

# EAF-VOD-VAR 和 VIM-VAR 冶炼工艺对 G50 超高强度钢韧性的影响

夏志新<sup>1,2</sup> 杨卓越<sup>2</sup> 李保成<sup>1</sup> 陈嘉砚<sup>2</sup>

(1 中北大学材料科学与工程学院,太原 030051; 2 中国钢研科技集团公司结构材料研究所,北京 100081)

**摘要** 研究了真空感应熔炼 + 真空自耗重熔 (VIM-VAR) 和电弧炉 + 真空-氧脱碳 + 真空自耗重熔 (EAF-VOD-VAR) 法两种工艺冶炼的超高强度钢 G50 (C: 0.28 ~ 0.29, Si: 1.88 ~ 1.98, Ni: 4.45 ~ 4.49, Cr: 1.04 ~ 1.05, Mo: 0.57 ~ 0.61, Nb: 0.031 ~ 0.034) 的夹杂物和机械性能。结果表明, EAF-VOD-VAR 法冶炼的 G50 钢夹杂物级别低于 VIM-VAR 法冶炼的 G50 钢的夹杂物级别; EAF-VOD-VAR 法冶炼的 G50 钢的韧性 ( $A_{KU2}$  86 ~ 88 J,  $K_{IC}$  130 ~ 132 MPa · m<sup>1/2</sup>) 明显高于 VIM-VAR 法冶炼的 G50 钢的韧性 ( $A_{KU2}$  70 ~ 74 J,  $K_{IC}$  112 ~ 118 MPa · m<sup>1/2</sup>)。

**关键词** 超高强度钢 G50 VIM-VAR EAF-VOD-VAR 夹杂物 韧性

## Effect of EAF-VOD-VAR and VIM-VAR Metallurgical Process on Toughness of Ultra-high Strength Steel G50

Xia Zhixin<sup>1,2</sup>, Yang Zhuoyue<sup>2</sup>, Li Baocheng<sup>1</sup> and Chen Jiayan<sup>2</sup>

(1 College of Materials Science and Engineering, Zhongbei University, Taiyuan 030051;

2 Institute for Science Materials, China Iron & Steel Research Institute Group, Beijing 100081)

**Abstract** Inclusion and mechanical properties of ultra-high strength steel G50 (0.28 ~ 0.29C, 1.88 ~ 1.98Si, 4.45 ~ 4.49Ni, 1.04 ~ 1.05Cr, 0.57 ~ 0.61Mo, 0.031 ~ 0.034Nb) melted by two process VIM-VAR and EAF-VOD-VAR have been studied. Results showed that the inclusion rating units of steel G50 melted by EAF-VOD-VAR process were lower than that melted by VIM-VAR process, and the toughness of steel G50 ( $A_{KU2}$  86 ~ 88 J,  $K_{IC}$  130 ~ 132 MPa · m<sup>1/2</sup>) was obviously higher than that ( $A_{KU2}$  70 ~ 74 J,  $K_{IC}$  112 ~ 118 MPa · m<sup>1/2</sup>) of steel G50 melted by VIM-VAR process.

**Material Index** Ultra-high Strength Steel G50, VIM-VAR, EAF-VOD-VAR, Inclusion, Toughness

超高强度钢(屈服强度 ≥ 1 380 MPa)的明显弱点是韧性不足<sup>[1~4]</sup>,尤其是低的断裂韧性  $K_{IC}$ ,用电弧炉(EAF) + 真空脱碳(VOD) + 真空自耗重熔(VAR)工艺取代原真空感应炉熔炼(VIM) + 真空自耗重熔(VAR)工艺,冶炼了 G50 超高强度钢,使冶炼原料成本降低,钢的韧性明显改善。

### 1 材料和试验方法

G50 超高强度试验钢采用“VIM + VAR”冶炼和“EAF + VOD + VAR”冶炼的两炉 4.8 t 钢锭。自耗重熔后各取头尾部钢锭锻造成 90 mm × 90 mm 的方坯(始锻温度 1 150 °C,终锻温度 850 °C),其化学成分和气体含量见表 1。从方坯上纵向分别切取 Φ5 mm × 25 mm、10 mm × 10 mm × 55 mm 和 20 mm × 40 mm × 180 mm 三点弯曲  $K_{IC}$  试样,所有试样经过 920

°C 1 h 正火、860 °C 1 h 油冷淬火,最终经过 300 °C 2 h 空冷的回火处理。拉伸试验在 WE-300 型试验机上进行;冲击试验在 JBN-300B 冲击试验机上进行;并用 MTS-880 测量计算断裂韧性  $K_{IC}$ ,所有力学性能至少取 3 个试样的平均值。

力学性能测试后,用 HITACHI S-4300 冷场发射扫描电子显微镜(SEM)观察拉伸和冲击试样的断口形貌,同时用 EDAX 能谱分析夹杂物、成分、形态和尺寸。用光学显微镜观察各类夹杂物,并按 GB/T 10561-2005 规定评级。

### 2 试验结果及分析

从表 1 可以看出,两种工艺冶炼的钢成分十分相近,经过相同的热处理(920 °C 1 h 正火、860 °C 1 h 淬火、300 °C 2 h 回火)后,拉伸性能(强度和塑

表 1 G50 钢的化学成分和气体含量

Table 1 Chemical compositions of steel G50 melted by VIM-VAR and EAF-VOD-VAR process

工艺	炉号	化学成分/%										气体含量/10 <sup>-6</sup>	
		C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	Nb	O	N	
VIM-VAR	T05R1-97	0.29	1.98	0.6	0.002	0.005	4.49	1.05	0.61	0.031	≤10	23	
EAF-VOD-VAR	T05R1-226	0.28	1.88	0.6	0.003	0.008	4.45	1.04	0.57	0.034	≤10	18	

性)十分接近,但“EAF + VOD + VAR”冶炼的钢韧性(冲击韧性和断裂韧性)明显较高(表2)。在成分很相近的情况下,两炉钢经历了相同的热加工(锻造和热处理),钢的显微组织(马氏体基体组织、回火时析出相以及奥氏体化时未溶的碳化物、氮化物和碳氮化物等)相同,但 EAF-VOD-VAR 法冶炼钢的洁净度明显优于 VIM-VAR 法冶炼钢的洁净度,所以前者有较高的韧性(表2)。图1为典型的断口 SEM 对比形貌,从图1(a)、(b)可以看出“VIM + VAR”冶炼的钢存在较多的细 MnS 富集区,由于 MnS 夹杂与马氏体基体之间的结合很弱、形成裂纹

的抗力很低,因此几乎所有细 MnS 夹杂均成为孔洞核心,这些孔洞长大、聚合后导致失效;而“EAF + VOD + VAR”冶炼的钢(T05R1-226)夹杂物间距较大,很少能观察到细 MnS 富集区,这也许是“VIM + VAR”和“EAF + VOD + VAR”两种工艺冶炼的钢韧性差别的主要原因。另一方面,断口上除观察到上述硫化物尺寸、分布的差别外,两炉钢中均可观察到脆性 Nb(C,N)(图2c、d),但从 T05R1-97 和 T05R1-226 两炉钢断口上很难找出这类夹杂物尺寸、分布及与断裂的相关性关系。

上述定性的结果,说明了两种工艺冶炼的钢硫

表2 VIM-VAR 和 EAF-VOD-VAR 工艺冶炼的 G50 钢力学性能和夹杂物级别

Table 2 Mechanical properties and inclusion rating units of steel G50 melted by VIM-VAR and EAF-VOD-VAR process

工艺	钢号	$R_m$ / MPa	$R_{p0.2}$ / MPa	A/ %	Z/ %	$A_{KU2}$ / J	$K_{IC}$ / (MPa·m <sup>1/2</sup> )	夹杂物/级							
								A		B		C		D(含球状 MnS)	
								细	粗	细	粗	细	粗	细	粗
VIM-VAR	T05R1-97	1 760	1 435	11.5	56.5	70~74	112~118	0.5	0	1.0	0	0	0	1.0	0
EAF-VOD-VAR	T05R1-226	1 750	1 450	12.5	57.0	86~88	130~132	0	0	0	0	0	0	0.5	0

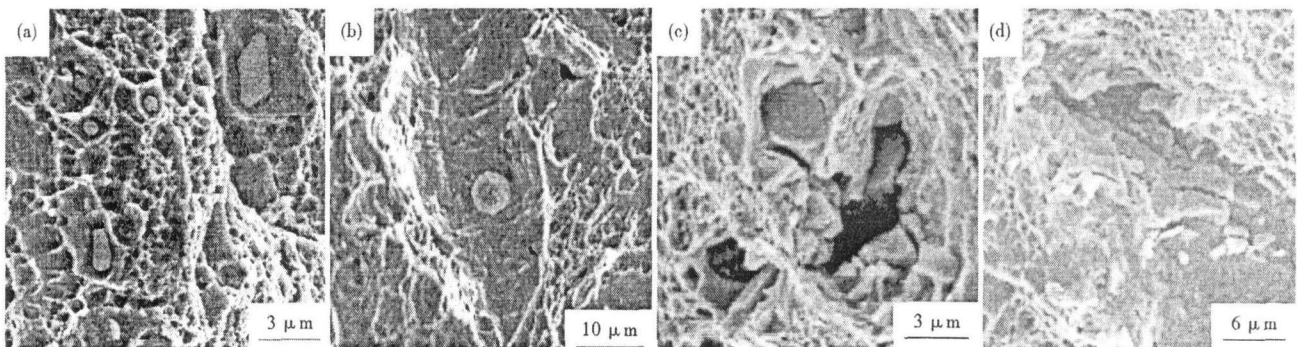


图1 G50 钢拉伸断口硫化物夹杂(a、b)和 Nb(C,N)(c、d)形貌,SEM:(a、c) VIM-VAR; (b、d) EAF-VOD-VAR

Fig. 1 Morphology of tensile fracture sulphide inclusion (a,b) and Nb(C,N) (c,d) in steel G50 melted by VIM-VAR (a,c) and EAF-VOD-VAR (b,d) process

化物夹杂尺寸、形态、分布的差异。为进一步证实硫化物夹杂与韧性的相关性,在抛光未侵蚀的金相试样上,按 GB/T10561-2005 规定对不同工艺生产的钢夹杂物进行评级,结果见表2。可以看出“VIM + VAR”冶炼的钢(炉号 T05R1-97)细类夹杂物的级别(硫化物和氧化物)明显高于“EAF + VOD + VAR”冶炼的钢(炉号 T05R1-226)。因将细球状硫化物归类为 D 类夹杂物评定,因此炉号 T05R1-97 的钢 D 类夹杂物的级别也高于 T05R1-226 炉号的钢。

### 3 结论

(1) 两种工艺冶炼的 G50 钢成分、拉伸性能非常接近,但“EAF + VPD + VAR”冶炼的钢韧性(冲击韧性和断裂韧性)明显改善。

(2) “EAF + VOD + VAR”冶炼的钢韧性可以归

结为细夹杂物(主要是硫化物)较少,细夹杂物密集分布区域更少,硫化物夹杂间距较宽,延迟夹杂物形成孔洞的聚合,因此有利于韧性的改善。

### 参考文献

- 1 James L, Maloney W M, Garrison Jr. The Effect of Sulfide Type on the Fracture Behavior of HY180 Steel. Acta Materialia, 2005, 53: 533
- 2 Tomita Y. Fracture Toughness of Calcium Modified Ultrahigh-strength 4340 Steel. Metallurgical Transactions, 1990, 21A: 2739
- 3 Carlson M F, Rao B V N, Thomas G. The Effect of Autenitizing Temperature Upon the Microstructure and Mechanical Properties of Experimental Fe/Cr/C Steels. Metallurgical Transactions, 1979, 10A: 1273
- 4 Tomita Y. Development of Fracture Toughness of Ultrahigh Strength, Medium Carbon, Low Alloy Steels for Aerospace Applications. International Materials Reviews, 2000, 45(1): 27

夏志新(1982-),男,硕士研究生,从事超高强度钢强韧化机理研究。

收稿日期:2007-08-31