焊接接头性能进行了分析研究。

## 1 实验方案

采用多层焊焊接接头进行试验。研究焊接线能量和层间温度对焊接接头性能的影响,对试验冲击试样和部分生产引弧板冲击试样进行组织分析和夹杂物分析。

### 1.1 试验用板材

在改变焊接线能量(层温不变)和焊接层温(线能量不变)的试验中,均采用 36 mm 厚和 44 mm 厚的 14MnNbq 钢板开坡口对接。

收稿日期:2009-09-24

作者简介:陈鹏(1961—),男,四川什邡人,副教授,硕士,主要从事焊接结构及工艺方面的研究工作。



### 1.2 不同焊接线能量冲击试验

焊接接头开双 U 型坡口,用  $\phi 5$  mm 的 H08Mn2E 焊丝和 S101 焊剂进行多层埋弧焊,焊接线能量分别控制在 32 kJ/cm、36 kJ/cm、43 kJ/cm,层温保持在 200 °C。对焊接三块试板,取 3 个焊接热影响区冲击试样,冲击温度-30 °C,按照 GB2650-89 执行。

### 1.3 不同焊接层间温度冲击试验

接头形式和焊接材料与改变焊接线能量冲击试验一致。焊接线能量保持为 35 kJ/cm,层间温度分别控制在 80 °C、140 °C、200 °C,对焊接三块试板,每块试板取 6 个焊接热影响区冲击试样。

### 1.4 光镜观察

对 40 个冲击韧性值高低不同的熔合线和热影响区试样进行取样,经打磨、抛光、腐蚀处理后,对垂直于断裂面的母材、焊缝、HAZ 的组织形态,缺陷状态和数量进行光镜观察。

### 1.5 电镜观察

对冲击功高低不同的 20 个冲击试样取样,并按要求制备。在 H-700H 透视电子显微镜下观察 HAZ 组织精细结构,并对碳化物进行电子衍射分析。用 HITACHIS-530 扫描电子显微镜进行观察,分析和比较冲击功值高低不同的断口形貌差异,观察缺陷对断裂的影响。

## 2 实验结果

(1)不同焊接线能量-30 °C冲击试验结果如表 1 所示。

(2)不同层温-30 °C冲击试验结果如表 2 所示。

表 1 不同焊接线能量-30 °C冲击试验结果

组号	线能量 E/kJ·cm <sup>-1</sup>	层温 T/°C	冲击功/J			母材 比例	HAZ 比例	焊缝 比例
			最小	最大	平均			
1	32	200±5	29	115	80	0.82	3.90	5.28
2	36	200±5	33	135	60	0.10	4.69	5.21
3	42	200±5	17	120	48	0.10	6.42	3.48

注:母材、HAZ、焊缝的比例是指它们占冲击试样断口边缘尺寸,各区比例尺寸皆为 6 个试样的平均值。

表 2 不同层温-30 °C冲击试验结果

组号	线能量 E/kJ·cm <sup>-1</sup>	层温 T/°C	冲击功/J			母材 比例	HAZ 比例	焊缝 比例
			最小	最大	平均			
1	34	80±5	92	161	113	0	4.91	5.09
2	34	140±5	51	98	69	0	4.62	5.38
3	34	200±5	137	179	148	0	5.31	4.69

(3)光镜组织观察。

对所有冲击试样进行光镜观察,其断口是由焊

缝、热影响区和母材三部分组成,而热影响区由粗晶区、细晶区和部分相变区构成。焊缝主要由铁素体+珠光体+粒状贝氏体组成;粗晶区为粒状贝氏体+少量下贝氏体组成;细晶区以及部分相变区由铁素体+珠光体组成,组织细小;母材由铁素体+珠光体组成,呈明显带状分布。所有试样各区组织形态、组成物基本无差异。

(4)母材非金属夹杂物观察。

对所有冲击试样进行了非金属夹杂物的观察,选取了其中最具有代表性的 9 组结果,如表 3 所示。表 3 中还列出了与国产 14MnNbq 成分、组织性能近似的日产 SM50C、韩国产 SM490C 钢材的非金属夹杂情况。通过光学显微镜和扫描电镜观察非金属夹杂。钢板中的夹杂物大致与板平面平行,有两头尖、中间粗的纺锤形,更多的是线带形,长度大多为 10~100  $\mu$  m,最长 1 mm。经扫描电镜波谱分析,在夹杂物中,S、Mn、Fe 含量较高。根据文献[2]可以判定夹杂物是 MnS,MnS 中夹有 FeS。FeS 比例越大,夹杂物越偏红色。

表 3 不同试样夹杂物分布

组号	试样号	测量面积 S/mm <sup>2</sup>	夹杂物 /条	单位面积夹 杂物/条·mm <sup>-2</sup>
1	1148(106 J)	74.00	471	6.36
	1147(34 J)	70.44	866	12.29
2	1176(135 J)	71.90	226	3.14
	1175(26 J)	77.00	455	5.91
3	1227(136 J)	68.50	219	3.20
	1128(12 J)	99.90	419	4.19
4	406*(153 J)	83.80	374	4.46
	404(15 J)	78.10	570	7.30
5	512*(135 J)	97.50	691	7.09
	510(33 J)	77.00	373	4.81
6	610(150 J)	77.10	327	4.24
	611(25 J)	82.00	470	5.73
7	15*(51 J)	79.90	459	5.74
	14*(142 J)	90.60	410	4.52
8	14MnNbq(1228 母材)	98.00	435	4.43
	957*(217 J)	91.50	190	2.08
9	日产 SM50C	98.60	2	0.02
	韩国产 SM490C	94.80	60	0.63

注:\*表示试样的母材部分,未包括焊缝,夹杂物统计偏多。

(5)扫描电镜和透射电镜观察。

经扫描电镜分析,所有冲击试样断口均由韧窝断口和解理端口组成,韧窝大小随试样不同而变化,韧窝中的第二相粒子存在。解理断口均呈河流状,无



冰糖花样。通常,焊缝区母材断口为韧窝,而热影响区主要是粗晶区为解理断口。冲击韧性越低,解理断口所占比例越大。在解理断口,发现有许多二次裂纹。这些二次裂纹随试样不同而长短不一,数量不变。冲击功低的试样,其二次裂纹多且较长。多数二次裂纹横切河流花样即垂直于断裂方向。经透射电镜观察,焊缝及HAZ组织中的铁素体主要以块状、板条状存在,铁素体内有较多的位错和伴错结构;焊缝组织中有细小球形夹杂,最大直径超过 $1\mu\text{m}$ ,属微观夹杂,且分布不均。在粒状贝氏体中,岛状物由板条马氏体+珠光体组成,未见孪晶马氏体和富碳奥氏体。板条马氏体中充满大量位错和位错胞,析出物均为渗碳体。

### 3 分析及讨论

通常HAZ冲击试样断口都包含了焊缝、HAZ和母材,且粗晶区的组织及其所占比例对其冲击韧性影响较大。粗晶区由粒状贝氏体+少量上贝氏体组成,故粗晶区的性能由粒状贝氏体决定。目前,大多数学者认为,若粒状贝氏体中的岛状物是M-A(孪晶马氏体+残余贝氏体组元),则其韧性较差。在本实验中,电镜观察粒状贝氏体并未发现M-A组元,岛状物是珠光体+板条马氏体+渗碳体,故韧性有所改善。实验结果也说明这一点,虽然层温升高,粗晶区温度增大,但对冲击韧性并无影响,因此可以认为没有M-A组元的粒韧性是较好的。随着线能量增加,粗晶区密度亦增大,但在线能量小于 $38\text{kJ/cm}$ 时,粗晶区密度增加并没使冲击韧性下降。当线能量大于 $40\text{kJ/cm}$ 时,粒贝组织及晶粒明显粗大,冲击韧性下降。故中小线能量(小于 $38\text{kJ/cm}$ )焊接时,焊接接头 $-30\text{℃}$ 冲击韧性好。层间温度在 $80\text{℃}\sim 200\text{℃}$ 范围内,对冲击韧性无影响。生产过程中出现的HAZ冲击韧性剧烈波动,不时由线能量随层温偶然波动造成的,这也说明影响低温冲击韧性的主要因素并不是组织变化。14MnNbq钢中的碳化物夹杂数量非常大,最大达到 $12.3\text{条/mm}$ ,最小也有 $2\text{条/mm}$ ,是日本、韩国同类钢硫化物夹杂数量的200倍和7倍。

从同一组试样比较来看,韧性低的试样夹杂物数量多。大量的试验和科学研究都证明<sup>[2-3]</sup>:非金属夹杂物对钢材性能影响很大,其数量越多,尺寸越大,则钢材的冲击韧性、断裂强度和疲劳强度越低。由于夹杂物破坏金属的连贯性,造成应力集中,裂纹首先会在夹杂物上形成,然后聚合、长大、扩展导致断裂。通过扫描电镜观察发现,在冲击断口上有数量不等的二次裂纹,这些二次裂纹便是碳化物所致。碳化物越多,二次裂纹越多,呈正比关系。观察发现二次裂纹主要发生在解理区,韧塑区很少。可以认为,14MnNbq钢焊接接头若有晶粒粗大的宽大晶粒区存在时,硫化物引起的二次裂纹数量是影响焊接接头 $-30\text{℃}$ 冲击功的主要因素。而硫化物夹杂分布的极不均匀性,造成了同等焊接条件下接头热影响区 $-30\text{℃}$ 冲击功离散度大。夹杂物集中量大的冲击试样的冲击功低,反之亦然。

### 4 结论

焊接14MnNbq钢,当线能量小于 $38\text{kJ/cm}$ ,层间温度在 $80\text{℃}\sim 200\text{℃}$ 变化时,不影响焊接接头 $-30\text{℃}$ 冲击韧性,其冲击功较高。当线能量大于 $40\text{kJ/cm}$ 时,接头冲击功下降。

随着焊接线能量、层间温度增加,焊接接头HAZ变宽,粗晶区变宽。仅当粗晶区组织晶粒变得粗大时,接头冲击韧性下降。

14MnNbq钢中存在非金属夹杂物,主要为硫化物。非金属不同,炉批、板材其数量分布不同。非金属夹杂物数量是造成14MnNbq焊接接头热影响区 $-30\text{℃}$ 冲击功离散度大的主要因素。夹杂物导致二次裂纹,夹杂物越多低温冲击功越低。

### 参考文献:

- [1] 宝鸡桥梁厂.芜湖长江大桥钢梁制造规则[S].宝鸡:宝鸡桥梁厂,1998:附录1,2
- [2] 李代锤.钢中非金属夹杂物[M].北京:科学出版社,1983:247-252,185-191.
- [3] 张树松,全爱遗.钢的强韧化机理与技术途径[M].北京:兵器工业出版社,1995:103-110.

## 钎料的基本要求

钎焊接头的质量在很大程度上取决于钎料的综合性能。为了满足钎焊的工艺要求,获得优质钎缝,钎料应满足以下基本要求:适当(低于母材)的熔点;具有良好的润湿性能和填缝性能;能与母材发生充分作用并形成牢固的结合;具有稳定和均匀的化学成分;能满足使用要求。