

## 轧制工艺对高强度车轮 AG650LW 轮辋钢的组织 and 性能的影响

万国喜, 刘艳红, 刘鹏, 何晓波

(安阳钢铁集团有限责任公司技术中心, 安阳 455004)

**摘要** 通过 Gleeble-3800 热模拟试验机对 AG650LW 钢进行动态 CCT 曲线测定和轧制工艺模拟试验, 得出满足 650 MPa 轮辋钢性能要求的组织为由铁素体 + 贝氏体 + 少量的珠光体, 其终轧温度 840 ~ 880 °C, 卷取温度 480 °C, 轧后层流冷却速率  $\geq 10$  °C/s, 硬度  $\geq 220$ HV。试验钢卷的综合开裂率 4.3‰, 满足了用户的加工期望要求。

**关键词** 650 MPa; AG650LW 钢; 车轮轮辋; 热模拟; 冷却速率; 卷取温度; 开裂率

## Effect of Rolling Process on Structure and Properties of Wheel Rim Steel AG650LW for High Strength Wheel

Wan Guoxi, Liu Yanhong, Liu Peng, He Xiaobo

(Technology Center, Anyang Iron & Steel Group Co., Ltd., Anyang 455004)

**Abstract** The dynamic CCT curve measurement and rolling process simulation test of AG650LW steel are carried out by gleeble-3800. It is obtained that the structure to satisfy 650 MPa rim steel is ferrite + bainite + a small amount of pearlite, with end rolling temperature at 840 ~ 880 °C and coiling temperature at 480 °C, laminar flow cooling rate after rolling  $\geq 10$  °C/s, and hardness value  $\geq 220$ HV. The comprehensive crack ratio of the test coil is 4.3‰, which meets the requirement of the user.

**Key Words:** 650 MPa; AG650LW Steel; Wheel Rim; Thermal Simulation; Cooling Rate; Coiling Temperature; Cracking Rate

市场对高强车轮钢需求迅速增加, 也对高强车轮钢品种质量提出了更高要求<sup>[1-3]</sup>。然而, 目前国内专用车轮钢仍然以屈服强度小于 500 MPa 为主, 屈服强度 600 MPa 级微合金化高强钢和 700 MPa 双相钢的应用正在快速推进, 800 MPa 以上的双相钢和 700 MPa 微合金化车轮用钢仍处于研制推广阶段<sup>[4-5]</sup>。

为了适应车轮钢轻量化发展趋势, 更高强度的车轮轮辋用钢板要求具有高强韧性、高疲劳性能和良好的成型性。传统意义上的双相钢和高强度铌、钛成分体系的车轮虽然具有良好的加工性能, 但闪光对焊后在涨型工序中容易出现热影响区“缩颈”的现象, 而严重影响轮辋钢的外形尺寸和疲劳性能<sup>[6-8]</sup>。本文在安阳钢铁微 Ti 处理的 Nb 微合金化合金高强车轮钢基础上优化了 Mn 和 Nb 含量, 同时研究添加提高淬透性元素 Mo、Cr 和 B, 突破一般车轮轮辋钢 85% ~ 95% 的铁素体加上 5% ~ 15% 珠光体的组织形式, 也避免了双相钢车轮的焊接后软化特点, 形成以 40% ~ 80% 贝氏体组织强化为主, 细

晶强化为辅的组织类型, 以此来达到易焊接、良好成型性 650 MPa 车轮轮辋的设计技术要求。

### 1 轧制工艺热模拟试验材料与方法

650 MPa AG650LW 试验钢成分 (%) 为: 0.06C, 0.09Si, 1.63Mn, 0.059Nb, 0.022Ti, 0.002S, 0.009P, 0.37Cr, 0.046Al, 0.0045N, 余量 Fe。经 50 kg 真空感应炉冶炼后, 由圆台形(上底  $\Phi 100$  mm 和下底  $\Phi 170$  mm)  $\times 365$  mm 通过 560 kg 的空气锤锻造成 260 mm  $\times$  120 mm  $\times$  80 mm 矩形试验坯。再锯切和机加工  $\Phi 6$  mm  $\times$  81 mm 和  $\Phi 8$  mm  $\times$  12 mm 试样, 在 Gleeble-3800 热模拟试验机上进行 CCT 曲线测定和轧制工艺模拟。CCT 曲线测定方法: 以 10 °C/s 加热至 1 200 °C, 保温 10 min, 然后以 5 °C/s 冷却至 1 100 °C 进行第 1 次变形, 变形速率为  $10$  s<sup>-1</sup>, 变形量为 30%; 再以 5 °C/s 冷却至 920 °C 进行第 2 次变形, 变形速率为  $10$  s<sup>-1</sup>, 变形量为 35%。然后分别以 1、5、10、15、20、25、30、40 °C/s 的冷却速率冷却至室温。轧制工艺测试方法: 以 10 °C/s 加

热至1 200 ℃,保温 5 min,然后以 5 ℃/s 冷却至 940 ℃进行压缩 17%,压缩长度和直径分别 Φ2 mm 和Φ8.7 mm,变形速率为 10 s<sup>-1</sup>,以 5 ℃/s 冷却至

840、880 ℃,以 10、15、20 ℃/s冷却至 450、480 ℃,然后再空冷至室温。具体工艺路线如图 1 所示。

热模拟试验后,在焊接热电偶区域的中心处纵

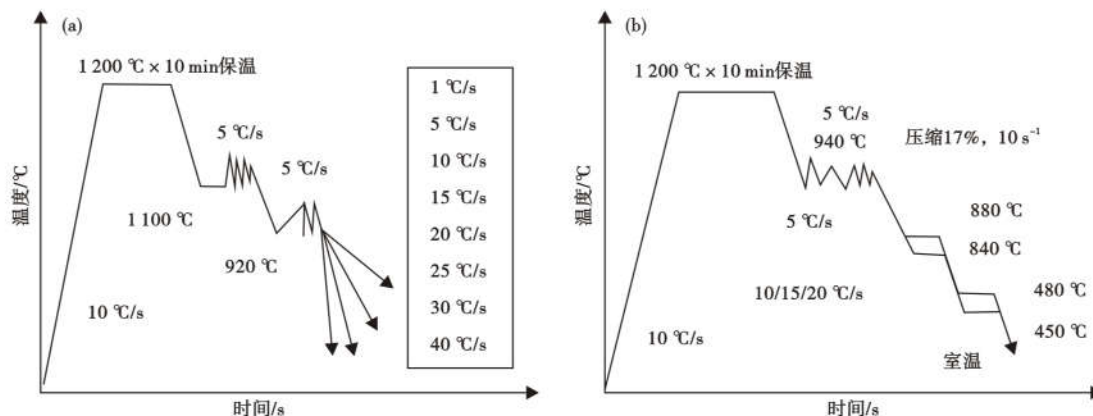


图 1 AG650LW 钢的连续冷却工艺 (a) 和模拟轧制工艺加热-冷却曲线 (b)

Fig. 1 Heating-cooling curves for continuous cooling process (a) and simulation rolling process of test AG650LW steel (b)

向切开试样,然后制作金相试样,采用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀,利用 Zeiss Axiovert 200 光学显微镜微观组织观察,并使用 TMVP-1S 维氏硬度计测定硬度,加载载荷为 5 kg,加载时间为 10 s。

## 2 试验结果与讨论分析

### 2.1 连续冷却条件下显微组织转变

从图 2 可以看出,当冷却速度 ≤ 1 ℃/s 时,试验

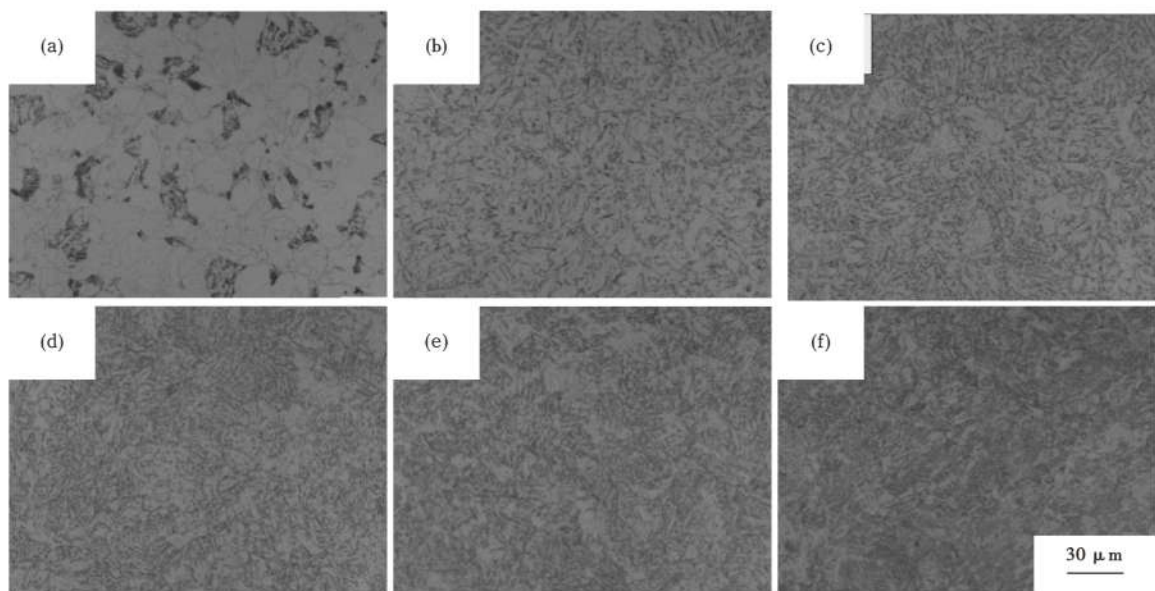


图 2 试验 AG650LW 钢经 1 100 ℃ 和 920 ℃ 变形冷却后的不同冷却速率显微组织和 (a) 1 ℃/s; (b) 5 ℃/s; (c) 10 ℃/s; (d) 15 ℃/s; (e) 20 ℃/s; (f) 40 ℃/s

Fig. 2 Microstructure of test AG650LW steel deforming at 1 100 ℃ and 920 ℃, then cooling with 1 ℃/s (a), 5 ℃/s (b), 10 ℃/s (c), 15 ℃/s (d), 20 ℃/s (e), 40 ℃/s (f)

钢的组织由铁素体、珠光体和少量退化珠光体组成;随着冷速增加到 5 ℃/s 时,铁素体晶粒明显细化,珠光体团也在逐渐减小,组织中出现了少量的粒状贝氏体组织,但还是主要由铁素体和珠光体构成;当

冷速增加至 10 ℃/s 时,组织中珠光体继续细化成颗粒状,基体出现较多的粒状贝氏体组织;当冷速继续增加到 15 ℃/s 时,试验钢中铁素体和珠光体体积分数明显减少,组织主要由铁素体、贝氏体和极少量的

珠光体组成; 当冷速提高到超过 20 °C/s 时, 钢中的贝氏体体积分数进一步增加, 珠光体基本消失, 组织全部由贝氏体和铁素体组成。

2.2 连续冷却条件下组织类型及显微硬度变化

表 1 冷却速度 1~40 °C/s AG650LW 钢的组织 and 硬度  
Table 1 Microstructure types and hardness of AG650LW steel at cooling rates 1-40 °C/s

冷速/(°C·s <sup>-1</sup> )	组织类型	HV 硬度值
1	铁素体 + 珠光体 + 退化珠光体	182
5	铁素体 + 珠光体 + 少量粒状贝氏体	190
10	铁素体 + 贝氏体 + 少量珠光体	223
15	贝氏体 + 铁素体 + 少量珠光体	230
20	贝氏体 + 少量铁素体	255
30	贝氏体 + 极少量铁素体	270
40	贝氏体 + 极少量铁素体	287

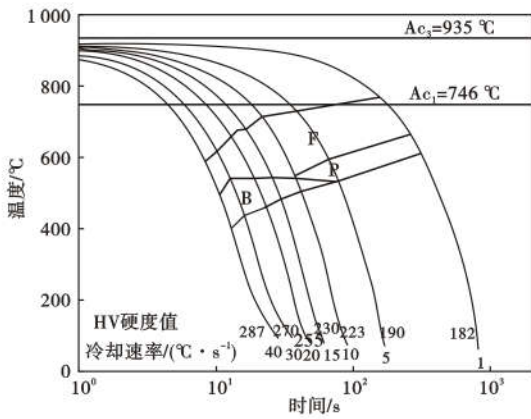


图 3 试验 AG650LW 钢的动态 CCT 曲线图  
Fig. 3 Dynamic CCT curves of test AG650LW steel

表 1 为试验钢 1~40 °C/s 冷却速度下组织构成和平均显微硬度。当冷却速度 ≤5 °C/s 时, 试验钢基体组织主要由软相的铁素体组成, 其显微硬度较小, 为 182~190HV。当冷却速度继续增加, 试验钢中的铁素体组织逐渐细化, 且当冷却速度增大到 10~15 °C/s 时, 试验钢中出现了大量的贝氏体硬相组织, 基体组织的硬度迅速增加至 223~230HV。随着冷却速度进一步增加到 20 °C/s 以上时, 试验钢中组织变化不明显, 但基体硬度逐渐增加到 287HV。

2.3 连续冷却条件下动态 CCT 曲线

通过加热和冷却过程中试验钢的膨胀曲线和表 1 结果, 1~40 °C/s 不同冷速条件下试验钢的相变点温度和动态 CCT 曲线, 如图 3 所示。当冷却速度 ≤5 °C/s 时, 试验钢的碳原子在高温下会完成长距离的扩散, 一般只发生铁素体和珠光体相变。但随着冷速继续增加到 ≤10 °C/s 时, 试验钢在高温段的停留时间减少, 碳原子的长程扩散受阻, 相变被抑制。当冷速继续增加到 15 °C/s 时, 碳原子扩散继续被抑制, 钢中的铁素体和珠光体含量逐渐减少, 未转变的奥氏体就会发生半扩散型相变, 产生部分贝氏体组织; 当冷速速率超过 20 °C/s 时, 钢中的奥氏体发生完全半扩散型相变, 组织全部转变为贝氏体组织, 这时对应的相变温度为 490~550 °C。

从连续冷却速率的组织类型和试验钢的动态 CCT 曲线可知, 高强度 650MPa 商用车的轮辋钢设

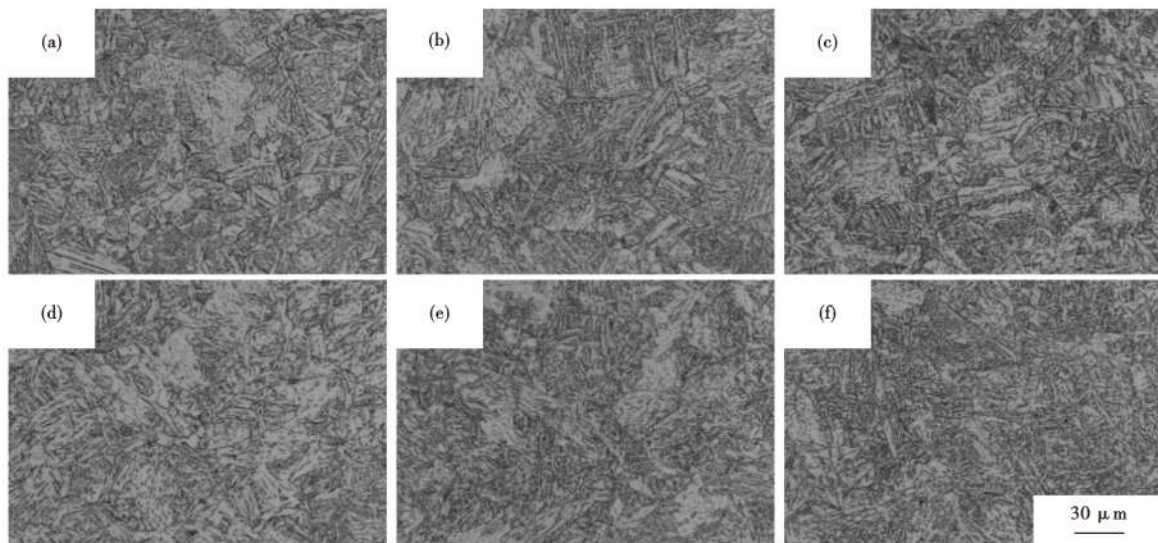


图 4 AG650LW 钢模拟终轧温度-轧后至卷取温度 480 °C 冷却速度的组织; 880 °C-10 °C/s (a); 880 °C-15 °C/s (b); 880 °C-20 °C/s (c); 840 °C-10 °C/s (d); 840 °C-15 °C/s (e); 840 °C-20 °C/s (f)  
Fig. 4 Structure of AG650LW steel with simulated end rolling temperature-cooling rate from end rolling to coiling temperature 480 °C; 880 °C-10 °C/s (a); 880 °C-15 °C/s (b); 880 °C-20 °C/s (c); 840 °C-10 °C/s (d); 840 °C-15 °C/s (e); 840 °C-20 °C/s (f)

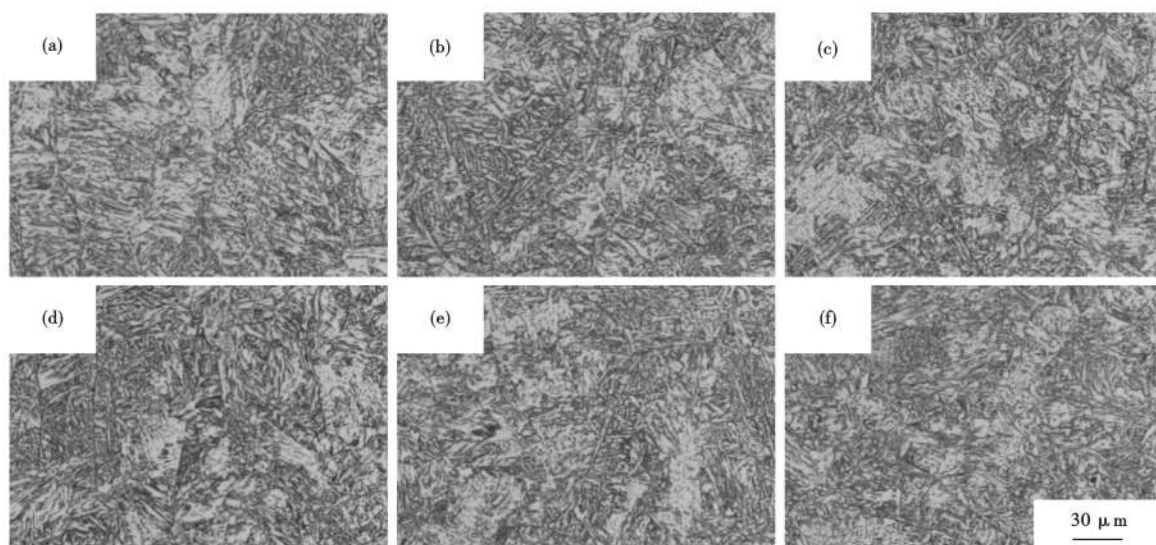


图 5 AG650LW 钢模拟终轧温度-轧后至卷取温度 450 ℃ 冷却速度的组织:880 ℃-10 ℃/s (a);880 ℃-15 ℃/s (b);880 ℃-20 ℃/s (c);840 ℃-10 ℃/s(d);840 ℃-15 ℃/s(e);840 ℃-20 ℃/s(f)

Fig. 5 Structure of AG650LW steel with simulated end rolling temperature-cooling rate from end rolling to 450 ℃ coiling temperature; 880 ℃-10 ℃/s (a);880 ℃-15 ℃/s (b);880 ℃-20 ℃/s (c);840 ℃-10 ℃/s(d);840 ℃-15 ℃/s(e);840 ℃-20 ℃/s (f)

表 2 不同工艺条件 AG650LW 维氏硬度 HV 值

Table 2 HV value of AG650LW steel vickers hardness with different process conditions

冷却速率(℃·s <sup>-1</sup> )	不同工艺温度下的硬度值(HV)			
	880 ℃-480 ℃	840 ℃-480 ℃	880 ℃-450 ℃	840 ℃-450 ℃
10	225	228	230	234
15	232	235	237	240
20	245	248	252	255

计的目标组织需要轧后层流冷却速率 $\geq 10$  ℃/s,卷取温度小于 500 ℃,参照硬度对照经验表力学性能要满足 650 ~ 770 MPa 的强度,钢材的显微维氏硬度应该大于 220HV。

#### 2.4 模拟轧制工艺讨论分析

图 4 和图 5 分别为精轧终轧目标温度 880、840 ℃ 条件下经过 10、15、20 ℃/s 冷却速率冷却到卷取目标温度 480、450 ℃ 的金相组织,表 2 为不同工艺条件下的显微硬度。当卷取温度不变时,无论精轧终轧温度为 880 ℃ 或 840 ℃,试验钢的组织类型,均由大量贝氏体和少量铁素体组成,主要是因为卷取温度较低达到了贝氏体相变开始温度,同时冷却速度超过了贝氏体相变临界冷却速率;但随着冷却速率的进一步提高,铁素体比例有着明显下降,贝氏体比例进一步提高,硬度有所上升,但贝氏体团尺寸变化较小,是由于该试验工艺试样已经完成压缩变形试验,原始奥氏体晶粒尺寸已经基本固定,后续冷却速率只能改变组织中的贝氏体和铁素体相比例。

依据国家标准 GB/T33362-2016《金属材料硬度

值的换算》中维氏硬度为 225 ~ 255HV,硬度值相邻相差 5HV 对应的抗拉强度差为 15 ~ 20 MPa<sup>[9]</sup>。从表 2 中可以看出:相同冷却速率条件下,不同轧制工艺硬度变化较小,极差为 8 ~ 10HV,对应强度变化不超过 35 MPa,主要是由于压缩变形已经完成,奥氏体晶粒大小基本相当,硬度的变化主要是由于不同终轧温度对应不同卷取温度对应奥氏体过冷度有一定差异,组织中形成的贝氏体相含量有所不同;当冷速达到 20 ℃/s 时,由于低的终轧温度使得过冷奥氏体稳定性增加,变形带数量增多,最终导致形核几率增加。低的卷取温度加上快速冷却使得贝氏体含量增加,二者共同作用使得显微硬度达到最大为 255HV。当终轧温度相同时,450 ℃ 相比 480 ℃ 卷取温度的显微硬度平均增加约为 5.8HV,对应的强度应该不超过 25 MPa。因此,相同的轧制工艺在不同的冷却速率下的硬度有一定的差别,约为 20HV;相同卷取温度和冷却速率情况下的显微硬度变化较小,表明终轧温度对试验钢的组织中贝氏体的含量和性能影响较小,但冷却速率对钢材组织相比例分配有较大影响。为此,在实际大生产过程中,要严格

控制冷却速率,控制贝氏体含量。

### 3 工业化试制

安阳钢铁 AG650LW 轮辋试验钢工业化生产工艺路线:150 t 铁水预处理→150 t 转炉→170 t LF→230 mm 双流板坯连铸→三座步进梁式加热炉→1 780 mm 热连轧机组轧制→超密集型层流冷却→3 台地下卷取→喷印标记→检验→入库。连铸板坯规格为 230 mm × 1 540 mm × 12 900 mm,轧制规格为 4.6 mm × 1 500 mm。热轧主要工艺参数:加热温度 1 240 ~ 1 260 °C,热送铸坯在炉时间为 120 ~

200 min;精轧终轧温度 840 ~ 880 °C;卷取温度 ≤ 500 °C。其中冷却模式是主要工艺控制要点。试制工艺采用前段 1 ~ 4 组冷却避让不出水和前段集中 4/5 式冷却方式,即 5 根集管为一组,前 4 根集管出水,第 5 根关闭,以此向后循环出水。该方法目的主要是控制前段冷却的间隔空冷温度和时间,进而控制铁素体比例;通过控制空冷后的集中冷却速度是为控制贝氏体组织比例。轧制工艺和力学性能如表 3 所示。

### 4 试制结果与分析

表 3 高强度 AG650LW 轮辋钢钢板热轧生产工艺参数和对应的力学性能

Table 3 Hot rolling process parameters and mechanical properties of high strength AG650LW rim steel

试验钢	轧制规格/mm	粗轧出口温度/°C	精轧入口温度/°C	终轧温度/°C	卷取温度/°C	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	HV 硬度(均值)
1#	4.6	1 054	1 024	871	491	606	667	23.5	226
2#	4.6	1 047	1 018	869	472	625	693	21	235
3#	4.6	1 061	1 031	873	484	611	678	22.5	229
4#	4.6	1 059	1 028	868	515	595	657	25	221
标准要求	2~8	1 050	1 020	870	480	≥550	≥650	≥19	≥200

注:标准要求中的力学性能是按照用户双方技术协议 Q/AG JX 01. 24. 502-2021

#### 4.1 力学性能和冷弯性能分析

检验试样拉伸方向和冷弯试样均为横向。由表 3 可知:4 卷试验钢除卷取温度有一定差异外,粗轧、精轧入口,终轧温度基本一致,其力学性能全部满足设计标准要求,工艺试验强度和塑性分布规律符合微合金结构钢的强度与塑性匹配一般特性。试验钢 4# 相比其它三个试验钢卷的卷取温度最高达 515 °C,伸长率最高达到 25%,但抗拉强度只有 657 MPa 富余量最小;试验钢 2# 相比另外三个试验钢的卷取温度最低为 470 °C 左右,强度最高达到 693 MPa,但伸长率最低只有 21%,富余量较小;试验钢 3# 的卷取温度约为 480 °C,其力学性能综合指标较好,强度富余和伸长率的富余量适中。因此,综合考虑表面质量和性能富余量的最佳轧制工艺为:粗轧出口目标温度 1 050 °C,精轧出口目标温度 880 °C,卷取目标温度 480 °C。

如图 6 所示,对试验钢卷进行 180°(试验宽度 B = 35 mm,弯芯直径 D = 1.0a 试样厚度)冷弯试验,结果全部合格。

#### 4.2 显微组织分析

试验钢的金相组织见图 7。通过 Zeiss Axiovert 200 光学显微镜观察组织和软件 Prolmaging 分析可知:四种试验钢的维氏显微硬度均达到了 220HV 以上,基本满足了设计要求。其中试验钢 4# 由于其卷



图 6 AG650LW 钢 4.6 mm 板 D = 1.0a 的冷弯试验

Fig. 6 Cold bending test of AG650LW steel 4.6 mm plate with D = 1.0a

取温度偏高,冷却速率相对较低,硬度仅为 221HV,晶粒尺寸平均为 5.6 μm,其铁素体晶粒尺寸较试验钢 2#、3# 和 4# 明显粗化,组织以 20.4% 贝氏体和 78.6% 铁素体为主,含量少量的退化珠光体。该试验钢贝氏体相变由于热连轧机组的 7 机架精轧累计变形量较大,提高了相变温度,使得过冷奥氏体更加稳定,再加上 Cr 元素提高了淬透性,最终试验钢在相对冷速较慢情况下产生了一定量的贝氏体组织。试验钢 2# 的显微硬度最高为 235HV,晶粒尺寸平均为 3.3 μm,组织以 78.4% 贝氏体和 16.8% 铁素体为主;试验钢 1# 和 3# 硬度基本相当,在 227HV 左右,其晶粒平均尺寸为 4.4 μm,其组织以 58.2% 铁素体和

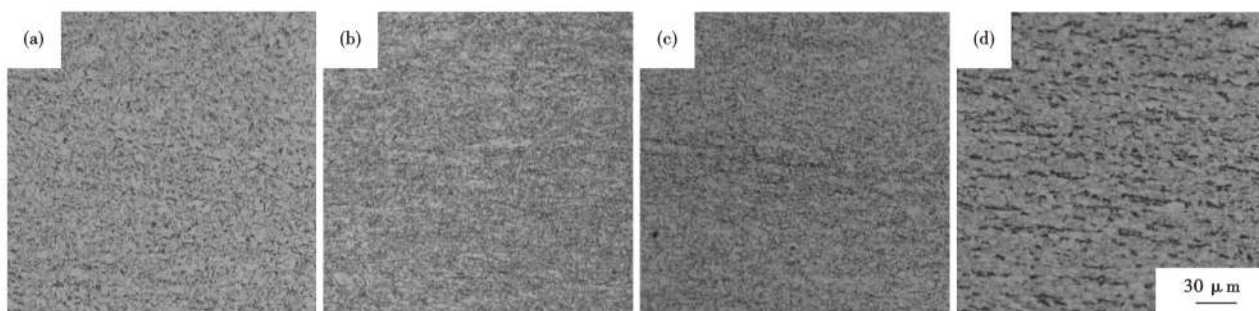


图 7 AG650LW 试验钢 1<sup>#</sup>(a), 2<sup>#</sup>(b), 3<sup>#</sup>(c) 和 4<sup>#</sup>(d) 的金相组织

Fig. 7 Metallographic structure of AG650LW test steel 1<sup>#</sup>(a), 2<sup>#</sup>(b), 3<sup>#</sup>(c) and 4<sup>#</sup>(d)



图 8 轻量化 650 MPa 高强度 AG650LW 钢轮辋形貌

Fig. 8 Morphology of ligh weight rim 650 MPa high strength AG650LW steel

41.8% 贝氏体为主,但贝氏体含量明显少于试验钢 2<sup>#</sup>,因此,其综合性能最好,强度和伸长率均有较大的富余量。

## 5 用户加工试验跟踪

试验钢 3 号发往洛阳车轮厂进行加工试验全程跟踪。由于闪光焊接过程热影响区一般可分为界面区、粗晶区、重结晶区与部分重结晶区等 4 个区域<sup>[10]</sup>,开裂的轮辋基本均是在重结晶区或部分重结晶区部位。为此,安钢与用户一起对下料尺寸、卷圆

开口度、闪光对焊烧化量、闪光留量、带电顶锻时间和三道次辊型模具间隙等工艺优化调整,再经过外形尺寸检验和气密性试验后,累计试验生产入库 4.6 mm 厚的 650 MPa 的高强度轮辋 2804 只,扩口开裂 4 只,涨型开裂 8 只,累计开裂损坏 12 只,开裂为 4.3‰,达到用户小于 1% 的期望。如图 8 经过称重该车轮重量为 18.4 ~ 18.5 kg,相比正常 590CL 高强轻量化车轮轮辋 20.5 ~ 21 kg 实现轻量化减重约 10%。

## 6 结论

(1) 满足 650 MPa 的轮辋钢性能要求的目标组织为贝氏体 + 铁素体 + 少量的珠光体组成,轧后层流冷却速率  $\geq 10$  °C/s,显微硬度  $\geq 220$  HV。

(2) 轧制关键工艺目标终轧温度 840 ~ 880 °C,卷取温度 480 °C,层流冷却模式采用前段避让 1 ~ 4 组 + 4/5 的冷却模式,即 5 根集管为一组,前 4 根集管出水,第 5 根关闭,以此向后循环出水。

(3) 试验钢卷通过轮辋加工企业对下料尺寸、卷圆开口度、闪光对焊烧化量、闪光留量、带电顶锻时间参数和三道次辊型模具间隙等工艺调整,取得综合开裂率 4.3‰,满足了高强轻量化轮辋设计加工要求。

## 参考文献

- [1] 肖尧. 500MPa Nb-Ti 微合金高强度汽车车轮钢 510CL 开发和性能[J]. 特殊钢, 2018, 39(6): 62-63.
- [2] 孔猛, 李瑞瑾, 杨强. 钢制车轮新材料的研究与探讨[J]. 商用汽车, 2008(1): 122-123.
- [3] Kikuchi H, Nilai, Tomida T, et al. 690 ~ 780 MPa 级热轧薄板车轮的材料设计[C]//中国金属学会. 汽车用钕微合金化钢板. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [4] 殷宇佳. 日本汽车用高强度钢板的新产品及其特点[J]. 天津汽车, 2000(3): 25-27.
- [5] 王利, 陆匠心. 宝钢汽车轻量化技术进展[C]//中国金属学会. 2009 年汽车用钢生产及应用技术国际研讨会论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 79-84.
- [6] 董瑞峰, 孙丽钢, 刘哲, 等. 汽车结构用 590 MPa 级热轧双相钢的开发[J]. 轧钢, 2008, 25(1): 9-12.
- [7] 姚贵升. 采用低合金高强度钢制造车轮以减轻重量[J]. 汽车材料, 2000(8): 14-20.
- [8] 李晓林, 肖宝亮, 崔阳, 等. Ti、Nb 微合金钢中碳氮化物固溶与再析出的研究[J]. 材料导报, 2017, 31(1): 107-109.
- [9] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 硬度值的换算标准: GB/T 33362-2016/ISO 18265: 2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 10-11.
- [10] 张洪博, 谭峰亮, 陈志国. 闪光留量对 510 MPa 级车轮闪光对焊接头组织与性能的影响[J]. 材料研究学报, 2017, 31(2): 154-155.