

## 700 MPa 级高强热轧双相钢 DP700 的开发

殷胜<sup>1,2</sup> 张建苏<sup>3</sup> 朱红丹<sup>4</sup>

(1 西北工业大学材料科学与工程学院,西安 710072 ;2 宝钢股份梅钢公司技术中心,南京 210039 ;  
3 宝山钢铁股份有限公司研究院,上海 201900;4 宝钢股份梅钢公司制造管理部,南京 210039)

**摘要** 阐述了在宝钢梅山基地 1780 热轧机生产线上开发的 700MPa 级热轧双相钢 DP700 (/% :C 0.08 ~ 0.12, Si 0.08 ~ 0.12, Mn 1.30 ~ 1.150, P ≤ 0.015, S ≤ 0.005, Cr 0.50 ~ 0.70, Ca ≥ 0.0015, Al ≥ 0.015) 工艺和性能,该钢板表面质量优良,屈服强度 ≥ 400 MPa,抗拉强度 ≥ 700 MPa,断后伸长率 ≥ 17% (b = 20 mm, L<sub>0</sub> = 80 mm),扩孔率 ≥ 35%,50% 存活率的疲劳极限达 475 MPa。结果表明,DP700 钢是一种具有良好应用前景的新型汽车零部件材料。

**关键词** 汽车用钢 双相钢 700 MPa 级 高疲劳性能

## Research and Development of 700 MPa Grade High Strength Hot Rolled Dual Phase Steel DP700

Yin Sheng<sup>1,2</sup>, Zhang Jiansu<sup>3</sup> and Zhu Hongdan<sup>4</sup>

(1 School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072; 2 R&D Center for Meisteel of Baosteel Research Institute, Nanjing 210039; 3 R&D Center of Baosteel Research Institute, Shanghai 201900; 4 Manufacturing department of Baosteel Meishan Co, Nanjing 210039)

**Abstract** The process and properties of 700 MPa grade hot rolled dual phase steel DP700 (/% :C 0.08 ~ 0.12, Si 0.08 ~ 0.12, Mn 1.30 ~ 1.150, P ≤ 0.015, S ≤ 0.005, Cr 0.50 ~ 0.70, Ca ≥ 0.0015, Al ≥ 0.015) development at Baosteel Meishan 1780 hot rolling mill are summarized. The developed plate has superior surface quality, its properties are Yield strength ≥ 400 MPa, Tensile strength ≥ 700 MPa, Elongation after fracture ≥ 17% (b = 20 mm, L<sub>0</sub> = 80 mm), Hole expansion rate ≥ 35%, 50% survival rate fatigue limit 475 MPa. Results show that the steel DP700 is one of new material for Auto industry with good application prospect.

**Material Index** Steel for Auto, Dual Phase Steel, 700 MPa Grada, High Fatigue Performance

为了满足汽车行业安全、环保、低成本的需求,除了零部件设计优化、生产工艺优化可以实现外,目前最常见的手段还是采用更高性能的零部件材料。鉴于此,很多钢铁生产致力于生产能够满足汽车零部件服役要求的高性能钢材。

双相钢的组织<sup>[1]</sup>是在软的铁素体基础上弥散分布着硬质的岛状马氏体。马氏体赋予材料强度,铁素体赋予材料塑性和韧性,其特点是具有高的抗拉强度,低的屈强比,无屈服点延伸,高塑性和高的加工硬化能力。正是由于这些特点,双相钢低屈强比特性使其加工时具有较低的变形抗力,高硬化能力使其加工后具有很高的强度,无屈服点延伸的特性使加工后的零件具有良好的表面质量,加上生产过程的夹杂物控制、特殊的热轧工艺,使双相钢具有良好的疲劳特性。

为此,在宝钢股份梅山基地 1780 生产线开发了一种抗拉强度为 700 MPa 热轧双相钢<sup>[2]</sup>,解决现有的汽车零部件用钢成形困难、成形后零件表面质量

差以及由此带来零件疲劳性能不足的问题。

### 1 700 MPa 级热轧双相钢的成分及工艺设计原理

汽车零部件用钢在加工过程采用冲压、剪切、焊接、折弯、辊压等工艺,因此对材料成形性和焊接性和纯净度要求较高。尤其是随着钢板强度的提高,对于钢中夹杂物、偏析等敏感程度更高,另外随着对汽车零部件服役性能要求的提高,对表面质量提出了更高的要求,因此需要精心设计钢的化学成分和炼钢、热轧工艺,才能满足市场对汽车零部件高成形、高表面和高疲劳性能的发展要求<sup>[3]</sup>。

试验钢 DP700 在宝钢梅山二炼钢 300 t 转炉冶炼,通过 LF + RH 双重精炼控制钢水纯净度,随后通过奥钢联直弧形连铸机连铸成 230 mm × 1 300 mm 板坯,连铸过热度控制在液相线 + 20 °C,控制拉速波动 0.8 ~ 1.0 m/s;板坯通过热装热送到梅钢二热轧 1780 生产线,经过可逆轧机 5 道次轧制成 42 ~ 49 mm 中间坯,随后经过 7 道次精轧,轧制成 3.5 ~ 6 mm,最后经过分段冷却:第一段冷却以一定速度

到铁素体相变区间,使材料具备足够的相变驱动力;第二段在铁素体相变区间停留一定时间,以获得一定数量的铁素体组织;第三段以大于马氏体相变最低速度的冷区使材料冷却到马氏体相变温度以下,使材料获得必须的马氏体组织;随后经过卷取机收卷经过取样检测,合格后放行。

### 1.1 化学成分设计

为使钢板获得 700 MPa 以上双相组织,考虑到材料后续的焊接、冲压等加工和服役的要求并结合梅山 1780 热轧层流冷却能力,需要合理设计化学成分、炼钢工艺和热轧工艺,充分利用相变强化、固溶强化、细晶强化等多种强化手段<sup>[4-6]</sup>,才能使材料具有理想的性能和制造成本。

传统热轧双相钢设计 Si、Cr、Mo 等合金元素的目的是通过这些合金元素改变钢的连续冷却转变 CCT 曲线,以在常规轧机获得双相钢,但存在合金成本高、含硅钢表面质量差、成品疲劳性能低等缺点。

为改善上述缺点,重新进行产品设计:针对合金成本较高的缺点,将 Mo 等合金元素取消,适当控制 Cr 含量;针对表面质量差的缺点,将 Si 含量限制在 0.15% 以下;针对疲劳性能低的缺点,将钢水进行钙处理,使夹杂物球化上浮,减少疲劳过程应力集中<sup>[7-10]</sup>。

C 是强淬透性元素,它直接影响双相钢中马氏体的体积分数和马氏体碳含量。C 含量增加使 CCT 图铁素体向右移,减少了铁素体的转变量,相对增加了马氏体的转变量,使钢的强度增加,塑性降低;硅提高奥氏体向铁素体的转变温度,促进铁素体析出,提高获得相同量铁素体所需的冷却速度,促进铁素体中的碳向奥氏体中富集,对铁素体起净化作用;Mn 是提高钢淬透性的元素,加入适量的 Mn,既可抑制珠光体的形成,又能加速铁素体的形成,Mn 可降低铁素体中的固溶碳,从而提高双相钢的塑性;Cr 也是提高钢淬透性的元素,加入适量的 Cr,可抑制珠光体的形成;Cr 降低 Bs 作用大于 Mn,对 Ms 点(马氏体开始相变温度)的降低作用小于 Mn;P 在钢中的都固溶于铁素体中,可强化双相钢铁素体,但由于 P 在钢中容易偏析,且在珠光体和铁素体中扩散很慢,不容易均匀化而产生高磷带和低磷带;S 在钢中形成沿轧制方向排列的 MnS 夹杂对冷弯有显著的影响。在冲压变形和受力疲劳过程中,应力集中首先使硫化物夹杂裂开,或使夹杂与金属基体分离产生

表 1 DP700 试验钢的化学成分/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ca	Al <sub>T</sub>
0.08 ~ 0.12	0.08 ~ 0.12	1.30 ~ 1.50	≤0.015	≤0.005	0.50 ~ 0.70	≥0.0015	≥0.015

显微孔洞。

为满足 700 MPa 级双相钢加工工艺要求,乘用 Ca 处理<sup>[11]</sup>,Ca 与 S 结合降低带状组织级别,另可实现夹杂物变性使夹杂物球化,均匀分布夹杂物,防止双相钢制成的零件在服役过程中因夹杂物处应力集中导致开裂。

DP700 钢的化学成分设计如表 1 所示

利用 Jmatpro 计算 DP700 钢相变特性,如图 1,以冷速 60 °C/s 为例,Fs(铁素体开始相变温度)为 719 °C,Ms(马氏体开始相变温度)为 426 °C,M50%(马氏体相变 50% 温度)为 393 °C,M90%(马氏体相变 90% 温度)为 317 °C。

### 1.2 热轧工艺设计

#### 1.2.1 加热工艺

根据 DP700 试验钢设计,加热工艺主要是考虑 1780 轧制负荷,设计出炉温度为 1 190 ~ 1 250 °C,加热时间为 180 ~ 300 min。

#### 1.2.2 终轧温度

精轧温度设定有两方面的作用,一方面通过奥氏体未再结晶区轧制,得到内部有变形带的扁平状奥氏体晶粒,在随后的层流冷却过程中转变成细小的铁素体晶粒,发挥细晶强化的作用。在成分设计下 Ar<sub>3</sub>(铁素体开始相变温度)温度为 719 °C,兼顾考虑轧制负荷,设计精轧结束温度设定为 810 ~ 850 °C。

#### 1.2.3 分段冷却

DP700 钢层流冷却设计是获得良好组织的核心

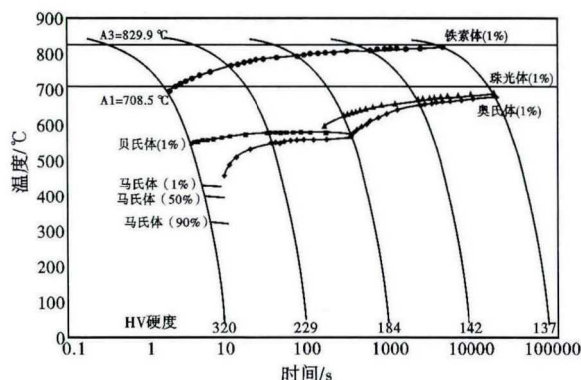


图 1 DP700 钢连续冷却转变曲线

Fig. 1 Continuous cooling transformation curves of steel DP700

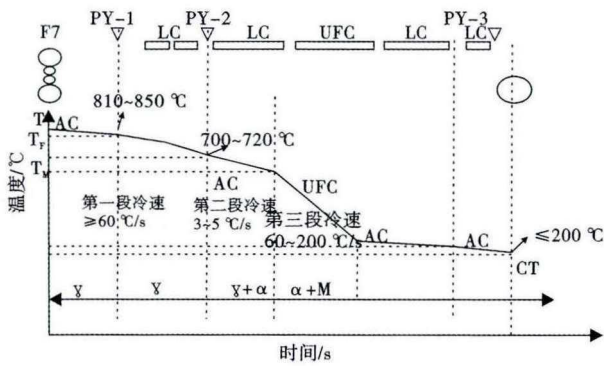


图 2 DP700 钢分段冷却工艺示意图

Fig. 2 Schematics of segmented cooling process of steel DP700

表 2 试验钢 DP700 的力学性能

Table 2 Mechanical properties of tested steel DP700

项目	上屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率 A <sub>80</sub> /%	扩孔率/%
技术要求	≥400	≥700	≥17	≥35%
实测	440~490	720~760	18~21	36~40

工艺,分成三段,见图 2,最终获得确定数量和形态的铁素体和马氏体组织。

第一段冷却是精轧出口到第二段冷却开始前,主要控制冷却速度和冷却终点。冷却速度控制主要目的是充分保持相变前奥氏体相变动力;第一段冷却终点需为铁素体相变区间,以使相变后的铁素体具有足够的量和良好的等轴形态。根据 DP700 钢相变特点,第一段冷却速度为 60 °C/s 以上,冷却方式为加强型层流水冷却,第一段冷却终点为 700 ~ 720 °C。

第二段冷却是第一段冷却结束到第三段冷却开始,主要控制冷却速度和冷却时间,目的是控制铁素

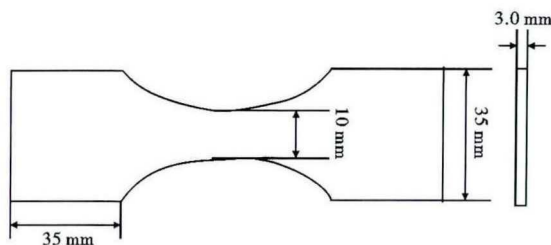


图 4 DP700 钢横向疲劳试样尺寸

Fig. 4 Steel DP700 transverse specimen size for fatigue test

体的数量和形态。根据 DP700 钢相变特点和梅山基地 1780 层流设备布置,此段冷却速度为空气冷却,冷却时间为 5 ~ 7 s。

第三段冷却为第二段冷却结束到冷却卷取温度结束,主要控制冷却速度和冷却终点。冷却速度大于马氏体相变最小速度,冷却终点为马氏体相变点以下。根据 DP700 钢相变特点,第三段冷却速度 60 ~ 200 °C/s,冷却方式为加强型层流水冷却,冷却终点为 200 °C 以下。

## 2 试制结果

### 2.1 力学性能

为了验证本文设计钢板力学性能,对钢卷头、中、尾进行取样,按照《GB/T228. 1-2010 金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》进行拉伸试验,其力学性能见表 2。

### 2.2 金相组织和表面质量

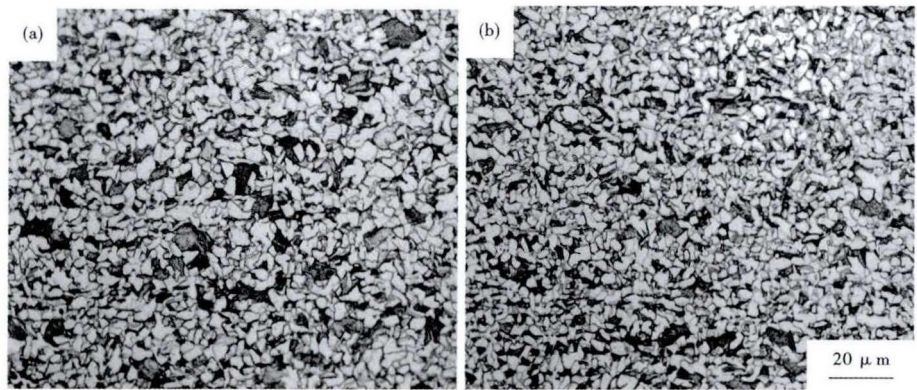


图 3 DP700 钢卷头(a)和卷尾(b)金相组织,铁素体 + 马氏体

Fig. 3 Metallographic structure of steel DP700 at coil head (a) and at coil tail (b), Ferrite + Martensite

取现场卷头和卷尾试样,作金相组织分析,采用

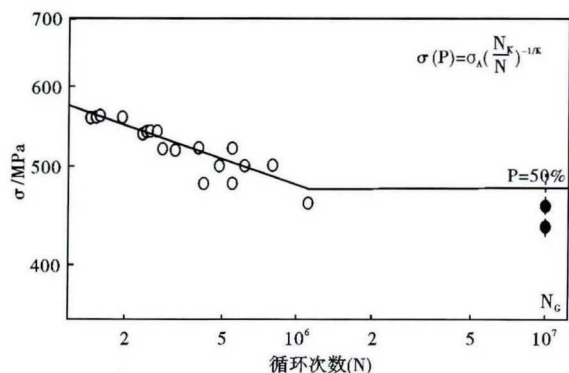


图 5 DP700 钢 S-N 疲劳曲线

Fig. 5 S-N fatigue curve of steel DP700

5% 硝酸酒精腐蚀,卷头和卷尾组织见图 3(a)和(b),可知卷头和卷尾组织均为铁素体和马氏体。

### 2.3 疲劳分析

采用 GBT 3075-2008 金属材料疲劳试验轴向力控制方法,拉-拉加载方式,加工成图 4 的疲劳试样,对 DP700 钢进行疲劳分析,疲劳试验过程参数和检测结果为:应力比:R = 0.1;加载波形:正弦波;循环基数:1 × 10<sup>7</sup>,其疲劳性能见图 5,可知 50% 存活率疲劳极限为 475 MPa,可知 DP700 钢具有良好的疲劳性能。

## 3 结论

(1)利用合理的成分设计和炼钢、热轧工艺组

合,开发了低成本、高强度、高表面质量 700 MPa 级热轧双相钢。

(2)钢板的显微组织为铁素体和马氏体,屈服强度 > 400 MPa,抗拉强度 > 700 MPa,断后伸长率 A<sub>80</sub> > 17%,扩孔率 > 35%,具有良好的强韧性。

(3)在应力比 R = 0.1;加载波形:正弦波;循环基数:1 × 10<sup>7</sup>,对试验钢作疲劳分析,共结果 50% 存活率疲劳极限为 475 MPa,疲劳性能良好。

### 参考文献

[1] 马鸣图,吴宝榕,双相钢. 物理与力学冶金[M]. 北京:冶金工业出版社,1988.

[2] 黄全伟,宋仁伯,周乐育,等. 700 MPa 级热轧双相钢的组织 and 性能[J]. 钢铁研究学报,2009,21(8):21-24.

[3] 康永林. 汽车用双相钢板的开发与研究进展[J]. 汽车工艺与材料,2006(5):1-5.

[4] 贾志伟. C-Si-Mn 系热轧双相钢的生产工艺[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2007.

[5] 利成宁. 500 ~ 700 MPa 低成本热轧双相钢的研究与开发[D]. 沈阳:东北大学材料加工工程学院,2012.

[6] 刘彦庆,刘静华. 双相钢低周疲劳断裂机理的研究[J]. 金属热处理学报,1991,12(4):1-8.

[7] Majumdar S, Roy S and Ray K K. Fatigue Performance of Dual-Phase Steels for Automotive Wheel Application[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structure, 31 May 2016, Published on Line: 1-18.

[8] Jha G, Das S, Lodh A and Haldar. A Development of Hot Rolled Steel Sheet With 600 MPa UTS for Automotive Wheel Application[J]. Mater. Sci. Eng. 2012 A(552), 457-463.

[9] Hanai S, Watanabe K and Esaka K. The Manufacture of Si-Mn as-hot-Rolled Dual Phase Steel Sheets [J]. Tetsu-To-Hagane. 1982, 68, 1306-1312.

[10] Hadianfard M J. Low Cycle Fatigue Behavior and Failure Mechanism of a Dual-Phase Steel [J]. Mater. Sci. Eng. (2009) A, 499, 493-499.

[11] 郎炜昀. 镁、钙处理对钢中非金属夹杂物的变质效果[D]. 沈阳:东北大学材料与冶金学院,2014.

殷 胜(1980-),男,硕士(2004 年南京理工大学),高级工程师,2002 年南京理工大学(本科)毕业,双相钢产品研发。E-mail: yinsheng@baosteel.com

收稿日期:2020-06-10

# 欢迎订阅《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183      定价:16.00 元/期 96.00 元/年      邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号、新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社

电话:0714-6297386 6297313 0714-6297888-8010