

## 稀土元素 Ce 对新型 616 钢板组织和力学性能的影响

董方 沈国慧 郭升乐 崔志峰

(内蒙古科技大学材料与冶金学院, 包头 014010)

**摘要** 试验的含 Ce 新型 616 钢(成分: 0.23 ~ 0.25C, 0.73 ~ 0.78Si, 1.64 ~ 1.70Mn, 0.003 ~ 0.005S, 0.016 ~ 0.020P, 0.051 ~ 0.061Ti, 0.026 ~ 0.028Nb, 0.002 0 ~ 0.003 0B, 0 ~ 0.302Ce) 由 10 kg 真空感应炉熔炼, 轧成 5 mm 厚钢板, 并经 900 °C 水淬, 600 °C 回火。通过万能试验机、金相显微镜、扫描电子显微镜等实验仪器研究了钢中 Ce 含量对 616 钢板的组织及力学性能的影响。结果表明, 当 Ce 含量在 0.096% 时, 616 钢板晶粒细化明显, 钢中硫化物由长条状转变为球状, 可提高钢板的抗拉强度和韧性, 含 0.096% Ce 板的抗拉强度从未加稀土的 681 MPa 提高至 779 MPa; 再增加 Ce 含量, 钢板进一步细化不明显, 钢中夹杂物增多, 当含 Ce 0.302% 时, 钢板的抗拉强度降至 712 MPa。

**关键词** 稀土元素 Ce 新型 616 钢 细化晶粒 力学性能

## Effect of Rare Earth Element Ce on Structure and Mechanical Properties of New Type Steel 616

Dong Fang, Shen Guohui, Guo Shengle and Cui Zhifeng

(School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010)

**Abstract** The test new type steel 616 containing Ce (成分: 0.23 ~ 0.25C, 0.73 ~ 0.78Si, 1.64 ~ 1.70Mn, 0.003 ~ 0.005S, 0.016 ~ 0.020P, 0.051 ~ 0.061Ti, 0.026 ~ 0.028Nb, 0.002 0 ~ 0.003 0B, 0 ~ 0.302Ce) is melted by a 10 kg vacuum induction furnace, rolled to 5mm thickness plate, water-quenched at 900 °C and tempered at 600 °C. The effect of Ce content in steel on structure and mechanical properties of plate of steel 616 has been studied by universal tensile testing machine, optical microscope, scanning electron microscope etc experimental instrument. Results show that as the Ce content in steel is 0.096%, the refinement of grain in plate of steel 616 is obvious and the sulphide in steel is modified from long strip to spheroid, it is available to increase the tensile strength and toughness of steel plate, the tensile strength of 0.096% Ce plate increases to 779 MPa from 681 MPa of non-adding Ce plate; as the Ce content further increases the more refinement of grain in plate is not obvious and the amount of inclusions in steel increases, with Ce content 0.302% the tensile strength of plate decreases to 712 MPa.

**Material Index** Rare Earth Element Ce, New Type Steel 616, Grain Refinement, Mechanical Properties

以 616 抗冲击钢板为基础, 通过添加稀土元素提高其高强韧性, 以发展适用于民用车辆的新型钢板。

利用稀土元素的特殊性质, 把稀土资源优势转化为优质稀土钢的品种优势, 增强我国钢铁产业的综合竞争力, 提高钢材质量, 扩大钢材品种<sup>[1-3]</sup>。目前, 国内外学者对稀土在钢中的作用机理研究主要集中在净化作用、变质作用、微合金化作用上。研究表明稀土具有提高钢材强韧性, 改善耐磨性, 提高抗疲劳性能, 改善钢的耐腐蚀性等效果<sup>[4-9]</sup>。

本文研究添加稀土元素 Ce 对抗冲击钢板力学性能的影响, 借此来发展新一代的具有特色的抗冲击钢板。

### 1 试验材料及方法

#### 1.1 试验钢制备

采用 10 kg 真空感应炉冶炼试验用 616 抗冲击钢。将纯铁、高碳硅铁、高碳锰铁等其它合金先进行

合金化熔炼。冶炼末期采用布料器二次加入不同含量的稀土元素 Ce, 稀土在钢中收得率为 30% ~ 50%, 所以稀土加入量分别为 0.25%、0.50%、0.75%。钢液熔化后使用大功率搅拌 3 ~ 4 min 后浇注为钢锭。冶炼后测得钢中稀土铈(Ce)剩余量分别为 0.096%、0.195%、0.302%, 实际收得率为 38.4%、39.0%、40.26%, 均在范围之内。

浇铸后的钢锭在电阻炉中加热至 1 200 °C 后取出开轧, 此温度下轧制钢件既不会出现高温咬入困难现象又不会出现低温热脆、头部开裂现象; 终轧温度过高容易使钢的实际晶粒长大, 温度过低保证了轧制在奥氏体单相区进行, 并且降低钢的塑性, 所以终轧温度比 Ac<sub>3</sub> 线高 50 ~ 100 °C 即可, 最终的终轧温度定为 900 °C。轧至 5 mm 厚的长条状薄板, 经过 900 °C 水淬, 600 °C 高温回火热处理工艺得到试验所需钢板。

试验用 616 钢板的化学成分见表 1。

表1 试验 Ce 微合金化新型 616 钢板的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of test Ce microalloying new type steel 616 plate / %

试样号	C	Si	Mn	S	P	Ti	Cu	Nb	B	Ce
1 <sup>#</sup>	0.23	0.73	1.65	0.005	0.018	0.052	0.08	0.027	0.002 0	0
2 <sup>#</sup>	0.24	0.78	1.64	0.004	0.017	0.051	0.07	0.028	0.002 0	0.096
3 <sup>#</sup>	0.24	0.78	1.68	0.005	0.016	0.057	0.07	0.026	0.003 0	0.195
4 <sup>#</sup>	0.25	0.78	1.70	0.003	0.020	0.061	0.08	0.028	0.002 0	0.302

## 1.2 试样制备及试验方法

(1) 采用 DK7740Z 电火花钼丝切割机, 在热处理后的薄板上纵向取样<sup>[9]</sup>。拉伸试样按国家标准 GB/T228-2002 要求进行加工, 制成带夹头板状试样。

(2) 试验钢的化学成分用直读光谱仪进行分析。通过 Axiovert25 型蔡司金相显微镜与 QUAN-TA-400 型扫描电子显微镜观察晶粒度、金相组织与稀土夹杂物的分布与形态。

(3) 拉伸实验在 CSS-88500 型电子万能试验机上进行, 采用 QUANTA-400 型扫描电镜对拉伸、冲击断口形貌进行定性分析。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 稀土对钢组织的影响

图 1 为添加稀土 Ce 含量不同钢板的实际晶粒度对比图, 钢板在电阻炉加热至 900 °C 水冷淬火, 获得马氏体组织, 后经 600 °C 高温回火。从图 1 中可以看出, 加入稀土后试样的实际晶粒度都明显小于未加稀土的试样; 2<sup>#</sup> ~ 4<sup>#</sup> 钢板中随稀土含量的增加, 钢的实际晶粒度相对于未添加稀土的 1<sup>#</sup> 钢板有了显著降低, 晶粒明显细化, 晶粒度从 6.5 级细化至 8 级。这是因为稀土属于表面活性元素, 可以降低表

面张力, 因此降低了形成临界晶核所需的功, 所以产生的大量高熔点稀土化合物微小固态质点提供了大量异质晶核, 并且这些异质晶核容易在晶界面上偏聚, 阻碍了晶粒长大, 故稀土加入能够细化晶粒; 但是当钢中稀土量超过 0.195% 时, 钢液中会产生大量稀土化合物, 彼此之间会有结合长大的趋势, 使得

钢的组织没有发生明显细化的同时却出现大量较大的夹杂物, 从而在受到外力作用时, 容易产生应力集中, 破坏钢板的性能。

### 2.2 稀土对钢夹杂物的影响

由图 2(a) 可知, 在未添加稀土 Ce 的钢板中, 主要含有的非金属夹杂物为长条形, 大小在 10 ~ 20 μm, 对应能谱图可知夹杂物成分主要为 Si、Mn、Fe、O、S 元素, 由此可知, 夹杂物类型主要为 MnS、SiO<sub>2</sub> 等夹杂; 由图 2(b) 可知, 加入稀土后钢板中的夹杂物由长条形变为球形, 尺寸减小到 3 μm 左右, 由对应的能谱图可知, 夹杂物成分主要为 Ce、O、C、Fe 元素。由此可知, 在钢中加入稀土 Ce 后, 钢中的夹杂物由硫化物、氧化物变为 Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CeS 等稀土夹杂物。

钢中 MnS 性质与基体相近, 但是其收缩系数比基体大, 因而在冷却时容易在其周围产生裂纹和空隙, 所以长条形的 MnS 夹杂在横向机械性能试验中相当于裂纹源, 在施加外来载荷时, 使这些显微裂纹进一步扩展, 破坏钢的横向性能; 钢中加入稀土 Ce 后, 与硫作用生成的稀土硫化物形状变为球形或椭圆形, 在钢板冷却或受到外力作用时, 不容易产生应力集中而形成裂纹源, 可以明显改善钢板的各向异性。

钢中稀土加入量也不是越多对钢的组织与性能

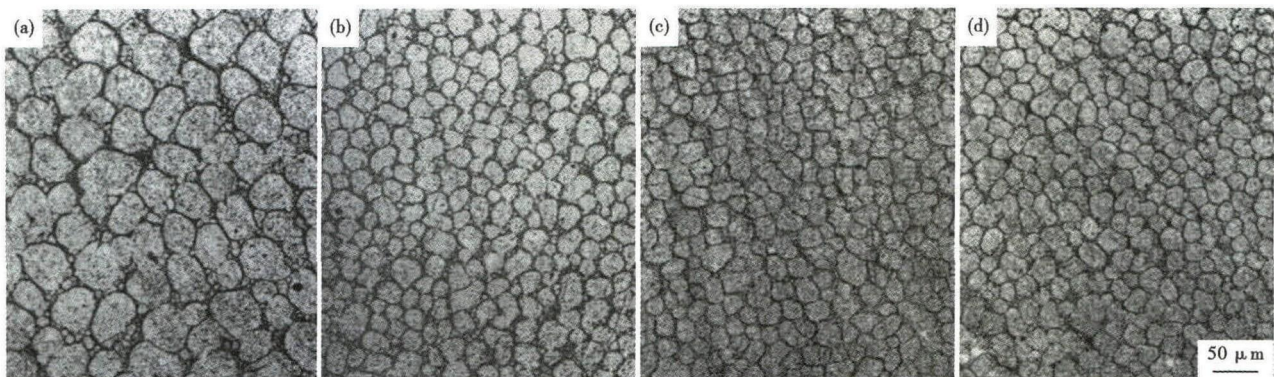


图 1 (a) 1<sup>#</sup> 未加 Ce, (b) 2<sup>#</sup> 0.096% Ce, (c) 3<sup>#</sup> 0.195% Ce, (d) 4<sup>#</sup> 0.302% Ce 钢板的晶粒形貌和尺寸 (900 °C 水淬, 600 °C 0.5 h 回火)

Fig. 1 Morphology and size of grains in steel plate; (a) 1<sup>#</sup> non-adding Ce, (b) 2<sup>#</sup> 0.096% Ce, (c) 3<sup>#</sup> 0.195% Ce and (d) 4<sup>#</sup> 0.302% Ce, water quenching at 900 °C and tempering at 600 °C for 0.5 h

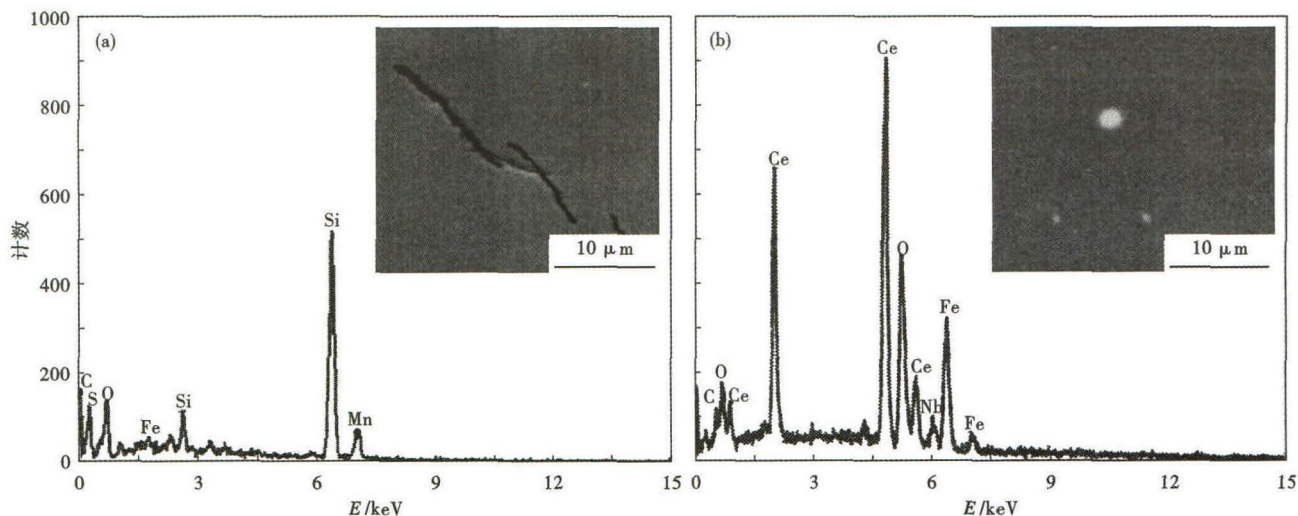


图 2 添加稀土元素铈前(a)后(b)钢板中夹杂物 SEM 形貌和能谱分析

Fig. 2 SEM morphology and energy dispersive spectrum of inclusion in steel plate before (a) and after (b) adding rare earth element cerium

越好,2#钢中含 0.096% Ce 的稀土产生的稀土化合物数量较少、尺寸较小、分布也比较弥散,从而改善钢板的组织和性能;随着稀土加入量的增加,当钢中稀土含量达到 0.302% 时,钢中的稀土夹杂物明显增多,并且有结合长大的趋势。这将会使得钢板的组织变差,性能降低。

### 2.3 Ce 对钢力学性能的影响

#### 2.3.1 稀土元素 Ce 对钢硬度的影响

在 HV-50A 型维氏硬度计上测出不同含量 Ce 钢板的硬度值后,通过维氏与洛氏硬度之间的转换表,化为对应的洛氏硬度,如图 3 所示,从图 3 可以看出,随着钢板中稀土 Ce 含量的增加,钢板的硬度在增高。未添加稀土时,硬度值为 20.3 HRC,当钢板中 Ce 含量为 0.096% 时,硬度值为 23.1 HRC; Ce 为 0.195% 时,硬度值为 25.8 HRC; Ce 为 0.302% 时,硬度值为 27.5 HRC。随稀土含量增加,硬度值分

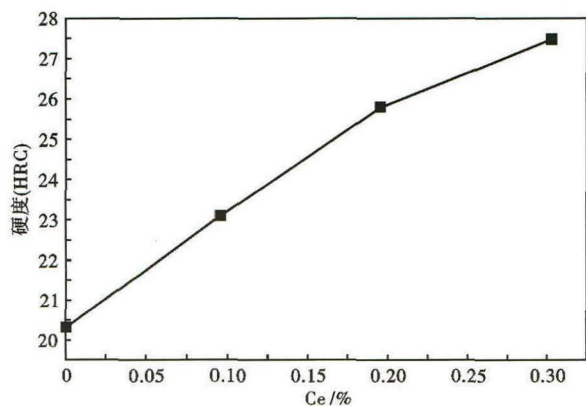


图 3 Ce 含量对钢板硬度的影响(900 °C 水淬,600 °C 0.5 h 回火)

Fig. 3 Effect of Ce content on hardness of steel plate, water quenching at 900 °C and tempering at 600 °C for 0.5 h

别增加 13.8%、11.7%、6.6%,增加幅度趋于平缓,可见稀土加入量在 0.096% 时,钢板硬度提高最明显,之后稀土的作用逐渐减弱。

#### 2.3.2 稀土元素 Ce 对钢拉伸性能的影响

表 2 为不同稀土铈含量的钢板的主要力学性能。图 4 为对应的拉伸应力-应变曲线图。从图 4 可以看出,加入稀土能够提高钢板的抗拉强度,并且当 Ce 含量在 0.096% 时,钢板的最大抗拉强度为 779 MPa,伸长率达到 16.42%;随着钢中稀土含量的增加,钢板的抗拉强度、伸长率开始降低,但是总体上性能要优于未添加稀土的钢板,所以添加适量稀土可以改善钢板的拉伸性能。

图 5 为 1#~4# 钢板拉伸断口 SEM 形貌,由图 5 可知:(1)未加 Ce 的 1# 试样由韧窝 + 少量解理面组成,断裂形式主要为韧性断裂;含 Ce 的 2#、3#、4# 试

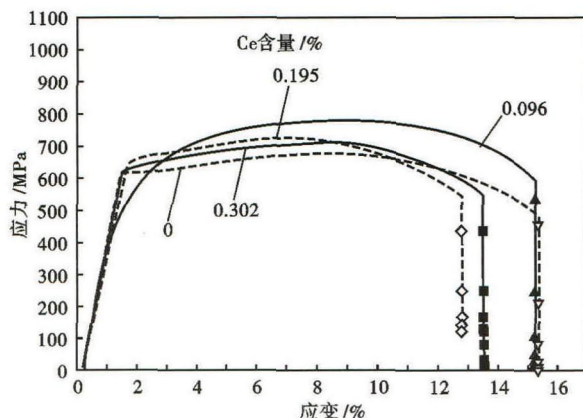


图 4 不同 Ce 含量钢板的拉伸曲线(900 °C 水淬,600 °C 0.5 h 回火)

Fig. 4 Tensile curves of steel plate with different Ce content, water quenching at 900 °C and tempering at 600 °C for 0.5 h

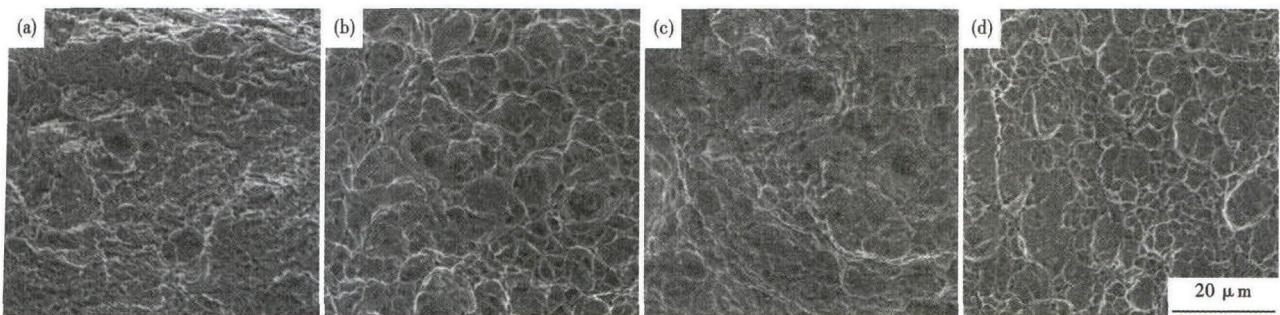


图5 (a)1#未加Ce,(b)2#0.096%Ce,(c)3#0.195%Ce,(d)4#0.302%Ce钢板拉伸断口形貌,SEM(900℃水淬,600℃0.5h回火)

Fig. 5 Morphology of tensile fracture of steel plate with non-adding Ce, 1#(a), containing 0.096% Ce, 2#(b), 0.195% Ce, 3#(c) and 0.302% Ce, 4#(d), water quenching at 900℃ and tempering at 600℃ for 0.5 h, SEM

表2 Ce含量对5mm 616钢板力学性能的影响(900℃水淬,600℃0.5h回火)

Table 2 Effect of Ce content on mechanical properties of 5 mm plate of steel 616, water quenching at 900℃ and tempering at 600℃ for 0.5 h

Ce / %	抗拉强度( $R_m$ ) / MPa	屈服强度( $R_{p0.2}$ ) / MPa	断后伸长率 / %
0	681	615	20.57
0.096	779	542	16.42
0.195	726	655	15.58
0.302	712	630	16.18

样由较多韧窝组成,断裂形式为韧性断裂。(2)1#试样中含较多S、P等有害杂质,这些有害杂质组成的化合物容易在晶界偏聚,使试样沿晶断裂,在其断口微观形貌上产生少量“河流状”花样,含0.096%Ce的2#试样断口韧窝均匀且较大,含0.195%Ce和0.302%Ce的3#、4#试样断口韧窝分布不均并且韧窝数量开始增多。

拉伸试样缩颈中心断口含较多韧窝,这与拉伸过程的塑性变形有关。当试样心部的夹杂物含量较多且沿晶界析出时,拉伸过程中夹杂物与基体产生大量空隙,随着应力的增大,微孔在纵向与横向不断增加和长大,聚合成微裂纹,方向垂直于拉应力方向,最后,裂纹沿剪切面扩展到试件表面,形成微观上的韧窝断面。2#试样(含0.096%Ce)钢板晶粒细化,夹杂物变性,生成的稀土球形化合物聚集在晶界,在受外力情况下不易产生应力集中,表现在拉伸断口上产生的韧窝分布均匀并且较大;3#、4#试样中(含0.195%Ce、0.302%Ce)随稀土含量增加,试样中夹杂物种类和含量都在增加,并且开始聚集长大,这就使得断口处韧窝分布不均匀,数量增多,最终导致钢板的拉伸性能降低。

### 3 结论

(1)加入稀土铈后可以明显细化钢板晶粒,稀土

最佳含量为0.096%,此时晶粒分布均匀,晶粒度达到8级;但随着铈加入量的增加,晶粒度没有明显变化,但晶粒分布开始混乱,稀土夹杂开始增多。

(2)钢中加入稀土铈可以将夹杂物改性,长条状的硫化物夹杂改变为球形或椭圆形的稀土夹杂物;Ce含量为0.096%时,钢中稀土夹杂物细小,分布均匀弥散,Ce含量在0.096%~0.302%时,钢中稀土夹杂物开始增多,并且开始聚集长大。

(3)钢中加入稀土铈能够提高钢板的硬度,Ce含量在0.096%时,硬度提高最明显,之后随铈含量的增加,钢板的硬度增加幅度开始变缓。

(4)钢中加入稀土铈可以增加钢板的抗拉强度,Ce含量在0.096%时,钢板的抗拉强度达到最大,之后随稀土铈含量增加,抗拉强度开始降低,但总体要高于未加稀土铈钢板的抗拉强度。

### 参考文献

- [1] 贺海钧,宋洪芳.发展产业集群,提高包头稀土产业的竞争力[J].稀土,2006,27(2):88-91.
- [2] 王艳文.包头稀土产业发展战略研究[D].包头:内蒙古科技大学,2013.
- [3] 袁利兵.浅谈包头稀土产品质量现状[J].稀土,2011,32(2):98-101.
- [4] 林勤,叶文,杜垣胜,等.稀土在钢中的作用规律与最佳控制[J].北京科技大学学报,1992,14(2):225-231.
- [5] 周恺武,彭平,徐少华,等.稀土元素在钢中的应用与研究[J].铸造设备研究,2004(3):35-38.
- [6] 戴景文.用稀土—发展21世纪钢的重要途径[J].稀土,2001,22(4):7-22.
- [7] 马杰,刘芳.稀土元素在钢中的作用及对钢性能的影响[J].钢铁研究,2009,37(3):54-56.
- [8] 李春龙.稀土在钢中的应用及需注意的一些问题[J].稀土,2001,22(4):1-6.
- [9] 霍文霞,任慧平,金自力,等.不同稀土加入量对高锰钢组织及力学性能的影响[J].热加工工艺,2012,41(7):15-17.

董方(1964-),男,硕士(1995年北京科技大学),教授,钢铁冶金新工艺新技术。E-mail:dongfang9407@163.com

收稿日期:2015-12-28