

马氏体对 C-Si-Mn 冷轧双相钢屈服特性的影响

Effect of Martensite on Yield Characteristics of Cold Rolled C-Si-Mn Dual Phase Steel

朱国明¹, 邝 霜¹, 陈贵江¹, 陈 波², 任君茹²

(1 北京科技大学 材料科学与工程学院新金属材料

国家重点实验室, 北京 100083; 2 北京首钢冷轧薄板有限公司, 北京 100043)

ZHU Guo-ming¹, KUANG Shuang¹, CHEN Gui-jiang¹, CHEN Bo², REN Jun-ru²

(1 State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2 Beijing Shougang Cold Rolling Co., Ltd., Beijing 100043, China)

摘要: 通过实验室退火与回火, 采用力学测定与显微组织分析研究了马氏体体积分数与回火温度对双相钢屈服特性的影响。结果表明: 随马氏体体积分数从 0% 增加到约 15%, 双相钢的屈服强度显著降低, 降低值约为 80~100 MPa; 而马氏体体积分数在 15%~35% 之间, 双相钢的屈服强度维持在一个较低的水平。当马氏体体积分数大于 35%, 双相钢屈服强度急剧上升。当马氏体体积分数超过 10%, 双相钢表现为连续屈服。随回火温度从 200℃ 升高到 400℃, 双相钢的屈服强度单调增加。回火温度大于 300℃, 双相钢重新出现物理屈服平台。对双相钢精细显微结构的观察分析得出, 铁素体中的高密度相变诱发位错及残余应力是导致双相钢低屈服强度与连续屈服的可能原因。

关键词: 双相钢; 马氏体; 屈服特性; 相变诱发位错; 残留应力

中图分类号: TG156.1; TG113.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2011)04-0066-05

Abstract: Based on the annealing and tempering in lab, the effect of martensite volume fraction (MVF) and tempering temperature on yield characteristics of trial dual phase (DP) steel were investigated by mechanical test and microstructure analysis. The results show that the MVF increases from 0% to about 15%, the yield stress of DP steels decreases significantly, the decrease values are between 80 MPa and 100 MPa; When MVF is in 15%-35%, the yield stress of DP steels maintains at a lower level, whereas, when MVF is more than 35%, the yield stress increases rapidly. When MVF exceeds 10%, the DP steels represent continuous yield. With the increasing of tempering temperature from 200℃ to 400℃, the yield stress of DP steels increases monotonously, and the yield platform reappears when tempering temperature is more than 300℃. Based on the observation and analysis to the fine microstructures of DP steels, the high density phase transformation induced dislocation and residual stress are considered as the potential reasons for the low stress and continuous yield of DP steels.

Key words: dual phase steel; martensite; yield characteristic; phase transformation induced dislocation; residual stress

由铁素体与马氏体组成的双相钢, 以相变强化为基础, 具有低屈强比、高的初始加工硬化速率、良好的强度和延性配合等特点, 是一种汽车用高强度新型冲压用钢^[1]。低屈服强度与连续屈服是双相钢的两个重要特性且有利于冲压成形, 因而研究双相钢的屈服特性具有重要意义。高品质冷轧双相钢主要采用连续退火生产, 该过程主要包括两相区奥氏

体化, 两段式冷却与等温时效^[2]。在冷却能力足够的情况下, 奥氏体化过程与过时效回火对双相钢的显微组织有重要影响^[3-5], 因而也直接影响到双相钢的屈服行为^[6]。本工作通过实验室连续退火与回火实验, 研究不同马氏体含量与不同马氏体回火状态对双相钢屈服行为的影响, 并分析解释了导致双相钢屈服特性的原因。

1 实验材料与方法

实验用钢的化学成分(质量分数/%)为: 0.06~0.09 C, 0.25~0.5 Si, 1.5~1.8 Mn, <0.015 P, <0.01 S, 0.02~0.07 Als(酸溶铝), <0.004 N, 余量为 Fe。采用 200kg 真空感应炉冶炼并浇铸成厚度为 90mm 的铸坯, 热轧厚度为 7mm, 终轧温度大于 880℃, 卷取温度为 690~720℃, 水冷速率小于 10℃/s。热轧板经酸洗后冷轧, 压下率为 80%。

将冷轧硬板加工成 50mm×200mm 的试样, 在盐浴中进行退火实验。图 1 为实验室退火与回火工艺路线, 将试样放入 700~780℃不同两相区温度的盐浴中, 试样放入后开始计时, 保温 300s 后立即水淬以得到不同马氏体体积分数的双相钢。取部分退火后的试样采用箱式电炉在 200~400℃的不同温度下进行回火 300s。将热轧板与退火后的钢板加工成 50mm, 标距拉伸试样在万能实验机上测定力学性能。取金相试样研磨、抛光后用体积分数为 4% 的硝酸酒精浸蚀, 在光学显微镜中观察显微组织。用 Image Tool 软件进行辅助图像分析以确定马氏体体积分数。制取双喷减薄试样用于透射电镜观察, 以分析组织精细结构。

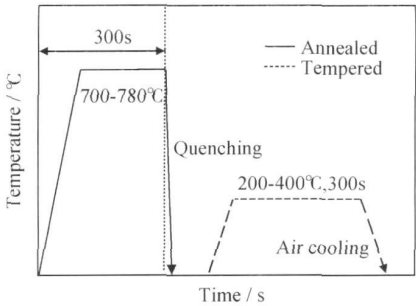


图 1 实验室退火与回火工艺路线图

Fig.1 Schematic diagram of annealing and tempering in laboratory

2 结果与分析

图 2 为不同马氏体体积分数 (V_m) 对双相钢屈服行为的影响(其中马氏体体积分数为 0% 代表热轧试样, 即铁素体珠光体组织)。从图 2 中可以看出, 当马氏体体积分数在 0%~15% 之间, 随着马氏体体积分数的增加, 双相钢的屈服强度显著下降, 强度降低约为 80~100MPa。马氏体体积分数在 15%~35% 之间, 双相钢的屈服强度维持在一个较低的水平。当马氏体

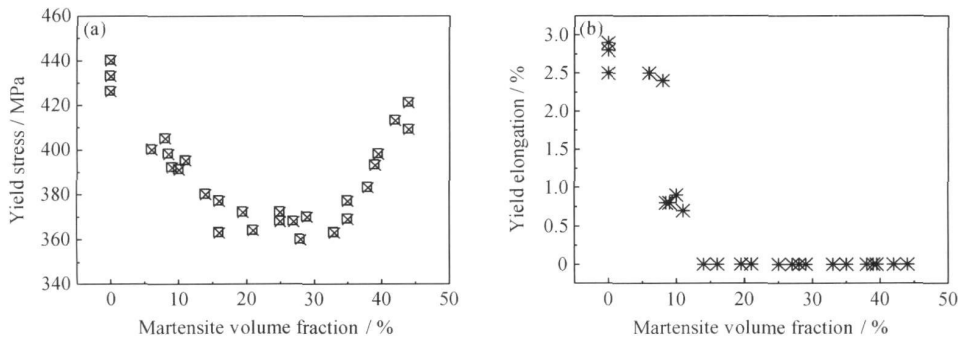


图 2 马氏体体积分数对双相钢屈服行为的影响

(a) 屈服强度; (b) 屈服伸长率

Fig.2 Effect of martensite volume fraction on the yield behavior of dual phase steel

(a) yield strength; (b) yield elongation

含量大于 35%, 随体积分数的进一步增加, 双相钢的屈服强度升高。双相钢的屈服伸长率(物理屈服平台)则随着马氏体的增加而减小, 当马氏体体积分数超过 10%, 双相钢表现为连续屈服。

图 3 为不同回火温度对淬火态马氏体体积分数(约 21%) 的双相钢屈服行为的影响。从图 3 中可以看出, 低于 300℃ 的回火处理对双相钢的屈服强度影响不大, 高于 300℃ 时, 随着温度的升高, 双相钢的屈服强度增加比较明显, 且出现了屈服延伸。

图 4 为不同马氏体体积分数及回火状态下的双相

钢显微组织照片与对应的应力-应变曲线。可以看出, 马氏体含量不足, 双相钢屈服强度较高, 而且具有屈服延伸, 屈服后的加工硬化能力明显低于含有足量马氏体双相钢的加工硬化能力。马氏体回火分解(马氏体岛内析出了碳化物粒子)后的双相钢, 其屈服强度增加, 抗拉强度减小, 且屈服延伸也重新出现。

图 5 为热轧态及退火态不同马氏体体积分数试样在低塑性变形区的应力-应变关系。从图 5 中可以看出, 热轧态钢的线弹性阶段比较明显, 而且在较大的应力范围内得以维持, 这说明热轧铁素体、珠光体组织

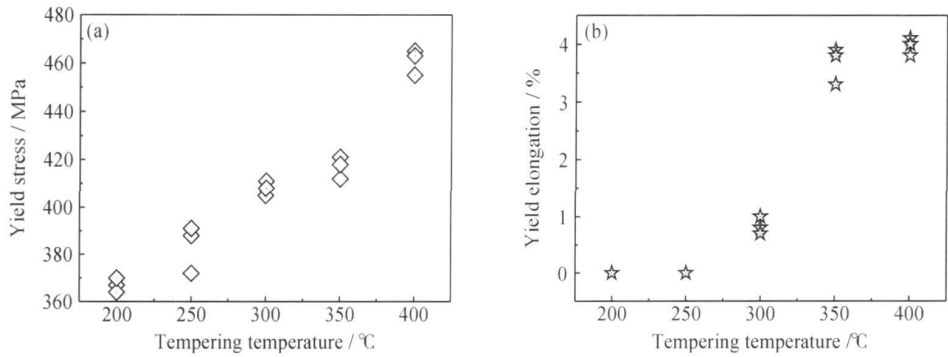


图 3 不同回火温度对淬火态双相钢屈服行为的影响
(a)屈服强度;(b)屈服伸长率

Fig. 3 Effect of tempering temperature on the yield behavior of quenching dual phase steel
(a) yield strength; (b) yield elongation

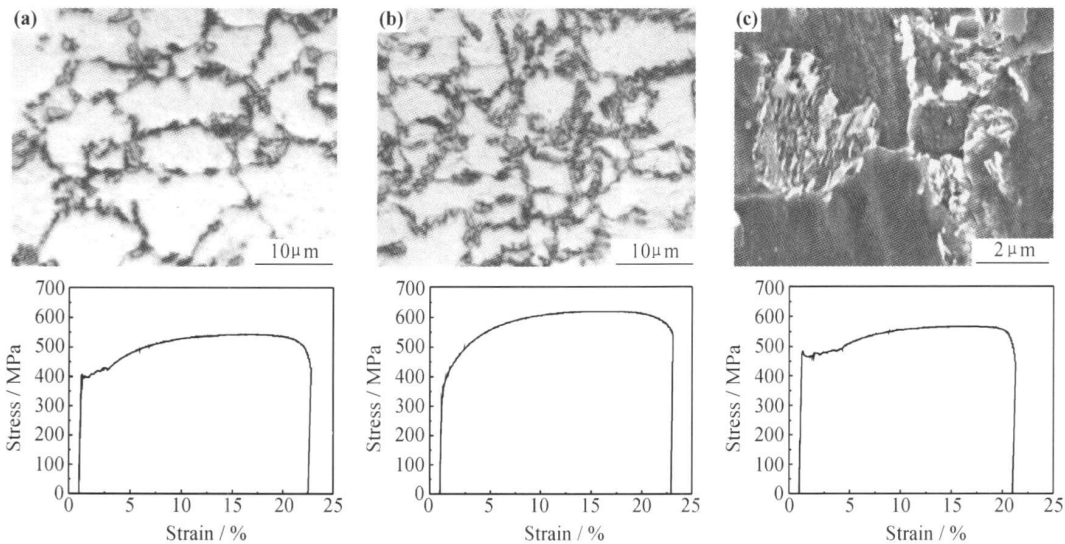


图 4 不同马氏体体积分数及回火状态下的双相钢显微组织及其对应的应力-应变曲线
(a)6%;(b)21%;(c)400℃马氏体回火分解

Fig. 4 The microstructures and corresponding stress-strain curves of dual phase steel with martensite volume fraction 6%(a), 21%(b) and decomposed martensite after tempered at 400℃ (c)

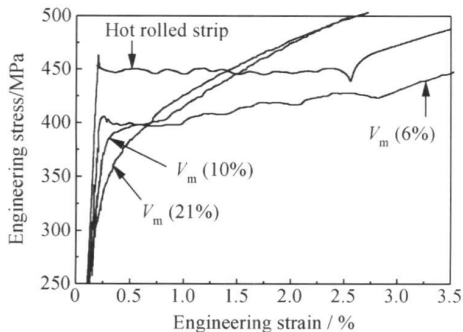


图 5 热轧与退火试样在低塑性区的应力-应变关系
Fig. 5 Stress-strain curves for the hot rolled and annealed DP steels at the low strain

随着马氏体体积分数的增加, 双相钢的屈服延伸区域形状也发生显著变化, 当马氏体体积分数较低时, 虽然双相钢具有屈服延伸区, 但是不如热轧态时那么平坦, 且屈服应力显著降低。当马氏体体积分数达到约 10%, 屈服延伸区域显著减小, 但是此时的双相钢并未表现出完全的连续屈服。当马氏体体积分数达到约 21%, 双相钢的屈服平台完全消失。应力-应变曲线表现为平滑的拱形。

从图 4 中还可以看出, 双相钢线弹性阶段的应力范围比较小, 当拉伸应力达到 300MPa, 应力-应变关系已经表现出非线性。对于马氏体体积分数约为 21% 的双相钢, 由于没有物理屈服点, 虽然规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ 为 378MPa 为双相钢的屈服强度, 但实际上, 真正的屈服在小于 378MPa 的应力条件下已经发生。

具有较强的抵抗塑性变形的能力。当拉伸应力达到约 450MPa, 铁素体发生塑性变形, 其屈服平台非常明显。

3 讨论

3.1 热轧态铁素体中的析出与位错的钉扎作用

钢铁材料的屈服行为实际上是由于位错运动引起晶体原子面逐步滑移的结果。实验钢热轧后在 690~720℃ 进行模拟卷取(事实上是在初始温度为 690~720℃ 的炉中炉冷到室温,这与实际工业生产钢卷的空冷速度相当),由于冷却速度比较缓慢,奥氏体将转变为铁素体与珠光体。在相变过程中,由于钢板冷却速度缓慢而在高温区停留时间较长,因此铁素体中的固溶碳、氮原子具有较大的扩散能力和足够的时间向位错线上聚集而钉扎位错,在外加拉伸作用下,开动位错源而进行逐步滑移所需的外力比较大,基体抵抗塑性变形的能力较强,因此热轧试样具有较大的弹性应力范围。一旦进入塑性变形区域,由于已处于较高的应力环境下,被钉扎位错发生脱钉现象,因此不需要应力的进一步增加也可以进行一个较大范围内的变形,即出现明显的物理屈服平台。

3.2 双相钢铁素体中的相变诱发自由位错

经两相区部分奥氏体化处理后的淬火过程中,双相钢奥氏体转变为马氏体,这将引起晶胞体积膨胀 2%~4% 左右,另外,由于相变以切变方式进行,这也会引起相变过程中原奥氏体岛的形状尺寸变化^[7],为协调这种变化,相界面铁素体一侧会发生塑性变形,从而在铁素体中诱发高密度位错,如图 6 所示。铁素体的这种微塑性变形实际上可以理解作为一种不需要外力的预屈服行为。

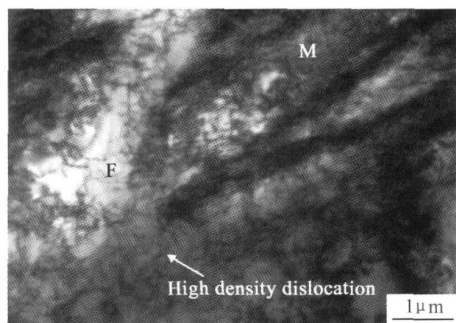


图 6 双相钢中铁素体的高密度位错

Fig. 6 High density dislocation substructure in the ferrite of G-Si-Mn dual phase steel

淬火过程冷却速度相当快,铁素体中的碳、氮原子来不及扩散到这些相变诱发的位错线上对其进行钉扎,因而这些位错实际上是自由可动位错^[8]。同时,由于两相区退火温度较高,铁素体中的碳化物粒子大部分溶解,大量碳、锰原子向奥氏体中偏聚,在淬火过程

中碳化物来不及重新析出,因而相变诱发的可动位错在运动过程中受到的阻碍减少。在外加应力作用下,由于马氏体与铁素体强度的巨大差异,双相钢的屈服首先发生在铁素体中,大量自由位错在较低应力下得以开动,因此双相钢的线弹性阶段范围较小,屈服强度较低,且具有连续屈服特性。

3.3 双相钢铁素体中的残余应力

奥氏体向马氏体的相变除了诱发相界面铁素体内的高密度位错外,还会在铁素体基体中形成残余应力。在紧靠马氏体岛周围的区域内,其内应力超过铁素体的屈服应力,因此在围绕着马氏体粒子的铁素体中产生塑性层。离开这一塑性层,内应力便处在基体的弹性范围,并随离开马氏体岛的距离增加而衰减^[8]。图 7 为马氏体相变在铁素体中引起的残余应力-应变示意图。按照力学平衡原理,铁素体中的应力场方向应该指向马氏体岛。在外力作用下,外加应力与残留应力叠加,因而使得双相钢的外加应力小于无残余应力存在条件下的屈服应力。

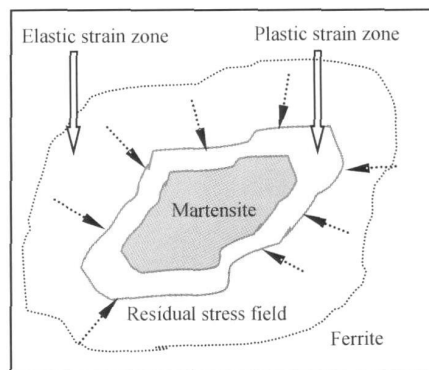


图 7 相变诱导残留应力-应变示意

Fig. 7 Schematic diagram of phase transformation induced stress and strain

3.4 组织形态对双相钢屈服行为的改变作用

如果马氏体含量不足,铁素体中的可动位错密度也相应降低,因而双相钢的屈服强度上升。当然,如果马氏体体积分数过度增加以至马氏体成为双相钢中的主导相,则马氏体对屈服强度的影响将增大,因而双相钢的屈服强度将会增加。

回火对双相钢屈服行为的影响也主要表现在对铁素体中的位错与残余应力的影响。回火过程中,马氏体与铁素体相界面处的大量位错对消,或重新排列,位错密度减小,并且铁素体中有碳化物或者细小沉淀相析出,这些析出物对自由位错的运动具有较大的阻碍作用^[9]。在较高的回火保温过程中,铁素体中的碳、氮原子活性提高,向位错线聚集,也降低了位错的可动

性。因而高温回火使双相钢的屈服强度显著增加,且出现屈服平台。同时,高温回火过程中,作为强化相的马氏体显著分解、碳化物析出、马氏体晶格畸变减小,应力状态发生改变,硬度与强度均会下降,马氏体的弱化也减小了对铁素体的变形阻碍,因而双相钢的抗拉强度也会相应降低。

4 结论

(1) 随马氏体体积分数从 0% 增加到约 15%, 双相钢的屈服强度显著降低, 降低值约为 80~100 MPa。马氏体体积分数在 15%~35% 之间, 双相钢的屈服强度维持在一个较低的水平。马氏体体积分数大于 35%, 双相钢屈服强度急剧上升。当马氏体体积分数超过 10%, 双相钢表现为连续屈服。随回火温度从 200℃ 升高到 400℃, 双相钢的屈服强度单调增加。回火温度大于 300℃, 双相钢重新出现物理屈服平台。

(2) 马氏体相变体积膨胀而在铁素体中诱发的高密度可动位错与残留应力是双相钢低屈服与连续屈服的主要原因。在两相区高温退火后的快速冷却过程中, 铁素体中溶解的碳、氮化物来不及重新析出以钉扎位错, 自由位错在较低的外加应力下便可以开动, 同时, 由于与残留应力的叠加, 因此使双相钢发生屈服的外加应力较低, 且表现出连续屈服。

(3) 如果双相钢马氏体含量不足, 铁素体中的可动位错密度也相应降低, 因而双相钢的屈服强度上升。当马氏体体积分数过度增加以至马氏体成为双相钢中的主导相, 则马氏体对屈服强度的影响将增大, 因而双相钢的屈服强度将会增加。回火导致铁素体中位错密度降低, 细小沉淀物析出及马氏体的分解, 因而导致双相钢屈

服强度的增加、抗拉强度减小, 且出现物理屈服平台。

参考文献

- [1] BHATTACHARYA D. Developments in advanced high strength steels [A]. The Joint International Conference of HSLA Steels 2005 and ISU GS 2005 proceedings [C]. Beijing: The Metallurgical Industry Press, 2005. 70-73.
- [2] ROCHA R O, MELO T M F, PERELOMA E V, et al. Microstructure evolution at the initial stages of continuous annealing of cold rolled dual phase steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 391(1-2): 296-304.
- [3] ERDOGAN M. Effect of austenite dispersion on phase transformation in dual phase steel [J]. Scripta Materialia, 2003, 48(5): 501-506.
- [4] ERDOGAN M, TEKELI S. The effect of martensite volume fraction and particle size on the tensile properties of a surface carburized AISI 8620 steel with a dual phase core microstructure [J]. Materials Characterization, 2002, 49(5): 445-454.
- [5] 蒋俊华, 李俊, 胡文彬. 超高强低碳 Si-Mn 冷轧双相钢的回火组织和力学性能研究 [J]. 金属热处理, 2007, 32(9): 14-17.
- [6] 花礼先, 王绪. 连续退火冷轧双相钢板的屈服点延伸 [J]. 北京科技大学学报, 1993, 15(2): 155-158.
- [7] 徐祖耀. 马氏体相变和马氏体 [M]. 北京: 科学出版社, 1980. 87.
- [8] 马鸣图, 吴宝榕. 双相钢——物理和力学冶金 [M]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [9] 张丙, 冯锋, 万晓景. 低碳合金双相钢低温时效机理探讨 [J]. 金属热处理学报, 1994, 15(2): 7-12.

基金项目: 国家 863 资助项目 (2009AA03Z518)

收稿日期: 2010-03-16; 修订日期: 2010-12-28

作者简介: 朱国明 (1974-), 男, 博士, 从事材料加工过程仿真分析及应用, 联系地址: 北京科技大学材料科学与工程学院 (100083), E-mail: zhuguoming345@yahoo.com.cn

(上接第 57 页)

- [3] 李朝弟, 王克鹏. 表面涂层材料的残余应力测量技术 [J]. 力学与实践, 1996, 18(4): 43-45.
- [4] 冯宝富, 赵恒华, 蔡光起. 平面磨削残余应力的测试方法 [J]. 机械制造, 2003, 41(461): 35-37.
- [5] 王彦龙. 残余应力的超声波检测研究 [D]. 西安: 西安科技大学硕士论文, 2005.
- [6] SHI Chang liang, DONG Shi yun, XU Bir shi, et al. Stress concentration degree affects spontaneous magnetic signals of ferror magnetic steel under dynamic tension load [J]. NDT & E International, 2010, 43(1): 8-12.
- [7] 西拉德. 超声检测新技术 [M]. 北京: 科学出版社, 1991. 45-46.
- [8] 李丽芳, 刘庆华. 脉冲噪声下的时间延迟估计方法研究 [J]. 电声技术, 2008, 32(8): 57-59.
- [9] 吴正毅. 测试技术与测试信号处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

- [10] FEDIM. Localized denoising filtering using the wavelet transform [J]. Pure and Applied Geophysics, 2000, 157(9): 1463-1469.

- [11] PEROV D V, RINKEVICH A B. Wavelet filtering of signals from ultrasonic flaw detector [J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2002, 38(12): 869-882.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50975287)

收稿日期: 2010-04-07; 修订日期: 2010-12-05

作者简介: 刘彬 (1983-), 男, 博士研究生, 目前主要从事材料无损检测及质量评估, 联系地址: 北京市丰台区杜家坎 21 号装备再制造国防科技重点实验室 (100072), E-mail: liubindely@163.com
通讯作者: 何鹏 (1972-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为钎焊及扩散焊, E-mail: hepeng@hit.edu.cn