

# 连续镀锌 DP600 双相钢的组织与性能研究

Research on Microstructure and Property of  
Continuous Galvanizing Dual Phase  
Steel DP600

窦婷婷<sup>1</sup>, 康永林<sup>1</sup>, 于浩<sup>1</sup>, 邝霜<sup>1</sup>, 尹显东<sup>1,2</sup>, 刘仁东<sup>2</sup>

(1 北京科技大学 材料学院, 北京 100083; 2 鞍山钢铁集团公司, 辽宁 鞍山 114001)

DOU Ting-ting<sup>1</sup>, KANG Yong-lin<sup>1</sup>, YU Hao<sup>1</sup>,

KUANG Shuang<sup>1</sup>, YIN Xian-dong<sup>1,2</sup>, LIU Ren-dong<sup>2</sup>

(1 School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2 Anshan Iron & Steel Group Corporation, Anshan 114001, Liaoning, China)

**摘要:** 制备了连续镀锌 DP600 双相钢, 利用光学显微镜、SEM、EBSD 技术对其显微组织进行了观察和分析; 利用 X 射线衍射和 EBSD 技术分别对钢板的宏观组织和微观组织进行了测定; 并对其力学性能、 $n$  值和  $r$  值进行了检测。实验结果表明: 试样组织为铁素体 + 马氏体岛的双相组织, 该钢板具有良好的综合力学性能和成形性, 达到了 DP600 级别双相钢的性能要求。

**关键词:** 双相钢; 显微组织; 性能; 组织

**中图分类号:** TG142.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2006)Suppl-0120-04

**Abstract:** Continuous galvanizing dual phase steel (DP600) was prepared in laboratory. The microstructure was observed and analyzed by optical microscopy, SEM and electron back scattered diffraction (EBSD) method; the macrotexture and microtexture of tested steel were analyzed by using X-ray diffraction and EBSD method respectively; the mechanical properties,  $n$  value and  $r$  value of tested steel were also detected. The results of experiments indicated that the microstructure was comprised of ferrite and martensite; the general mechanical properties and formability are preferable, the tested steel satisfied the desired properties of DP600 class of these steels.

**Key words:** dual phase steel; microstructure; property; texture

随着现代汽车向减重、节能、环保、高安全性、耐蚀性等方向的发展, 推动了汽车用高强薄钢板的研发。双相钢具有低的屈强比、高初始加工硬化速率、强度和延性的配合良好等优点, 已经发展成为一种成形性良好的高强度新型冲压用钢, 成为现代汽车用钢的重要组成部分<sup>[1]</sup>。双相钢的显微组织主要由铁素体(F)和少量(体积分数 < 20%) 马氏体(M) 组成<sup>[1]</sup>。连续镀锌双相钢在成分设计上多采用碳-锰-铬-低硅合金系统。连续镀锌双相钢的主要生产工艺过程包括: 炼钢、热轧、冷轧和 CGL(连续热镀锌), 其中 CGL 包含退火和镀锌两个工序。

本工作在实验室制备了连续镀锌 DP600 双相钢, 利用光学显微镜、SEM、EBSD 技术对其显微组织进行了观察; 利用 X 射线衍射和 EBSD 技术分别对钢板的

宏观组织和微观组织进行了分析; 并对其力学性能和  $n$  值、 $r$  值进行了检测。

## 1 实验材料及方法

实验用钢经 200kg 真空感应炉冶炼, 其化学成分见表 1, 锻造后进行热轧, 热轧采用奥氏体完全再结晶区粗轧与奥氏体未再结晶区精轧两阶段轧制, 终轧温度 962℃, 水冷后模拟 750℃ 卷取, 终轧厚度约 5mm。热轧板经酸洗后冷轧, 冷轧压下量为 80%, 然后在 Gleeble-3800 热/力模拟试验机上模拟连续镀锌工艺, 工艺制度如图 1 所示, 其中加热速度 HR 为 14℃/s, 加热温度  $T$  为 820℃, 第一冷速 CR<sub>1</sub> 为 16℃/s, 镀锌温度为 460℃, 第二冷速 CR<sub>2</sub> 为 14℃/s。

表 1 实验用钢的化学成分(质量分数/ %)

Table 1 Chemical composition of tested steel (mass fraction/ %)

C	Si	Mn	P	S	Al	N	Cr
0.06 ~ 0.10	0.05	1.40 ~ 2.00	0.015	0.01	0.02 ~ 0.07	0.004	0.30 ~ 0.50

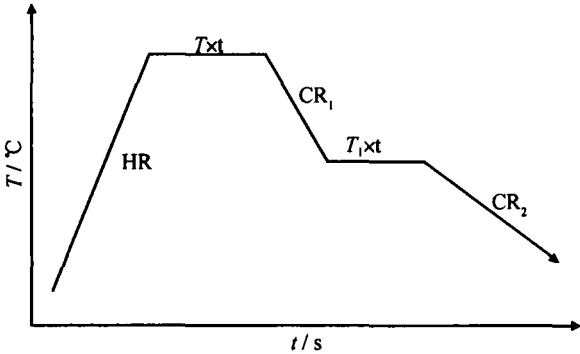


图 1 连续镀锌工艺制度

Fig. 1 The simulation technology of continuous galvanizing

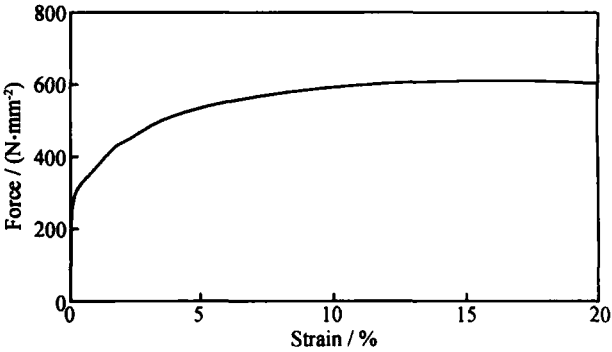


图 2 实验用钢的应力应变曲线

Fig. 2 The stress-strain curve of tested steel

利用光学显微镜和扫描电子显微镜观察显微组织;宏观组织样品(12mm ×24mm)表面经研磨后在 D8 GADDS 型 X 射线快速取向分析仪上分别测得 {110}、{200} 和 {211} 三张不完整极图,并计算得到取向分布函数 ODF 及反极图;微区组织样品(7mm ×8mm)表面经研磨、电解抛光和浸蚀后通过 EBSD 观察其微观组织及其取向;力学性能测试在电子万能拉伸试验机上进行。

2 实验结果与分析

2.1 实验用连续镀锌双相钢的力学性能

静态拉伸下的工程应力-应变曲线见图 2,其力学性能指标见表 2。结果表明,实验用钢具有高的抗拉强度和低的屈强比,抗拉强度大于 600MPa,屈强比为 0.52;高的初始加工硬化速率,  $n = 0.198$ ,高的  $n$  值能够有利于防止材料在成形过程中早期鼓起和褶皱的发生。从图 2 的应力-应变曲线可以看出,应力-应变曲线平滑,无物理屈服点和屈服延伸区,而且均匀延伸区范围较宽,这可以避免成形零件表面起皱,而不需要附加的精整轧制或其他附加操作。

表 2 实验用钢的力学性能、 $n$  值和  $r$  值

Table 2 Mechanical properties,  $n$  value and  $r$  value of tested steel

$p_{0.2}/\text{MPa}$	$b/\text{MPa}$	$p_{0.2}/b$	$r/\%$	$n$	$r$
316	607	0.52	22.7	0.198	0.76

实验用钢表现出来的低屈服强度与连续屈服的特

征,是由于在将双相钢加热到(+)临界区处理时,铁素体中大量的碳(氮)化物沉淀溶解或部分溶解,在随后的快冷过程中来不及析出或以极细小的颗粒重新析出,当质点的尺寸很小时,位错线将刚性通过粒子而不发生弯曲,这样就大大减弱了原来的强化效应,使双相钢的屈服强度显著降低,同时由于快冷过程中会发生马氏体相变,马氏体相变时体积膨胀诱发周围铁素体内产生大量的可动位错,在较低应力下位错源就被激活,从而双相钢表现出连续屈服<sup>[2]</sup>。

2.2 实验用连续镀锌双相钢显微组织

在热处理后的实验用钢板上截取金相试样,试样经研磨、抛光后,用 4% 硝酸酒精溶液浸蚀,然后分别在光学显微镜和扫描电镜下进行组织观察。

图 3 为实验用钢连续镀锌后的最终组织。在光学显微镜下,可以观察到实验用连续镀锌双相钢的最终组织为铁素体和马氏体岛状组织,但效果不太明显,较难辨认图 3a。扫描电镜下,图 3b 中可以观察到灰色的铁素体基体上分布着亮白色的马氏体,同时还可以观察到具有亮白色边圈,心部呈灰色的岛状组织,这是由于 Mn 通过铁素体或沿铁素体晶界扩散时,在奥氏体岛的周围形成了高 Mn 的边圈,使得奥氏体岛的边部比中心有更高的淬透性,从而在冷却过程中形成了高锰的马氏体边圈及中心部分形成的渗碳体加铁素体的聚集体。

2.3 宏观结构

双相钢作为一类新型的冲压成型用低合金高强度钢,具有良好的深冲性能。衡量深冲性能的主要指标是塑性应变比  $r$  值,研究指出<sup>[3]</sup>,获得较强的 {111} 纤

维织构能显著提高钢板的深冲性能(高的  $r$  值),因此,研究双相钢冷轧织构和退火织构的形成规律及其之间的联系,对提高双相钢的深冲性能具有重要意义。

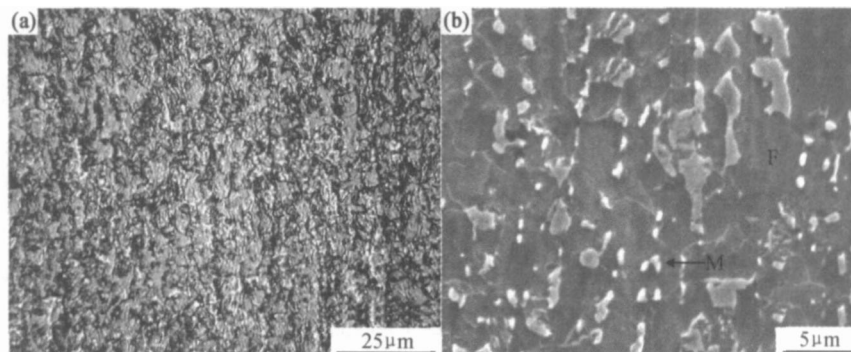


图3 实验用钢退火后的显微组织 (a)光学显微组织;(b)SEM 组织

Fig. 3 The microstructures of tested steel (a)optical microstructure;(b)SEM microstructure

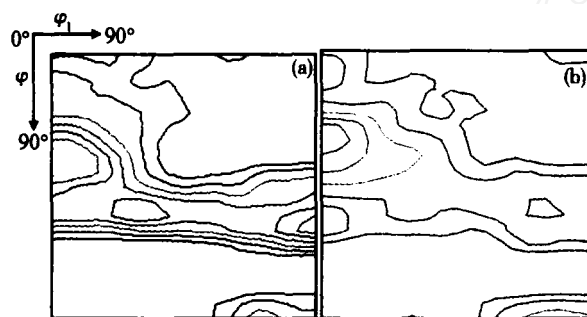


图4 冷轧态和退火态  $\rho = 45^\circ$  ODF 截面图(密度水平:

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7) (a)冷轧态(密度最大值 7.93);

(b)退火态(密度最大值 5.91)

Fig. 4  $\rho = 45^\circ$  Section of ODFs of cold rolled and annealed tested steel(intensity level:1, 2, 3, 4, 5, 6, 7) (a)cold rolled tested steel(the maximum intensity is 7.93);(b)annealed tested steel (the maximum intensity is 5.91)

冷轧宏观织构主要由 纤维织构( $\{111\}$  ND)和取向线上的 $\{112\}$   $\{110\}$  织构组成(图 4a),还存在较弱的其他立方织构,取向密度最强点在 $\{112\}$   $\{110\}$ , 密度值 7.93, 纤维织构在  $\rho = 45^\circ$  截面图中基本呈均匀分布,最强点在 $\{111\}$   $\{112\}$  取向点, $\{111\}$   $\{110\}$  次之,强度级别仅差 1 级左右。如图 4b 所示,退火后 纤维织构的取向密度下降 2 - 3 级,呈均匀分布, 取向线上的 $\{112\}$   $\{110\}$  织构下降 2 级,取向密度最强点仍然在 $\{112\}$   $\{110\}$ ,但密度值减弱到 5.91。实验用钢在退火后没有形成很强的 $\{111\}$ 纤维织构,而且还有不利于深冲性能的织构存在,这与实验用钢的退火工艺、化学成分、卷曲温度和冷轧压下率等因素有密切关系,具体的机理还有待进一步研究。

## 2.4 EBSD 微观组织及取向分析

近几年发展的 EBSD(电子背散射衍射)技术正迅

在冷轧钢板和退火钢板上分别截取试样进行织构测定,实验用钢的冷轧态和退火态  $\rho = 45^\circ$  ODF 截面图如图 4 所示。

速成为显微(亚微米)层次上的晶体分析手段,与 X 射线衍射宏观织构分析相比,EBSD 系统能揭示局部区域的微观取向分布以及晶界或相界的取向差分布、微观组织与晶粒取向的直接联系,为从织构角度来分析显微组织的演变提供了基础<sup>[4]</sup>。

在退火后的钢板上截取试样进行 EBSD 分析,由图 5 和图 6 可知,最终组织中铁素体晶粒内有相当数量的亚晶存在,但铁素体晶粒间多为大角度晶界( $> 15^\circ$ ),这是因为在连续镀锌的快速加热过程中,铁素体将迅速发生再结晶,一般在达到预定的临界区退火温度之前,再结晶过程就会完成<sup>[5]</sup>,随着再结晶的进行,相近取向亚晶之间的合并或者大角度晶界的移动,导致了亚晶数量的减少,从而晶粒之间取向差呈大角度关系所占的比例上升,呈小角度关系所占的比例下降。

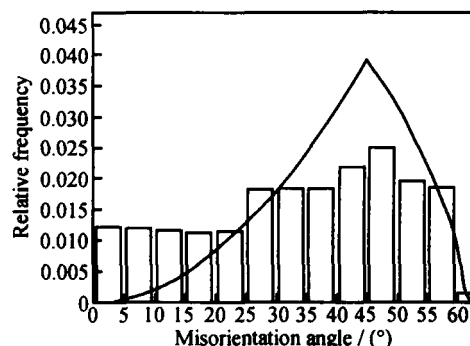


图5 晶粒的取向差分布图

Fig. 5 Misorientation angle distribution

图 7 是根据 EBSD 所测数据绘制的  $\rho = 45^\circ$  的 ODF 截面图,结果表明,退火后试样的微观织构主要由 纤维织构( $\{111\}$  ND)和 取向线上的 $\{001\}$   $\{110\}$  织构组成,取向密度最强点在 取向线上的

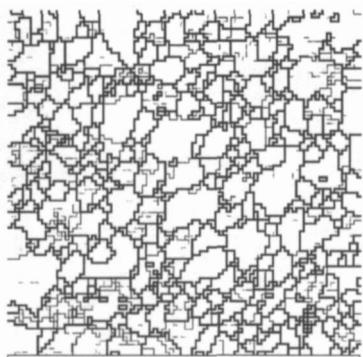
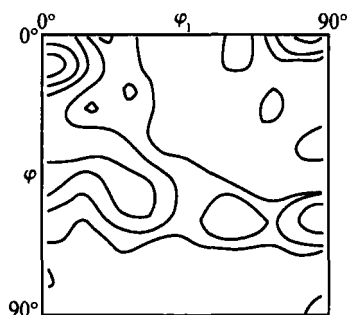


图6 按晶粒取向差绘制的组织

Fig.6 Microstructure plotted based on misorientation

{001} 110 , 纤维结构较弱,这与 X 射线衍射方法测得的退火后宏观织构结果基本一致。

图7 EBSD 测得的  $\gamma = 45^\circ$  ODF

截面图(密度水平:1,2,4,6,8)

Fig.7  $\gamma = 45^\circ$  Section of ODF based on the data of EBSD(intensity level:1,2,4,6,8)

### 3 结论

(1)在实验室模拟制备了连续镀锌 DP600 双相钢。其力学性能为:  $\sigma_{0.2} = 316\text{MPa}$  ,  $\sigma_b = 607\text{MPa}$  ,屈

强比为 0.52 ,  $\delta = 22.7\%$  ,  $n = 0.198$  ,  $r = 0.76$  ,可见该钢板满足了 600 MPa 级双相钢的力学性能要求,并具有良好的成形性。

(2)实验用钢的组织为大量的铁素体加少量的马氏体双相组织,马氏体相在铁素体晶界或晶内弥散分布,铁素体晶粒之间多为大角度晶界,还有少量的小角度晶界。

(3)X 射线衍射方法测得钢板退火后的宏观织构主要由 纤维结构 (111 ND) 和 取向线上的 {112} 110 织构组成,还存在较弱的其他立方织构,其中 {112} 110 织构取向密度最强,纤维织构较弱,与 EBSD 测得的微观织构基本一致。

### 参考文献

- [1] 张梅,符仁钰,许洛萍.汽车用双相钢板的发展[J].热处理,2001,(1):5-8.
- [2] 马鸣图,吴宝榕.双相钢-物理和力学冶金[M].北京:冶金工业出版社,1988.
- [3] RAY R K, JONAS J J, HOOK R E. Cold rolling and annealing textures in low carbon and extra low carbon steels[J]. International Materials Reviews,1994,39(4):129-172.
- [4] 毛卫民.金属材料的晶体学结构与各向异性[M].北京:科学出版社,2002.
- [5] SPEICH G R, DEMAREST V A, MILLER R L. Formation of austenite during intercritical annealing of dual-phase steels[J]. Metallurgical Transactions A,1981,12:1419-1428.

作者简介:窦婷婷(1983-),女,硕士研究生,主要从事汽车板的开发与研究,联系地址:北京科技大学材料学院材加研 04-1 班 227 信箱 (100083)。

(上接第 119 页)

- [3] YOON C O, KIM J H, SONG H K, et al. Electrical conductivity and thermopower of phosphoric acid doped polyaniline[J]. Synthetic Metals, 1997, 84: 789.
- [4] WANG M X, LI J C. Electrical and ferromagnetic behavior of polyaniline composites[J]. Synthetic Metals, 1999, 101: 844.
- [5] POMFRET S J, ADAMS P N, COMFORT N P, et al. Electrical and mechanical properties of polyaniline fibres produced by a one-step wet spinning process[J]. Polymer, 2000, 41: 2265.
- [6] 王利祥,王佛松.导电聚合物——聚苯胺的研究进展[J].应用化学,1990,7(6):1.
- [7] WaN M, LI W. Porous polyaniline films with high conductivity[J]. Synthetic Metals, 1998, 92: 121.
- [8] GHOSH M, BARMAN A, MEIKAP A K, et al. Hopping transport in hcl doped conducting polyaniline[J]. Physics Letters, 1999, A260: 138.
- [9] GHOSH M, MEIKAP A K, CHATTOPADHYA Y S K, et al.

Low temperature transport properties of cl-doped conducting polyaniline[J]. Journal of Physics and Chemistry Solids, 2001, 62: 475.

- [10] 龙云泽,郑萍,张志明,等.奈磺酸掺杂对纳米管结构聚苯胺低温电阻率的影响.物理学报[J],2002,15(9):2090.
- [11] JAROSLAV S, PAVEL K, AUBREY D J. The formation of polyaniline and the nature of its structures r[J]. Polyme, 1996, 37(2):367.
- [12] MACDIARMID A G. Synthetic metals: a novel role for organic polymers[J]. Synthetic Met, 2002, 125:11.
- [13] STEJSKAL J, GILBERT R G. Polyaniline. preparation of aconducting polymer.pure appl[J]. Chem., 2002, 74(5):857.

作者简介:李靖(1978-),硕士研究生,研究方向:导电聚合物材料研究,联系地址:北京科技大学应用科学学院(100083)。