

## 采用控轧控冷工艺生产车轮用轮辐钢板

马海涛<sup>1,2</sup> 吴迪<sup>1</sup> 张永富<sup>3</sup>

(1 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110004; 2 辽宁科技学院冶金工程系, 本溪 117022; 3 本溪钢铁(集团)公司技术中心, 本溪 117000)

**摘要** 通过 1700 mm 热连轧机组对轮辐钢(0.09C、0.12Si、0.98Mn、0.010P、0.005S、0.010Nb、0.04Al)进行 830~890 °C 终轧温度和 620~680 °C 卷取温度的轧制试验。结果表明,板坯加热温度 1 230~1 250 °C、终轧温度(870±15)°C、卷取温度(660±15)°C 生产的车轮用轮辐钢板的组织为细铁素体加少量的珠光体,屈服强度 335~380 MPa,抗拉强度 430~485 MPa,伸长率 26%~31%,每卷带钢的纵向强度差为 13~37 MPa,在车轮制作过程中冲压成型良好,冲废率小于 0.3%。

**关键词** 车轮钢 控轧控冷 性能

## Production of Steel Plate for Wheel Spoke by Controlled Rolling and Cooling Technology

Ma Haitao<sup>1,2</sup>, Wu Di<sup>1</sup> and Zhang Yongfu<sup>3</sup>

(1 The State Key Lab of Rolling Technology and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004;  
2 Dept of Metallurgical Engineering, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi 117022;  
3 Technology Center, Benxi Iron and Steel (Group) Co Ltd, Benxi 117000)

**Abstract** Rolling test on steel plate (0.09C, 0.12Si, 0.98Mn, 0.010P, 0.005S, 0.010Nb, 0.04Al) for wheel spoke with finishing rolling temperature 830~890 °C and coiling temperature 620~680 °C has been carried out by 1700mm hot rolling mill train. Results showed that with slab heating temperature 1 230~1 250 °C, finishing rolling temperature 870±15 °C, coiling temperature 660±15 °C, the structure of steel plate for wheel spoke was fine ferrite + minor pearlite, the yield strength of steel was 335~380MPa, tensile strength 430~485MPa, elongation 26%~31%, the longitudinal strength difference of each steel coil was 13~37MPa, and the punching formability during vehicle wheel manufacturing was excellent with punching rejection rate less than 0.3%.

**Material Index** Steel for Vehicle Wheel, Controlled Rolling and Cooling, Performance

近年来,汽车工业为了提高安全性和节省能源,所用钢板已向高强度和轻量化方向发展,市场对汽车用高强度结构钢板的需求日益增加。采用控轧控冷工艺生产,可以使钢板的铁素体晶粒细化,从而有效地提高钢板的强度。同时,晶粒细化对延伸凸缘性能(即扩孔性能)也有很大的影响。因此,对控轧控冷工艺进行严格控制是获得热轧车轮用轮辐钢板优良性能的决定条件。

### 1 生产工艺的确定

#### 1.1 CCT 曲线的测定

钢的动态 CCT 曲线即钢的过冷奥氏体连续冷却转变曲线,反映了不同冷却条件下,转变温度、时间与转变产物之间的关系,是正确制定热连轧工艺制度的依据<sup>[1]</sup>。

原料取自工业生产的厚度为 40 mm 的热轧中间坯,炉号 DL0313418。化学成分(%)为:0.09C、0.12Si、0.98Mn、0.010P、0.005S、0.010Nb、0.04Al,

在 Φ300 mm 轧机上轧成 12 mm 厚的板材。机加工成 Φ8 mm、长 15 mm 的圆柱形状试样。

实验在 Gleeble-2000 热模拟试验机上进行。试样以 20 °C/s 的加热速度加热至 1 200 °C,保温 3 min;然后以 10 °C/s 的冷却速度冷却至 870 °C,保温 3 s;以 5 s<sup>-1</sup> 的变形速度压缩变形 55%;再分别以 0.5~20 °C/s 的冷却速度连续冷却至室温。采用热膨胀法测定实验用钢的动态 CCT 曲线见图 1,实验钢的临界点为 Ac<sub>1</sub> = 710 °C、Ac<sub>3</sub> = 880 °C。由于形变增加了形核位置和能量,使相变温度提高,钢的动态 CCT 曲线中,变形后 A→F、A→P 与 A→B 转变均发生了向高温区的左移;动态 CCT 曲线较静态 CCT 曲线维氏硬度升高。

#### 1.2 加热工艺

加热炉采用步进梁式连续加热炉,连铸坯采用热送热装。降低板坯的加热温度是细化奥氏体晶粒最有效的方法之一,为此将车轮用钢的加热温度确定为 1 230~1 250 °C,防止晶粒过分长大。为保证钢

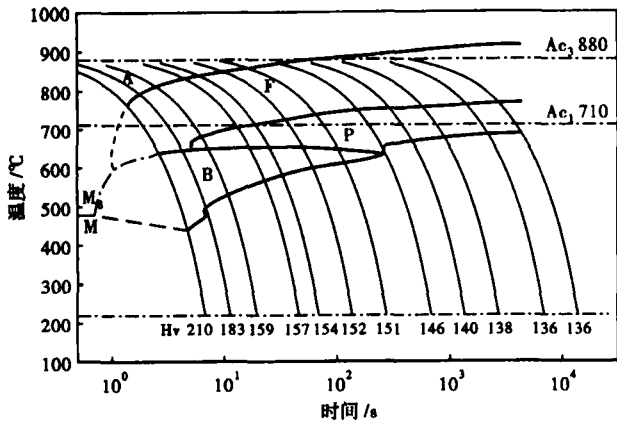


图 1 轮辐钢 870 °C 变形动态连续冷却转变 (CCT) 曲线  
Fig. 1 Dynamic CCT curves of steel for wheel spoke deformed at 870 °C

坏的表面质量,在加热时严格控制炉内的气氛(弱氧化性气氛)以及升温速度,采用高温快速加热,从根本上避免了板坯及热轧卷板表面裂纹的出现。

### 1.3 终轧及卷取温度

在化学成分相同的前提下,选取炉号为 DL0338668 的连铸坯通过 1 700 mm 热连轧机组进行不同终轧温度(分别为 830, 850, 870, 890 °C)和卷取温度(分别为 620, 640, 660, 680 °C)的轧制试验,获得试验结果如表 1。根据表 1 中数据,绘制终轧温度、卷取温度与性能之间的关系(图 2)。终轧温度应接近相转变温度  $Ar_3$ , 轧后马上进行水冷,在相转变过程中得到细晶粒铁素体,对强韧性指标有利。终轧温度低于  $Ar_3$  过多,会引起带状组织,降低横向冲击韧性,增加钢的各向异性。

表 1 不同工艺轧制的试验轮辐钢的力学性能

Table 1 Mechanical properties of test steel for wheel spoke rolled by different rolling process

序号	终轧温度/°C	卷取温度/°C	$R_{cl}/$ MPa	$R_m/$ MPa	$A/$ %	冷弯 180° ( $d=a$ )	$R_{cl}/R_m$
1	830		395	500	28	完好	0.79
2	850		380	485	29	完好	0.78
3	870	660	360	465	32	完好	0.77
4	890		345	455	34	完好	0.76
5		620	400	495	26	完好	0.81
6		640	390	490	27	完好	0.80
7	870	660	360	465	32	完好	0.77
8		680	340	460	35	完好	0.74

注:成品厚度 13.5 mm,温度控制精度为  $\pm 15$  °C 可达到带钢全长的 90% 以上, a 为板厚。

图 2(a) 示出了加热至 1 230 °C 后,在不同的终轧温度下轧制,并在 660 °C 卷取时该车轮钢的屈服强度( $R_{cl}$ )、抗拉强度( $R_m$ )和伸长率( $A$ )变化曲线。由表 1 可见,终轧温度 830, 850, 890 °C 时钢板屈服

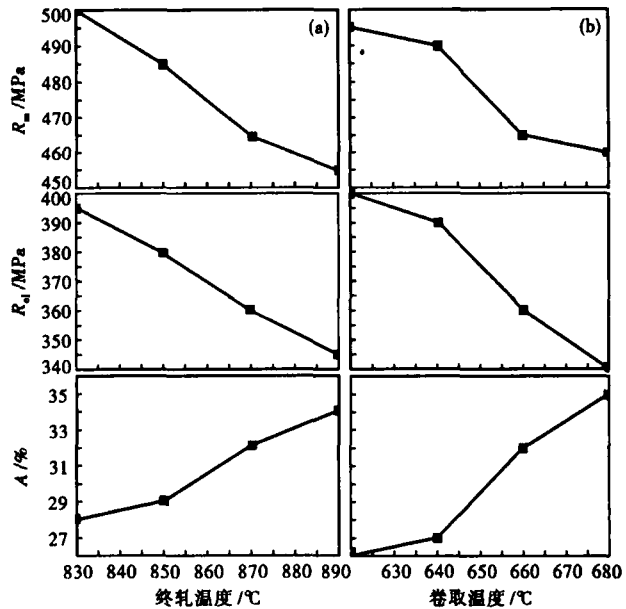


图 2 终轧温度(a)、卷取温度(b)对轮辐钢板力学性能的影响:(a)卷取温度 660 °C;(b)终轧温度 870 °C

Fig. 2 Effect of finishing temperature (a) and coiling temperature (b) on mechanical properties of steel plate for wheel spoke: (a) coiling temperature 660 °C; (b) finishing temperature 870 °C

比较大;而终轧温度为 870 °C 时钢板显微组织为细铁素体 + 珠光体组织,屈服比最小。因此,终轧目标温度定为  $(870 \pm 15)$  °C。

控制冷却实质上是用高于空冷的速度冷却至相变温度区域。图 2(b) 示出了加热至 1 230 °C 后在 870 °C 进行终轧,然后在各不相同的卷取温度下卷取时钢板力学性能变化曲线。由图 2 可见,卷取温度对力学性能的影响比终轧温度更显著,660 °C 卷取时,可以充分发挥轧后冷却的作用。

从图 2 中可以看出,在化学成分相同的前提下,随着终轧温度、卷取温度的下降, $R_{cl}$ 、 $R_m$  上升,  $A$  下降,对于 13.5 mm 厚的钢板,在  $(870 \pm 15)$  °C 终轧,即能保证所需的强度,又能够获得良好的塑性。

### 1.4 冷却工艺

整个层冷系统被分为 21 个冷却段,冷却段总长度 96 m。包括 92 组上部喷淋集水管和 92 组底部喷淋集水管,单独进行气动阀开关控制。这 21 个冷却段由 19 个微调段和 2 个精调段组成。

车轮钢组织以细铁素体和少量的珠光体为主,为获得理想的组织,采用 3 段式控制冷却工艺。第 1 段为带钢终轧后,采用微调段第 2、3、4 冷却段的喷水冷却方式使带钢冷却到一定温度。第 2 段采用空冷方式,第 3 段采用精调段第 21 冷却段喷水冷却方式。在层流冷却时,为保证热轧带钢纵向性能均

匀性,带钢头部 20 m 处投入热头功能,带钢尾部 30 m 处投入热尾功能。

## 2 结果讨论

为提高钢的强韧性,在 TMCP 工艺中大量使用铌、钒等微合金元素。Nb 的细化晶粒作用最大,综合性能优于 V<sup>[2]</sup>;汽车车轮轮辐实际工况下承受着很高的交变应力,还要考虑蠕变对其的影响。在钢中加 Mo、Nb 可以提高其蠕变性能,但 Mo 铁比较昂贵。因此,研究轮辐钢采用 Nb 微合金化,将铌的标准控制在 $\leq 0.03\%$ 。

为充分发挥低 C、Mn 钢 Nb 微合金化的优势,发挥 Nb 的碳氮化物在钢中沉淀析出抑制奥氏体形变再结晶,阻止奥氏体晶粒长大的作用,轧制时要采用控制冷却措施,实施低温终轧。控制总压下量和道次压下量,增加形变带和形变诱导析出的效果。此外,控制冷却速度是非常重要的,冷却速度越快,通过相变温度区的过冷度越大,从而提高铁素体的形核速度并降低铁素体晶粒的长大速度,使得铁素体晶粒细化。由于采用 3 段式控制冷却工艺,钢板组织细化。3 段式控制的 7\* 试样(表 1 中 7\* 样)金相组织为细铁素体加少量的珠光体,晶粒度为 10~11 级。

研究含 Nb 轮辐钢晶粒细化的主要原因有两个方面:(1)形变诱导相变提高了铁素体的形核率。在奥氏体未再结晶区多道次累积变形。奥氏体晶粒除了被压扁、拉长外,在晶内也会形成大量的变形带<sup>[3]</sup>,使铁素体形核率大大提高、形成了许多微细的铁素体,铁素体的百分数加大了,相应地珠光体数量减少了。(2)形变诱导析出使 Nb 从奥氏体中大量沉淀,降低了固溶于奥氏体中的 Nb 含量,随着变形量增大及诱导析出作用的增强。相变速度加快,铁素体形核率提高<sup>[4]</sup>。

控轧控冷工艺对车轮用轮辐钢板的组织性能产生影响。终轧温度越低,奥氏体向铁素体转变的形核驱动力就越大,促使晶内成核<sup>[5]</sup>,铁素体晶粒越细小。根据 Hall-Petch 公式,晶粒越细,屈服强度越高,屈强比随之增高。但采用合理的控轧控冷工艺,使组织中铁素体量相对增多(图 1),试验用钢屈强比均较低,在 4 种终轧温度下,3\* 试样屈强比最低(表 1),出现图 2(a)的性能变化;根据实验用钢的动态 CCT 曲线,卷取温度越高,先共析铁素体含量也越多,伸长率越高(图 2b);而 680℃ 卷取时的组织相对粗大一些,造成了屈强比的降低(表 1)。

延伸凸缘性能(即扩孔性能)是评价钢板冲压成形性能的主要指标之一。对扩孔性能来说,最佳的显微组织是细铁素体加少量的珠光体<sup>[2]</sup>。研究轮辐用钢经过控轧控冷工艺处理后得到了这样的组织,钢板无疑具有最佳的扩孔性能。

控轧控冷使车轮用轮辐钢板的组织得以细化,此外,析出强化、固溶强化和位错强化等强化机制对性能也有贡献。随着终轧温度、卷取温度的降低或轧后冷却速度加快,钢板的强度升高。就伸长率而言,晶界强化对伸长率的提高产生了有利的作用。微合金化低合金钢通过控轧控冷工艺得到细小的铁素体晶粒加上少量的珠光体,借助细晶强化和析出强化获得了高的强度和良好的冲压成形性能。

## 3 结语

采用试验的控轧控冷工艺生产的轮辐钢板性能十分理想,屈服强度为 335~380 MPa,抗拉强度为 430~485 MPa,伸长率为 26%~31%。屈强比大多数为 0.75~0.79,可满足低屈强比要求。其组织为细铁素体加少量的珠光体。每卷带钢的纵向强度差最大为 37 MPa,最小仅为 13 MPa,纵向性能均匀性明显改善。

产品供龙口兴民车轮厂、正兴车轮集团有限公司、厦门日尚有限公司、褚城钢圈厂制作车轮,制作过程中钢板冲压成型性能良好,冲废率 $< 0.3\%$ 。各项性能指标达到技术标准的要求,完全能够满足用户的要求。

国家自然科学基金资助项目(50334010)

## 参考文献

- 1 李曼云,孙本荣. 钢的控制轧制和控制冷却技术手册. 北京:冶金工业出版社,1998
- 2 东涛,付俊岩. 我国微合金化技术应用和微合金化钢开发的调查. 2001 中国钢铁年会论文集(下卷). 北京:冶金工业出版社,2001
- 3 Luo H, Zhao L, Kruijver S O. Effect of Intercritical Deformation on Bainite Formation in Al-containing TRIP Steel. ISIJ International, 2003, 43:1219
- 4 蔡庆伍,余伟,董洪波,等. 控轧控冷工艺对 Nb-V 钢的组织性能析出行为的影响. 钢铁,2002,37(3):32
- 5 Weng Y Q, Sun X J, Dong H, et al. Overview on the Theory of Deformation Induced Ferrite Transformation. Iron and Steel, 2005, 40(Supply):9

马海涛(1969-),男,博士生,副教授,高级工程师,1992年东北大学毕业,材料加工工程。

收稿日期:2008-01-07