

铈对超级双相不锈钢 00Cr25Ni7Mo4N 热加工性能的影响

俞 飞^{1,2} 宋志刚² 郑文杰² 郭忠诚¹ 季祥民² 丰 涵²

(1 昆明理工大学材料科学与工程学院, 昆明 650093; 2 钢铁研究总院结构材料研究所, 北京 100081)

摘要 通过 Gleeble-1500D 热模拟试验机对 0~0.034% Ce 的超级双相不锈钢 00Cr25Ni7Mo4N (% : 0.016 ~ 0.020C, 24.50 ~ 24.72Cr, 7.06 ~ 7.18Ni, 3.61 ~ 3.73Mo, 0.26 ~ 0.27N) 进行了 950 ~ 1 200 °C、应变速率 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的热拉伸和变形量 60%、应变速率 $1 \times 10^0 \text{ s}^{-1}$ 的热压缩试验。结果表明, 适量铈的加入能提高 00Cr25Ni7Mo4N 钢的热塑性, 铈含量为 0.012% 时有最好的热塑性; 铈含量为 0.021% 以上时, 该钢的峰值应力低于未加稀土钢; 铈的加入有助于钢提前达到稳态流变阶段。

关键词 超级双相不锈钢 00Cr25Ni7Mo4N 铈 热加工性

Influence of Cerium on Hot Workability of Super Duplex Stainless Steel 00Cr25Ni7Mo4N

Yu Fei^{1,2}, Song Zhigang², Zheng Wenjie², Guo Zhongcheng¹, Ji Xiangmin² and Feng Han²

(1 School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093; 2 Institute for Structural Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract Hot tension test with strain rate $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ and hot reduction test with deformation 60% and strain rate $1 \times 10^0 \text{ s}^{-1}$ for 0 ~ 0.034% Ce super duplex stainless steel 00Cr25Ni7Mo4N (% : 0.016 ~ 0.020C, 24.50 ~ 24.72Cr, 7.06 ~ 7.18Ni, 3.61 ~ 3.73Mo, 0.26 ~ 0.27N) at 950 ~ 1 200 °C have been carried out by using Gleeble-1500D thermal simulation machine. Results show that adding suitable cerium is available to increase the hot plasticity of steel 00Cr25Ni7Mo4N, and the steel containing 0.012Ce% has optimum hot plasticity; as the Ce content is more than 0.021%, the peak stress of the steel is lower than that of steel non-adding rare earth elements; and adding Ce is available to reach steady state deformation stage in advance.

Material Index Super Duplex Stainless Steel, 00Cr25Ni7Mo4N, Cerium, Hot Workability

00Cr25Ni7Mo4N 超级双相不锈钢中的非金属夹杂的存在是影响材料高温热塑性的一个重要原因, 但其对钢的热塑性影响十分复杂, 数量、组成、粒度、形状、硬度以及其分布等都是必须考虑的因素^[1]。为改善合金的高温热塑性, 可适量地加入稀土等添加剂^[2]。本文就稀土铈含量对高氮超级双相不锈钢 00Cr25Ni7Mo4N 的高温热塑性影响作了相关研究。

1 试验方法

试验钢(表 1)用 50 kg 真空感应炉冶炼, 将金属纯料, 通入预定压强的高纯氮气, 在出炉前加入不同含量的稀土 Ce 后浇锭。钢锭锻成 $\Phi 14 \text{ mm}$ 圆棒, 经过 1 080 °C 固溶处理 30 min, 水淬, 并加工成 $\Phi 10 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$ 热拉伸试样和 $\Phi 8 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的热压缩试样, 在 Gleeble-1500D 热模拟试验机上进行热塑性试验。

高温拉伸试验温度为 950 ~ 1 200 °C, 以 20 °C/s 的速率加热至 950 ~ 1 200 °C 温度, 保温 180 s, 进行热拉伸试验; 应变速率 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。

高温压缩试验温度为 800 ~ 1 250 °C, 以 20 °C/s 的速率加热至 800 ~ 1 250 °C 温度, 保温 60 s, 进行热压缩试验; 热压后立刻对试样进行水淬; 热压缩变形量 60%, 应变速率 $1 \times 10^0 \text{ s}^{-1}$ 。

2 试验结果与分析

2.1 铈对 00Cr25Ni7Mo4N 超级双相不锈钢断面收缩率的影响

表 1 试验钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test steel / %

样号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Ce
0*	0.020	0.48	0.99	0.011	0.011	24.72	7.06	3.73	0.27	0
4*	0.018	0.49	0.95	0.011	0.011	24.50	7.18	3.61	0.27	0.012
5*	0.019	0.48	0.97	0.011	0.010	24.55	7.12	3.65	0.27	0.021
6*	0.016	0.47	0.98	0.011	0.010	24.61	7.09	3.62	0.26	0.034

通讯作者: 宋志刚, 教授, 钢铁研究总院结构材料研究所, 北京 100081

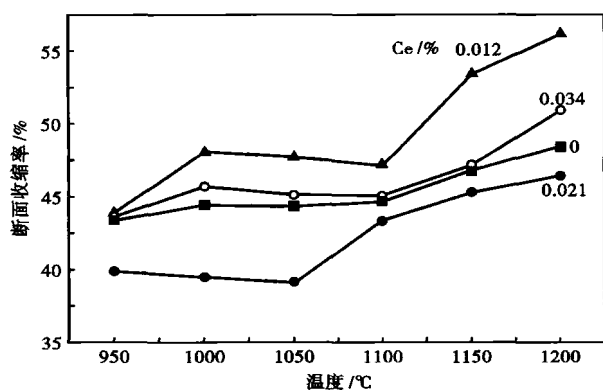


图1 温度和铈含量对00Cr25Ni7Mo4N钢的断面收缩率的影响

Fig. 1 Effect of cerium content and temperature on reduction of area of steel 00Cr25Ni7Mo4N

由图1可知,1200℃时,稀土0.012%Ce的4[#]钢比不加稀土的0[#]钢的最大断面收缩率提高了16%。而加入0.021%Ce的5[#]钢的高温热塑性则变差,继续增加铈含量至0.034%的6[#]钢与未添加稀土的0[#]钢相比,两者的高温热塑性差别不大。

由图2(a)可看出,在未加稀土的钢中,存在长条浅灰色的MnS夹杂以及深色尖角的硬质Al₂O₃夹杂,因此钢的热塑性较差。

随着钢中铈的加入,夹杂物形态发生了变化,钢中长条状MnS夹杂变短,如图2(b)所示。由于稀土的化学活性较高,与氧的亲合力较大,加入的稀土优先与含铝氧化物进行了复合,试样已没有尖角的硬质Al₂O₃夹杂的存在,因此钢的高温热塑性得到

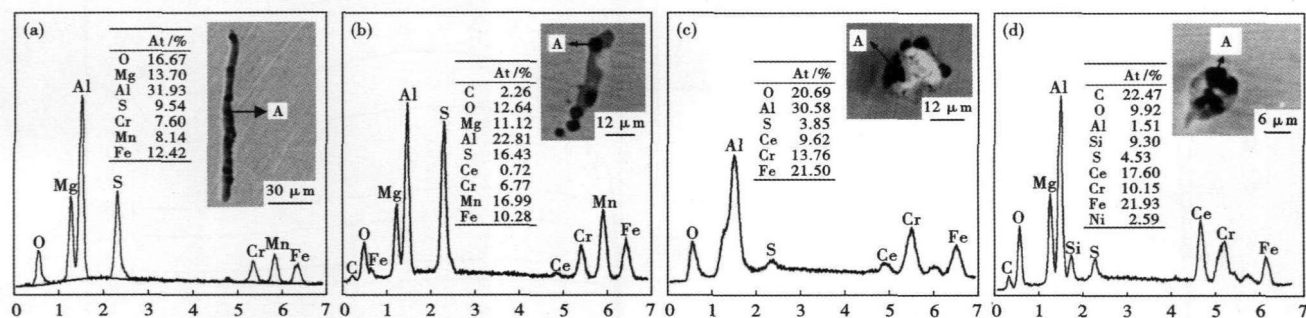


图2 夹杂物能谱分析,00Cr25Ni7Mo4N钢中Ce%:0(a);0.012(b);0.021(c);0.034(d)

Fig. 2 Energy spectrum analysis of inclusions in steel 00Cr25Ni7Mo4N, Ce%: 0(a); 0.012(b); 0.021(c); 0.034(d)

改善。但由于铈量不足使钢液凝固后期析出的硫化锰变性,具有危害性的长条硫化锰依然存在。分析夹杂能谱图可知,该夹杂以铈的化合物为中心,形成了含有Ce₂O₃S、MnS、Al₂O₃的复合夹杂。

随着稀土含量和稀土硫比值的增加,钢中长条硫化锰夹杂的数量和形态逐渐发生变化^[3]。稀土含量为0.021%的5[#]钢中出现大量的球状夹杂和纺锤型夹杂,且细长条硫化锰夹杂基本消失。如图2(c)所示,5[#]钢样中的稀土夹杂的外形明显变得更为圆润,但夹杂尺寸也变大,这是因为过量的稀土会导致含稀土夹杂的聚集,大型铈化合物的存在对钢的热塑性具有不利的影响。对该球状夹杂进行能谱分析,结果显示经过稀土变性的此种球状夹杂为稀土硫氧化物、硅酸盐、氧化铝及硫化锰的复合夹杂,此时钢中夹杂物基本上都是球状的稀土硫氧化物,不出现细长条硫化锰夹杂、单纯的稀土氧化物硫化物夹杂,稀土基本完成了对硫化物改性的冶金功能。

当加入的稀土量达到一定程度时,稀土对硫化

锰变质的同时,多余的稀土由于极强的化学活性,很容易与具有极大表面积的熔融氧化镁坩埚反应,形成RE-Mg-O-S的复合物。如图2(d)所示的含铈为0.034%的6[#]钢样的电镜扫描图片及能谱图支持了上述观点。稀土加入量较高的情况下,稀土还可以与钢中的磷、砷、锑、铋、铅、铜等低熔点杂质发生交互作用。它可抑制这些杂质在晶界上偏聚,有净化晶界的作用,从而改善高温热塑性,这也是6[#]钢比5[#]钢热塑性好的原因所在。

2.2 铈对00Cr25Ni7Mo4N超级双相不锈钢热变形行为的影响

由图3可见,00Cr25Ni7Mo4N钢中加入0.012%Ce后,1100℃的峰值应力从141MPa升至145MPa,当Ce加至0.021%时,其峰值应力下降至135MPa,进一步增加Ce至0.034%时,峰值应力降至131MPa。

图4可见,铈为0(a)与0.034%(b)的不同温度下的单道次平面应力-应变试验曲线,可以看出随

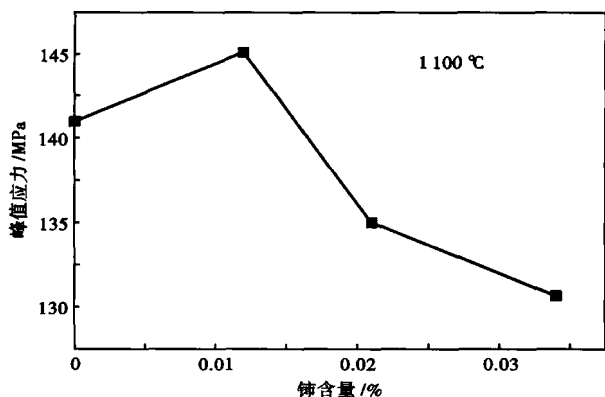


图 3 钕含量对 00Cr25Ni7Mo4N 钢变形峰值应力的影响

Fig. 3 Effect of Cerium content on peak stress of deformation of steel 00Cr25Ni7Mo4N

着压缩的进行,在开始阶段,材料出现明显的加工硬化,在这个过程中伴随有铁素体的动态回复软化和奥氏体的动态再结晶软化,但硬化效果大于软化效果,仍表现为加工硬化效果,流变应力值迅速增大。在达到峰值应力后,软化效果大于硬化效果,所以流变应力值降低。当达到稳态应力值时,硬化效果和软化效果基本持平,材料进入稳态流变应力阶段,在形貌上表现为近似水平线^[4],因此可以判断组织在变形过程中发生了动态再结晶。随着变形温度的提高,峰值应力呈现逐渐降低的趋势。这是由于:(1)温度升高有利于再结晶软化;(2)随着变形温度升高,位错移动的阻力减小,变形抗力降低,同时第二相的溶解也有利于动态再结晶。

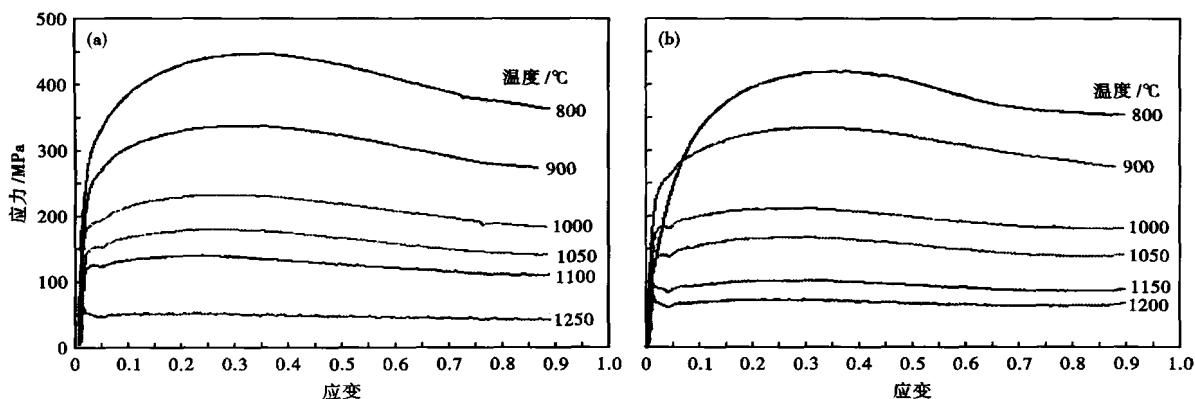


图 4 00Cr25Ni7Mo4N 钢的应力-应变曲线, Ce% : 0(a); 0.034(b)

Fig. 4 Stress-strain curves of steel 00Cr25Ni7Mo4N, Ce% : 0(a); 0.034(b)

图 4 中,加 0.034% Ce 的试样在 1 000 °C 时就基本达到稳态流变阶段,而未加钕的 0[#] 试样则在 1 100 °C 才达到类似稳态流变阶段,说明钕的加入促进了钢达到稳态流变阶段,即扩大了材料的稳态流变的温度区间。其可能有两方面的原因:

(1) 一般情况下,碳氮原子沿位错线一侧偏聚形成 Cottrell 气团,有钉扎位错或阻滞位错滑移的能力,钕是一种表面活性元素,其对碳氮原子的极化作用,阻碍了碳氮原子进入位错,从而减弱了对位错的钉扎作用^[5],有利于组织的动态再结晶。

(2) 钕也是极有效的非自发形核剂,具有细化晶粒的作用,而在相同变形量下,细晶粒变形储能高,再结晶驱动力大,因此更容易发生再结晶。

3 结论

(1) 在 950 ~ 1 200 °C, 钢中钕含量为 0.012% 时,材料的断面收缩率最高。

(2) 在 1 100 °C 内,钕含量为 0.021% 时,材料的最大变形抗力低于未加稀土钢。

(3) 钕的加入有助于超级双相不锈钢提前达到稳态流变阶段。

参考文献

- 1 李代铺. 钢中的非金属夹杂物. 北京: 科学出版社, 1983
- 2 陈佩芳. 稀土金属在钢中的应用. 金属学报, 1978, 2(14): 188
- 3 余宗森, 褚幼义. 钢中稀土. 北京: 冶金工业出版社, 1982
- 4 周计明, 齐乐华, 陈国定. 热成形中金属本构关系建模方法综述. 机械科学与科技, 2005, 24(2): 13
- 5 郭景海, 杨庆祥, 田永君, 等. 稀土对 60CrMnMo 钢塑性和韧性的影响. 钢铁, 1991, 26(11): 47

俞 飞 (1984-), 男, 硕士研究生, 双相不锈钢材料研究。

收稿日期: 2010-02-26