

文章编号: 1004-0609(2004)S1-0207-04

400~ 500 MPa 级碳素钢先进工业化制造技术^①

刘相华, 陆匠心, 张丕君, 杜林秀, 王国栋

(东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110004)

摘 要: 利用洁净普碳钢的化学成分, 通过控制轧制与轧后冷却工艺制度, 可以得到内部组织均匀、细小的新一代钢材——超级钢。其成本低廉、性能优异, 将成为普碳钢的换代产品。按照超级钢开发的思路, 已经把与 Q235 成分相同的普碳钢的屈服强度提高到 400~ 500 MPa, 产品应用于汽车、建筑等行业, 取得了用户降低成本、生产厂多获效益的“双赢”效果。介绍了目前国内外超级钢研制、生产和应用的现状, 探讨了超级钢生产中遇到的几个技术问题。

关键词: 超级钢; 晶粒细化; 屈服强度; 换代产品

Advanced manufacturing technology of 400~ 500 MPa carbon steel

LIU Xiang-hua, LU Jiang-xin, ZHANG Pi-jun, DU Lin-xiu, WANG Guo-dong

(State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: Using the same chemical compositions as those of the cleanly plain carbon steel, by means of optimizing the parameters in rolling and cooling, the super steel which has fine grain size was produced. It will become the new generation steel product because of its advantages of low cost and good properties. Following this idea, the super steel with yielding strength of 400~ 500 MPa has been put into mass production, and the strip coils have been used to press as the auto beams. The research and development, production and application in industry of super steel in China and outside were described. Some problems in the production of super steel were discussed.

Key words: super steel; fine grain size; yield strength; new product

面对近年来铝和镁等金属材料、塑料和陶瓷等非金属材料以及复合材料对钢铁材料提出的挑战, 需要不断地改进钢材质量、降低成本、增强钢铁材料的竞争能力。在这种背景下出现了新一代钢铁材料——超级钢。开发超级钢的基本思路是: 通过高洁净、均匀化、超细晶来大幅度提高钢材的性能。例如, 对低碳钢 Q195~ Q235, 在不添加合金元素的前提下, 把屈服强度从 200 MPa 级提高到 400~ 500 MPa 级, 它意味着减轻结构质量、降低成本和提高效益。超级钢开发成功, 将会促成钢铁生产领域里产品的更新换代。围绕超级钢的开发, 一场新的国际竞争已经开始, 见表 1。

表 1 主要产钢国家的超级钢开发计划

年份	国家	项目名称
1997	日本	超级钢基础研究
1997	日本	超级金属计划
1998	韩国	21 世纪高性能结构钢
1998	中国	新一代钢铁材料的重大基础研究
2001	中国	500 MPa 碳素钢先进工业化制造技术
2001	欧盟	超细晶粒钢
2002	日本	环境友好型超细晶粒钢的基础研究

1 超级钢的开发研究

1.1 关于晶粒细化的研究

要在保证塑性和韧性前提下, 大幅度提高普碳

① 基金项目: 国家“八六三”计划资助项目(2001AA33220, 2003AA33G010); 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000067208-4)

作者简介: 刘相华(1953-), 男, 教授, 博士生导师。

通讯作者: 刘相华, 教授, 博士生导师; 电话: 013804021121; E-mail: Liuxh@mail.neu.edu.cn

钢的强度指标, 需要合理选择强韧化机制。细晶是目前所知的既能提高强度, 又能改善韧性的主要方法。Hall-Petch 公式给出了屈服强度与晶粒尺寸间的定量关系:

$$\sigma_s = \sigma_0 + k \cdot d^{1/2} \quad (1)$$

式中 d 为晶粒的平均直径, σ_0 为其它强化方式作用项; k 为钢种常数。

在晶粒尺寸超细化时, Hall-Petch 公式的适用性是一个尚待深入研究的问题。Niihara^[1] 等认为晶粒尺寸在 $1 \mu\text{m}$ 以上时钢的屈服强度和抗拉强度与晶粒直径符合 Hall-Petch 关系, 而 Morris^[2] 和 Takaki^[3] 认为晶粒尺寸在 $0.2 \mu\text{m}$ 以上时钢的屈服强度与晶粒直径之间仍存在 Hall-Petch 关系。目前的研究结果至少可以说明: 晶粒尺寸在微米级以上时 Hall-Petch 公式仍然适用。

为了最大限度地利用晶粒细化机制来提高强度, 很多学者致力于探讨目前条件下所能够得到的晶粒细化极限。利用等径角挤压 (ECAE, Equal Channel Angular Extrusion) 和累积叠轧 (ARB, Accumulative Roll Bonding) 可以在实验室条件下得到晶粒尺寸达 $1 \mu\text{m}$ 左右的样品, 但拉伸实验发现: 晶粒尺寸 $< 1 \mu\text{m}$ 时, 晶粒越细, 屈服强度越高, 塑性越差^[4], 如图 1 所示。

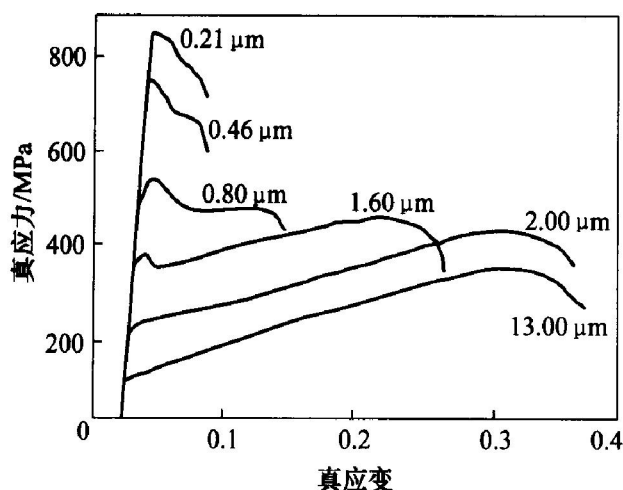


图 1 不同晶粒尺寸试样的拉伸曲线^[4]

得到晶粒尺寸 $< 1 \mu\text{m}$ 的样品是超级钢基础研究的一大进展, 目前看来它有 2 个缺陷: 1) 强度高、塑性差, 应用领域受到限制; 2) 利用目前的钢铁生产流程难以得到。

在大量实验研究和理论分析的基础上, 考虑到现有轧制设备上能够实现, 我们提出晶粒尺寸适度细化的概念, 把目标晶粒尺寸定位在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$, 工业实验和工业生产的数据表明, 这种钢材强度得到

提高, 塑性良好。

1.2 形变诱导相变的研究

钢材在热轧过程中要经历加工硬化、回复、再结晶、相变等物理冶金过程, 它们都会对晶粒尺寸产生影响。近年的研究工作非常重视在变形过程中材料组织和性能的变化, 先后提出了应变诱导铁素体相变 (SIFT, Strain Induced Ferrite Transformation, Priestner^[5] 1982, Yada^[6] 1984), 应变强化铁素体相变 (SEFT, Strain Enhanced Ferrite Transformation, Tamura^[7] 1988), 形变强化铁素体相变 (DEFT, Deformation Enhanced Ferrite Transformation, SUN^[8] 2000), 形变诱导铁素体相变 (DIFT, Deformation Induced Ferrite Transformation, Han^[9] 2000), 应变诱导动态相变 (SIDT, Strain Induced Dynamic Transformation, Choo^[10]) 等理论, 来解释轧制变形中的晶粒细化现象。Du 等^[11] 通过测定试件横断面上冷却速度与组织观察相结合的方法, 确定了形变诱导相变的上限温度, 为辨认形变诱导铁素体的形貌和数量提供了一种可行的方法。

2 超级钢生产

2.1 指导超级钢生产的工艺原则

在对晶粒细化机理和形变诱导相变现象进行深入研究的基础上, 经过热模拟实验和实验室热轧实验的验证, 得到轧制超级钢的工艺控制原则如下:

1) 降低轧制温度, 在接近 Ar_3 点终轧, 利用形变诱导相变获得形变诱导铁素体, 使尚未发生转变的部分奥氏体处于未再结晶状态, 促进随后铁素体相变的发生。

2) 增加终轧压下量, 利用大变形产生的晶格畸变、位错累积和变形带来的奥氏体/铁素体相变的形核部位的增加, 细化铁素体晶粒; 在变形温度较低时, 增加终轧压下量还可以使铁素体发生动态再结晶, 从而细化铁素体晶粒。

3) 终轧后短时间内快速冷却, 抑制晶粒长大, 保留变形组织。

4) 降低终冷温度, 为控制中温区的贝氏体转变创造条件。

将细晶强化和相变强化相结合, 是大幅度提高钢材性能的有效措施。

2.2 400 MPa 超级钢的生产

按照上述思路和工艺原则, 近期在宝钢 2050 机组进行 400 MPa 超级钢板卷试生产和工业批量

生产^[12], 累计产量达 5000 多吨。用与 Q235 相同成分钢生产出平均晶粒尺寸为 3.5 μm、性能优异的超级钢(表 2)。

表 2 400 MPa 级超级钢力学性能

实验 ^①	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	宽冷弯
				($D=0.5a$, $B=35\text{ mm}$)
1	≥ 400	≥ 500	≥ 28	完好
2	≥ 420	≥ 520	≥ 28	完好
3	≥ 420	≥ 530	≥ 27	完好
4	≥ 420	≥ 520	≥ 28	完好

① 实验 1, 2, 3 分别为 3 次工业实验的实测结果; 4 为批量生产实测的结果

2.3 500 MPa 超级钢的生产

生产 500 MPa 级超级钢需要采用复合强化机理, 即一方面要得到细晶粒, 另一方面希望得到一定量的贝氏体, 起相变强化作用, 因此需要对轧后冷却过程的中温转变进行更为精细的控制。用本钢 1700 轧机生产的 500MPa 超级钢的性能数据和金相照片分别如表 3 和图 2 所示。

表 3 500 MPa 级超级钢力学性能

厚度/mm	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	冷弯
4.48	522	623	29	完好
5.30	543	651	25	完好

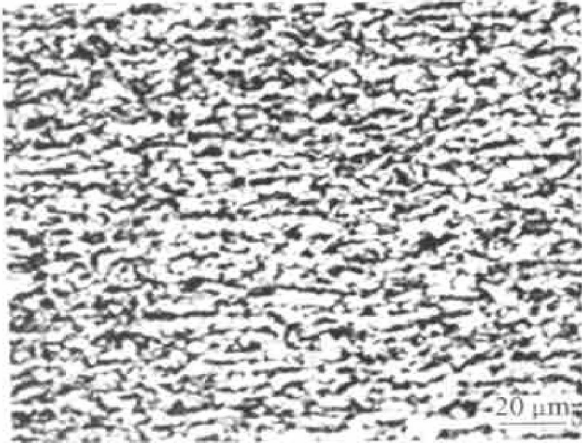


图 2 500 MPa 超级钢的金相组织

3 超级钢的应用

3.1 超级钢在汽车制造业中的应用

汽车生产厂急需新材料, 以减轻车自身质量, 减少油耗。在这种背景下, 超级钢首先在汽车制造业中找到了市场。宝钢生产的 400 MPa 级超级钢, 用于一汽集团作卡车底盘发动机前置横梁(图 3), 收到了良好的效果, 各项指标均满足要求。过去该零件用微合金钢制作, 现在用不含合金元素的

超级钢替代, 每吨钢可以节省 200~ 300 元。目前已经实现千吨级批量供货。

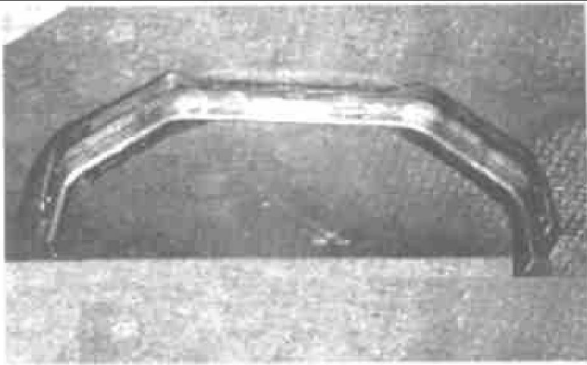


图 3 用超级钢制作的卡车横梁

500 MPa 级超级钢用于卡车纵梁(图 4)。纵梁是卡车的关键承重部件, 用量大, 经济效益会更加明显。普碳钢品种的升级换代将带动汽车行业的技术进步, 汽车设计师在新车型设计时, 选择材料会有更大的发挥空间, 通过减少钢板厚度、减轻结构件尺寸及质量, 从而减轻车身自身质量, 降低油耗, 改进车辆的性能。目前本钢生产的 500 MPa 级超级钢已经为金州车架厂供货, 取得了钢材生产厂和用户“双赢”的效果。

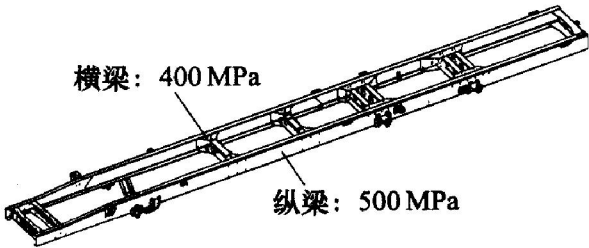


图 4 卡车底盘的纵梁与横梁

3.2 超级钢在建筑行业中的应用

建筑行业是普碳钢应用最为广泛的领域, 建筑型钢和钢筋量大面广, 应用超级钢替代传统的 II 级钢筋具有良好的前景。据介绍, 国外钢筋强度等级为 300 MPa、400 MPa 和 500 MPa 级, 其中 400 MPa 级已经成为主导受力钢筋, 500 MPa 级已开始应用。为扭转我国混凝土用钢水平落后的局面, 新修订的混凝土结构设计规范将屈服强度为 400 MPa 的 II 级钢筋作为主导受力钢筋, 其设计强度为 360 MPa, 强度价格比优于 II 级钢筋 15% 以上。这一变化应引起钢筋生产厂家的充分注意。

过去我国生产 II 级钢筋通常采用增加合金元素的办法来提高强度, 现在利用超级钢生产的思路, 从技术的角度已经有充分的把握在不添加合金元素

的前提下用 Q235 的成分生产出 400 MPa 的钢筋,人们最担心的是标准、规范等管理层面上的问题,现在新修订的混凝土结构设计规范已经出台,一旦它为建筑结构设计师所广为采用,超级钢作为 II 级钢筋的广阔应用前景将变为巨大的市场商机。

3.3 超级钢在其他行业中的应用前景

过去依靠添加微合金元素来改善性能的造船用钢、桥梁用钢、容器用钢等均可考虑通过细化晶粒来提高强度、改善韧性,保证所需要的性能。过去我国一些轧钢厂,特别是中厚板厂在产品性能(主要是力学性能)不合格时,常用添加微合金元素 V、Ti 和 Nb 的方法来改善性能,使产品的成本升高。如果按照超级钢的思路,利用控制轧制及冷却过程的参数来细化晶粒、改善性能,可以节省微合金元素用量,降低成本,增强产品的市场竞争能力。

3.4 超级钢应用中的几个关键问题

1) 超晶粒钢的焊接问题。如建筑、造船、桥梁、容器等很多用钢都需要焊接,焊接时焊口和热影响区局部组织结构和性能会发生变化,开发新的焊接工艺,抑制焊口和热影响区的晶粒长大,使之与基体的性能差别尽可能地减小,是超级钢推广应用时必须解决的关键问题。

2) 大尺寸工件的组织与性能均匀性问题。如大直径棒材、厚规格板材在轧制和冷却过程中容易产生表面与内部的变形不均匀与温度、冷却速度的不均匀,这势必带来内外晶粒尺寸等组织和性能方面的差异。这种差异将对此类工件的使用性能产生不利影响,这也是超级钢开发往往先从薄规格板材和小规格棒材开始的原因,今后开发大尺寸工件的超级钢,需要攻克组织和性能均匀性这个难题。

3) 超级钢屈强比控制问题。利用细晶机制来提高钢材的强度,一般来说对提高屈服强度的效果比提高抗拉强度更为明显,其结果是当低碳钢的屈服强度提高幅度很大时,使得产品的屈/强比增加,这对某些场合(如耐火、防震性能)是不利的。此外,依靠细化晶粒来提高强度的作用是有限的,强度要求超过一定限度时,需要考虑其他强化手段。

4 结论

1) 普碳钢品种的升级换代已经提到日程,以洁净钢细晶化为主要特征的超级钢将成为今后替代

普通碳素钢和部分微合金钢的主导品种。

2) 在理论和实验研究基础上提出了生产超级钢的工艺原则,依据这些原则用 Q235 成分生产出的 400~500 MPa 级超级钢,应用于汽车行业,取得良好效果。

3) 厚规格板带钢和大尺寸棒材超级钢的生产,以及超级钢的焊接和屈强比控制等问题,还需要进一步深入研究。

参考文献

- [1] Niikura M, Yokota T. Ultra refinement of grain size and its effect on mechanical properties [A]. 新一代钢铁材料研讨会论文集[C]. 北京: 2001. 100~107.
- [2] Morris J W. The influence of grain size on the mechanical properties of steel [A]. 新一代钢铁材料的重大基础研究国外文献汇编[C]. 北京: 2001. 163~170.
- [3] Takaki S. Understanding of grain refining strengthening based on dislocation pile-up model [A]. 新一代钢铁材料的重大基础研究国外文献汇编[C]. 北京: 2001. 171~179.
- [4] 迁伸泰. 钢铁材料的晶粒超细化[J]. 世界钢铁, 2003, 3: 16~24.
- [5] Priestner R. Thermomechanical processing of austenite [A]. TMS-AIME [C]. Warrendale, 1982. 78.
- [6] Yada H, Matsumura Y, Nakajima K. US Patent 4466842, 1984.
- [7] Tamura I, Sekine H, Tanaka T, et al. Thermomechanical Processing of High Strength Low Alloy Steels [M]. London: Butterworths, 1988. 93.
- [8] SUN Zu-qing, YANG Wang-yue, HU An-min, et al. Microstructure refinement and mechanical properties of plain low carbon steel through strain-enhanced transformation [A]. HSLA Steels' 2000 [C]. Beijing: 2000. 119~126.
- [9] HAN Dong. Deformation induced ferrite transformation in microalloyed steels [A]. 新一代钢铁材料研讨会论文集[C]. 北京: 2001. 41~47.
- [10] Choo Wung-yong. Present developing status of high performance steel in Korea [A]. 新一代钢铁材料研讨会论文集[C]. 北京: 2001. 16~26.
- [11] DU Lin-xiu, LIU Xiang-hua, WANG Guo-Du-dong, et al. Determination of upper limit temperature of strain-induced transformation of low carbon steels [J]. ISIJ International, 2002, 42(10): 1119~1124.
- [12] 王国栋, 刘相华, 李维娟, 等. 超级 Super-SS400 钢的工业轧制实验[J]. 钢铁, 2001, 36(5): 39~43.

(编辑 杨 兵)