

九江长江大桥钢梁用材的研究

铁道部科学研究院 乌通儒 李旭光 苏本伟

一、前 言

目前正在建设中的九江长江大桥为公铁两用桥,铁路桥全长7675.4m,公路桥全长4460.1m。正桥为上下双层公铁两用栓焊钢梁,钢梁全长1808.6m,四联十一孔,由北至南桥式为:2联($3 \times 162\text{m}$)桁梁+1联($180\text{m}+216\text{m}+180\text{m}$)系杆拱桁梁+1联($2 \times 126\text{m}$)桁梁。桥式简图见图一。由于江北(湖北省小池口)目前尚无铁路,钢梁架通后先通公路桥。

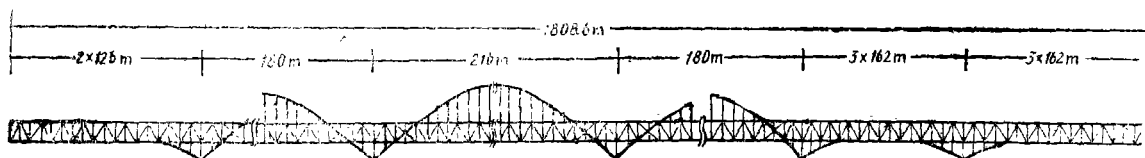


图1 九江长江大桥钢梁示意图

钢梁主体系为带竖杆的三角形桁架,桁高16m,节间长9m,在支点处设有下加劲桁(桥台处除外)。180m+216m+180m梁除设有下加劲桁外还加劲拱,成为刚性桁梁柔性拱体系。加劲桁高16m,加劲拱的矢高在180m跨为24m,在216m跨为32m。两主桁中心距12.5m,双线铁路位于钢桁梁下弦之间。

钢梁总重35500t,其中16Mnq钢15500t,15MnVNq钢18250t,其余为A₃钢及高强度螺栓。由于15MnVNq(15锰钒氮桥梁钢)钢强度高,使它成为九江桥的主要钢种。

二、为什么要选用15MnVNq钢

早在1974年,国家下达文件,要求九江长江大桥建成一座栓焊钢桥,后来在桥位钻探时又发现大面积的溶洞,这就使九江桥的主跨达到216米。经初算,若仍采用16Mnq钢,就满足不了设计要求。

16Mnq桥梁钢有明显的板厚效应,强度随板厚增加而降低。用厚度为24mm板与40mm板作比较,承载能力虽增加了33.3%,而钢板的自重却增加了66.7%。为了把九江桥建成一座大跨度的栓焊梁,必须应用强度更高的新钢种。

在当时条件下,能选择的钢种只有15MnVNq钢,①它的强度合适,屈服强度比16Mnq高100MPa,可以设计出单跨长216m的栓焊梁;②它有试验与应有基础。铁道部有关单位已经

开展了研究工作,对它的性能有所了解;白河桥作为九江桥的试验桥也在1976年建成通车。

三、15MnVNq钢研究过程概述

15MnVNq钢诞生于1965年,当时准备在枝城长江大桥上首次应用它,后来因为种种原因,枝城桥没有用上。七十年代,用15MnVNq钢造了两座铁路桥:(北)京——承(德)线上的白河桥与京山线上的永定新河桥,最大跨度为144米,最大板厚达到40毫米。

1973年,九江桥开始兴建,在下达的文件中明确规定“要建成栓焊梁,有关新钢种的供应,请冶金部协助解决”。

当时无其它钢种可供选择,只有15MnVNq钢较有把握。

1976年,铁道部与鞍钢达成协议,为在九江长江大桥上应用15MnVNq钢,冶炼了500t试验料,钢板最厚为56mm,板长18m。

这500t试验料的技术条件,介于15MnVNqA与15MnVNqB之间。

从1976年开始,铁道部组织路内外一些单位集中对15MnVNq钢的厚板进行科研攻关,内容包括:钢材的可焊性、焊接工艺参数选择、焊接材料、钢材及焊接接头疲劳、栓接接头疲劳、杆件的受压稳定、栓接接头的传力理论、钢材及焊接接头的断裂力学试验等等;试验费用高达二百余万,论文出了一百多篇。

1986年7月底,铁道部在山海关召开专家会议,研究在九江桥设计前还有哪些科研工作要进行。会议一致认为:(1)九江桥焊接试验组所提出的一套厚板焊接工艺基本可行;(2)现有的钢材焊接性能不好,施焊参数的可变范围很窄,在大生产中很难实施,因此,钢材要优化;(3)现有焊缝的强度高,韧性差,与钢材不匹配,焊接材料也要优化。

1986年9月中,负责九江桥科研工作的三个单位:大桥工程局、铁道部科学研究院、山海关桥梁工厂在武汉开会,协商了钢材的优化方案。

同年10月,冶金部、铁道部在鞍山开了一次联席会议,签订了鞍铁协86—31协议,在第一批500吨试验料的基础上,对钢材化学成分及机械性能加以调整。1986年年底,鞍钢按鞍铁协86—31协议的技术条件生产了一炉试验钢,计107吨。铁道部立即组织有关单位进行了各种试验,结果证明:钢材优化达到了预期目标,焊接性能有了改善。

1987年,冶金部与铁道部就九江长江大桥用的18250吨15MnVNq钢的供货标准开了多次会议,最后在1987年11月达成了协议,决定把15MnVNq钢分为A、B、C三级,技术条件见表1、表2。

钢梁的主要受力杆件用15MnVNq-C制成。从表1、表2可见,C类钢中C、P、S、V、N等项元素进行了严格控制,从而使钢材在基本保持强度水平的基础上把碳当量 C_{eq} 值降下来,满足焊接结构钢 $C_{eq} \leq 0.45\%$ 的要求;同时使热影响区的性能有明显改善。

在钢桥中,不同部位的杆件受力状态不同,所用材料可以不同,做到优质优用,使钢梁的质量好、成本低,这才是优秀的设计。因此铁道部决定将15MnVNq钢分为A、B、C三级,三级钢的用量各为:15MnVNqA5236t、15MnVNqB5766t、15MnVNqC7245t。

九江桥所用的15500t16Mnq钢由武汉钢铁公司供货。16Mnq钢在我国是一个成熟的钢种,到目前为止,约有15万吨16Mnq钢在铁路钢梁上服役,早期的桥梁已经历了二十多年铁路运

15MnVNq与16Mnq的化学成分(%)

表1

钢 号	标准	C	Si	Mn	P	S	V	N
15MnVNq—C	鞍铁协 37—11—13	≤0.18	0.2/0.6	1.3/1.7	≤0.02	≤0.015	≤0.18	≤0.018
15MnVNq—B	YB(T) 10—81	≤0.18	0.2/0.6	1.3/1.7	≥0.035	≥0.035	0.1/0.2	0.01/0.02
15MnVNq—A	YB168—70	0.12~0.20	0.2/0.6	1.2/1.7	≥0.040	≥0.040	0.16/0.25	0.014/0.022
16Mnq		0.12~0.20	0.2/0.6	1.2/1.6	≥0.035	≥0.035	—	—

注：箱型杆件用16Mnq时，其S、P含量均应小于0.025%

15MnVNq与16Mnq的机械性能

表2

钢 号	标准	板厚 mm	σ_s N/mm ²	σ_b N/mm ²	δ_5 %	$a_k-10^\circ\text{C}$ J/cm ²	$a_k\text{时}$ J/cm ²	冷弯 d=3a $\alpha=180^\circ$
15MnVNq—C	鞍铁协 87—11—13	—	≥411.6	≥548.8	≥19	≥49	≥49	完好
15MnVNq—B	YB(T) 10—81	≤25	≥421.4	≥568.4	≥19	≥39.2	≥39.2	完好
		26~60	≥411.6	≥548.8	≥19	≥39.2	≥39.2	完好
15MnVNq—A	YB168—70	10~25	≥4.41	≥588	≥18	≥29.4	≥29.4	完好
		26~38	≥411.6	≥548.8	≥17	≥29.4	≥29.4	完好
		40~50	≥392	≥529.2	≥17	≥29.4	≥29.4	完好
16Mnq	YB(T)10—81	≤16	≥343	≥509.6	≥21	≥29.4	≥29.4	完好
		17~25	≥323.4	≥490	≥19	≥34.3	≥34.3	完好
		26~36	≥303.8	≥470.4	≥19	≥34.3	≥34.3	完好
		38~50	≥284.2	≥470.4	≥19	≥29.4	≥29.4	完好

输的考验。这些桥梁迄今未发生过脆断事故，这就证明16Mnq钢具有良好的性能，因此本文不介绍16Mnq钢的性能重点放在探讨15MnVNq钢的性能上。

四、15MnVNq钢的性能

自15MnVNq钢问世以来，铁道部对15MnVNq钢的研究工作一直在断断续续地进行，取得了大量的科学数据，再加有白河桥的建造经验，这就为在九江桥上应用15MnVNq钢打下了基础。

1. 15MnVNq钢的强化机理

概括地说，15MnVNq钢是在16Mnq钢的基础上加入钒、氮元素冶炼的。轧成钢板后要经过正火处理。它的屈服强度比16Mnq钢高100N/mm²；它的塑性与16Mnq相当，韧性高于16Mnq钢。氮元素取自空气，我国拥有丰富的钒铁资源，因此，15MnVNq钢是一种适合于我国资源状况的新型的高效钢材。

15MnVNq钢板为什么要经过正火处理呢？因为热轧态的钢板强度高、韧性差。将热轧

的钢板重新加热至奥氏体相区域 (900—955℃), 然后在空气中冷却至室温。在冷却过程中钒的碳、氮化合物会沉淀出来, 均匀地弥散于钢中, 有效地细化铁素体晶粒, 从而改善了钢板的韧性。正火钢板由于潜在的沉淀硬化作用较少, 故其屈服强度比热轧钢板低。

15MnVNq钢板有一个明显的优点: 厚板与薄板的强度一样, 这是由于其强化机理是钒氮化合物呈质点状弥散在钢中, 属弥散强化。钢板的热处理温度控制得好, 能得到典型的铁素体加珠光体组织, 基本上消除了带状组织, 晶粒度在8级以上, 属细晶粒钢。钢的硬度 (HV₁₀) 平均为193。两种钢的综合性能见表3。

15MnVNq与16Mnq的综合性能

表3

钢 种	强度(MPa)		VE- ₂₀ °C J (纵向)	COD (常温)		时效 (10%) J/cm ²	NDT	硬度 HV ₁₀	P _{cm} %
	σ _s	σ _b		mm 纵向	mm 横向				
15MnVNqC	441	588	12.5~15.0	0.555	0.195	69	-50°C	193	0.262
16Mnq	348	510	10.4~13.7	0.431	—	30	-50°C	166	0.259

注: 本文所用冷裂敏感性指数P_{cm}的公式

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 513 (\%)$$

2. 可焊性特点

九江桥是一座大型栓焊钢桥, 桥梁杆件在工厂用焊接方法制造, 杆件运到工地后用高强度螺栓通过节点板连接, 架设成整孔钢梁。因此, 研究15MnVNq的焊接性能十分重要。

九江桥的焊接有三个特点: A. 15MnVNq 钢属碳、锰体系的钢, 强度靠碳、硅、锰维持, 因此有冷裂敏感性倾向。B. 15MnVNq 钢是细晶粒钢, 过大的焊接热输入会使焊接热影响区的韧性下降。C. 用于九江桥的板厚达到 56mm, 厚板造成的大刚性拘束使焊接更加困难。

因此, 为了保证九江长江大桥的绝对安全, 需要在三个方面进行工作。

第一, 如上所述, 把15MnVNq钢分成A、B、C三级。由表1表2可以看出, C类钢质量最好, 它用于拉力杆件及受疲劳控制的拉压型杆件。B类钢质量中等, 它用于压力杆件。A类钢质量列第三, 它只用于联接系。

B、C两级可用于焊接, A类钢不准焊接。

第二, 采用焊前预热工艺。关于预热工艺本文作者将另文详细介绍。

第三, 优选焊接材料、严格控制埋弧自动焊的焊接热输入、精心选择焊接工艺过程等等。

3. 钢板的韧性

对于大跨度焊接钢梁的用材, 主要控制三个方面: A. 焊接性能、B. 钢材的厚度、C. 钢板的韧性。这三方面的内容又是紧密地联系在一起的。

(1) 16Mnq钢与15MnVNq钢在韧性上的比较

前面已经提到, 15MnVNq钢的韧性优于16Mnq, 表3中反应韧性的几个数字说明了这一点。按照我国国家标准的取样与试验方法, 对一块24mm厚的16Mnq 钢板及一块 38mm厚的 15MnVNqU型钢板横向取梅氏冲击试样 (U型缺口), 各自做韧性与温度的关系曲线,

16Mnq钢的脆性转变温度在 -80°C , 15MnVNq钢的脆性转变温度在 -100°C 。试验结果见图2。这说明这两种钢应用在我国最寒冷的地区也是安全的。

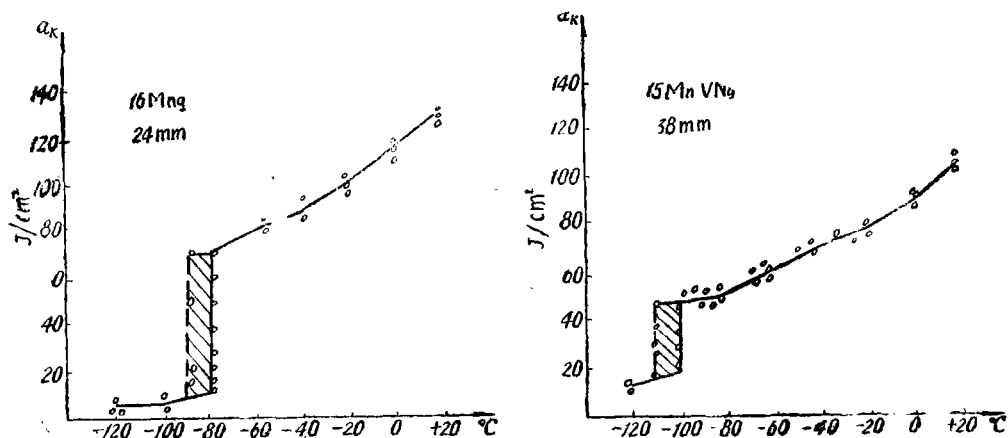


图2 16Mnq、15MnVNq钢 a_k -T曲线(横向取样)

表3中有一项指标称NDT。NDT的含义是无塑性临界温度(Nil-Ductility Transition)它是通过落锤试验求得的。落锤试验的试件带有自然裂纹,裂纹侧受试时的应力正好达到钢材的屈服强度,比较符合实际结构破坏时的状态。

通过6~8块试件不同温度的试验,可得到某一温度,试件在此温度受落锤冲击时,既可能在保持平面的情况下断裂,也可能不断裂,这就是转变温度,并称之为失塑点。迄今为止,16Mnq钢与15MnVNq钢各做了八组(每组6~8块试件)试验,NDT值均在 -40°C ~ -65°C 之间,平均值可取 -50°C 。落锤试验用天然开裂代替人工缺口,它比却贝V或却贝U冲击试验(用人造钝缺口)具有明显的优点,且试验具有显著的重现性,各组试验相互间误差较小。

对15MnVNq钢研究的高峰期在七十年代末八十年代初,为了彻底认识15MnVNq钢的性能,对它进行了全面的多学科的研究。

八十年代初,断裂力学这门新兴学科有了新的发展;线弹性断裂力学日趋完善,使像15MnVNq钢这种属于塑性好、强度中等的钢进行断裂韧性测定有了可能。其中像裂纹张开位移(COD)法及J积分法等被广泛采用。尤其是J积分法,已被大量试验证明它对用于测定中低强度钢的断裂韧性比较准确。

由于钢板厚度的限制,无法测定常温的 K_{Ic} 值,需要通过测定 J_{Ic} 来估计。对于中低强度钢, K_{IR} 与 J_R 有如下关系

$$K_{IR}=152\sqrt{J_R}\cdots\cdots$$

经过三组试件的测试,用金相剖面法确定开裂点,最后确定纵向试样 -40°C 时的 $J_R=8\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}$ 。将 J_R 值代入上式得

$$K_{Ic}=152\sqrt{J_R}=430\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^{\frac{3}{2}}$$

用大试样直接测定 -140°C 时的 K_{Ic} 值,纵向试样的 $K_{Ic}=308\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^{\frac{3}{2}}$

纵向试样的 K_{Ic} 与温度 $T^{\circ}\text{C}$ 的关系曲线见图3。

很明显,随着温度降低 K_{Ic} 值也随之下降。从图3可以看出,15MnVNq钢的脆性转变温

度在 -100°C 以下。

定义I型的应力强度因子为 K_I 。当 K_I 达到或超过某一临界值时,即荷载、裂纹尺寸和构件外形的任意组合达到临界值时,将发生不稳定的裂纹扩展。把这个临界的 K_I 值定义为 K_{Ic} ,称 K_{Ic} 为平面应变断裂韧性。这是从断裂力学引出的崭新的衡量材料韧性的指标。 K_{Ic} 与材料的延伸率 δ 、断面收缩率 ψ 、冲击韧性 a_k 有根本的差别,材料通过 K_{Ic} 值把所承受的外力、结构的内部缺陷(裂纹)与结构的外形有机的结合起来,全面的来衡量材料抵抗裂纹扩展的能力。设结构中的应力为定值,则材料的 K_{Ic} 值高,所能容许的裂纹尺寸 a 就大。所以,材料的 K_{Ic} 值高,材料抵抗脆性断裂的能力也就高。由图3可知,15MnVNq钢在常温时($+20^{\circ}\text{C}$ 左右) $K_{Ic}=500\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^{\frac{3}{2}}$ 。

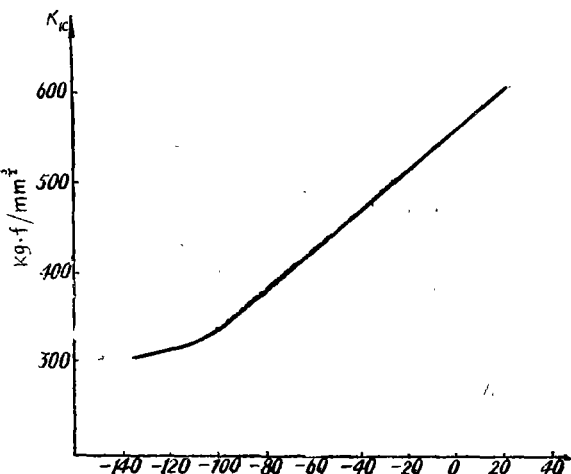


图3 $K_{Ic}-T$ 曲线(纵向试样)

$K_{Ic}=500\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^{\frac{3}{2}}$ 究竟是个什么样的水平呢?这可通过与其它材料的对比来认识。热轧的16Mnq钢常温 $K_{Ic}=400\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^{\frac{3}{2}}$;压力容器钢14MnMoNbB(调质钢)常温 $K_{Ic}=490\sim 535\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^{\frac{3}{2}}$ 。15MnVNq钢的 K_{Ic} 值高于16Mnq钢的 K_{Ic} 值。

(2) 国际上最严格的规范对桥梁钢板韧性的要求。

各国都对桥板缺口敏感性加以严格的限制。钢板在加工过程中会造成各种缺陷,同样一个缺陷在厚板中与在薄板中它的性质是不同的。因此,对于厚板钢材的韧性更要有严格的要求。英国的BS5400规范,对于箱型杆件的板作了如下规定:

$$C_v \geq \frac{\sigma_y}{355} [0.3t(1+0.67K)] \quad (\text{焦})$$

式中 C_v ——在最低设计温度下,却贝V形缺口试验的耗散能(焦)。对于箱型杆件的加劲肋处,应力集中系数 $K=3.5$ 。因此, $C_v \geq 65.2\text{J}$ 。

九江桥用的15MnVNq-C钢,实际达到的水平是:对厚度在30mm以上的302t钢板取样试验, -5°C $C_v=165\text{J}$,超过BS5400的规定值,因此,钢材的韧性是足够的。

五、厚板与韧性

对于大跨度钢桥应用厚度超过50mm的板,尤其是进行厚板焊接各国都很重视。对于厚板的韧性,在其钢材的标准中都相应做了规定。现把一些主要国家对钢材的韧性要求汇总列于表4。

由表4可知,日本本四公团所制订的标准最为严格,SM58的厚板规定的韧性为 -10°C $C_v=47\text{J}$ 。九江桥用料的韧性值远远超过这个标准。

一些国家对桥采用厚钢板韧性的要求

表4

国别	标准号	钢材	σ_s MPa	σ_b MPa	板厚 (mm)	冲击韧性要求			备 注
						连接方式	试验温度 °C	CvN J	
美国	ASTM A709	50WF	≥ 345		51—102	焊接	21	41	
美国	AREA—1985	A 588	≥ 345		51—102	焊接	10	41	重要杆件
英国	BS4360—86	5cc	≥ 325		63—100	焊接	0	27	非重要杆件
英国	BS4360—86	50c	≥ 325		63—100	焊接	10	41	重要杆件
日本	本四公团	SM58		490—630	50—70	焊接	-10	47	
西德	DIN17000—1980	St52—3		490—630	16—63	焊接	-20	27	

六、几项保证安全的措施

九江桥的建设为世人所瞩目。为增加大桥的安全度,采取了如下措施。

1. 厚板探伤

我国桥梁钢板过去都不经探伤。这次九江桥例外,对厚度为50mm、56mm的15MnVNqC类钢板全部进行探伤。探伤方法及分级按英国 BS5996:1980 “Methods for ultrasonic testing and specifying quality grades of ferritic steel plate”

探伤工作由铁道部科学研究院承担。

截至1989年9月,已经有100块钢板计500t被判为不合格料。鞍钢将补齐因探伤不合格而判废的钢板。实践证明对九江桥厚板进行探伤是完全必要的。

2. 预热工艺

在九江桥的制造工艺中,焊前预热又是一项关键措施,保证焊接过程中不产生裂纹。

3. 制订钢梁制造规则

《九江长江大桥钢梁制造规则》以铁道部颁发的TBJ212—86《铁路钢桥制造规则》为基础,结合九江桥的各项科研成果,并参照了国外同行业的标准而编制的。它对材料、预热温度、焊接规范参数、实桥杆件带出试板等都作了明确的规定。制造厂家定期提供的带出试板的各项数据,可使九江桥的设计者、研究者、生产指挥系统及时掌握九江桥的质量数据。

4. 成立驻厂监理组

这个驻厂监理组由大桥工程局(九江桥的设计、施工单位)、铁道部科学研究院(九江桥的科研单位)、哈尔滨焊接研究所(九江桥科研单位)、山海关桥梁厂(九江桥钢梁制造厂)组成,代表铁道部对整个钢梁制造过程进行质量监督,这对于工厂认真执行《九江长江大桥钢梁制造规则》及《九江长江大桥钢梁焊接工艺细则》起促进作用,也给今后进行工程监理积累经验。

七、结 论

1. 九江长江大桥所用的15500t16Mnq钢,是我国成熟的优质钢种,它的一套焊接工艺

也证明是合理的。

2. 作为九江桥主要钢种的15MnVNq钢、由于分成A、B、C三级,做到优质优用。它的各项指标均达到世界各国所制订的对特大桥钢种的要求。与钢材相配套的焊接材料与焊接工艺,也是经过充分的科学试验优选出来的。通过九个月(1989.2—1989.10)的生产实践说明,符合订货标准的15MnVNq钢的各项性能良好,因此用它来制造九江长江大桥的钢梁是安全可靠的。

参 考 资 料

- 〔1〕鞍钢钢研所:《锰钒(铌)氮低合金钢专辑》1985年8月
- 〔2〕九江桥焊接试验组:《九江长江大桥15MnVNq桥梁钢焊接试验研究总结》1982年6月
- 〔3〕大桥工程局:《15MnVNq低合金钢基材断裂力学试验研究报告(第一集)》1982年
- 〔4〕李克中、苏本伟:“15MnVNq钢56mm厚板在九江长江大桥上应用的研究”.《桥梁建设》杂志1989年第3期
- 〔5〕乌通儒:“15MnVNq桥梁钢基本性能及其优化方案”《钢结构》杂志1986年第2期