

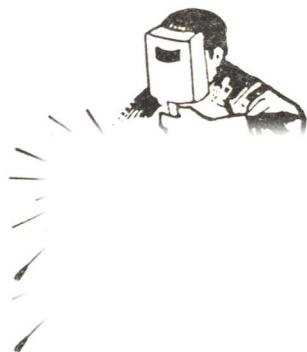
机械工人学习材料

JIXIE GONGREN XUEXI CAILIAO

耐热钢的焊接

顾溥锦 毕鹏飞 编著

焊工



机械工业出版社

内容提要 本书共分六章，第一章简要介绍常用耐热钢的分类、应用和高温性能；第二章介绍耐热钢的各种焊接方法；第三、四、五、六章分别论述珠光体和马氏体耐热钢、铁素体耐热钢、奥氏体耐热钢以及异种钢的焊接特点、焊接工艺，并列举了实例。

本书可供从事耐热钢焊接的焊工阅读，也可供初、中级焊接技术人员参考。

耐热钢的焊接

顾溥锦 毕鹏飞 编著

责任编辑 俞逢英

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 $2^{3/4}$ 字数62千字

1986年2月北京第一版·1986年2月北京第一次印刷

印数 0,001—8,100·定价0.60元

科技新书目: 114-86

统一书号: 15033·6273

目 次

一	耐热钢简介	1
1	耐热钢的种类(1)——2 耐热钢的应用(3)——3 耐热钢的高温性能(11)	
二	常用耐热钢的焊接方法	12
1	气焊(13)——2 手工电弧焊(13)——3 钨极氩弧焊(17)——4 等离子弧焊(19)——5 埋弧自动焊(21)	
三	珠光体和马氏体耐热钢的焊接	24
1	珠光体和马氏体耐热钢的焊接特点(24)——2 珠光体和马氏体耐热钢的焊接工艺(47)——3 珠光体和马氏体耐热钢的焊接实例(62)	
四	铁素体耐热钢的焊接	68
1	铁素体耐热钢的焊接特点(68)——2 铁素体耐热钢的焊接工艺(68)	
五	奥氏体耐热钢的焊接	70
1	奥氏体耐热钢的焊接特点(70)——2 奥氏体耐热钢的焊接工艺(72)——3 奥氏体耐热钢的焊接实例(76)	
六	异种钢焊接	78
1	异种钢的焊接特点(78)——2 异种钢的焊接工艺(80)	

耐热钢简介

动力和能源工程在国民经济中占有极其重要的地位。在我国四个现代化的建设中，这些工程将获得进一步的发展。动力和能源工程中的锅炉、汽轮机、炼油设备、核容器以及石油化工等设备均处于高温、强腐蚀条件下工作，制造这些设备需广泛应用耐热钢。

什么叫耐热钢？耐热钢就是能在高温下长期工作、并有足够的强度和抗氧化能力，抗特定介质条件下的脆化以及抗中子辐照脆化的钢。

为了保证耐热钢的高温性能，就要在其中加入较多的合金元素，而这些元素又给焊接工作带来了种种困难。对耐热钢的焊接接头，既要求能防止出现裂纹和超差缺陷，又要求保证具有满意的高温性能，这就决定了焊接耐热钢时需采取一定的工艺措施。

1 耐热钢的种类

一、按特性和用途分类

(一) 抗氧化钢 高温下具有较好的抗氧化性，并有一定强度的钢称为抗氧化钢，又叫不起皮钢。这种钢多数用来制造炉用零件和热交换器，如燃气轮机燃烧室，锅炉吊挂、锅炉管夹等。表1列出了部分耐热钢的抗氧化性能。

耐热钢在某些气体介质中会发生腐蚀，有时高温腐蚀成为化工设备的主要矛盾，例如化工设备中的氢脆化，锅炉中燃油或燃劣质煤时引起锅炉的灰分腐蚀等。

表1 部分耐热钢管子的抗氧化性能

钢 号	试验温度(℃)	氧化深度(毫米/年)
15MnV	520	0.023
12MnMoV	550	0.042
12Cr1MoV	580	0.05~0.098
	600	0.12~0.22
12MoVWBSiRe	580	0.088
12Cr3MoVSiTiB	580	0.00733
	600	0.00887
	620	0.00873
	650	0.00946
12Cr2MoWVB	580	0.004
	600	0.003
	620	<0.1

(二) 热强钢 高温下有一定的抗氧化能力和较高强度的钢称为热强钢。这种钢可用于制造汽轮机、燃气轮机的转子和叶片、锅炉过热器等。

热强钢在高温长期应力作用下会出现蠕变、持久断裂及蠕变脆性破坏等现象。因此对热强钢除了要求室温机械性能外,更重要的是它们的高温性能。图1为各种耐热钢的持久强度值。

二、按组织分类

(一) 珠光体钢 这类钢的合金元素总含量一般不超过5%,正火后得到珠光体组织,在500~600℃具有良好的热强性,冷加工、热加工及焊接性能好,比较经济,因此该种

钢已获得广泛应用。其中使用最多的是铬钼钢和铬钼钒钢。

(二) 马氏体钢 指含铬5~9%的中铬钢和含铬12%的高铬钢，在650℃左右有较好的抗氧化性，600℃以下有一定的热强性，有较大的淬硬倾向，焊接性差。

(三) 铁素体钢 为了提高抗氧化性而加入相当数量的铬、硅、铝等铁素体化元素，使钢具有单相铁素体组织。这类钢具有很好的高温下不起氧化皮的性能，但焊接性较差，并有脆性倾向。

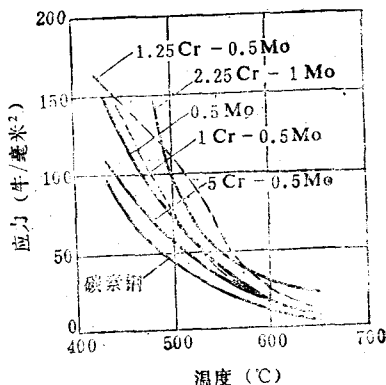


图1 各种耐热钢的持久强度值
(1%/10000小时的持久强度)

(四) 奥氏体钢 奥氏体钢含有较高的镍、锰、氮等奥氏体化形成元素，高温下有较好的热强性和组织稳定性，通常工作温度在600℃以上时才选用。图2为各种耐热钢的适用温度范围。

国内外常用耐热钢的化学成分和机械性能见表2和表3。

2 耐热钢的应用

一、在锅炉设备中的应用 在锅炉设备中，耐热钢主要用于制造受热部件（如过热器、再热器和水冷壁等）、集箱、管道和各种炉内零件。

高压电站锅炉受压元件，除了水冷壁和省煤器用20A

表2 国内常用耐热钢的化学成分和机械性能

钢 号	化 学 成 分						常 温 机 械 性 能								
	C	Mn	Si	Cr	Mo	W	V	Ti	B	Re	抗拉强度 (牛/毫米 ²)	屈服强度 (牛/毫米 ²)	延伸率 (%)	冲击值 (牛·米/厘米 ²)	
珠 光 体 耐 热 钢															
12CrMo	≤0.15 0.40 ~0.70	0.20 0.40 ~0.40	0.40 0.40 ~0.55	0.40 0.40 ~0.55	0.40 0.40 ~0.55						420	210	21	70	
15CrMo	0.12 0.40 ~0.18	0.40 0.17 ~0.70	0.80 0.37 ~0.37	1.10 0.55 ~0.55	0.40 0.40 ~0.55						450	240	21	60	
12Cr1MoV	0.08 0.15 ~0.15	0.40 0.70 ~0.37	0.90 1.20 ~0.35	0.25 0.35 ~0.15	0.15 0.30 ~0.30						480	280	21	60	
12Cr2MoWVB	0.08 0.15 ~0.15	0.45 0.65 ~0.75	1.60 2.10 ~0.65	0.50 0.65 ~0.55	0.30 0.55 ~0.42	0.28 0.42 ~0.18	0.008				550	350	18		
12MoVWESiRe	0.08 0.15 ~0.15	0.40 0.70 ~0.90	0.60 0.90 ~0.65	0.45 0.40 ~0.50	0.15 0.40 ~0.40	0.30 0.50 ~0.50	0.05 0.115 ~0.01	0.008			550	320	18		
12Cr3MoVSiTiB	0.09 0.15 ~0.15	0.50 0.80 ~0.90	2.50 3.00 ~1.20	1.00 1.20 ~0.05	0.25 0.35 ~0.011	0.22 0.38 ~0.011					640	450	18		
ZG20CrMoV	0.18 0.25 ~0.25	0.40 0.70 ~0.37	0.90 1.20 ~0.70	0.50 0.70 ~0.30	0.20 0.30 ~0.30						500	320	14	30	

马 氏 体 耐 热 钢										
ZG.5Cr1Mo1V	0.14 ~0.23	0.40 ~0.70	0.17 ~0.37	1.20 ~1.70	1.00 ~1.20	0.20 ~0.40		500	350	14 30
1Cr5Mo	≤ 0.15	≤ 0.60	≤ 0.50	4.00 ~6.00	0.50 ~0.80			600	400	18
1Cr9Mo1	≤ 0.15	0.30 ~0.60	0.50 ~1.00	8.00 ~10.0	0.90 ~1.10			550 ~700	320	24
1Cr13	≤ 0.15	≤ 0.80	≤ 0.60	12.00 ~14.00				600	420	20 90
2Cr13	0.16 ~0.24	≤ 0.05	≤ 0.60	12.00 ~14.00				600	450	16 80
1Cr11MoV	0.11 ~0.18	≤ 0.60	≤ 0.50	10.0 ~11.50	0.50 ~0.70	0.25 ~0.40		700	500	16 60
铁 素 铁 耐 热 钢										
1Cr17	≤ 0.12	≤ 0.80	≤ 0.80	16.0 ~18.0				400	250	20
1Cr17Ti	≤ 0.12	≤ 0.80	≤ 0.80	16.0 ~18.0		5 x c% ~0.80		450	300	20
1Cr17Mo2Ti	≤ 0.10	≤ 0.80	≤ 0.80	16.0 ~18.0		≥ 7 x c%		500	300	20

(续)

钢 号	C	Mn	Si	Cr	Mo	W	V	Ti	B	Re	抗拉强度 (牛/毫米 ²)	屈服强度 (牛/毫米 ²)	伸长率 (%)	冲击值 (牛·米/厘米 ²)
1Cr25Ti	≤0.12	≤0.80	≤1.00	24.0 ~27.0				5×C% ~0.80			450	300	20	
1Cr28	≤0.15	≤0.80	≤1.00	27.0 ~30.0				≤0.20			450	300	20	
奥 氏 体 耐 热 钢														
1Cr18Ni9Ti	≤0.12	≤2.00	≤0.80	17.0 ~19.0	Ni18.0 ~11.0			5×C% 0.027 ~0.80			550	200	40	
1Cr17Ni13W	0.10 ~0.15	0.50 ~0.80	≤0.60	15.0 ~16.5	Ni12.5 ~14.5	2.50 ~3.00	≤0.15	0.40 ~0.80			650	450 ~550	30	80
ZG1Cr14Ni14Mo 2W/Nb	0.09 ~0.15	0.50 ~1.00	≤0.55	13.0 ~15.0	1.70 ~2.10	1.25 ~1.65	Ni13.0 ~15.0	Nb(8) ~1.20						
Cr15Ni35WTi	≤0.08	≤0.60	≤0.60	12.0 ~16.0	Ni33.0 ~37.0	2.0 ~4.0	Al0.70 ~1.70	2.40 ~3.20			950	650	6	30
1Cr25Ni20Si	≤0.20	≤1.50	1.50 ~2.50	24.0 ~27.0	Ni18.0 ~21.0						600	300	35	
1Cr25Ni20	≤0.20	≤2.00	≤1.00	23.0 ~25.0	Ni19.0 ~22.0						600	245 ~340	40~53	

表3 国外常用耐热钢的化学成分和机械性能

钢 号	化 学 成 分							常 温 机 械 性 能				
	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ti	Ni	抗拉强度 (牛/毫米 ²)	屈服强度 (牛/毫米 ²)	延伸率 (%)	冲击值 (牛·米 /厘米 ²)
13CrMo44 (相当于15CrMo)	0.10 ~0.18	0.40 ~0.70	0.15 ~0.35	0.70 ~1.00	0.40 ~0.50				450~580	300	22	
16Cr10910	≤0.15	0.40 ~0.80	0.15 ~0.50	2.0 ~2.50	0.90 ~1.10				450~600	270	20	
X9CrMo91	0.10	0.45	0.65	9	1.0				450~580	300	22	
X20CrMoV121	0.17 ~0.23	0.30 ~0.80	0.10 ~0.50	11.00 ~12.50	0.80 ~1.20	0.25 ~0.35		0.3 ~0.8	700~850	500	17	80
1Cr20Ni14Si2	≤0.20	≤1.50	1.50 ~2.50	19.0 ~22.0	12.0 ~15.0						300	35
1Cr23Ni18	≤0.20	≤2.00	≤1.00	22.0 ~25.0	17.0 ~20.0					550	250	35
ZG1Cr25Ni13Ti	0.13 ~0.20	1~1.5	≤0.7	23.5 ~28	Ni 12~14			0.1 ~0.2				

(续)

钢 号	化 学 成 分						常 温 机 械 性 能					
	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ti	Ni	抗拉强度 (牛/毫米 ²)	屈服强度 (牛/毫米 ²)	延伸率 (%)	冲击值 (牛·米 /厘米 ²)
ASTM A38711组 如ASTM A3870 (相当于15CrMo)	≤0.17	0.40 ~ 0.65	0.50 ~ 0.80	1.00 ~ 1.50	0.45 ~ 0.65				425~600 530~710	250 320	22 22	
ASTM 304型 (相当于1Cr 18Ni9)	≤0.08	≤2.00	≤1.00	18.00 ~ 20.00			N ≤0.10	8.00 ~ 10.50	530	210	40	
ASTM 310S型	≤0.08	≤2.00	≤1.50	24.00 ~ 26.00				19.00 ~ 22.00	530	210	40	
ASTM 347型	≤0.08	≤2.00	≤1.00	17.00 ~ 19.00			Nb+ Ta ≥ 10×C ≤1.10	9.00 ~ 13.00	530	210	40	
ASTM 430型 (相当于1Cr17)	≤0.12	≤1.00	≤1.00	16.00 ~ 18.00				≤0.75	460	210	22	
ASTM 409型	≤0.08	≤1.00	≤1.00	10.50 ~ 11.75			8×C% ~0.75		370	180	20	
ASTM 410S型	≤0.08	≤1.00	≤1.00	11.50 ~ 13.50				≤0.60	425	210	22	

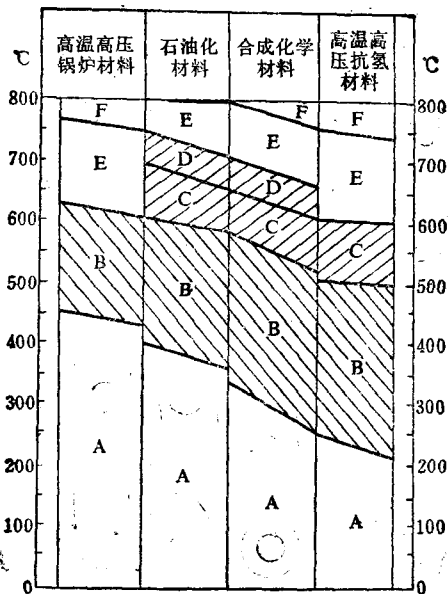


图2 各种耐热钢的适用温度范围

A—碳钢及普通低合金钢 B—Cr-Mo基低合金耐热钢 C—5Cr-0.5Mo
钢 D—9Cr-1Mo钢 E—CrNi奥氏体钢 F—高温合金

碳钢或15Mo钢外，过热器、再热器和主蒸汽管等均采用Cr-Mo系的低合金耐热钢(如15CrMo、12Cr1MoV、10CrMo910、12Cr2MoWVB、12Cr3MoVSiTiB等)、铬马氏体钢(如X9CrMo91、X20CrMoV121等)或铬镍奥氏体钢(如1Cr18Ni9Nb、1Cr19Ni9Mo2Ti等)。

锅炉汽包的工作温度一般低于450℃，多采用Cr-Mn钢、Mn-Mo钢和Mn-Mo-Ni钢制造，这些钢属低合金高强钢。

二、在汽轮机、燃气轮机中的应用 汽轮机的主蒸汽管

用材与锅炉钢管相同。

工作温度在500℃以下的叶片材料采用铬钼，铬钼钒低合金耐热钢或1Cr13类钢。在500~600℃工作时，选用含铬12%为基的热强钢。在650℃左右工作时，选用铬镍或铬锰奥氏体钢。

在535℃以下工作的汽轮机转子可选用低合金铬钼钒钢或铬钼钨钒钢，温度更高时可用含铬12%为基的热强钢。

汽缸、喷嘴室、主蒸汽阀和锅炉高压阀门多用铸钢，牌号有ZG 20CrMo、ZG20CrMoV、ZG15Cr1MoV、ZG2Cr5Mo等。

火力发电设备的蒸汽温度范围和选用材料间的关系如表4所示。

表4 火力发电设备的蒸汽温度范围与材料选用

蒸汽温度范围(℃)	材 料 类 别
<480	碳素钢, 0.15~0.5Mo
<580	1Cr-0.5Mo, 1.25Cr-0.5Mo-Si 2.25Cr-1Mo 9Cr-1Mo, 18Cr-8Ni
>580	18Cr-8Ni-Ti, 18Cr-12Ni-Mo, 18Cr-8Ni-Nb16, Cr-10Ni-6Mn-MoNbV

三、炼油和化工设备中的应用 耐热钢在炼油和化工设备中主要用于炉管、热交换器和其他受热面管子、高压加氢设备中的各种管道等。

对炼油和化工设备用耐热钢的选择，除考虑工作温度、应力和设计寿命外，耐腐蚀性也很重要。按照零件承受的工作介质不同，这种钢可分成如下几类：

(一) 高压抗氢钢 这类钢用于氨合成塔和高压加氢设

备，其使用温度在 500°C 左右。

(二) 抗硫腐蚀钢 用于石油裂化设备。主要有中铬钢和高铬钢，在 500°C 以下工作的也可用 $15\text{Al}_3\text{MoWTi}$ 钢。

(三) 抗乙醇和亚硝基等腐蚀用钢 用于高温硝酸氧化炉、合成氨和乙烯成套设备中的转化炉。工作温度在 800°C 以上的，采用镍铬奥氏体钢。

3 耐热钢的高温性能 钢材在高温时所表现出来的性能和室温时有很大的差别，钢材（包括焊接接头）的室温机械性能是不能代替其高温性能的，因为钢材在高温、长期应力作用下，其内部组织会发生显著的变化，随着组织的变化，钢的性能也会改变。以下简述几项耐热钢的高温性能及其评定方法。

一、蠕变 金属在一定温度和一定应力作用下，随着时间的增加，慢慢地发生塑性变形的现象称为蠕变。如碳钢当工作温度超过 $300\sim 350^{\circ}\text{C}$ 时，合金钢的工作温度高于 400°C 时，在应力作用下都会发生蠕变现象，而且温度越高蠕变速度越快。

蠕变极限是评定耐热钢抗蠕变能力的一项指标。条件极限系指在一定的变形速度下或在规定时间内获得一定总变形量时的应力。条件蠕变极限，通常用在规定的时间内引起一定总变形量时的应力值来表示。用于汽轮机、锅炉设备的耐热钢，其条件蠕变极限以 10^5 小时变形 1% 时的应力值来表示。

二、持久强度 金属材料在高温、长期应力作用下抵抗断裂的能力称为持久强度。持久强度能反映出材料在规定的时间内抵抗破坏的应力。汽轮机、锅炉设备的高温零部件，是以在一定温度下，10万小时的断裂应力作为持久强度极

限。例如，12Cr1MoV钢在585℃下工作时的持久强度 $\sigma_{10^5}=90\sim 100$ 牛/毫米²，这就表示在585℃温度下持续10万（10⁵）小时的断裂强度为90~100牛/毫米²。

三、蠕变脆性 耐热钢的蠕变脆性是指在温度、应力和时间三者联合作用下所产生的脆性倾向，在此种情况下钢的持久塑性显著降低。

蠕变脆性主要以持久塑性指标来评定。即用材料在持久强度试验时所测定的塑性(δ 、 ψ)与试验时间的关系来表示。很多钢材在一定温度下随着试验时间的增加，钢的持久塑性下降，到达某一时间后则出现最低持久塑性值，以后随着时间的延长，持久塑性复又上升。

四、氧化 由于氧与金属表面接触，最初形成一层极薄的氧化膜，之后在氧化膜与金属交界处通过扩散作用，不断形成新的氧化膜而使氧化层逐渐增厚。随着工作温度的提高，钢的氧化速度增加。在耐热钢中加入铬、铝、硅等合金元素能提高钢的抗氧化性能，其中铬元素的抗氧化效果为最佳。

氧化性能常用氧化深度来表示，例如12Cr1MoV钢在500℃下的氧化深度为0.05~0.098毫米/年；也可以用单位面积上的氧化增重量表示，例如Cr5Mo钢在700℃温度下，持续1000小时的氧化增重量为50毫克/厘米²。

二 常用耐热钢的焊接方法

所有的焊接方法几乎都能用于耐热钢的焊接，其中以手工电弧焊、氩弧焊、等离子弧焊和埋弧自动焊应用较多，且能满足质量要求。气焊方法在一些低合金钢薄板和少量小直径管子对焊时也有应用，但由于气焊的焊接接头质量不能充

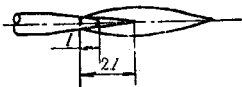
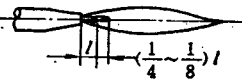
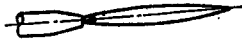
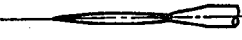
分满足耐热钢的使用要求，因此在大量生产的场合下，这种焊接方法已被淘汰。

1 气焊 常用的是氧-乙炔焰气焊，由于火焰温度相对电弧温度要低得多，因此热量不易集中，焊缝热影响区宽大。另外，在焊接合金元素含量较高的合金钢时，铬、钛等易氧化元素很容易被烧损。

气焊的主要优点，在于容易控制熔池形状和尺寸。

根据组成火焰的氧与乙炔比例不同，火焰可分为碳化焰、还原焰、中性焰和氧化焰（表5）。耐热钢含有不同数量的合金元素，一般只允许使用中性焰。

表5 氧-乙炔火焰的种类和特点

火焰种类	火焰形状	O_2/C_2H_2	特点
碳化焰		< 1	乙炔过剩，火焰中有游离碳及过多的氢，焊低碳钢等有渗碳现象。最高温度2700~3000℃
还原焰		≈ 1	乙炔稍多，但不产生渗碳现象。最高温度2930~3040℃
中性焰		1-1.2	氧与乙炔充分燃烧，没有氧或乙炔过剩。最高温度3050~3150℃
氧化焰		> 1.2	氧过剩，火焰有氧化性。最高温度3100~3300℃

2 手工电弧焊 手工电弧焊是利用焊条与焊件间产生的电弧热将金属熔化的一种焊接方法。其最大的特点是操作自由方便，可以在各种场合从各种位置进行焊接，设备简

单, 焊接质量可以满足各种耐热钢的要求。

在所有焊接方法中, 手工电弧焊是一种基本方法。要达到一定的质量要求, 掌握操作技巧和选择合适的焊条是十分重要的因素。

耐热钢手工电弧焊使用的焊机实际上都是直流弧焊机。与交流弧焊机相比, 直流弧焊机更能保证电弧的稳定性, 尤其在使用 $\phi 2.5$ 毫米小直径焊条和立焊、仰焊时, 一般的交流弧焊机满足不了操作上的要求。耐热钢都含有不同数量的合金元素, 不论从提高焊接接头的抗裂纹能力还是满足机械性能考虑都要求采用碱性焊条, 现在市场上虽有交直流两用的碱性焊条, 但其操作性能和焊缝质量都还不够理想。

表 6 是我国的低合金耐热钢和部分中、高合金耐热钢用

表6 耐热钢焊条的药皮类型及其使用特点

牌号	国 标	药皮类型	焊接电源	焊缝金属主要成分(%)	主要用途
热107	TRMo-7	低 氢	直 流	Mo~0.5	用于工作温度 $\leq 510^{\circ}\text{C}$ 的15Mo类型的珠光体耐热钢焊接
热200	TRCrMo-0	氧化钛- 氧化铁	交、直流	Cr~0.5 Mo~0.5	用于工作温度 $\leq 510^{\circ}\text{C}$ 的12CrMo类型的珠光体耐热钢焊接
热202	TRCrMo-2	钛 钙	交、直流	Cr~0.5 Mo~0.5	同 上
热207	TRCrMo-7	 低 氢	直 流	Cr~0.5 Mo~0.5	同 上
热307	TRCr1Mo-7	低 氢	直 流	Cr~1.0 Mo~0.5	用于工作温度 $\leq 520^{\circ}\text{C}$ 的15CrMo等珠光体耐热钢的焊接