

梯度变形加工改善低碳钢的力学性能

于晓娟¹ 邢万里^{2,3,*} 常连波^{2,3} 刘苗苗^{2,3}

1 邯郸市科学技术情报研究所, 河北 邯郸 056038

2 邯郸慧桥复合材料科技有限公司, 河北 邯郸 056700

3 河北省耐磨蚀金属基复合材料技术创新中心, 河北 邯郸 056700

[摘要]文中研究了经过非均匀梯度预扭转和均匀预拉伸处理的低碳钢的组织结构和力学性能。实验结果表明, 预扭转和预拉伸都能有效地提高低碳钢的强度, 但在延性和韧性方面有所损失。然而, 梯度预扭转处理的试样比预拉伸的试样具有更好的强度-延展性-韧性协同效应。这种综合力学性能的提高是由于梯度组织的形成, 即位错密度随着距试样表面深度的减小而逐渐增大。本研究为提高金属材料的力学性能提供了一种梯度塑性变形的策略。

[关键词]扭转变形; 梯度结构; 机械性能; 低碳钢

DOI: 10.33142/ec.v6i9.9409

中图分类号: TG161

文献标识码: A

Improving the Mechanical Properties of Low-carbon Steel by a Graded Pre-torsion Deformation

YU Xiaojuan¹, XING Wanli^{2,3,*}, CHANG Lianbo^{2,3}, LIU Miaomiao^{2,3}

1 Handan Science and Technology Information Institute, Handan, Hebei, 056038, China

2 Handan Huiqiao Compound Materials Technology Co., Ltd, Handan, Hebei, 056700, China

3 Hebei Technology Innovation Center of Abrasion-resistant Metal-matrix Composites, Handan, Hebei, 056700, China

Abstract: The microstructure and mechanical properties of low carbon steel treated with non-uniform gradient pre torsion and uniform pre tension were studied in the article. The experimental results show that both pre twisting and pre stretching can effectively improve the strength of low-carbon steel, but there is a loss in ductility and toughness. However, the samples treated with gradient pre torsion have better synergistic effects of strength ductility toughness than those pre stretched. The improvement of comprehensive mechanical properties is due to the formation of gradient structure, which means that the dislocation density gradually increases with the decrease of depth from the sample surface. This study provides a strategy for improving the mechanical properties of metal materials through gradient plastic deformation.

Keywords: torsional deformation; gradient structure; mechanical properties; low-carbon steel

引言

高强度、高延展性与韧性的协同是结构材料广泛应用的理想选择^[1]。金属的力学性能可以通过塑性变形、合金化、晶粒细化和引入第二相等多种加工方法来提高^[2]。在这些方法中, 塑性变形是可以用来调整几乎所有金属的力学性能的最广泛的方法之一^[3]。迄今为止, 已经发明了多种塑性变形工艺, 包括拉伸^[4]、压缩^[5]、累积叠轧 (ARB)^[6]、冷轧^[7]、等通道挤压变形^[8]、冷拔^[9]等等。这些塑性变形过程的共同之处在于它们可以对整个样品施加均匀变形。一般来说, 这些变形过程可以显著提高材料强度, 但是会导致塑性和韧性急剧下降^[10]。这意味着均匀变形的微观结构与变形材料的强度和延展性之间是不可同时存在的。另外, 一些非均匀的变形加工方法, 比如异步轧制^[11]、表面机械碾压处理^[12]、表面机械研磨处理^[13], 被用来制备梯度结构材料并实现了高强度与高塑性匹配^[14]。最近, 发现扭转变形是一种能够在圆形试样中沿径向引入应变和应变率梯度的非均匀梯度塑性变形的的方法, 这种方法能用于调整某些金属材料

的微观结构和力学性能^[15]。然而, 均匀和非均匀梯度变形对某种材料的微观结构和力学性能的影响之间的差异尚未见报道。在本文中, 使用 Q235 低碳钢作为模型材料, 分别研究了通过均匀预拉伸 (PTE) 和非均匀预扭转 (PTO) 加工的低碳钢的微观结构和拉伸性能, 并且发现在预扭转加工的样品具有更好的强度-延展性-韧性协同作用。

1 实验材料与方法

实验所研究的材料是 Q235 低碳钢, 其组成成分 (wt. %) 为 0.13C、0.32Mn、0.18Si、0.03P 和 0.032S。样品被加工成狗骨样, 标距部分长 120mm、直径 $\phi=10\text{mm}$ 。在所有加工程序之前, 样品首先在 700℃ 真空退火 1 h, 以消除过往加工的影响, 获得均匀粗晶 (CG) 组织。

1.1 预扭转变形实验

在室温 (RT) 下, 通过扭转试验机对低碳钢试样进行预扭转变形加工, 其中样品在一端保持静止并且另一端可以在中心轴上旋转^[15]。以 0.2 rpm (转/分) 的恒定速率进行扭转, 导致样品表面处的最大等效应变率为 2×10^{-3}

s^{-1} , 并设计了不同的扭转转数, 即 0.5、1 和 1.5 转 (R)。

1.2 预拉伸、拉伸和显微硬度实验

在 INSTRON 5966 试验机上进行了试件的预拉伸和拉伸试验, 初始应变速率为 $5 \times 10^{-4} s^{-1}$, 在恒定的横梁速度 ($3 mm/min$) 下进行了预拉伸和拉伸试验。预拉伸分别设置在 5%、10% 和 15% 的应变下停止, 而拉伸试验则拉伸到断裂为止。使用标距为 50 mm 的接触式引伸计来测量变形量。在本实验中, 每种条件至少使用两个试样, 得到的应力-应变曲线具有良好的重复性。显微硬度实验在经过机械抛光的棒状试样横截面上, 沿半径方向从表面到心部进行, 每次试验施加载荷为 9.8 N、保载时间为 5 s。每个硬度值是同一半径上五次检测结果的平均值。

1.3 显微分析实验

采用 X 射线衍射 (XRD)、扫描电子显微镜 (SEM) 和透射电子显微镜 (TEM) 等分析技术对经过预扭转和预拉伸处理的低碳钢试样进行显微组织表征。在使用光学显微镜时, 使用 400# 至 1500# 的砂纸对试样进行机械抛光, 然后采用硝酸酒精腐蚀液, 即 5% 硝酸和 95% 乙醇的混合溶液, 进行侵蚀。制备扫描电镜和透射电镜试样时, 样品首先经过机械抛光, 使得样品厚度达到 30 μm 左右, 然后将它们在含有 10% 高氯酸和 90% 乙酸的溶液中, 在 20 V 电压和室温下进行双射电化学抛光。

2 实验结果与分析

2.1 力学性能的分析与讨论

图 1 出示了低碳钢在预扭转 (PTO) 和预拉伸 (PTE) 加工后的工程应力-应变曲线和拉伸性能。如图 1 (a) 中的曲线 1 所示, CG 试样具有低强度 (即屈服强度 $\sigma_{0.2}=268.2 MPa$ 和抗拉强度 $\sigma_b=392.2 MPa$) 和良好的延展性 (即均匀延伸率为 $\varepsilon_u=21.1\%$, 断裂延伸率为 $\varepsilon_f=31.0\%$)。在 0.5 R 的 PTO 后 [见图 1 (a) 曲线 2], $\sigma_{0.2}$ 和 σ_b 分别增加到 328.0 MPa 和 434.2 MPa, 而 ε_u 和 ε_f 分别降至 18.9% 和 29.6%。随着 PTO 增加至 1.0 R 和 1.5 R 时 [见图 1 (a) 中的曲线 3 和 4], 强度逐渐升高伴随着延展性的连续降低, 即典型的加工硬化行为, 正如大多数变形材料一样^[16]。如图 1 (b) 所示, 随着 PTE 变形从 5% 增加到 15%, PTE 试样也表现出强度不断提升、延展性急剧下降的现象。

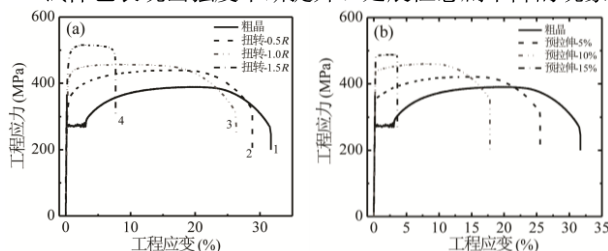


图 1 低碳钢在 (a) 预扭转和 (b) 预拉伸处理下的应力-应变曲线

为了比较 PTO 和 PTE 对低碳钢力学性能的影响, PTO 和 PTE 试样的极限强度 (σ_b) 与断裂伸长率 (ε_f) 变化趋势如图 2 (a) 所示。显然, PTE 试样的 $\sigma_b-\varepsilon_f$ 曲线的变化趋势是近似直线的, 然而, PTO 样本的 $\sigma_b-\varepsilon_f$ 曲线的

变化趋势是向上弯曲的。这表明当强度得到改善时, PTO 样品的延展性下降速度比 PTE 样品的延展率下降速度慢。因此, 用 PTO 处理的样品比通过 PTE 处理的样品获得更好的强度-延展性的协同。

静态韧性 (U_r), 应力-应变曲线下的总面积, 是表征材料在断裂之前每单位体积能量吸收能力的一个指标^[16], 计算受 PTO 和 PTE 影响的低碳钢的综合力学性能如表 1 所示。CG 样品具有非常高的静态韧性 ($U_r=119.2 MJ/m^3$)。经过 0.5 R 和 1.0 R 的 PTO 之后, U_r 分别略微降低至 118.9 MJ/m^3 和 109.3 MJ/m^3 。当进一步将 PTO 转速增加到 1.5 R 时, U_r 急剧下降至 35.6 MJ/m^3 , 类似地, PTE 加工导致静态韧性随着 PTE 应变的增加而逐渐降低, 例如, 在 10% 的 PTE 之后, U_r 降低至 86.1 MJ/m^3 。

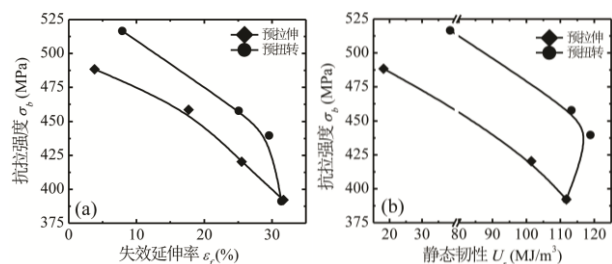


图 2 (a) 低碳钢在预扭转 (PTO) 和预拉伸 (PTE) 处理后的抗拉强度与断裂伸长率的关系, (b) 低碳钢在预扭转 (PTO) 和预拉伸 (PTE) 处理后的抗拉强度与静态韧性的关系

一般来说, 金属材料的强度和韧性不能共存的^[17], 如图 2 (b) 所示, 抗拉强度的提高是以加工样品静态韧性的降低为代价的。然而, 在 PTO 样品中获得的极限强度与静态韧性的曲线比在 PTE 样品中高得多, 即具有更好的强度-韧性匹配。图 3 是样品的维氏显微硬度 (H_v)。由图可知, CG 样品的平均显微硬度为 139.6 H_v (用 ● 表示)。在 10% 的 PTE (用 ▲ 表示) 之后, 显微硬度显著增加至约 186.4 H_v , 并且在不同深度处的值几乎相同。所有 PTO 样品的显微硬度也得到改善, 然而, 显微硬度变化的大小与距离样品表面的深度有着密切的关联。例如, PTO-1 R 样品的显微硬度 (由 ■ 表示), 在 300 μm 处其硬度为 208.1 H_v , 随着深度增加显微硬度连续降低至中心的 160.2 H_v , 近似遵循线性规律。通过这个显微硬度梯度, 我们通常认为样品在经过 PTO 处理后产生了梯度组织结构^[15]。

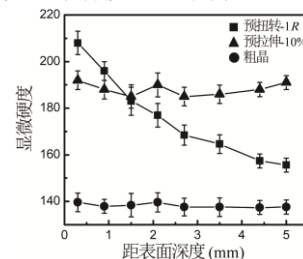


图 3 低碳钢在预扭转 (PTO) 和预拉伸 (PTE) 后距离试样表面不同深度的维氏显微硬度分布

2.2 微观结构观察与分析

图4(a)显示CG样品的SEM图像,表示该组织结构由铁素体(由绿色箭头指示的灰色区域)和珠光体(由红色箭头指示的白色区域)组成。如图4(b)放大图所示,珠光体无疑是由铁素体和渗碳体互相交叠组成的层状结构。根据SEM统计结果表明,铁素体和珠光体的平均尺寸分别为30 μm 和10 μm ,并且珠光体的体积分布约为10%左右。PTO和PTE对铁素体和珠光体的尺寸和体积分数的影响可以忽略不计。

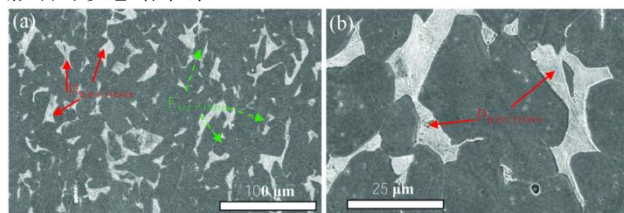


图4 (a) CG低碳钢的SEM图像,(b)珠光体的放大图像。铁素体和珠光体分别用绿色箭头和红色箭头表示

图5给出了PTO-1.5 R下样品表面不同深度的X射线衍射图,其晶体结构仅由铁素体组成,没有渗碳体的相,因渗碳体晶格常数远大于X射线波长不能产生衍射造成的。实验结果表明(110)和(200)峰的宽度随着距离表面深度的减小而逐渐增大,这与显微硬度变化规律相图,证实了梯度组织结构在预扭转加工低碳钢试样中形成。

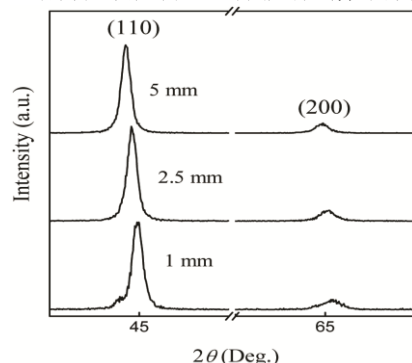


图5 低碳钢在(a)预扭转1.5 R、(b)预拉伸15%后距离表面5 mm、3 mm和1 mm深度的X射线衍射图谱

图6显示了在PTO-1 R的样品距离表面3 mm深度处的TEM图像和选区电子衍射(SAED)图像。经过观察,可以发现在PTO过程中引入了高密度位错,并且形成了大量的位错胞亚结构(由图中的箭头所示)。在 $[-111]$ 晶轴取得的SAED图像与铁素体相同(见图中的插图),这与X射线衍射结果一致(见图5)。

如上所述,CG样品的微观结构由铁素体和珠光体组成(见图4(a))。铁素体显然是由大晶粒组成,而珠光体含有铁素体和渗碳体,珠光体的层间隙可以达到几百纳米^[17]。渗碳体晶界可以作为位错滑移的阻碍,根据界面强化机理,材料的屈服强度主要取决于平均位错滑移距离^[18],在这种

情况下,铁素体的屈服强度比珠光体的屈服强度低。因此,可以推断出CG低碳钢的塑性变形(即PTO和PTE)主要是在铁素体区域进行的。因此,铁素体区域的高密度位错(见图6),是X射线衍射峰(见图7)加宽的原因。众所周知,变形材料的微观结构特征与塑性变形的条件密切相关^[19],对于PTO,应变和应变率随着距离样品表面深度的减小而不断增加^[18],因此,在PTO样品中位错密度的梯度分布,是随着表面深度逐渐变小X射线衍射峰逐渐加宽(见图5)的原因。

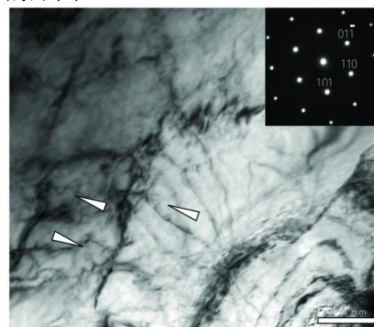


图6 预扭转1.0 R之后的低碳钢在距离表面3 mm深度的TEM图像和SAED图像。图中的箭头显示的是位错胞,插图表示在 $[-111]$ 晶轴采取的SAED图像

由于引入位错导致的加工硬化,有助于提高样品的强度^[2-3]。另外,协同强化还可以增强具有梯度组织结构的PTO样品的强度^[20],预扭转处理的样品比通过预拉伸处理的样品有更好的强度-延展性-韧性的协同作用(参见图3和4),这是由梯度结构的特定变形机制导致的^[21]。

(1) 梯度微观结构会引起拉伸试验的宏观梯度变形,并将应力状态从单轴应力转变为多轴应力,促进位错的积累和相互作用,导致应变硬化,可以提高延展性和韧性^[22-23]。

(2) 由于力学性能的不同,梯度组织结构会产生背应力^[23],背应力应变硬化是提高延展性和韧性的另一个因素。

3 结论

在本论文中,研究了非均匀梯度预扭转和均匀预拉伸对低碳钢显微组织和力学性能的影响,主要结论如下:

(1) 预扭转和预拉伸使得低碳钢强度逐渐升高,伴随着延展性的连续降低,结合样品拉伸性能的各项数据,发现经过预扭转处理的样品比经过预拉伸处理的样品获得更好的强度-延展性-韧性的协同。

(2) 显微硬度、X射线衍射图及透射电镜图像分析,表明预扭转过程产生梯度组织结构,随着距离样品表面深度的减小,位错密度不断增大,而预拉伸形成了均匀变形的微观结构。

(3) 预扭转塑性变形可形成梯度结构材料,导致优异的强度-延展性-韧性匹配,为发展先进高强韧性钢铁材料提供了一种重要方法。

基金项目:邯郸慧桥复合材料科技有限公司自设项目。

[参考文献]

- [1] K. Lu, The future of metals [J]. Science, 2010(328):319-320.
- [2] K. Lu, L. Lu, S. Suresh, Strengthening materials by engineering coherent internal boundaries at the nanoscale [J]. Science, 2009(324):349-352.
- [3] R. Valiev, Nanostructuring of metals by severe plastic deformation for advanced properties [J]. Nat. Mater, 2004(324):511-516.
- [4] J. H. Hollomon, Tensile deformation [J]. AIME Trans, 1945(12):1-22.
- [5] K. Yamanaka, M. Mori, S. Kurosu, H. Matsumoto, A. Chiba, Ultrafine grain refinement of biomedical Co-29Cr-6Mo alloy during conventional hot-compression deformation. Metall [J]. Mater. Trans. A, 2009(40):1980-1994.
- [6] Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji, T. Sakai, Novel ultra-high straining process for bulk materials-development of the accumulative roll-bonding (ARB) process [J]. Acta Mater, 1999(47):579-583.
- [7] N. Tsuji, R. Ueji, Y. Minamino, Nanoscale crystallographic analysis of ultrafine grained IF steel fabricated by ARB process [J]. Scr. Mater, 2002(47):69-76.
- [8] Y. Shi, M. Li, D. Guo, T. Ma, Z. Zhang, G. Zhang, X. Zhang, Tailoring grain size distribution for optimizing strength and ductility of multi-modal Zr [J]. Mater. Lett, 2013(108):228-230.
- [9] R. Z. Valiev, T. G. Langdon, Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement [J]. Prog. Mater. Sci, 2006(51):881-981.
- [10] X. Zhang, A. Godfrey, X. Huang, N. Hansen, Q. Liu, Microstructure and strengthening mechanisms in cold-drawn pearlitic steel wire [J]. Acta Mater, 2011(59):3422-3430.
- [11] R. Z. Valiev, I. V. Alexandrov, Y. T. Zhu, T. C. Lowe, Paradox of strength and ductility in metals processed by severe plastic deformation [J]. J. Mater. Res, 2002(17):5-8.
- [12] X. Wu, M. Yang, F. Yuan, G. Wu, Y. Wei, X. Huang, Y. Zhu, Heterogeneous lamella structure unites ultrafine-grain strength with coarse-grain ductility [J]. Proc. Natl. Acad. Sci, 2015(112):14501-14505.
- [13] T.H. Fang, W.L. Li, N.R. Tao, K. Lu, Revealing extraordinary intrinsic tensile plasticity in gradient nano-grained copper [J]. Science, 2011(331):1587-1590.
- [14] X. Yang, X. Ma, J. Moering, H. Zhou, W. Wang, Y. Gong, J. Tao, Y. Zhu, X. Zhu, Influence of gradient structure volume fraction on the mechanical properties of pure copper. Mater. Sci [J]. Eng. A, 2015(645):280-285.
- [15] Y. Wei, Y. Li, L. Zhu, Y. Liu, X. Lei, G. Wang, Y. Wu, Z. Mi, J. Liu, H. Wang, H. Gao, Evading the strength-ductility trade-off dilemma in steel through gradient hierarchical nanotwins [J]. Nat. Commun, 2014(5):67-69.
- [16] Y. M. Wang, E. Ma, M. W. Chen, Enhanced tensile ductility and toughness in nanostructured Cu [J]. Appl. Phys. Lett, 2002(80):2395-2397.
- [17] R. O. Ritchie, The conflicts between strength and toughness [J]. Nat. Mater, 2011(10):817.
- [18] M. E. Launey, R. O. Ritchie, On the Fracture Toughness of Advanced Materials [J]. Adv. Mater, 2009(21):2103-2110.
- [19] E. O. Hall, The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results [J]. Proc. Phys. Soc. B, 1951(64):747-753.
- [20] A. Galiyev, R. Kaibyshev, G. Gottstein, Correlation of plastic deformation and dynamic recrystallization in magnesium alloy ZK60 [J]. Acta Mater, 2001(49):1199-1207.
- [21] Z. Zeng, X. Li, D. Xu, L. Lu, H. Gao, T. Zhu, Gradient plasticity in gradient nano-grained metals [J]. Extreme Mech. Lett, 2016(8):213-219.
- [22] K. Lu, Making strong nanomaterials ductile with gradients [J]. Science, 2014(345):1455-1456.
- [23] M. Yang, Y. Pan, F. Yuan, Y. Zhu, X. Wu, Back stress strengthening and strain hardening in gradient structure [J]. Mater. Res. Lett, 2016(4):145-151.

作者简介：于晓娟（1990—），女，毕业于北京化工大学材料科学与工程专业，目前工作单位为邯郸市科学技术情报研究所，职务是专业技术人员，职称为研究实习员。