

15MnVNq钢56mm厚板对接接头 应变时效敏感性的研究

吴佳林工程师 夏丕旭高级工程师

(哈尔滨焊接研究所)

摘要

本文就15MnVNq钢56mm厚板接头动态与静态应变时效，焊接热应变脆化倾向及应变时效对焊缝横向和纵向COD及夏比冲击的影响进行试验分析，得出15MnVNq钢56mm厚板对接接头的焊缝金属具有明显的动态应变时效倾向。时效敏感温度在200~300℃范围内，焊缝的最脆区是先焊面的最后焊道。试验结果还表明，对低温工作的焊接结构采用应变时效试件在低温下作韧性的定量评定是必要的。

主题词 han ying duan
焊接接头 应变时效 断裂

0 序 言

15MnVNq钢是在16Mn钢基础上加入V、N元素冶炼的，轧成板材后经正火处理，使它的屈服强度比16Mnq钢高，塑性与16Mnq钢相当，它的韧性略高于后者。由于强度和韧性的提高，使这种钢材能适应大型钢结构的建造需要。考虑到结构制造中难免涉及到应变时效过程，曾对这种钢材角接头经冷矫形处理的脆化敏感性进行过评定^[1]。本文系进一步就15MnVNq钢56mm厚板对接接头动态与静态应变时效，焊接热应变脆化倾向及应变时效对焊缝横向和纵向COD及夏比冲击的影响进行试验分析。

1 试件制备

采用正火状态，厚度为56mm的15MnVNq试验用钢板，其化学成分列于表1。机械性能列于表2。对接试板开成带钝边的X型坡口，用埋弧焊工艺交替翻转焊满(图1)。

焊接工艺参数列于表3。焊丝及焊缝金属化学成分列于表4。

表1 试验用15MnVNq钢板化学成分(%)

C	Si	Mn	S	P	V	N
0.20	0.34	1.69	0.018	0.014	0.17	0.017

表2 试验用15MnVNq钢板机械性能

σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	δ_s (%)	$a_k - 40^\circ\text{C}$ (J/cm ²)	$a_{k'} - \text{时效}$ (J/cm ²)	冷弯 $d = 3a, 180^\circ$
485	635	22	47	45	完好

表3 试件焊接工艺参数

焊接材料	预热温度 (℃)	层间温度 (℃)	焊接速度 (m/h)	焊接电流 (A)	焊接电压 (V)	线能量 (kJ/cm)
H08MnMoA + 350	160~180	160~200	25	650~700	31~34	29~34

表4 焊丝及焊缝金属化学成分(%)

项 目	C	Mn	Si	Mo	S	P	其 它
H08MnMoA (标准)	≤ 0.10	$1.20 \sim 1.60$	≤ 0.25	$0.30 \sim 0.50$	< 0.30	< 0.03	Ti 0.15 (加入量)
焊 缝	0.10	1.43	0.34	0.28	0.010	0.020	V 0.041 N 0.017

动态应变时效试件的结构尺寸示于图2。横向焊缝动态应变时效试件切取部位见示意图3。纵、横向焊缝静态应变时效COD试件取样及缺口方位见图4。

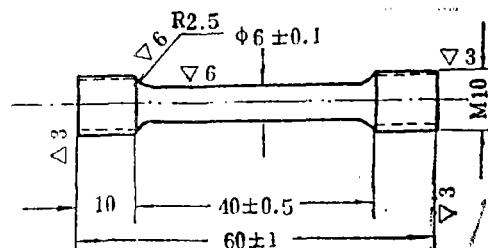
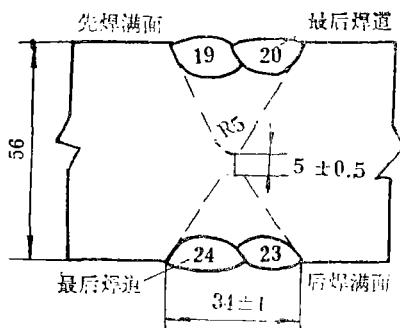


图2 动态应变时效拉伸试件

图1 接头型式

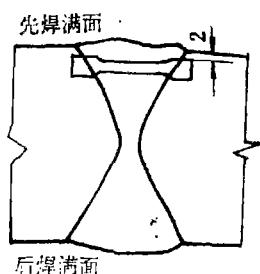


图3 焊缝动态应变时效试件取样部位

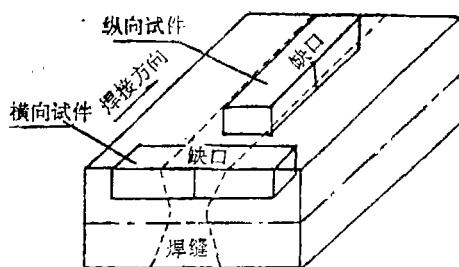


图4 纵向横向焊缝静态应变时效COD试件取样示意图

2 试验方法及结果

首先，对15MnVNq钢56mm厚板母材及对接接头横向取样的动态应变时效倾向进行了试验评定。试件系在机械式拉力机上以 0.5mm/min 加载速度进行拉伸，拉伸温度分别取 $100、150、200、250、300、400、500^\circ\text{C}$ 等几档，试验结果分别示于图5 a、b。

静态应变时效试件是先粗加工成拉伸试样，拉伸变形量分别取 3% 和 5% ，焊缝分纵向和横向两种情况进行拉伸，时效处理采用 250°C 保温 1h ，出炉空冷。COD试验系按GB2358—80规定进行，所得的结果列于表5。原始焊缝横向取样试件采用了电位法和阻力曲线法进行测试，两种方法的COD值吻合较好。各种状态下焊缝金属的夏比冲击试验结果列于表6。焊缝金属夏比冲击试件转变温度曲线见图6。

表5 COD试验结果

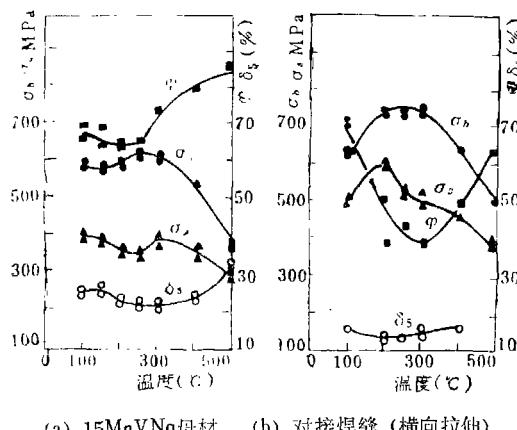


图5 不同温度对15MnVNq钢母材及横向焊缝动态应变时效力学性能的影响

试样条件	试样编号	$\delta_c (\text{mm})$
原始焊缝 横向取样	21	0.061
	22	0.062
	23	0.071
	24	0.061
	26	0.061
	27	0.054
焊缝横向 应变时效 3 %	2	0.050
	4	0.038
	7	0.033
	8	0.053
	30	0.050
焊缝纵向 应变时效 5 %	1	0.037
	3	0.038
	5	0.037
	6	0.028
	29	0.032
焊缝纵向 应变时效 3 %	01	0.038
	01	0.039
	32	0.027
	35	0.021
焊缝纵向 应变时效 5 %	02	0.027
	02	0.034
	33	0.028
	34	0.024
	36	0.026

表6 夏比冲击试验结果

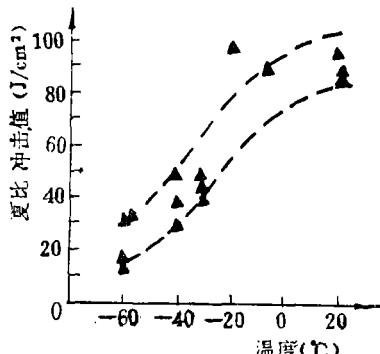


图6 焊缝金属夏比冲击试件转变温度曲线

试 样 条 件	夏比冲击值 (J/cm ²)			夏比冲击 平均值 (J/cm ²)
	60	71	59	
焊 态 先 焊 面	60	71	59	63
焊 态 后 焊 面	104	155	63	105
先 焊 面 焊 缝 横 向 3 % 应 变 时 效	29	28	34	31
后 焊 面 焊 缝 横 向 3 % 应 变 时 效	34	23	45	34
先 焊 面 焊 缝 横 向 5 % 应 变 时 效	20	20	25	21
后 焊 面 焊 缝 横 向 5 % 应 变 时 效	24	28	24	25
先 焊 面 焊 缝 纵 向 3 % 应 变 时 效	33	32	28	30
后 焊 面 焊 缝 纵 向 3 % 应 变 时 效	31	25	25	26
先 焊 面 焊 缝 纵 向 5 % 应 变 时 效	23	18	15	18
后 焊 面 焊 缝 纵 向 5 % 应 变 时 效	20	25	25	23

3 试验结果的分析讨论

3.1 15MnVNq钢母材与焊缝的动态应变时效倾向明显差异

从图5的试验结果看出，经过100~500℃不同温度的动态应变时效处理后，焊缝的强度指标 σ_b 、 σ_s 在200~300℃范围内出现了最大值，相应延性指标 δ_s 、 ψ 则出现了最低值(图5b)，母材部分其规律性则不甚明显，见图5a。另外以量值大小方面看，在同一处理温度下，焊缝强度又均比母材高，而延性指标又均比母材低，这样就更明显地展现了焊缝金属的脆化倾向。比较焊缝与母材化学成分(表1、表3)、合金元素量级相当，只是V、N元素相对比值上有较大差异，根据15MnVNq钢材成分设计，V含量应在0.010%~0.020%范围内。15MnVNq桥梁钢是16Mnq钢基础上加入V、N等元素，其强化机理是由于钒氮化合物呈质点状弥散在钢中，使其屈服强度比16Mnq有所提高(约98MPa)，韧性也略高于16Mnq，只是塑性与16Mnq钢保持在同一水平上，且无厚度效应。然而，焊缝经动态应变时效处理后，强度指标大大超过母材，而塑性指标又明显低于母材，探求其原因，主要是焊缝中V/N比过低，剩余的固溶氮促成了应变时效的脆化。

关于钢的应变时效，自从19世纪末由Kent和Martens提出以来，完成了许多实验。关于钢的应变时效的原因，Cottrell等提出，起因于位错和溶质原子的相互作用。这一点已为后来的许多论文所证实^[2]。应变在钢中产生位错，C和N原子集积到这些位错周围形成柯氏气团，结果使位错锁住，材质脆化。C、N等溶质原子在所产生的位错周围形成气团，需要一定的时间，这是由原子扩散速度所决定的。这个时间很自然取决于位错密度以及溶质原子的浓度和温度。N的存在对上述钢的应变时效影响甚大，专门的影响实验已证明，当加入了固定N和C的某些元素后，上述钢的应变时效就变得难于发生，为了达到这个目的，往往加入诸如Zr、Al、V、Ti、Cr、B、Nb等元素。

在本试验条件下，显然是因为焊缝中固定N的元素——V含量过低，所以导致了焊

缝金属与母材之间在应变时效的倾向方面出现了明显差异。

3.2 56mm厚板对接接头经应变时效后焊缝横向和纵向COD及夏比冲击值

从表5、表6中可看出56mm厚板对接接头经应变时效后，焊缝横向和纵向COD及夏比冲击值比未经应变时效焊缝的COD及夏比冲击值低，这可由前面所述关于钢的应变时效机理解释。文献[3]也指出，实际上时效条件是由变形以及随后稳定化退火产生的，该过程也可称为稳定化应变时效，而焊接过程也包含动态时效，即热应变脆化。对于正常的焊接接头，在无缺口存在的情况下，焊接过程中所产生的热应变一般不超过1.0%。在此基础上，再经历人工应变时效，自然要导致韧性降低。从表5、表6还看出，变形3%和5%焊缝比较，前者的COD值和冲击值大于后者，这进一步说明形变量越大，使其韧性下降得更多。

此外，56mm厚板对接接头经应变时效后，焊缝纵向取样试件的COD值及冲击韧性低于横向取样试件的值。从冲击试件宏观断口形貌表明了这一差别（图7a、b）。其主要原因是纵向焊缝拘束度大，焊缝残余应力高，相应纵向焊缝在随后的应变时效处理中，较之横向焊缝会损失更多的塑性而加重了脆化倾向。

上田幸雄利用热弹性有限元法对焊接面过程中内应力应变分布进行了数值解析^[4]，发现焊接纵向瞬时应力 σ_x 要比横向应力 σ_y 大得多，而且越靠近焊缝纵向拉伸应力 σ_x 越集中。另外佐藤邦彦等的试验结果也指出^[5]，焊缝附近纵向残余应力 σ_x 也是比横向残余应力 σ_y 大得多，使之残余应变也大。这样，即使在同一名义变形量下，最终纵向应变量必然大于横向应变量，从而导致韧性下降得多些。从上述分析看出，焊接接头应变时效后韧性的降低主要来自纵向取样试件，而以往焊接接头应变时效试验标准的取样方案却规定为横向取样，看来，这一问题很值得深入探讨。

3.3 56mm厚板对接接头应变时效与低温条件的关系

从表5、表6中可看出，经不同条件应变时效焊缝的COD值大约在0.021~0.050mm之间，夏比冲击值在10~34J/cm²之间，它们分别与56mm厚板对接接头焊缝金属在-30℃左右时的 δ_v 值^[6]以及图6所示56mm厚板对接接头焊缝金属在-50℃时的冲击值相同，这说明经应变时效的接头制件，相当于在低温下某个温度的材质性能，使其韧性大大降低。焊接结构在制造过程中往往会经受应变时效过程（如冷矫形等），故在低温下工作的焊接构件，考核应变时效后的低温韧性就显得很必要。



图7 5%应变时效焊缝冲击断口
(a) 横向取样 (b) 纵向取样

3.4 56mm厚板对接接头焊缝的最脆区

从表6看出，在不同的情况下，基本上先焊面的冲击值低于后焊面的冲击值。取样时多取至表面最后一道焊道。由于该焊道未经回火，晶粒粗大，所以冲击韧性必然低。然而，对于先焊面的最后焊道，由于后焊面焊接过程中，焊道收缩引起了先焊面表面焊道的拉伸热应变而导致脆化，所以56mm厚板对接接头的最脆区是先焊面的最后焊道。

4 结 论

1. 15MnVNq钢56mm钢板对接接头的焊缝金属具有明显的动态应变时效倾向，时效敏感温度在200~300℃范围内，而母材则不甚明显，其原因是与焊缝中V/N比过低直接相关。

2. 对接接头试件经应变时效后焊缝横向取样的COD及夏比冲击值高于纵向取样，现行焊接接头应变时效试验方法标准中规定的取样方案值得进一步探讨。

3. 焊接结构在制造过程中往往会经受应变时效过程，在低温下工作的焊接构件，考核其应变时效后的低温韧性就显得很必要。

4. 由于焊接热应变脆化影响，15MnVNq钢56mm厚板对接接头的最脆区是先焊满面的最后焊道。

(1987年10月22日收到)

参 考 文 献

- 1 夏丕旭等. 模拟H型桥梁杆件角接头冷矫形COD评定. 哈尔滨焊接研究所研究报告, 1980.
- 2 日本溶接协会HSE委员会编. 钢溶接部の熱ひずみ脆化(レビュー). 1977.
- 3 Berkhout C F, Van den Brink S H. Welding and Metal Fabrication, 1978, (6): 347~351
- 4 Ueda Y, et al. IIWX-616-71.
- 5 佐藤邦彦. 溶接工学. 理工学社, 1979.
- 6 夏丕旭等. 15MnVNq钢56mm厚板对接接头COD及脆性转变温度评定. 哈尔滨焊接研究所研究报告, 1982.

A STUDY OF STRAIN AGING SENSIBILITY OF 15MnVNq

STEEL BUTT JOINT WITH THICK PLATES

*Engineer Wu Jialin, Senior Engineer Xia Pixu**(Harbin Research Institute of Welding)***Abstract**

In this paper, the dynamic and static strain aging, the tendency of welding hot straining embrittlement of butt joint of double V groove with root face and the influence of strain aging on COD and Charpy impact of transverse and longitudinal weld of 15MnVNq steel butt joint with 56mm thick plates are investigated. Results show 15MnVNq steel butt weld has an obvious tendency towards dynamic strain aging. The sensitive temperature range is about 200~300°C. The most embrittled region of the butt weld is the last bead of the first finished side in welding by both sides. The test results show that it is necessary to use strain aged samples for judging quantitatively the low temperature toughness for welded structure under low temperature working condition.

Key words Welded joint Strain aging Fracture