

## 锻造变形方式对叶片钢 1Cr12Ni2Mo2VN 横向冲击韧性的影响

陈 列<sup>1</sup> 曹小军<sup>1</sup> 佐 辉<sup>1</sup> 钱才让<sup>1</sup> 刘雅政<sup>2</sup> 李俊儒<sup>2</sup> 甄建才<sup>1</sup> 晁智勇<sup>1</sup>  
(1 西宁特殊钢股份有限公司, 西宁 810005; 2 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

**摘 要** 分析了常规锻造-拔长, 镦粗-拔长, 镦粗-拔长-镦粗-拔长, 镦粗-换向拔长 4 种锻造方式对叶片钢 1Cr12Ni2Mo2VN(% : 0.10C, 0.17Si, 0.74Mn, 0.014P, 0.002S, 11.8Cr, 2.43Ni, 1.65Mo, 0.32V, 0.035 2N) 2.5 t 电渣锭锻造 Φ220 mm 棒材横向冲击韧性的影响。结果表明, 单道次大压下量的镦拔锻造及镦拔次数的增加可显著提高叶片钢的横向冲击韧性, 2 镦 2 拔后的棒材经 1 050 ℃ 1 h 油冷, 660 ℃ 2 h 空冷后的横向冲击功为 141 J, 横纵向冲击值比可达 90% 以上, 组织均匀, 晶粒细化。

**关键词** 叶片钢 1Cr12Ni2Mo2VN 镦拔锻造 横向冲击韧性

## Effect of Forging Method on Horizontal Impact Toughness of Blade Steel 1Cr12Ni2Mo2VN

Chen Lie<sup>1</sup>, Cao Xiaojun<sup>1</sup>, Zuo Hui<sup>1</sup>, Qian Cairang<sup>1</sup>, Liu Yazheng<sup>2</sup>, Li Junru<sup>2</sup>, Zhen Jiancai<sup>1</sup> and Chao Zhiyong<sup>1</sup>  
(1 Xining Special Steel Co Ltd, Xining 810005; 2 School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

**Abstract** The effect of four forging methods i. e. conventional forging-stretching, upsetting-stretching, upsetting-stretching-upsetting-stretching and upsetting-changing direction stretching on horizontal impact toughness of Φ200 mm bar products forged from 2.5 t ESR ingot of blade steel 1Cr12Ni2Mo2VN (% : 0.10C, 0.17Si, 0.74Mn, 0.014P, 0.002S, 11.8Cr, 2.43Ni, 1.65Mo, 0.32V, 0.035 2N) has been analyzed. The results show that the upsetting-stretching forging with single pass large reduction and increasing upsetting-stretching forging times are available to obviously increase the horizontal impact toughness of blade steel; with upsetting-stretching-upsetting-stretching process the horizontal impact energy of bar product heated at 1 050 ℃ for 1 h, oil cooling and at 660 ℃ for 2 h, air cooling is 141 J, the ratio of horizontal and longitudinal impact energy is more than 90%, and steel structure is uniformity with finer grains.

**Material Index** Blade Steel 1Cr12Ni2Mo2VN, Upsetting-Stretching Forging, Horizontal Impact Toughness

提高火力发电机组效率的关键是提高蒸气参数, 即提高蒸气温度及压力, 但参数的提高取决于所用叶片材料的高温性能。随着汽轮机制造技术的发展, 汽轮机向超临界、超超临界机组发展, 其蒸气温度和蒸气压力已由原来的 520 ℃、15 MPa 提高到 600 ℃ (更高到 650 ℃)、26 ~ 30 MPa, 这对汽轮机叶片材料提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。1Cr12Ni2Mo2VN 钢是一种新型 Cr-Ni-Mo-V-N 型超临界、超超临界叶片用钢, 叶片作为汽轮机关键部件在服役过程中是多向受力, 因此, 提高叶片钢的等向性, 改善叶片钢横向的韧性和塑性, 可大幅提高叶片钢的使用寿命及服役安全性。

### 1 试验材料及方法

#### 1.1 试验材料

(1) 生产工艺流程。30 t 电弧炉冶炼 + 30 t VOD + 30 t LF 精炼 → 浇铸 2.67 t 锭 → 2000 t 快锻机生产电极坯 → 电渣重熔 → 锻造成品材 → 退火、探伤、检验。

表 1 试验 1Cr12Ni2Mo2VN 叶片钢分析成分 / %  
Table 1 Analysis of test blade steel 1Cr12Ni2Mo2VN / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	N
0.10	0.17	0.74	0.014	0.002	11.8	2.43	1.65	0.32	0.035 2

(2) 试验用钢化学成分。1Cr12Ni2Mo2VN 钢化学成分见表 1。

#### 1.2 试验方法

电渣锭锻造产材时分别采用: 常规锻造拔长、1 镦 1 拔锻造、2 镦 2 拔锻造、换向锻造 4 种锻造变形方式 (图 1)。对比分析锻造变形方式对叶片钢 1Cr12Ni2Mo2VN 横纵向冲击韧性的影响

### 2 结果及分析

#### 2.1 JmatPro 相变点计算

为了制定合适的锻造加热温度及后期热处理工艺, 对 1Cr12Ni2Mo2VN 钢相变点进行了理论计算。通过理论计算, 1Cr12Ni2Mo2VN 钢 900 ℃ 以下为铁素体 + 奥氏体区, 900 ~ 1200 ℃ 为奥氏体单相区, 1 210 ℃ 以上为铁素体 + 奥氏体区。碳化物在 1050 ℃

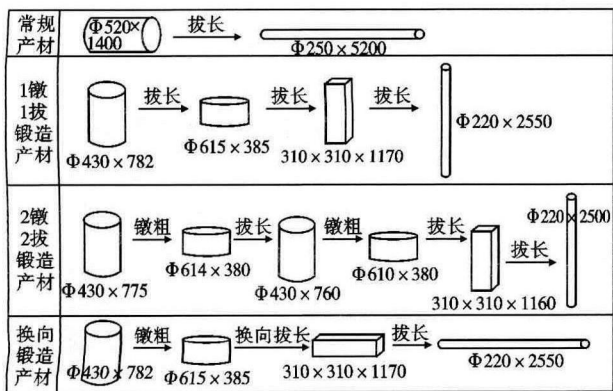


图 1 不同锻造变形方式示意图  
Fig. 1 Schematics of different forging methods

时已全部溶解于奥氏体中。

为控制试验钢低的铁素体含量,冶炼时成分 Cr 当量控制在小于 7 范围内,根据相变点计算结果,结合特钢公司叶片钢生产经验,锻造加热温度上限控制在 1 180 ℃ 以下。力学性能试验时试样的热处理淬火温度控制在 1 050 ℃ 附近。

### 2.2 锻拔锻造的理论分析

为了消除锻造过程中电渣锭、钢坯内部的各种冶金缺陷及防止内部微裂纹的产生,锻造时要使钢坯尽可能处于三向压应力状态<sup>[2]</sup>。

刘助柏等在理论分析及试验基础上,提出了圆柱体锻粗时刚塑性力学模型的拉应力理论<sup>[3-4]</sup>(图 2),该理论认为对于高径比  $H/D > 1$  的圆柱体,在锻粗过程中位于中心区域(刚性区除外)存在径向和切向(周向)拉应力。

由于钢锭内部不同部位满足塑性变形条件的先后顺序不同,当高径比  $H/D > 2$  时,均匀压缩区 IV 存

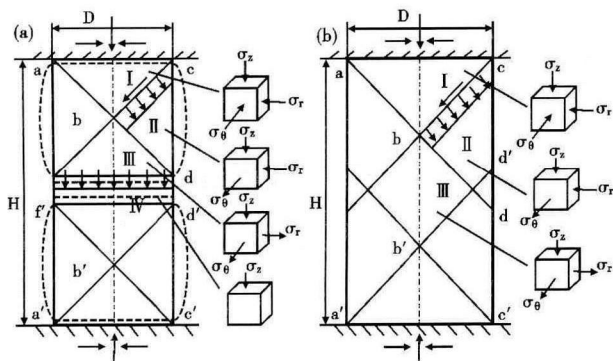


图 2 刚塑性力学模型的拉应力理论:(a)  $H/D > 2$ ; (b)  $1 < H/D < 2$ ; I - 刚性区, II - 主动变形区, III - 被动变形区, IV - 均匀压缩区

Fig. 2 Tensile stress theory of rigid-plastic mechanics model; (a)  $H/D > 2$ ; (b)  $1 < H/D < 2$ ; I - rigid zone; II - active deformation zone; III - passive deformation zone; IV - uniform compression zone

在,变形体呈双鼓形。 $1 < H/D \leq 2$  时,IV区消失,中心拉力区 III(径向  $\sigma_r$  和切向  $\sigma_\theta$  为拉应力,轴向  $\sigma_z$  为压应力)区域缩小。模拟分析高径比  $H_0/D_0 = 1.8$  时中心区应力随压下量的变化关系,发现在单道次小压下量时圆柱体心部存在两向拉应力,当压下量超过 20% 时转变为压应力。

综合考虑以上因素及锻粗后的拔长需要,本次锻拔试验用电渣锭原始高径比均定为  $H_0/D_0 = 1.8$  左右,锻粗压下量为钢锭高度的 50%。

### 2.3 不同锻造变形方式生产钢材的力学性能

锻拔及换向锻造开坯采用 2000 t 快锻机,最终产材采用电液锤锻造(产材规格  $\Phi 220$  mm)。常规长材采用 2 火成材,锻拔/换向锻造为多火次成材(每完成一次锻拔/换向锻造后进行回炉保温),开锻温度 1 130 ~ 1 150 ℃,终锻温度不低于 850 ℃。锻造工艺参数见表 2,锻造方式示意图见图 1。

对 4 种锻造变形方式产  $\Phi 220$  mm 钢材在横、纵向 1/2 半径处分别取试样毛坯件,试样毛坯件( $\Phi 25$  mm  $\times$  120 mm)经 1 050 ℃ 1 h 油冷-660 ℃ 2 h 空冷热处理后按 GB/T228、229 加工成标准试样测试力学性能[2 拉 6 冲(V2 型标准试样)],试验设备及型号:电液伺服万能试验机(型号 WAW-Y500C)、摆锤式冲击机(型号 JB-30B)。

热处理工艺均为 1 050 ℃ 1 h 油冷-660 ℃ 2 h 空冷。4 种锻造变形方式的棒材的横、纵向力学性能检验结果见表 3。

从表 3 中各参数测试值来看,  $R_m$ 、 $R_{p0.2}$ 、 $A$ 、 $Z$  4 项横、纵向测试值差别较小(横纵比  $\geq 95\%$ ),但横、纵向  $A_{KV2}$  值差别较大(图 3)。4 种锻造变形方式下横、纵向冲击值比见图 3。

从以上变化曲线可以看出,不同锻造变形方式对抗拉强度、屈服强度、断面收缩率、延伸率的影响较小,而对冲击韧性产生较大影响,采用锻拔和增加锻拔次数可显著提高叶片钢 1Cr12Ni2Mo2VN 横纵

表 2 不同锻造变形方式工艺参数

Table 2 Process parameters of different forging method

锻造方式	电渣锭直径/mm	电渣锭锭重/kg	电渣锭高径比	加热温度/℃	锻粗压下量/%	过程坯尺寸/mm $\times$ mm	产材锻比
常规	520	2 330	2.69	1 180	-	-	4.33
1 锻 1 拔	430	891	1.82	1 180	50	310 $\times$ 300	3.82
2 锻 2 拔	430	885	1.80	1 180	50	310 $\times$ 300	3.82
换向锻造	430	891	1.82	1 180	50	310 $\times$ 300	3.82

注:产材锻比为电渣锭到材的锻造比

表 3 锻造变形方式对叶片钢 1Cr12Ni2Mo2VN 力学性能的影响

Table 3 Effect of forging method on mechanical properties of blade steel 1Cr12Ni2Mo2VN

锻造变形方式	取样方向	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%	Z/%	$A_{KV2}$ /J
常规	横向	1 030	835	16.5	58	67
	纵向	1 050	870	15.5	61	123
	纵横比/%	98.1	96	106	95.1	54.5
1 墩 1 拔	横向	1 032	848	15	55	83
	纵向	1 024	835	15	58	98
	纵横比/%	101	102	100	95	84.7
2 墩 2 拔	横向	1 000	882	18	64	141
	纵向	1 013	874	18.5	65	152
	纵横比/%	98.7	101	97.3	98.5	92.8
换向锻造	横向	1 050	846	16.2	61	69
	纵向	1 063	874	16.8	61	99
	纵横比/%	98.7	96.8	96.5	100	69.7

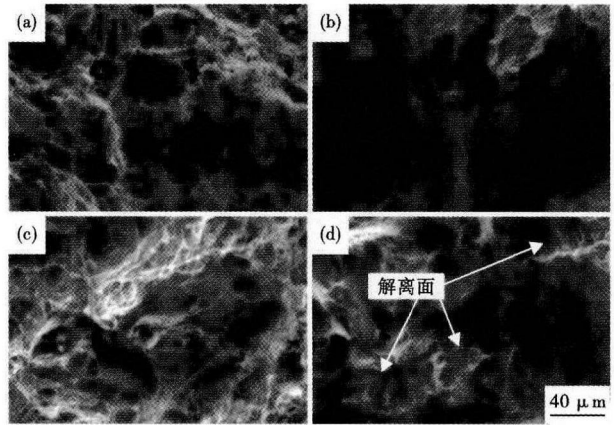


图 4 1Cr12Ni2Mo2VN 叶片钢冲击断口微观形貌 (SEM): (a) 2 墩 2 拔纵向; (b) 2 墩 2 拔横向; (c) 常规锻造纵向; (d) 常规锻造横向

Fig. 4 Morphology of impact fracture of steel 1Cr12Ni2Mo2VN with double upsetting and double stretching forging- (a) longitudinal and (b) horizontal, and conventional stretching forging- (c) longitudinal and (d) horizontal, SEM

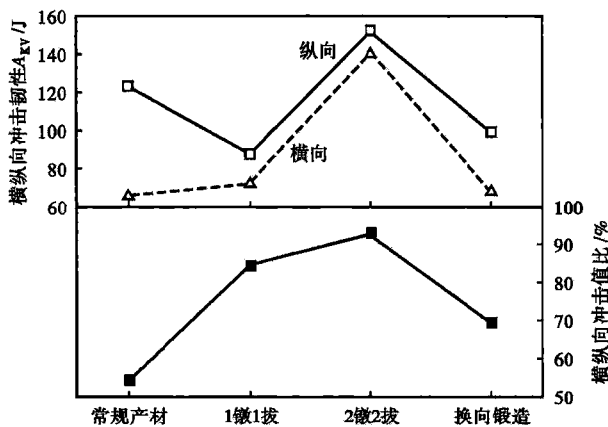


图 3 1Cr12Ni2Mo2VN 叶片钢 4 种锻造变形方式横纵向  $A_{KV}$  值和冲击值比变化曲线

Fig. 3 Changing curves of longitudinal and horizontal  $A_{KV}$  value and  $A_{KV}$  value ratio of blade steel 1Cr12Ni2Mo2VN with four forging methods

向冲击值比, 2 墩 2 拔锻造变形后在合适的热处理工艺下钢材横纵向冲击值比可达到 90% 以上; 换向锻造对横向冲击韧性的改善及横纵向冲击值比的提高效果不显著。

## 2.4 微观组织分析

### 2.4.1 冲击断口显微形貌特征

锻造变形方式的不同对横向冲击韧性的影响较大, 经 2 墩 2 拔锻造后横向冲击韧性值由常规锻造产材时的 67 J 提高到 141 J, 在高倍显微镜下观察不同锻造方式下的横向冲击宏观断口, 均为纤维区和剪切唇区两部分构成, 常规锻造时纤维区面积最小 (约 40%), 2 墩 2 拔试样断口纤维区面积达到最大 (约 80%)。

研究表明, 裂纹扩展功主要消耗在经过塑性变形而形成的纤维区, 纤维区面积的扩大说明经墩拔

后材料的冲击韧性得到提高。在扫描电镜下对比观察冲击试样纤维区断口形貌, 发现随墩拔次数增加, 断口上的解理台阶逐渐消失, 经 2 墩 2 拔后横向冲击断口已由常规产材时的准解理断裂转变为完全韧性断裂 (图 4)。

另外, 在 1 墩 1 拔锻造的冲击试样断口的韧窝处发现较多点状  $Al_2O_3$  夹杂物, 点状非金属夹杂物的弥散分布破坏了基体的连续性, 是造成 1 墩 1 拔锻造试样冲击韧性较低的原因之一。钢材中较多的非金属夹杂物对高温持久、蠕变、疲劳等均产生较坏的影响, 在叶片服役过程中易造成过早失效。所以, 高纯净度是生产高品质叶片钢的基础条件。

### 2.4.2 冲击断口显微组织

图 5 为 2 墩 2 拔锻造和常规锻造两种方式下经相同工艺调制处理后的横纵向冲击试样断口附近组织形貌。常规锻造产材后, 纵向组织仍保持较明显的沿拔长方向的位相 (图 5c), 且回火马氏体片层厚度较厚, 这是造成常规产材后横纵向冲击韧性比较低的主要原因。在经过数次大压下量墩拔后, 可使锻件进一步提高锻造比, 在墩拔过程中原始组织发生破碎, 在动态再结晶过程中, 晶粒不断细化并使层片组织取向随机分布, 横纵向组织差异性逐渐变小, 使组织均匀性得到大幅提高, 如图 5(a, b), 从而使横向冲击性能得到改善。

晶粒的大小对冲击韧性影响较大, 在 300 倍金相视场下对常规产材、2 墩 2 拔、换向锻造 3 种锻造方式冲击断口处晶粒尺寸进行统计, 其平均晶粒尺

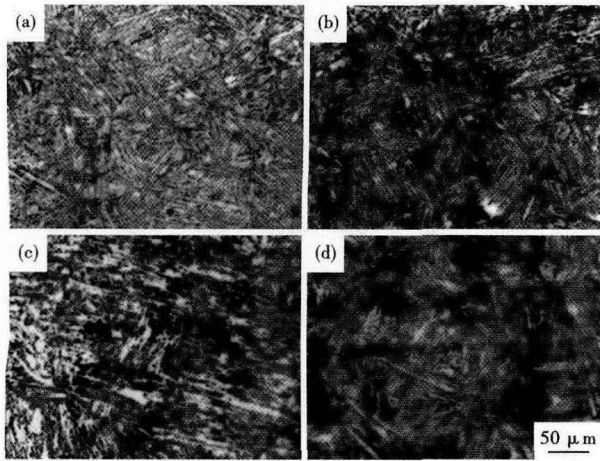


图5 1Cr12Ni2Mo2VN 叶片钢冲击断口组织形貌:(a)2 墩2 拔纵向;(b)2 墩2 拔横向;(c)常规锻造纵向;(d)常规锻造横向

Fig.5 Morphology of impact fracture structure of blade steel 1Cr12Ni2Mo2VN with double upsetting and double stretching forging- (a) longitudinal and (b) horizontal, and conventional stretching forging- (c) longitudinal and (d) horizontal

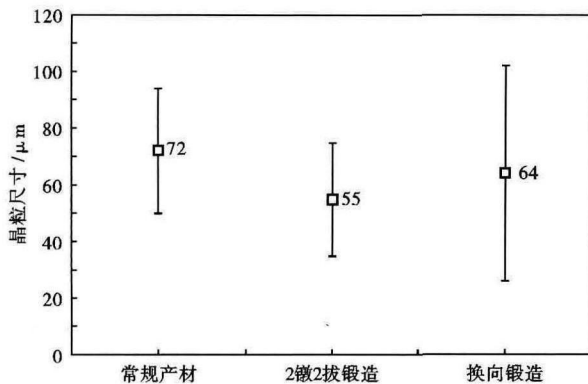


图6 1Cr12Ni2Mo2VN 叶片钢常规锻造、2 墩2 拔锻造和墩粗-换向拔长锻造的平均晶粒尺寸及标准偏差对比

Fig.6 Comparison of average grain size and standard deviation blade steel 1Cr12Ni2Mo2VN between conventional stretching forging, double upsetting and double stretching forging, and upsetting-changing direction stretching forging

寸和标准偏差对比见图6。

经大压下量2 墩2 拔锻造变形后,晶粒尺寸较常规产材(平均晶粒尺寸  $72 \mu\text{m}$ )有明显的细化,平均晶粒尺寸为  $55 \mu\text{m}$  左右。在大变形量2 墩2 拔锻造与回炉保温的交替过程中(每完成1 墩1 拔后回炉保温1次),已形成的再结晶核心在长大中再次受到变形作用,使再结晶部分位错增殖,变形储能增高而停止长大,当再结晶部分储能增高到一定程度,

又会重新形成再结晶核心,因这种反复再结晶,使晶粒得到不断细化<sup>[5]</sup>。

换向锻造方式下出现混晶(晶粒尺寸分布范围  $20 \sim 105 \mu\text{m}$ ,平均晶粒尺寸  $64 \mu\text{m}$ ),这可能是单次换向锻造下,钢锭不同部位材料的变形程度存在较大差异,在产生大变形量区域发生反复再结晶而晶粒得到细化,而小变形量区域内再结晶晶粒长大而造成原始奥氏体晶粒尺寸出现不均,因晶粒尺寸的遗传效应,在经过调制处理后,仍出现混晶情况,这是换向锻造方式下横纵向冲击值比较低的主要原因。

### 3 结论

(1) 锻造变形方式对叶片钢 1Cr12Ni2Mo2VN 强度、塑性影响较小,但对冲击韧性产生较大影响。

(2) 采用墩拔锻造工艺和增加墩拔次数可显著提高叶片钢 1Cr12Ni2Mo2VN 横纵向冲击值比,采用2 墩2 拔可使横纵向冲击值比达90%以上,这是由于经数次墩拔后横纵向组织差异性减小,晶粒得到进一步细化所致。

(3) 单次换向锻造由于变形不均出现混晶情况,对提高横纵向冲击值比效果不明显。

(4) 高纯净度是 1Cr12Ni2Mo2VN 叶片钢冲击韧性改善的基本条件。

国家(863 计划)课题资助项目(2012AA03A502)

### 参考文献

- [1] 杨 钢,王立民,程世长. 蒸汽轮机用叶片钢的研究进展[J]. 特钢技术,2000,15(3):2-4.
- [2] Ma L,Zhong Y, Ma Q, et al. Technical Development of HP-IP Rotors in Supercritical Fossil Plants[J]. Forging & Stamping Technology, 2006,12(1):37-39.
- [3] 王连东,李仕华,刘助柏. 墩粗工艺理论与技术的研究进展[J]. 大型铸锻件,2001,12(4):474-476.
- [4] 刘助柏,倪利勇. 普通平板墩粗高圆柱体的拉应力理论的模拟[J]. 中国机械工程,2005,12(1):26-28.
- [5] 潘金生,全健民. 材料科学基础[M]. 北京:清华大学出版社,2011:541-543.

陈 列(1968-),男,博士(北京科技大学),1990年北京科技大学(本科)毕业,特殊钢的工艺技术、质量及新产品研发工作。

收稿日期:2014-10-25