

机械工人学习材料

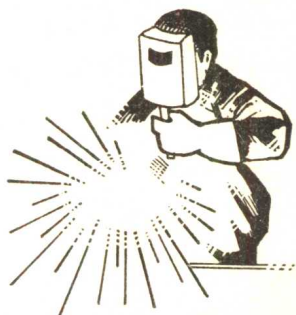
JIXIE GONGREN XUEXI CAILIAO

低温用钢的焊接

周维愚 编著

焊工

7.78
726



机械工业出版社

内容提要 本书主要介绍了低温用钢焊接结构的工作特性；各类低温用钢及其焊接特点、焊接方法、焊接材料和焊接结构的质量控制；并介绍了典型产品的焊接实例。

本书主要读者对象为从事低温用钢焊接工作的焊工，也可供从事低温用钢焊接生产、培训和教育的有关人员参考。

低温用钢的焊接

周维愚 编著

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第 117 号）

北京市朝阳区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印张 $2 \frac{3}{4}$ ·字数 64 千字

1983 年 11 月北京第一版·1983 年 11 月北京第一次印刷

印数 00,001—10,500·定价 0.27 元

*

科技新书目： 61-103

统一书号：15033·5572

机械工人学习材料

焊工类

1. 手工电弧焊操作技术
2. 焊条的选择与使用
3. 埋弧焊
4. 电渣焊
5. 钨极氩弧焊
6. 二氧化碳气体保护焊
7. 等离子弧焊接
8. 点焊、缝焊、凸焊
9. 电阻对接焊
10. 摩擦焊
11. 金属的堆焊技术
12. 金属钎焊
13. 气割
14. 常用低合金结构钢的焊接
15. 耐热钢的焊接
16. 耐酸不锈钢的焊接
17. 低温用钢的焊接
18. 异种金属的焊接
19. 铸铁焊补
20. 铝及铝合金的焊接
21. 铜及铜合金的焊接
22. 钛及钛合金的焊接
23. 塑料的焊接
24. 怎样防止焊接裂纹
25. 怎样防止焊接应力与变形
26. 焊接夹具
27. 焊接检验
28. 焊机常见故障的排除
29. 焊工安全与卫生

目 次

一	焊接结构在低温下的特性.....	(1)
1	焊接结构的特点 (1) —— 2 温度对焊接结构使用性能的影响 (3) —— 3 低温下焊接结构的破坏方式 (5)	
二	低温用钢的基本知识.....	(5)
1	分类 (6) —— 2 化学成分和组织 (6) 3 性能 (11) —— 4 低温用钢的焊接特点 (15)	
三	低温用钢的焊接方法.....	(19)
1	选择焊接方法的基本原则 (19) —— 2 手工电弧焊 (20) —— 3 埋弧自动焊 (23) —— 4 氩弧焊 (26)	
四	低温用钢的焊接材料.....	(38)
1	焊接材料的选配原则 (38) —— 2 手工电弧焊焊条 (40) —— 3 埋弧自动焊焊丝和焊剂 (45) —— 4 氩弧焊焊丝和气体 (50)	
五	低温用钢焊接质量的控制.....	(54)
1	焊接工艺评定 (54) —— 2 焊前准备 (55) 3 焊接规范和焊接线能量 (58) —— 4 焊接操作和焊接程序 (63) —— 5 应力消除和焊缝修整 (67) —— 6 焊接缺陷的防止和返修 (70) —— 7 焊接质量检验 (78)	
六	典型低温焊接结构的焊接实例.....	(78)
1	低压氨循环贮液器和管壳式热交换器 (78) —— 2 乙烯蒸馏塔和第一脱甲烷塔 (81) —— 3 液化天然气球形贮罐 (83)	

一 焊接结构在低温下的特性

1 焊接结构的特点 在低温下使用的焊接结构,按其用途不同而具有各种不同的结构型式。大多数受压元件如塔器、换热器、冷凝器、球罐、贮罐、管道等是由各种圆柱形、圆锥形及球形壳体、封头、接管和管接头等所组成,这些零部件和整个结构通常采用冷加工或热加工成型,用焊接的方法进行制造。而梁和金属构架则由各种截面型式的杆件组合焊接而成。焊接结构的制造质量要经过一系列的质量检验来进行严格的鉴定。

焊接接头是焊接结构中的一个关键性部位,其性能的优劣将直接影响到整个结构的制造质量和使用安全。焊接结构型式和焊接工艺过程使焊接结构具有如下主要特点:

(一) 焊接结构的刚度大 与铆接相比,焊接是刚性联接。刚性大是焊接结构的优点。但是,由于设计和制造中的一些环节未充分考虑或考虑不周,如结构不连续,非圆滑过渡,焊接应力,焊接变形及焊接缺陷等,则会在结构中引起巨大的附加应力和集中应力。在低温下,当材质塑性和韧性较差时,这些附加应力和集中应力常常会导致大刚性焊接结构的脆性断裂。

(二) 焊接结构的整体连续性 焊接结构的整体连续性为合理地进行焊接结构的制造提供了有利的条件。然而,若设计不当、制造不良,局部区域中潜在的缺陷一旦萌生成裂纹或产生裂纹扩展,则因整体连续性的特点而很可能导致整个结构的破坏。在低温下工作的结构,尤为突出。

(三) 结构材料在制造过程中的塑性和韧性耗损 焊接结构

制造过程中的某些加工工艺，如冷、热成型，焊接，矫形，消除应力热处理等，对于具有应变时效脆性倾向、淬火倾向、回火脆性倾向的材料，将会在加工过程中消耗或降低材料的塑性和韧性，使材料变脆。对于低温下工作的焊接结构，这是极为不利的。因此，在选择或研制低温钢及其焊接材料、制订结构制造工艺规程时，要充分考虑到这一点。

(四) 焊接结构中的工艺缺陷 由于结构刚性、坡口型式、钢材及焊接材料的特点、焊接方法及操作技术、工艺规范参数、焊前准备和施工条件等因素的影响，若在结构制造过程中对这些环节控制不当时，往往会在焊接接头中产生裂纹、未熔合、未焊透、夹渣、咬边和气孔等缺陷。平面型的工艺缺陷，如裂纹、未熔合、尖锐的咬边和未焊透、片状夹渣等，是可能导致低温焊接结构产生脆性断裂危险的潜在因素。因此，必须对焊接缺陷的尺寸和数量进行严格控制，高度重视焊接工艺缺陷的防止、消除和返修工作。

(五) 焊接接头性能的不均匀性 由于焊接过程中不均匀加热和冷却作用，以及结构刚性或外加刚性拘束的作用，使焊接接头各区在焊接过程中进行着不同的焊接冶金和焊接力学过程，承受着不同的焊接热循环和应变循环的作用，所以各区中的组织和性能存在着较大的差异，从而使焊接接头具有组织和性能的不均匀性。特别对焊接热循环和应变循环比较敏感的材料则更为明显，在紧靠焊缝的熔合区、过热区，其性能与母材相比，往往有所下降。因此，焊接时必须控制焊接热循环，尤其是焊接线能量和冷却速度，以使焊接接头各区的性能达到所要求的指标。

(六) 焊态结构中存在着较大的拉伸残余应力 焊接时的不均匀加热和冷却，以及结构本身或外加刚性拘束的作用，通过力、温度和组织等因素的变化，使焊接接头区产生不均匀的塑性

变形，在焊接过程结束，结构完全冷却之后，焊接接头区域将存在着较大的拉伸残余应力和不均匀的残余应力场。这种拉伸残余应力是导致结构低温脆断的一个重要因素。所以，对于低温下使用的焊接结构，应尽可能在焊后采取消除或减少残余应力的工艺措施。对于低温压力容器，当壁厚超过16毫米时，通常在焊后要进行消除应力的热处理。

(七) 焊接结构中的残余变形和其它几何缺陷 焊接结构制造过程中，各个环节控制不当时，往往会产生焊接变形（如角变形等），焊缝成形不良（如焊缝过分凸起，焊趾曲率半径太小等）及其它几何缺陷（如咬边、几何尺寸不符合要求等），在工作载荷作用下，将会在这些区域引起较大的附加应力和集中应力，在结构几何形状不连续处尤为突出，从而降低结构的承载能力。因此，在施工时应加以控制和设法防止。

2 温度对焊接结构使用性能的影响 影响焊接结构使用性能的因素很多，对于低温下工作的结构来说，温度是一个极为重要的因素。低温与焊接缺陷、拉伸残余应力、焊接接头的材料性能损耗（指塑性和韧性的下降）、附加应力和集中应力等结合在一起，将使焊接结构的使用性能下降，并增加了许多不安全因素，从而导致产生断裂事故的危险性。

(一) 温度对材料性能的影响 温度对材料性能的影响规律与材料的组织和点阵结构有关。对于铁素体型和马氏体型低温材料，其点阵结构属于体心立方，随着温度下降，材料的强度提高，当温度下降到某一区间时，材料的塑性和韧性急剧下降，即材料从塑性、韧性状态向脆性状态转变，这一温度区间称为脆性转变温度，如图1所示。在脆性转变温度以上，断裂是塑性的，在脆性转变温度以下，断裂则是脆性的。同一材料采用不同的试验方法所测得的脆性转变温度也是不相同的。试样上的缺口越深，缺口

尖端曲率半径越小，试验时的形变速度越快，则所测脆性转变温度越高。具有脆性转变特征是铁素体型和马氏体型低温材料的固有特性，这是因为温度下降，原子活动能力下降，不容易产生滑移和塑性变形的缘故。为了防止发生低温脆断，这类材料的工作温度必须在其脆性转变温度之上。对于奥氏体型低温材料，其点阵结构属于面心立方，随着温度下降，材料的强度有所提高，而塑性和韧性稍有下降，但无明显的脆性转变现象，如图2所示。这是因为面心立方点阵结构具有较多的滑移系统，尽管温度下降，原子活动能力下降，但仍能进行滑移和塑性变形，从而使之在

-196℃乃至-253℃的低温下具有极为优良的低温塑性和韧性。

(二) 温度对结构使用性能的影响 低温钢及其焊接材料在工作温度下通常具有足够的强度，良好的塑性和韧性。但是，在

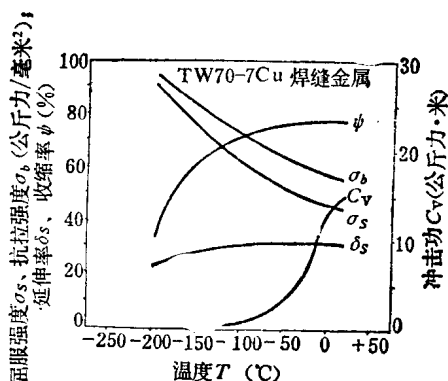


图1 铁素体型材料的脆性转变特征

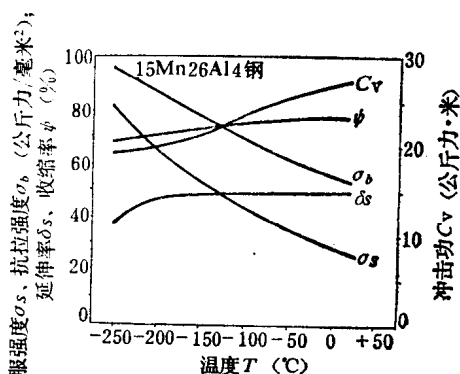


图2 奥氏体型材料的性能与温度的关系

一定条件下也会发生脆性断裂。这是因为低温条件与结构中存在的缺陷、应力集中以及拉伸残余应力等不利因素综合作用的结果。缺口效应和拉伸残余应力的存在将使结构的脆性转变温度显著提高。因此，在制造低温焊接结构时，应尽量防止和消除缺陷，减小或消除拉伸残余应力，使结构在工作温度下能安全可靠地运行，防止发生低应力脆断。

3 低温下焊接结构的破坏方式 低温下焊接结构的破坏方式往往具有脆性破坏的特征。按其破坏的机理可分为低应力脆断，疲劳断裂和应力腐蚀破坏等方式。这些破坏事故与结构中存在的焊接缺陷，应力集中，拉伸残余应力，钢材及其焊接接头塑性和韧性较差，环境或工作温度下降，存在腐蚀介质以及交变载荷幅度增大、次数增多等因素有关。

为了防止低温下工作的焊接结构发生破坏事故，除了在设计时应考虑温度、介质及交变载荷的作用、合理选材、降低结构中不连续区域的应力集中程度、进行合理的焊接设计外，还必须从焊接制造方面加以严格控制，建立必要的质量管理机构，加强质量检查工作。此外，在结构使用和操作方面，也应严格遵守设计要求和操作规程，严禁超温、超载操作。

二 低温用钢的基本知识

用于制造 $-20\sim -253^{\circ}\text{C}$ 低温下工作的焊接结构的专用钢材，称为低温钢。作为低温用钢，最重要的是在所要求的低温工作条件下具有足够的强度、塑性和韧性；同时，应具有良好的制造工艺性能，特别是要具有优良的工艺可焊性和使用可焊性，对应变时效脆性和回火脆性的敏感性要小，以便在结构制成后，使钢材和焊接接头区的脆性转变温度低于最低工作温度，以便具备足够

的抗断能力，达到安全和经济使用的目的。

1 分类 低温钢通常按使用温度等级、合金含量和组织以及合金系统中有无镍、铬元素进行分类。

(一) 按使用温度等级分类 低温钢的使用温度等级一般按实际产品的工作温度而加以划分。如在自然环境温度下工作的产品，其使用温度一般在 -40°C 以上，石油化学产品的使用温度为 $-30\sim-165^{\circ}\text{C}$ ，空气分离产品的使用温度为 $-150\sim-269^{\circ}\text{C}$ 。详见表1。目前，各国对使用温度等级的划分尚未统一，大致可归纳为如下四个等级： $-20\sim-40^{\circ}\text{C}$ 低温钢； $-50\sim-80^{\circ}\text{C}$ 低温钢； $-100\sim-110^{\circ}\text{C}$ 低温钢以及 $-196\sim-253^{\circ}\text{C}$ 低温钢。

表1 典型产品的使用温度

介质名称	温度($^{\circ}\text{C}$)	介质名称	温度($^{\circ}\text{C}$)	介质名称	温度($^{\circ}\text{C}$)	介质名称	温度($^{\circ}\text{C}$)
自然环境	≥ -40	硫化氢	-61	氢	-151	液态氮	-195.8
氮	-33.4	液态二氧化碳	-78.5	甲烷	-163	氟	-246
丙烷	-45	乙炔	-84	液氧	-183	重氢	-249.6
丙烯	-44.7	乙烷	-88.3	氩	-186	液态氢	-252.8
硫化碳酰	-50	乙烯	-103.8	氟	-187	氮	-269

(二) 按合金含量和组织分类 按低温钢所含合金元素的含量和组织的不同，又可分为低合金铁素体型低温钢，中合金低碳马氏体型低温钢和高合金奥氏体型低温钢。

(三) 按有无镍、铬元素分类 当产品的工作温度低于 -50°C 时，国外一般均采用含镍或含镍、铬合金系统低温钢。我国曾研制了一系列在 $-40\sim-253^{\circ}\text{C}$ 低温下使用的无镍、铬合金系统低温钢。所以，又可按合金系统中有无镍、铬元素将低温钢分为无镍、铬低温钢和含镍、铬低温钢。

2 化学成分和组织 国内外常用低温钢的化学成分、温度等级和使用状态见表2。

(一) 低合金铁素体型低温钢 低合金铁素体型低温钢含合金元素总量 $\leq 5\%$ ，组织为铁素体加少量珠光体。按其化学成分、炼钢工艺、热处理方法和板厚的不同，分别在 $-20\sim-110^{\circ}\text{C}$ 温度范围内使用。如铝镇静CMn钢，16MnR，0.5Ni，1Ni，1.5Ni，2.5Ni，09Mn2VR，09MnTiCuRe，06MnNb，06MnVTi，06AlCu，06AlCuNbN，3.5Ni等。由于合金系统本身的限制，其脆性转变温度难以降低到 -110°C 以下，所以，一般只能在 -110°C 以上使用。

为了使低合金铁素体型低温钢获得良好的低温韧性，必须对化学成分加以调节，如控制锰碳比、降低碳含量、添加适当的细化晶粒元素（如Ni，V，Ti，Nb，Al，Re等）和提高铁素体低温韧性的元素（如Ni，Cu等）；采用合理的炼钢工艺，注意脱氧方法，控制轧制工艺；采用合理的热处理方法，尽量降低钢中的杂质元素（如S，P，Sb，As，Sn，Bi等）及有害气体（如N，H，O）的含量，以防止产生热脆性，冷脆性，时效脆性和回火脆性等。

随着板厚的增加，钢中铁素体晶粒的大小和方位也将发生变化。通常，板厚增加，钢的脆性转变温度也相应提高。因此，要特别注意对于厚板的质量控制和合理使用。

(二) 中合金低碳马氏体型低温钢 9Ni钢是典型的中合金低碳马氏体型低温钢。合金元素总含量为 $>5\sim 10\%$ ，组织与热处理方法有关。由于钢中含有9%的Ni，故具有很高的可淬性。常用的热处理方法有两种：一种是在 900°C 正火，再在 790°C 正火后进行 570°C 回火；另一种是在 800°C 水淬后进行 570°C 回火。 900°C 正火的目的是为了细化原奥氏体晶粒。 790°C 正火或 800°C 水淬的目的是产生片状马氏体组织，尽量采取较快的冷却速度，以避免产生其它的转变产物。 570°C 回火的目的是使回火碳化物

表 2 低温钢

分 类	温度等级 (°C)	钢 号	使用状态	化 学				
				C	Mn	Si	S	P
无 镍 铬 低 温 钢	-40	16MnR	热轧或正火	≤0.20	1.20~ 1.60	0.20~ 0.60	≤0.040	≤0.040
	-70	09Mn2VR 09MnTiCuRe	正火	≤0.12 ≤0.12	1.40~ 1.80	0.20~ 0.50 ≤0.40	≤0.040	≤0.040
	-90	06MnNb	正火	≤0.07	1.20~ 1.60	0.17~ 0.37	≤0.030	≤0.030
	-100	06MnVTi	正火	≤0.07	1.40~ 1.80	0.17~ 0.37	≤0.030	≤0.030
	-105	06AlCu 06AlCuNbN	正火	≤0.06 ≤0.08	0.80~ 1.10 0.80~ 1.20	≤0.25 ≤0.35	≤0.025 ≤0.035	≤0.015 ≤0.020
	-196	26Mn23Al	固溶	0.15~ 0.25	21.0~ 26.0	≤0.50	≤0.030	≤0.030
	-253	15Mn26Al4	固溶	0.13~ 0.19	24.5~ 27.0	≤0.80	≤0.035	≤0.035
含 镍 铬 低 温 钢	-60	0.5NiA 0.5NiB	正火	≤0.14 ≤0.16	0.70~ 1.50 0.85~ 1.60	≤0.30	≤0.035	≤0.035
	-80	1.5NiA 1.5NiB 2.5NiA 2.5NiB	正火或调质	≤0.14 ≤0.18 ≤0.14 ≤0.18	0.30~ 0.70 0.50~ 1.50 ≤0.80 ≤0.80	0.10~ 0.30	≤0.035	≤0.035
	-100	3.5NiA 3.5NiB	正火或调质	≤0.14 ≤0.18	≤0.80	0.10~ 0.30	≤0.035	≤0.035
	-120~ -170	5Ni	淬火+回火 +回复退火	≤0.12	≤0.80	0.10~ 0.30	≤0.035	≤0.035
	-196	9Ni	二次正火+ 回火或淬火 +回火	≤0.10	≤0.80	0.10~ 0.30	≤0.035	≤0.035
	-196~ -253	18Cr9Ni 18Cr9NiTi	固溶	≤0.08	≤2.00	≤1.00	≤0.025	≤0.030
	-269	25Cr20Ni	固溶	≤0.08	≤2.00	≤1.50	≤0.030	≤0.040

注：*表示加入量；**表示克/吨。06AlCu钢用于制造钢管。

的化学成分

成 分 (%)										
V	Ti	Cu	Nb	Al	Cr	Ni	Mo	Re	N	B
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.04~ 0.10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	0.04~ 0.10	≤0.40	—	—	—	—	—	0.15*	—	—
—	—	—	0.02~ 0.04	—	—	—	—	—	—	—
0.04~ 0.10	240**	—	—	0.04~ 0.08	—	—	—	—	—	—
—	—	0.35~ 0.45	—	0.09~ 0.26	—	—	—	—	—	—
—	—	0.30~ 0.40	0.04~ 0.08	0.04~ 0.15	—	—	—	—	0.010~ 0.015	—
0.06~ 0.12	—	0.10~ 0.20	—	0.7~ 1.2	—	—	—	0.30*	0.03~ 0.08	0.001~ 0.005
—	—	—	—	3.8~ 4.7	—	—	—	—	—	—
0.03~ 0.10	—	≤0.35	0.15~ 0.50	0.15~ 0.50	≤0.25	0.30~ 0.70	≤0.10	—	—	—
0.02~ 0.05	—	≤0.35	0.15~ 0.50	0.15~ 0.50	≤0.25	1.30~ 1.60 1.30~ 1.70 2.00~ 2.50 2.00~ 2.50	≤0.10	—	—	—
0.02~ 0.05	—	≤0.35	0.15~ 0.50	0.15~ 0.50	≤0.25	3.25~ 3.75	≤0.10	—	—	—
0.02~ 0.05	—	≤0.35	0.15~ 0.50	0.15~ 0.50	≤0.25	4.75~ 5.25	≤0.10	—	—	—
0.02~ 0.05	—	≤0.35	0.15~ 0.50	0.15~ 0.50	≤0.25	8.0~ 10.0	≤0.10	—	—	—
—	—	—	—	—	17.0~ 19.0	9.0~ 11.0	≤0.50	—	—	—
—	5 × C % ~0.8	—	—	—	24.0~ 26.0	19.0~ 22.0	≤0.50	—	—	—

溶入奥氏体中，避免发生脆化作用。通过正确的回火，可得到体积为5~10%的富碳奥氏体，并为碳和镍所稳定，故在-196℃低温下不发生任何脆性转变。通常，淬火后的组织为低碳马氏体；正火后的组织为低碳马氏体、铁素体及少量奥氏体；回火后的组织为含镍铁素体和少量富碳奥氏体。含镍铁素体和少量奥氏体使9Ni钢在-196℃低温下具有优良的低温韧性。因此，对9Ni钢的热处理应予以重视。如果热处理不当，则回火中生成的奥氏体在低温下或在低温下变形时会转变为马氏体，导致低温韧性的下降。此外，9Ni钢具有一定的回火脆性敏感性，并随着磷含量的增加而显著增加，所以，也必须严格控制磷的含量。

为了节镍并降低成本，在9Ni钢的基础上研制成功了一种含镍量较低的5Ni钢。5Ni钢与9Ni钢相比，成本可降低2%左右。5Ni钢主要通过化学成分的最优调整以及采用独特的热处理方法来控制组织，使之在-162℃，乃至-196℃的低温下具有与9Ni钢相近的强度和韧性。通过加入Mo 0.25%，以增加析出奥氏体的数量，并使之稳定化，还可起到细化组织的作用。采用新的淬火、回火和回复退火三级热处理方法来控制组织，特别要注意控制回火和回复退火的加热温度和冷却速度，以控制稳定奥氏体、铁素体以及低碳回火马氏体的数量，使5Ni钢具有高的强度、塑性和低温韧性。

(三) 高合金奥氏体型低温钢 高合金奥氏体型低温钢的合金元素总含量>10%，组织为奥氏体。钢中含有较高的奥氏体合金元素和稳定奥氏体的合金元素，以得到稳定的奥氏体组织，从而使之具有极为优良的低温韧性，在-196~-269℃的低温下仍保持着相当高的韧性。高合金奥氏体型低温钢分镍、铬奥氏体型低温钢和无镍、铬奥氏体型低温钢两类。

镍、铬奥氏体型低温钢中含有Cr 18%和Ni 9%。铬的加入使

钢具有一定的抗氧化、耐腐蚀性；镍的加入则起着稳定奥氏体组织的作用。镍和铬含量的合理配合，可获得单一的奥氏体组织。这类钢的碳含量很低，几乎都是低碳和超低碳的，因为碳很容易和铬化合生成碳化铬，降低有效铬含量，使钢的耐腐蚀性能下降。此外，钢中有时还加入少量的钛或铌，因为钛或铌比铬更容易与碳结合生成稳定的碳化物，从而降低钢中碳的有害作用。镍、铬奥氏体型低温钢通常在热处理后使用，热处理方法为固溶处理，即将钢材加热到 $1050\sim 1080^{\circ}\text{C}$ ，然后在水或油中速冷，从而使铬的碳化物来不及析出。含钛或铌的钢往往要进行稳定化处理，即将固溶处理后的钢材，再加热到 $850\sim 900^{\circ}\text{C}$ ，保温 $2\sim 4$ 小时，使固溶的钛或铌与碳结合成碳化钛或碳化铌。固溶处理和稳定化处理的目的是为了使镍、铬奥氏体型低温钢具有优良的耐腐蚀性能。

无镍奥氏体型低温钢中含有 $\text{Mn}23\sim 26\%$ 和 $\text{Al}1\sim 4\%$ ，锰和铝都是奥氏体形成元素，用以代替镍起着稳定奥氏体的作用，使钢材成为单一的奥氏体组织，从而获得与镍、铬奥氏体型低温钢相近的低温韧性，可在 $-196\sim -253^{\circ}\text{C}$ 低温下使用，而钢材的成本则大为降低。无镍、铬奥氏体型低温钢经 1100°C 固溶处理后，低温韧性有很大提高，一般均在固溶处理后使用。

3 性能 低温钢的性能不仅与化学成分、热处理方法和组织有关，而且与炼钢工艺、合金纯度、杂质元素和气体含量、钢板厚度及钢中的缺陷等因素有关。为保证低温钢的质量，必须对这些因素加以严格控制。低温钢的最低工作温度与这些因素密切相关。同类合金系统的钢材，其它因素控制不相同，其最低工作温度也不同。通常，按照热处理方法与板厚，焊接结构的特点和应力水平，焊后是否进行消除应力热处理以及焊接制造工艺水平等来确定钢材的最低安全工作温度。钢中常见的缺陷有夹杂物、

分层、白点、重皮等。缺陷的存在不仅降低钢材的塑性和韧性，而且影响到焊接接头的质量。板厚较大时，要特别注意厚度方向上的性能。为提高低温钢的性能和使用可靠性，应严格控制 and 避免钢中的缺陷。通常，经探伤检查合格后方能使用。

(一) 低温钢的基本力学性能 常用低温钢的基本力学性能见表 3。

图 3 及图 4 为国内常用低温钢的 V 型缺口冲击试验和 U 型缺

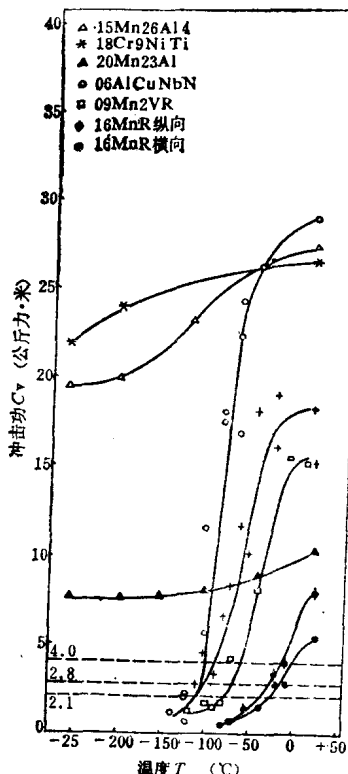


图 3 V 型缺口冲击试验转变温度曲线

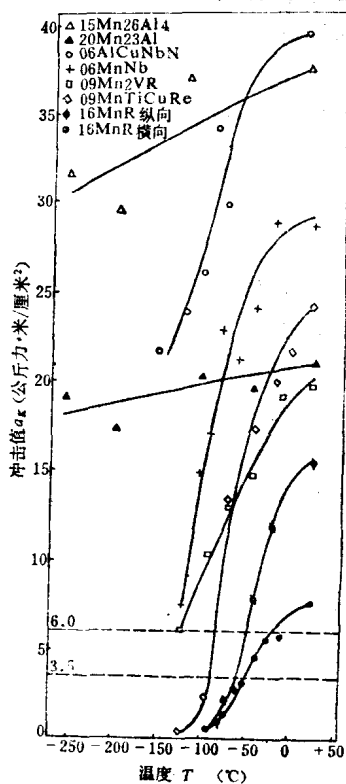


图 4 U 型缺口冲击试验转变温度曲线

表3 常用低温钢的基本力学性能

钢 号	板厚 (毫米)	试验 温度 (°C)	屈服强度 σ_s (公斤力/ 毫米 ²)	抗拉强度 σ_b (公斤力/ 毫米 ²)	延伸率 δ_s (%)	收缩率 ψ (%)	V型缺口 冲击功 C_v (公斤力·米)	U型缺口冲 击值 α_k (公斤力·米 /厘米 ²)
16MnR	6~16 12	常温 -40	≥ 35 36	≥ 52 62	≥ 21 23	— 64	— 1.4(1.2)	— 4.8(4.5)
09Mn2VR	5~20 12	常温 -70	≥ 35 —	≥ 50 —	≥ 21 —	— —	— 4.0(3.6)	— 13.1(10.5)
09MnTi CuRe	≤ 20 20	常温 -70	≥ 32 38	≥ 45 58	≥ 21 31	— 75	— 1.1(0.6)	— 7.3(6.1)
06MnNb	≤ 20 12	常温 -90	≥ 30 41	≥ 40 56	≥ 21 24	— 74	— 2.2(1.1)	— 9.4(8.3)
06MnVTi	≤ 20 16	常温 -100	≥ 30 —	≥ 40 —	≥ 21 —	— —	— 1.4	— 5.7(5.4)
06AlCu NbN	≤ 14 12	常温 -100	≥ 30 41	≥ 40 55	≥ 21 44	— 78	— 13.6(7.1)	— 26.0(25.4)
3.5Ni	≤ 30	常温 -100	28~35 —	46~61 —	22 —	— —	— ≥ 4.0 或 ≥ 2.8	— —
5Ni	≤ 30	常温 -170	38 72	55~70 82	20 16	— 24	— ≥ 4.0 或 ≥ 2.8	— —
9Ni	≤ 30	常温 -196	50 71	65~80 102	19 14	— 30	— ≥ 4.0 或 ≥ 2.8	— —
20Mn23Al	16 16	常温 -196	≥ 20 49	≥ 50 103	≥ 21 35	— 30	— 7.3	— 17.6
15Mn26 Al4	≤ 30 12~14 12~14	常温 -196 -253	≥ 20 57 82	≥ 50 81 82	≥ 21 41 21	— 70 60	— 19.7(18.8) 19.1(17.6)	— 29.6(28.2) 31.7(30.6)
18Cr9NiTi		常温 -196 -253	28 64 77	66 155 179	— — —	76 61 48	26.5 24.0 22.0	— — —

注：冲击性能中括号前为三个试样的平均值，括号内为单个试样的最低值。