



国外 低合金钢、合金钢

2

(总第10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》期间内，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，每集各约30万字。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，又考虑到未来发展的新动向。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，尚有少量余额，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。

编 者

1990年12月

目 录

一、综 述

| | |
|----------------------|--------|
| 热轧高强度钢的研究及其在汽车车轮上的应用 | (1) |
| 未来的工程用钢 | (7) |
| 航空用超高强度钢 | (12) |
| 易切削钢的发展 | (18) |
| 粉末冶金工具钢的生产工艺、性能及其应用 | (22) |
| 高温1%CrMoV转子钢成分设计的改进 | (27) |
| 高强度齿轮钢的生产 | (34) |
| 底吹电炉不锈钢精炼法的开发 | (38) |
| 不同方法熔炼不锈钢时氮的控制 | (43) |

二、低合金钢

| | |
|-----------------------------|--------|
| 锰和硼对热轧-室温卷取超低碳含钛冷轧薄板机械性能的影响 | (48) |
| 微合金化对控轧09Γ2钢性能的影响 | (53) |
| 冶金因素对微合金化钢控轧时变形抗力的影响 | (56) |
| 火车车厢用含铌低合金钢 | (60) |
| 高延性高强度复合组织钢板的生产 | (61) |
| 延性优良的超高强度钢板的生产方法 | (64) |
| 耐纵裂性优良的超深冲用高强度冷轧钢板 | (68) |
| 结构件用高强度钢板的生产方法 | (72) |
| 加工性、烘烤硬化性优良的热轧钢板的生产 | (75) |
| 具有极好闪光焊接性的汽车轮辋用热轧薄板 | (78) |
| 具有高耐寒性和耐蚀性的BCr3cn钢新的生产工艺 | (83) |
| 石油天然气管线用13Γ2AΦ正火钢 | (86) |
| 凸缘延伸性优良的深冲用冷轧钢板的生产方法 | (88) |

三、合金钢

| | |
|------------------------|---------|
| 一种新的化工设备用高合金镍铬钼钢 | (92) |
| 新型耐蚀材料和防护金属涂层 | (97) |
| 高氮合金钢的生产和机械性能 | (100) |
| 塑料成形模具用钢 | (105) |
| 夹杂物形态对低碳硫铅易切削钢切削性能的影响 | (109) |
| 合金元素对耐磨铸件用低合金钢组织和性能的影响 | (112) |
| 莱氏体工具钢断裂性能的影响因素 | (114) |
| 合金化对二次硬化经济合金化工具钢性能的影响 | (118) |

| | |
|--|---------|
| 新开发的X ₂ CrNiMnMoN23 17 6 4钢的性能····· | (121) |
| 高强度马氏体钢钢管的性能····· | (123) |
| 奥氏体不锈钢包层金属的点蚀····· | (127) |

四、工艺性能和使用性能

| | |
|---|---------|
| 广泛用途钢的微合金化和变性处理的工艺现状····· | (131) |
| 现代金属学金相研究方法····· | (136) |
| 测定和模拟 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo钢经长期使用后的显微组织变化和脆化····· | (139) |
| 压力容器用低合金钢在高温高压水中的低周疲劳行为····· | (142) |
| 无钼钢和含钼钢在硝酸钙溶液和氢氧化钠溶液中的应力腐蚀破裂····· | (146) |
| 马氏体时效钢离子氮化时的沉淀硬化····· | (151) |
| 添加氮优化双相不锈钢焊缝金属的性能····· | (153) |
| 双相不锈钢焊接热影响区的组织和韧性····· | (157) |
| 一些钢和合金在含氟和氯离子溶液中的腐蚀和电化学行为····· | (159) |

热轧高强度钢的研究及其在汽车车轮上的应用

祖 荣 祥

(冶金部钢铁研究总院)

汽车制造工业用钢铁材料的最近发展趋势是高强度化。为了减轻汽车用零件的重量以降低其自重、节约能源,并提高运载效率,可从两方面采取措施:一是改进零件的结构、设计;二是采用高强度材料。

高强度钢用于车轮可以收到更为明显的效果。据分析,汽车车轮一类旋转件应用高强度材料来减轻重量的节能效果相当于非旋转件的1.2~1.3倍^[1]。而且车轮能以单个部件的形式进行试验和评价,比较方便,因而也为其试验研究创造了有利条件。

由于上述原因,高强度钢应用于汽车车轮的试验研究十分活跃。美国最早(1978年)提出用高强度钢制造车轮,如SAE960X, 965X等。

高强度钢种类不少,据报道热轧高强度钢应用于车轮效果最好,减轻重量最明显,所以热轧高强度钢在车轮上的用量逐年增加。日本在汽车用高强度薄钢板发展的第三个时期(大约在1985年)加强了对车轮用热轧高强度钢的研究,并取得了较大进展。目前日本大部分汽车车轮都使用抗拉强度50~60kgf/mm²的热轧高强度钢板^[2]。

但是,热轧高强度钢在轮辋、轮辐上的应用还有许多问题有待解决。一些生产、应用结果也并不一致。从研究钢的性能、制造方法上报道较多,但对车轮钢的一些必要性性能尚不很清楚。到目前为止还几乎未见到关于用强度600MPa以上的高强度钢来大量生产车轮的报道。

车轮是保证汽车行走安全的重要部件,生产工序多,要求严格,因而也是技术难度最大的部件之一。车轮制造包括轮辐成形、轮辋成形、组装加工、涂漆,最后经过检查而得到产品。对制造车轮的钢材要求也十分严格,除要求具有优良的强度、塑性、韧性等力学性能外,还应有良好的冲压成形性、焊接性、抗疲劳破坏性能、耐腐蚀性、涂漆性等,而采用高强度钢更增加了一些困难。因为随着强度提高、塑性降低,成形性能也就变坏,对疲劳缺口的敏感性增大,而且焊接的影响也增大等。

轮辐需冲压成形,故轮辐钢应具有良好的深冲性、拉伸成形性和剪切边拉伸性。轮辋需在闪光焊接后滚压成形,故焊后的成形性要好。侧弯试验是评价闪光焊接性能的最好方法。轮辋钢应当有良好的侧弯延伸率(SEL)。SEL随 σ_s 增加而下降,同时硫也降低SEL,为使高强度钢保持较高的SEL,措施之一是降低硫含量。

检验焊接接头弯曲成形性的弯曲试验中,在焊接线上出现的顶头裂纹与钢中的Si、Mn含量有关。当Mn/Si含量比在一定范围内时,顶头裂纹的生成率最低(图1)^[3]。据分析认为是由于氧化物熔点低于钢,有利于减少裂纹。而由母材中夹杂物导致的钩形裂纹与铝镇静钢中的硫含量有关(图2)。将硫含量降至0.005%以下能有效地减少钩形裂纹。这些试验结果对于高强度钢用于车轮是十分有用的。

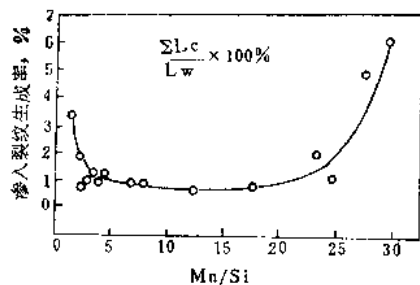


图1 渗入裂纹与Mn、Si含量的关系
 T.S. ≥ 500 MPa; Mn ≥ 0.9 wt%
 ΣL_c : 裂纹总长度; L_w : 焊接线长度

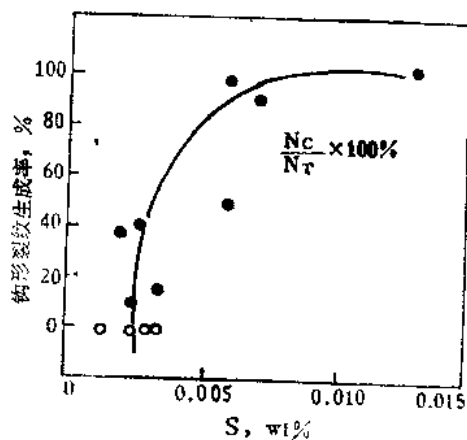


图2 含硫量对钩形裂纹生成率的影响
 N_c —出现裂纹的试样数; N_T —试样总数

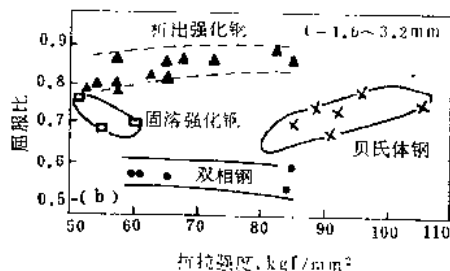
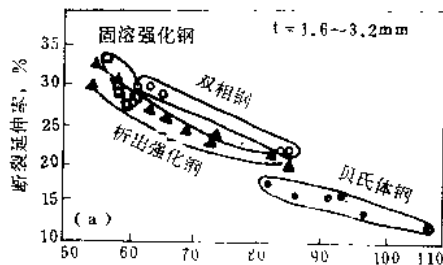


图3 热轧高强度钢板拉伸强度与延伸率(a)和屈服比(b)的关系

图3给出了几种热轧高强度钢拉伸强度与延伸率和屈服比之间的关系[4]。由图中可以看出：贝氏体钢强度很高，但塑性最低，因而冲压成型性不好，不适合制作车轮。普通高强度钢，如固溶强化和析出强化钢，其组织为铁素体加珠光体，在相同强度下屈服比却高得多，延伸凸缘性低（表1），因含有

表1 热轧高强度钢板的力学性能（厚2.7mm）

| 类别 | 级别 | 抗拉强度 kgf/mm ² | 屈服强度 kgf/mm ² | 延伸率 % | 屈服比 % | 扩孔率 % |
|----------|----|-----------------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|
| 铁素体-珠光体钢 | 50 | 55 | 38 | 33 | 69 | 40 |
| | 55 | 60 | 42 | 29 | 70 | 35 |
| | 60 | 65 | 51 | 26 | 78 | 30 |
| 双相钢 | 50 | 55 | 33 | 34 | 60 | 65 |
| | 55 | 59 | 37 | 31 | 63 | 60 |
| | 60 | 64 | 41 | 30 | 64 | 50 |

较多合金元素故成形性和焊接性也不很好，因此一般只能用来制造形状不很复杂的轮辐和轮辋。

为了克服上述缺点，曾开发出新型铁素体珠光体钢[5]，其含碳量比过去稍高，不需加钒等元素，属C-Mn系热轧高强度钢。这种称为SHA55B的新型高强度钢的典型化学

成分(%)是：0.14C, 0.10Si, 1.08 Mn, 0.016P, 0.001S, 0.020Al, 0.0062N。为控制夹杂物形态以改善加工性，还可以加入适量钙。此钢为铝镇静钢，热轧后低温卷取，得到铁素体和细珠光体组织。因为含碳量提高及卷取温度降低使强度达到55kgf/mm²级，屈服比降至约70%，因而具有车轮等行

走部件所要求的优良成形性（特别是扩孔性）、形状固定性和焊接性。与沉淀硬化钢相比，新钢种的延伸率、回弹性、扩孔性都有所改善。根据汽车厂的试车结果，这种钢几乎适用于全部车轮部件，包括轮辐和轮辋。现已广泛用于以轮辐为主的部件。制作轮辐时可以减重10%以上，由于不含铌等元素故经济性很好。

通过试验得出(3)，为使轮辋顺利成形，

抗拉强度为600MPa的钢板必须具有30%以上的侧弯延伸率(SEL)，为此应将钢中含硫量降到30ppm以下，对于沉淀硬化钢还必须使碳当量 $C_{eq}(FBW) > 0.4\%$ ，以保证焊缝附近硬度分布良好，且 $SEL > 30\%$ ，这是强度为600MPa的沉淀硬化钢用于轮辋的必要条件。已开发了强度为550和600MPa的沉淀硬化钢，其成分及性能分别列于表2、和表3。

表2 沉淀硬化钢的化学成分，%

| 级别 MPa | C | Si | Mn | P | S | Al | Nb | Ti | Ceq | Mn/Si |
|-----------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| 550 | 0.12 | 0.15 | 1.39 | 0.017 | 0.001 | 0.045 | — | 0.035 | 0.42 | 9 |
| 600 | 0.09 | 0.21 | 1.42 | 0.017 | 0.003 | 0.043 | 0.046 | — | 0.42 | 6 |

表3 沉淀硬化钢的力学性能

| 级别 MPa | 厚度 mm | 钢 板 | | | | 焊接接头 | | | |
|-----------|----------|-----------|-----------|---------|----------|-----------|-----------|---------|----------|
| | | YS MPa | TS MPa | E1 % | SEL % | YS MPa | TS MPa | E1 % | SEL % |
| 550 | 2.6 | 480 | 570 | 29 | 44 | 470 | 580 | 24 | 31 |
| 600 | 2.6 | 560 | 640 | 26 | 40 | 550 | 630 | 22 | 30 |

钢的显微组织为铁素体和珠光体。由于含硫量低， $C_{eq}(FBW)$ 和Mn/Si比比合适，焊接接头的侧弯延伸率大于30%，故弯曲试验中不会出现顶头裂纹和钩形裂纹。600MPa级钢已经用来制造轮辋。其焊缝横截面的硬度分布良好(图4)，焊缝处硬度提高，钢的疲劳性能也很好。

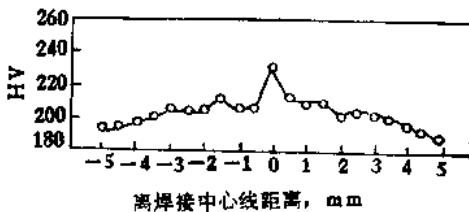


图4 焊缝横截面的硬度分布
TS 600MPa Ceq 0.43%

(因而屈强比低)、成形性能好、加工硬化指数高、变形后弹性回复小等(6)，因而可用于制造形状较复杂的冲压零件，其典型的零件是轻型汽车的轮辐(7)。

尽管有不少报道介绍了双相钢在车轮制造中的应用，但仍有许多问题有待解决。例如，焊接接头侧弯试验中形成裂纹的部位基本上与硬度最低的部位一致，也就是说裂纹开始在焊接接头最软的地方出现，因此制造轮辋的钢在焊接时不应软化。由于生产双相钢时采用低温卷取，闪光焊接时使热影响区出现较显著的软化(图5a)，在焊后加工过程中热影响区产生缩颈，甚至出现裂纹，因此双相钢不适宜制造需焊后加工(如轮辋)的零件。

组织为铁素体和马氏体的双相钢具有许多优良的性能。如延伸率高、屈服强度低

然而，如果对生产工艺加以改进，充分利用双相钢的良好成形性能，那么强度在

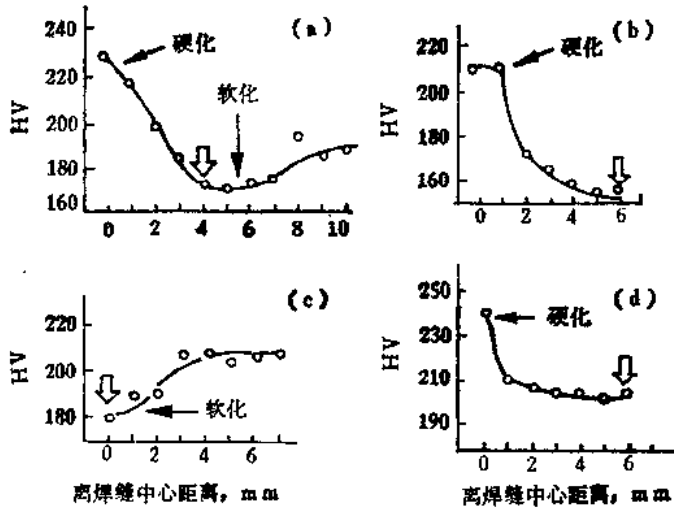


图5 闪光焊接接头的硬度分布

(a) 一双相钢(0.063C,0.52Si,1.79Mn,σ_b530MPa)

(b) 一固溶强化钢(0.066C,0.52Si,1.78Mn,σ_b520MPa)

(c) 一沉淀硬化钢(0.084C,0.05Si,1.07Mn,0.052Ti,σ_b640MPa)

(d) 一沉淀硬化钢(0.09C,0.35Si,1.44Mn,0.044Nb,σ_b610MPa)

图中空心箭头为侧弯试验裂纹位置

表4

热轧双相钢的化学成分(%)及力学性能(板厚2.8mm)

| C | Si | Mn | P | S | Al | Cr | YS | TS | E1 | YR |
|------|------|------|-------|-------|-------|------|-----|-----|----|----|
| | | | | | | | MPa | | % | % |
| 0.05 | 0.49 | 1.48 | 0.081 | 0.002 | 0.032 | 1.09 | 350 | 650 | 30 | 54 |

600MPa以上的双相钢仍可制造轮辋。文献〔3〕的作者提出了一种新的轮辋生产方法,即在轮辋焊接、修剪边部之后和扩孔之前增加一道特殊的热处理工序,使之产生双相组织。通过热处理可以消除母材和焊缝在硬度及显微组织上的差别。采用这种方法后,强度600MPa的双相钢已用于工业生产轮辋和轮辐,其成分和性能列于表4。该钢为Mn-Si-Cr系、屈强比为54%,可使车轮减重18%。据介绍,强度800MPa的双相钢经过这种处理后也能够用于制造高强度轮辋。至于这种特殊热处理的详细内容文献未作介绍,但增加这种特殊热处理后大概会使生产过程复杂化,生产周期及成本也可能随之增加。

作为车轮用钢,铁素体-贝氏体钢(F+B)比双相钢(F+M)似乎具有更多的优越性。C-Mn系铁素体-贝氏体热轧高强度钢板在比较低的温度区卷取(300~500℃),当贝氏体含量约10~20%时具有非常好的力学性能,特别是延伸凸缘性〔8〕。其综合性能TS-E1和TS-λ(图6)非常好。由图6可以看出,在强度相同时双相钢的扩孔率λ只有(F+B)钢的50%左右。另外(F+B)钢还具有低的屈强比、良好的表面状态和良好的焊接性、涂漆性等优点,因此更适合用于车轮钢。

文献〔9〕也得到与上述结果相似的结论。与显微组织为(F+P)和(F+M)双相钢相比,(F+B)钢具有更好的TS×E1

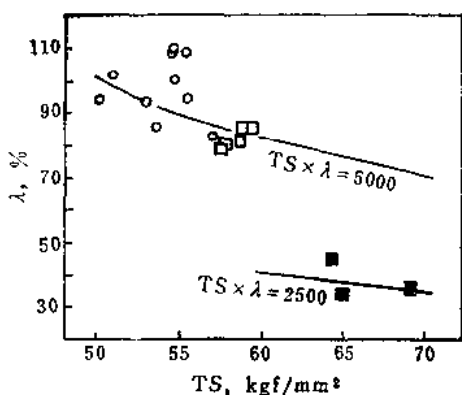


图6 工业生产的(F+B)钢和(F+M)钢强度和扩孔率(TS-λ)关系的比较

○: (F+B)钢于400~500℃卷取
 ■: (F+M)钢于250℃卷取

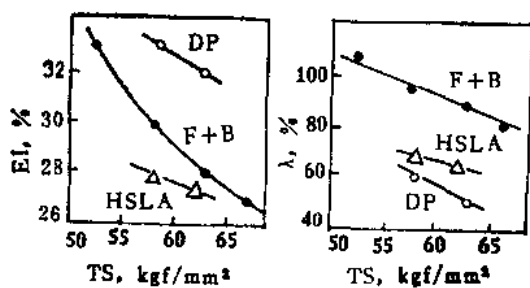


图7 (F+B)钢的TS-EI和TS-λ性能

表5 KBHF-B系列钢(F+B)的化学成分(%)和力学性能

| 牌号 | C | Si | Mn | P | S | Nb (Ti) | YS kgf/mm ² | TS kgf/mm ² | EI % | λ % |
|----------|-------|------|------|------|-------|---------|---------------------------|---------------------------|---------|--------|
| KBHF-50B | ≤0.10 | ≤0.1 | ≤1.4 | ≤0.1 | ≤0.01 | 添加 | 43.5 | 52.4 | 34.4 | 105 |
| KBHF-55B | ≤0.15 | ≤0.5 | ≤1.6 | ≤0.1 | ≤0.01 | 添加 | 48.8 | 58.0 | 30.5 | 96 |
| KBHF-60B | ≤0.15 | ≤0.5 | ≤1.6 | ≤0.1 | ≤0.01 | 添加 | 53.6 | 63.0 | 28.5 | 82 |

相钢的屈服强度和屈强比与双相钢相等,甚至更低,而比(F+B)钢(屈强比约70%左右)就更低得多。其强度-塑性的综合水平比(F+B)钢好,但贝氏体含量对这一性能有很大影响。作为低屈强比型的高强度复合组织钢板,远优于双相钢。而且当贝氏体为上贝氏体,且 $\alpha=0.2\sim0.7$ 时最好^[11]($\alpha=f_B/f$, f_B 为贝氏体体积分, f 为第2相体积分,即 $f=f_B+f_M$)。

含铬三相钢的一种成分是(wt%):

和扩孔性(图7)。当贝氏体为10~30%时,TS×EI最大;于350~550℃温度卷取后扩孔性能最好。如果进行钙处理,改善硫化物夹杂形态,扩孔率还可再提高。与双相钢不同,闪光焊接后热影响区的硬度高于基体金属,随后加工时不会出现局部缩颈。因此(F+B)钢被认为是最适合做轮辐、轮辋的材料。这是由于贝氏体的延性好,硬度适中,克服了双相钢的一些缺点。

(F+B)组织的钢号KBHF-B的化学成分及力学性能列于表5,这类钢正在系列化。通过严格控制终轧温度、冷却制度和卷取温度来控制贝氏体含量。这些钢已经工业生产,并广泛用于制造轮辐、轮辋,能显著减轻重量,而且成本低。

除上述双相组织的热轧高强度钢外,还研制出一些车轮用三相组织的热轧钢。如F-B-M钢。研究发现,在双相钢的组织中含有少量贝氏体可以使塑性大大改善,但不降低室温至77K之间的强度^[10]。(F+B+M)钢兼有双相钢屈强比低、连续屈服的优点,以及(F+B)钢的良好成形性、凸缘延伸性。三

0.08C, 1.0Si, 1.2Mn, 0.011P, 0.002S, 0.69Cr, 0.033Al。经450℃卷取,可得到多边形铁素体+贝氏体及马氏体,YS为39 kgf/mm², TS为64.9 kgf/mm², 屈强比为0.60, EI为32.5%, 屈服点延伸率(YPE1)为0%。因为扩孔率λ随马氏体含量增加而下降,如欲使λ>70%,则应使马氏体含量小于10%。

上述钢中含有铬,为提高涂漆后的耐蚀性并降低成本,希望不加铬而用C-Si-Mn系

钢来代替,故研究了C、Si、Mn等化学成分和卷取温度对组织、力学性能以及F、B、M各相体积分数的影响^[12]。结果发现,为降低铬而同时又保持良好屈强比、YPE1等性能,则应降低卷取温度。当铬含量降至0.34%时卷取温度为230℃以下,不含铬时,卷取温度应当在150℃以下,即可得到(F+B+M)三相组织。为使C-Si-Mn系三相钢具有双相钢的优点(屈强比 <0.7 , YPE1 $<1\%$)和(F+B)钢的优点($\lambda > 70\%$),马氏体量至少应为2%,但又不能超过10%。

最近发展的(F+A+M)钢是另一种复相钢。这种钢能够进一步改善强度和塑性的配合,作为车轮用钢具有更好的加工成形性。神户钢铁公司推出的这种钢强度在80kgf/mm²以上,延性极好,并且焊接性和表面质量好^[13]。组织中的残余奥氏体大于10%,可通过奥氏体的加工诱发相变来提高n值和延性。化学成分(wt%)有两种,

(1) 表面质量好的: 0.15~0.45C, 0.8~1.5Si, 1.0~2.5Mn, Si/Mn=0.5~1.0, 另可加入0.02~0.20P, 0.05~0.40V, 5~100ppmB, 0.01~0.06溶Al;

(2) 点焊性能好的: 0.15~0.45C, 1.5~2.0Si, Mn ≥ 1.1 , Si+Mn=2.8~4.0, 其余同(1)。

上述钢的终轧温度在Ar₃以上,于650~700℃卷取,使碳化物球化。连续退火时先在A+F区内保温4分钟以下,以便在球化的碳化物上生成奥氏体。冷却时由双相区先慢冷(30℃/s)至600℃到Ar₁,再快冷(大于30℃/s)至350~450℃,使贝氏体含量在15%以上,其余为F、 Λ 残余和M体,所以它的显微组织中其实包含着4种成分。

尽管热轧高强度钢用于制造车轮可以获得明显的效果,但在技术上还有许多问题,至今尚未全部解决。至于双相钢、(F+B)钢以及(F+B+M)等复相钢,虽然各有不同的优点和特性,但也都存在不同的局限性,目前

它们都还处在不断地发展中,所以它们的成分、制造工艺、应用范围以及组织、性能研究等今后还会不断地改进和完善,并有可能出现新的高强度材料和制造工艺以便实现车轮轻量化。例如,最近有文献提出一种生产新型高强度热轧钢板的方法^[14]。钢的主要成分(%)为: 0.35~0.55C, 1.0~2.5Si, 1.5~3.0Mn, 另外可加0.005%以下的S和0.005%以下的Ca中的一种或两种。组织为百分之十以上的亚稳奥氏体,余为贝氏体。钢热轧后冷却,冷速保证连续冷却中不发生铁素体转变,卷取温度高于Ms点,低于出现珠光体的温度。因为为奥氏体会使钢的强度和延性特别是均匀延伸性变好,其生产方法的特点是不需加铬,只通过限定冷速和卷取温度而使C-Si-Mn系钢得到足够数量的亚稳奥氏体。

参 考 文 献

- [1] 水井止也等, 制铁研究, 1984, №312, 18
- [2] 森本纯正等, 住友金属, 1989, 41, №2, 3
- [3] 篠崎正利等, 铁と钢, 1982, 68, №9, 214
- [4] 武智弘等, 制铁研究, 1984, №312, 8
- [5] 岡重和俊等, 住友金属, 1984, 36, №2, 43
- [6] Isao takahashi等, Kawasaki Steel Technical Report, 1981, №2, 23
- [7] С. А. Голованенко等, МИТОМ, 1984, №11, 25
- [8] Shun-ichi Hasimoto等, Transactions ISIJ, 1986, 26, 985
- [9] 须藤正俊等, 神户制钢技报, 1983, 33, №4, 49
- [10] In Sup Kim等, Steel Research, 1987, 58, №4, 186
- [11] 杉本公一等, 铁と钢, 1986, 72, №15, 125
- [12] 桥本俊一等, 铁と钢, 1982, 72, №11, 70
- [13] 日本公开特许公报, 1987, №164827, №164828
- [14] 伊丹淳等, 日本公开特许公报, 1989, №159317

未来的工程用钢

D. J. Naylor

工程用钢的分类和应用

本文叙述了各种工程用钢及其应用实例。含C $\leq 0.45\%$ 和Mn $\leq 1.5\%$ 的钢在轧制和正火状态下广泛地用于要求抗拉强度达至700MNm⁻²左右的一般工程。这些钢的显微组织为铁素体-珠光体，用作低应力部件如轴、滑轮、托架、拉杆、管件和悬挂件。

直接硬化的碳钢和低合金钢，在淬火和回火状态具有很好的强度和韧性配合。依靠调整合金含量、截面尺寸和热处理条件，其强度的上限可高达2000MNm⁻²。对于1C-1.5Cr轴承钢，可以达到非常高的硬度(HV 800~850)。这些钢的应用包括曲轴、连杆、悬挂锻件、紧固件、轴承、飞机起落架、弹簧、高强度管线联接件、气体容器、矿用链条和手工工具等。

表面渗碳钢含有较低的碳量，也可含合金元素。热处理使碳进入工件表面，产生高的表面硬度(HV700~800)，而心部的最大硬度仅450HV。渗碳处理通常用于齿轮钢以提高磨损和疲劳抗力。感应淬火对中碳钢是一种快速、便宜、有效和可靠的表面处理工艺，它可以得到深的硬化层。渗氮处理是另一种表面硬化处理法，它用于Cr-Mo合金钢来制造滑动件。对所有可硬化钢都要求严格控制化学成分以得到稳定和可预测的淬透性。

易切削钢含少量硫($\leq 0.4\%$)或铅($\leq 0.3\%$)，必要时还加入碲、硒或铋。它们用作形状复杂但受力不很大又需大量机加工的制品，包括液压耦合器、车轮螺柱、衬垫、马达轴、套筒、动力操纵轴。

冷成形钢(包括中、低碳钢、硼处理钢和低合金钢)用作紧固件和各种发动机/传动构件，如火花塞、齿轮和耳轴销。主要要

求低硬度、好延性、低夹杂含量和高的表面质量。

弹簧钢必须具有高的弹性极限和高的屈服比，这可以通过碳钢的冷加工或低合金钢(如Si-Mn或Cr-Mo钢)的热处理来达到。

滚珠、滚柱和针状轴承由直接淬火的高碳、高合金钢或低碳、合金渗碳钢制造。它们要承受高的滚动接触应力，要求高的纯度。

种类繁多的高合金不锈钢用于那些需要高耐腐蚀性和抗高温性能的工程制品，例如矿物燃料和核电站过热器、锅炉管、喷气发动机、热交换器、加热炉、石化工业用阀门、管线和泵。

汽车工业工程用钢

汽车工业是工程用钢最重要的市场。全世界每年生产近4000万辆车。欧洲从业人员有1/10依赖汽车工业。一辆小汽车上的工程用钢量约占其总重量的14%，一辆卡车约占22%。小汽车正向轻型化、更强牵引力、更便宜、可靠、舒适、污染小的方向发展。为适应这些变化，从表1可见，在过去10年，尽管用钢量有所下降，但高强钢板的应用却大大增长。铝和新材料，如塑料的使用对钢比重的减少作出了贡献。车辆尺寸和重量的减小对减少钢的比重也起重要作用。对于汽车用材和生产工艺正在进行大量研究和开发的项目有：金属基复合材料、纤维增强聚合物、轻金属、陶瓷、粉末锻件和铸铁。这些将继续与车辆用钢竞争，但是目前黑色金属材料仍显示相当有利的条件，因为它们价格低、容易加工以及熟悉的设计和生产技术。

图1(略)示出了汽车零件的成本结构。一般说来，钢坯或钢棒热处理后价值提高一

表1 汽车用材的相对量, %

| 材 料 | 1947年 | 1975年 | 1985年 | 1995年 |
|------|-------|-------|-------|-------|
| 钢 | >80 | 63 | 60 | 50 |
| 铸铁 | — | 16 | 13 | 5 |
| 铝 | — | 2 | 6 | 10 |
| 塑料 | — | 4 | 9 | 25 |
| 其他材料 | — | 9 | 12 | 10 |

倍, 切削加工和精整后又提高一倍。在某些情况下, 例如大柴油发动机曲轴的切削加工费用可以高达总成本的70%。因而相当大的注意力花在改进工程用钢的机械加工性能方面, 并用近似于产品形状的成形操作来减少机加工的量。此外正继续研究和应用有可能得到所希望的机械性能, 而不必求助于传统的花费昂贵的调质处理。

优良可机加工性能

除了确实具有好的机械加工性能外, 一个重要要求, 特别对CNC切削工具, 是易切削或其他可机加工钢的机加工性能的稳定性。

最近引进的方坯连铸对生产含铅低碳易切削钢获得稳定的机加工性能很有益, 许多年来, 一直存在一种担心, 即连铸钢的高凝固速率会导致MnS夹杂尺寸变小, 从而引起机加工性能的恶化。然而, 由连铸坯轧成的小方坯中硫化物的尺寸, 同10吨模铸锭轧后的硫化物尺寸实际上是相似的, 尽管认为铸态时硫化物的尺寸随连铸结晶器和炼钢条件而变化。连铸钢中铅的分布也是比较均匀的。

因为硫化物对钢的韧性和延性, 特别是厚度方向有不良影响。易切削钢由于含硫量高, 一般不合作高应力零件。因此, 大多高中碳钢和低合金钢的含硫量通常有限制, 一般最高含硫量为0.4%。对于机加工十分重要的制品, 常常规定最低的含硫量, 避免因含硫量低而产生切削困难的问题。然而, 对一些高强度镇静钢和细晶粒钢仍要求有好

的机械加工性, 而对其他重要性能或功能又不致于产生不良影响。为了达到这一点, 过去10年的办法是采用稍高的含硫量 ($\leq 0.1\%$) 以及使硫化物夹杂改性, 从而确保有足够的横向机械性能。少量添加Ca和/或Te也认为对改善韧性各向同性是有效的 (图4)。钙还有其他的好处, 它起到一种特殊的脱氧剂作用, 能使氧化铝夹杂变成外边包覆较软的钙锰硫化物壳层的磨粒作用很小的铝酸钙复合物。因为钙是一种很活泼而易挥发的元素, 已开发的用喷粉式喂丝法可确保产生所希望的夹杂物。这一新技术正应用到碳钢、微合金钢、低合金表面淬火和直接淬火热钢。

加入钙和碲对烧结碳化物和高速钢工具寿命的有益作用示于图5 (略), 图中也示出含高硫的特殊脱氧和夹杂物改性钢机加工性和其他性能的良好配合。这些产品正由英国联合工程钢公司 (United Engineering Steels) 以MAXIM牌号出售。特殊脱氧但含硫按现行国家标准的钢以IM牌号生产。表6表示这些新产品高而稳定的机加工性。它们可以在较高的速度 (高100%) 下加工而不降低工具寿命。尤其是MAXIM钢能形成非常好的精整表面和较好的切屑形式以利去除。业已证明, 这些可加工性好的直接淬火合金钢在全淬硬情况下能满意地加工, 而许多高强度低合金钢则要经昂贵的退火处理才

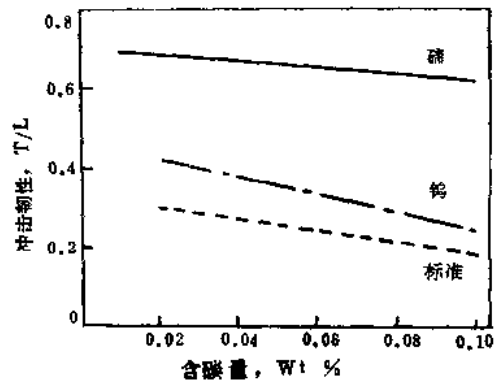


图4 硫、钙和碲对调质708M40钢韧性各向同性的影响

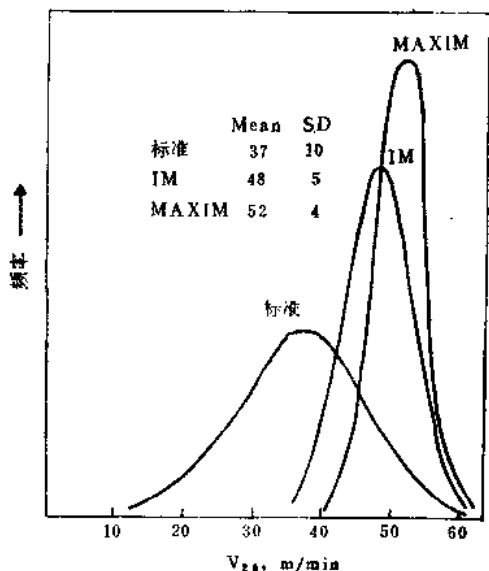


图6 可加工低合金钢(调质)的加工稳定性

能赋予加工性，加工后的制品还得进行调质处理，甚至要用控制气氛。附加处理的费用超过MAXIM钢的10倍。

工程用不锈钢的机加工件也可通过加硫和铅来改善，如AISI303和416，但是它们的耐蚀性会受到严重损害，特别是硫化物夹杂引起的点蚀。为了得到良好的机加工性，特别对难加工的奥氏体钢来说，在控制含硫量的同时，还要采取特殊的脱氧技术(IM钢)。这样，机加工性可接近加硫的303钢，且保持304/316钢的耐蚀性(图7，略)。

铅作为易切削添加剂已有50年历史，最近15年涉及到生产环境和含铅钢的应用问题。炼钢厂安装了排烟设备以保证生产这类钢时的安全作业，含铅钢在锻造和再加热时也采用类似的措施。在开发和应用新易切削钢来代替含铅钢方面很令人注意。最可能的代用钢是铋和硼处理加硫钢。遗憾的是铋比铅昂贵得多，硼以低熔点和熔剂性能的氧化物来改善机加工性，虽然较便宜，但不能提供铅的各方面优点。

对于工程用合金钢，已发现增加硫和特殊脱氧的夹杂物改性钢能成功地代替含铅钢，例如燃料泵喷射器零件和阀弹簧。

空冷钢

在开发具有较好使用价值的工程用钢方面，另一个重大成就是采用空冷的碳钢和微合金钢。它们在热加工后控制冷却达到所希望的性能，免去了习惯和费钱的调质处理。中碳钢用钒和铌微合金化以及组织-性能关系的物理冶金学问题大约在20年前就已确立。加入少量钒(0.1%)由于形成细小分散的碳氮化钒使强度增加20%左右。然而在欧洲15年前才开始用于汽车锻件，后来扩展到日本，在美国的锻造和汽车工业并没有充分使用这种低成本的微合金锻钢。合理选定钒、硅、锰和碳的含量可使抗拉强度达到 $800\sim 1150\text{MNm}^{-2}$ 。如果不添加微合金化元素，强度只能达到 $750\sim 800\text{MNm}^{-2}$ 。Rover Group公司宣称，微合金化钢用于A系列1.3升发动机曲轴，以1982年价格计算可节省50万英镑/年。空冷锻件还比调质钢有更稳定的性能。它不会因淬火而产生扭弯，因而不必要进行矫直。从而锻件可以直接由锻造车间送到机加工车间，也不必存贮以待热处理。

空冷微合金化钢的机械加工性能至少和同等强度的热处理合金钢相当。然而，具有较粗晶粒的铁素体-珠光体组织的钢的屈服强度和冲击韧性比通常的调质钢要低。低和高周疲劳试验令人满意；循环应力-应变试验指出，这种钢周期地硬化，而普通钢在周期负荷下则软化。然而，一些汽车制造厂在使用这些钢时仍然有些勉强，因为它们的韧性较低，改善韧性的方法之一是添加少量钛以细化晶粒。还试验了加入少量合金元素使在空冷状态生成较韧的低碳贝氏体。前者会有更好的经济效果，初步结果令人满意，性能见图9。

预料空冷碳钢和微合金化钢棒和锻件的应用将继续增长，特别在北美是这样。

采用低的终轧温度和控轧后冷却可以提高轧材的性能。根据所需性能，可以加速或

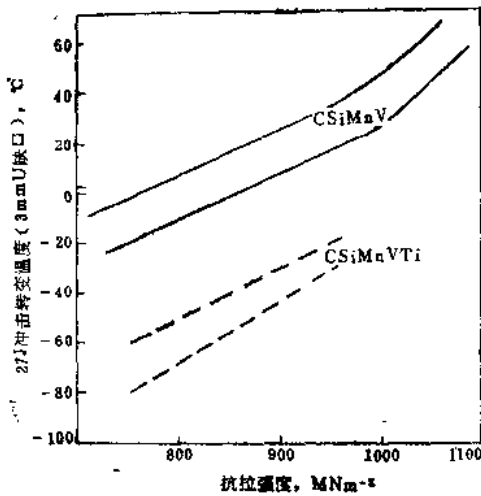


图9 钛处理空冷微合金化钢韧性的改善

延缓冷却。为了充分实现降低成本和发挥改善性能的潜力，轧机改造和增设冷却装备是必要的。

直接淬火钢

当那些空冷钢的性能不能满足重要用途时，另一种低成本方法是从锻造直接淬火。这一工艺可用于碳钢、硼处理钢和低合金钢。通常，淬火的锻件必须回火。从热成形操作淬火对形状较简单的制品如卷弹簧等是一种既定的作业。最近在欧洲（包括英国）

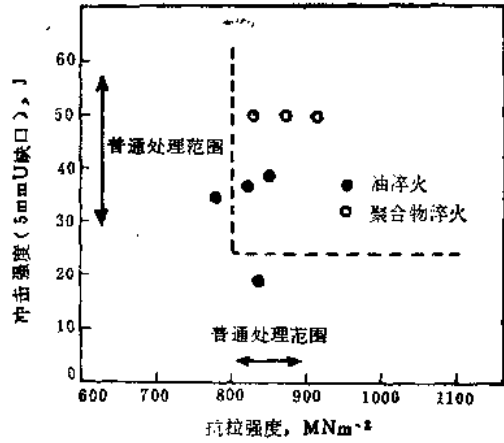


图10 41Cr4钢直接淬火汽车用前桥梁的性能

的几家锻件厂已决定对直接淬火锻件投资，以生产重要的汽车锻件，如前桥梁以及其他操纵杆和悬挂件。

从技术上看，因为终锻温度相当高，原奥氏体晶粒尺寸要比普通热处理温度生成的要粗大，这导致较高的淬透性，原则上适用于含合金少的钢。还认为，应当控制磷含量以抑制粗晶粒的C-Mn和C-Mn-Cr钢的回火脆性。还通过控制钛、氮和铝的含量来阻止奥氏体晶粒的长大。表2给出了直接淬火热合金钢锻件达到的性能。其他重要措施是

表2 直接淬火汽车用锻件的典型性能

| 零件 | 重量 kg | 钢种 | 热处理 | 力学性能 | | | | |
|--------|-------|--------|---------|------------------|------------------|-------|------|-----------------|
| | | | | 屈服强度 $MN m^{-2}$ | 抗拉强度 $MN m^{-2}$ | 延伸率 % | RA % | 5mm夏比U型缺口冲击功, J |
| 重载车前架 | 90 | 41Cr4 | 普通调质 | 685 | 890 | 16 | 55 | 35~50 |
| | | | 直接淬火和回火 | 685 | 875 | 15 | 50 | 45 |
| 小车转向拉杆 | 1 | 605M36 | 普通调质 | 865 | 970 | 30 | 60 | 55 |
| | | | 直接淬火和回火 | 855 | 1000 | 20 | 60 | 50 |

表3 直接淬火低碳钢的成分(%)及性能

| C | Mn | B | Ti | 截面尺寸 mm | 屈服强度 $MN m^{-2}$ | 抗拉强度 $MN m^{-2}$ | 延伸率 % | RA % | 夏比V型缺口冲击功, J |
|------|-----|-----|-----|---------|------------------|------------------|-------|------|--------------|
| 0.05 | 1.8 | ✓ | ✓ | 19 | 770 | 1010 | 15 | 67 | 74 |
| 0.08 | 2.0 | ✓ | ✓ | 50 | 790 | 995 | 13 | 67 | 57 |
| 0.08 | 1.9 | ... | ... | 15 | 855 | 1150 | 14 | 68 | 95 |

在锻造-淬火过程很好地控制温度和时间,并选用直接淬火的最佳介质。如图10所示。聚合物淬火比油淬火能获得更稳定的性能。

除了传统的中碳钢外,还研究了低碳钢的直接淬火处理,不必再经其他处理,只须低温去除应力。如表3所列,一种0.05C-1.8 Mn-B-Ti钢,截面尺寸为19mm,在直接淬火状态下抗拉强度达到1000MNm⁻²,同时夏比冲击值保持74J。增加碳和锰的含量,50 mm截面的材料可得到相似的性能。通过合理选定化学成分,15mm材甚至可获得更佳的性能。从锻造后直接淬火,由于成本低,且产品质量高,因此将得到广泛采用。

精密温锻工程用钢

为了降低成本和改善质量,接近终产品形状的成形工艺有增长趋势,目的是减少费钱的切削加工的量。这类制品有齿轮、传动操纵构件、CV联接器、液压制动气缸等。

温锻(在500和900℃之间)比传统的热锻能得到更好的材料收得率、表面精度和公差,而且温锻的优点超过冷锻。温锻时,较高强度的钢也能加工成复杂的形状,且免去了耗时费能的退火处理。然而,对于许多形状精密的零件进行加工精整是非常必要的,如钻削加工,因此所用的钢必须有好的机械加工性和成形性。

一般,从冶金方面有利于成形性的因素(均匀性、质地软、延性显微组织和低的夹杂物含量)对机械加工性有损害。相反,普通采用加硫来改善机加工性的办法又有损于成形性。采用加铅和/或控制硫化物夹杂使其变成小的球形,有利于解决上述矛盾。温锻的另一特点是可以不必随后热处理就可得到规定的性能。钒处理钢在温锻状态下具有特别好的性能。

高清洁度工程用钢

最近几年,清洁钢的生产有重大进展。采用的工艺技术有:浸入式出钢、偏心炉底出钢、倒包和吹氩、合成还原渣、真空脱

气和保护浇注。

目前工程用钢可以得到很低的含硫量(<0.005%),由于横向性能的改善,提高了韧性的各向同性,如图11所示。然而,低的硫含量也使机加工性能降低。

钢包精炼使钢的含氧量减少。例如,Stocksbridge Engineering Steel公司生产的1%Cr轴承钢的平均含氧量从1984年的20ppm降到1987年的10ppm。清洁轴承钢的B10寿命提高一倍。清洁钢的断裂韧性也得到提高。

随着对更高强度和更好韧性制品的需求,更为清洁的钢的需要量日益增长。因为夹杂物含量的减少,用普通的金相法越来越难以精确地定量评价。产品的含氧量可以作为一种评价方法,无损探伤技术也正被采用。

用钢包精炼法生产工程用钢的另一优点

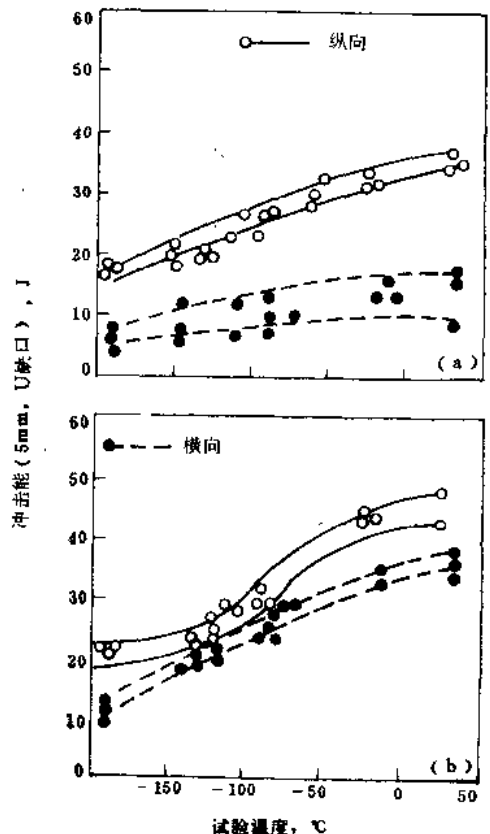


图11 清洁钢的韧性各向同性的改善

是精确地控制化学成分。例如，可以得到三分之一的顶端淬透性带。对表面硬化钢可以达到的成分(%)范围是：0.21~0.23C、0.20~0.25Si、0.86~0.94Mn、0.55~0.65Cr、0.19~0.21Mo、0.50~0.60Ni。以统计学为基础的几种计算机已被应用，并正为这一目的得到进一步发展。

油/气工业工程用钢

管线配件用高强、高韧可焊接钢

过去20年，在北极和北海深处越来越严酷的条件下勘探和提取油气。地球上余下的石油和天然气正日益变成酸性，随之而来的问题是因硫化氢导致破断和疲劳。为了能承受更高的压力，对高强度微合金钢管线用钢板大力发展了控制轧制和快速冷却工艺。随着钢管直径的增大，运输能力也加大。然而，直到最近尚没有联接件和法兰用的锻件来相应匹配。因此，要求开发在很低温度下具有高强、高韧且可焊接的锻造或环轧的配件用钢。

为此开发了一种新的C-Mn-Mo-Nb-V钢系列，它的碳当量 <0.45 ，它可以满足API X65对水调质的(截面尺寸 $\leq 150\text{mm}$)性能要求，即屈服强度 $>448\text{MNm}^{-2}$ ，抗拉强度 $>530\text{MNm}^{-2}$ ， -46°C 时的夏比V缺口冲击值 $>50\text{J}$ ，较小截面(例如50mm)的

钢材可以满足X75的要求。现在几家大公司已成功用X65钢生产高强度法兰，这类产品用MIG试验表现出优良的焊接区冲击性能。预期，用于联接件的高强度可焊接钢的需要将继续增加，已推出一种符合X100性能要求的焊接性更好的钢。

气体容器用高强度钢

高压气体容器的使用范围很广，包括重工业、轻工业和卫生部门。过去50年，以筒体重量和气体重量之比表示，效能提高了4倍，例如，容纳50升水的筒体，在1920年重210kg，而现在只有60kg，这主要是通过应用较高合金的高强度钢来实现的。最初，用的是0.2%C钢，最低屈服强度为 250MNm^{-2} ；现在筒体通常采用0.35C-1Cr-0.2Mo钢，最低屈服强度达 755MNm^{-2} 。

可以预测，现在使用的基本合金钢还将保留下来，同时将采用先进的热处理工艺来提高强度，可使效率提高20%。为了得到更高屈服强度(如达到 950MNm^{-2})，需要开发新的合金钢。有一种意见是将钒加入Cr-Mo合金钢中，当然也在考虑其他的方法。为验证容器的合格率和安全性，精细的无损检验和评价方法是必不可少的。

季 缘节译自《Ironmaking and Steelmaking》，1990，17，№1，17~25

航空用超高强度钢

W. M. Garrison, Jr.

引言

航空工业中使用少量钢铁材料。在商用飞机和军用飞机中钢铁约占总重量的7~20%。在商用和军用飞机中主要使用低合金钢(例如4340和300M)、高合金二次硬化钢(HY180、AF1410、HP9-4-20、HP9-4-30)、沉淀硬化不锈钢(15-5PH和PH13-

8)以及马氏体时效钢(C250)。这些钢的公称成分列于表1。低合金钢典型的用途是在起落架方面；高合金二次硬化钢在美国海军运输机中常作为起落架和停机钩使用；沉淀硬化不锈钢在C5A和C17等运输机中作为发动机装配零件和货舱材料使用；马氏体时效钢有时用于发动机的传动轴。这些合金的典

表1

航空工业中应用的超高强度钢的成分

| 合金 | C | Ni | Co | Cr | Mo | Mn | Cu | V | Si | Al | Ti |
|----------|-------|-----|----|------|------|----------|-----|------|-------|-----|-----|
| 4340 | 0.40 | 1.8 | — | 0.85 | 0.25 | 0.7 | — | — | 0.2 | — | — |
| 300M | 0.40 | 1.8 | — | 0.85 | 0.4 | 0.7 | — | 0.1 | 1.6 | — | — |
| HP9-4-20 | 0.20 | 9 | 4 | 0.8 | 1 | 0.1~0.3 | — | 0.08 | 最多0.2 | — | — |
| HP9-4-30 | 0.3 | 9 | 4 | 1 | 1 | 0.15~0.3 | — | 0.08 | 最多0.1 | — | — |
| HY180 | 0.10 | 10 | 8 | 2 | 1 | 0.15 | — | — | — | — | — |
| AF1410 | 0.16 | 10 | 14 | 2 | 1 | — | — | — | — | — | — |
| 15-5PH | 0.04 | 4.6 | — | 15 | — | 0.25 | 3.3 | — | 0.4 | — | — |
| PH13-8 | 0.04 | 8 | — | 13 | 2.2 | — | — | — | — | 1.1 | — |
| C250 | 0.005 | 18 | 8 | — | 4.8 | — | — | — | — | 0.1 | 0.4 |

* PH13-8、AF1410和C250中的Mn和Si含量尽量保持最低水平，15-5PH含Nb+Ta和碳量成比例，所有的数值为wt%。

表2 航空工业中应用的超高强度钢的力学性能

| 合金 | YS MPa | UTS MPa | K_{IC} MPa \sqrt{m} | K_{ISCC}^* MPa \sqrt{m} |
|------------------|-----------|------------|----------------------------|--------------------------------|
| 4340 | 1482 | 1965 | 71 | 11~16 |
| 300M | 1689 | 1965 | 71 | 11~16 |
| HP9-4-20 | 1276 | 1344 | 192 | 121 |
| HP9-4-30 | 1413 | 1586 | 121 | — |
| HY180 | 1276 | 1344 | 203 | 45 |
| AF1410 | 1551 | 1689 | 187 | 45.71 |
| 15-5PH (真空冶炼) | 1089 | 1124 | 132 | 132 |
| PH13-8 | 1434 | 1551 | 81 | >69 |
| C250 | 1689 | 1724 | 110 | 33 |

* K_{ISCC} 为3.5%NaCl水溶液中1000小时的数据。Tromans得到AF1410的 K_{ISCC} 为45MPa \sqrt{m} ，但很早以前Nue曾报道过为71MPa \sqrt{m} ，两人的数据均取自1000小时。Tromans报道的HY180的 K_{ISCC} 和AF1410的相同，HY180试验未用La变性处理，而AF1410很可能使用了La。

型性能列于表2。很明显，如果单是从强度考虑，4340和300M合金的性能优于其他材料，但这些材料的断裂韧性低，而且易于产生应力腐蚀裂纹。对于特定的用途，选择钢材时应在和断裂韧性及抗应力腐蚀开裂和抗疲劳裂纹性相适应的范围内选择最高的强度。

超高强度钢

以上提到的超高强度钢都是马氏体钢。

奥氏体化后转变为马氏体，最后进行回火或时效，析出碳化物和（或）其他粒子。这些钢在某些方面可以差别很大，如片状马氏体量、固溶碳量、回火时析出物的性质、夹杂物类型和体积率等。这些钢是用真空感应或氩氧脱碳冶炼，再经真空电弧重熔生产的。4340是航空工业中使用的典型低合金钢。这种钢在200℃或接近200℃回火。回火处理（第一阶段回火）后约有50%的碳作为碳化物析出。这些碳化物不是渗碳体。300M合金实际上是4340合金的改型，在其中加入了1.6wt%的Si。加Si后可提高回火温度而不致降低屈服强度和韧性。HY180、AF1410、HP9-4-20、HP9-4-30等合金是非常相似的。这些合金通常在高温回火（HY180和AF1410合金为510℃，HP9-4-20和HP9-4-30合金是565℃）。回火后大部分碳化物作为细小的合金碳化物析出，以提高强度。加入Co可提高碳化物析出的驱动力，并延迟位错的回复，因此增加了碳化物的密度，并提高合金碳化物的强化作用。HP-9-4-20和HP9-4-30合金是美国共和钢公司分别于1962年和1966年开发的；HY180合金是美国钢公司于1965年开发的。1970年中期由General Dynamics开发，后来由Cytemp发展的AF1410合金是在HY180合金中提高了碳和钼