

稀土 Ce 对孪晶诱导塑性钢低温冲击性能影响研究

庄昌凌*, 杨光凯

贵州大学材料与冶金学院, 贵阳 550025

Study on the effect of rare earth Ce on the low-temperature impact properties of twin-induced plasticity steel

Zhuang Changling*, Yang Guangkai

College of Materials and Metallurgy, Guizhou University, Guiyang 550025, China

1. 前言

孪晶诱导塑性钢因其优异的性能在最近几十年备受关注, 并且在液化天然气存储、外太空和具有丰富资源的极地地区的探索等方面展现出巨大的应用潜力^[1-3]。目前奥氏体不锈钢[1]、9%Ni 合金钢[66]等传统低温结构材料存在成本高昂、制备工艺复杂等缺点。因此, 可满足碰撞过程中能量吸收需求和抗低温开裂能力的孪晶诱导塑性钢成为能满足以上要求的替代钢种, 而低温冲击性能是低温钢在低温服役环境的核心指标。因此, 有必要开展孪晶诱导塑性钢的低温冲击性能研究。

本课题组利用 25Kg 真空感应炉开展了 Fe-Mn-C-Al 孪晶诱导塑性钢冶炼实验, 结果表明, 孪晶诱导塑性钢在室温下展现出良好塑性与韧性; 一些文献报道了孪晶诱导塑性钢的低温夏比冲击韧性^[4-6], 表明该类钢种在超低温应用下是非常有应用潜力。Wang 等人^[7]的研究中表明, 韧窝源于形状不规则的大尺寸夹杂物颗粒, 孪晶诱导塑性钢较高的 Mn 含量会使钢中形成许多尺寸粗大且形状不规则的 MnS 夹杂物, 导致形成更多的裂纹源从而降低了低温韧性。稀土的加入可以通过改变夹杂物的类型和形貌来改善钢的显微组织和机械性能, 但是稀土在孪晶诱导塑性钢方面的研究是较少的。因此, 本文通过冶炼不同稀土 Ce 含量的孪晶诱导塑性钢, 探索稀土的加入能否提高孪晶诱导塑性钢低温下的冲击韧性, 扩大其在低温应用领域的发展空间。

2. 实验材料和步骤

2.1. 实验材料

本研究涉及的钢种主要元素成分的质量分数如表 1 所示。其中通过高频红外碳硫分析仪(Yanrui Instruments, CS-230)采用红外吸收法测定 C 和 S 的含量。采用氧氮氢分析仪(LECO, ONH836), 测定 O 和 N 的含量。另外, 采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS; ThermoFisher, iCAPQ)对微量的 Ce 含量进行检测。剩余元素含量(包括 Mn、Al 和 Ti)的含量使用 X 射线荧光光谱(XRF; SHIMADZU, XRF-1800)测定。

表 1 四炉孪晶诱导塑性钢的主要元素成分含量(质量分数, %)

Table 1 Main elemental component content of four-furnace TWIP steel (mass fraction, %)

样品编号	Mn	Al	C	S	O	N	Ce	Fe
1#	18.09	1.80	0.61	0.0012	0.0014	0.0029	—	余量
2#	17.83	1.85	0.55	0.0008	0.0016	0.0027	0.0008	余量
3#	17.94	1.86	0.54	0.0007	0.0019	0.0031	0.0011	余量
4#	18.21	1.79	0.54	0.0004	0.0018	0.0033	0.0048	余量

2.2. 实验步骤

本研究采用工业纯铁(99.5%)、电解锰(99.8%)、铝块(98%)和增碳剂($C \geq 98.5\%$, $S \leq 0.05\%$)作为基础原材料,并使用氧化铝坩埚在 25kg 中频真空感应炉冶炼了四炉 20kg 的 Fe-Mn-C-Al 孪晶诱导塑性钢的钢锭,编号依次为 1#、2#、3#、4#。其中,编号为 1# 的炉次不添加稀土 Ce,编号为 2#、3#、4# 的炉次分别加入 0.0005wt.%、0.0015wt.%、0.0045wt.% 的稀土铈颗粒(99.9%)。随后,将冶炼后的铸锭加热至 1100℃,保温 1 小时。采用 750Kg 空气锤将铸锭锻造成直径约为 $\Phi 120\text{mm}$,高 220mm 的圆柱。采用 0.1mm 的钼丝在如图 1(a)所示圆柱位置进行线切割加工,切下多个标准夏比 V 型缺口摆锤冲击试样和拉伸试样,夏比冲击试样均采用最新的中华人民共和国国家标准 (GB/T 229-2020) 所执行。随后将试样在电阻炉中 850℃ 固溶处理 1h 后,立即水淬至室温。随后在冲击样品上采用线切割加工开出 V 型缺口。

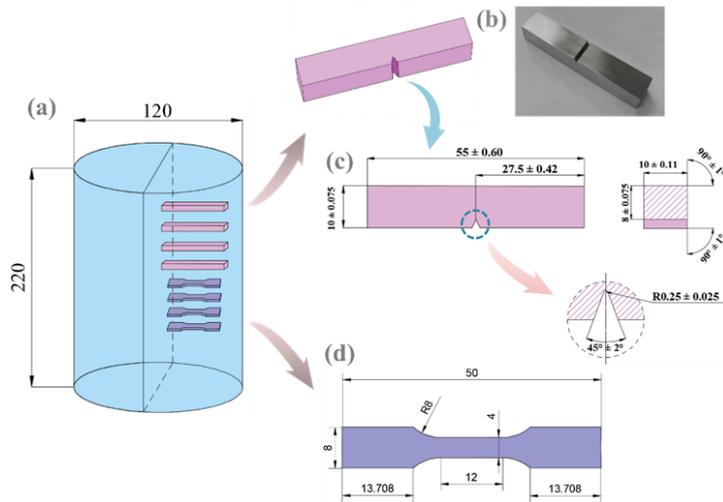


图 1 夏比冲击和拉伸试样样品外观与尺寸。(a)试样在钢锭中的取样位置;(b)夏比 V 型缺口冲击试样示意图和表面打磨后的试样外观;(c)夏比 V 型缺口冲击试样的具体尺寸标注图;(d)拉伸试样的具体尺寸标注图。

Fig. 1 Appearance and dimensions of Charpy impact and tensile specimen samples. (a) sampling position of the specimen in the ingot; (b) schematic diagram of the Charpy V-notch impact specimen and the appearance of the specimen after surface polishing; (c) specific dimensional labeling diagram of the Charpy V-notch impact specimen; (d) specific dimensional labeling diagram of the tensile specimen.

3. 结果与分析:

按上述实验方案得到的三个不同温度下 1#~4#样品的冲击韧性如表 2 所示。

表 2 三个不同温度下 1#~4#样品的冲击韧性

Table 2 Impact toughness of samples 1# ~ 4# at three different temperatures

冲击韧性(J/cm ²)	室温(RT)	-80°C	-196°C (LNT)
1#	288.6	208.6	55.3
2#	306.7	214.1	81.2
3#	341.8	229.4	86.4
4#	353.9	242.4	103.6

可以发现在三个不同温度下，随着 Ce 添加量的增加，冲击韧性均随之提升。同号样品在 LNT 至 RT 的温度范围内，冲击韧性随着温度的降低而降低。尽管如此，4#/LNT 样品的冲击韧性仍高达 103.6 J/cm²。随着 Ce 添加量的增加，样品在 LNT 下的冲击韧性明显上升。4#/RT 样品在所有冲击试样中具有最好的冲击韧性，其值为 353.9 J/cm²。值得一提的是，在 LNT 下，4#/LNT 样品相比较 1#/LNT 样品，其冲击韧性增强了约 87.3%。所以，可以发现随着 Ce 的加入，对本实验所研究的孪晶诱导塑性钢冲击性能提高极为有利，尤其在 LNT 下的增强效果是尤为突出的。

对 1#~4#冲击样品在 LNT 下断口横截面附近的夹杂物进行了统计分析，获得了不同 Ce 含量处理后样品中夹杂物尺寸的演变规律，其结果如图 2 所示。

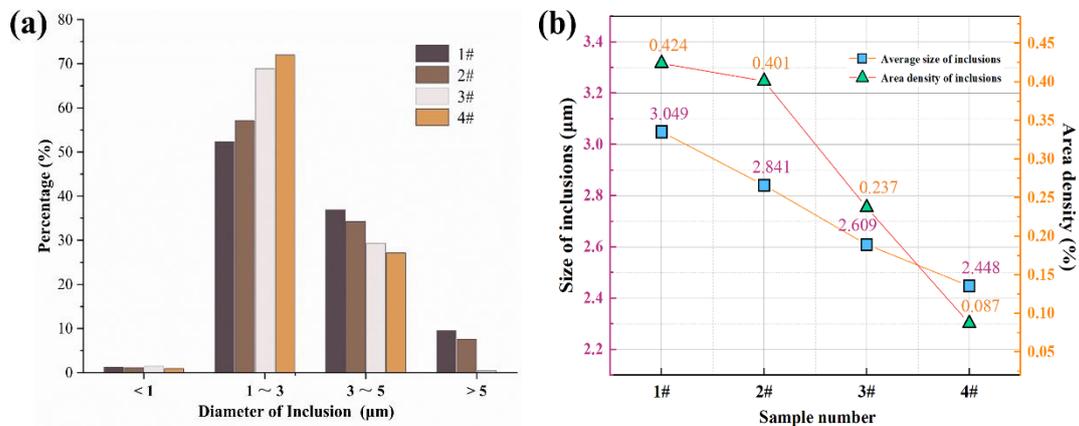


图 2 在 LNT 下，对冲击样品 1#~4#的断裂截面附近的夹杂物进行统计分析。(a)样品 1#~4#中不同尺寸夹杂物比例；(b)样品 1#~4#中夹杂物的平均尺寸。

Fig. 2. Statistical analysis of inclusions near the fracture cross-sections of impact samples 1# to 4# at LNT. (a) The proportion of inclusions in different size ranges in samples 1# ~ 4#; (b) Average size of inclusions in samples 1# ~ 4#.

将 4 个样品中的夹杂物尺寸分为 4 个等级，分别为小于 1 μm、1~3 μm、3~5 μm 以及大于 5 μm。从图 2 (a) 中可以明显观察到，尺寸小于 1 μm 的夹杂物比例没有明显差别。然而，随着 Ce 添加量的增加，尺寸在 1~3 μm 范围内的夹杂物数量逐渐增多，大于 3 μm 的夹杂物数量降低。尤其在 4#样品中，几乎没有发现尺寸大于 5 μm 的夹杂物。在图 2 (b) 中，可以发现随着 Ce 含量的增加，钢中夹杂物的平均尺寸不断减小，在 Ce 添加量为 0.0048%时，钢中夹杂物平均尺寸为 2.448 μm，相比较未添加 Ce 的 1#样品，钢中夹杂

物平均尺寸减小了 19.71%。另外，1#样品中单位面积的表面夹杂物密度较大，达到了 0.424%。当钢中添加 Ce 的量仅为 0.008%时，夹杂物面密度稍有下降，但是随着 Ce 的进一步添加，0.0048%添加量的 4#样品中面密度大幅降低，仅有 0.087%，降低了 79.48%。

从以上的统计分析，可以发现稀土 Ce 的添加可以大幅降低钢中大尺寸夹杂物的占比，细化夹杂物，有效降低夹杂物的平均尺寸。同时，可以有效降低钢中夹杂物的面密度，达到夹杂物弥散化的效果。夹杂物弥散化后会导致裂纹尖端前的空隙密度下降，增大了裂纹扩展阻力，提升了冲击韧性。

4. 结论

(1) 与没有添加稀土的孪晶诱导塑性钢相比，添加微量 Ce 对孪晶诱导塑性钢的夏比冲击韧性提升是非常显著的，尤其是在 LNT 下，提升幅度分别为 46.9%、56.3%、87.3%。随着 Ce 加入量的增加，钢中夹杂物被稀土细化且变得弥散，其平均尺寸减小了 19.71%，面密度降低了 79.48%。

(2) 钢中的夹杂物从大尺寸且不规则变成了椭球状的细小稀土夹杂物，缓解了应力集中现象，抑制微裂纹的发生，这是导致冲击韧性大幅提升的主要原因。采用稀土改性钢中原有夹杂物的思路，通过添加微量的 Ce 有效增强低温下的冲击韧性，提高了孪晶诱导塑性钢对于现有低温用钢的竞争力，对低温结构件的运用提供了参考。

致谢

感谢国家自然科学基金项目（项目号：52164032）的支持。

参考文献

- [1] B. Cooman, Y. Estrin, S.K. Kim, Twinning-induced plasticity (TWIP) steels, *Acta Mater.* 142 (2017) 283-362.
- [2] D.L. Zou, J.G. Sun, H. Wu, Y.F. Hao, L.F. Cui, Experimental and numerical studies on the impact resistance of large-scale liquefied natural gas (LNG) storage outer tank against the accidental missile, *Thin-Walled Struct.* 158 (2021) 107189.
- [3] M.L. Uhran, Progress toward establishing a US national laboratory on the International Space Station, *Acta Astronaut.* 66 (2010) 149-156.
- [4] J. Chen, F.T. Dong, H.L. Jiang, Z.Y. Liu, G.D. Wang, Influence of final rolling temperature on microstructure and mechanical properties in a hot-rolled TWIP steel for cryogenic application, *Mater. Sci. Eng. A* 724 (2018) 330-334.
- [5] Y. Li, Y.F. Lu, W. Li, M. Khedr, H.B. Liu, X.J. Jin, Hierarchical microstructure design of a bimodal grained twinning-induced plasticity steel with excellent cryogenic mechanical properties, *Acta Mater.* 158 (2018) 79-94.
- [6] S.X. Zhong, C. Xu, Y. Li, W. Li, H. Luo, R.Z. Peng, X.S. Jia, Hierarchy modification induced exceptional cryogenic strength, ductility and toughness combinations in an asymmetrical-rolled heterogeneous-grained high manganese steel, *Int. J. Plast.* 154 (2022) 103316.
- [7] X.J. Wang, X.J. Sun, C. Song, H. Chen, S. Tong, W. Han, F. Pan, Evolution of microstructures and mechanical properties during solution treatment of a Ti-V-Mo-containing high-manganese cryogenic steel, *Mater. Charact.* 135 (2018) 287-294.