

成分对高锰合金钢组织和变形特性的影响

马晓莉¹ 于建刚^{1,2} 陈翠欣¹ 彭会芬¹

(1 河北工业大学材料学院,天津 300130; 2 首钢机电有限公司机械厂,北京 100040)

摘要 27Mn-3Si-3Al 和 15Mn-2Si-3Al 试验合金钢由真空感应炉冶炼成 16.5 kg 铸锭,1 200 ℃ 加热,锻成 Φ25 mm 棒材。27Mn-3Si-3Al 合金钢在应变前后保持单相奥氏体组织,其应力-应变曲线平滑,没有屈服平台和明显的加工硬化峰,该钢经 1 000 ℃ 2 h 固溶处理后,材料的抗拉强度为 692 MPa,伸长率为 59%。当钢中 Mn 含量降至 15%,有较多马氏体(Martensite, α' -M)相出现。而且在应变时又使 15Mn-2Si-3Al 钢中大量奥氏体转变为 α' -M 相,造成应力-应变曲线产生明显的加工硬化峰,致使该钢的伸长率降低至 35%。

关键词 TWIP(相变诱发塑性)钢 孪晶 变形特性

Effect of Composition on Structure and Deformation Behavior of High Manganese Alloy Steel

Ma Xiaoli¹, Yu Jiangang^{1,2}, Chen Cuixin¹ and Peng Huifen¹

(1 School of Materials Science & Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130;

2 Machine Works, Shougang Mechano-Electronic Co Ltd, Beijing 100040)

Abstract Test alloy steels 27Mn-3Si-3Al and 15Mn-2Si-3Al were melted by vacuum induction furnace, cast to 16.5 kg ingot, heated to 1 200 ℃ and forged to Φ25 mm bar. The 27Mn-3Si-3Al alloy steel maintained single-phase austenite structure before and after strain, of which the stress-strain curve was smooth without apparent yielding phenomenon and work hardening peak, the tensile strength of the steel solid-solution treated at 1 000 ℃ for 2 h was 692 MPa with elongation 59%. As the Mn content in the steel decreased to 15%, there was considerable martensite in structure, and strain led to large amount austenite in steel 15Mn-2Si-3Al transferring to α' -M phase, stress-strain curve producing obvious work hardening peak and elongation of steel decreasing to 35%.

Material Index TWIP (Transformation Induced Plasticity) Steel, Twin, Deformation Behavior

孪晶诱发塑性钢 TWIP (twinning induced plasticity steel) 是单相奥氏体(austenite, A) 钢,在外力作用下,这种材料以孪生方式产生均匀的塑性变形并仍保持奥氏体相不变,从而使其具有极高的塑性(60%~80%)和强度(600~800 MPa),成为近年来汽车用高强度、高塑性钢研究的热点^[1-5]。

1 试验材料

试验钢(表 1)在 ZG-0.025 型真空感应炉熔炼,锭重 16.5 kg。将铸锭重新加热到 1 200 ℃,锻造成 Φ25 mm 圆棒并进行 1 000 ℃ 2 h 固溶处理,水冷。

表 1 试验钢的化学成分/%
Table 1 Chemical composition of test steels /%

试验钢	Mn	Si	Al	C
27Mn-3Si-3Al (Mn27)	27.2	3.0	3.4	0.001 7
15Mn-2Si-3Al (Mn15)	15.5	2.0	3.5	0.002 7

2 试验结果和讨论

图 1 中 27Mn-3Si-3Al (Mn27, 图 1a) 钢看似由两

种颜色不同的相组成,但图 1(c) 的 XRD 谱上只有奥氏体相(γ)的衍射谱,为单相奥氏体(A)组成,因成分不均匀造成晶粒颜色的不同。

与 Mn27 钢相比,15Mn-2Si-3Al (Mn15) 钢的晶粒较为细小,且明、暗交替分布,由奥氏体和铁素体(ferrite, F or α) 两种相组成(图 1d)。由衍射峰的相对强度可知, α 相的体积分数应多于奥氏体相,对照图 1(b) 可知,其中份量较大的发暗组织为 α 相,而体积较少的白亮组织则为奥氏体相。考虑到此钢含锰 15%,Mn 是强烈提高奥氏体稳定性、且使钢 C 曲线显著右移的合金元素,故此钢在冷却过程中形成的 α 相不可能是平衡态的铁素体相,应是和铁素体具有相同结构的淬火组织-马氏体(M) 组织。两者具有体心立方结构,在 XRD 谱上很难将其衍射峰分开。参照文献[6],将此时的 α 相定义为 α' -M。

1 000 ℃ 2 h 固溶处理后,所得钢的显微组织如图 2(a,b) 所示。Mn27 钢锻态组织中的黑色块状组织消失,说明高温奥氏体均匀化通过材料成分的均匀而达到组织均匀的目的。但图 2(c,d) 的 XRD 谱

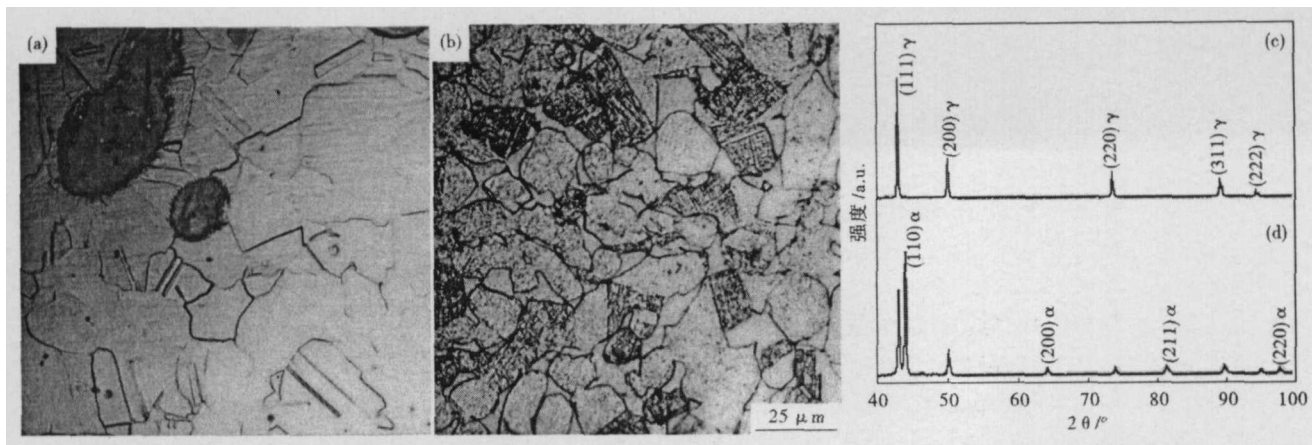


图 1 锻态 27Mn-3Si-3Al 钢(a)(c)和 15Mn-2Si-3Al 钢(b)(d)的组织形貌(a)(b)和 X-射线衍射(XRD)谱(c)(d)

Fig. 1 Morphology of structure (a) (b) and X-ray diffraction (XRD) spectrum (c) (d) of 27Mn-3Si-3Al steel (a) (c) and 15Mn-2Si-3Al steel (b) (d), forged

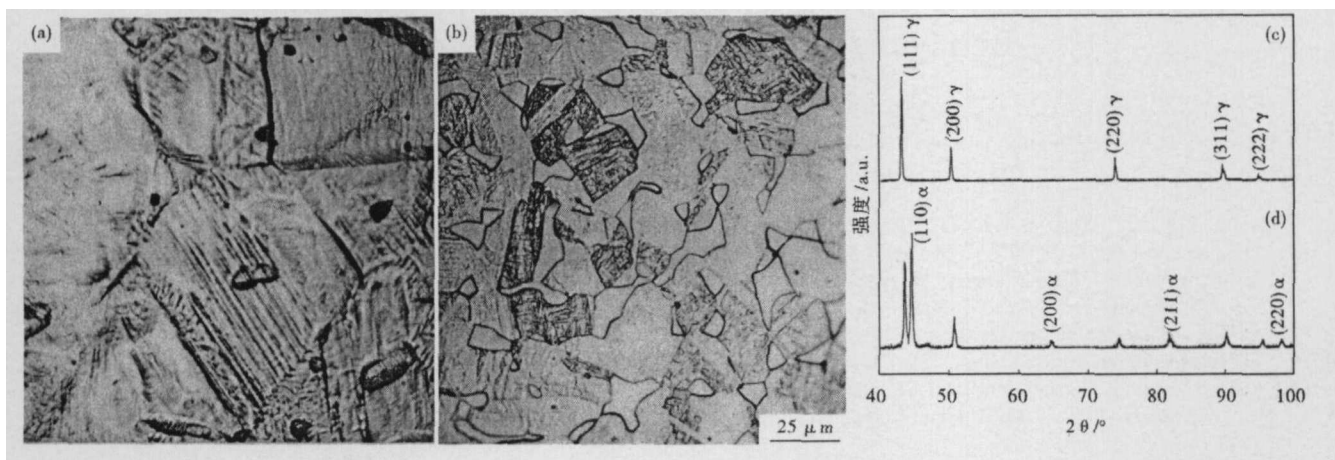


图 2 27Mn-3Si-3Al 钢(a)(c)和 15Mn-2Si-3Al 钢(b)(d)1 000 °C 2 h 固溶处理后的组织形貌(a)(b)和 X-射线衍射(XRD)谱(c)(d)

Fig. 2 Morphology of structure (a) (b) and X-ray diffraction (XRD) spectrum (c) (d) of 27Mn-3Si-3Al steel (a) (c) and 15Mn-2Si-3Al steel (b) (d), solid-solution treated at 1 000 °C for 2 h

表明两种钢的相组成与锻态没有差别, Mn27 钢仍由单相奥氏体组成, Mn15 钢由 $A + \alpha'$ -M 两相构成。

两种钢的应力-应变曲线都很平滑, 没有一般钢屈服时产生的锯齿状屈服平台(图 3)。Mn27 钢受

力前为单相奥氏体组织, 外力的作用并未使奥氏体状态改变(图 4a, b), 并且由变形后该钢的显微组织可知, 奥氏体晶粒内部存在大量孪晶(图 4c), 说明外加载荷使奥氏体以孪生方式实现变形。

对比变形前后材料两种状态的 XRD 谱可以发现, 变形后钢的(111) γ 峰明显加强, 其它衍射峰则明显变弱。说明在变形过程中有晶粒转动。一个方向的变形发生困难后, 通过晶粒转动使另一个方向的孪生变形启动, 这是在图 4(c)观察到的不同方向孪晶发生交叉的主要原因。

与 Mn27 钢不同, Mn15 钢的应力-应变曲线则在普通碳钢和低合金钢中观察到的类似, 先有一个低应力屈服台阶, 而后材料的应力急剧增加达到最大值(产生缩颈), 导致材料迅速断裂。并且, 两种状态下材料的伸长率都比相应的 Mn27 钢低。

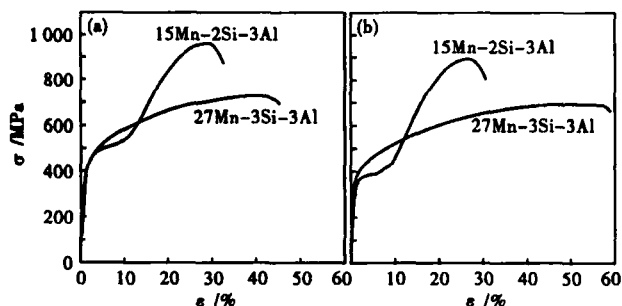


图 3 两种高锰合金钢应力-应变曲线:(a)锻态;(b)1 000 °C 2 h, 水冷

Fig. 3 Stress-strain curves of two high Mn steels: (a) forged; (b) 1 000 °C 2 h, water cooling

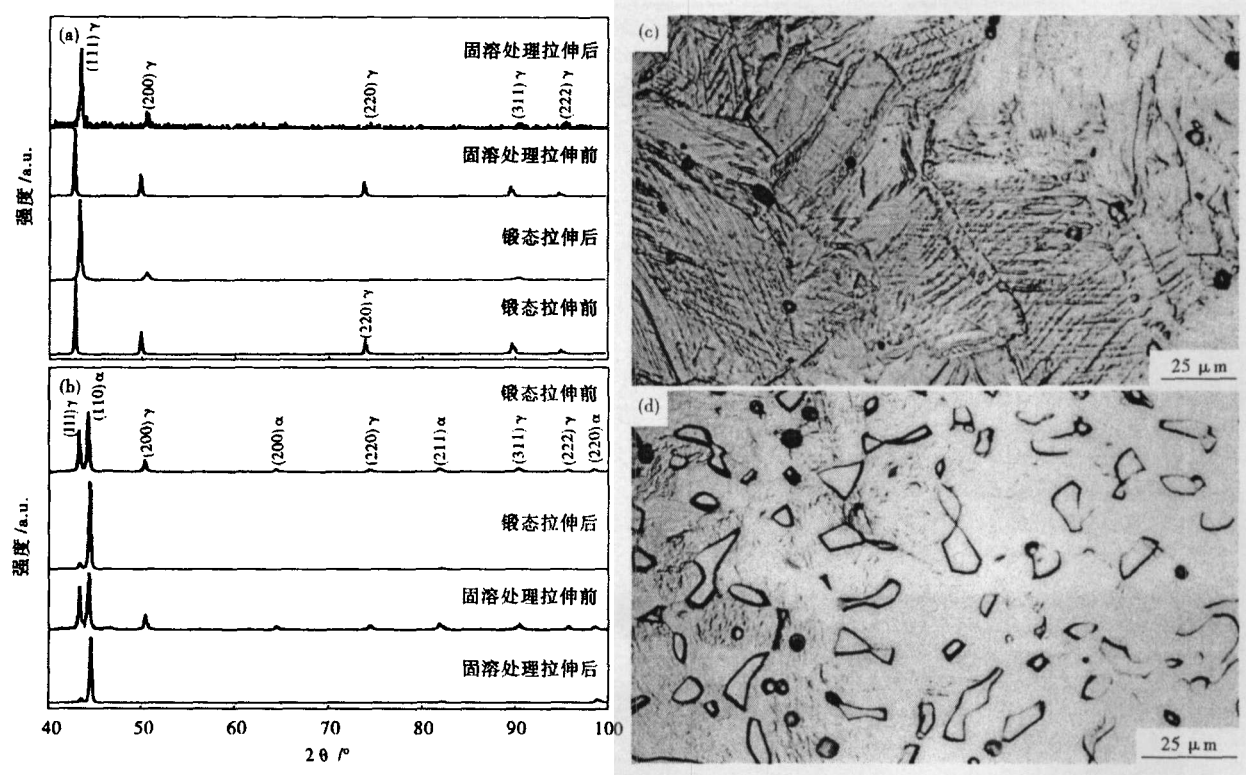


图4 27Mn-3Si-3Al钢(a)(c)和15Mn-2Si-3Al钢(b)(d)在拉伸应变前后的XRD谱(a)(b)和组织形貌(c)(d)

Fig. 4 X-ray diffraction (XRD) spectrum (a) (b) and morphology of structure (c) (d) of 27Mn-3Si-3Al steel (a) (c) and 15Mn-2Si-3Al steel (b) (d) before and after tensile strain

图4(a,b)表明受力后Mn15钢 α 相的衍射峰明显增强,且几乎只看到(110) α 峰,而奥氏体相的衍射峰则变得很弱,说明在受力变形过程中不仅有 $A \rightarrow \alpha'$ -M相变发生,而且也有晶粒转动。由此可知, α' -M相为强化相,对应图3(a,b)中Mn15钢应力-应变曲线上的加工硬化峰则是由上述相变引起的。对应图3(a,b)低应变区的屈服台阶则是奥氏体变形引起的。

与Mn27钢相比,尽管Mn15钢的伸长率较低,但在将近1000 MPa的抗拉强度条件下能够达到30%伸长率也是一般钢无法比拟的。产生如此好塑性的原因与变形过程中的应力诱发 $A \rightarrow \alpha'$ -M相变分不开,即相变诱发塑性效应(Transformation induced plasticity, TRIP)。

3 结论

(1)足够的锰和适量的Al、Si是保证材料获得单相奥氏体组织,且在受力变形过程中仍保持此相不变的先决条件。具有这种单相奥氏体组织的钢在外界载荷作用下,以孪生方式进行变形,应力-应变曲线平滑,没有明显的加工硬化。所以能使锰含量为27%时、Si含量3%和Al含量3%的材料在1000℃2h固溶处理后,材料的抗拉强度达到692 MPa

的同时伸长率为59%,具有很好的塑性。

(2)钢中Mn含量降低使奥氏体稳定性变差,导致材料冷却过程中 α' -M相出现,而且外加载荷又促使大量奥氏体转变为 α' -M,致使材料的应力-应变曲线产生明显的加工硬化峰,降低了材料伸长率。

河北省自然科学基金资助项目(599032)

参考文献

- 1 Grässel O, Krüger L, Frommeyer G, et al. High Strength Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP Steels Development-properties-application. *Inter J Plasticity*, 2000, 16: 1391
- 2 Bouaziz O, Guelton N. Modeling of TWIP Effect on Work-hardening. *Mater Sci & Eng*, 2001, A319-321: 246
- 3 Vercammen S, Blanpain B, De Cooman B C, et al. Cold Rolling Behavior of an Austenitic Fe-30Mn-3Al-3Si TWIP Steel: the Importance of Deformation Twinning. *Acta Mater*, 2004, 52: 2005
- 4 严玲,唐获,米振莉,等.不同加工工艺对高强高塑性TWIP钢组织与性能的影响. *热加工工艺*, 2005(8): 15
- 5 唐获,米振莉,陈雨来.国外新型汽车用钢的技术要求及研究开发现状. *钢铁*, 2005, 40(6): 1
- 6 Tomota Y, Strum M, Jr Morris J W. Microstructure Dependence of Fe-high Mn Tensile Behavior. *Metall Trans*, 1986, 17A: 537

马晓莉(1954-),女,高级实验师,河北工学院毕业,金属材料物理性能。

收稿日期:2008-01-02