

450~780 MPa 系列双相钢扩孔性能实验

祝洪川¹, 王有禄¹, 魏星¹, 杨冰²

(1. 宝山钢铁股份有限公司中央研究院武汉分院, 武汉 430080;

2. 东风汽车公司技术中心, 武汉 430056)

摘要: **目的** 避免双相钢在成形过程中经常出现的翻边或扩孔开裂的问题, 提高生产效率。**方法** 以几种强度级别为 450~780 MPa 的双相钢为实验对象, 测试材料的单向拉伸和扩孔性能, 并从微观组织上分析影响双相钢强度和扩孔性能的因素。**结果** 450~780 MPa 强度级别双相钢的屈服强度随铁素体晶粒尺寸的减小而增加, 抗拉强度随马氏体体积分数的增加呈近似线性增加。双相钢的扩孔性能随着材料强度的提高呈下降的趋势。DP500 与 DP450 和 DP600 相比, 抗拉强度(579 MPa)居中, 伸长率最高, 但由于其马氏体形态和分布的差异, 其扩孔性能反而最低。**结论** 双相钢的扩孔性能会受到马氏体的含量、尺寸、形态和分布的影响, 与材料强度和伸长率没有必然的关系, 当马氏体呈颗粒状均匀分布时, 具有更好的扩孔性能。

关键词: 双相钢; 扩孔性能; 晶粒尺寸; 微观组织

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.06.006

中图分类号: TG391.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)06-0027-05

Test on Hole Expansion Property for 450~780 MPa Dual Phase Steel Sheets

ZHU Hong-chuan¹, WANG You-lu¹, WEI Xing¹, YANG Bing²

(1. Wuhan Branch of Central Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Wuhan 430080, China;

2. Dongfeng Motor Corporation Technical Center, Wuhan 430056, China)

ABSTRACT: The paper aims to avoid flanging or hole-expansion in forming dual-phase steel to improve the productivity. Uniaxial tensile test and hole-expansion test for several dual-phase steels between 450 MPa and 789 MPa were carried out. Effects of microstructure on mechanical properties of dual-phase steels were analyzed. The yield strength for 450~780 MPa dual-phase steels increased with the reduction of ferrite's grain size. The ultimate tensile strength increased almost linearly with the increase of martensite's volume fraction. Compared with DP450 and DP600, DP500 had an intermediate ultimate tensile strength (579 MPa) and a maximum elongation; but for the difference of martensite's shape and distribution, it had a minimum hole-expansion ratio. The hole-expansion ability of dual-phase steel was mainly affected by total volume fraction, size, shape and distribution of martensite particle rather than strength and elongation of material. Uniform distribution of globular martensite particle indicates better hole-expansion ability.

KEY WORDS: dual-phase steel; hole-expansion property; grain size; microstructure

双相钢是目前被广泛使用的一种高强度汽车板, 由于其具有良好的性价比及冷冲压成形性, 近年来已成为汽车轻量化发展中被广泛使用的一种材料。双相钢的主要成分为 C 和 Mn, 主要添加的合金元素有 Cr,

Mo, Si, Nb 等, 常用强度级别从 450~980 MPa, 产品主要应用在汽车纵横梁、A 柱、B 柱和其他结构件上, 产品覆盖范围非常广。C-Mn 马氏体双相钢的主要组织为铁素体和马氏体, 其具有较高强度的同时, 也具有

收稿日期: 2017-09-15

作者简介: 祝洪川 (1975—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为金属材料成形及应用。

良好的塑性成形性能，因此非常适合于冲压那些对强度和成形性能都有较高要求的汽车零部件。双相钢在使用过程中的一个主要问题是随着强度的提高，其塑性成形能力会迅速下降，给零件的设计制造带来了一定的难度，主要表现在成形过程中对模具的磨损较严重，冲压时常有开裂，尤其翻边扩孔开裂最为常见^[1-4]。另外相比于低合金高强钢，双相钢的各向异性表现更明显，产品性能的稳定性也没有低合金高。双相钢的性能由其铁素体+马氏体复合组织决定，其中铁素体晶粒主要决定了双相钢的屈服强度和塑性潜力，而马氏体的含量及其尺寸、形态和分布则影响了双相

钢的应变强化能力和断裂性能^[5-10]。文中通过对几种强度级别双相钢 DP450, DP500, DP600, 780DPD+Z 和 780DP 的组织及扩孔性能的测试和分析，指出铁素体晶粒尺寸、马氏体的含量及其尺寸、形态和分布是影响双相钢拉伸性能和扩孔性能的主要原因。

1 试验材料

1.1 双相钢的成分

采用化学和光谱分析的方法对几种双相钢的成分进行了测试，其测试结果见表 1。

表 1 双相钢的化学成分（质量分数）
Tab.1 Chemical composition (mass fraction) of dual-phase steels %

材料	C	Si	Mn	P	S	Alt	Ni	Cr	Ti
DP450	0.082	0.040	1.299	0.010	0.003	0.038	0.007	0.288	0.002
DP500	0.086	0.136	1.506	0.013	0.005	0.033	0.006	0.379	0.001
DP600	0.097	0.075	1.399	0.012	0.003	0.088	0.015	0.017	0.003
780DPD+Z	0.094	0.015	1.923	0.009	0.002	0.055	0.007	0.370	0.001
780DP	0.078	0.241	1.806	0.011	0.004	0.052	0.010	0.387	0.002

从测试结果看，几种双相钢中 C 的质量分数差别不大，在 0.078%~0.097%之间，Mn 含量以 780DPD+Z 和 780DP 较高，Si 的含量 780DP 最高，其次是 DP500，DP600 的 Cr 含量要远低于其他几种材料，780DPD+Z 和 780DP 添加了少量的 Nb 元素。

1.2 双相钢的组织

双相钢的微观组织以铁素体和马氏体为主，部分材料可能含有少量贝氏体。几种双相钢材料的显微组织见图 1。

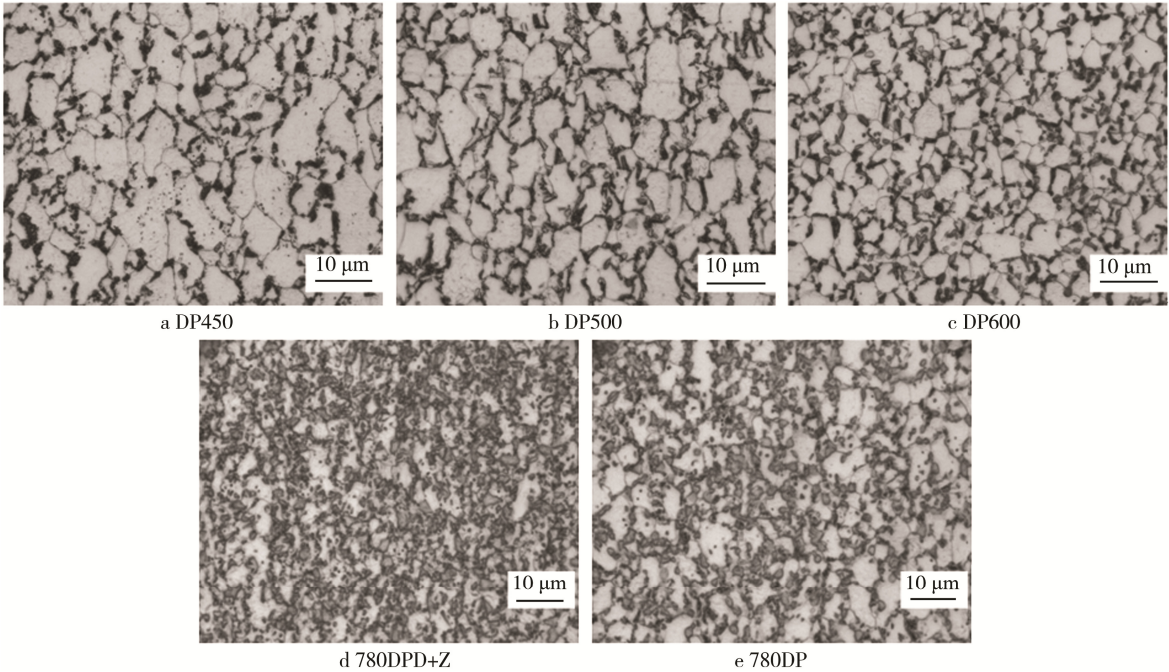


图 1 双相钢的金相组织
Fig.1 MP of dual-phase steels

马氏体的含量、大小、形态和分布都会对双相钢的性能产生影响。马氏体颗粒的尺寸较小，为了得到其有效尺寸，对其金相组织的马氏体颗粒进行计数，

然后按照总的马氏体颗粒占比计算平均马氏体颗粒的大小。马氏体颗粒的形态不太好量化，文中以马氏体颗粒的长短轴之比作为其形态量化指标，具体方法

是对金相组织照片上较大的马氏体颗粒采用人工的方法测量其颗粒的长、短轴，取前 20 个马氏体颗粒的长短轴之比的平均值作为参考。铁素体晶粒的大小采用截线法进行了统计分析，为简单起见，所计算的铁素体晶粒尺寸按照铁素体占比长度（总的截线长度减去其中马氏体所占的长度）除以截面线上的铁素体晶粒计数值，统计结果见表 2。统计结果显示，随着双相钢强度的提高，其铁素体晶粒尺寸随之减小，马氏体含量则相应提高，其中 DP500 的马氏体平均尺寸和长短轴之比最大（780DPD+Z 和 780DP 的马氏体长短轴未统计），铁素体晶粒尺寸和马氏体的平均尺寸则是 780DPD+Z 最小。

表 2 马氏体和铁素体的统计分析结果
Tab.2 Computing results of martensite particle and ferrite grain

材料	铁素体晶粒尺寸/ μm	马氏体体积分数%	马氏体平均大小/ μm^2	马氏体长短轴之比
DP450	4.93	15.3	3.09	2.65
DP500	4.49	20.0	3.84	3.00
DP600	3.51	23.6	2.99	2.04
780DPD+Z	1.34	41.8	1.86	—
780DP	1.82	37.4	2.45	—

2 拉伸试验

采用电子万能材料拉伸试验机双相钢基本力学性能进行了测试，试验结果见表 3。

表 3 双相钢的拉伸性能
Tab.3 Tensile test results of dual-phase steels

牌号规格	厚度/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	应变硬化指数(n 值)
DP450	1.5	317	491	25.5	0.195
DP500	1.8	313	579	28.4	0.166
DP600	1.4	375	636	23.4	0.173
780DPD+Z	1.4	562	836	15.9	0.129
780DP	2.0	509	783	19.9	0.120

双相钢中的铁素体相较软，在材料出现塑性变形的时候，铁素体首先发生变形，而马氏体在此过程中则保持原有形貌无明显变形，铁素体是双相钢屈服强度的决定因素。传统的 Hall-Petch 公式见式(1)^[11]。

$$\sigma_s = \sigma_0 + kd^{\frac{1}{2}}$$
(1)

式中： σ_s 为材料屈服强度； σ_0 为位错在晶粒内滑移时的摩擦阻力（内摩擦力）； k 为与晶界对滑移传播阻碍有关的常数； d 为晶粒的平均直径。

双相钢的屈服强度可以认为由铁素体晶粒的尺寸决定，而内摩擦力和 k 值在组织构成相近的情况下可以认为无显著差异，随着铁素体晶粒尺寸的增加，

几种牌号双相钢的屈服强度呈迅速下降的趋势，见图 2，按式(1)拟合后可得双相钢的屈服强度与铁素体晶粒尺寸符合式(2)。

$$\sigma_s = 33 + 624d^{\frac{1}{2}}$$
(2)

另外，随着马氏体体积分数的增加，双相钢的抗拉强度也随之近似线性增加，见图 3，二者符合式(3)。

$$\sigma_T = 322 + 1242V_m$$
(3)

式中： V_m 为马氏体体积分数。

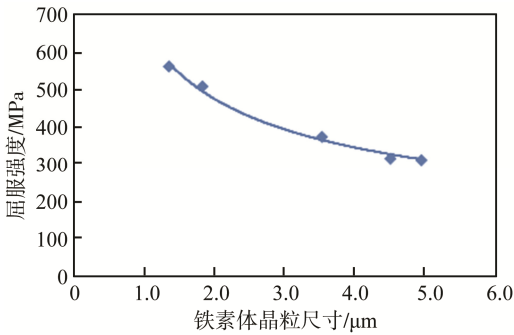


图 2 铁素体晶粒尺寸与屈服强度的关系
Fig.2 Correlation of grain size and yield strength

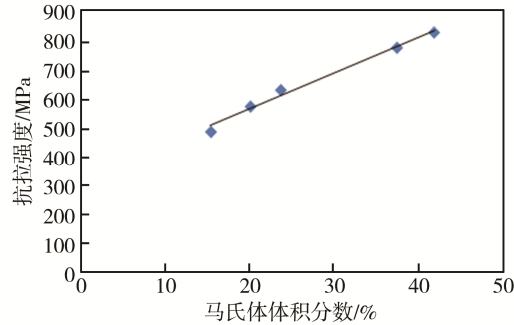


图 3 马氏体体积份数与抗拉强度的关系
Fig.3 Correlation of volume fraction and ultimate tensile strength of martensite steel

3 扩孔试验

扩孔和翻边工艺是双相钢冲压成形中常见的加工类型，因这两种成形工艺导致的开裂是零件失效的主要表现，扩孔性能的好坏在很大程度上决定了双相钢的使用性能。根据扩孔试验标准，用于扩孔性能测试的试样需要采用 $\Phi 10\text{ mm}$ 冲头冲制原始孔，然后使用 60 冲圆锥冲头进行扩孔试验，几种双相钢扩孔后的试样见图 4，双相钢的扩孔性能见图 5。

随着双相钢强度级别的提高，材料的扩孔性能总体呈下降的趋势，但 DP500 和 780DPD+Z 的扩孔性能表现明显偏低。其中 DP500 的铁素体晶粒尺寸和马氏体含量位于 DP450 和 DP600 之间，其单向拉伸试验的伸长率要高于 DP450 和 DP600，但其扩孔性能却反而低于这两种材料。从 3 种材料的马氏体形态和分布进行分析，3 种材料的马氏体形态及分布的比较见图 6，

DP450 和 DP600 的马氏体形态和分布具有相似性,都以颗粒状的马氏体为主,铁素体晶粒间存在较多的铁素体+铁素体晶界,而 DP500 中单纯的铁素体+铁素体晶界较少,马氏体多呈条带状沿铁素体晶界分布,其平均长短轴之比最大,对材料基体组织的割裂更加明

显,这是 DP500 的扩孔性能异常偏低的主要原因。780DPD+Z 的扩孔性能同样偏低,金相统计分析其马氏体含量很高,铁素体晶粒尺寸和马氏体颗粒比 780DP 更小,780DPD+Z 的强度比 780DP 高 53 MPa,但其扩孔率从 780DP 的 31.25%下降到 19.5%。

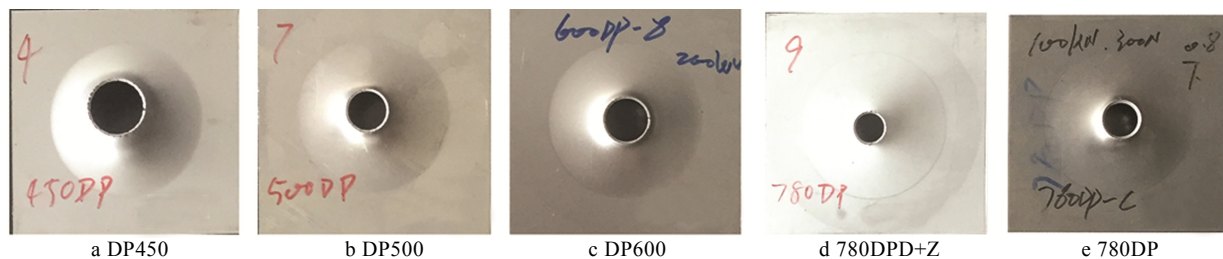


图 4 扩孔后的试样

Fig.4 Specimens after hole-expansion test

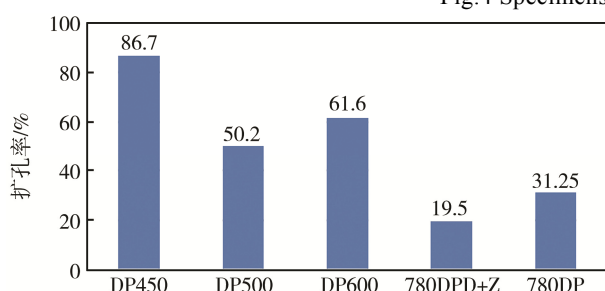
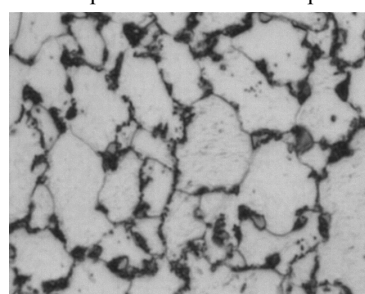
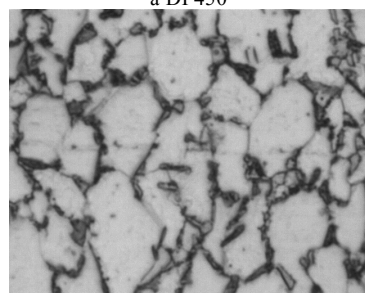


图 5 双相钢的扩孔性能

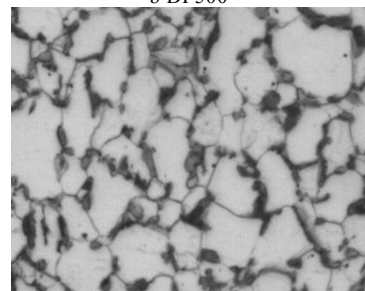
Fig.5 Hole-expansion ratio of dual-phase steels



a DP450



b DP500



c DP600

图 6 马氏体的形态和分布

Fig.6 Shape and distribution of martensite particles

4 结论

双相钢的组织主要由铁素体和马氏体构成,其组织形态决定了其强度和基本成形性能,而基于单向拉伸的力学性能难以全面反应双相钢的实际成形能力,特别是材料的翻边扩孔性能。双相钢扩孔性能的好坏与材料的组织密切相关,颗粒状的马氏体形态+较大的铁素体晶粒尺寸+较多的纯铁素体晶界能够有效提升双相钢材料的扩孔性能。主要结论如下。

- 1) 双相钢的屈服强度随着铁素体晶粒尺寸的减小而呈现线性增长的趋势。
- 2) 双相钢的抗拉强度随着马氏体含量的增加表现出线性增长的趋势。
- 3) 颗粒状的马氏体形态更有利于提高双相钢的扩孔性能,而沿铁素体晶界连续分布的马氏体会显著降低材料的扩孔成形能力。

参考文献:

- [1] KARELOVA A, KREMPASZKY C, WERNER E. Hole Expansion of Dual-phase and Complex-phase AHS Steels-Effect of Edge Conditions[J]. Steel Research International, 2010, 80(1): 71—77.
- [2] OSCAR Rene Terrazas, KIP Owen Findley, CHESTER John Van Tyne. Influence of Martensite Morphology on Sheared-Edge Formability of Dual-Phase Steels[J]. ISIJ International, 2017, 57(5): 937—944.
- [3] KOHEI Hasegawa, KENJI Kawamura, TOSHIAKI Urabe, et al. Effects of Microstructure on Stretch-flange-formability of 980 MPa Grade Cold-rolled Ultra High Strength Steel Sheets[J]. ISIJ International, 2004, 44(3): 603—608.
- [4] 祝洪川, 孙宜强, 吴青松. 先进高强钢断裂性能研究[J]. 锻压技术, 2015, 40(12): 115—119.

- ZHU Hong-chuan, SUN Yi-qiang, WU Qing-song. Study on the Fracture Performance of AHSS[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2015, 40(12): 115—119.
- [5] MONDAL D K, DEY R M. Effect of Grain Size on the Microstructure and Mechanical Properties of a C-Mn-V Dual-phase Steel[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1992, 149: 173—181.
- [6] KIM N J, THOMAS G. Effects of Morphology on the Mechanical Behavior of Dual Phase Fe/2Si/0.1C Steel[J]. *Metallurgical Transactions A*, 1981, 12(3): 483—489.
- [7] CORINNA Thomser, VITOON Uthaisangsuk, WOLFGANG Bleck. Influence of Martensite Distribution on the Mechanical Properties of Dual Phase Steels: Experiments and Simulation[J]. *Materials Technology*, 2009, 80(8): 582—587.
- [8] PENG-HENG C A, PREBAN G. The Effect of Ferrite Grain Size and Martensite Volume Fraction on the Tensile Properties of Dual Phase Steel[J]. *Acta Metallurgica*, 1985, 33(5): 897—903.
- [9] IRINA Pushkareva, SÉBASTIEN Allain, COLIN Scott, et al. Relationship between Microstructure, Mechanical Properties and Damage Mechanisms in High Martensite Fraction Dual Phase Steels[J]. *ISIJ International*, 2015, 55(10): 2237—2246.
- [10] 祝洪川, 雷泽红, 吴青松. DP600 的组织对成形性能的影响[J]. *钢铁研究*, 2013, 41(2): 32—36.
- ZHU Hong-chuan, LEI Ze-hong, WU Qing-song. Influence of Microstructure of DP600 on Formability[J]. *Research on Iron & Steel*, 2013, 41(2): 32—36.
- [11] 雷毅, 许晓峰, 余圣甫. 面向高性能结构材料的超细晶粒钢研究现状及发展方向[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2007, 31(2): 154—162.
- LEI Yi, XU Xiao-feng, YU Sheng-fu. Present Status and Developmental Direction of High Performance Structural Material-oriented Ultra-fine Grained Steel[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2007, 31(2): 154—162.