



国外 低合金钢、合金钢

(总第14集)

1994

冶金部钢铁研究总院

国外低合金钢、合金钢

(内部发行)

1994年(总第14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: 《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。

1994年出版一集，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，张玉凤描图。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

1994年10月

6.10.7.10 / 0101

目 录

一、综 述

国外钢铁材料的现状及展望	(1)
汽车用钢的现状与发展趋势	(6)
不锈弹簧钢的发展	(15)
非调质钢的现状和动向	(21)
钢中的硼	(26)
热作工具钢的近期发展	(30)
美国钢铁工业中钛的应用	(35)

二、能源用钢

核聚变反应堆用低活化钢的开发现状	(39)
原子能核燃料处理装置用不锈钢的耐蚀性	(43)
焊后热处理对1Cr-0.5Mo焊接接头蠕变性能的影响	(47)
超高临界压力涡轮机用改型A286叶轮的开发	(52)
抗硝酸不锈钢的制造方法	(54)
恶劣环境中使用的超级不锈钢	(57)
压力容器用高强度Cr-Mo钢锻件	(61)
9%Ni厚钢板的破坏特性及其在大型液化天然气贮罐的应用	(65)
耐热钢和高温材料的持久性能的会议简介	(68)

三、交通运输用钢

硼对调质钢淬透性和机械性能的影响	(71)
具有良好冲压性和耐蚀性的汽车用经济钢	(74)
具有良好凸缘性的热轧镀锌高强度钢板的开发	(78)
成形性优异的440和490N/mm ² 级冷轧高强度钢板的开发	(81)
高速铁路车辆刹车片的开发	(85)
提高钢轨低温工作的可靠性	(89)
罩式炉退火和连续炉退火的烘烤硬化薄板的对比	(92)
磷和硼对高强度低碳汽车钢板再结晶的影响的研究	(96)

四、化工化肥用钢

马氏体时效钢的性能和应用	(99)
化工用廉价材料——复合轧制合金WStE355/NiMo28	(102)
钼对Cr-Ni-Mo-V钢性能的影响	(105)
高碳铬镍钢的磨料耐磨性	(108)

薄氧化膜对CrNi钢耐孔蚀性能的影响.....	(110)
硫、锰、钛对耐蚀钢的高温塑性和耐蚀性的影响.....	(114)
硅合金化高强度耐蚀钢板的组织和性能.....	(117)
10XCHД钢和09Г2С钢的脆性断裂倾向.....	(120)

五、工程机械用钢

易切削非调质结构钢.....	(123)
低硫钢的性能和切削性.....	(125)
冲压模具材料的最新动向.....	(130)
塑料成形用工具钢.....	(134)
阀门弹簧用超纯净钢.....	(139)
建筑结构用耐热钢.....	(141)
国际材料标准和检验标准——机械制造用钢的质量保证.....	(144)

国外钢铁材料的现状及展望

赵 光 存

(冶金部钢铁研究总院)

一、前言

近年来,新材料有了重大进展,但是迄今为止,还没有任何一类新材料能够在资源、生产能力、综合性能以及经济性等方面在可预见的未来取代钢铁材料。尽管,工业发达国家的钢铁材料产量已进入“饱和期”,但是第三世界还处在“成长期”。高新技术在钢铁材料科研和生产中的应用以及受新材料高速发展的推动,必将给钢铁材料的发展注入新的活力。

钢铁材料在当前还不是“过时材料”,因为不仅高新技术的发展,而且传统工业都离不开钢铁材料。

二、国外钢铁材料的现状

世界钢铁工业早在60~70年代基本上已完成向大型化、连续化、高速化及自动化方向的过渡,并形成了10亿吨的生产能力。

大型高炉,铁水预处理、转炉顶底复合吹炼(或大型超高功率直流、交流电弧炉)、炉外精炼、连铸-连轧、精整及在线检测技术的应用都大大提高了钢铁材料的质量水平,基本上满足了传统工业及高新技术产业对钢铁材料品种和质量的要求。

国外钢铁工业科研的重点向钢铁材料的应用领域,即钢铁材料工程领域过渡。

采用新工艺、新技术和新的检测手段,根据市场需求和高新技术发展的需要,开发节约合金资源,节约能源,综合性能良好、经济效益显著,并尽量接近使用形状的新型钢铁材料以及与之相适应的高效化、节能化、专业化和合理化的生产流程及工艺装备是钢铁材料发展的基本方向。

当前钢铁材料的品种和质量发展具有性能高级化、产品多样化,批量小型化及交货期短等特点。

1. 性能高级化

钢铁材料性能高级化的特点是高纯度,高均匀性、超细组织和高精度。

1.1 高纯度

钢的纯度提高到一定程度后,不但可以改善钢的原有性能,还可以赋予它新的性能。

轴承钢中的氧从30ppm降到15ppm,其寿命提高5倍。奥氏体不锈钢中磷 ≤ 3 ppm,能抗应力腐蚀。IF钢中 $C+N \leq 30 \sim 50$ ppm,具有极好的深冲性及无时效性,Z向钢中硫 ≤ 20 ppm时,抗层状撕裂性大幅度提高。目前国外大生产可达到的纯度水平如下(ppm)

$[H] \leq 1, [O] \leq 5, [C] \leq 10, [N] \leq 15, [P] \leq 25.$

1.2 高均匀性

窄淬透性齿轮钢淬硬带的硬度波动最小为 ± 3 HRC,从而要求钢中的碳、镍、钼分别控制在 $\pm 0.01\%$ 之间。锰和铬分别控制在 $\pm 0.02\%$ 之间。高质量轴承钢淬火后晶粒为球形,尺寸为 $0.8 \pm 0.2 \mu m$ 。

1.3 超细组织

AFC-77钢的晶粒从 $60 \mu m$ 细化到 $2.3 \mu m$,则 K_{1c} 从100增加到220公制单位。反应堆压力容器用钢粗晶态的辐照脆化温度为 $150 \sim 250^\circ C$,而细晶态为 $50 \sim 70^\circ C$ 。轴承钢中碳化物细化到 $0.5 \mu m$ 时寿命最高。

1.4 高精度

高精度主要指钢材表面质量好、尺寸公差小。例如热轧棒材的精度为 $\pm 0.1mm$,并

且以每0.1mm作为标准的分档级差。热轧板卷厚度精度为 $\pm 0.05\text{mm}$ 。冷轧板卷厚度公差为 $\pm 0.003\text{mm}$ ，板形不平度 $<1\%$ 。热轧无缝管壁厚度公差 $<1\% D$ 。

2. 产品多样化

产品多样化指通用的板、管、丝、带材、锻、轧、挤、拉、铸材，以及超薄、超细、特宽、超厚、特长材等。

还有复合的板、管、丝、带材、表面合金化材、表面涂镀层材等。发展方向是接近使用形状的产品；如精轧材、精锻材、精铸件、冷轧材、异型材以及粉末冶金制品等。

3. 应用研究深入化

应用研究向钢铁材料工程方向延伸，研究内容主要包括：

(1) 正确选材、合理用材及确定合理制造工艺；

(2) 表面处理工艺的选择与实施；

(3) 无损探伤技术的选择与实施；

(4) 材料与工程安全可靠性的研究；

(5) 失效过程分析。

4. 批量小型化和交货期短

为满足用户对产品的新颖化、多样化、个性化的要求，钢厂已把季计划变成月计划，甚至一个月排两次计划，而订货起始重量也大为降低。

三、国外钢铁材料的展望

美国、日本对未来与钢铁材料密切相关的高科技发展的预测是钢铁材料发展的强大推动力，例如：

1994年，液氧温度以上的超导材料及超导发电技术。

1998年 低噪声、轻型、高速轿车。

2000年 低噪声、低振动列车；磁流体发电；激光浓缩铀；从海水中提取铀；两年不需维修的高可靠性船舶；氢作为常规能源。

2001年 时速大于500km的超导直流电动机车；城市之间运输用超导磁悬浮列车；建成东京附近的海洋城市；海上航空港城市；

海上人工岛、海底隧道、海底仓库，地下核电站及能源贮存库等。

2002年 城市间交通用低噪声，并能垂直起落的直升飞机。

2003年 矿山开采无人化。

2004年 商用宇宙工厂及超导电磁驱动船。

2007年 特超音速客机。

2009年 宇宙空间太阳能发电站。

2010年 月球表面永久有人基地。

2012年 永久载人宇宙基地。

2013年 快中子熔盐堆。

2020年 油页岩就地干馏。

2040年 氢、甲烷作燃料的飞机。

2050年 热离子发电；海洋温差发电；原子能驱动汽车及太阳能飞机等。

上述高技术，不但需要新材料，还需要大量高性能钢铁结构材料、钢铁功能材料及钢铁结构-功能材料。

1. 国外钢铁材料展望

1.1 国外钢铁材料今后研究开发的主要内容

(1) 钢铁材料的成分、加工、组织和性能的优化。

(2) 钢铁材料的性能与使用目的相适应。

(3) 钢铁材料制品失效分析专家系统的开发和应用，为有效改进材料的性能提供依据。

(4) 特殊使用条件下，节约合金资源及能源钢种的开发。

(5) 改进钢铁材料的易切削性、成形性、焊接性及铸造性等加工性能的研究。

(6) 钢铁材料生产及制造工艺参数最佳化的研究，包括钢铁材料生产新工艺、新技术的研究。

(7) 极端条件下（如超高温、超低温、超真空、超高压、高辐照等）高性能钢铁材料及具有特殊综合性能的新型钢铁材料的开

发和应用研究,诸如高温、耐蚀、耐磨不锈钢耐热钢,低温、无磁高强度不锈钢;调整淬透性、超低氧、高清洁度碳钢;调整晶粒度、超低氧、高纯度冷镦钢;高强度、高刚度、低温、抗氢裂钢等。

(8) 钢铁功能材料与钢铁结构-功能材料的研究。

1.2 国外各类钢铁材料展望

1.2.1 非合金钢和低合金钢

这类钢发展的主要方向是高强度、耐腐蚀,不但改进钢铁材料的固有缺点并同时具有良好的综合性能和经济性。这类钢包括:非金属夹杂物和碳、氧、氮、硫、磷杂质很低且具有良好可加工性的超低碳冷轧钢板,高强、高韧性、易焊接的超低碳贝氏体钢(0.03C-1.6Mn-0.3Mo-0.05Nb-0.001B);沉淀硬化型贝氏体-铁素体钢(0.05C-0.6Mn-0.7Cr-0.8Ni-1.1Cu)以及针状铁素体钢(0.05C-1.8Mn-0.3Mo-0.05Nb);C+N \leq 30ppm的IF钢系列(包括深冲热镀锌、深冲高强度、高强度热镀锌,深冲烘烤硬化IF钢等)。

强度大于500MPa的汽车用冷轧深冲高强度钢板、强度大于1000MPa的冷轧高强钢板、强度大于600MPa冷轧冲压钢板、强度大于450MPa的烘烤硬化钢板,强度大于700MPa的热轧高强度钢板,强度大于600MPa的冷轧轮钢钢板,强度为3000~4000MPa的轮胎帘布高强度钢丝,强度为1000~1500MPa的抗延迟断裂性好的螺栓钢以及强度大于Walten80的工程结构用钢等都是当前研究开发的重要内容。

耐候钢和耐蚀钢的研究主要集中在加工性能好的经济耐大气腐蚀钢、耐海洋大气和海水腐蚀钢、耐弱腐蚀介质用的耐蚀钢以及镀涂层钢板,例如Fe-Zn(7~12%Fe)、Zn-Al(55%Al)、Al-Si(7~12%Si)、Sn-Pb(<15%Sn)与Sn-Pb-Ni(7~10%Sn)等。

将微合金化与新工艺、新技术相结合是提高非合金钢和低合金钢质量和性能的有效途径。

1.2.2 合金结构钢

合金结构钢的发展趋势是节约能源和合金资源,以及提高现有材料的质量和性能。

节能合金结构钢

这类钢包括:(1)省略工序钢,如控轧控冷后省去退火处理的中碳合金钢;省去正火处理的渗碳钢;热加工或渗碳后直接淬火钢;微合金非调质钢;火焰表面淬火的整体淬火钢。(2)快速渗碳钢、渗氮钢。(3)高频淬火中碳钢等。

经济合金结构钢

充分利用微合金元素钒、钛、铌、硼等元素代替镍、铬、钼等元素。例如汽车用钢的发展趋势是:Cr-Ni-Mo钢 \rightarrow Cr-Mo钢 \rightarrow Cr-Mn钢 \rightarrow Mn-B钢。应该指出,炉外精炼工艺为硼钢的发展创造了条件。含硼合金结构钢的发展有极大的技术和经济潜力。

高性能合金结构钢。

主要包括:(1)高强韧性齿轮钢、低应变齿轮钢与窄淬透性齿轮钢等;(2)易切削控制钢,这是一种疲劳强度很高,既能制造压力容器,又易切削的钢种;(3)超级易切削钢,它包括不损横向性能的低硫(0.001%)易切削钢,添加钙、锆、铈、钛、稀土元素改变硫化物形态、改善各向异性并提高冲击韧性的多元易切削钢,含磷、硫、铝、铈复合易切削钢以及含铋易切削钢;(4)调整晶粒度、超低氧、高清洁度冷镦钢;(5)氧含量小于10~15ppm的易切削齿轮钢等。

总之,利用合金化开发合金结构钢新钢种的时代已经过去,钢的多途径硬化技术时代已经到来,合金结构钢已进入一个复合功能化和使用简单化的新时期。

1.2.3 轴承钢

高碳铬轴承钢的发展方向是超高纯度、超高均匀性和超细组织。

采用精料--UHP 电弧炉—LF—RH—CC工艺已能够生产氧含量为3~4ppm、钛含量为9~15ppm的超高纯度轴承钢，从而大大提高轴承的寿命。

特殊轴承钢品种的开发是今后研究的重点，例如，快速渗碳轴承钢，高频淬火中碳轴承钢，控制淬透性轴承钢，加工性能好、成本低、疲劳寿命长的高温渗碳钢M50NiL，降碳、降铬易加工不锈钢轴承50X18M，超低温用无磁轴承钢，长寿命视频磁带录相机用轴承钢，长寿命直线运动轴承钢和超精密及超小型轴承钢等。

解决轴承钢连铸坯的中心偏析，开发滚动体用连铸坯生产钢材，仍是当前轴承钢连铸技术中亟待解决的问题。

1.2.4 弹簧钢

提高现有弹簧钢的冶金质量和性能，发展超级弹簧钢，提高其寿命是弹簧钢发展的主要方向。

超级弹簧钢的特点是高强度、好的抗延迟断裂性、高的疲劳性和抗弹力衰减性。目前弹簧钢的允许设计应力为1100MPa左右，今后将向1200~1500MPa或更高水平发展，但要求同时具有很高的疲劳性。

超耐弹力衰减弹簧钢、超高疲劳强度弹簧钢以及高耐蚀性、高强度弹簧钢是弹簧钢今后开发的重要钢种。

汽车悬挂弹簧用弹簧钢的强化，即悬挂弹簧的轻型化是发展方向，为此在钢种研究中必须控制组织中的位错运动，采用复合强化、多元微合金化、低温回火，表面强化以及高纯度（氧小于15ppm）的生产技术。

1.2.5 高速钢

高速钢的发展有向两极分化的趋势，一是性能高级化，用来切削调质到HB300~400高强度齿轮、塑料模具或HRC为40~50的所谓淬硬态钢材，尤其是铁、镍或钴基奥氏体高温合金或钛材；二是低合金化或者说经济化，以满足普通机床进入家庭的需求。

目前正在开发的钢种有超级高速钢，例如，无偏析高速钢，HRC大于70的高硬度粉末高速钢，超高淬透性高速钢及塑性加工工具用高速钢等。

高速钢的低合金化是指在中等切削速度下可代替M2的95W3Mo5Cr4VNb低合金高速钢，并采用PVD或不同氮化处理的通用型高速钢等。改进通用高速钢的可连铸性，仍是高速钢生产技术的重要研究内容。

1.2.6 工模具钢

随着被切削材质的发展和加工方式的更新（例如，电火花加工范围的延伸和工具寿命的延长），工模具钢材质日趋系列化、产品规格多样化和制品化。它们包括塑料、压铸及冲压模具的易切模具钢、防振模具钢、三向等韧性模具钢、不变形模具钢（温度变化、外力作用和热处理条件下均不变形）、粉末工具钢以及接近使用形状模具，如铸造制模，粉末冶金制模和挤压制模模具钢等。

工模具钢从通用钢种转向专用钢种，例如发展耐磨性更高的特殊塑料模具钢、易切性及镜面性均好的塑料模具钢、耐热合金工具钢、超硬碳化物和氮化物处理的工具钢及高淬透性工具钢等。

热作模具钢提高寿命的要求远比提高加工性更为迫切，因此需要开发长寿命的热作模具钢。

利用深冷处理使组织更加稳定，用氮合金化以提高耐磨性。随着热处技术的发展，特别是真空淬火和高压气体冷却、离子注入技术和低温（500℃）CVD、TiC+TiN（两层或三层）沉积技术的发展将会促使开发新的表面处理工模具钢，并不断提高其使用寿命。

1.2.7 不锈钢

不锈钢发展的方向是微合金化和高纯化、高耐蚀性和高强度、易加工化和功能化。通用奥氏体不锈钢发展的方向是微合金化和高纯化，以提高其耐蚀性和屈服强度，对氮合金化应给予足够重视。

发展耐海水、耐尿素、耐高温腐蚀的不锈钢以适应日益苛刻的使用环境是今后发展耐腐蚀新钢种的重要内容。

不锈钢的易加工化是要发展超易切削不锈钢、高可焊性不锈钢及加工硬化率较低的不锈钢。

不锈钢的高强度化是为了弥补其强度低的缺点，为此要开发耐氯离子腐蚀的高强不锈钢、耐疲劳、耐磨损的马氏体时效不锈钢、耐气蚀与耐泥沙磨损的高强不锈钢及冷处理硬化不锈钢和含氮不锈钢等。

不锈钢功能化也是不锈钢发展的重要方向，例如无磁不锈钢、软磁不锈钢、阻尼不锈钢（包括铁磁型、位错型及晶间腐蚀型）、形状记忆不锈钢等。还有装饰用彩色不锈钢板、涂有氟系透明漆的彩色不锈钢及包复陶瓷不锈钢等。

1.2.8 耐热钢

解决超与超超临界锅炉用T91钢及性能优于AISI347H钢的奥氏体耐热钢是火电用热强钢的研究方向。例如HCM12(0.1-12-Cr-1Mo-1W-V-Nb)，细晶粒TP347H, H-R3C(0.1C-25Cr-20Ni-Nb-N), Tempalloy A-1(0.1C-18Cr-10Ni-Ti-Nb)，NF611(0.1C-8/13Cr-1Mo-2W-V-Nb-N)，NF709(0.08C-20Cr-25Ni-1.5Mo-Ti-Nb-B-N和1Cr18Ni9Cu3NbN钢等。

高技术用耐热钢是耐热钢新钢种研究的主要内容，例如高温气冷堆蒸发器材料、快中子堆及受控核聚变堆用结构第一壁材料等。

石油化工用裂解炉管材料、煤液化和气化用耐高温氧化、氮化、碳化及硫化材料，在800~850℃耐PbO+V₂O₅腐蚀的奥氏体阀门钢以及汽车排气净化装置用耐热材料的要求也日益迫切。

1.3 精细钢是国外钢铁材料发展的新趋势

现在以铁和铁基合金为中心生产的金属材料、金属间化合物以及金属系材料统称为

精细钢。精细意味着成分纯且没有杂质，质量优异、外观美丽，这是由于冶金技术进步对质量进行控制的结果。

1.3.1 精细钢发展的总趋势

精细钢发展的总趋势是超高级质量化、复合化、智能化和环境无污染，力图弥补钢铁材料的固有缺点并赋予新的性能。

超高级质量化

新开发的材料有：（1）高韧性高强度碳钢、超高冲击韧性高强度钢、高韧性马氏体时效钢、用于超塑性加工和变形磨合性的固相扩散结合超塑性钢、高强度双相不锈钢、金属间化合物、高温钛合金、高强高韧钛合金、超深冲薄板以及高温、高耐腐蚀条件下使用的油井管等。（2）超耐热合金、晶粒控制合金、弥散强化合金、低膨胀耐热钢和合金及超低温钢等。（3）特殊金属涂层钢、有机涂层钢、干式电镀钢板、耐蚀钛合金和对局部腐蚀免疫不锈钢等。（4）铁基非晶材料、6%Si取向硅钢片、阴极罩冷轧薄带钢、无磁钢和引线框架材料等。

材料复合化

材料复合化主要包括：金属基复合材料、夹层阻尼钢板（热塑性或热固性树脂夹层、可焊接易导电树脂及高耐热性金属夹层）、纤维强化耐热钢、复合不锈钢防振板、抗氧化合金及耐磨合金复合板、耐辐照、耐高温或低温以及生物相溶性好的功能渐变材料、微晶片复合粉末冶金材料、纤维金属消音材料和粉末冶金防振材料等。

材料功能化

特别是钢铁结构材料功能化，如形状记忆钢、阻尼钢、贮氢钢、太阳能收集转化钢、高温超导材料、热膨胀系数低的无磁不锈钢等。

重视智能和环境材料的开发

智能材料具有感知机能、处理机能以及感应和传动机能。目前还没有完全实现智能化的材料。从材料的理、化基本性能和构造

来发现智能性的基本机能以及如何构成各个基本机能间的相互关系是研究的重点。

环境材料即环境无污染材料,其目的是保护环境、节约资源和能源。环境材料包括舒适材料、边缘环境材料和环境调和材料。

1.3.2 精细钢研究和开发的内容

高新技术在精细钢研究和生产中的应用如下。

(1) 电子计算技术:包括数据处理、传热学计算机分析、仿真技术、数学模型、CAD/CAM技术、工艺过程自动化、CIMS系统、网络技术、仪表智能化及数据和专家系统等。

(2) 核技术:包括薄膜活化分析、氮化技术、中子活化分析和核反应分析等。

(3) 材料表面技术:包括离子技术、激光技术以及复合表面技术等。

(4) 块状材料快速凝固技术:包括非晶粉末爆破成形技术、超声波接合技术和激光焊接技术以及利用高能电子束或激光照射非晶化技术等。

(5) 提高金属强度、韧性及耐热性的

高压磁场处理技术。

(6) 其他高新技术:例如半凝固加工技术、注射成形技术、快速凝固技术、爆炸及微波烧结技术、超塑性成形及近净化成型技术和电渣熔铸技术等。

1.3.3 高新技术产业及国民经济更新换代产品用精细钢的研究和开发。

精细钢最重要的应用领域是高新技术产业,包括宇航技术、核能技术、信息技术、新能源开发和海洋开发等。

四、结束语

到21世纪中期,钢铁材料在综合性、可供应性、应用广泛性和经济性等方面,至少在发展中国家将占主导地位。钢铁材料的超高级质量化、复合化、功能化将使它保持更大的竞争能力。

高新技术在钢铁材料科研、生产和制造中的应用以及高新技术用新型结构材料、功能材料和结构-功能材料的研究和开发是今后钢铁材料研究的重要内容。

参考文献(略)

汽车用钢的现状与发展趋势

董瀚 张永权 李桂芬

(冶金部钢铁研究总院合金钢部*)

1. 引言

世界主要工业发达国家都将汽车工业作为国民经济的支柱产业。我国明确提出要加速发展汽车工业,到2010年,将与钢铁、石化和建筑工业一样,形成国民经济的支柱产业。工业化国家汽车工业产值占制造业的8~10%。据1992年统计,当年汽车产量达4900万辆。国外专家预测,到2010年,世界轿车和载重车消耗量将达7500万辆,比目前每年消耗5000万辆增长50%。每年汽车生产约消耗

世界总产量24%的钢铁材料,58%的橡胶和46%的石油^[1]。我国汽车工业目前正处在快速发展阶段,1993年汽车产量达到130万辆,2010年我国汽车工业的目标是产量达到600万辆,形成支柱产业。

未来的汽车技术发展大致表现在汽车使用、汽车结构和性能、汽车生产技术和汽车社会体系等四个方面。在汽车的结构和性能方面,低油耗、净化排放气体、延长汽车使用寿命和提高汽车性能是四个基本发展目

*钢铁研究总院合金钢部的黄春富和刘清友两位同志为本文提供了大量资料,并对本文进行过深入和有建设性的讨论,借此表示感谢。

标^[2]。降低油耗的主要办法有：减轻重量（轻量化）占50%，提高发动机效率占20%，降低行驶阻力占30%，其中最有效的方法是汽车轻量化。一般质量减轻10%，油耗约可降低8%。

改进汽车生产技术的目的是节省能源、节约人力、降低生产成本和进行高效率生产。为此，在汽车制造中广泛采用激光电子技术和机电一体化技术，如车身冲压、装焊和涂漆等均利用机器人；发动机零件的锻造和机加工等采用数控设备；在设计、生产和管理中运用自动化电脑辅助设计和电脑辅助生产

等。

2. 适应汽车发展的汽车用钢的发展趋势

2.1 高强度是汽车用钢的发展方向

为减轻汽车自重、降低能耗和提高汽车碰撞时的安全性，汽车必须使用高强度钢板。国外汽车用钢板已形成系列，有抗拉强度280~340MPa的普通深冲钢板、抗拉强度345~440MPa的深冲高强度钢板、抗拉强度490~980MPa的冲压用高强度钢板等。高强度钢板在汽车上的使用量逐年增加（表1）。

据预测，10年后，整个汽车使用的高强

表1 汽车高强度钢板的设计使用量，kg/辆

年 度	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
使用量	113.5	116.2	123.0	128.9	139.4	153.5	163.9	174.8

度薄钢板将达30~50%。

除去减重原因外，汽车发动机、动力传递和转向系统采用高强度钢后，可提高发动机效率，增加动力传输效率。

2.2 高耐蚀性是延长汽车使用寿命、保持美观性和扩大使用环境必不可少的条件

在北欧、加拿大和美国等寒冷地区，在冬季为防止路面冻结而撒放大量融雪盐。当汽车高速行驶时，盐分飞溅到汽车各部位，造成车体严重腐蚀。加拿大、美国和日本都制定了汽车防锈标准：在正常使用条件下，行走20万公里，经5年无穿孔腐蚀，最近又修订为10年无穿孔腐蚀。为提高汽车用钢板的耐蚀性，各国都广泛地使用涂镀层钢板，如镀锌板、锌合金板、镀铝板、镀铝及铅锡合金板、高锌有机涂层和复合有机涂层板。1992年汽车用镀锌板占总镀锌钢板量的30%，比1988年增长8.5%。

2.3 汽车用钢向高质量方向发展

汽车用钢的质量分为表面质量和内部质量两个方面：从表面质量上看，汽车用钢的尺寸精度高，无表面缺陷。合金钢表面无脱

碳，或表面经100%剥皮或磨光处理等。从内部质量上看，钢具有高纯度，有害夹杂和气体含量均很低，如齿轮钢的氧含量一般都低于15ppm，日本齿轮钢的氧含量低于10ppm。很高的表面和内部质量使汽车用钢具有良好的综合性能。

2.4 采用先进的冶金生产工艺生产汽车用钢

汽车用钢的生产广泛采用真空脱气、炉外精炼、成分微调、计算机控制、连铸等生产工艺。

尽管目前轻型代用材料，如铝合金和塑料等的研究和应用发展迅速，但钢材仍然是汽车生产的主要材料，它占每辆轿车材料构成的75%左右。这种比例到本世纪末也不会有太大变化。

根据钢材的应用部位和加工成型方法，可把汽车用钢分作钢板和特殊钢两大类。本文将从钢板和特殊钢这两个方面评述汽车用钢的开发、生产和应用的现状与发展动向。

3. 汽车用可成型钢板

3.1 高强度热轧板

一般使用的热轧钢板强度最大为500 MPa, 虽然增加铌或钛一类微合金元素的含量可进一步提高强度, 但是成型性将变坏,

从而限制了它的应用。为了提高强度水平, 开发了双相钢和三相TRIP钢, (表2)。

表2 高强度热轧钢板⁽⁸⁾

强度水平, MPa	钢种	特点(强化机理)
400~500	高强度低合金钢	含铌或钛, 细小单相铁素体组织, 析出强化。
550~600	C-Mn钢	双相铁素体-贝氏体组织, 良好的卷边塑性。
600~650	双相钢	双相铁素体-马氏体组织, 由形变硬化特性导致的良好成型性。
~800	TRIP钢	三相铁素体-贝氏体-奥氏体组织, 改善形变硬化和成型性。

双相高强度钢特点是在细小的铁素体基体上分布大约15%的硬相, 并通过固溶原子进一步强化。铁素体-贝氏体(C-Mn钢)和双相铁素体-马氏体钢的抗拉强度在550~650MPa之间。第二相的形态由钢的化学成分和热轧过程来控制, 特别是通过热轧终止至卷取温度之间的冷却来控制第二相形态。由于成型性的限制, 双相钢无法达到800MPa的强度水平。为了满足更高强度的需求, 开发了含残余奥氏体的三相钢。在变形过程中, 残余奥氏体应变诱发转变为马氏体(TRIP), 从而引起强化。对于上述高强度钢, 在冶炼过程中, 要严格控制钢中的硫含量和硫化物形态, 从而提高塑性。

3.2 冷轧冲压钢板

多年来, 人们一直致力于新型涂镀层和非涂镀层冷轧和退火钢板的研究。为了减轻重量和提高安全性, 冷轧钢板也有向高强度发展的趋势。当钢板厚度分别减小0.05、0.10和0.15mm时, 车身减重分别为6%、12%和18%⁽⁴⁾, 所以增加强度是减小板厚、减轻重量的主要途径。然而与热轧钢板相同, 冷轧钢板在提高强度的同时也会导致成型性变差。在汽车成型过程中, 要求钢板具有高塑性应变率(r)和高形变硬化指数(n)⁽⁸⁾。

为了在提高强度的同时又改善成型性, 在铝脱氧低碳钢的基础上开发了增磷钢。其优点在于强度的增大对延展性的损害很小,

强度级别分别达340、370、390和440MPa, $r > 1.5$ 。主要用于汽车的外复盖件, 具有良好的抗凹陷性和优良的表面质量⁽⁶⁾。但是, 对于某些构件, 增磷钢的塑性则显得不足, 这样就发展了烘烤硬化钢(BH钢)。

BH钢比低碳软钢的强度略高一些, 因此表现出良好的成型性。强度增加40MPa, BH钢具有优良的抗凹陷性, 减重效果显著。

双相钢的优点是在抗拉强度达800MPa时, 具有良好的强韧性配合。在更高强度的TRIP钢(大于1000MPa)中, 仍可获得较好的塑性, 但此类钢目前尚未得到广泛应用。

随着对热镀锌和超深冲性能要求的增加, 开发了超低碳($< 0.01\%$)的无间隙原子钢(IF钢)。钢中的碳和氮由钛和铌来固定, 使钢中几乎不存在间隙固溶原子, 故称之为无间隙原子钢。IF钢的生产关键在于获得纯铁素体组织。

IF钢作为非镀层钢板, 由于其高 r 、 n 值, 可用于生产复杂形状的深冲件, 如车门板、翼子板等。IF钢具有低屈服点($\sigma_s = 100 \sim 150$ MPa)、低屈强比($\sigma_s/\sigma_b \leq 0.5$)、超深冲性能($r = 1.8 \sim 2.2$, $n = 0.23 \sim 0.28$)、良好的延展性能($\delta = 44 \sim 55\%$)和非时效性。由于IF钢在短时退火过程中所呈现的优良成型性, 因而它特别适合作为连续热浸镀锌的基板材料。

日本住友金属公司开发的一种含钛超低

碳IF钢，其抗拉强度达450MPa。通过调整化学成分（添加锰、磷和硅）和轧制工艺（卷取温度低于500℃）可得到极好的深冲性能。这种IF钢适合于连续退火和连续镀锌生产^[4]。新研制的IF钢性能如下：抗拉强度为455MPa，屈服强度为276MPa，延伸率为37.9%， $n=0.227$ ， $r=1.8$ 。其 n 、 r 值远远大于一般的超低碳钢（450MPa， $n=0.209$ ， $r=1.5$ ）和增磷钢（ $n=0.19$ ， $r=1.6$ ）。

3.3 涂镀层钢板

涂镀层钢板最大优点是具有优良的耐腐蚀性、成型性和涂漆性，以及良好的装饰性。目前世界上汽车应用最广泛的涂镀层板是电镀锌及其合金板、热浸镀锌及其合金板、高锌有机涂层板和复合有机涂层板等。

电镀锌板是汽车车身应用最多的钢板，

这是由于电镀锌对基体钢板的性能和表面影响最小。同时电镀锌还可用于单面镀，镀锌量易控制，镀层较薄，一般为 $2.5\sim 7.5\mu\text{m}$ （ $20\sim 50\text{g}/\text{m}^2$ ）。

为了降低镀锌板的成本，增加其应用范围，日本开发了薄合金镀层板，如Zn-Ni和Zn-Fe电镀锌板已广泛地用于汽车车身。当对成型性、耐腐蚀性和焊接性要求较高时，合金镀层板则显示出优越性，厚度只有镀锌层的 $\frac{1}{4}$ 和 $\frac{1}{2}$ ，耐腐蚀性是同厚度镀锌层的3~5倍。

双层金属镀和金属/有机复合镀层也在开发应用之中。

世界各国汽车生产厂对电镀锌板的需求汇于表3。在日本，发展趋势是逐渐用合金镀层板和有机镀层板取代镀锌板，在欧洲，

表3 汽车工业使用的电镀锌种类^[5]

地区	Zn	Zn-Ni	Zn-Fe	Zn-Fe+Fe-Zn	Zn+有机	Zn-Ni+有机
英国	✓	✓				✓
欧洲	✓	✓			✓	✓
美国	✓	✓	✓	✓	✓	✓
日本	✓	✓	✓	✓	✓	✓

倾向于采用Zn-Ni镀层板。

目前，电镀锌板已部分地被热浸镀锌和锌合金板所取代。热浸镀锌的质量和生产工艺均在不断地改进，特别是在镀层厚度、均匀性、表面质量和镀层冶金学方面（合金相、组成、形态）都有较大进步。例如将铅砷镀锌槽改成无铅无砷镀锌槽，镀层表面光滑，同时对生产和环境有利。

某些汽车厂需要薄和均匀的镀层板，目前已能够生产镀层厚 $4\mu\text{m}$ （ $30\text{g}/\text{m}^2$ ）的钢板，这主要是Zn-Al合金镀板。它的镀层附着性、成型性、阻热性和耐腐蚀性均有所改进。

Pb-Sn合金镀层板用于制造油箱。Pb-Sn热浸镀层具有极好的耐腐蚀性，热浸镀铝板用于制造汽车消声系统，其使用寿命和成本

介于碳钢和不锈钢之间。

3.4 复合减振钢板

钢/树脂/钢复合减振钢板由低成本的钢板和低重量树脂结合而成。目前，复合板已用于生产车身零件（挡泥板、隔板、底板和顶板等）和动力传动零件（油底盘、隔音板等），获得了显著的降低噪声的效果。同时复合板还用于降低车重，如车身、电池盘、太阳顶和阻隔板等零件。日本的马自达汽车厂与新日铁合作在Mazda 929型车上采用复合减振板生产挡泥隔板。夹层由热固聚合树脂和导电充填物（球状镍粒子）掺合而构成。夹层钢板为 0.45mm 厚、附锌量 $30\text{g}/\text{m}^2$ 的电镀锌-Ni合金板^[6]。热固树脂将振动能量转变为热能，从而达到减振降噪效果。树

脂与钢板的结合剪切应力可达11MPa,与其它使用热塑粘结剂的减振板不同,这种粘结强度在烤漆过程中不会降低。树脂中掺合20~25%的镍颗粒,在钢板之间起导电作用,保证复合板的点焊性能。与过去的档泥隔板相比,采用复合减振板制成零件后,可降低内部噪音5分贝,减轻重量18%。

4. 汽车用特殊钢

汽车发动机和传动系统的许多零件使用特殊钢。对汽车用特殊钢的要求包括两个方面:一是涉及零件设计和使用的性能,如强度、韧性、疲劳强度、耐磨性和耐热性;其次是与加工生产过程有关的加工性能,如塑性加工能力,机加工性能和热处理性能等。大多数特殊钢制品以棒材或盘条供应,并经过切削加工和冷热锻造。

4.1 弹簧钢

汽车中采用弹簧钢的零件很多,有叠板弹簧、悬挂弹簧、气门弹簧、离合器膜片弹簧和波形片弹簧等。零件不同,服役环境不同,因而对弹簧钢的要求也不同。减轻弹簧重量最有效的方法是提高弹簧的设计应力,而影响设计应力的两个最主要因素是抗疲劳性能和抗弹性减退能力。弹簧钢的发展分别表现在冶金技术、热处理工艺和化学成分等方面^[7]。

在炼钢方面,近年来广泛应用钢包精炼、真空脱气、连续铸造等技术,使钢中氧含量小于15ppm,减少影响疲劳性能的非金属夹杂物含量,改变夹杂物形态和粒度,提高弹簧的疲劳极限。

为了提高悬挂螺旋弹簧的弹减抗力,使用含硅更高的SUP7和SUP12,取代原用钢种SUP6,钢丝的强度极限达1764~1960MPa。为了进一步改善弹减抗力,在Si-Mn钢中添加铌钒或钼,通过微合金元素的析出强化和晶粒细化来改善弹减抗力^[8]。汽车螺旋悬挂弹簧目前逐渐由热成形改为冷成形。

汽车用气门弹簧钢丝有SWP-V、SWO-

V、SWOCV及SWOSC-V,随着发动机转速的增加及工作温度升高,耐疲劳和耐热性优良的SWOSC-V用量不断增加。

弹簧钢钢种的发展方向是开发设计应力为1176~1274MPa或更高的弹簧钢。另一个发展方向是降低碳含量、减小脱碳倾向,提高塑性成型性和抗弹减性。在新钢种开发中,除应重视耐疲劳性能、抗弹减性和淬透性外,还应重视耐腐蚀性,防止悬挂弹簧表面出现蚀坑,造成应力腐蚀疲劳破坏。

目前,国外弹簧钢号比较齐全,力学性能、淬透性和疲劳性能基本上满足生产和使用要求。除开发新钢种满足高性能指标外,正集中研究如何发挥现有弹簧钢的潜力,如改进生产工艺,采用新技术,调整成分等,从而进一步提高性能,扩大应用范围。

4.2 齿轮钢

近年来为了减轻车重和提高动力输出,高强度和小尺寸齿轮是一个重要发展方向,由此,开发了高镍、高钨等高强度齿轮钢。

渗碳齿轮钢的疲劳强度可分为两部分:即齿根强度(弯齿疲劳强度)和齿面强度(表面接触疲劳强度)。增加渗碳齿轮齿根强度的手段是阻止晶界氧化物层的形成。因此在选择钢种时,就必须采用在渗碳处理中能够降低晶界氧化的合金设计,并减小表面硬度损失。细化晶粒同样也是一个有效方法。在齿轮生产过程中,在表面引入适当的压应力是最有效的方法。

日本的汽车生产厂采用“双重喷丸法”来增大齿轮的压应力^[9]。渗碳齿轮首先经历大钢丸高密度喷丸,然后进行小钢丸低密度喷丸。齿轮疲劳寿命大幅度提高。日本爱知钢厂开发的DSG1齿轮钢(0.2%C、Si≤0.05%、0.07%Mn、P≤0.015%、0.015%S、1%Cr、0.4%Mo)即为一例。与SCH420钢(AISI4118)相比,其疲劳性能好,表面粗糙度和韧性降低的现象得到改善。

一般的SCM420齿轮钢易形成晶界氧化

物层,导致表面淬硬性不足。喷丸时,表面层较粗糙。这种粗糙的表面可作为疲劳裂纹的形核地点,降低了喷丸效果。因此日本目前各钢厂都竞相研制开发新型齿轮钢,降低易形成晶界氧化物的硅含量,用钼和钒来补偿硬度损失,添加钒还可细化晶粒。为了减少疲劳强度的各向异性,在钢中添加钙,形成钙铝复合化合物,并在MnS周边形成(Ca、Mn)S。这种控制MnS形态的方法可防止拉长的MnS和硬Al₂O₃的形成。钼的添加量最高可达0.8%。与SCM420相比,高钼高强度钢极少发生晶界氧化,同时晶粒细小,结果齿根弯曲疲劳强度和接触表面疲劳性能都有较大提高。

齿轮钢的另一个发展方向是开发节省合金元素(钼)的钢种。在钢中添加硼提高淬透性,如德国ZF公司的ZF6和ZF7齿轮钢,实际上是Mn-Cr系并加硼处理,具有晶粒细小、淬透性带窄、渗碳稳定性好、热处理变形稳定等特点,渗碳处理后弯冲值高^[9]。

为了确保齿轮钢的质量稳定,控制其淬透性十分重要,冶炼时化学成分的控制是保证窄淬透性带的关键。

4.3 非调质钢

自1972年德国蒂森钢公司率先将非调质钢49MnVS3用于汽车曲轴至今,非调质钢已经历了铁素体-珠光体、贝氏体和马氏体非调质钢三个阶段,并仍在不断地完善和发展。

目前,珠光体-铁素体型非调质钢由于其合金元素含量少且生产工艺简单已被广泛地用于生产曲轴、连杆、转向节臂、轴颈等汽车锻件。为了改善珠光体-铁素体型非调质钢的韧性,新日铁开发了晶内铁素体形成技术。将出钢前氧含量控制在30~40ppm的水平,酸溶铝在0.005~0.03%范围内,钢中形成的Al₂O₃、MnO和FeO复合氧化物有利于MnS析出。钢中的VN则以MnS为核心而析出,这些VN和铁素体晶格具有贝克-纳丁(Beker-Nutting)取向关系,在VN上铁素

体形成表面能较低,因此,铁素体易在这些颗粒上形核。采用晶内铁素体技术可得到细晶粒的珠光体-铁素体组织,在保持高强度的情况下,提高非调质钢的韧性^[10,11]。晶内铁素体的组织比加钛的组织更细小,其韧性甚至超过一般淬火回火钢。经改进韧性后的非调质钢可用于生产汽车转向和悬挂系统的保安件。

珠光体-铁素体型非调质钢的强度水平在600~900MPa范围内。为了进一步提高强度和韧性,开发了空冷贝氏体型非调质钢。日本三菱钢公司开发了0.25C-1.5Mn-0.35-Cr-0.15V的贝氏体钢,其强度达到900MPa,用于锻造前轴梁。与珠光体-铁素体型非调质钢相比,强度高,低温韧性好。美国内陆钢公司开发的0.38C-0.3Si-1.5Mn-0.2Mo-0.15V的贝氏体钢,其棒材直径最大可达64mm,韧性极好。表4列出了一些厂家开发的贝氏体型非调质钢的化学成分和力学性能。

马氏体型非调质钢包括热加工后直接淬火再回火和直接淬火自回火两种类型。前者一般采用原用的淬火回火钢,添加适量微合金元素改善韧性。与传统淬火回火钢相比,强度和韧性相当(表5)。这种钢可用于生产螺旋弹簧、转向球、前轴梁和其它转向和悬挂零件。直接淬火的合金元素含量少,但应严格控制加工过程。

近年来,开发了低碳自回火马氏体非调质钢,这种钢具有极好的强韧性配合。其韧性明显优于前两类非调质钢。美国、英国、日本和我国都在这方面做了大量的研究工作(见表5)。目前我国开发的自回火马氏体钢已用于生产汽车水泵轴。

自回火马氏体型非调质钢的性能取决于化学成分和加工工艺。控制冷却终止温度略低于马氏体转变起始点,可获得最大程度的自回火,此时钢的韧性较高。

4.4 不锈钢和耐热钢

早期的汽车排气装置使用的是碳钢,为

表4

一些厂家生产的贝氏体钢的成分和性能

生产厂	化学成分, wt%							力学性能				文献
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	σ_s MPa	σ_b MPa	室温	夏比冲击值 J/mm ² -40℃	
日本三菱钢公司	0.26	—	1.67	0.34	0.18	—	0.18	725	945	54	47	(12)
内陆钢公司	0.37	0.30	1.51	—	—	0.20	0.17	617	864	20	16	(12)
	0.39	0.88	1.52	—	—	0.20	0.15	612	831	27	11	
Chaparral (1524MoV)	0.22	—	1.54	—	—	0.11	0.11	20			(13)	
	0.24	0.25	1.5	—	—	—	0.15	570	882	(-50℃)		(14)
	~0.32	~1.25	~2.3	—	—	—	—	~730	~1225	24~50		
匹兹堡大学 (CCR状态)	BHS-1 (0.1C-Mn-Mo-Nb)							965		95	(-18℃)	(16)
								~1100			43	

表5

马氏体型非调质钢的成分和性能

生产厂	化学成分, wt%				力学性能			文献	
	C	Si	Mn		$\sigma_{0.2}$ MPa	σ_b MPa	Ak J		
英国	41Cr4 (90kg载重车前轴架),			QT	685	890	35~40	(15)	
				DQT	685	875	45		
	615M36 (1kg轿车转向节),			QT	865	970	55(5mm U缺		
				DQT	855	1000	50 口试样)		
日本	S45C			QT	539	804	70 (U缺口)	(16,17)	
				DQT	539	843	60		
美国 Chaparral	0.09	0.44	1.5	Cu ≤ 0.30%, Ni ≤ 0.15%		856	1053	V缺口	(18)
	~0.17	~0.69	~2.0	Cr ≤ 0.20%, Mo ≤ 0.20%		~1116	~1400	(-30℃), 室温	
	添加V, Nb等元素						20~43	46~75	
英国	0.05	—	1.8	添加Ti-B或不加		770	995	Y缺口	(19,15)
	~0.08	—	~2.0			~855	~1150	57~95	
日本 神户钢厂	0.06	0.2	0.85	添加Ti-B-Al		HB 303~398		U缺口	(20)
	~0.15	~0.3	~1.70					53~185	
日本 新日铁	0.04	0.25	1.60	1.0%Cr		588	784	U缺口	(14)
	~0.13			添加Ti-B		~882	~1176	70($\sigma_b=1176$ MPa)	
中国 大连钢厂	0.18	0.33	1.67	0.08%V		765	995	U缺口	(21)
				添加Ti-B		~1110	~1340	63~140	
								(HB292~373)	

改善其耐腐蚀性和抗氧化性, 开始使用镀锌碳钢, 但即使提高镀锌层厚度仍不能避免机械

损坏和装置内部冷凝液的腐蚀。因此, 1961年美国福特公司率先采用MF-1 (AISI409)