

## 冷轧变形量和退火对双相高强度钢 DP780 应力分布的影响

李秀霞

(上海电子信息职业技术学院机电工程系, 上海 201411)

**摘要** 860 °C 终轧水冷的 3 mm 双相钢 DP780 热轧板( /% :0.09C, 0.17Si, 1.94Mn, 0.009P, 0.003S, 0.23Cr) 分别经单道次压下率 1.0% 和 6.0% 冷轧至 1 mm 板, 并经 780 °C 5 h 退火处理。利用 X 射线衍射法及剥层法分别分析了双相高强度钢 DP780 不同单道次压下率冷轧后和退火后的表层残余应力及厚度方向上残余应力的分布。实验结果表明, 单道次压下率对双相钢 DP780 应力分布影响较大, 道次压下率为 6.0% 时表层残余应力值较大且随着厚度方向的深入, 应力值逐渐减小, 道次压下率为 1.0% 时表层残余应力值较小, 且随着厚度方向的深入, 应力值先增加后减小, 两者在厚度中心位置应力都达到最大压应力。退火可以显著减小残余应力, 1.0% 道次压下率钢板表层残余应力减小了 50%, 6.0% 道次压下率钢板表层残余应力减小了 75%, 两者在退火完成后厚度方向残余应力分布规律基本一致。

**关键词** 双相高强度钢 DP780 冷轧 道次压下率 退火 残余应力分布

## Effect of Cold-Rolling Percentage of Reduction and Annealing on Stress Distribution of Dual-Phase High-Strength Steel DP780

Li Xiuxia

(Mechanical and Electrical Department, Shanghai Professional-Technical Institute of Electronics and Information, Shanghai 201411)

**Abstract** The 3 mm hot-rolled plate finishing rolling at 860 °C water-cooling of dual-phase steel DP780 ( /% : 0.09C, 0.17Si, 1.94Mn, 0.009P, 0.003S, 0.23Cr) is cold-rolled to 1mm sheet respectively with single pass reduction 1.0% and 6.0%, and annealed at 780 °C for 5 h. The distribution of surface residual stress and thickness direction residual stress after cold-rolling and annealing of dual-phase high-strength steel DP780 with different single pass reduction is analyzed respectively by using X-ray diffraction and peeling method. Test results show that the effect of single pass reduction on distribution of stress in dual phase steel DP780 is great, the surface residual stress of sheet with pass reduction 6.0% is larger and with increasing the distance along thickness direction the stress gradually decreases, the surface residual stress of sheet with pass reduction 1.0% is smaller and with increasing the distance along thickness direction the stress first increases then decreases, and the compressive stress of center of thickness for both reduction is up to maximum value. The residual stress of sheet reduces markedly by annealing, that is with pass reduction 1.0% the surface residual stress of sheet decreases by 50% and with pass reduction 6.0% the surface residual stress of sheet decreases by 75%, and after annealing the distribution rule of residual stress along thickness direction with both reduction percentages is about the same.

**Material Index** Dual-Phase High-Strength Steel DP780, Cold Rolling, Pass Reduction, Annealing, Residual Stress Distribution

双相钢(DP 钢)是汽车、航空等领域常用的一种高强度钢,通过对该钢材的实际应用成果表明,该类先进高强度钢在节能、减重及提高安全性等方面都远优于原有钢材,特别成为新一代汽车用钢的发展趋势<sup>[1]</sup>。该双相钢是在低碳钢或者低碳合金钢的基础之上经过控制其轧制工艺或者是临界区热处理后得到的一种高强度钢,其组织为铁素体-马氏体双相复合组织,其特点是在细小的铁素体基体上分布着 15% 左右的硬质相,并且固溶原子可以使其得到进一步强化。DP 钢一般应用于对于强度及碰撞吸收率要求较高且成形性也要求严格的汽车零件,现在也大量用于汽车的内外板以及其他如航空等领域。它与相同抗拉强度的普通钢种对比起来,DP 钢具有很高的应变率这一特点,从而体现出了很好的

高能量吸收能力,所以其应用在汽车上会更加安全。对于 DP 钢而言,研究者对其做了大量有关于组织<sup>[2-4]</sup>、性能<sup>[5-8]</sup>、拉伸变形行为<sup>[9-10]</sup>等研究,但几乎没有关于残余应力分布方面的工作,但残余应力的分布又与显性的板型以及在后续的加工过程中表现出来的隐形板型直接相关。于是本文选取了 DP780 高强度钢,对其冷轧后及热处理后的残余应力分布情况进行了测试研究。

### 1 试验方法

本试验所采用的 DP780 双相钢由国内钢厂提供,其主要化学成分如表 1 所示。钢锭热轧开始温度为 1 150 °C,经过 8 道次轧制,累计变形量为 70% ~ 75%,终轧温度约为 860 °C,热轧完成后再进

表 1 DP780 双相钢化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of dual-phase steel DP780 / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu
0.09	0.17	1.94	0.009	0.003	0.23	0.008

行水冷,水冷后板材温度约为 810 ℃,最后再空冷到室温,这时板厚为 3.5 mm。经过酸洗打磨去除表面氧化铁皮后分别在两种不同的道次压下率 1.0% 和 6.0% 下进行冷轧,1.0% 和 6.0% 都为单道次(简称道次)压下率,冷轧板目标厚度都是 1 mm,前者轧制道次为 70 次,后者轧制道次为 12 次。冷轧完成后采用同一种退火工艺进行热处理,整个过程中退火温度为 780 ℃,保温时间为 5 h,冷却速度为 10 ℃/s。

试验一共得到 4 块钢板,板 1 为道次压下率 1.0% 的冷轧板,板 2 为道次压下率 6.0% 的冷轧板,板 3 为板 1 经过退火后的热处理板,板 4 为板 2 经过退火后的热处理板。表面处理后用 X 射线衍射法对其残余应力进行无损测试,测试仪器为 X-350A 型 X 射线应力仪。残余应力的测试分为两个部分:

(1) 试验板表面的残余应力测试,将 4 种钢板分别取 400 mm × 320 mm 大小尺寸,取图 1 所示的位置点分别进行测试。

(2) 试验板厚度方向的残余应力测试,采用剥层法测试从表面到厚度中心 0.5 mm 处的应力。

本试验所用剥层法是一种在测定材料表面及材料内部残余应力沿深度方向分布的一种应用较早的方法,它工作原理是通过化学侵蚀的方法或者切削剥层的方法使得材料内部逐层露出,从而测量和计算各层的残余应力。当试验采用 X 射线剥层法来测量材料内部应力时,在外部材料被剥除或者侵蚀掉后,将会引起材料残余应力的释放,因此被测对象内部的残余应力会产生重新分布,然后可以根据弹性力学的方法来计算剥除后测得的应力值再进行修正,从而得到未剥除时材料内部各点的实际应力值。

本实验由于材料较薄,所以采用电解抛光方法进行剥层,每块板选择同一个位置一个点进行测试,通过电解抛光时间来确定其对应抛光深度。

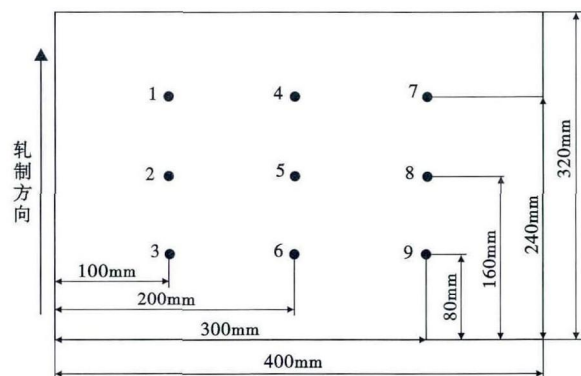


图 1 X 射线衍射仪对残余应力测试点示意图

Fig. 1 Schematics of measured points of residual stress by X-ray diffractometer

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 压下率对残余应力的影响

利用 X-350A 型 X 射线应力仪对试验板 1 及板 2 表面进行测试,利用剥层法对试验板 1 及板 2 厚度方向进行测试。测试结果如图 2、图 3 所示。

图 2 为 X 射线应力仪测试出来的道次压下率分别为 1.0% 和 6.0% 的板 1 和板 2 的表面残余应力数值。每块板测试了 9 个点,图 2 上 9 个点的位置分别与图 1 所示残余应力测试点示意图一一对应。从图 2(a) 中可以看出,道次压下率为 1.0% 的板 1 表面残余应力较小,数值在 50 ~ 80 MPa 波动,平均残余应力值在 65 MPa 左右。而道次压下率为 6.0% 的板 2 表面残余应力较大,数值在 150 ~ 200 MPa 波动,平均残余应力值在 175 MPa 左右。单道次压下率大的板 2 要比单道次压下率小的板 1 表面残余应力数值高 2 ~ 3 倍。

图 3 为利用剥层法测试出来的道次压下率分别

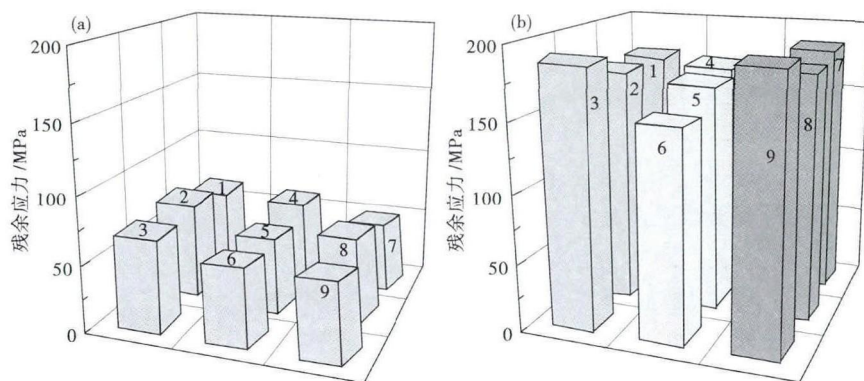


图 2 X 射线法测得薄板表面残余应力分布:(a) 板 1,道次压下率 1.0%;(b) 板 2,道次压下率 6.0%

Fig. 2 Distribution of surface residual stress of sheet measured by X-ray diffractometry: (a) sheet No1, pass reduction 1.0%; (b) sheet No2, pass reduction 6.0%

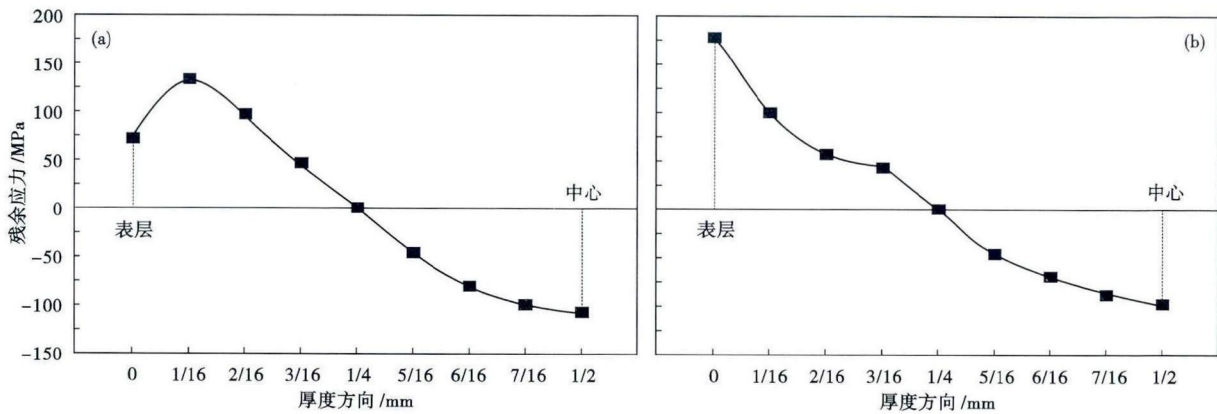


图 3 剥层法测得薄板厚度方向残余应力:(a)板 1,道次压下率 1.0%;(b)板 2,道次压下率 6.0%

Fig. 3 Residual stress along thickness direction of sheet measured by peeling method: (a) sheet No1, pass reduction 1.0%; (b) sheet No2, pass reduction 6.0%

为 1.0% 和 6.0% 的板 1 和板 2 的厚度方向残余应力数值,从钢板表面一直测试到厚度中心处。对比图 2 可以看出,两块钢板表面的残余应力值刚好可以与 X 射线法测得表面残余应力相对应。并且厚度方向也出现了完全不同的应力走向分布:

(1) 道次压下率为 1.0% 的板 1 表层残余应力小,但随着沿厚度方向的深入,残余应力有一个增大的过程,从 72 MPa 增加到 132 MPa,然后开始匀速下降,到板厚 1/4 处左右应力值降低为 0 MPa,然后应力值变为负,转变为压应力并且数值随着板厚度的深入而增加,在板厚中心处达到压应力的最大值 -106 MPa;

(2) 道次压下率为 6.0% 的板 2 表层残余应力大,随着板厚度方向上的深入,没有板 1 应力增加的过程,先是迅速减小然后缓慢减小,同样到板厚 1/4 处左右应力值降低为 0 MPa,然后应力值变为负,转变为压应力,并且数值随着板厚度的深入而增加,在板厚中心处达到压应力的最大值 -98 MPa。

综上所述,单道次压下率对 DP780 双相钢残余应力的分布影响较大,道次压下率越大,表层残余应力值越大,且厚度方向应力的变化趋势也不同,但在板厚 1/4 处到中心处应力变化趋势及大小基本一致。

### 2.2 退火对残余应力的影响

为了研究退火对残余应力的影响,同样利用 X-350A 型 X 射线应力仪对试验板 3 及板 4 表面进行

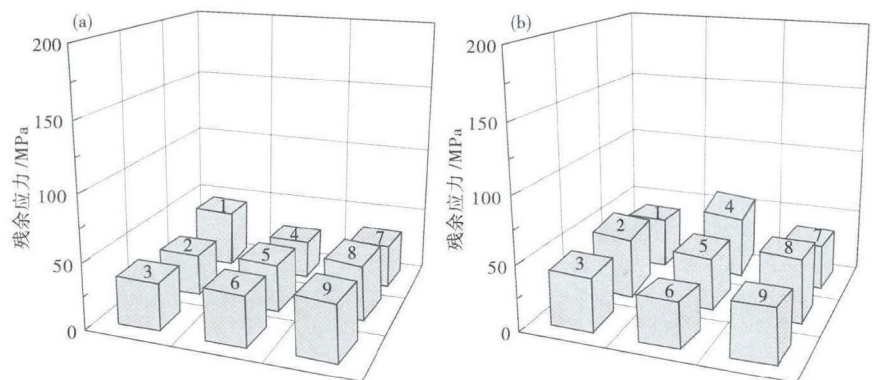


图 4 X 射线法测得薄板表面残余应力分布:(a)板 3,道次压下率 1.0% + 780 °C 退火;(b)板 4,道次压下率 6.0% + 780 °C 退火

Fig. 4 Distribution of Surface residual stress of sheet measured by X-ray diffractometry: (a) sheet No3, pass reduction 1.0% + annealed 780 °C; (b) sheet No4, pass reduction 6.0% + annealed at 780 °C

测试,利用剥层法对试验板 3 及板 4 厚度方向进行测试。板 3 和板 4 在退火前分别对应板 1 和板 2。测试结果如图 4、图 5 所示。

与图 2 测试方法一样,图 4 为 X 射线应力仪测试出来的道次压下率为 1.0% + 退火和道次压下率为 6.0% + 退火的板 3 和板 4 的表面残余应力数值。从图 4(a)中可以看出,道次压下率为 1.0% 的板经过退火后表面残余应力在 30 ~ 50 MPa 波动,其平均残余应力值在 40 MPa 左右,与退火前的板 1 相比,残余应力数值下降了约 50%。道次压下率为 6.0% 的板经过退火后表面残余应力值在 30 ~ 60 MPa 波动,其平均残余应力值在 45 MPa 左右,相比于退火前的板 2 应力值下降了约 75%,且相比于道次压下率为 1.0% 的退火板 3 的应力值只是略微高出 5 ~ 10 MPa。

同样图 5 为利用剥层法测试出来的退火板 3 和板 4 厚度方向残余应力数值,表层的残余应力值也

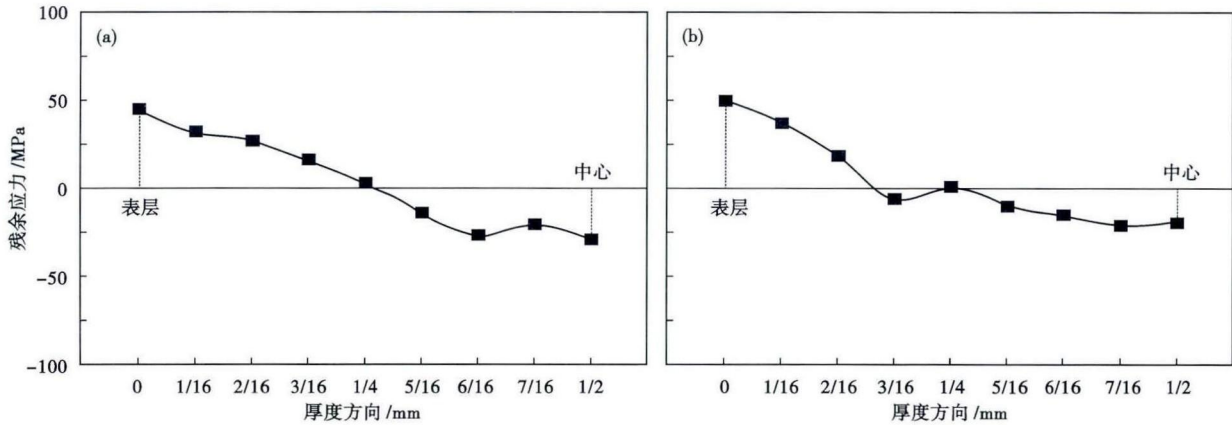


图5 剥层法测得薄板厚度方向残余应力:(a)板3,道次压下率1.0%+780 °C退火;(b)板4,道次压下率6.0%+780 °C退火  
 Fig. 5 Residual stress along thickness direction of sheet measured by peeling method: (a) sheet No3, pass reduction 1.0% + annealed at 780 °C; (b) sheet No4, pass reduction 6.0% + annealed at 780 °C

可以与X射线法测得表面残余应力相吻合,并且两块板在应力大小以及分布差别不大。但值得注意的是,从图3到图5两块板分别经过退火热处理后,残余应力整体数值都有了大幅度下降,并且是退火前残余应力值越大的地方降低越多,所以才能导致压下率不同带来厚度方向应力变化情况不同的两块板在退火后应力变化趋势基本一致。

### 3 结论

(1)单道次压下率对DP780双相钢应力分布规律影响很大,道次压下率为6.0%时表层残余应力值较大,且随着厚度方向的深入,应力值逐渐减小,

直至到厚度中心应力达到最大压应力。道次压下率为1.0%时表层残余应力值较小且随着厚度方向的深入,应力值先增加后减小。

(2)退火热处理可以在很大程度上减小残余应力,道次压下率为1.0%的钢板表层残余应力减小了50%,道次压下率为6.0%的钢板表层残余应力减小了75%。

(3)厚度方向上残余应力值越大,退火后该位置应力值就降低越多。退火完成后,道次压下率1.0%钢板与道次压下率6.0%钢板厚度方向应力分布规律基本保持一致。

### 参考文献

[1] 康永林,陈贵江,朱国明,等.新一代汽车用先进高强钢的成形与应用[J].钢铁,2010,45(8):1-6,19.  
 [2] 王春祥.热镀锌DP钢奥氏体及临界区连续冷却组织演变规律[J].热加工工艺,2011,40(2):62-64,81.  
 [3] 陈杰.冷轧DP钢热镀锌工艺及微合金化机理研究[D].北京:北京科技大学,2009.  
 [4] 何昌炜,谢震,章哲,等.800 MPa级DP钢冲压成形及裂纹扩展机理[J].塑性工程学报,2013,20(1):121-125.  
 [5] 霍刚,韩会全,刘彦春,等.本钢780 MPa级冷轧DP钢组织性能研究[J].轧钢,2008,25(2):20-22.  
 [6] 汪志刚,赵征志,赵爱民,等.析出相对深冲DP钢组织性能及结构的影响[J].材料科学与工艺,2013,21(5):75-81.  
 [7] 韩会全.低碳硅锰系冷轧连续退火DP钢组织性能研究[D].沈阳:东北大学,2009.  
 [8] 杨成广,刘晓峰.连退机组过时效段温度对DP钢组织及性能的影响[J].冶金设备,2013(3):71-73.  
 [9] 郭必耀,王武荣,韦习成,等.试样标距对800 MPa级DP钢准静态拉伸变形行为的影响[J].塑性工程学报,2011,18(1):91-95.  
 [10] 徐超,朱超群,何燕霖,等.不同应变速率下DP钢变形行为的微观机理研究[J].上海金属,2014,36(3):1-5.

李秀霞(1976-),女,讲师,工程师,机械制造与数控技术、CAD/CAM软件技术应用。

收稿日期:2016-08-16

欢迎全国冶金、机械、耐材及相关  
 行业在《特殊钢》杂志上刊登工艺设备  
 和技术、产品研发宣传广告