

国外



低合金钢、合金钢

1

(总第9集)

1990

冶金部钢铁研究总院

## 前 言

为配合《七五》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《七五》期间，将有针对性地、不定期编辑出版《国外低合金钢、合金钢》情报资料，供有关单位和人员参考。

1986、1987、1988、1989年已出版了八个文集，前六集每集30万字，后两集每集约25万字。1990年仍出版两集，内容分综述、低合金钢、合金钢、工艺性能和使用性能四部分。文章的选取力求密切结合《七五》攻关的实际需要，又考虑到未来发展新动向。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。1986、1987、1988、1989年出版的文集尚有少量剩余，仍可订购。

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，以便在随后的文集中加以改进，也欢迎向本刊投稿。

编 者

1990年7月

# 目 录

## 一、综 述

|                                 |        |
|---------------------------------|--------|
| 微合金工程用钢述评                       | ( 1 )  |
| 日本近期开发的新型高强度钢                   | ( 5 )  |
| 100kgf/mm <sup>2</sup> 级高强度钢的研制 | ( 11 ) |
| 汽车用材的近期动向和住友公司的对策               | ( 16 ) |
| 弹簧材料的最新动向                       | ( 18 ) |
| 未来的高温动力工程零件用材料的要求               | ( 24 ) |
| 易切削金属材料的开发动向                    | ( 26 ) |

## 二、低合金钢

|                              |        |
|------------------------------|--------|
| 实用性能好的减振钢板                   | ( 30 ) |
| 钒和钛微合金化钢的二次硬化                | ( 33 ) |
| 碳含量对含硼控轧钢强韧性的影响              | ( 36 ) |
| 具有片状珠光体组织的钢轨钢的抗裂性            | ( 40 ) |
| 10XCH $\Pi$ 热强化钢管钢的组织 and 性能 | ( 43 ) |
| 深冲用冷轧钢板的生产方法                 | ( 46 ) |
| 凸缘加工性优良的高强度薄板的生产方法           | ( 50 ) |
| 强度和延性均优的高强度热轧钢板的生产方法         | ( 53 ) |
| 焊接性好的高强度高韧性管道用钢              | ( 56 ) |
| 低温韧性好的超厚调质高强度钢板              | ( 60 ) |
| 轧制制度对钒和钛微合金化钢的机械性能和组织的影响     | ( 62 ) |

## 三、合金钢

|                                                 |        |
|-------------------------------------------------|--------|
| 高压和低压联合转子用2Cr-1.75Mo-1Mn-V 钢                    | ( 65 ) |
| 通过改善硫化物夹杂形状和控制显微组织提高超高强度0.4C-Cr-Mo-Ni钢<br>的机械性能 | ( 67 ) |
| 杂质含量、抗拉强度和晶粒度对CrMoV钢在使用中回火脆化的影响                 | ( 71 ) |
| 大型锻件用经济合金化铬镍钼钢                                  | ( 74 ) |
| 马氏体时效工具钢                                        | ( 78 ) |
| Mo和V对15Cr-26Ni-1.25Mo析出强化型耐热钢高温强度的影响            | ( 82 ) |
| 易切削高Mn无磁钢板“KNM24-M”                             | ( 84 ) |
| 硅对高速工具钢韧性的影响                                    | ( 85 ) |
| 添加B、N、Ca和Co的经济高速钢S3-5-1.5-0.5(Nb)的组织结构和性能       | ( 88 ) |
| 韧性优良的双相不锈钢                                      | ( 92 ) |
| 05X13H7 $\Pi$ 2马氏体时效钢的抗脆断强度                     | ( 94 ) |

|                   |        |
|-------------------|--------|
| 低合金高速钢的脱碳和氧化..... | ( 96 ) |
|-------------------|--------|

#### 四、工艺性能和使用性能

|                                                        |         |
|--------------------------------------------------------|---------|
| 高温形变处理在含3.5%Ni冷韧钢中的 应用.....                            | ( 100 ) |
| 合金元素及伴随元素对X18CrNiTi18.10奥氏体耐蚀铬镍钢的加工性能<br>和使用性能的影响..... | ( 103 ) |
| 马氏体不锈钢在高温水中静载荷下应力腐蚀裂纹的行为.....                          | ( 105 ) |
| 经钙处理的塑料模具钢的性能.....                                     | ( 108 ) |
| 共析钢钢轨的综合热处理强化.....                                     | ( 111 ) |
| 动力机械制造用钢耐蚀性的提高.....                                    | ( 115 ) |
| 钢制件激光热处理新工艺.....                                       | ( 117 ) |
| 超声波振荡对17-7PH特殊钢和AISI301钢调质特性的 影响.....                  | ( 118 ) |
| 真空处理09Γ2C钢的应用前 景.....                                  | ( 121 ) |

## 微合金工程用钢述评

D.J. Naylor

本文概述了欧洲共同体以外（主要是远东和北美）用作锻件和棒材的微合金钢的发展和应，并和欧洲的这些钢进行了比较。

### 微合金钢的发展和性能

无可置疑，锻件用中碳微合金钢的物理冶金、组织和性能之间关系的研究以及最初工业应用是由欧洲开创的，在70年代初西德首先采用49MnVS3。日本汽车工业十分欣赏这类钢种。1977年本田公司派出一个代表团访问了欧洲的钢厂，短期内该公司便对欧洲供应的试制品进行了评价，接着日本钢铁厂家开发了几个微合金钢变种。起初，它们的目的是想获得足够的数据来选择最适宜的成分和加工条件以便达到所需的强度。近来，它们的注意点是改善钢的韧性。在北美微合金锻件用钢的发展比欧洲和日本要晚得多。

### 成分和显微组织

日本和斯堪的那维亚几家钢铁公司报道了根据显微组织、化学成分、截面尺寸和加工条件预测的铁素体-珠光体微合金钢性能的多重回归分析结果。这些结果列于表1（略）。有些资料已经引用了有关回归系数，而有些则采用碳当量（ $C_{eq}$ ）法。对给定成分，各种公式预测的性能并不相同，见表2（略）。关于碳、硅、锰、氮、钒、合金化或残余元素对强度的影响，看法基本一致。日本关于钒和铌的强化作用说法不一。住友公司认为铌更有效，而大同公司则认为钒更有效。神户公司则认为铌对屈服强度的影响较大，钒对抗拉强度的影响较大。中碳钢在通常的均热温度下铌在奥氏体中的溶解度有限，限制了它的弥散强化潜力。一致认为，大多数强化添加剂，除锰外都损害韧性。英

国钢铁公司最早在Vanard微合金钢系列中采用高锰含量。瑞典金属研究所证实了西德关于硅对韧性有益作用的试验。

日本首先将加钛细化晶粒的概念引用到中碳微合金锻钢来提高韧性，新日铁1983年就宣称它在空冷钢中阻止晶粒粗化和改善韧性的作用。近来，它们声称，0.32C-1.0Mn-0.024Ti-0.12V钢的冲击性能和抗拉强度相当于调质钢。钢中氮化钛颗粒尺寸小于0.1 $\mu$ m。日本钢管公司也成功地用钛合金化（含钛低至0.003%）来细化棒材和锻件的晶粒并改善韧性。为了使钒起到充分的弥散强化，必须含适当的氮量（0.006%）。神户公司也试验了钛处理微合金钢，添加量达0.1%。他们认为含钛量较低时起不到细化晶粒的作用。Tanaka和Isokawa指出，含钛达至0.5%，稍改善韧性，但强度降低，三菱重工和日本钢管公司声称。用V-Ti钢制作车轴，当韧性 $>100J/cm^2$ 时，强度勉强要求（ $<800MN/m^2$ ）。西德新钢种27-MnSiVS6钢，含适度钛量，使强度和韧性得到较好配合。

瑞典金属研究所证实了V-Ti钢的强韧性比普通钒处理钢要好。它们还提出，用添加0.06~0.08%Al和0.015~0.02%N来作为获得最佳强度和韧性的方法。这一观点得到Kilsta Forge和Ovako的支持，但主张稍低的含铝量（ $>0.04\%$ ）。

用钛细化晶粒的一个特点是不必降低终轧温度，在普通均热和锻造温度下就能得到高的韧性。

前几年报道了用在锻件中生成贝氏体的方法来改善微合金钢的韧性。三菱重工介绍

了汽车前桥梁锻件用的0.25C-1.5Mn-0.35Cr-0.15V贝氏体钢,当强度>900MN/m<sup>2</sup>情况下,低温韧性比铁素体-珠光体钢好(见表3)。但是应指出,珠光体钢有较好的常温韧性。实验室结果指出,碳和锰对贝氏体含量有影响,增加贝氏体含量对冲击韧性有益。然而,这些性能是从1250℃空冷后测定的,没有施加变形。

北美一些研究人员也宣称,贝氏体微合金钢可改善韧性。印度也试验了截面尺寸相当于φ64mm、终轧温度1000℃以上的0.38C-0.3~1.6Si-1.5Mn-0.2Mo-0.15V钢棒材(见表4)。此外还研究了一些硼处理钢,但是发现硼对轧制状态的淬透性没有作

用。一种含0.88%Si,有20%残余奥氏体的钢具有最佳的常温韧性和短杆断裂韧性,应指出,轧制状态的贝氏体钢的延性低。因为在贝氏体组织中钒的弥散强化程度较小。强度虽可通过时效来增加,但损害韧性。而普通的珠光体微合金钢相对讲不受时效的影响。Tither等也主张向0.2~0.3C-1.5Mn-0.15V钢中添加钼通过形成贝氏体来提高韧性。表5(略)给出了直径16mm、1065℃终轧的棒材的性能。AMAX材料研究中心早先的工作指出,加钼的贝氏体钢性能随冷却速度的变化较珠光体钢小。Chapparral也声称,在含铌钢中贝氏体组织可改善韧性。然而Ovako则认为,铁素体-珠光体组织中引入

表3 汽车前桥梁用贝氏体微合金钢的成分和性能

| 成分, wt%  |      |      |      |      | 组织      | 屈服强度<br>MNm <sup>-2</sup> | 抗拉强度<br>MNm <sup>-2</sup> | 夏比值, J cm <sup>-2</sup> |      |
|----------|------|------|------|------|---------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|------|
| C        | Mn   | Cr   | Ni   | V    |         |                           |                           | 室温                      | -40℃ |
| 0.26     | 1.67 | 0.34 | 0.18 | 0.18 | 贝氏体     | 725                       | 945                       | 54                      | 47   |
| 0.27     | 1.49 | 0.34 | 0.06 | 0.10 | 铁素体+珠光体 | 670                       | 910                       | 78                      | 13   |
| C-Mn Q+T |      |      |      |      |         | 490                       | 850                       | 59                      | 54   |

表4 印度贝氏体微合金钢的成分和性能

| 成分, wt%      |      |                   |      |                   |        | 组织      |                         |       |                    |
|--------------|------|-------------------|------|-------------------|--------|---------|-------------------------|-------|--------------------|
| 钢            | C    | Si                | Mn   | Mo                | V      |         |                         |       |                    |
| 1            | 0.37 | 0.30              | 1.51 | 0.20              | 0.17   | 贝氏体     |                         |       |                    |
| 2            | 0.39 | 0.88              | 1.52 | 0.20              | 0.15   | 贝氏体     |                         |       |                    |
| 3            | 0.46 | 0.24              | 0.82 | ...               | 0.14   | 铁素体+珠光体 |                         |       |                    |
| 时效处理         |      | 屈服强度              |      | 抗拉强度              | 延伸率, % | A, %    | 夏比值, J cm <sup>-2</sup> |       | K <sub>IC</sub>    |
| 时间, h 温度, °C |      | MNm <sup>-2</sup> |      | MNm <sup>-2</sup> |        |         | 室温                      | -29°C | MNm <sup>3/2</sup> |
| 时效前          |      |                   |      |                   |        |         |                         |       |                    |
| 1            | ...  | ...               | 617  | 864               | 11.5   | 23      | 20                      | 16    | 85                 |
| 2            | ...  | ...               | 612  | 831               | 6.0    | 10      | 27                      | 11    | 98                 |
| 3            | ...  | ...               | 611  | 880               | 18.8   | 40      | 16                      | 4     | 64                 |
| 时效后          |      |                   |      |                   |        |         |                         |       |                    |
| 1            | 2    | 316               | 597  | 871               | 13.5   | 28      | 19                      | 12    | ...                |
|              | 2    | 593               | 703  | 898               | 13.0   | 25      | 16                      | 11    | ...                |
| 2            | 2    | 316               | 682  | 935               | 7.0    | 15      | 18                      | 10    | 81                 |
|              | 2    | 593               | 798  | 988               | 13.0   | 25      | 11                      | 8     | 62                 |
| 3            | 2    | 316               | 620  | 878               | 18.5   | 40      | 15                      | 5     | 62                 |
|              | 2    | 593               | 614  | 876               | 18.0   | 40      | 14                      | 5     | 59                 |

贝氏体对韧性有害。

### 加工处理条件

Burnett全面地定量评价了锻造条件对性能的影响,并强调了锰对强度和韧性的影响。其表达式为:

$$TS(MN/m^2) = 60.7 + 229(Mn\%) + 0.286TF + 57.91nCR$$

$$CVN(J) = 78.5 + 4.14(Mn\%) - 0.0622TF - 2.92 \ln CR$$

式中CR:冷却速度,K/min;TF:锻造温度,℃。

他还定量描述了显微组织随加工条件的变化及其对性能的影响。随着锰含量以及冷却速度的提高,珠光体层间距、渗碳体板条厚度以及铁素体中碳化钒的尺寸和体积比减小。在珠光体中的析出情况不因冷却速度的变化而有大的改变。

瑞典金属研究所得出空气中冷却的微合金钢的强度与铁素体含量、冷却速度和硅、钒、氮含量的关系。

Leap等弄清楚了析出物尺寸和分布的变化与均热温度的关系。增加细小析出物(<250nm)的体积比可使奥氏体晶粒尺寸的粗化受到抑制。在950℃以上时,小颗粒体积比减少,奥氏体晶粒急剧长大,当1050℃时,V(C,N)全部溶解。这些作者都证明,850℃均热时,强度、延性和韧性得到最佳配合,并随均热温度和冷却速度的升高,强度和FATT增加,延性和上平台能下降。

Chapparral详细报道了锻造条件对由SAE1030、1526V和1526MoV钢制成的三种不同部件的组织 and 性能的影响,试验时采用强风冷、空冷和箱冷。对大多数1公斤以上的锻件建议应用带强风冷却装置的可变速传送机。他们证明,微合金钢应用感应加热是合适的。

在Bofors的Kilsta Forge有一个自动的、先进的生产线能控制微合金化钢曲轴的冷却。能严格控制均热和锻造温度。矫直

后,锻件在隧道中冷却,锻件垂直挂在传送机上并各自旋转以避免畸变。必要时用强风冷却。自隧道出口旁,锻件从300~400℃于水中冷却以免翘曲。

Nissan建立了一条专门锻造线,在800和500℃之间控制冷却(30~60K/min)来生产微合金钢前轮轮毂。生产能力为7.5t/h。

### 控制轧制棒材

许多研究表明,均热和轧制温度对轧材性能的影响与锻件有相同的倾向,只是轧材可以得到更低的终轧温度。某些情况下,钒和铌综合添加最好,在不采用控轧的场合,钒是最好的添加剂,而加铌能使控轧材得到更好的韧性。日本神户建立了带有控轧和控冷装置的新的棒材轧机,在终轧机组前,通过水冷可使终轧温度达到850℃。控轧材的性能见表6。

因为许多棒材要在冷拔状态下切削加工,为此,评价了拔制的微合金钢的性能。和轧制状态比较,强度和屈服比增加,而延性和韧性下降。Ohtani和Nakasato指出,拉拔减径和将Mn和Cr分别提高到1.5%和0.5%。强度提高而不损害韧性。日本各钢铁公司对中碳微合金钢未采用轧后快冷工艺。

General Motors研究了含钒达至0.15%或铌达至0.06%和不同含铝量的冷加工0.2C-1.4Mn钢的再结晶行为,钒降低冷轧材回火时产生的强化作用。铌的作用处于中等。回火时形成AlN还会抑制再结晶(尤其是钒处理钢)。没有提到这一工作的应用情况,但是LTV供应这种钢材。

日本钢铁厂能提供各种各样的微合金控轧材。性能比欧洲目前通用的要好,而Ascometal制造的METASAFE产品系列具有较高的强度。

### 切削加工性

差不多一致认为微合金钢的切削加工性比调质的碳钢和合金钢好,原因是它的延性

表6

冷拔微合金钢棒材的性能

| 厂家           | 成分                      | 状态       | 尺寸<br>mm | 屈服强度<br>$\text{MNm}^{-2}$ | 抗拉强度<br>$\text{MNm}^{-2}$ | 延伸率<br>% | RA<br>% | 夏比值<br>$\text{Jcm}^{-2}$ |
|--------------|-------------------------|----------|----------|---------------------------|---------------------------|----------|---------|--------------------------|
| 住友金属<br>工业公司 | 0.47C-0.95Mn-0.2Cr-V    | 热轧       | 38       | 592                       | 858                       | 23       | 49      | 51                       |
|              |                         | 冷拔       | 35       | 902                       | 984                       | 14       | 43      | 40                       |
|              | 0.28C-1.54Mn-0.1V       | 热轧       | 22       | 680                       | 840                       | 26       | 63      | 175                      |
|              |                         | 冷拔10%    |          | 930                       | 980                       | 16       | 57      | 90                       |
|              |                         | 冷拔20%    |          | 950                       | 1060                      | 15       | 55      | 80                       |
|              |                         | 冷拔30%    |          | 950                       | 1110                      | 14       | 53      | 75                       |
|              | 0.43C-0.99Mn-0.09V      | 热轧       | 22       | 609                       | 800                       | 26       | 54      | 100                      |
|              |                         | 冷拔10%    |          | 850                       | 900                       | 16       | 51      | 70                       |
|              |                         | 冷拔20%    |          | 900                       | 990                       | 15       | 49      | 55                       |
|              |                         | 冷拔25%    |          | 930                       | 1010                      | 15       | 48      | 50                       |
| 日本钢管公<br>司   | 0.33C-1.33Mn-0.026Nb    | 控轧       | 22       | 463                       | 632                       | 32       | 56      | 172                      |
|              |                         | 冷拔11%    |          | 600                       | 729                       | 23       | 57      | 157                      |
|              |                         | 冷拔19%    |          | 790                       | 834                       | 14       | 51      | 118                      |
|              | SAE1038                 | Q+T      | 22       | 437                       | 619                       | 33       | 72      | 166                      |
|              |                         | Q+T冷拔19% |          | 671                       | 733                       | 20       | 62      | 155                      |
|              | 0.33C-1.45Mn-Ti-V       | 热轧       | 40       | 509                       | 713                       | 31       | 66      | 152                      |
|              | 0.42C-1.2Mn-0.1V        | 控轧       | 25       | 608                       | 836                       | 25       | 56      | 78                       |
|              | 0.42C-1.2Mn-0.03Nb-0.1V | 控轧       | 25       | 587                       | 822                       | 26       | 58      | 94                       |
| 神户钢铁公<br>司   | 0.41C-1.56Mn-0.1V       | 控轧       | 25       | 634                       | 882                       | 25       | 58      | 104                      |

较低,容易引起裂纹萌生和变形集中。Ollilainen等除验证微合金钢切削性好外,还强调了切削条件和刀具形状的最佳化对获得最高切削加工性的影响。指出,在深孔钻削中,轴向切削力较高,同时切屑的形态不如同等强度的合金钢,建议采用一种改型的裂口和宽出屑槽的刀具。对车螺丝来说,最好使用一种改型的攻丝刀具。

神户和川崎公司也指出,微合金钢车削和钻削时,刀具寿命较长,切屑形式较好。几家日本公司都建议提高硫含量。Ohtani和Nakasato指出,车削冷拔微合金钢的切削力比热轧材的小。含碳量的变化对切削力没有太大影响。本田公司证明了微合金钢和调质钢之间没有明显差别,只是切削加工性受含硫和铅量的控制。在丰田厂的生产试验表明,粗和精车削及油孔钻削加工微合金钢曲轴的刀具寿命比加工调质钢时高。日本钢管公司得出,加工Ti-V钢时碳化物刀具的寿命比加工调质碳钢长。

#### 疲劳和断裂

对微合金钢各种试样和试验方式以及各色制品进行疲劳试验的结果都说明钢的疲劳

性能令人满意。Sampei等指出,增进疲劳抗力的效果按下列次序减小,固溶强化,析出强化,珠光体含量,晶粒细化,位错强化。住友公司证明,渗氮和感应淬火后,无论带缺口与否,疲劳性能得到改善。Caterpillar也证明,微合金钢和调质钢的缺口疲劳强度、裂纹萌生和疲劳现象均相同。Ovako认为微合金钢的疲劳裂纹萌生抗力较高,归因于细小的析出物和短的颗粒间距。在裂纹扩展速度方面,两类钢没有差别。

微合金钢的冲击抗力较低,这是普遍公认的,全世界都试图改善这一特性。然而,几乎没有令人信服的方法来解决微合金钢制品的这一问题。

美国利罗拉多矿业学院进行了用仪表控制的夏比冲击试验,试验是在再加热到800、1000和1300℃后的大范围内进行的。观察到四种不同的载荷-时间曲线,相当于上、下平台和弹-塑性转变行为。应用能量平衡来评价在弹-塑性断裂方式中的不稳定破断负荷。这为从标准夏比试样计算表观断裂韧性提供了一个基础。

Caterpillar对2mm V型和5mm圆角缺

口的夏比试样在比普通冲击试验较低的应变速率（更近实际）下进行了短杆断裂韧性试验和三点弯曲试验。这一工作认真研究了微合金钢冲击能低的问题，认为它主要与高的应变速率有关（是实际操作的5000倍）。表7示出冲击能随应变速率和缺口锐度的下降而升高。当应变速率 $<1/s$ 时，微合金钢对应变速率不敏感。5mm圆角缺口产生超过比例极限的更大偏离和较高的能值。夏比冲击能低的主要原因是在高应变速率下低于屈服断裂。在较大截面尺寸情况下由于拘束较大可产生类似的情况，估算的临界缺陷尺寸为 $1.2 \times 12$ 或 $3 \times 6$ mm（应力接近屈服，最低 $k_{Ic}$ 值 $50 \text{ MN m}^{-3/2}$ ）。然而，这些缺陷非常小，不能被探测出来。

表7 应变速率和缺口形式对冲击能的影响

| 材料                  | 缺口    | 应变速率, $S^{-1}$ | 冲击能, J |
|---------------------|-------|----------------|--------|
| AISI1040(Q+T) CVN   |       | 0.046          | $>58$  |
| AISI1040(Q+T) 5mm圆角 |       | 0.040          | $>45$  |
| AISI1045V           | CVN   | 0.046          | 66     |
| AISI1045V           | 5mm圆角 | 0.040          | $>43$  |
| AISI1045V           | CVN   | 4.6            | 2.2    |

### 应用

70年代初以来，在欧洲微合金钢空冷制品的应用已很广泛并且还在增长。主要的应用是曲轴、连杆、转向节、操纵杆、铰接轴、托架、控制杆、配对凸缘、拨叉、变速杆、曲柄、防车体侧倾稳定杆、转向横拉杆。Volvo每年使用微合金钢25000吨。

Volkswagen近年来每年使用新的27MnSi-VS6钢制造250万根连杆。除欧洲以外，国际上也广泛使用微合金钢制造上述制品。

一些报道介绍了使用微合金钢锻件的经济效果。Austin Rover声称，以空冷微合金钢代替Mn-Mo合金钢制造1275cc“A”系列发动机的曲轴，可节省50万英镑/年（1982年价格）。Chapparral报道，用来代替SAE1035和4140钢生产连杆和曲轴，成本分别减少9和11.6%。对再硫化的微合金钢还有附加的切削加工性好的益处，成本的减少分别达到20和24.6%。日产公司也宣称，用以生产前轮轮毂，成本减少45%。已有一种新的成形技术，可以免去修整和减少飞边，从而节省材料13%。

### 结语

日本钢铁和汽车制造厂在开发、评价、应用微合金钢作汽车锻件方面非常积极。日本钢铁厂由于能用控轧方法来生产所需性能的轧材，在工艺技术上处于领先地位。北美在微合金钢的开发和应用较慢。

为了扩大空冷微合金钢的安全使用，需要提高其韧性。一些生产者正积极研究用钛处理的具有晶粒细化和较韧贝氏体组织的钢。另外，对碳钢、合金钢、硼钢或特种钢锻件采用直接淬火工艺也许可以生产出低成本的制品。这方面还受到等温淬火球墨铸铁的挑战。竞争将继续。

余力摘译自《Ironmaking & Steel-making》，1989，16，No4，246~252

## 日本近期开发的新型高强度钢

### 一、高强度齿轮用钢

最近，随着汽车、建筑机械等所用发动机的输出功率增加及轻量化，变速器和差动装置的负荷加重，这就要求齿轮材料实现高强度化。为此，日本各大钢铁公司十分重视开发高强度齿轮用钢，并推出了众多系列的

新产品。

表1列出神户制钢、山阳特殊制钢、大同特殊钢、住友金属工业和新日铁五家公司新近推出的高强度齿轮用钢的化学成分。

KKG系列是神户制钢公司研制的。该公司在研究时发现，齿根处的残余应力对齿

表1

高强度齿轮用钢的化学成分, wt%

| 牌 号            | C         | Si    | Mn        | P      | S      |
|----------------|-----------|-------|-----------|--------|--------|
| KKG3 (SCM815H) | 0.13~0.15 | ≤0.15 | 0.55~0.90 | —      | —      |
| KKG4 (SCM820H) | 0.17~0.23 | ≤0.15 | 0.55~0.90 | —      | —      |
| KKG8 (SCM8)    | 0.17~0.23 | ≤0.15 | 0.55~0.90 | —      | —      |
| CHD2           | 0.20      | 0.10  | 0.50      | —      | —      |
| NCHD2          | 0.20      | 0.10  | 0.30      | —      | —      |
| NCHD3          | 0.24      | 0.10  | 0.50      | —      | —      |
| NCHD4          | 0.20      | 0.10* | 0.50      | —      | —      |
| DSG1           | 0.20      | <0.15 | 0.70      | <0.015 | 0.015  |
| DSG2           | 0.20      | <0.15 | 0.60      | <0.015 | 0.015  |
| DSG3           | 0.20      | <0.15 | 0.30      | <0.015 | 0.015  |
| スミナロイCM151     | 0.12~0.18 | ≤0.15 | 0.55~0.90 | ≤0.030 | ≤0.030 |
| スミナロイCM201     | 0.17~0.23 | ≤0.15 | 0.55~0.90 | ≤0.030 | ≤0.030 |
| 新日铁开发钢         | 0.21      | 0.03  | 1.09      | 0.022  | 0.009  |

| 牌 号            | Ni    | Cr        | Mo        | Nb | V  | Cu    |
|----------------|-------|-----------|-----------|----|----|-------|
| KKG3 (SCM815H) | ≤0.25 | 0.85~1.25 | 0.35~0.45 | —  | —  | ≤0.30 |
| KKG4 (SCM820H) | ≤0.25 | 0.85~1.25 | 0.35~0.45 | —  | —  | ≤0.30 |
| KKG8 (SCM8)    | ≤0.25 | 0.85~1.25 | 0.75~0.85 | —  | —  | ≤0.30 |
| CHD2           | —     | 1.00      | 0.50      | —  | 添加 | —     |
| NCHD2          | 2.25  | 0.50      | 0.50      | 添加 | 添加 | —     |
| NCHD3          | 0.50  | 0.50      | 0.50      | 添加 | —  | —     |
| NCHD4          | 1.80  | 0.50      | 0.50      | 添加 | —  | —     |
| DSG1           | —     | 1.0       | 0.40      | —  | —  | —     |
| DSG2           | 1.0   | 0.8       | 0.30      | —  | —  | —     |
| DSG3           | 2.0   | 0.3       | 0.75      | —  | —  | —     |
| スミナロイCM151     | ≤0.25 | 0.85~1.25 | 0.35~0.45 | —  | —  | ≤0.30 |
| スミナロイCM201     | ≤0.25 | 0.85~1.25 | 0.35~0.45 | —  | —  | ≤0.30 |
| 新日铁开发钢         | —     | 1.02      | 0.25      | —  | —  | —     |

根的耐弯曲疲劳特性(齿轮高强度化方面最重要的特性)影响很大。要想提高耐疲劳性,必须形成高的压缩残余应力。通常的齿轮用钢,在渗碳(表面硬化处理)过程中易发生内部氧化现象,随后的淬火又使其最表面处变软,形成异常氧化层。这种状态下难以获得高的残余压应力。所以,该公司在合金设计时选用了不容易发生由渗碳引起的内部氧化现象的元素Mo,使淬火后最表面处形成由硬质的马氏体与适量的残留奥氏体构成的组织,获得高的残余压应力值。KKG系列齿轮钢的特点是:(1)耐疲劳强度高。与原有齿轮钢相比,渗碳态相当于它的1.2倍以上;喷丸硬化后相当于它的1.5倍以上;(2)韧性好。晶界得到强化;(3)切削性

好。硬度相同时,切削性与原有钢种相当。

鉴于齿轮的破坏形式是由齿根处弯曲应力引起的疲劳破坏和齿面点蚀或剥落等齿面疲劳,山阳特殊制钢公司在研制齿轮钢CHD或NCHD系列时采取了以下措施:(1)注意防止形成渗碳时产生的表面异常层、晶界氧化层;(2)尽量减少容易成为疲劳破坏,尤其是齿面疲劳破坏源的非金属夹杂;(3)通过控制杂质含量并有效添加合金元素,保持良好的强度-韧性匹配。表2列出了新钢种与传统钢种的性能比较。

大同特殊钢公司开发的DSG系列齿轮用钢具有以下特征:(1)减少易氧化元素(如Si),防止形成渗碳异常层,从而提高了疲劳强度;(2)添加Mo并降低P,减少

表2

齿轮钢的性能比较

| 钢 种     | 渗碳材料的冲击值<br>( $\text{kgf} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$ ) | 旋转弯曲疲劳极限<br>( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ ) | 冲击疲劳强度<br>(次) | 推力 $B_{10}$ 寿命<br>( $\times 10^6$ ) |
|---------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------|-------------------------------------|
| CHD2    | 1.91                                                    | 87.5                                     | 7500          | 29.2                                |
| NCHD2   | 3.20                                                    | 100.0                                    | 10500         | 33.8                                |
| NCHD3   | 1.96                                                    | 84.0                                     | 6300          | 13.5                                |
| NCHD4   | 2.83                                                    | 97.5                                     | 11000         | 15.3                                |
| SCM420  | 1.3                                                     | 70~80                                    | 5400          | 8~40                                |
| SNCM420 | 2.3                                                     | 80~85                                    | 6400          | —                                   |

氧化物系非金属夹杂物含量,提高了渗碳材料的韧性;(3)综合运用喷丸硬化法,提高齿根和齿面的强度;(4)添加Ni、Mo等改善切削性,实施适当的热处理(如等温退火)。

住友金属工业公司在合金成分设计时采用了低Si、高Mo的方针,明显减少了渗碳异常层的厚度。传统齿轮钢SCM420钢渗碳异常层厚度为 $13\mu\text{m}$ ,而住友金属研制的“スミアロイCM”系列齿轮钢减少到约 $4\mu\text{m}$ 。如图1所示:降低含硅量减少渗碳异常层厚

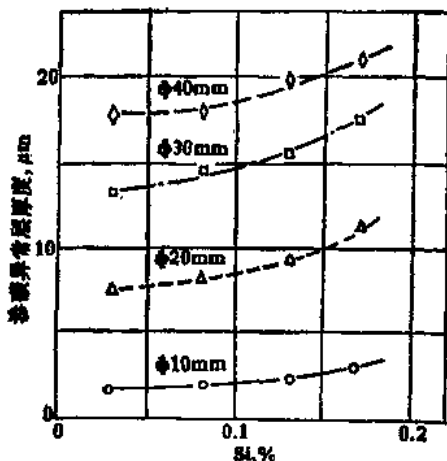


图1 含硅量对渗碳异常层厚度的影响

度的作用在0.1%Si附近达到饱和。疲劳试验结果表明:渗碳异常层减薄的CM201钢

的疲劳极限比SCM40钢高10%左右。若实施喷丸硬化处理,这一效果将更加显著。此外,CM201钢的切削性与SCM420相当。

新日铁选用比较廉价的Mn、Cr等元素取代高价的Ni、Mo,同样达到了减少齿轮最表层处内部氧化并改善不完全淬火组织,从而提高齿轮的疲劳强度。他们开发的新型高强度齿轮钢的疲劳极限比SCM420H高18%。同时,由于不含降低刀具寿命的Ni等元素。机加工性得以提高。

表3说明,三菱制钢公司推出的EX系列齿轮钢在获得渗碳层的最高硬度的前提下可确保韧性。

## 二、高强度螺栓用钢

近年,钢结构件的大型化和各种机械、汽车的高性能化、轻量化对作为连接部件的螺栓也提出了高强度化的要求。表4列出了新推出的三大系列高强度螺栓用钢的化学成分。

螺栓在静应力状态下经过一段时间后会突然发生脆性断裂,即出现延迟断裂现象。螺栓用钢的高强度化主要在于大幅度改善抗延迟断裂性。仔细观察延迟断裂的螺栓断口,可看到断裂源附近形成沿奥氏体晶界的晶间断裂。所以,要想防止延迟断裂,必须

表3

夏比冲击试验结果(1.0mm渗碳)

| 钢 种     | 夏比冲击值<br>( $\text{kgf} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$ ) | 裂纹形成能<br>( $\text{kgf} \cdot \text{m}$ ) | 裂纹扩展能<br>( $\text{kgf} \cdot \text{m}$ ) | 表面硬度<br>(HV) |
|---------|------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|--------------|
| EX 55P  | 3.63                                                 | 1.15                                     | 1.88                                     | 800          |
| EX 30G  | 5.30                                                 | 1.90                                     | 2.80                                     | 800          |
| SCM 420 | 1.38                                                 | 0.78                                     | 0.63                                     | 760          |

表4

高强度螺栓用钢的化学成分, wt%

| 钢 种   | C    | Si    | Mn   | P      | S      | Ni   | Cr   | Mo   | V    | B  | Al | Ti | Nb    |
|-------|------|-------|------|--------|--------|------|------|------|------|----|----|----|-------|
| KNDS1 | 0.27 | 0.25  | 1.05 | ≤0.015 | ≤0.015 | —    | 0.90 | 0.22 | —    | 添加 | 添加 | 添加 | —     |
| KNDS2 | 0.35 | 0.25  | 0.73 | ≤0.015 | ≤0.015 | —    | 1.05 | 0.20 | —    | —  | 添加 | 添加 | —     |
| KNDS3 | 0.40 | 0.05  | 0.50 | ≤0.015 | ≤0.015 | 0.30 | 1.00 | 0.60 | —    | —  | 添加 | 添加 | —     |
| KNDS4 | 0.40 | 0.05  | 0.50 | ≤0.015 | ≤0.015 | 0.55 | 1.00 | 0.95 | 0.07 | —  | 添加 | 添加 | —     |
| DSB1  | 0.45 | <0.15 | 0.30 | <0.015 | <0.005 | —    | 1.0  | 0.5  | 0.3  | —  | —  | —  | —     |
| DSB2  | 0.35 | <0.15 | 0.30 | <0.015 | <0.005 | —    | 1.5  | 1.0  | 0.3  | —  | —  | —  | —     |
| ADS2  | 0.34 | 0.22  | 0.36 | 0.011  | 0.009  | —    | 1.26 | 0.40 | —    | —  | —  | —  | 0.019 |

强化奥氏体晶界,也就是防止晶界脆化。基于这一分析,日本各钢铁公司在研制高强度螺栓用钢时采取了以下措施:

### 1. 减少晶界偏析

降低合金中容易偏析于晶界的元素(如Si、Mn、P、S)的含量。

### 2. 晶粒细化

神户制钢公司的KNDS系列螺栓用钢,通过添加Al、Ti使晶粒细化并减少固溶的氮量,从而提高了缺口韧性。住友金属工业的ADS2钢,添加Nb所形成的碳(氮)化物有助于细化淬火前加热时的奥氏体晶粒。

### 3. 高温回火

利用添加抗回火软化性好的元素Mo或V,避开容易引起晶界脆化的回火温度区域,在保证足够的淬透性的前提下实施高温回火。图2示出ADS2钢制备的M12螺栓的

ADS2的抗拉强度可达150kgf/mm<sup>2</sup>。此外,ADS2在150kgf/mm<sup>2</sup>这样高的抗拉强度下仍可保持200小时不断裂,明显优于SCM435钢。

KNDS钢各强度水平的延迟断裂强度比传统螺栓用钢高10%以上,而且冷锻性好。大同特殊钢公司开发的DSB系列螺栓钢,即使在600℃回火,仍能获得140kgf/mm<sup>2</sup>以上的抗拉强度、60%的断面收缩率和良好的延性。

## 三、高浓度渗碳用钢

高浓度渗碳法是一种旨在使转动部件高性能化的渗碳手段。它以2~3%的高浓度渗碳为目标,试图积极地析出碳化物。高浓度渗碳法包括普通的气体渗碳法和等离子渗碳法。尤其是等离子渗碳法,被处理物(阴极)与电极(阳极)之间发生辉光放电,使碳氢化合物系气体离子化,从而达到渗碳的目的。经过这种处理的材料表面光亮,无渗碳异常层,且碳的侵入速度快。

大同特殊钢公司探讨了适应这种高浓度渗碳的最佳化学成分,并已实现了高浓度渗碳用钢RK706的商品化。RK706钢的化学成分(wt%)为:0.17%C、0.50%Si、0.30%Mo、<0.030%P、<0.030%S、<0.30%Cu、<0.25%Ni、2.25%Cr、0.41%Mo。它的特点是:(1)渗碳时析出细小的碳化物,表面硬度高于HV900。C、Cr量最佳化的RK706钢渗碳时可保持γ-M<sub>7</sub>C相的良好平衡,(2)耐点蚀性和耐热胶着性比普通的渗碳材料好,(3)疲劳

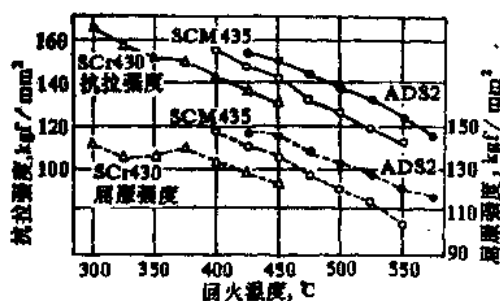


图2 ADS2螺栓用钢的抗拉强度与回火温度的关系

回火温度与抗拉强度的关系。在抗拉强度相同的情况下,ADS2的回火温度分别比抗延迟断裂试验所用的比较钢SCr430和SCM435高100℃和50℃。通过调整回火温度,

新日铁研制的高强度非调质钢

表5

| 分 类      | 加工法 |      | 热 处 理      |            |                | 用              |                 |                 | 直接切削用(无锻造加工)        |                     |                     | 冷 锻 用<br>(以螺栓为主)    |                |
|----------|-----|------|------------|------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------|
|          | 韧性  | 组 织  | 高 韧 性 型    |            | 贝氏体            | 一 般 型          |                 | 高 韧 性 型         | 一 般 型               | 铁素体-珠光体             | 一 般 型               |                     |                |
|          |     |      | 铁素体-珠光体    | 80         |                | 90             | 90              |                 |                     |                     |                     |                     | 70~90          |
| 非调质钢规格   |     | 强度等级 | 80         | 80         | 90             | 90             | 70~90           | 70~90           | 70~90               | 70~100              | 70~90               | 70~90               | 70~90          |
|          |     |      | NQF 33T    | NQF 22S    | NQF... (暂名)    | NQF20 BC V     | NQF40C ~NQF 55C | NQF40M ~NQF 55M | NQF70 CCR~NQ M90CCR | NQM70 MCR~NQ M90MCR | NQM70 DSQ~NQ M90DSQ | NQM70C ~NQ M90C 90C | NQM70M ~NQM90M |
|          |     |      | S43C ~S50C | S43C ~S50C | S55C/ SCM 435H | S55C/ SCM 435H | S40C~ S55C      | S40C~ S55C      | S40C~ S55C          | S40C~ S55C          | S40C~ S55C          | S40C~ S55C          | NHF60/ NHF60S  |
| 相对应的典型钢种 |     |      |            |            |                |                | S40C~ S55C      | S40C~ S55C      | S40C~ S55C          | S40C~ S55C          | S40C~ S55C          | S40C~ S55C          | S43C ~S45C     |

注: 强度等级的单位为kgf/mm<sup>2</sup>

爱知制钢公司开发的高强度非调质钢

表6

| 用途  | 钢 种     | 屈服强度<br>kgf/mm <sup>2</sup> | 抗拉强度<br>kgf/mm <sup>2</sup> | 延伸率<br>%   | 面 缩 率<br>% | 冲 击 值<br>kgf·m/cm <sup>2</sup> | 硬 度<br>HB | 取代的钢种            |
|-----|---------|-----------------------------|-----------------------------|------------|------------|--------------------------------|-----------|------------------|
| 切削用 | SVd45HT | ≥60<br>≥55                  | ≥85<br>≥85                  | ≥14<br>≥14 | ≥25<br>≥20 | ≥4<br>≥3                       | 235~302   | SC高强度钢<br>SCr调质钢 |
|     | SVd40ST | ≥70<br>≥60                  | ≥90<br>≥90                  | ≥16<br>≥16 | ≥30<br>≥25 | ≥5<br>≥4                       | 255~321   | SCr、SCM<br>调质钢   |
| 锻造用 | SVd45HT | ≥60                         | ≥90                         | —          | —          | ≥2                             | 262~321   | SC高强度钢, SCr调质钢   |
|     | SVd20BT | ≥75                         | ≥105                        | —          | —          | ≥2                             | 302~352   | SCr、SCM调质钢       |

注: 切削用材分别列出两个尺寸范围的性能。上面的数字代表φ20~75mm时的数据, 下面的为φ80~160mm。

强度也优于普通渗碳材料；（4）利用具有等离子热处理功能的多功能真空炉可得到无晶界氧化、表面光亮且抑制了晶粒粗大化的材料。三菱制钢公司开发的高浓度渗碳用钢MAC14，在渗碳处理时选用了渗碳能力强的渗碳气体，结果仅经渗碳、淬火、回火处理即获得均匀分散且有细小球状碳化物的渗碳层，它具有优异的耐磨性、耐点蚀性和耐热性。

#### 四、高强度非调质钢

出于省去部件的淬火、回火或热处理变形矫正工序，压缩库存等降低生产成本的需要，非调质钢的用途正在不断扩大。目前使用的铁素体-珠光体型非调质钢，强度低于80kgf/mm<sup>2</sup>，很难满足部件高强度化的要求。为此各大公司积极开发强度超过80kgf/mm<sup>2</sup>的非调质钢。表5和表6分别列出新日铁、爱知制钢公司开发的高强度非调质钢。分为直接切削用和锻造用两大类，供用户选择。其中，高强度铁素体-珠光体型非调质钢SVd45HT借助于增加Mn和V的含量，即使在1100~1200℃锻造也能防止奥氏体晶粒粗大化，从而提高了疲劳强度。图3给出了SVd45HT热锻后的抗拉强度与疲劳极限的关系，并与原有的SC钢、合金钢的调质材料作了比较。SVd45HT钢的屈强比（屈服

强度/抗拉强度）可达0.50，比合金钢的0.53毫不逊色。

鉴于原有的铁素体-珠光体型非调质钢难以达到合金钢那样好的韧性（冲击值），爱知制钢公司还为重视冲击值的产品开发了低碳贝氏体型非调质钢SVd20BT。通过成分控制低碳、高锰、高铬、高钒，提高了冲击值和疲劳强度，并减少了对锻造条件变化的敏感性。切削用高耐疲劳非调质钢SVd40ST具有优于合金钢的屈强比，SCM调质钢为0.53，SVd40ST可达0.58。

NKK公司以大型汽车的热锻造用部件为对象，开发了高强度、高韧性的贝氏体型非调质钢B-HF系列，分为三种：B-HF1，B-HF2，B-HF3，抗拉强度分别超过75、85和95kgf/mm<sup>2</sup>。成分的特点是极力降低

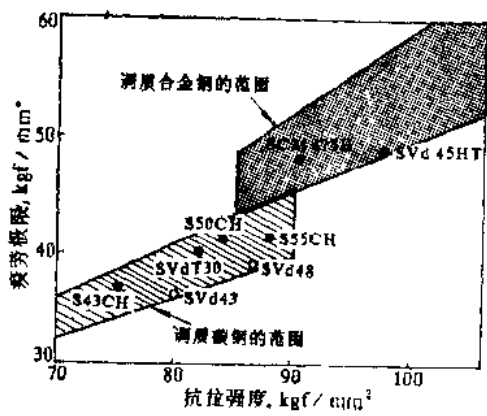


图3 SVd45HT钢的抗拉强度与疲劳极限的关系

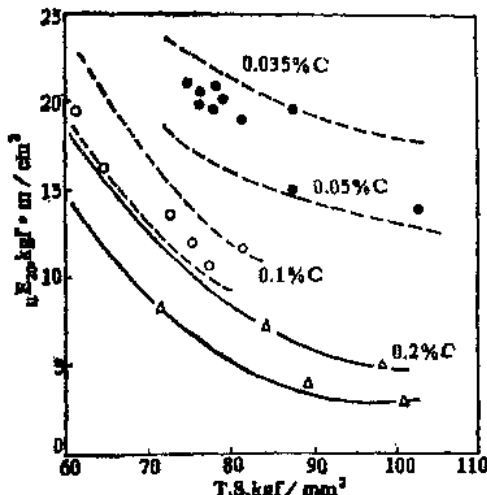


图4 含碳量对强度和冲击值的影响

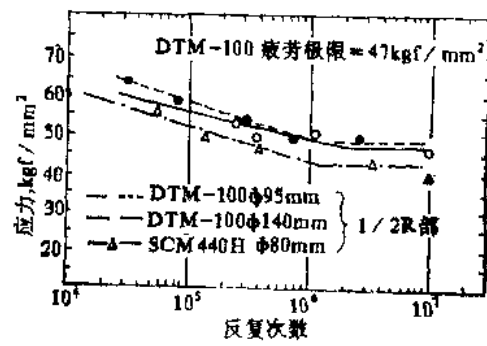


图5 小野式旋转弯曲疲劳试验结果

含碳量(均低于0.05%)。图4表明:随着含碳量的降低,冲击值可大幅度提高。此外,为了获得贝氏体组织增加了Mn、Cr含量;添加V、B以便提高淬透性。

三菱制钢公司推出的特殊热处理棒钢DTM-100可直接切削加工,省去了机加工后的热处理工序。直径55~140mm的棒材质量几乎无差异,抗拉强度均可达到100kgf/mm<sup>2</sup>级。而且,钢材截面内硬度分布均匀,所以疲劳强度优于普通的SCM440H钢(参

照图5)。利用鼓形炉连续淬火、回火,减少了切削加工时的应变。

川崎制铁公司研制了一种直径可达190mm的高强度非调质棒钢NH48MV,它的强度、韧性几乎不随尺寸的增加而降低。 $\phi 190$ mm棒钢的强度达95kgf/mm<sup>2</sup>,冲击值达4kgf·m/cm<sup>2</sup>,疲劳强度约44kgf/mm<sup>2</sup>,屈强比为0.45,这些性能均等于甚至优于机械结构用合金钢(Cr-Mo钢)。

方 烨编译自《特殊钢》,1989, No6

## 100kgf/mm<sup>2</sup>级高强度钢的研制

S. Yano等

### 1. 前言

1963年,日本钢铁厂采用再加热和淬火方法开发了截面厚度为32mm的HT100高强度钢。但随着更大型钢结构的建造,而需要有更大截面厚度的钢板,由于钢截面厚度的增加将给钢用户在制造、焊接和运输等方面带来各种技术和经济问题。而这些问题可通过应用更高强度的结构钢而得到解决。例如,抽水蓄能水电站用的进水管是用80kgf/mm<sup>2</sup>级高强度HT80钢制造的。进水管主干部分壁厚达77mm,支干部分达100mm。如果进一步提高抽水蓄能水库的水头,则进水管的壁厚,主干部分将增加到70~80mm,支干部分将增加到150mm。对此,为开发50mm和100mm截面厚度的HT100钢面进行了全面研究。

### 2. 厚截面HT100钢生产的基本研究

HT100钢的化学成分根据下列基本想法设计:

(1)为了减小焊接裂纹敏感性和淬硬性将碳当量(C<sub>eq</sub>)和焊接冷裂纹敏感性指数(P<sub>cm</sub>)降至最低值。

(2)虽然镍在不损害韧性的情况下能有效提高淬硬性,但其价高,因此将镍含量

限制在3%左右。

(3)为了使钢板心部获得所希望的淬硬性将添加一些淬硬性增强剂(如Cr、Mo和B)。通过添加铝和采用CAP(控制铝析出)法以充分利用硼的淬硬性增强效果。

(4)添加沉淀强化元素(如Mo、V),以得到不低于97kgf/mm<sup>2</sup>的抗拉强度。

(5)减少P、S和其他杂质元素,以达到高水平韧性。

根据上述原则,在300kg真空熔炼炉中冶炼出含有1%、2%、3%Ni的Ni-Mn-Cr-Mo-V-Al-B钢,经CAP方法处理后轧成20mm厚板。钢板在475~650℃回火,并进行拉伸和冲击性能试验。选取了符合指标值的试验结果,并研究了奥氏体晶粒度和镍含量对100kgf/mm<sup>2</sup>级高强度钢的强度和韧性的影响。图1示出这些结果。由图1(a)可知:

(1)淬火显微组织主要为马氏体时奥氏体晶粒度与vTrs的相关性比淬火显微组织主要为下贝氏体时大。

(2)在研究范围内的镍含量对韧性很少或没有发生影响,这与淬火显微组织主要是马氏体还是下贝氏体无关。

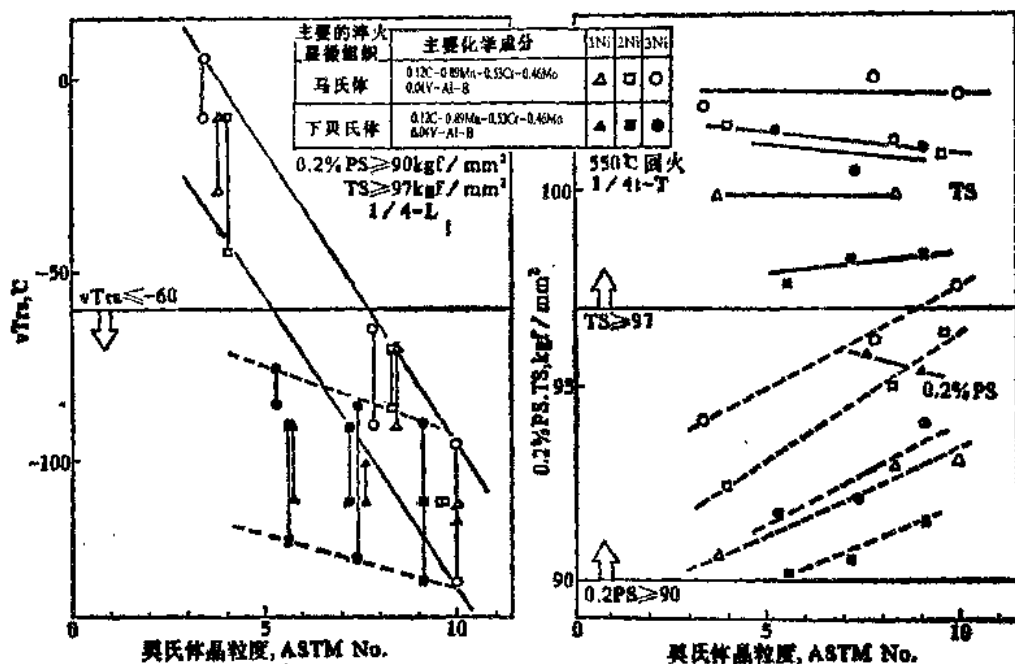


图1 奥氏体晶粒度和镍含量对100kgf/mm²级高强度钢的强度和韧性的影响

图1(b)示出奥氏体晶粒度和镍含量对在550℃回火60分钟的HT100钢拉伸性能的影响。由图可知:

(1) 屈服强度(0.2%PS)随奥氏体晶粒尺寸的减小而增加,而抗拉强度(TS)实际上保持不变(即与奥氏体晶粒度无关)。

(2) 0.2%PS和TS可按镍含量加以分类。镍含量越高,钢所显示的强度也越高。

(3) 虽然在两种淬火显微组织中都观测到上述倾向,但淬火显微组织主要为下贝氏体的强度水平要比主要为马氏体的低。淬火显微组织主要为下贝氏体时,镍含量为1%钢的0.2%PS和TS均不能满足要求。

根据上述特点,采用3%Ni-Cr-Mo-V-Al-B系作为HT100钢研制方案的基本成分。

图3(略)示出在100mm厚、3%NiHT100钢板上进行的拉伸和夏比冲击试验的结果。拉伸性能完全满足指标值,但是夏比冲击能基本上处于低水平,特别是表面的剪切断裂百分数和韧性不能满足指标值。为此,

通过在表面形成细晶马氏体和在心部形成细晶贝氏体来改善钢板表面和心部的韧性。为了细化奥氏体晶粒度进行了多次淬火试验,其结果示于图4。当钢板经二次淬火时,平

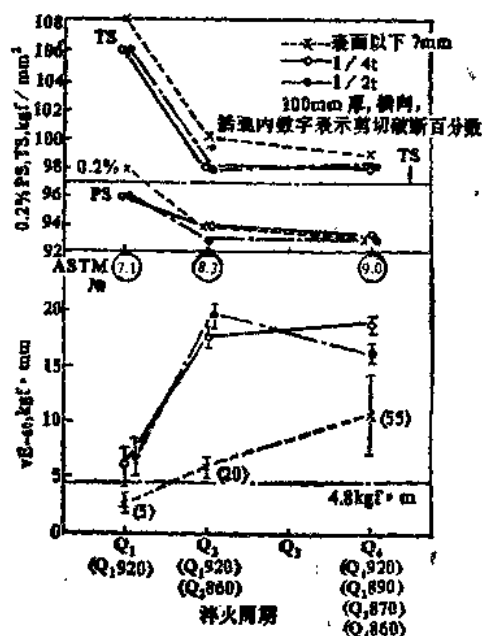


图4 经多次淬火和回火钢的性能  
(600~625℃回火)

均奥氏体晶粒度从№7.1升到№8.3, 因而在厚度的四分之一处 ( $\frac{1}{4}t$ ) 和心部 ( $\frac{1}{2}t$ ) 的韧性得到改善。当钢板经四次淬火时, 平均奥氏体晶粒度细化到№9, 其韧性在整个厚度上均得到改善, 满足了指标值。

根据上述试验结果, 在工厂试生产了 HT100 钢。表 2 (略) 列出试生产钢的化学成分, 图 5 (略) 示出其生产工艺。表 3 (略) 列出试生产钢的各项性能。与一次淬火比较, 多次淬火降低了强度、改善了延伸率和韧性。取自表面试样的韧性比取自其他部位

试样的稍低, 但均满足指标值。

新 HT100 钢的生产工艺是把 CAP 法 (为了改善心部淬硬性) 和低表面温度轧制再加上直接淬火 (为了细化表面的奥氏体晶粒) 结合在一起的生产工艺。根据这个生产工艺, 必须以满足下列三个要求来选择 HT100 钢的化学成分: (1) 在心部形成以下贝氏体为主另加一些马氏体的混合显微组织; (2) 规定与 HT80 钢相同的  $C_{eq}$  和  $P_{cm}$  值, 以得到与 HT80 钢同样好的焊接性; (3) 得到所要求的焊接接头韧性。图 6 示出通过改变镍和铝含量所生产的直接淬火和回火 (DQT) HT100 钢的各项力学性能。采用累积压下量为 40% 或更大的控制轧制是一种获得细晶显微组织的强有力的手段。

根据上述讨论的研究结果, 在工业生产线上生产了 50mm 和 100mm 厚的 HT100 钢板。图 7 示出 HT100 钢的生产工艺, 表 5 列出其化学成分。该钢是在 150t BOF (顶吹氧气转炉) 中熔炼并采用 CAP 法和形变热处理相结合的工艺加工成 50mm 和 100mm 厚 HT100 钢板。钢板采用工厂的连续在线控制

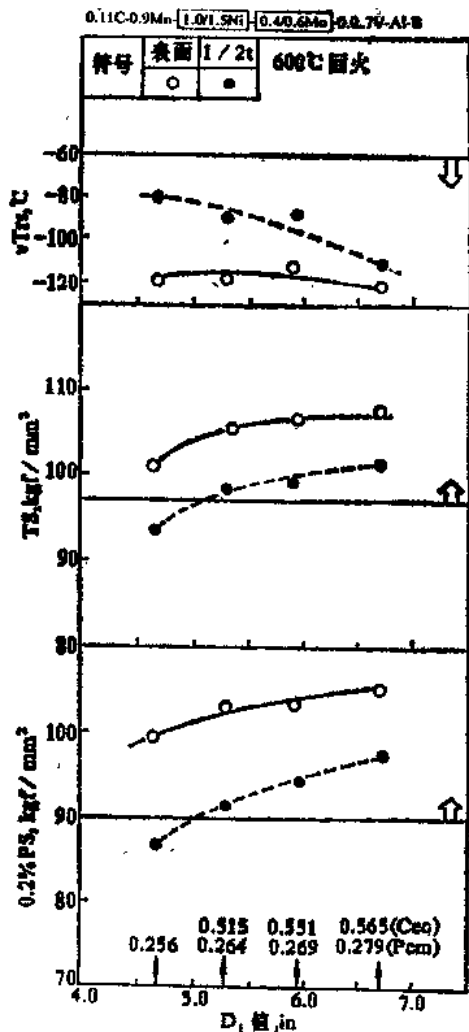


图 6 (a) HT100 钢的  $D_1$  值与力学性能之间的关系 (经直接淬火和回火, 50mm 厚)

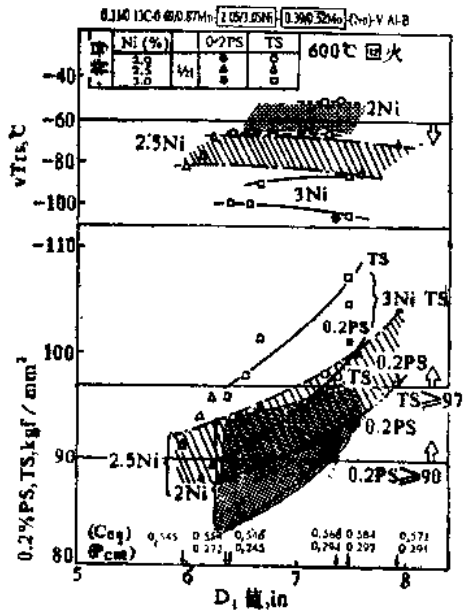


图 6 (b) HT100 钢的  $D_1$  值与心部力学性能之间的关系 (经直接淬火和回火, 100mm 厚)