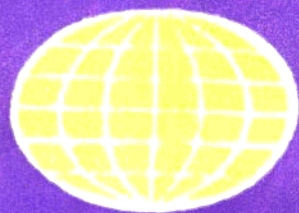


国外



低合金钢、合金钢

(总第15集)

1995

冶金部钢铁研究总院

国外低合金钢、合金钢

(内部发行)

1995年(总第15集)

主办: 冶金工业部 科学技术司
钢铁研究总院

编辑者: 冶金部钢铁研究总院
出版者: 《国外低合金钢、合金钢》编辑部
地址: 北京学院南路76号(100081)
印刷者: 北京百善印刷厂
发行者: 本刊编辑部

前 言

为配合《八五》国家重点科技攻关课题，大力发展我国的低合金钢和合金钢，冶金部科技司委托钢铁研究总院在《八五》期间仍继续编译出版《国外低合金钢、合金钢》情报资料，供有关单位和人员参考。

1995年出版最后一集，约24万字，内容包括综述、能源用钢、交通运输用钢、化工化肥用钢和工程机械用钢五部分。文章的选取力求密切结合《八五》攻关的实际需要，又考虑到未来发展动向。本资料对从事低合金钢和合金钢生产、使用、科研和教学人员很有参考价值。欢迎订购。《七五》期间出版的十集尚有少量剩余，仍可订购。

本文集由冶金部钢铁研究总院赵先存、王玉砚技术审校，吴曼先主编，张玉凤绘图。

由于编译者水平有限，错误和不当之处，欢迎读者提出意见和批评。

编 者

1995年10月

10/10/95

目 录

一、综 述

国外工程机械用钢及其发展	(1)
国内外水轮机组、发电机组用钢概况	(10)
合金结构钢的发展	(18)
弹簧钢的合金化研究	(24)
钢91的发展及未来的应用	(31)
温加工Esshete 1250: 高强度螺栓钢	(36)

二、能源用钢

作为钢铁材料先行者的电站技术	(42)
火力发电设备用耐热钢的开发动向	(45)
冷凝管用超级不锈钢钢管FS10	(51)
超高纯净钢生产技术的开发	(53)
压水堆蒸汽发生器管在高温高压水环境下动态SCC临界值的评估和寿命预测	(56)
改进型12%Cr钢TMK-1转子在593℃大型超高临界压力发电设备上的应用	(60)
具有优异HAZ韧性的590MPa级铜析出强化高强度钢的开发	(62)
快速反应堆堆芯材料用改进型奥氏体钢的开发	(66)

三、交通运输用钢

汽车用结构钢的未来发展	(70)
21世纪的钢轨钢——专题讨论会综述	(73)
高强度传动齿轮用钢的开发	(76)
奥氏体晶粒尺寸对渗氮钢组织和接触寿命的影响	(80)
汽车的轻量化与材料	(81)
满足用户要求的热轧板材生产工艺的改进	(84)
先进的钢轨在线轨头淬火工艺	(86)
含硼特殊结构钢的淬透性	(89)

四、化工化肥用钢

耐蚀耐磨材料的发展动向	(95)
新双相不锈钢钢管DP3W	(98)
添加镍对低合金回火马氏体钢的抗硫化物应力破裂的影响	(101)
提高耐蚀马氏体时效钢的冲击韧性	(104)
合金元素对稳定奥氏体不锈钢力学性能的影响	(107)

如何正确选用不锈钢	(111)
双相不锈钢加工材氢脆型应力腐蚀裂纹敏感性及其断口的评估	(116)

五、工程机械用钢

新开发的不锈钢及其焊接	(120)
新型锻造模具材料	(123)
无磁滚动轴承钢	(127)
形变热处理高强度可焊接钢的微合金化和性能	(129)
塑料成形用模具材料	(135)
32Г2Φ钢和32Г2ΦPT钢的组织 and 性能	(140)
锅炉管用高强度2.25Cr-1.6W-V-Nb钢(HCM2S)的开发	(143)
非调质高强度螺栓	(147)

国外工程机械用钢及其发展

朱维翰

(冶金部钢铁研究总院)

一、引言

土方、石方、混凝土工程以及各种建筑安装工程在综合机械化施工中所必需的作业机械设备统称为工程机械。按我国习惯，工程机械主要包括：挖掘、铲土运输、工程起重、路面施工、压实、桩工、钢筋混凝土、凿岩与风动、叉车、专用工程机械等10大类。美国称这些为建筑机械，日本则称之为建设机械。其它工业国家工程机械所包含的内容大同小异，但产品种类和范围一般比我国更广泛些。

工程机械随各国经济的发展而迅速发展。例如，日本的工程机械自1955年至1980年，平均年增长率为29.1%，美国从1967年至1976年的平均年增长率为12%，同时期其它主要工业国家工程机械的平均增长率分别为：原苏联20%；法国15%；原联邦德国11.9%；英国9%。与1984年相比，1994年我国工程机械行业的年产值增长了10倍以上。预计“九五”期间，国内各类工程机械的年产量与“八五”比较将分别增长1~4倍。

美国的工程机械产品品种比较齐全，产量高，质量好。日本的工程机械工业起步稍晚，但由于大量引进国外先进技术和与国外企业合作经营加速了其发展，目前许多产品已达到世界先进水平。推土机、装载机、轮式起重机和挖掘机在日本工程机械的生产中占主要位置。此外，德国、原苏联、英国、法国、意大利等国在世界工程机械的生产中都占有比较重要的位置。随着建设工程的不断发展和施工机械化水平的不断提高，工程

机械继续向大型化和微型化两个方向发展。

在工程机械中，材料和热处理费在零件成本中占有很大的比重。图1是日本小松公司工程机械的成本构成图⁽¹⁾。据统计，原材料费总计在工程机械整机成本中占45%左右。而原材料中钢材又占主要地位。图2和图3是小松公司60t推土机和0.7m³挖掘机上所使用材料的构成比例，由图可见钢铁材料（轧材、锻材、棒材及少量铸铁）所占的比例达到70%以上。而一台16m³电铲所用高

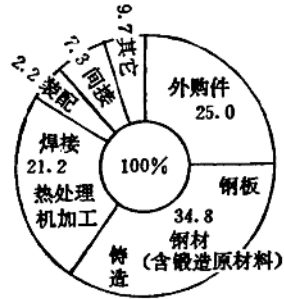


图1 日本小松公司工程机械成本构成图⁽¹⁾

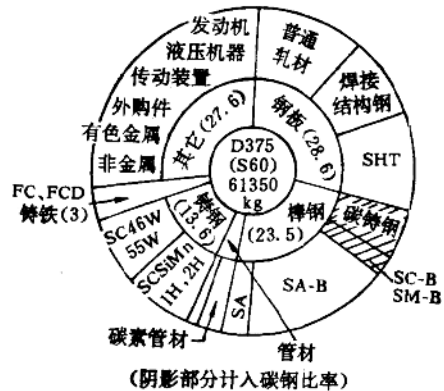


图2 日本小松公司60t推土机使用材料的构成图⁽¹⁾

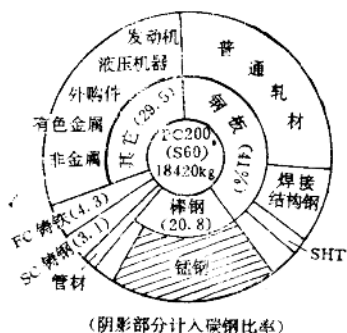


图3 日本小松公司0.7m³挖掘机使用材料的构成图^[1]

强度钢板一项的重量就达420t(约占整体重量的59%)。因此,有人称工程机械为“活动着的钢材”。

工程机械用钢材的品种繁多,下面仅就用量较大,用材问题比较突出的推土机、装载机、挖掘机、汽车起重机中关键、易损零部件所用的钢材和热处理问题做一简要介绍。

二、国外工程机械用耐磨钢

工程机械零部件的磨损以磨料磨损为主。日本将这类零部件与土砂间的磨损分为三种类型。第一类是凿削式磨损。例如,推土机的松土器齿尖和刀片以及履带板等的磨损就可以看作是这种磨损,其磨损速度最大。第二类是研削(或研磨)式磨损(或称之为高应力磨损)。如链轨节、支重轮、销套等的磨损。第三类是擦伤式磨损(或称为低应力磨损)。斗齿、松土齿、推土机、平地机刀片即属此类。

1. 履带板

履带板容易磨损的现场大多是有岩石的地面,该板是履带式行走机械中消耗量最大的一种零件。一般一套履带板的使用寿命要求达到8000~10000h。

美国和日本大多采用中碳碳钢或锰钢的轧制履带板,整体调质后筋部再进行中频感应淬火(喷水淬火)、低温回火,以提高筋部的耐磨性^[2]。例如,日本的SMn433H,美

国的10B35,其化学成分(%)是: C 0.32~0.38, Si 0.15~0.35, Mn 0.60~0.90, S ≤ 0.035, P ≤ 0.030, Cu ≤ 0.30, Ni ≤ 0.20, Cr ≤ 0.20, B 0.003~0.0005。日本也有用高硅钢SHSC-2H来制造大马力推土机履带板的^[3,4],其化学成分为(%) : C 0.30, Si 1.74, Mn 0.51, P 0.009, S 0.016, Cr 0.60, Mo 0.12, B 0.0012。美国卡特彼勒公司还采用一种中碳锰钒钛钢来制造履带板。日本厂家还采用辊压式整体淬火、中频回火的工艺,以缩短生产周期并防止淬火变形。

履带板的本体硬度一般为HRC32~50,筋部一般为HRC40~53。

2. 履带链轨节

链轨节承受整个机器的重量,使用条件苛刻,因此要求它具有较高的强度和疲劳强度、一定的韧性,其轨面应具有较高的抗磨损性能。根据各种机型的不同要求,美国、日本等选用不同的钢种,如碳钢S50C、SAE 1040,中碳锰钢SMn41、SMn433H、SMn-443H,铬钼钢SCM435H、SCM835M0D、铬硼钢SCr435B、锰硼钢SAE10B35M0D、SAE15B36M0D,镍铬钼钢SNCM431等。热处理采用整体调质后,轨面感应加热淬火、低温回火。轨面硬化深度大于15mm,硬度为HRC52~58,基体硬度HB330~390。

在链轨节的磨损量达到允许的极限时,轨面的高频淬火区要进行耐磨堆焊。近年来从提高轨面的淬透性、韧性、降低成本和减少焊接裂纹敏感性等方面考虑,一般均选用硼钢。为确保高硬度区的韧性而采用超纯净钢。为减少氧化铝系夹杂,采用脱气处理。

日本生产的小机型推土机的链轨节(单件≤4kg)多采用锻后余热淬火处理。在进行锻后淬火时必须对锻造加热温度、加工时间及冷却方法等加以严格控制。

3. 履带销套

履带销套与驱动轮的齿啮合,是向履带传递驱动力的零件,承受由齿面传递的大负

荷,同时还受到履带的冲击载荷,工作条件恶劣。因此,要求材料耐磨料磨损,具有高的抗弯强度、疲劳强度和足够的冲击韧性。国外基本上都选用低碳钢(如SAE1018)、低碳铬钼钢(如SCM420、SCM415)或低碳锰硼钢等钢管进行渗碳淬火(一次或两次)、渗碳-高频表面淬火,以增加表层的耐磨性,渗碳层的厚度2~4mm(大型推土机3~4mm),表面硬度HRC58~63,心部HRC38。为了提高疲劳强度要求采用高纯净度的钢材。非金属夹杂物的含量对销套的疲劳寿命有很大影响。日本小松公司在中小挖掘机履带销套生产中用SMnB2中碳钼硼钢(C0.30~0.33%, Mo1.20~1.50%, B>

0.0005%)取代SCM420钢,渗碳时间由53h缩短至28h,获得同样深度的硬化层,仅材料费一项即可降低成本9%。同时,小松公司在大型推土机履带销套中用950℃高温渗碳,也获得同样效果,而渗碳时间缩短了10h,节约10%的能源费,并使设备占有率减小20%,而炉子的修理费用没有增加。

日本专利还介绍了一种用于销套的高硬度渗碳钢,其化学成分见表1,热处理工艺及结果见表2。由表2可见,用实例1的材质和热处理工艺制成推土机履带销套与SCM-21钢制销套比较,前者的耐磨性为SCM21钢销套的1.7倍。

4. 支重轮

表1 化学成分, %^(%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
实例1	0.22	1.2	1.11	0.022	0.018	4.51	2.20	0.16
实例2	0.20	0.98	1.03	0.025	0.015	4.16	1.90	0.78
实例3	0.21	1.31	1.18	0.020	0.019	4.30	2.10	1.15
原用钢SCM21	0.15	0.30	0.75	0.018	0.015	0.98	0.23	—

表2 热处理工艺及结果^(%)

	渗碳工艺	淬火温度, °C	回火温度, °C	渗碳深度, mm	表面硬度, HRC
实例1	930℃×20h	900~930	220	2.4	64.5
实例2	930℃×20h	900~930	220	2.4	64.0
实例3	930℃×20h	900~930	220	2.4	64.3
原用钢SCM21	930℃×20h	700~830	220	2.6	59.5

推土机支重轮承受整机全部自重,因工作条件极其恶劣,故易被损坏。由于它与链轨节之间受到泥砂磨损,要求具有良好的耐磨性、高的强度及足够的韧性。在一般条件下,支重轮部件的使用寿命为1000~10000h。

支重轮采用的材质有中碳锰钢SMn443H或中碳硼钢S43BC、锰硼钢锻件。美国、日本一般采用中频感应加热淬火,淬硬层深4~9mm,轨面硬度HRC55。日本也有采用

整体加热喷水淬火的。大机型支重轮的内表面也采用喷水淬火,以提高内表面的硬度^(6, 7)。

随着热处理工艺水平的提高,许多支重轮已选用碳钢进行整体调质后表面再进行感应淬火。美国卡特彼勒公司设计了支重轮淬火系统,采用整体加热喷水淬火工艺,淬火介质为UCON(聚烯二醇)水溶液,浓度为8~10%。溶液初始喷射压力为27KPa,溶

液温度43~49℃。工作表面的硬度约为HRC 52^[6]。

在支重轮轴承外侧采用浮动油封,防止泥沙进入,可大大减少磨损。国外使用的密封环大多采用合金铸铁精密铸造而成。如日本的Cr-Mo-W-V、Cr-Mo-V、Cr-Mo-W-Ni-V-Co等系列,硬度为HRC65~68,德国的Ni-Cr、Cr-Co-Mo系和美国的Ni-Co-Mo系等,它们的实测硬度分别为HRC57~63和HRC62~63^[6]。

5. 驱动轮和引导轮

驱动轮的齿面与销套之间为三体磨料磨损,主要失效形式为齿面节圆处磨损。常用的材质有中碳锰钢(如SMn433H)、中碳硅锰铸钢(0.44% C、0.50% Si、1.10% Mn)、含硅的铬钼铸钢、中碳锰硼钢(0.37% C、1.10% Mn、0.0017% B)等。中、小机型的驱动轮多采用整体式铸钢件,通过感应加热淬火后,齿面硬度可达HRC 50左右。大机型的驱动轮均采用组合式,轮齿为锻件,轮毂为中碳钢铸件。日本有一种用于大直径驱动轮拼合轮齿的淬火装置,可使淬火变形控制到最低限度并防止淬火裂纹。

日本大多用中碳硅锰铸钢(0.44% C、0.50% Si、1.10% Mn)制造引导轮。外圆轨面采用感应加热淬火,淬硬层深6mm左右,轨面硬度HRC56。也有用S38C制做轮毂, S17C做轮毂焊接而成的。美国采用球墨铸铁制造导轮。原苏联采用35ГТP和45ФП钢制造引导轮圈,其表面硬度可达HRC 51.5~52,淬硬层深度4~5mm。试制的引导轮在ДТ-75M型拖拉机上实车试验6000h后,经高频淬火后的轮圈与成批生产的轮圈比较,在厚度方向耐磨性提高1.64倍,宽度方向提高1.07倍^[9]。

6. 刀片(切刃、刀刃)

推土机、平地机、铲运机的刀片(主刀片和侧刀片)工作时切削土砂、与石块撞

击,因此,要求具有较高的耐磨性和良好的抗冲击性能,一般要求其硬度达到HRC46~55,夏比冲击值大于30Nm/cm²。刀片多采用淬透性好的中碳低合金锰钢(SMn433H)和锰硼钢(0.35% C、1.1% Mn、0.0017% B)等进行淬火、回火,使其心部完全淬透成为马氏体组织。日本小松公司的推土机主刀片和侧刀片均采用SHSC-2H高硅铬钼硼耐磨钢,其化学成分见表3。

表3 SHSC-2H的化学成分, %^[10]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	B
0.30	1.74	0.51	0.009	0.016	0.60	0.12	0.0012

日本专利介绍了一种中碳含硅铬钼铝的耐磨钢,其化学成分为(%): 0.49C、1.36 Si、0.72Mn、1.02 Cr、0.04 Nb、0.39 Al^[11]。用这种钢制成平地机的切削刃,硬度为HRC56, U型缺口室温冲击值为54.9 Nm/cm²。这种钢的回火稳定性较好,适于切削刃尖端可能产生高于400℃的已压实的砂石路面和除雪作业,试验表明,新钢种的磨损量比传统钢的明显减少。

日本还介绍了几种中碳硅铬钼硼钢、中碳锰钢、中碳铬钢、中碳硅铬钼制成的推土机、平地机刀片加压或辊压淬火的实例^[12]。原苏联为了提高刀片的耐磨性,曾对其进行电机械加工处理(ЭМО法),在镀铜的硬质合金或高速钢滚柱与刀片间施加低电压大电流和一定压力,可使强化深度达到1.2~2mm,表层硬度HV50 680~715(原始硬度HV50 276),经强化后,推土机刀片的硬度约可提高1.5倍^[13]。

7. 松土器齿

推土机的松土器齿是受到严重凿削式磨损的零件,在破碎岩石时,其齿尖由于摩擦发热,接触面的温度高达550~650℃,因此,要求齿尖材料具有高硬度、高强度、高韧性

($HRC > 50$, $\sigma_b \geq 980\text{MPa}$, $a_k > 29.4\text{J}$) 和良好的抗回火软化性能。70年代中期,日本小松公司研制了含Nb的SHSC-3(0.33% C、1.65% Si、0.53% Mn、0.018% P、0.014% S、4.08% Cr、0.97% Mo、0.05% Nb)^[14]。它的抗回火软化性能和淬透性能好。淬、回火后硬度为HRC48~52。SHSC-3钢松土器齿的综合寿命是原用SHSC-2钢

的两倍。该钢的缺点是不能用堆焊法修复。70年代中期以来,日本又研制了如中碳中锰钢,750℃水淬,350℃回火后硬度HRC54~51^{[15][16]}和双金属复合齿尖^[17]。表4是80年代日本开发的一个松土器齿钢种。该钢生产的松土器齿的质量与SHSC-3钢相当,但其原材料便宜,且锻造性能好,费用低,是一种理想的松土器齿材料。

表4 新钢种与SHSC-3钢的化学成分(%)及热扭转次数的对比^[18-20]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Nb	热扭转次数
新钢种	0.31	1.72	0.39	0.013	0.011	3.09	0.46	0.30	—	24
SHSC-3	0.33	1.65	0.53	0.018	0.014	4.08	0.97	—	0.05	16

8. 斗齿、斗刃

斗齿、斗刃应具有高的表面硬度和足够的淬硬层深度、高屈强比和良好的韧性;齿尖座(斗齿基体部分或镶嵌式斗齿的本体部分)应具有足够的强度、良好的延伸率和较低的缺口敏感性,同时,应对冷脆不敏感。

目前,斗齿所用的材料可分为两大类:经受较高冲击接触应力的斗齿仍然选用各类高锰钢,对于在工作时不能达到充分加工硬化的斗齿则选用低合金钢。斗齿在结构形式上又分为整体式和组合式,组合式由耐磨的齿尖与齿座两部分组成。

目前,高锰钢斗齿的工作与其它高锰钢部件的工作类似,主要集中在两个方面:(1)调整高锰钢的化学成分和进一步合金化,如开发了高碳高锰钢、低碳高锰钢、介稳奥氏体锰钢、中锰钢、超高锰钢以及加入铜、钨、钛、铬、镍、钒等元素的改型高锰钢等。(2)对高锰钢的生产工艺加以改进和完善,如用炉外精炼、吹氩、吹氮等降低夹杂物,提高钢的纯净度;实施悬浮浇注、表面合金化、爆炸硬化、堆焊硬化、热处理工艺的改进。高锰钢斗齿的基体硬度通常为HB180~200,经过充分加工硬化后,其表层硬度应提高到HB400~600。

低合金钢斗齿(斗刃)具有中等含碳量(0.2~0.55%),并加入锰、铬、镍、铜、硅、钒等合金元素中的一种或数种以提高其淬透性,改善韧性和低温性能,或形成碳化物来增加耐磨性。具有代表性的低合金铸钢斗齿有Mn-Cr、Cr-Mo、Ni-Cr-Mo、Si-Mn-Cr-Mo等钢系。为适应不同条件的要求,应选择不同化学成分的钢种及合理的热处理制度,以获得硬度、强度与韧性的良好配合。美国B-E公司的280B挖掘机的斗齿和齿尖是用含Ni、Cr、Mo等元素的CS马氏体钢制作的,其屈服强度达到1350MPa,硬度为HRC36~44。日本住友公司在70年代研制成功了SSA系列新型耐磨钢,分为低锰型、锰-铬-铜型和硅-锰-铬-铜型三类。它们的含碳量在0.3%左右。斗齿的布氏硬度HB250~520,屈服强度可达1450MPa。这种斗齿在现场使用取得了良好的效果^[21]。

文献^[22]中还介绍了美国、日本、德国和原苏联的斗齿、斗刃等选用的一些低合金耐磨钢。

三、工程机械用高强度结构钢

工程机械所用的高强度结构钢包括可焊接高强度钢板、齿轮及高强度销、栓用钢等,因篇幅所限,此处仅简单介绍高强度钢

板的一些情况。

挖掘机、装载机、起重机、大型自卸车等工程机械的主要结构件承受的是复杂多变的周期载荷,要求其构件材料具有高的屈服强度和疲劳强度、良好的冲击韧性、冷成型性和优良的可焊接性能。随着工程机械向大型化、轻型化发展,对上述性能的要求更为突出。高强度钢板的性能水平对于提高工程机械的能力和效率、延长使用寿命、减轻设备自重、降低能耗和原材料消耗、提高整机的档次有着重大作用。以往,美国普遍使用 $\sigma_s=345\text{MPa}$ 的钢板制作 $7.5\sim 13\text{M}^3$ 电铲的动臂、回转平台、底座和履带架,至80年代中期,所用的这类钢板的屈服强度级已提高到 $\sigma_s 585\sim 685\text{MPa}$ 。美国的A514(T-1)钢,日本的Welten60、80钢,德国的StE 460、690,原苏联的14Г2CAΦ钢等均普遍用于工程、建筑机械中。这类低合金高强度钢板在国外已形成系列产品,其抗拉强度一般为 $590\sim 1270\text{MPa}$ 。例如,日本新日铁的Welten系列高强度钢的钢号有30多个(其中 $\sigma_b\leq 980\text{MPa}$ 18个,HB235-500的高硬度耐磨板16个)。美国A514高强度钢的钢号有13个($\sigma_b 690\sim 895\text{MPa}$),这类钢的韧性(含低温韧性)好、可焊接、可冷成型、适用板厚范围宽,可满足工程机械结构件用材的需要。随着高强度钢板应用的普及,大大提高了工程机械的效能和使用寿命,并节约了原材

料。国外在 0.5m^3 的液压挖掘机上用735MPa级高强度钢板取代原用的345MPa级钢板,使金属结构件的重量减轻了25~30%,斗容增至 0.65m^3 ,挖掘力从7t增至12t。原苏联乌拉尔重机厂3KГ-4.6挖掘机的斗杆梁在改用屈服强度为585MPa的钢板制作后,使用寿命提高了一倍。日本的大型挖掘机的底座、侧架、斗体、斗杆、动臂、平台和后支座等均采用高强度钢板制造,这种钢已占该机使用钢板的73.4%^[28]。其中的美国卡特彼勒公司的992B大型矿用装载机的铲斗所用低合金高强度钢板的屈服强度达到了980MPa,日本大型推土机推土板采用1075MPa和1375MPa级Mn-B系调质高强度钢板后,在硬岩地带工作时,其耐磨性分别比585MPa级提高50%和130%。80年代德国已用牌号为StE880V的 $\sigma_s 880\text{MPa}$ 级细晶粒高强度结构钢板制造适于低温条件下工作、起重量为160~250t的汽车起重机,在LTM1060汽车起重机机架上70%钢板使用StE 880,30%用StE690($\sigma_s 690\text{MPa}$ 级)^[24]。目前,国外千吨级的汽吊已使用1175MPa级高强度可焊接钢板做为吊臂等结构件材料。

美国P&H2300XF型电铲的铲斗、起重臂、钢丝绳托架、A形架转台、底架、以及左右履带架等大型焊接结构件所用的P&H166与P&H50C调质或正火处理钢板的化学成分及力学性能见表5及表6。

表5 P&H166及P&H50C的化学成分, %

牌 号	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo
P&H166	0.13/0.20	0.40/0.70	0.20/0.35	≤ 0.035	≤ 0.040	0.85/1.20	0.15/0.25
P&H50C	≤ 0.12	0.95/1.65	0.15/0.30	≤ 0.040	≤ 0.050		
牌 号	Cu	B	Ti	Nb	V	Al	
P&H166	0.20/0.40	0.0015/0.005	0.04/0.10				
P&H50C				0.02/0.10	0.02/0.10	≤ 0.08	Nb+V ≤ 0.15

表6 P&H166及P&H50C的力学性能

牌 号	抗拉强度 σ_b MPa	屈服强度 σ_s MPa	V缺口冲击韧性, J -46℃~60℃	延伸率 δ %	适用板厚 mm
P&H166	685~920	620~685	34 20.6		12~127
P&H50C	549~685	412~440		≥ 22	25~127

80年代中期我国引进的卡特彼勒公司的推土机、装载机制造技术中涉及到IE标准的几个强度等级的低合金高强度钢板,其化学成分范围及力学性能指标汇于表7及表8。其

中E893、E577皆为淬火后中温回火,在结构制造中,焊前不预热,焊后不处理。E860钢要求真空脱气处理,钢中的 $O_2 \leq 20ppm$ 。

工程机械所用的低合金可焊耐磨钢板是

表7 IE标准中的几个低合金高强度钢板的化学成分, %

牌号	C	Mn	Si	P	S	Nb	V	B	Cu
E893	0.13/0.20	0.60/1.35	0.15/0.35	<0.04	<0.05			0.0005/0.003	<0.25
E577	0.13/0.20	0.60/1.35	0.15/0.35	<0.04	<0.05			0.0005/0.003	
E170	≤ 0.20	≤ 1.35	0.15/0.35	<0.04	<0.04	0.04/0.06 (板厚12mm以下)	0.010/0.15 (板厚12mm以上)		
E860	<0.22	<1.40	0.15/0.40	<0.05	<0.04	0.05/0.08 (板厚 $\leq 12mm$)	0.010/0.15 (板厚 $\geq 12mm$)		

表8 IE标准中的几个低合金高强度钢板的力学性能指标

牌号	屈服强度 σ_s MPa	抗拉强度 σ_b MPa	延伸率 δ %	断面收缩率 %	V缺口冲击功 J	硬度 HRC	板厚 mm	用途
E893	≥ 960	≥ 1035	≥ 10	≥ 25		31~37	8~10	推土机前面板
E577	≥ 620	725~860	纵向 ≥ 18 横向 ≥ 16	≥ 40		20~30	8~10	推土机弧形板
E170	≥ 260				-40℃ ≥ 27		4~60	装载机动臂等
E860	290~450	>430	纵向 $>20\sim24$ 横向 $>18\sim22$		-30℃ 11		2.5~40	翻车保护用钢板

属于低合金高强度钢系列中的一类品种。初期,国外已将抗拉强度590~785MPa级的可焊钢板广泛用于制造工程机械耐磨部件,随着工程机械的发展,需要提高构件的使用寿命,70年代以来,国外又开发了低合金高硬度(高强度)耐磨钢板,其硬度范围一般为HB235—500。国外的许多钢铁公司已将这类钢系列化。表9是日本新日铁公司和英国

米克公司的低合金耐磨钢板钢的化学成分、硬度及适用的钢板厚度。

国外在低合金高强度钢板的开发与生产上采取的主要技术措施是用先进的冶炼与炉外处理工艺,保证钢质的纯净度,随后根据不同情况,对钢板分别采用控轧控冷、正火调质热处理(含轧后直接淬火)等不同工艺,其特点是在保证钢板性能的同时,尽量

表9 新日铁和米克公司低合金耐锈钢板的化学成分、硬度及适用板厚

序号	国家	牌号	适用板厚 mm	化 学 成 分, %							布氏硬度 HB
				C	Si	Mn	P	S	Cr	其 他	
1	日本	WEL-TENAR235	6~100	≤ 0.22	≤ 0.35	0.60~1.20	≤ 0.020	≤ 0.015	0.40~0.80	Cu=0.15~0.50 Ni=0.40~1.50 Mo=0.15~0.60 V ≤ 0.10 B ≤ 0.005	≥ 235
		WEL-TENAR285									≥ 285
		WEL-TENAR320									≥ 321
		WEL-TENAR360									≥ 361
		WEL-TENAR400									≥ 401
2	日本	WEL-TENAR235C	6~75	≤ 0.22	≤ 0.35	0.60~1.20 板厚大于50mm时 板厚大于50mm时	≤ 0.025	≤ 0.015	0.60~1.20	Cu ≤ 0.50 Mo=0.15~0.60 V ≤ 0.10 B ≤ 0.005 板厚>50mm时, Ni ≤ 0.35	≥ 235
		WEL-TENAR285C									≥ 285
		WEL-TENAR320C									≥ 321
		WEL-TENAR360C									≥ 361
		WEL-TENAR400C									≥ 401
3	日本	WEL-TENAR235E	6~50	≤ 0.22	≤ 0.55	≤ 1.60	≤ 0.025	≤ 0.015	≤ 0.50	B ≤ 0.005	≥ 235
		WEL-TENAR285E									≥ 285
		WEL-TENAR320E									≥ 321
		WEL-TENAR360E									≥ 361
		WEL-TENAR400E									≥ 401
4	英国	WEL-TEN AR500E	6~20 20~50	≤ 0.35	≤ 0.55	≤ 1.60	≤ 0.015	≤ 0.010	≤ 1.00	B ≤ 0.005	≥ 477
		ARQ360	≤ 40	≤ 0.20	0.15~0.70	≤ 1.70	≤ 0.03	≤ 0.02	≤ 0.05	Cu ≤ 0.30, B ≤ 0.005, Mo ≤ 0.15 B ≤ 0.005	名义500 360~440

简化与减少钢中的合金元素种类及数量、节约能源，同时达到改善钢板焊接等工艺性能并提高生产率的目的。就钢板的调质热处理这一传统工艺而言，在如何利用轧后余热，把钢板轧制与调质热处理结合起来，以更廉价的化学元素取代贵重元素等方面，国外做了不少研制与开发工作。

在高硬度钢板的生产中，如果采用适当的中、低温回火处理则比高温回火的硬度高，综合性能也能满足要求，同时，由于碳当量低往往不需预热可直接进行焊接。采用钢的微合金化成分设计，配合以钢的控轧、控冷生产工艺，可以节约合金资源与能源，而且这类低合金高强度钢板的强韧性好，焊接及冷成型性能优良，国外已普遍采用控轧控冷方法生产强度级为440MPa、590MPa的低合金高强钢板。

四、结束语

鉴于工程机械市场的激烈竞争及降低成本的考虑，国外有关的制造商都致力于旨在提高材料利用率、降低材料总价、修订材料的技术规格、降低零件加工费用、改进热处理技术等方面的研究。为降低材料单价尽量采用锰钢、硼钢甚至碳钢。在热处理方面，采用减少热处理时间、缩短工艺过程、改变工艺方法（如锻、轧后余热淬火，用水淬代替油淬等）、采用节省能源的热处理设备。图4和图5是日本小松公司推土机和挖掘机零件的热处理状况，由图看出，在该公司的挖掘机和中、小型推土机零件生产中采用

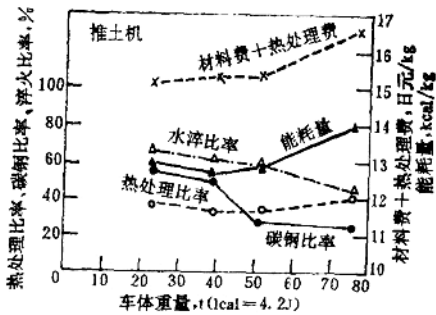


图4 推土机零件的热处理^(1, 2)

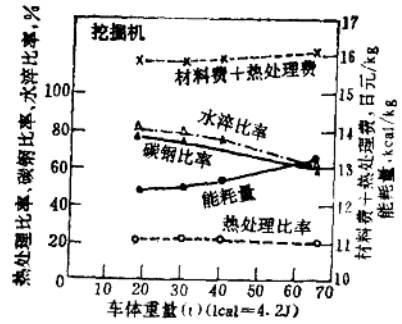


图5 挖掘机零件的热处理^(2, 5)

碳钢和水淬所占的比例很大。70年代以来，硼作为合金化元素在合金钢、低合金钢领域中逐步推广使用并取得了显著效果，在工程机械用钢中也不例外。由于极微量的硼可明显提高钢的淬透性，从而可节约大量贵重的合金元素，并使碳当量 C_{eq} 和焊接裂纹敏感系数 P_{CM} 大大降低。在许多用材情况下采用硼钢更为经济合理，这类钢对于大量采用焊接结构或需用堆焊来修复的许多工程机械零部件来说其特点显得尤为突出。硼钢适于水淬，且硼的淬透性效果与奥氏体化温度无明显关系，故硼钢可以在热加工后直接进行淬火，用较低的碳当量材料（通过快冷）获得所需要的硬度和强度，从而简化了热处理工艺，降低热处理成本。鉴于人们已掌握了精确控制化学成分和淬透性的技术，更为这类钢采用水淬提供了更大的可能性。目前采用含硼钢直接淬火工艺已经生产出适于工程机械用的980MPa级高强度厚钢板、锻件及1080MPa级可焊耐磨钢（0.13% C-1.5% Mn-B）。采用直接淬火法生产的50mm厚的HT100钢（980MPa级）的含镍量可降至1%，100mm厚的HT100钢的含镍量可降至2.3%，而HT80钢（780MPa级）则可去掉化学成分中的1% Ni。由于含硼钢的诸多优点，使其在国外的工程机械制造业中得到广泛应用。例如，日本小松公司已将十几种硼处理钢列入企业标准供工程机械制造使用。80年代我国从美国卡特彼勒公司引进的多种

机型推土机、装载机产品制造技术中,在选材方面涉及到多种中碳锰硼钢。例如,推土机履带板和刀片用钢(称之为35MnB和38MnB)、装载机铲刃型钢(0.29~0.37C、1.10~1.45Mn、0.0005~0.003B)。美国785MPa级(A514)中的15个低碳可焊高强度钢、日本、英国所开发的高硬度耐磨钢板钢以及许多其它级别的高强度钢中几乎无一例外的都采用了硼作为主要强化元素。

参 考 文 献

[1] 池田宏,铁と钢,1987(14),1631~1642
 [2] 工程机械,机械工业出版社,1986,477
 [3] 谭学斌、汪国华,国外工程机械,1983,2,75~79
 [4] 小松技报,1976(22)2,18~27
 [5] 日本特公昭,57-14749
 [6] 工程机械,机械工业出版社,1986,481
 [7] 田口一男,机械の研究,977,1,159~164
 [8] 王泽双,国外工程机械,1991,1,40~42
 [9] Коллаков В.В., Тракторы и сельхозмашины

[10] 小松技报,1976(22)2,18~27
 [11] 日本特公昭61-23258,(1986.6.5)
 [12] 王娟,国外工程机械,1984,6,67~71
 [13] 王隆基,国外工程机械,1991,1,42~43
 [14] 小松技报,1976(22)2,18~27
 [15] 耐磨锰钢,日本公开特许公报,昭和51-40319
 [16] 耐磨锰钢,日本公开特许公报,昭和51-40320
 [17] 松土器齿尖,日本特许公报,昭和51-26886
 [18] 日本公开特许公报,昭和57-14749
 [19] 日本公开特许公报,昭和57-42147
 [20] 日本公开特许公报,昭和57-26341
 [21] 李中翰,国外工程机械,1981,5,55~59
 [22] 工程机械,机械工业出版社,1986,486
 [23] 工程机械,机械工业出版社,1986,495
 [24] P. Gerster, Stahl und Eisen, 1984, 104(2), 49~52
 [25] 池田宏,铁と钢,1987(14),1631~1642

国内外水轮机组、发电机组用钢概况

易邦旺 郎文远 杨志勇 胡燕

(冶金部钢铁研究总院)

前言

世界各国都十分重视水能资源的开发和利用,发达国家水能资源开发率平均在40%以上,个别国家开发率可高达80~90%。我国水能资源居世界第一位,但是开发率仅为7.6%^[1]。

当前水轮机组、发电机组发展趋势是向容量大型化、高水头化、高比转速化方向发展^[2]。50年代世界水轮发电机组的制造水

平只能达到单机20万kW,到80年代已发展到单机70万kW。水轮机运行水头,混流式机组运行水头可达600M。

随着水轮发电机组的大型化,水轮机、发电机组制造行业对冶金材料的要求亦越来越高,几乎应用全部现代化冶金手段才能满足水轮机、发电机制造业的要求。国内外水轮机、发电机组不同部件用钢特点为:高强度、高韧性、高纯净度、高抗泥沙磨损、高

抗汽蚀性、高精度、高磁通、高抗磁性和高可焊性等。水轮机、发电机组用钢涉及到结构钢、不锈钢、无磁钢、软磁钢、复合钢板等品种。其材料规格要求最薄为1mm，最厚为450mm，最宽为5000mm。在水轮机、发电机组的成套设备中，其关键冶金材料又可分为：承压构件用钢、通流部件用钢、支承部件用钢、铁芯材料以及轴类部件用钢等^{〔8〕〔9〕}。本文就国内外水轮机、发电机组的主要关键部件用钢情况介绍如下。

一、承压构件用钢

水轮机组承压构件一般指的是涡壳、配流管、引水管道和叉管等。图1为某机组涡壳示意图。此类部件承受最大水头下所产生的压力。因此，在承压构件的用钢选材上必须要求此类钢种具有高的强度、良好的低温韧性和可焊性。

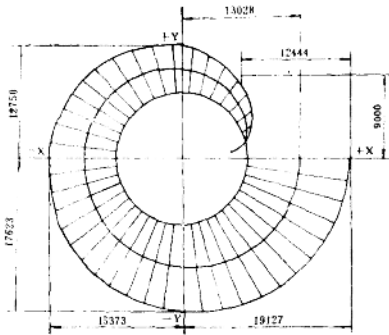


图1 某机组涡壳示意图

涡壳是水轮机组关键部件之一，随着水轮机组向大型化、高水头化发展，延用的A₃、碳素钢、16Mn容、15MnV、15MnVN等已不能适用大型涡壳的制造要求。涡壳用钢在强度级别选择上，各国水轮机组设计观点虽然有所争异，但近10余年来随着冶金技术的进步，炉外精炼LF、RH等技术的普及，总的发展趋势是尽可能地使用高强度级别钢来制造涡壳，以减少金属消耗和焊接工作量。如日本开发了HT60、HT70、HT80等一系列高强度调质钢板。其中HT60已成为制造

大型水轮机涡壳的主要钢种，它应用于古里水电站单机容量61万kW机组的涡壳上。对于HT80这样高强度级别的钢种大型水电站涡壳整体使用目前未见报道，但HT60和HT80两个钢种联合制造，已用于大平电站25.6万kW蓄能机组的涡壳上；美国选用高强度调质钢ASTM517F（即T-1钢）作为大型水轮机涡壳用钢，它成功地被应用于当今最大的机组——美国大古力电站单机70万kW机组的涡壳上，该钢种还制造了加拿大邱吉尔瀑布47.8万kW机组的涡壳；采用异钢种联合制造大型涡壳是俄罗斯（含前苏联）水轮机制造的特点，如克拉斯诺尔斯克单机50.8万kW机组的涡壳采用CK₂（ $\sigma_{0.2}$ 为510MPa）和10CrSiNiCu两个钢种联合制造的。并建议我国二滩电站采用AB1钢（ $\sigma_{0.2}$ 为490MPa）和09Mn₂Si钢联合制造涡壳。其中09Mn₂Si钢曾制造冰岛5.17万kW机组涡壳；德国在水轮机设计中对钢板强度级别的选择较为慎重，要求高强度钢的屈强比为0.625~0.9。德国选用强度级别较低的TTSTE36钢（ $\sigma_{0.2}$ 为360MPa）来制造巴西依泰普单机70万kW机组的涡壳。同时也正在积极开发 $\sigma_{0.2}$ 为400~500MPa的低合金钢微合金化调质钢板，并研制成功STE 690T钢。国内外涡壳用主要钢种见表1。

在大型水电机组涡壳用钢中，国内外呼声最高的钢种为HT62CF（含WELTEN62CF，HITEN62U，SUMITEN62F）。该钢的特点是在C-Mn系基础上加入微量Ni、Mo、V等元素，以调质状态交货。考虑到受压容器的可靠性，要求控制碳当量 $C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{12} \leq 0.42$ ，裂纹 $P_{cm} = C + \frac{Si}{20} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 6B \leq 0.20$ 。62CF钢具有良好的可焊性，该钢焊接时预热温度仅为50~80℃，焊接线能量基本不受限制。而HT60钢板当板厚为38~

表1 国内外涡壳用主要钢种的成分和力学性能

钢号	化 学 成 分, %										力 学 性 能			
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	其 它	$\sigma_{0.2}$, MPa	σ_b , MPa	δ_5 , %	ψ , %		
CK33	0.18/0.25	0.15/0.35	0.30/0.60	≤ 0.035	≤ 0.035	≤ 0.50			≥ 300	500/650	22	50		
09Mn2Si	≤ 0.12	0.5/0.8	1.3/1.7	≤ 0.04	≤ 0.04	≤ 0.30	≤ 0.30		≥ 264	≥ 431	≥ 21			
10CrSiNiCu	0.14	0.85	0.71	≤ 0.03	≤ 0.03		0.79	Cu 0.44	415/424	574/609	22.3/28.6	59/64		
HT60 (Welten-60)	0.15	0.53	1.40	0.016	0.007	0.23	0.48	Mo 0.31	≥ 490	≥ 608	≥ 28			
HT70 (Welten-2H)	0.08/0.16	≤ 0.55	0.60/1.20	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.8	≤ 1.5	Mo ≤ 0.7 V ≤ 0.1 B ≤ 0.006	≥ 667	≥ 735	≥ 43			
HT80	≤ 0.14	≤ 0.35	≤ 1.20	≤ 0.03	≤ 0.02	1.0/1.8	2.25/3.5		≥ 784	≥ 981	≥ 18	≥ 45		
Welten-62CF	≤ 0.09	0.15/0.30	1.0/1.5	≤ 0.03	≤ 0.03	0.24	≤ 0.60	V ≤ 0.1	≥ 490	≥ 608	≥ 19			
HITEN-62U	0.09	0.23	1.34	0.007	0.005	0.14	0.26	V 0.033 Mo 0.7 Cu 0.015	520	618	24	80		
A517F (T1)	0.08/0.22	≤ 0.35	≤ 1.20	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.7	≤ 1.50	V ≤ 0.10 Mo ≤ 0.40 B ≤ 0.003	≥ 690	≥ 795	≥ 16	≥ 45		
HY-80	≤ 0.18	0.15/0.35	0.10/0.40	≤ 0.025	≤ 0.025	1.0/1.8	2.0/3.5	Mo 0.2/0.6	784/1115		$\delta_{55} \geq 20$	≥ 50		
HY-100	0.12/0.20	0.15/0.35	0.10/0.40	≤ 0.025	≤ 0.025	1.0/1.8	2.25/3.5		981/1128		$\delta_{55} \geq 18$	≥ 45		
14MnMoVN	0.12/0.20	0.20/0.50	1.30/1.70	≤ 0.04	≤ 0.04			Mo 0.45/0.6 V 0.1/0.18 N 0.01/0.02	≥ 580	≥ 686	≥ 16			

注: 以上钢种的性能为调质状态; 凡无成分区间的钢种为实测成分。