

Effects of Microstructures on Mechanical Behavior of Dual-Phases Steel

Jia Guo, Zhiqiang Yao, Yu Du, Jie Liu, Fei Li, Guosen Zhu

Shougang Research Institute of Technology, Beijing
Email: guojia1017@sohu.com

Received: Dec. 12th, 2012; revised: Dec. 15th, 2012; accepted: Jun. 10th, 2013

Copyright © 2013 Jia Guo et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: The ingots were rolled by 550 mills in laboratory and the different shapes and distributions of ferrite and martensite were obtained by changing the cooling process. The influence of the shape and distribution of ferrite and martensite on mechanical properties of dual phase steel was investigated. The results indicated that, the size of martensite is finer, and the distribution of martensite is more homogeneous in steel with the microstructure mixed by polygonal ferrite, acicular ferrite and martensite than that of steel with the microstructure mixed by polygonal ferrite and martensite. Moreover, the values of yield strength, tensile strength and impact toughness increase apparently, the value of elongation decreases.

Keywords: Ferrite/Martensite Dual Phase Steel; Tension Test Properties; Impact Property

组织形貌对热轧双相钢力学行为影响

郭佳, 姚志强, 杜宇, 刘杰, 李飞, 朱国森

首钢技术研究院, 北京
Email: guojia1017@sohu.com

收稿日期: 2012年12月12日; 修回日期: 2012年12月15日; 录用日期: 2013年6月10日

摘要: 采用 550 小轧机进行了实验室轧制实验, 通过改变冷却工艺改变双相钢显微组织中铁素体和马氏体形貌和分布, 研究了铁素体和马氏体形貌和分布对钢力学行为的影响。实验结果表明, 当组织中的铁素体由多边形铁素体部分转变为针状铁素体时, 马氏体的尺寸变小且分布更为均匀。此时, 钢的屈服强度和抗拉强度明显提高, 延伸率略有下降, 冲击性能明显提高。

关键词: 铁素体/马氏体双相钢; 拉伸性能; 冲击性能

1. 引言

目前高端轿车车轮用钢板主要采用热轧双相钢, 随着汽车行业的迅速发展, 其市场需求也越来越大。影响热轧双相钢性能的组织因素主要是马氏体的体积分、形状、分布及铁素体的形貌、分布和晶粒细化程度。

前人以多边形铁素体/马氏体为载体钢对钢的力

学性能进行了大量研究。通常认为, 双相钢的应变硬化分为三个阶段^[1]。2008年, A. Kumara 等人的研究表明^[2], 随双相中马氏体含量增加, 三个阶段的应变硬化值都有所升高。2009年, G. Avramovic-Cingara 等人^[3]研究了双相钢中的裂纹形核机制, 研究表明, 铁素体马氏体相界面、相邻马氏体界面是裂纹形核核心。2008年, Min Yang 等人^[4]研究了双相钢冲击断口

的分层裂纹现象,认为冲击断口上的裂纹是由于含 Si 和 Mn 的夹杂物,并沿马氏体铁素体界面扩展。2009 年, P. Movahed 等人^[5]研究了马氏体体积变化对钢强度和塑性的影响,认为当钢中马氏体体积分数超过 50%时,继续增加马氏体体积分数,钢的强度和延性都下降。2010 年, Marion Calcagnotto 等人^[6]研究了晶粒细化到 1 μm 对双相钢力学性能的影响,结果表明,细晶不仅有效提高钢的强度和延伸率,还能提高钢的初始应变速率,此外,细晶使马氏体分布均匀并有球化趋势,有效减少裂纹形核点。

本研究通过改变部分铁素体形貌,使马氏体形貌也有所改变。针对这些组织形貌上的改变,研究其对力学性能的影响。

2. 实验材料和试验方法

采用 50 kg 真空感应炉冶炼,冶炼完成后倒入模子中成为铸坯,铸坯尺寸为: 150 × 150 × 300 (mm)。

机加工切除铸坯缩孔,并将铸坯分割成 3 块尺寸为: 40 × 150 × 250 (mm)的铸坯。取尺寸为 20 × 20 × 20 (mm)铸坯样,光谱化验成分,实验钢的设计成分和化验成分如表 1 所示。采用 550 小轧机进行轧制实验。坯子随炉升温到 1200℃保温 1 h,加 N₂ 作为保护性气氛。两阶段控制轧制,轧制工艺和冷却工艺如图 1 所示。压下量控制如下: 40 mm—30 mm—20 mm—15 mm, 15 mm—11 mm—8 mm—6 mm。轧后层流冷却至室温,热轧板剪切成合适尺寸后入炉,炉温 100℃,保温 2 h 后随炉冷却。

从 3 块热轧板上分别取尺寸为: 10 × 10 × 20 (mm) 试样,依次采用 150#~1500#砂纸研磨,随后抛光,硝酸酒精和 lepera 试剂侵蚀,在激光共聚焦显微镜下观察试样的显微组织,观察位置为试样厚度的 1/4 处,平行于轧向的平面。从 3 块轧板上分别取拉伸和冲击试样进行力学性能的测试。采用激光共聚焦显微镜观察拉伸试样颈缩前,颈缩和拉断状态时试样的显微组

Table 1. Chemical composition of steel (mass, %)
 表 1. 实验钢成分(质量分数, %)

	C	Si	Mn	P	S	Cr, Mo
目标成分	0.05	0.1	1.40	0.011	0.009	≤1.0
实际成分	0.055	0.06	1.40	0.010	0.005	≤1.0

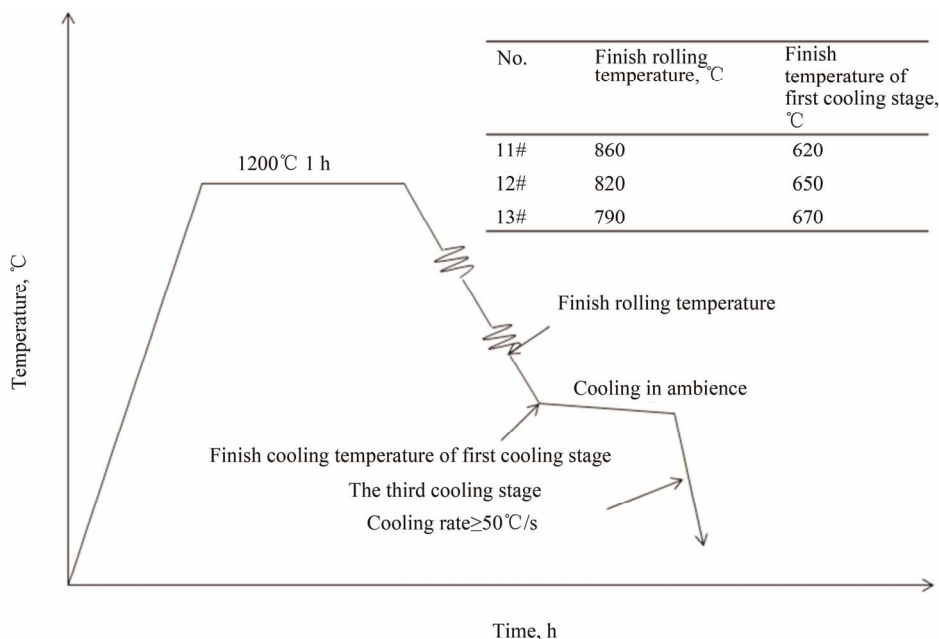


Figure 1. Rolling and cooling process of the steel
 图 1. 实验钢轧制和冷却工艺

织状态。采用示波冲击设备研究显微组织中裂纹形核和扩展过程中的能量变化。

3. 实验结果

3.1. 力学性能

从热轧板上取纵向试样进行力学性能测试，拉伸试样尺寸为：总长 400 mm，平行段长度 100 mm，平行段宽度 25 mm。拉伸实验结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出，11#钢屈服和抗拉强度都较高，12#和 13#钢强度相当，11#钢的延伸率较低。

表 3 为实验钢的冲击性能，从图中可以看出，3

块钢的纵向冲击性能明显好于横向冲击性能，随实验温度降低，冲击值明显降低。3 块钢相比，冲击性能较好的是 11#，12#和 13#相当。

3.2. 显微组织

采用激光共聚焦显微镜观察硝酸酒精和 lepera 试剂侵蚀后试样的显微组织，如图 2 所示。从图 2 中可以看出，11#钢的显微组织中的铁素体以多边形铁素体为主，有部分针状铁素体，马氏体块分布均匀，尺寸细小，并且相邻的 2 至 3 个马氏体条有位向一致现象。12#钢和 13#钢显微组织中的铁素体以多边形铁素

Table 2. Strength, elongation and n value of steels
表 2. 实验钢强度、延伸率和 n 值

No.	Rp0.2 (MPa)		Rm (MPa)		A _{80mm} (%)		N _{10-Ag}
	样本	均值	样本	均值	样本	均值	
11-1	365		630		18.0		0.14
11-2	343	354	623	626	24.5	22.3	0.15
11-3	355		625		24.5		0.13
12-1	315		595		28.5		0.17
12-2	315	318	595	596	29.0	27.1	0.16
12-3	326		600		24.0		0.17
13-1	335		560		25.5		0.17
13-2	340	335	585	580	25.0	25.8	0.16
13-3	330		595		27.0		0.15

Table 3. Impact value of steels
表 3. 实验钢的冲击性能

No.	缺口类型	试验温度 (°C)	试样尺寸 (mm × mm)	冲击吸收能量 KV2, J							
				纵向试样				横向试样			
				试样 1	试样 2	试样 3	均值	试样 1	试样 2	试样 3	均值
11#	V	0	5 × 10	75	55	56	62	38	37	38	37
	V	-20	5 × 10	51	63	49	54.3	31	32	32	31
	V	-40	5 × 10	24	30	40	31.3	21	23	22	22
12#	V	0	5 × 10	66	52	54	57.3	32	36	32	33
	V	-20	5 × 10	45	31	29	35	31	28	30	30
	V	-40	5 × 10	20	20	25	21.6	16	16	16	16
13#	V	0	5 × 10	55	62	58	58.3	39	35	41	38
	V	-20	5 × 10	34	36	39	36.3	31	27	26	28
	V	-40	5 × 10	26	22	22	23.3	19	15	17	17

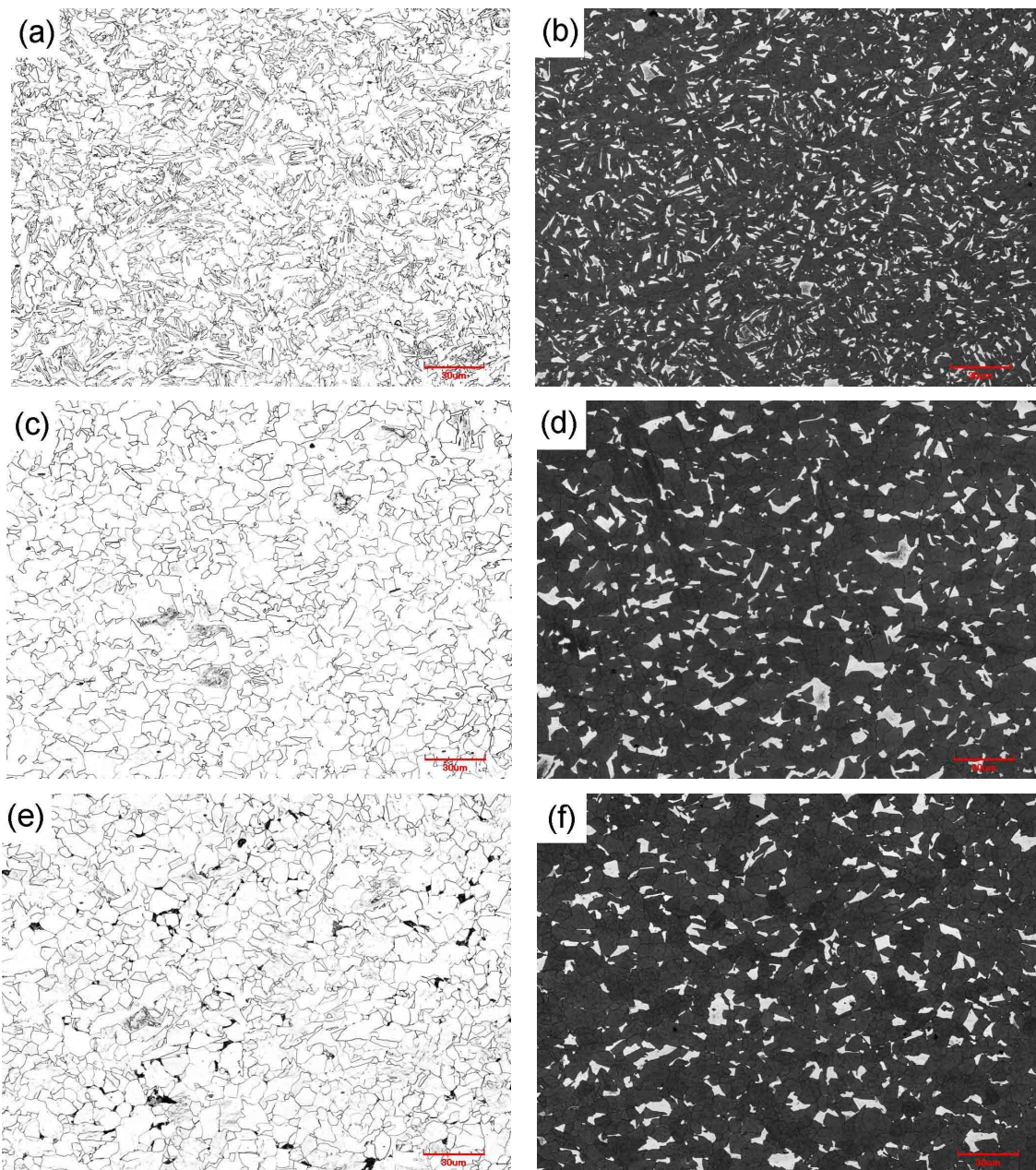


Figure 2. Confocal laser scanning micrographs showing: (a) steel 11; (c) steel 12 and (e) steel 13 were etched by nital; (b) steel 11, (d) steel 12 and (f) steel 13 were etched by lepera

图 2. 激光共聚焦显微镜观察实验钢显微组织: (a) 11; (c) 12; (e) 13 采用硝酸酒精侵蚀; (b) 11; (d) 12; (f) 13 采用 lepera 侵蚀

体为主，马氏体以块状为主，13#钢中还有少量的珠光体组织。

3.3. 应变硬化行为

9 个试样的拉伸曲线如图 3 所示，从图中可以看出，几个试样的拉伸曲线都没有屈服平台。图 4 中的曲线斜率代表双相钢平均应变硬化指数 n ，其应变硬化行为都为两个阶段：第一阶段 n 值较高，第二阶

段 n 值下降。几种实验钢的应变硬化行为一致，表明部分针状铁素体的生成对钢的应变硬化行为影响较小。

3.4. 不同变形量下中双相钢组织中裂纹的形核和扩展

采用激光共聚焦显微镜观察拉伸试样颈缩时试样的显微组织状态，如图 5 所示。从图中可以看出，

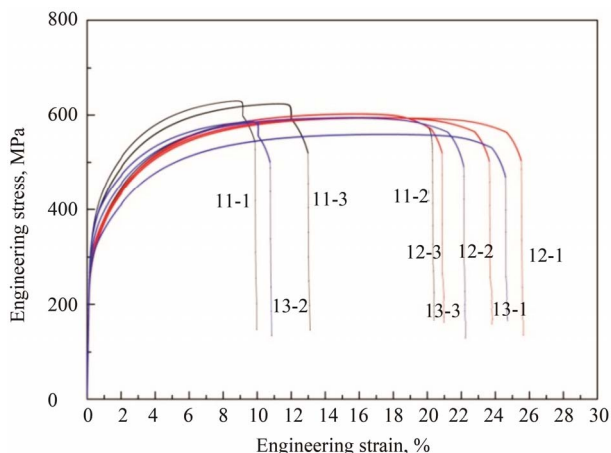


Figure 3. Tensile curves of steels
图 3. 实验钢的拉伸曲线

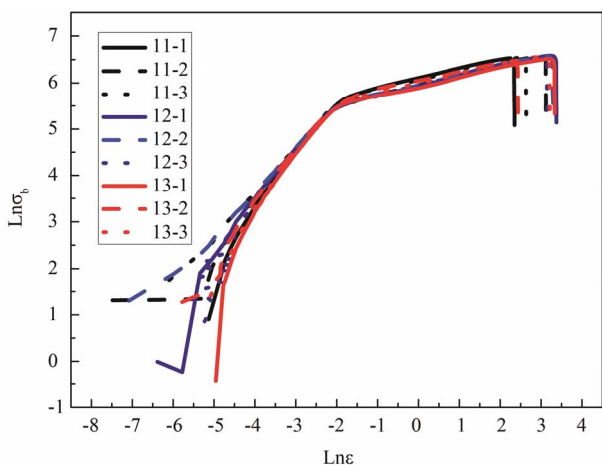


Figure 4. True stress-strain curve of steels
图 4. 实验钢真应力-真应变曲线

11#钢的裂纹形核与铁素体和马氏体相界面，12#和13#钢的裂纹形核位置除在铁素体和马氏体相界面处以外，还有细长形和块状马氏体内部。

3.5. 示波冲击

采用夏氏 V 形缺口试样的阶梯能量示波冲击法，考察实验钢破断过程中裂纹的萌芽、生长与扩展特性。阶梯能量的冲击功由摆锤的预扬角确定，摆锤预扬角角度分别为：40°、60°、100°，实验温度为 0℃。

图 6 所示为不同预仰角条件下的裂纹萌芽功 Ak_1 和裂纹扩展功 Ak_{23} 。从图 6 可以看出，几种钢横向和纵向冲击试样相比，11#钢的裂纹萌芽和扩展消耗的功最大；几种钢的裂纹萌芽功 Ak_1 均低于裂纹扩展功 Ak_{23} 。

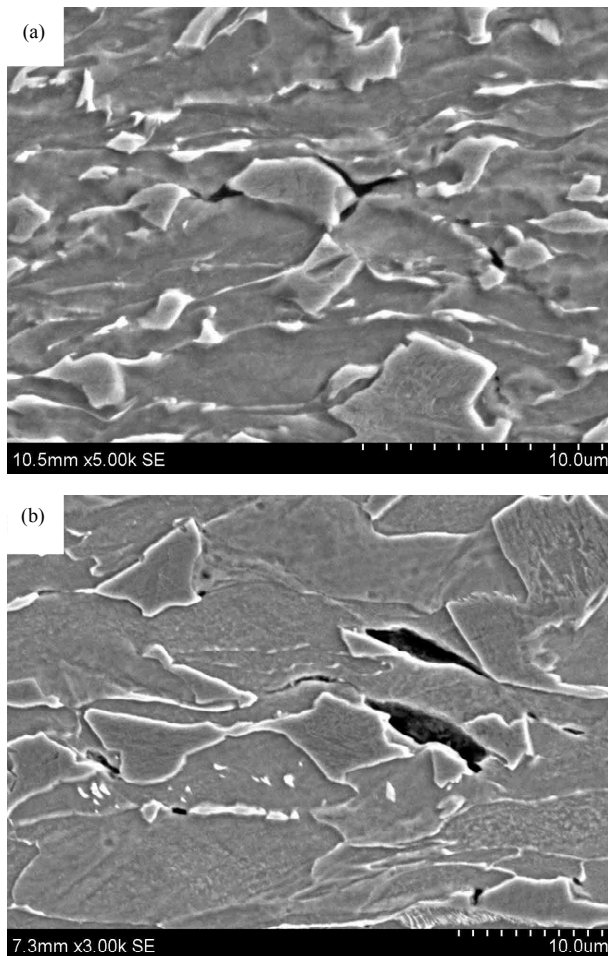


Figure 5. The SEM micrographs of void formation in steel 11 (a) ferrite-martensite interface and steel 13 (b) martensite and adjacent martensite regions
图 5. 扫描电镜下观察实验钢的裂纹形核位置：实验钢 11 (a)在铁素体和马氏体相界面；实验钢 12(b)在马氏体内部和相邻马氏体之间

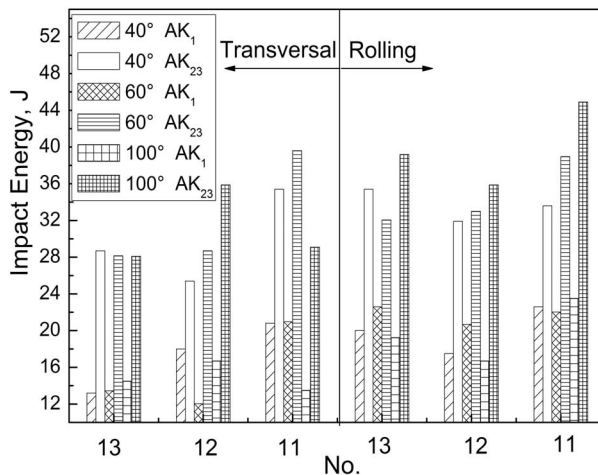


Figure 6. Energy of crack initiation and propagation of specimens in instrumented impact test under the different angle of jar weight
图 6. 示波冲击实验中不同仰角下实验钢的裂纹萌芽功和扩展功

4. 讨论

4.1. 显微组织中铁素体和马氏体形态对钢力学性能的影响

12#和 13#钢相比, 13#钢屈服强度略高(17 MPa), 13#钢抗拉强度略低(16 MPa), 延伸率高 1%, n 值相当。13#钢的显微组织中出现了少量的珠光体, 珠光体的形成消耗了钢中的碳, 从而减少奥氏体相变为马氏体的比例, 因此对钢的抗拉强度造成一定的损失。同时, 马氏体比例的减少一方面造成钢中可动位错的减少, 另外一方面也具有与铁素体发生协同变形的能力, 因此, 13#钢屈服强度增加, 且由于马氏体量的减少造成了抗拉强度的下降。

11#钢与 12#和 13#钢的组织相比, 11#钢的基体组织为针状铁素体。针状铁素体不仅细化了晶粒, 还细化了马氏体组织。对于铁素体马氏体双相钢来说, 裂纹形核点不仅在铁素体和马氏体相界面, 还存在于细长形、大块的马氏体内部。因此, 马氏体晶粒的细化有效减少了裂纹形核点。同时, 晶粒细化能够增加变形过程中晶界和位错阻力, 从而提高钢的屈服强度和抗拉强度, 使实验钢的止裂能力也明显提高。

4.2. 显微组织对钢冲击韧性的影响

试样的破断过程可以描述为: 受冲击弯曲载荷时, 由于缺口根部的应力集中效应, 在不大的冲击载荷和弯曲挠度时, 缺口根部便有了裂纹萌芽, 继而裂纹胚芽在增大的载荷下不断生长, 当裂纹生长至临界尺寸时, 裂纹便开始了小载荷下的快速失稳扩展, 最后导致断裂。扫描电镜下对纵向冲击断口的心部进行观察, 如图 7 所示。从图中可以看出, 3 个试样的断口都是韧窝状, 属于韧性断裂, 但 11#试样的韧窝更为均匀细小, 表明受冲击弯曲载荷时, 裂纹生长阻力更大。

5. 结论

1) 通过轧制和冷却工艺将实验钢中多边形铁素体控制为针状铁素体, 针状铁素体将未相变的奥氏体分割, 能在随后的相变中使晶粒细化, 同时也使马氏体晶粒细化, 并使形状多边形化。

2) 在变形过程中, 马氏体/铁素体相界面和大块

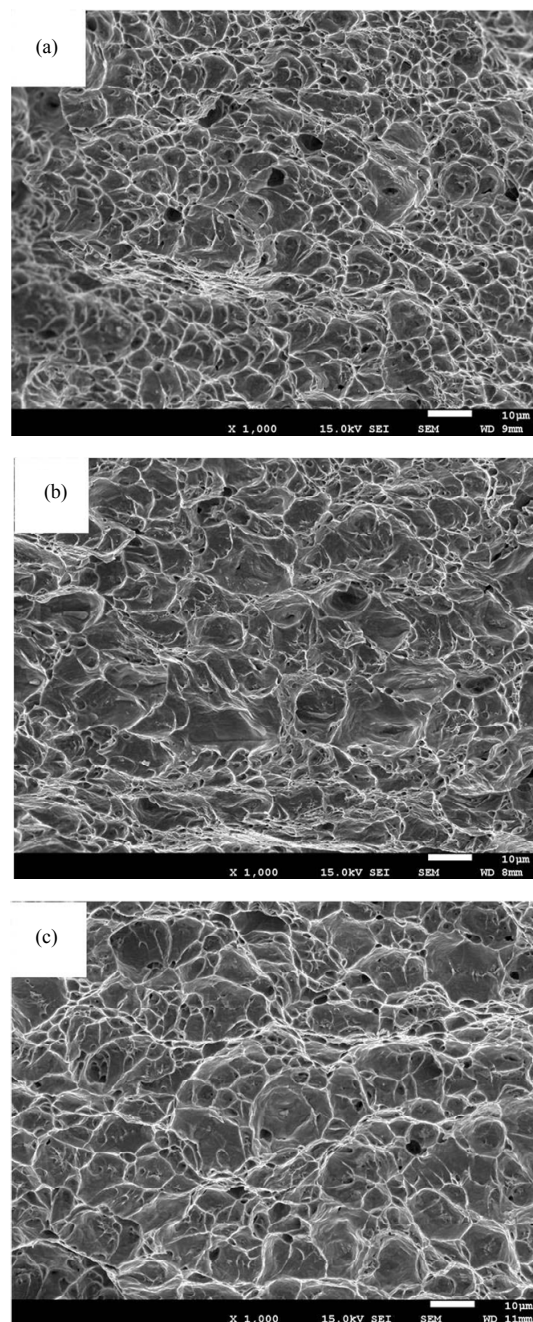


Figure 7. Microstructure of fracture surface of samples applied to impact test: (a) steel 11; (b) steel 12; (c) steel 13

图 7. 采用扫描电镜观察冲击试样断口形貌: (a) 11; (b) 12; (c) 13

马氏内部是裂纹形核点, 马氏体尺寸细化和多边形化, 使马氏体内部成为裂纹形核点的几率大大降低。

3) 力学性能测试结果表明, 双相中基体为针状铁素体时, 钢的屈服强度提高, 裂纹萌芽功和扩展功也明显提高。

综上所述, 通过改变钢中铁素体的形貌, 能有效提高钢的强度、冲击韧性, 同时又不破坏钢的加工硬

化性能。对于变形较小的部件，可以替代高强钢，同时又具有较好的加工性能。

参考文献 (References)

- [1] G. Avramovic-Cingaraa. Micromechanical modeling of the effect of particle size difference in dual phase steels. *International Journal of Solids and Structures*, 2003, 40(13-14): 3379-3391.
- [2] A. Kumar, S. B. Singh and K. K. Ray. Influence of bainite/martensite-content on the tensile properties of low carbon dual-phase steels. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 474(1-2): 270-282.
- [3] G. Avramovic-Cingara, Y. Ososkov, M. K. Jain and D. S. Wilkinson. Effect of martensite distribution on damage behaviour in DP600 dual phase steels. *Materials Science and Engineering A*, 2009, 516(1-2): 7-16.
- [4] M. Yang, Y. J. Chao, X. D. Li and J. Z. Tan. Splitting in dual-phase 590 high strength steel plates. Part I. Mechanisms *Materials Science and Engineering A*, 2008, 497(1-2): 451-461.
- [5] P. Movahed, S. Kolahgar, S. P. H. Marashi, M. Pouranvari and N. Parvina. The effect of intercritical heat treatment temperature on the tensile properties and work hardening behavior of ferrite-martensite dual phase steel sheets. *Materials Science and Engineering A*, 2009, 518: 1-6.
- [6] M. Calcagnotto, D. Ponge and D. Raabe. Effect of grain refinement to 1 μm strength and toughness of dual-phase steels. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527(13-14): 7832-7840.