

特约专栏

新型纳米强化超高强度钢的研究与进展

焦增宝, 刘锦川

(香港城市大学机械与生物医学工程系 先进结构材料研究中心, 香港 999077)

摘要: 随着资源、能源和环境压力日益加大, 超高强度钢的开发越来越受到世界各国的极大重视。传统的超高强度钢大都是依赖提高碳含量或合金元素含量而获得较高强度的马氏体或贝氏体钢, 此种钢存在着焊接性能差、塑韧性低、钢材尺寸受限制和成本昂贵等问题, 严重制约了经济的快速发展和现代国防的建设, 因此, 开发综合性能良好、成本低廉的新型超高强度钢刻不容缓。结合当前纳米科技的发展, 介绍了新型纳米强化超高强度钢的设计理念, 阐述了以纳米析出强化为主、多种强化方式结合的强韧化理论, 并总结了纳米析出强化超高强度钢在合金设计和工艺优化等方面的初步研究进展, 最后探讨了新型纳米强化超高强度钢亟待解决的问题。

关键词: 新型超高强度钢; 纳米析出强化; 合金设计; 工艺优化

中图分类号: TG135.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962 (2011)12-0006-06

Research and Development of Advanced Nano-Precipitate Strengthened Ultra-High Strength Steels

JIAO Zengbao, LIU Chain-Tsuan

(Center for Advanced Structural Materials, Department of Mechanical and Biomedical Engineering,
City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: In view of the limited material resources and energy supply available together with serious environment impact concerns at the present time, the development of ultra-high strength steels has attracted a great deal of attentions from various countries in the world. As we know, most traditional high strength steels have been developed based on martensitic and bainitic structures with high levels of carbon or high alloy additions. However, these alloys are facing many severe problems, including poor weldability, low ductility and toughness, fabrication-size limitation, as well as high production cost, all of these resulting in slowdown of the economic and national-defense developments in China. Thus, it is imperative for us to speed up the development of advanced ultra-high strength steels with excellent mechanical and metallurgical properties as well as the low manufacturing cost. In this paper, we present a comprehensive review of the recent development of high-strength ferritic steels hardened by precipitation of nano-scale precipitates. In this paper, we have evaluated all potential hardening mechanisms possibly applied to ferritic steels. Furthermore, the scientific and technical challenges facing this new class of high-strength and low-cost steels will be briefly discussed.

Key words: advanced ultra-high strength steel; nano-precipitate strengthening; alloy design; processing optimization

1 前言

目前, 资源、能源、环境压力日益加大, 环保和节能越来越受到钢铁工业的重视。开发具有节能、节材及优异性能的超高强度钢, 来满足经济建设中结构和功能的需要, 是实现钢铁工业可持续发展的重要途径^[1-2]。中国虽已是钢铁大国, 但远非钢铁强国, 在超高强度钢的质量、品种方面, 与国际先进水平有较大差距, 严重制约了石油、煤炭、化工、电力、交通等国民经济关键

行业的持续发展。特别是近年来, 国家大飞机、高铁和新能源等重大工程的实施, 又对超高强度钢的开发提出了更高的要求, 因此, 发展超高强度钢刻不容缓。

超高强度钢除了要求其高的抗拉强度外, 还要求具有一定塑性和韧性、尽可能小的缺口敏感性、高的疲劳强度、一定的抗蚀性、良好的工艺性能、符合资源情况及价格低廉等。超高强度钢现在已发展成为应用范围很广的一类重要钢种, 如已经大量应用于火箭发动机外壳、飞机起落架、防弹钢板等对性能有特殊要求的领域, 而且其使用范围正不断扩大到建筑、机械制造、车辆和其它军事装备上。因此, 超高强度钢不仅是钢铁材料研究的重要方向, 而且具有广阔的应用和发展前景。

传统超高强度合金钢按其物理冶金学特点大体可以

收稿日期: 2011-11-02

通信作者: 刘锦川, 男, 1937年生, 美国工程院院士, 中国工程院外籍院士

分为：① 低温回火马氏体组织或下贝氏体组织强化的低合金超高强度钢^[3]；② 高温回火析出合金碳化物、二次硬化组织的超高强度钢^[4]；③ 从低 C 马氏体基体析出金属间化合物进行强化的马氏体时效钢^[5]。这些传统超高强度钢在一定程度上达到了超高强度的要求，但是综合性能仍然存在着不可忽视的问题，难以满足当前经济发展和国防建设对其良好综合性能的要求。例如，低合金超高强度钢和二次硬化超高强度钢中较高 C 含量带来了焊接性能差、断裂韧性不高等问题；马氏体时效钢含有大量的合金化元素，特别是价格昂贵的 Co、Ni 等元素产生的成本问题，制约了马氏体时效钢的大规模应用；另外，马氏体或贝氏体转变需要较快的冷却速度，也限制了大型尺寸马氏体和贝氏体钢的生产。因此，面对经济和国防建设对更高强度级别要求的同时，又要有高韧性、良好焊接性能钢材的日益增长的需求，就必须突破传统的高 C、高合金超高强度钢的思维，开发新型超高强度钢。

近年来，随着纳米科技的发展，纳米材料在力学性能方面展现出高强度、高硬度和高韧性等独特的优势，引起了研究者的广泛关注^[6]。纳米科技的发展也为新型超高强度钢的设计开拓了新的途径，将纳米材料和纳米技术应用到钢铁材料设计中，利用纳米级析出相的沉淀强化和阻止晶粒长大技术，有望大幅度提高结构钢的强度和韧性^[7-9]。本文将从热力学和动力学角度分析新型纳米析出强化的原理，探讨多种纳米析出相复合强化在多元低合金钢中的应用。

2 新型超高强度钢的设计理念

新型超高强度钢的设计必须着眼于节约资源和保护环境，充分考虑钢材的制备工艺、加工性能和服役性能，在保证良好综合性能的前提下，最大限度的提高材料的强韧性。新型超高强度钢的设计，既要克服传统超高强度钢的缺点，又要充分发掘和有效的利用传统超高强度钢的优点，开发出新一代具有良好综合性能的新型超高强度钢。图 1 概述了新型超高强度钢的设计理念。

为了实现焊接性能、韧性的明显改善，必须合理控制新型超高强度钢中的 C 含量，消除高 C 含量和粗大碳化物析出对焊接性能和塑韧性的危害，并且在不破坏良好综合性能的前提下，有效的发挥微量 C 元素的积极强化作用。

为了节约资源、降低成本、提高回收效率，新型超高强度钢的设计应当减少甚至避免昂贵合金元素的使用，降低合金元素含量，发展低合金超高强度钢，并优化合金元素配比，充分利用其中各种微合金元素的强韧

化作用。

为了提高生产效率、促进大尺寸钢材的规模化生产，新型超高强度钢选用韧性良好、生产工艺简单的铁素体组织为基体，克服了马氏体钢的快冷要求对材料尺寸的限制。更重要的是，铁素体钢材可以利用连铸连轧技术生产，能够节约能源、简化工艺，因此，与超高强度钢常用的马氏体组织相比，有着极大的工艺和成本优势。

为了最大限度的提高低 C、低合金钢的强度，需要创新思维，充分吸收和利用现代纳米科学与技术，积极探索新型纳米复合强化，并结合传统强化方式，形成以纳米析出强化为主、多种强化方式结合的强韧化方法。

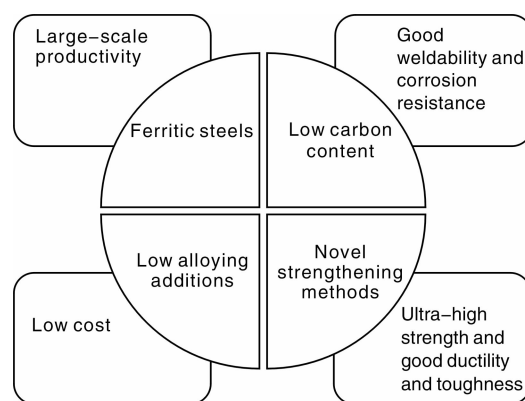


图 1 新型纳米强化超高强度钢的设计理念

Fig. 1 Design concept of the advanced nano-precipitate strengthened ultra-high strength steels

3 新型复合强化方式

纳米析出强化是金属材料最有前途的强韧化机制之一，也是新型超高强度钢最重要的强化机制。铁素体是 bcc 晶格结构，fcc 元素和 C 元素在铁素体中的固溶度非常低，随着温度的下降，这些元素的固溶量逐渐减小。因此，在合理的热处理条件下，fcc 元素和 C 元素能够在过饱和的铁素体基体上，以纳米析出相的形式均匀析出，这些纳米析出相包括纳米团簇、纳米金属间化合物和纳米碳化物。当滑移位错以 Orowan 机制绕过这些不可变形的纳米析出相时，由于位错弓出弯曲将增大位错的线张力，因而需要更大的外加应力才能使位错越过强化相颗粒而继续滑移，由此导致铁素体钢的强化^[10]。析出强化的强度增量 YS 与析出相的体积分数 f 和析出相尺寸 d 之间大致关系如下^[11]：

$$YS \propto f^{1/2} d^{-1} \cdot \ln d \quad (1)$$

即析出相强化的效果与析出相尺寸成反比，与析出相的体积分数的 1/2 次方成正比，因此，析出相的尺寸愈小、析出体积分数愈高，其强化效果愈好，这就需要采

取措施控制钢中析出相的析出和生长。一方面,从热力学角度优化设计合金成分,合理调整 fcc 元素、C 元素与其它合金元素的配比,创造纳米团簇、纳米金属间化合物和纳米碳化物同时析出的条件,最大程度的增加纳米析出相的体积分数,增加铁素体钢的强度,使低 C 低合金超高强度铁素体钢具有更强的竞争能力。另一方面,要获得细小的纳米团簇、纳米金属间化合物和纳米碳化物,关键是原位析出时控制这些纳米析出相的长大,而且要使全部固溶的合金元素均匀析出来,必须造就大量的形核位置,同时控制析出温度和析出时间,这是纳米强化超高强度钢的关键。

新型超高强度钢在利用纳米析出强化的同时,综合利用传统的强化机制:细晶强化、固溶强化和位错强化。根据 Hall-Petch 关系式^[12],通过细化晶粒尺寸,可以提高材料的强度;同时晶粒尺寸越小,塑性越好,韧性指数也越高,因此,细化晶粒也是新型超高强度钢设计中另一种非常重要的强韧化机制。而固溶在铁素体基体中的微合金元素能引起晶格畸变,畸变所产生的应力场与位错周围的弹性应力场交互作用,在位错周围形成固溶原子的偏聚,从而阻碍位错运动,也能提高铁素体钢的强度^[13]。另外,通过热处理与冷热形变增加晶体中的位错密度,利用位错的交互作用,也能阻碍位错运动,提高铁素体钢的强度。

因此,这种低 C 低合金钢是以纳米团簇、纳米金属间化合物和纳米碳化物的复合析出强化为主,同时综合利用传统的细晶强化、固溶强化和位错强化等强化机制的新型超高强度钢,从而获得强韧性匹配极佳的性能。多种强化机制复合利用、多种强化效果的叠加是其超高强度的保证,其中各种强化机制的效果可以用图 2 表示。

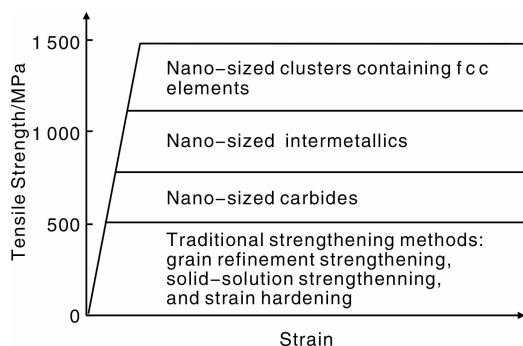


图 2 新型超高强度钢的各种强化效果

Fig. 2 Strengthening effects of various strengthening mechanism in advanced ultra-high strength steels

4 新型超高强度钢的研究进展

稳定的纳米团簇能有效的阻碍位错移动,从而提高

钢的强度。近期研究发现,纳米 Y-Ti-O 团簇能显著提高铁素体的室温和高温性能^[14-16],更进一步的探索利用传统铸造工艺制备 fcc 元素纳米团簇增强铁素体钢,通过成分与工艺的优化设计,开发出抗拉强度为 1 200 MPa 以上的超高强度钢^[17]。根据 fcc 元素在 bcc 结构铁素体中的平衡固溶度非常有限这一原理,对合金元素热力学和动力学进行了大量的理论和实验研究,在铁素体钢中优化添加不同含量的 fcc 元素,通过固溶、淬火得到了铁素体过饱和固溶体。通过合理控制时效温度和时效时间,有效的控制了 fcc 元素纳米团簇的析出与长大,得到了纳米团簇增强的铁素体钢。铁素体钢基体上析出的大量细小的纳米团簇有效的提高了铁素体钢的强度,抗拉强度由固溶态的 600 MPa 提高到时效后的 1 200 MPa,如图 3a 所示。随后,又对纳米团簇的结构进行了进一步研究,高分辨透射电镜分析表明,这些 fcc 元素纳米团簇直径约 2~3 nm,与铁素体基体共格存在。原子层析成像结果如图 3b 所示,这些纳米团簇主要由 fcc 元素 Cu, Ni, Mn 和 Al 组成^[18],这些高密度、小尺寸的 fcc 元素纳米团簇有效的阻碍了位错运动,显著的增强了铁素体钢的强度。S. Vaynman 等^[19]研究了

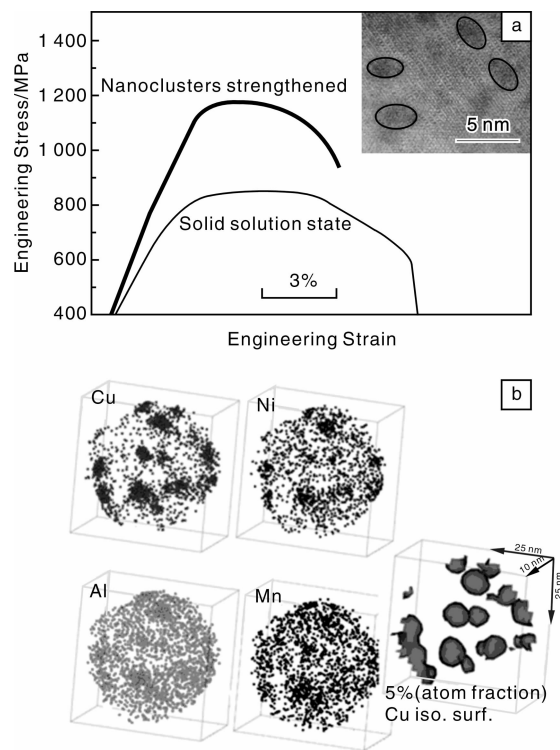


图 3 纳米团簇析出前后的应力-应变曲线(a), fcc 元素在纳米团簇中的分布(b)

Fig. 3 Engineering stress-strain curves for steels before and after nanocluster precipitation (a) and distribution of fcc elements in a nanocluster strengthened steel (b)

热处理工艺对纳米团簇强化超高强度力学性能的影响,不同的固溶处理和时效处理制度,对 fcc 元素纳米团簇的形态和分布有着显著的影响,进而影响纳米强化超高强度钢的强韧性,如图 4 所示。他们通过优化工艺参数,也得到了强韧性匹配较好的超高强度钢。

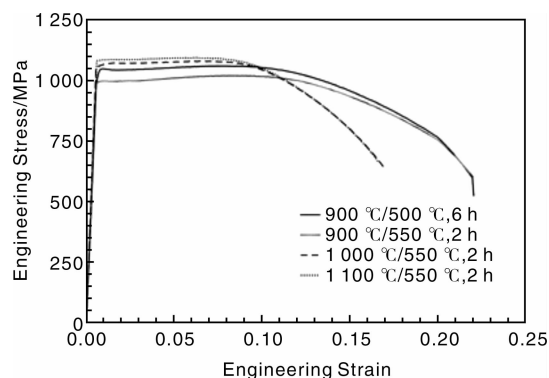


图 4 热处理制度对纳米团簇析出强化铁素体钢的影响

Fig. 4 Effects of heat treatment on the mechanical behaviors of the nanoclusters strengthened steels

纳米级金属间化合物具有较高的强度和硬度,是提高钢材强度的最有效方法之一^[20-22]。R. Schnitzer 等对纳米金属间化合物和纳米团簇复合强化超高强度钢进行了初步研究^[23-24]。他们首先通过调节合金成分,添加适量的金属间化合物形成元素,在适当的热处理工艺制度下,基体上析出了大量纳米级尺寸金属间化合物。为进一步提高材料的强度,他们探索了纳米金属间化合物和纳米团簇复合强化,即在纳米金属间化合物强化超高强度钢的基础上,添加适量的 fcc 元素,并且探索出了纳米金属间化合物和纳米团簇共存的热处理工艺,成功研制出纳米金属间化合物和纳米团簇复合强化超高强度钢。图 5 显示了纳米金属间化合物和纳米团簇复合强化超高强度钢原子探针层析成像分析结果,其中绿色球状析出相为纳米 B2-NiAl 相,蓝色细长析出相为纳米 η -Ni₃Ti 相,橙色球状析出相为 fcc 元素纳米团簇,这 3 种纳米析出相复合强化对超高强钢强度的提高起到了十分重要的作用。

纳米碳化物均匀析出是另一种显著提高钢材强度的有效方式。J. R. Yang 等探索了纳米 MC ($M = \text{Ti}, \text{V}, \text{Nb}, \text{Mo}$) 强化低碳铁素体钢的开发^[25-26]。图 6 所示为低碳铁素体钢经过不同温度处理后所显现的碳化物析出形貌,可以很清楚地观察到碳化物是以界面析出的方式在铁素体基体中析出。从奥氏体转变成为铁素体时,是依赖界面阶梯的移动而完成的,所以铁素体钢中的合金碳化物可以在这些阶梯移动的同时形核和长大,进而形成一排排纳米级碳化物,这些碳化物正是铁素体钢强化的

主要因素。而且,他们还发现复合的碳化物比单一的碳化物有更慢的粗化行为,这可能与扩散速率有关,因为当碳化物一旦形成后开始要进入粗化阶段时,需要从其邻近基体中吸取微合金元素来产生其长大反应,但对于复合型碳化物而言,需要从基体中同时提供两种以上的微合金元素进入碳化物中以提供碳化物成长,但是,扩散度的差异使得扩散速度不同的原子需要较长间的扩散,才可以达到其平衡位置而使碳化物成长,因此复合的碳化物有更好的热稳定性。

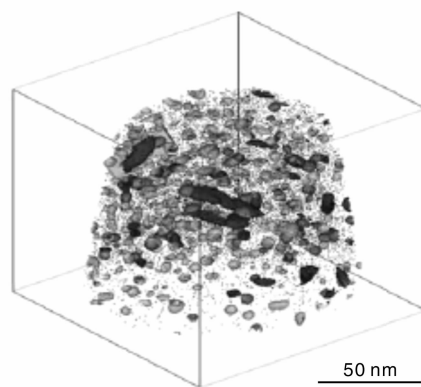


图 5 纳米金属间化合物和纳米团簇复合强化超高强度钢原子探针层析成像

Fig. 5 Atom probe tomographic image of element distribution in a nano-intermetallics and nanocluster strengthened steel

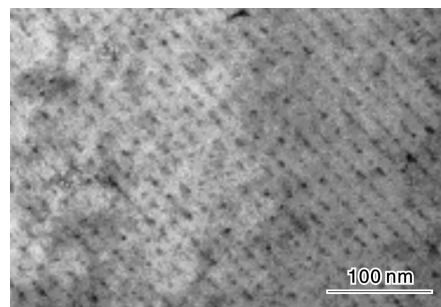


图 6 纳米碳化物的析出形貌

Fig. 6 Nano-carbide precipitation morphology in a ferrite steel

5 亟待解决的科学问题

根据纳米强化铁素体钢的特点和传统铁素体钢的研究经验,新型纳米强化超高强度钢需要特别关注以下几类关键性问题:

纳米析出相结构演化及其热稳定性 对于纳米强化超高强度钢,纳米相析出强化是其最重要的强化方式,而纳米析出相的结构对其强化效果有关键影响,因此,有效的控制纳米析出相的结构及其热稳定性非常重要。但是,目前对各种纳米析出相的结构演化及其热稳定性

的认识还不十分清楚,有待进一步深入研究。

纳米相的复合析出 各种纳米析出相的成核、长大及其热稳定性与合金元素的种类、含量和温度密切相关,而多种纳米相的复合析出则更为复杂,多种纳米析出相之间亦存在互相影响的可能性,因此,为了最大程度地发挥各种纳米析出相的强化作用,必须认真研究合金成分和热处理工艺参数对纳米相复合析出的影响。

防止超高强度钢的热脆性 一些合金元素在铁素体中溶解度极小,有时以低熔点单质或与铁形成低熔点的化合物的形式存在,而且这些单质或化合物与铁形成的共晶体熔点更低,这种低熔点的共晶体一般以离异共晶形式分布在晶界上。对钢进行热加工(锻造、轧制)时,晶界上的共晶体会熔化,导致热加工时钢的开裂,严重影响钢的力学性能与工程应用^[27]。只有认真研究合金成分与热处理参数对热脆性的影响,通过优化合金成分和热处理制度,并合理控制杂质含量、提高钢的纯净度等综合控制手段才能避免热脆性的发生。

防止超高强度钢的晶界氧脆 超高强度钢在高温空气中暴露或热加工时,如果表面不能形成致密、连续的氧化层保护膜,小原子的氧会通过晶界快速扩散,大量的氧在晶界上的富集则会引起晶界氧脆,对超高强度钢的性能影响很大^[28]。因此,必须认真研究合金成分与热处理参数对合金抗氧化性和高温性能的影响,通过合理的成分优化设计来提高铁素体钢晶界的抗氧化性和高温性能,并通过合理的热处理工艺最大程度的避免晶界氧脆的发生。

防止超高强度钢的时效脆性 铁素体钢在 375 ~ 750 °C 长期停留可能会出现 σ 相脆性,而且 P, Sn, Sb 和 As 等杂质元素会在晶界偏聚,导致晶界脆化, Mn, Ni, Cr 等合金元素与上述杂质元素在晶界发生共偏聚,进一步促进杂质元素的富集而加剧脆化;其次,将铁素体钢在 400 ~ 500 °C 长时间加热时,还会出现 475 °C 脆性^[29]。为了避免超高强度钢在时效时产生时效脆性,必须深入研究合金成分与热处理参数对时效脆性的影响,优化合金成分和热处理制度。

防止超高强度钢的氢脆 氢在 bcc 结构的铁素体中的扩散速度极大,因此,铁素体钢对氢脆的敏感性很大,而超高强度铁素体钢对氢脆的倾向性更大,因此为了防止和减少氢导致的脆性开裂,必须合理调控材料的成分和组织,增加氢陷阱的数量,降低陷阱中富集的氢含量,同时添加适量微合金化元素使其在材料表面形成沉淀膜或氧化膜,阻碍环境中氢的进入,避免氢脆对超高强度钢的不利影响^[30]。

防止超高强度钢的晶间腐蚀 含 Cr 碳化物的析出

会导致的晶界贫 Cr,引起晶间腐蚀,直接影响超高强度钢的工作寿命^[31]。因此,必须研究合金成分和热处理工艺对超高强度钢晶间腐蚀的影响,并通过合金成分的优化设计和热处理工艺的优化调整,防止这类钢的晶间腐蚀。

6 结 语

中国虽已成为世界钢铁大国,但远非钢铁强国,在超高强度钢的质量、品种方面与国际先进水平还有较大的差距,在一定程度上限制了现代化工业的建设与发展,并给国家资源、能源和环境造成过重的负担。因此,我国要从钢铁大国走向钢铁强国,必须提高钢铁品质,增强竞争力,实现由量变到质变的飞跃。开发综合性能良好、成本低廉的超高强度钢已经成为当前一个重要的研究方向,纳米科技的发展为新型超高强度钢的设计带来了新的生机,研究和设计新型纳米强化超高强度钢不仅具有重要科学意义,而且具有巨大的工程价值和社会效益。

为实现新型纳米强化超高强度钢的规模化工程应用,还需要广大研究者的共同努力,认真研究合金成分和工艺技术参数对新型超高强度钢显微组织和力学性能的影响,深刻理解纳米相结构演化及其热稳定性的机理,理清多种纳米相复合析出的规律,并注重消除新型超高强度钢可能存在的热脆性、氢脆、晶界氧脆、时效脆性,防止晶间腐蚀,建立最佳的合金成分和最佳的工艺技术参数,为实现新型纳米强化超高强度铁素体钢的工业应用奠定良好的基础。

参考文献 References

- [1] Xu Zuyao(徐祖耀). 自主创新发展超高强度钢[J]. *Shanghai Metals*(上海金属), 2009, 31(2): 1-6.
- [2] Gan Yong(干勇), Dong Han(董瀚). 先进钢铁材料技术的进展[J]. *China Metallurgy*(中国冶金), 2004(8): 1-6.
- [3] Bhadeshia H K D H. Large Chunks of Very Strong Steel [J]. *Materials Science and Technology*, 2005, 21: 1 293-1 302.
- [4] Ayer R, Machmeier P M. Microstructural Basis for the Effect of Chromium on the Strength and Toughness of AF1410-Based High Performance Steels[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1996, 27: 2 510-2 518.
- [5] DeGarmo E P, Black J T, Kohser R A. *Material and Processes in Manufacturing* [M]. New York: Wiley Press, 2003.
- [6] Lu K, Lu L, Suresh S. Strengthening Materials by Engineering Coherent Internal Boundaries at the Nanoscale [J]. *Science*, 2009, 324(17): 349-352.
- [7] Fine M E, Liu J Z, Asta M D. An Unsolved Mystery: the Composition of bcc Cu Alloy Precipitates in bcc Fe and Steels [J].

- Materials Science and Engineering: A*, 2007, 463: 271–274.
- [8] Isheim D, Gagliano S, Fine M F, *et al.* Interfacial Segregation at Cu-Rich Precipitates in a High-Strength Low-Carbon Steel Studied on a Sub-Nanometer Scale[J]. *Acta Materialia*, 2006, 54: 841–849.
- [9] Mulholland M D, Seidman D N. Nanoscale Co-Precipitation and Mechanical Properties of a High-Strength Low-Carbon Steel[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59: 1 881–1 897.
- [10] Orowan E. *Symposium on Internal Stresses in Metals and Alloys* [M]. London: Institute of Metals, 1948.
- [11] Yong Qilong(雍岐龙). *The Second Phase in Iron and Steel*(钢铁材料中的第二相)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.
- [12] Takaki S. Review on the Hall-Petch Relation in Ferritic Steel[J]. *Materials Science Forum*, 2010, 654: 11–16.
- [13] Callister W D. *Material Science and Engineering: an Introduction* [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2007.
- [14] Xu J, Liu C T, Miller M K, *et al.* Nanocluster-Associated Vacancies in Nanocluster-Strengthened Ferritic Steel as Seen via Positron-Lifetime Spectroscopy[J]. *Physical Review B*, 2009, 79: 020 204.
- [15] Alinger M J, Odette G R, Hoelzer D T. On the Role of Alloy Composition and Processing Parameters in Nanocluster Formation and Dispersion Strengthening in Nanostuctured Ferritic Alloys[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57: 392–406.
- [16] Schneibel J H, Liu C T, Miller M K, *et al.* Ultrafine-Grained Nanocluster-Strengthened Alloys with Unusually High Creep Strength[J]. *Scripta Materialia*, 2009, 61: 793–796.
- [17] Zhang Z W, Liu C T, Guo S, *et al.* Boron Effects on the Ductility of a Nano-Cluster-Strengthened Ferritic Steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(3): 855–859.
- [18] Zhang Z W, Liu C T, Wang X L, *et al.* Received in Press.
- [19] Vaynman S, Isheim D, Kolli R P, *et al.* High-Strength Low-Carbon Ferritic Steel Containing Cu-Fe-Ni-Al-Mn Precipitates[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2008, 39: 363–373.
- [20] Liu C T, Stiegler J O. Ductile Ordered Intermetallic Alloys[J]. *Science*, 1984, 226: 636–642.
- [21] Liu C T. Recent Advances in Ordered Intermetallics[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 1995, 42: 77–86.
- [22] Teng Z K, Liu C T, Ghosh G, *et al.* Effects of Al on the Microstructure and Ductility of NiAl-Strengthened Ferritic Steels at Room Temperature[J]. *Intermetallics*, 2010, 18: 1 437–1 441.
- [23] Schnitzer R, Schober M, Zinner S, *et al.* Effect of Cu on the Evolution of Precipitation in an Fe-Cr-Ni-Al-Ti Maraging Steel[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58: 3 733–3 741.
- [24] Schobera M, Schnitzer R, Leitner H. Precipitation Evolution in the Ti-Free and Ti-Containing Stainless Maraging Steel[J]. *Ultramicroscopy*, 2009, 109: 553–562.
- [25] Yen H W, Huang C Y, Yang J R. The Nano Carbide Control: Design of Super Ferrite in Steels[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 89–91: 663–668.
- [26] Chen C Y, Yen H W, Kao F H, *et al.* Precipitation Hardening of Nanometer-Sized Carbides in High-Strength Low-Alloy Steels[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 499: 162–166.
- [27] Garza L G, Van Tyne C J. Surface Hot-Shortness of 1045 Forging Steel with Residual Copper[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 159: 169–180.
- [28] Takeyama M, Liu C T. Elevated-Temperature Environmental Embrittlement and Alloy Design of L12 Ordered Intermetallics[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1992, 153: 538–547.
- [29] Haoquan W, Spear W S, Polonis D H. Influence of Annealing and Aging Treatments on the Embrittlement of Type 446 Ferritic Stainless Steel[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1987, 9: 51–61.
- [30] Raymond L. *Hydrogen Embrittlement: Prevention and Control* [M]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials International, 1988.
- [31] Bond A P, Lizlovs E A. Intergranular Corrosion of Ferritic Stainless Steels[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1969, 116: 1 305–1 311.

中国科学院化学部 2011 年新增院士名单

姓 名	研究方向	工作单位	姓 名	研究方向	工作单位
田 禾	精细化工	华东理工大学	李亚栋	无机化学	清华大学
刘忠范	物理化学	北京大学	杨学明	物理化学	中国科学院大连化学物理研究所
严纯华	无机化学	北京大学	赵进才	环境化学	中国科学院化学研究所
张俐娜	天然高分子与高分子物理	武汉大学			

(本刊通讯员)