

# 钢铁结构材料的高性能化

翁宇庆

(中国金属学会, 北京 100711)

**[摘要]** 叙述了以细化钢铁结构材料的晶粒尺寸为核心, 将现有钢材强度和寿命翻番的基本进展; 在保持塑性提高和价格下降的同时, 碳素结构钢板带材屈服强度从 235 MPa 已提高到 420~470 MPa, 塑性由最大 26% 提高到 29%~34%; 建筑螺纹钢由一级提高到三级, 碳-锰钢由二级提高到四级, 且抗地震性能好; 高强抗延迟断裂螺栓钢, 已达到世界最高的 13.9 级。

**[关键词]** 钢铁材料; 基础研究; 高性能化; 进展

**[中图分类号]** TG142 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)03-0048-06

## 1 钢铁结构材料高性能化的提出及发展

日本钢铁界及日本国家金属研究院 (NRIM) 经过 1995-1996 年两年的调研<sup>[1]</sup>, 在日本科技厅四大计划 (脑科学、信息技术、地球科学和超级钢) 的启动和支持下, 1997 年出台了超级钢研究工程 (STX-21) 项目。其目的是开发对社会和经济影响最大的新型结构材料, 减轻环境负担和通过将超级钢的强度和寿命提高 1 倍来降低超级钢的总成本。这项计划以 NRIM 为主建立结构材料前沿研究中心 (FRC), 从事基础研究开发工作已实现目标和取得突破。这是一个 10 年期的项目, 日本政府投资  $1\ 000 \times 10^8$  日元。与此同时通产省宣布了为期 5 年的 (1997-2002 年) 的“超级金属”计划。并以五大钢铁公司和工业技术院合作, 从事铁基材料显微组织控制技术的研究, 围绕着把晶粒尺寸控制在微米级的技术开展工作, 强调这是“最大限度开发钢铁材料的全新技术”, 每年支持约  $250 \times 10^8$  日元的经费。日本的举措, 被认为是对世界最重要的工程结构材料钢铁的再认识, 是“第二次铁器时代”来临的前期征兆, 即传统材料经过

努力可以高性能化, 可以使强度和寿命提高 1 倍, 到 2030 年, 钢铁材料的强度和寿命再提高 1 倍, 吹响了“向钢铁进军”的新号角。

1 年之后, 即 1998 年, 国际上有类似的 3 项新研究项目立即启动。1998 年 3 月, 在国际钢铁协会 (IISI) 主持下, 由欧洲和北美 35 家钢厂和汽车厂联合的“超轻钢车身”项目出笼 (ultra light steel body project, ULSAB), 它要求车身强度提高 80%, 车重减轻 25%, 车重可由平均 1 300 kg/辆降至 900 kg/辆, 达到百公里油耗可降 0.7 L/辆, 对轿车理想油耗比可从 13 km/L 提高到 34 km/L, 这项计划预计 2003 年底结束, 实际钢材面板屈服强度提高 1 倍 (为 35~60 kg 级)。另一项是韩国启动“21 世纪高性能结构钢发展”10 年项目, 由浦项钢铁公司总工程师负责并执行总协调。核心研究力量为浦项公司的研究开发总部, 政府产业资源部筹措部分资金, 各大学及相关研究院参加。第一期 5 年主要是实验室研究, 第二期 5 年建立原型钢中间生产厂并确立制造技术, 其核心仍是超细晶粒钢的获得, 并延伸到耐候影响, 耐海洋气氛影响<sup>[2]</sup>。

我国在 1997 年启动了国家攀登项目“新一代

微合金高强高韧钢的基础研究”。由于日、韩、欧美对先进钢铁结构材料的迅速启动和对超级钢（以达到  $1\ \mu\text{m}$  尺寸的铁素体晶粒尺寸为目的）的宣传，1998 年 10 月我国在“九七三”项目中批准了“新一代钢铁材料的重大基础研究”项目，并作为我国第一批“九七三”启动的项目之一。由于原攀登项目和新的“九七三”项目首席科学家为同一人（本文作者），故攀登项目停止工作，两项目合并，这是当年启动的第三项研究。

由超级钢思路发展形成“超细晶粒钢”得到美国等发达国家响应，2001 年欧共体以 CRM（比利时 Liege 的冶金研究中心），CSM（罗马的材料发展中心），BFI（德国钢铁制造者协会的研发机构）及 MEFOS（瑞典研发机构）为主的同一目的的项目也已启动。至此，全球性的先进钢铁结构材料研发工作蓬勃展开已成定局，又竞争又交流，又有基础研究又有开发研究的局面已经形成，并定于 2002 年 5 月在日本筑波召开世界第一次先进钢铁结构材料国际大会，由日本金属研究院院长任主席，中国该项目首席科学家及韩国代表（浦项 CTO）任副主席。相信经过 3~5 年的国际性工作，新类型的先进钢铁结构材料必将诞生。

## 2 新一代钢铁材料的基本特征

在日本提出超细晶粒钢（ $1\ \mu\text{m}$  为代表的铁素体晶粒尺寸）为特征的超级钢基础上，我国研究人员全面分析了钢铁材料的化学成分、组织结构、力学性能、工艺制造诸因素的关联耦合。提出以超细晶为核心，高纯净和高均匀性三特征为新一代钢铁材料的共性。这是先进钢铁结构材料应同时满足组织结构和工艺制造基础，是达到性能和寿命提高 1 倍目标必须满足的条件。

日本采用还原铁粉放入充氩的振动球磨机球磨后，在氢气氛中退火，抽真空压缩成形试验试样，利用不同热处理制度形成不同晶粒尺寸的等轴铁素体晶粒，其晶粒尺寸（ $d$ ）与屈服强度（ $\sigma$ ）关系如图 1 所示\*。

图 1 同时将 Hayashi 的  $\gamma$  系不锈钢数据放在一起。图 1 表明，在超细晶范围内铁基材料的屈服强度随晶粒尺寸的变化仍符合  $\sigma_s \propto d^{-1/2}$  的 Hall-petch 关系， $\sigma_s$  从 200 MPa 随晶粒从  $20\ \mu\text{m}$  细化到亚微米（ $0.26\ \mu\text{m}$  左右）后可达 1.4 GPa，增加可达 5 倍以上。我国研究人员利用宝钢生产的 X65 商业

管线钢板，经实验室细化晶粒后，屈服强度和晶粒尺寸关系在晶粒细化到  $1.07\ \mu\text{m}$  后仍满足 Hall-petch 关系，达到屈服强度翻番<sup>[4]</sup>（见图 2）。证明了采用晶粒超细化（从传统的  $20\sim 30\ \mu\text{m}$  的细晶粒细化到  $1\sim 5\ \mu\text{m}$  的超细晶粒）就可能使强度翻番目标得以实现。问题是如何采用工业界认可的技术，经济界认可的成本概念得到大规模工业用钢的超细晶粒化方法。

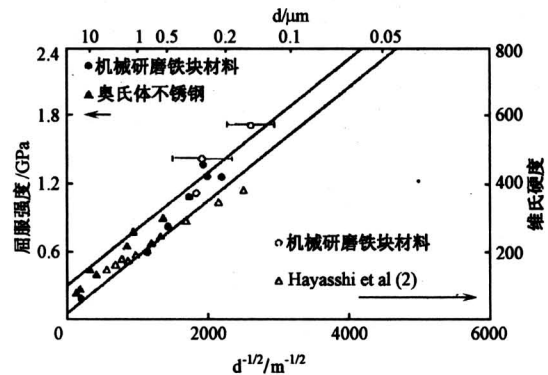


图 1 铁的晶粒尺寸与屈服强度关系

Fig.1 Variation of yielding strength with grain size of Fe material

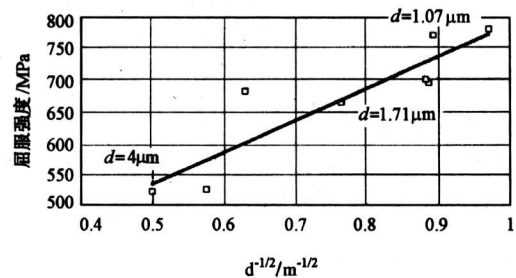


图 2 X65 铁的晶粒尺寸（ $d$ ）- 屈服强度关系

Fig.2 Relationship between yielding strength and grain sizes of Fe material

关于洁净度和均匀性问题，这是我国研究人员提出在制造工艺中必须面对和重视的重要点，可参阅文献 [3, 4]。

## 3 获得超细晶化的物理冶金基础

经过近 3 年的工作，在钢铁结构材料中获得有工业应用前景的，实验室或工业试制中显现出超细

\* 高木节雄. 日本高强高韧钢最近进展（内部资料），1998

净化的技术路线概述如下：

(1) 形变诱导铁素体相变 (DIFT)。这是我国“九七三”项目系统研究，有独创知识产权和原创性技术，在碳素钢和低、微合金钢中有广泛应用前景。

韩国开发应变诱导动态相变 (SIDT)，在原理上和 DIFT 类似，但轧制温度更低以达到相变驱动力更大。这和我国“973”项目中北京科技大学的形变强化铁素体相变路线有更多相近之处。

(2) 应变诱导 M (C, N) 析出和中温相变控制的复合作用。这被认为“薄板坯连铸连轧”和“中厚板微合金高强板”获得超细晶的新技术路线。我国珠江钢铁公司 CSP 流程近期已初步试制、生产出汽车用热轧大梁用钢，将传统屈服强度  $\sigma_s = 195$  MPa 级 (08 钢级) 提高到 Q330 级 ( $\sigma_s = 330$  MPa)，取代原来 16 Mn Q335 级钢材应用。中厚板已在实验室开发出  $\sigma_s = 800$  MPa 级原型用钢。

(3) 抗延迟断裂性能好的 ( $\sigma_s = 1\ 500$  MPa) 超高强度合金结构钢。这是中、日、韩三国的共同目标，若开发成功将打破当今世界合金结构钢不能应用在  $\sigma_s > 1\ 200$  MPa 的禁令。从技术路线讲，有三种不同方法，即：

带残余奥氏体的双相组织 ( $B + A_{残}$ ,  $F + A_{残}$ ,  $M + A_{残}$ ) 用钢；合金钢采用微合金化原理增强增韧；晶界氮化物强化，而不是碳化物强化的合金结构钢。

从这三类细化晶粒方法看，是近 20 年控轧控冷 (TMCP) 理论和微合金化理论的新发展，是 90 年代“临界轧制”思路的具体化发展。迄今为止，只有中国把基础研究—工艺过程控制—工业试制和使用考核联系在一起，开始把实验室研究和产品开发相结合，因而受到国际同行的关注 (可参阅文献 [5])。

### 4 形变诱导铁素体相变 (DIFT)

#### 原理

通常钢材的热轧过程都发生在高温奥氏体 ( $\gamma$ ) 区进行，传统称为奥氏体轧制 (见图 3-a)。为了获得低温铁素体 ( $\alpha$ ) 的稳定组织，轧后必须首先满足  $\gamma \rightarrow \alpha$  的热力学条件，如图 3-b，在传统结构钢中穿过  $\gamma \rightarrow \gamma + \alpha$  的  $A_3$  线区，即首先有它的热力学平衡公切线。传统热轧时由变形引起的畸变能在轧间、轧后甚至慢速轧制时由于动态回复、再

结晶等过程而释放。如果人为保持设定条件，将热轧变形产生的畸变能储存，并转化为相变驱动力的一部分，这将带来自由能状态的变化 (见图 3-b)，它会使相图公切线变化，引起两相碳溶解度的变化 (也就引起组织状态的变化)。从自由能计算的变化可以证明这一想法，在  $\gamma \rightarrow \alpha$  相变时：

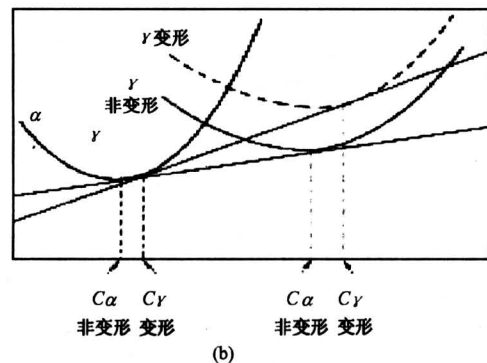
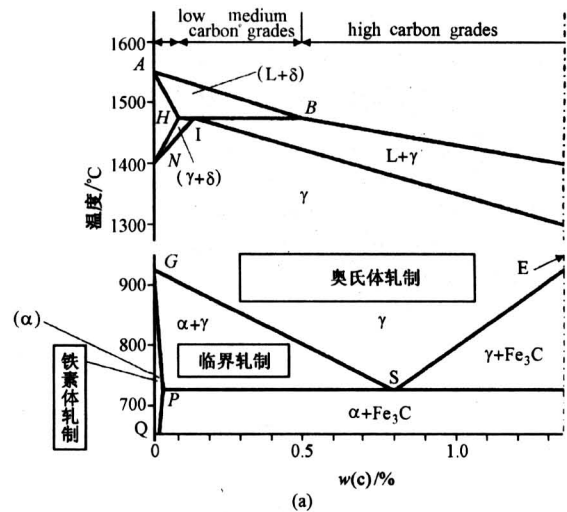


图 3 形变诱导铁素体相变原理图

Fig.3 Prototype of deformation induced ferrite transformation (DIFT)

$$\Delta G = - V(\Delta G_V - \Delta G_E) + \Delta G_S \quad (1)$$

式中  $\Delta G_V$ ——体积自由能变化；

$\Delta G_E$ ——弹性自由能变化；

$\Delta G_S$ ——表面自由能变化。

在有应变储存能存在时，(1) 式成为：

$$\Delta G = - V(\Delta G_V - \Delta G_E) + \Delta G_S + \Delta G_D \quad (2)$$

式中  $\Delta G_D$  是应变储存能变化，它与位错密度增加有关。

根据 (2) 式，Fe-C 平衡相图将改变为图 4 的动态相变，由平衡的  $A_3$  ( $\gamma \rightarrow \gamma + \alpha$ ) 线变成根据

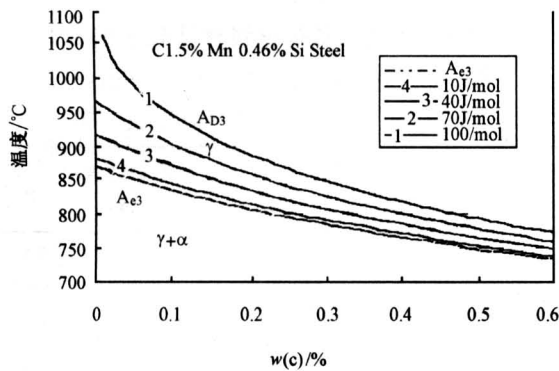
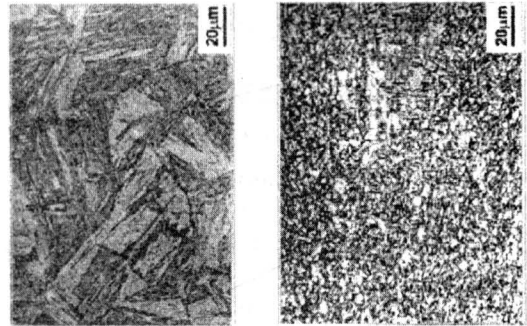


图 4 形变诱导铁素体相变中的应变存储能变化

Fig.4 Deformation stored energy change during DIFT process

应变储存能不同大小的  $A_{D3}$  线 (式中 10 J/mol 到 100 J/mol 为  $\Delta G_D$  的设定), 即  $A_3$  点在轧制时提高到  $A_{D3}$ 。从图 4 看出,  $A_{D3} \sim A_{e3}$  之间的区域 (在实际轧制时  $A_{D3} \sim A_{e3} \sim A_3$  整个区域) 形成非稳态区: 由稳定的  $\gamma$  态在有应变能储存式转变为  $\gamma + \alpha$  区, 即有非稳态  $\alpha$  相形成。根据计算和试验, 这个新生的  $\alpha$  相是超细、新生的铁素体相,

经过控制冷却成为我们目的性产物。这就是形变诱导铁素体相变的简单原理。图 5 是试验证明, 在非轧制态下奥氏体保温稳定后水淬形成马氏体组织 (左图); 而在相同温度制度下施以必要应变并诱导相变, 同样热制度下得到超细铁素体组织。Q235 钢实验室多道次热轧获得均匀等轴的超细组织见图 6。按照 Hall-petch 计算和力学测定, 强度接近翻倍。



300 steel 1423K-5K/s-1108K-WQ 300 steel 1423K-5K/s-1108K/60%-WQ

图 5 形变诱导铁素体相变的试验证明

Fig.5 Experimental confirmation for DIFT

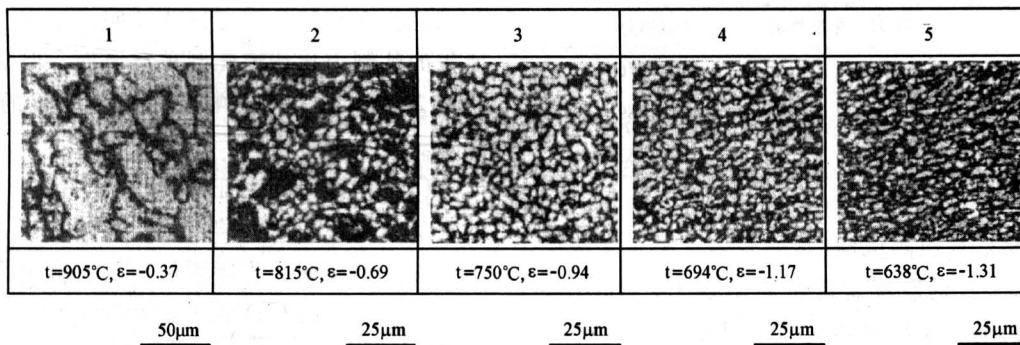


图 6 Q235 钢经多道次轧制后的晶粒尺寸变化

Fig.6 Grain size change during multi-passes rolling in Q235 steel

### 5 超细晶钢铁材料的试制试用

基于超细晶钢的理论研究和实验室试验成果, 现已逐步扩展到工业现场进行试制和用户的试用, 并仅就 2001 年的试制试用现况作一介绍。

#### 5.1 热轧板带轧机试制

在宝钢 2050 热轧板带轧机上进行了 3 次试轧试验后, 已经试生产了 800 t 以上的热轧薄板, 全部供第一汽车厂车载重货车发动机前置横梁, 产品力学性能和冷弯性能检验全部合格, 一汽工艺性能

100% 合格 (图 7)。至今已有  $3 \times 10^4$  多辆用试制材料的货车投入运行, 并将陆续投入  $2 \times 10^4$  辆以上试用考核, 正式设计定型后, 成为“超轻钢车身”工作的一部分。原设计试用低合金钢, 用新的超细晶碳素钢, 吨钢材成本下降 10% ~ 15%, 这还未含车身减重带来的效益。

#### 5.2 薄板坯连铸连轧机试制

目前我国珠江钢铁公司的国内第一条薄板坯连铸连轧生产线已能规模供应超细晶钢。该厂已将原  $\sigma_s = 195 \text{ MPa}$  的低碳钢经超细晶轧制后达  $\sigma_s = 330$

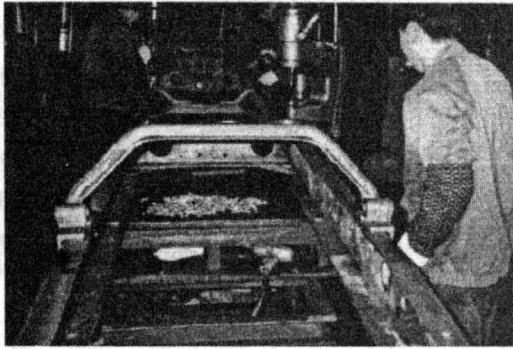


图7 超细晶碳素钢在一汽的运用

Fig.7 Application of ultra-fine grained steel in First Automobile Works

MPa, 将原  $\sigma_s = 235$  MPa 的普通碳素钢经超细晶轧制后达  $\sigma_s = 400$  MPa 级 (表 1), 现已生产 60 t 试验材供汽车厂试用。超细晶碳素集装箱板钢已成批供应市场。

表 1 超细晶轧制在薄板坯连铸连轧上的应用

Table 1 Application of ultra-fine grained rolling in thin-slab continuous rolling mill

	商业 Q195 钢	标准性能	试验钢材
$\sigma_s$ /MPa		195	323~376
$\sigma_b$ /MPa		315~390	430~489
$\delta_5$ /%		32	32~38

### 5.3 棒线材连轧机组试制

在首钢、唐钢原理验证试验基础上, 2001 年在淮钢 18 机架的棒线材连轧机上试生产了大规格 (直径大于 20 mm) 的螺纹钢。试制证明了由原 I 级螺纹钢可由超细晶生产达 III 级标准, II 级螺纹钢成分由超细晶生产达 IV 级螺纹钢性能, 提升了二个级别 (表 2)。

### 5.4 合金钢棒线材试制

由大连钢厂试制的 1 500 MPa 抗延迟断裂超细晶新钢种 AFD 钢, 已通过南京汽车公司的全部工艺和性能考核, 开始在依维柯汽车作外暴露件高强度螺栓, 做成当前世界最高强度级 (13.9 级) 的汽车螺栓; 跑车试验尚未结束, 虽未得到最终结果, 但已显示良好的运行状态。已完成 1 500 MPa 级 (14.9 级) 的钢厂及汽车厂的工艺考核, 准备装车试用。

采用形变诱导铁素体相变 (DIFT) 得到超细

晶的先进结构钢, 有以下一些特点:

表 2 超细晶轧制在棒线材连轧上的应用

Table 2 Application of ultra-fine grained rolling in continuous bar rolling mill

	$\sigma_s$ / MPa	$\sigma_b$ / MPa	$\delta_5$ /%	屈强比	均匀延伸率/ %	备注
商业 Q235	235	375~460	$\geq 26$			I 级螺纹钢
试验钢材	405	505	31	0.80		已达 III 级 螺纹钢
商业 HRB335	$\geq 335$	$\geq 490$	$\geq 16$	$\geq 0.80$	抗震要求 $\geq 9$	II 级螺纹钢
试验钢材	510~520	625~640	25~33	~0.81	14~16	已达 IV 级 螺纹钢

(1) 临界晶核尺寸小于其他相变的临界晶核尺寸。根据计算, 若  $\Delta G_D = 50$  J/mol, 则临界晶核尺寸  $r = 0.64 \mu\text{m}$ 。而相同条件下再结晶晶核尺寸接近  $1 \mu\text{m}$ 。因此超细晶达  $1 \mu\text{m}$  是可能的。

(2) 产生 DIFT 所允许的轧钢温度范围 ( $A_{d3} \sim A_{r3}$ ) 比较宽, 一般在  $100^\circ\text{C}$  左右温度区间, 尽管它与变形量、变形速率、轧间和轧后冷速有关, 但生产工艺不难控制, 因此现场易于推广。

(3) 在宝钢的现场试验证明, 采用 DIFT 轧之所需的轧制力比传统轧制稍有增加, 但最大负荷仅增加 20% 左右, 不影响现有板带轧机的设备负荷配置。

(4) 计算和试验证明, DIFT 是一个形核为主的相变过程, 形核率与  $\Delta G_D$  式指数成正比关系, 只有加大形核率, 才能细化产生的组织结构, 这就是强度和韧性同时提高的原因所在。

(5) 某些微合金元素的加入促进了 DIFT 相变, 少量 Nb 加入到 16 Mn 钢中证明, 单位体积诱导的铁素体体积百分数在应变达 0.6 以后可成倍或数倍增加。这与微合金碳化物促进铁素体形核有关。

综上所述, 以超细晶为核心的钢铁结构材料高性能化已从 20 世纪 90 年代末期开始在日、韩、中、欧洲和北美广泛开展研究, 预期 3~5 年内会出现一定的突破。

### 参考文献

- [1] Akira Sato. Research project on ultra-steel in Japan (STX-21)[C]. Asia Steel 2000, Beijing, vol (A): General, 192
- [2] Won-Pyo Lee. Development of high performance struc-



- tural steels for 21st century in Korea [C]. Proceedings of ultra-steel 2000, Tsukuba, Japan, 33-63
- [3] Weng Yuqing. New generation of iron and steel materials in China [C]. Proceedings of ultra-steel, Jan. 2000, Tsukuba, Japan
- [4] 翁宇庆. 国内外钢铁材料发展的新动向 [A]. 钢铁工业的前沿技术概述 [C]. 北京: 中国金属学会, 2001
- [6] Weng Yuqing. Physical metallurgy for ultra-fine grain Steels. HIPER-21. Sep. 2000, Pohang, Korea

## Advance in Structural Steel

Weng Yuqing

(Chinese Society for Metals, Beijing 100071, China)

[Abstract] Advance on "Ultra Steel", which is characterized by fine grained microstructure, is described in this paper. Progress has been made in this field in China. Yielding strength increases from 235 Mpa to 420~470 Mpa while elongation increases from 26% to 29%~34% for plain carbon steels. The high strength steel with anti-delayed fracture function has been developed and its pilot testing has been successfully finished in IVECO Auto Com. with 13.9 grade.

[Key words] iron and steel materials; basic research; performance improvement; advance

## 新兴交叉学科——电接触科学

电接触是一门研究电子可靠连接的科学。在电子或电力系统中,不仅元件之间,电路之间,设备之间乃至元件内部都需要可靠的电子连接。传统上,称这门科学叫电接触学。近年来,也有不少人称之为电子连接与内部连接系统的科学。

电子连接的类型有永久连接,如焊接、压接、缠接等;半永久连接,如各种插头插座、小开关、小继电器等;滑动连接,如电刷/导电环;电弧连接,如中大型继电器、断路器等。

在一个通信系统或电力传输系统中,存在大量的连接环节,任何一个连接处出现故障都会影响系统的可靠运行。如阿波罗登月飞船大约有  $100 \times 10^4$  个接点,为保证登月成功并按期返回地球,其所有接触点必须是完全可靠的。要使电接触可靠并非易事,它与其它电子元件不同,接触点大多暴露在大气中,大气污染如尘土、腐蚀性气体、湿度、温度都会直接影响连接可靠性。由于电子结构元件的小型化,连接器的尺寸亦随之减小,外界大气污染、温度影响和电磁干扰都会造成接触不可靠。近年研究表明,电接触故障是数字通信电路系统中高误码率的主要原因,实际上电接触发生故障相当于在电路系统中介入了一个多变的网络,从而造成误码,这种误码大多无法用电路方法消除。

由于接触表面有一定粗糙度,真正的接触点非常小(大多在微米范围内),一旦在该处介入尘土颗粒或腐蚀生成物,肉眼是无法观察和辨别的,只有借助于扫描电子显微镜、X射线能谱仪、X射线波谱仪、光学显微镜等。

机电元件(如连接器)的质量比较难鉴别的另一个因素是时延效应。与其它电子元件不同,其它电子元件如集成电路用仪器当场就能鉴别好坏,检验接触点质量却无法当场做到。比如,镀金质量,有的金表面微孔甚多,但要出现故障必须经过腐蚀后生成一定的腐蚀物后才能造成故障。故鉴别质量有一个时间的滞后效应。这也是造成人们优劣不分的原因。

由此可见,机电元件从设计上虽然仍保持一定的传统机械设计方法,但内容却极其复杂,它包括设计精确的应力范围,温度变化影响,防腐蚀,防尘土,绝缘,抗电磁干扰,微小型结构,高频分布参数影响等一系列问题。实际上电接触科学及其应用是一门交叉科学,涉及到机械,电子,材料,化学等多门学科。一位法国通信公司总裁在80年代末作过估算,他说在通信系统中,仅连接器,继电器,键盘这三种元件大约占整个通信成本的15%~20%。仅以连接器为例,1997年国际市场销售额约为240亿美元(不算中国)。

美国阿波罗登月飞船顾问 J. B. P. Williamson 博士曾说:“电接触科学是电子学的一部分。没有可靠的电子连接,就不可能发展先进电子学。”

电接触科学是随电子学的发展而发展的。它一直是 IEEE 学会中最活跃的分支学科之一。