

汽车用低合金高强度钢成分及控冷工艺

张爱文, 郑磊

(宝山钢铁股份有限公司研究院, 上海 201900)

摘要: 对铌、钛微合金化低碳锰系汽车用低合金高强度钢的成分、控冷工艺对其组织与力学性能的影响进行了试验研究。结果表明: 卷取温度降低, 钢的强度上升, 伸长率下降, 组织由铁素体+珠光体向贝氏体、马氏体转变; 高温卷取时铌、钒对强度的贡献较明显, 低温卷取时碳的贡献较大; 对含 0.06%~0.11% 碳的锰-铌-钛系低合金高强度钢, 同一成分采用不同的控冷工艺可以达到 S550MC 与 S700MC 两个级别的性能要求。

关键词: 低合金高强度钢; 控轧控冷; 分段冷却

中图分类号: TG142.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3738(2006)12-0011-03

Chemical Compositions and Cooling Processes of High Strength Low Alloy Steel for Automobile

ZHANG Ai-wen, ZHENG Lei

(Baosteel Research Institute, Shanghai 201900, China)

Abstract: The effect of chemical compositions and cooling processes on microstructure and mechanical properties of low carbon and manganese containing niobium and titanium micro-alloyed advanced high strength low alloy steels for automobile were studied in laboratory. The microstructure changed from ferrite plus pearlite to bainite and martensite, and the strength increased when the elongation decreased with the decreasing of coiling temperature. The strength increment of the sheet coiled at high temperature is much higher than that coiled at lower temperature due to the contribution of Nb and V, while the function of carbon went to the opposite. The two different strength class steels S550MC and S700MC can be manufactured by different cooling processes with steel of the same chemical composition about 0.06%—0.11% carbon, and also manganese, niobium and titanium added.

Key words: high strength low alloy steel(HSLAS); controlled rolling and cooling; stepwise cooling process

0 引言

传统汽车用低合金高强度钢以低碳锰系或硅锰系为基础, 通过添加铬和钼等贵金属元素以及铌、钒、钛等微合金化元素并结合先进的生产工艺, 使其在较低的碳当量下具有较高的强度和塑性, 满足汽车制造对强度、塑性和韧性以及其它方面的要求。目前汽车用低合金高强度钢强度级别主要在抗拉强度 500 MPa 以下, 随着汽车工业的发展以及能源、环境问题的加剧, 对车辆节能和安全性的要求越来越高, 传统汽车用低合金高强度钢已不能满足要求, 先进低合金高强度钢应运而生^[1,2]。与传统的低合金高强度钢的固溶强化、析出强化和细晶强化等强

化机制不同, 先进低合金高强度钢主要采用相变强化与细晶强化, 兼具高强度和良好成形性, 特别是加工硬化指数高, 有利于提高冲击过程中的能量吸收, 在减重的同时保证安全性^[3]。

宝钢即将于 2007 年投产的三热轧 1 880 mm 机组具备强冷、多种水冷模式和低温卷取的设备优势。为了充分发挥其优势, 作者在试验室研究中采用低成本的合金设计、严格控制轧制及控冷过程以及多种冷却工艺来生产不同钢级的 S550MC 和 S700MC 先进低合金高强度钢, 并研究了成分设计、控冷工艺对其组织与性能的影响。

1 试样制备与试验方法

用 50 kg 真空感应炉冶炼了五种试验钢, 其化学成分见表 1。表 1 中碳当量计算采用国际焊接学会公式 $C_{eq} = w(C) + w(Mn)/6 + [w(Cr) + w(Mo)]$

收稿日期: 2005-12-12; 修订日期: 2006-03-02

作者简介: 张爱文(1972—), 男, 安徽铜陵人, 研究员, 硕士。

$+w(\text{V})]/5+[w(\text{Cu})+w(\text{Ni})]/15$;焊接裂纹敏感指数采用日本 ITO 公式 $P_{\text{cm}}=w(\text{C})+w(\text{Si})/30+[w(\text{Mn})+w(\text{Cu})+w(\text{Cr})]/20+w(\text{Ni})/60+w(\text{Mo})/15+w(\text{V})/10+5w(\text{B})$ 。钢锭锻造成 30 mm 厚坯料,加热到 1 200 ℃保温 45 min,在 ϕ 370 mm 轧机上进行再结晶区(1 100~980 ℃)与未再结晶区(940~800 ℃)两段控轧,其中再结晶区轧制压下率大于 70%,未再结晶区轧制压下率大于 60%,终轧温度为 800~880 ℃,成品板厚 3 mm。轧后采用加速冷却、直接淬火及分段冷却三种水冷工艺将钢板冷却到 200~600 ℃卷取并放入相同温度的炉子保温 30 min,然后随炉冷却模拟工业生产时钢卷的冷却过程。其中分段冷却是指轧后迅速水冷至一中间温度(约 500~800 ℃)空冷一段时间(2~60 s)后再水冷至一定温度卷取。

在钢板上取金相试样,经研磨抛光后用 4% 硝酸酒精腐蚀,用 Leica MEF4A 型光学显微镜观察纵向组织;制备 80 mm 定标距的 JIS No. 13A 试样用 SCL132 型 500 kN 拉伸试验机测定其强度和伸长率,所有数据均为 2 个试样的平均值。

表 1 试验钢的化学成分(质量分数/%)

Tab. 1 Chemical compositions of steels (mass/%)

材料	C	Si	Mn	Ti	Nb	V	C_{eq}	P_{cm}
Q1	0.070	0.260	1.676	0.018			0.350	0.163
Q2	0.070	0.259	1.670	0.019	0.045		0.348	0.162
Q3	0.069	0.262	1.654	0.018	0.047	0.043	0.353	0.164
Q4	0.073	0.258	1.910	0.018	0.047	0.044	0.400	0.181
Q5	0.090	0.269	1.938	0.018	0.050	0.045	0.422	0.200

2 试验结果与讨论

2.1 化学成分对钢力学性能的影响

2.1.1 微合金元素铌、钒的影响

Q1~Q3 试验钢以碳-锰-钛为基础,添加铌以及复合添加铌和钒。图 1 中 200 ℃卷取采用直接淬火工艺,其它卷取温度均采用加速冷却工艺。由图 1 可见,在高温卷取时添加铌与复合添加铌和钒能显著提高钢的强度。这是因为高温卷取时它们的碳化物能充分析出产生强化;而随着卷取温度的降低,合金元素在钢中的扩散系数减小,碳化物来不及析出强化,故添加铌或复合添加铌、钒对强度的贡献逐渐减少;采用直接淬火冷却工艺在 200 ℃卷取时,添加铌几乎不能提高强度,而复合添加铌、钒还能使强度有一定程度的提高,当然这时铌、钒对强度的贡献比高温卷取时已减少很多。低温卷取尤其是 200 ℃卷

取时钢的强度主要取决于碳的固溶强化和马氏体相变强化。总体来说添加铌后 Q2 钢的伸长率与 Q1 钢的伸长率基本相当,复合添加铌、钒的 Q3 钢的伸长率最低。

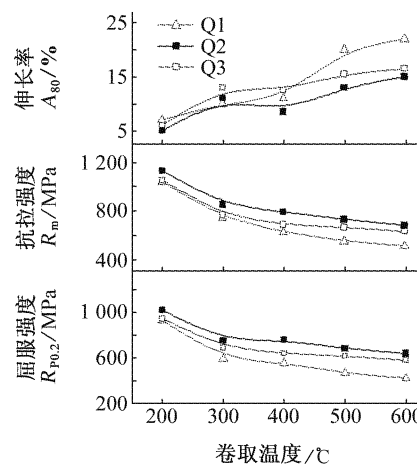


图 1 微合金元素对力学性能的影响

Fig. 1 Effect of micro alloying elements on mechanical properties

2.1.2 碳、锰含量的影响

Q4 钢在 Q3 钢基础上添加了 0.26% 的锰, Q5 钢在 Q3 钢基础上添加了 0.02% 的碳和 0.29% 的锰,其它元素含量基本相同。图 2 所采用的卷取温度与工艺同图 1。由图 2 可见,在卷取温度一定时,碳含量和锰含量的增加使钢在低温卷取时强度上升,在高温卷取时对强度影响不大,而伸长率下降。如在高温 600 ℃卷取时碳含量和锰含量的变化对强度几乎没有影响,这时钢的强度主要由微合金元素铌、钒决定;随着卷取温度的降低,碳、锰含量增加对强度的贡献逐渐增大,尤其是采用直接淬火冷却工艺在 200 ℃卷取时,碳、锰含量增加后 Q5 钢强度显著提高,而单独增加锰含量的 Q4 钢在整个卷取温度范围内强度与 Q3 钢相当,这说明淬火马氏体组织中碳含量对强度的贡献最大也最关键。虽然高碳含量在低温卷取时能使强度显著增加,但碳含量提高后伸长率降低,所以不能单纯依靠提高碳含量来增加强度。

2.2 控冷工艺对组织和性能的影响

2.2.1 卷取温度对组织的影响

由图 3 可见,随着卷取温度的降低, Q2 钢组织由铁素体(F)+珠光体(P)向贝氏体(B)、马氏体(M)转变。另外在采用加速冷却工艺温度介于 500~300 ℃之间或采用分段冷却工艺温度介于 400~200 ℃之间卷取时部分试验钢出现以上三类组织中

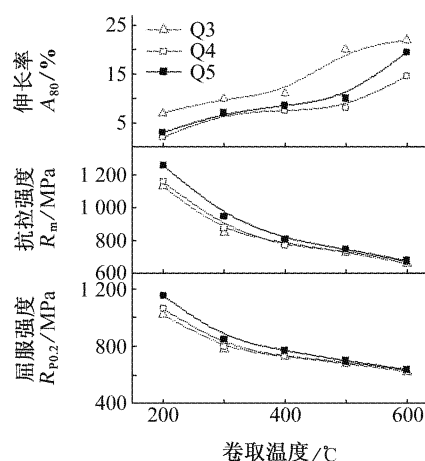
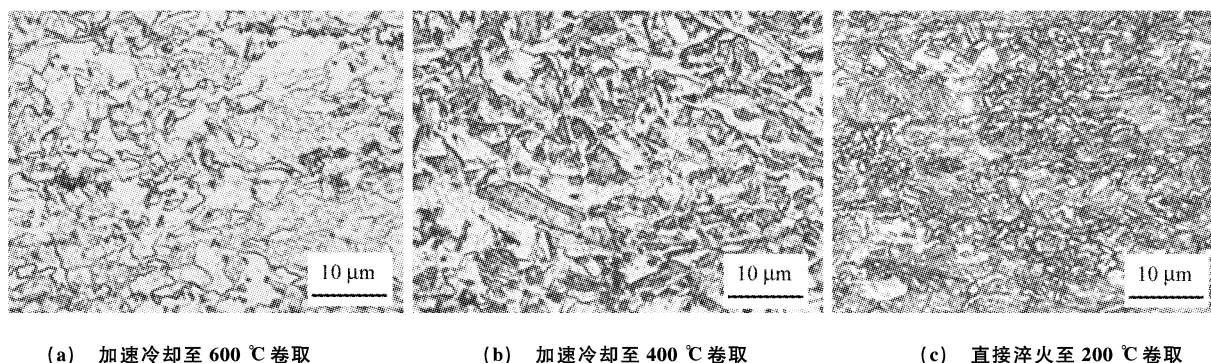


图2 碳、锰含量对力学性能的影响
Fig. 2 Effect of carbon and manganese content on mechanical properties

的两类混合组织;而在采用直接淬火工艺 200℃卷取时基本上全部为低碳板条马氏体组织。

2.2.2 冷却工艺对组织和性能的影响

由表 2 可见,采用加速冷却工艺在 600~350℃卷取时,Q2 钢性能满足低合金高强度 S550MC 钢的要求;采用分段冷却工艺在 350℃卷取时,可以使钢的强度比采用加速冷却工艺有较大幅度增加,虽然伸长率稍有下降,但性能可满足 S700MC 钢的要求;采用分段冷却工艺在 200℃卷取时钢的性能满足马氏体 MP900 钢的要求。对分段冷却工艺而言,中间停留空冷一段时间的目的是让变形奥氏体进行回复以及控制其中碳化物析出和选择性析出某些相,以使最终的组织与力学性能满足要求。TRIP 钢就是采用这种工艺以获得强度和伸长率的良好结



(a) 加速冷却至 600℃卷取 (b) 加速冷却至 400℃卷取 (c) 直接淬火至 200℃卷取
图3 Q2 钢不同卷取温度下的典型组织
Fig. 3 Optical micrographs at different coiling temperatures of steel Q2

合。文献[4]报道了一种 TMCP-RPC 工艺(弛豫析出-控制相变),采用这种工艺钢的强度和韧性均有大幅提高,能获得贝氏体与马氏体的混合组织。作者采用的工艺与前者不同的是轧制后先水冷至一定温度进行弛豫析出,然后继续水冷,而前者是轧制后即进行弛豫析出再水冷,虽然工艺不同,但弛豫析出过程的作用相似。200℃卷取时,采用直接淬火工艺能使碳最大程度固溶于基体中,获得过饱和固溶体马氏体单一组织,因而强度最高,但伸长率很低;而采用分段冷却工艺后,无论中间停留空冷温度高低都使钢先期进入铁素体/贝氏体形成区间,析出部分铁素体/贝氏体和碳化物,奥氏体中碳的过饱和度降低,导致随后马氏体强度降低。且弛豫-析出-控制相变过程也使组织细化,伸长率提高,原因是先析出的铁素体/贝氏体分割了原始奥氏体晶粒,使马氏体在更小的奥氏体晶粒内部形成,从而细化马氏体板条^[4]。总体来说,用 Q2 钢的成分来生产 S550MC 与 S700MC 两个级别的低合金高强度钢最为合适。

表 2 Q2 钢在不同冷却工艺下的组织与力学性能
Tab. 2 Microstructure and mechanical properties of steel Q2 for different cooling processes

卷取温度 / °C	冷却工艺	屈服强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	伸长率 / %	组织	对应钢级
600~350	加速冷却	615~650	655~705	15~20	(F+P)/B	S550MC
350	分段冷却	720	803	12	B	S700MC
200	分段冷却	818	1 030	7	M+B	MP900

2.3 满足不同钢级的成分与控冷工艺

由以上对 Q1~Q5 钢的成分及控冷工艺研究结果可知,单独添加铌和微量钛的 Q2 钢,合金元素成本相对较低,性能满足低合金高强度 S550MC 钢与 S700MC 钢的要求。另外由表 1 可见,此钢的碳当量和焊接裂纹敏感指数相对较低,加上此钢可以在
(下转第 18 页)

系虽仍能描述超声频率加载下低周和高周($<10^7$ 次)范围内拉伸平均应力对 50 钢疲劳性能的影响,但是不能用来描述超声频率加载下超高周范围内拉伸和弯曲平均应力对 50 钢疲劳性能的影响。

3 结 论

(1) 超声频率加载下平均应力对 50 钢超高周疲劳性能有显著影响,在应力幅相同的情况下,随着平均应力的增大,疲劳寿命降低。

(2) 在长寿命(高周和超高周)阶段,含有平均应力的三点弯曲疲劳 $S-N$ 曲线及非对称拉压疲劳 $S-N$ 曲线与对称拉压超声疲劳 $S-N$ 曲线具有相同的趋势和规律,三者均可用 Basquin 方程来描述。

(3) 常规疲劳用于描述平均应力影响的 Morrow 关系仍能描述超声频率加载下高周疲劳($<10^7$ 次)范围内拉伸平均应力对 50 钢疲劳性能的影响,但是不能描述超声频率加载下超高周范围内拉伸平均应力和弯曲平均应力对 50 钢疲劳性能的影响。

(4) 常规疲劳用于描述平均应力影响的 Goodman 模型仍能很好地描述超声频率加载下一定寿命的应力幅值和平均应力的配合。此时用 Gerber 模型估计一定寿命下应力幅值和平均应力的配合偏于

危险,用 Soderberg 模型估计则偏于保守。

参考文献:

- [1] Suresh S. 材料的疲劳(II)[M]. 北京:国防工业出版社,1999.152—243.
- [2] Wang Q Y, Berard J Y, Bathias C, *et al.* Gigacycle fatigue of ferrous alloys[J]. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*,1999,22:667—672.
- [3] 闫桂玲,王 弘,高 庆. 超声频率加载下 50# 车轴钢超长寿命疲劳性能研究[J]. *中国铁道科学*,2004,25(2):78—81.
- [4] 王 弘,高 庆. 超声疲劳试验方法在 40Cr 钢疲劳性能研究中的应用[J]. *机械工程材料*,2003,27(12):29—31.
- [5] 王 弘,高 庆. 缺口应力集中对 40Cr 钢高周疲劳性能的影响[J]. *机械工程材料*,2004,28(8):12—14.
- [6] 王 弘,高 庆. 超声疲劳扭转试样谐振长度的解析法计算[J]. *西南交通大学学报*,2001,36(6):595—598.
- [7] 闫桂玲,王 弘,高 庆. 超声疲劳试验方法及其应用[J]. *力学与实践*,2004,26(6):25—29.
- [8] 王 弘. 40Cr、50 车轴钢超高周疲劳性能研究及疲劳断裂机理探讨[A]. 西南交通大学博士论文集[C]. 成都:西南交通大学,2004.
- [9] 闫桂玲. 非对称超高周疲劳试验研究[A]. 西南交通大学硕士学位论文[C]. 成都:西南交通大学,2005.
- [10] 束德林. 工程材料力学性能[M]. 北京:机械工业出版社,2003.112—138.

(上接第 13 页)

不同的冷却工艺下获得不同钢级的性能,因此通过进一步试验,最终以同一成分(含 0.06%~0.11% 碳的硅-锰-铌-钛系钢)、不同的卷取温度(600~200℃)和不同的冷却工艺(加速冷却、分段冷却和直接淬火)生产了低合金高强度 S550MC 和 S700MC 钢和马氏体 MP900 钢多钢级品种,改变了以往提高钢级性能主要依靠添加合金元素尤其是贵重金属(铜、镍、铬和钼等)的通用做法,有望实现以比较低的成本来满足高钢级品种的性能要求。

3 结 论

(1) 随着卷取温度的降低,试验钢的强度上升,伸长率下降;冷却工艺对试验钢的强度和塑性影响较大。

(2) 随着卷取温度的降低,试验钢的组织逐渐由高温卷取时的铁素体+珠光体向中温卷取时的贝氏体和低温卷取时的马氏体转变;部分卷取温度和工艺情况下可以获得三类组织中两类的混合组织;而采用直接淬火冷却工艺则钢的组织几乎全为低碳

板条马氏体。

(3) 同一成分 0.06%~0.11% 碳的硅-锰-铌-钛系钢通过加速冷却和分段冷却控冷工艺可以分别达到低合金高强度 S550MC 钢、S700MC 钢和马氏体 MP900 钢的性能要求,改变了以往提高钢级性能主要依靠添加合金元素的通用做法,有望实现以比较低的成本来满足高钢级品种的性能要求。

参考文献:

- [1] Jeanneau M, Pichant P. The trends of steel products in the european automotive industry[A]. The 55th Congress of ABM [C]. Brazil: La Revue de Métallurgie,2000.1399—1408.
- [2] Yukihiisa Kuriyama, Manabu Takahashi, Hiroshi Ohashi. Trend of car weight reduction using high-strength steel[J]. *Automotive Engineering*,2001,55(4):51—57.
- [3] Takehide SENUMA, Physical metallurgy of modern high strength steel sheets[J]. *ISIJ International*,2001,41(6):520—532.
- [4] 尚成嘉,杨善武,王学敏,等. RPC 对 800 MPa 级低合金高强度钢的影响[J]. *北京科技大学学报*,2002,24(2):129—132.