

淬火冷速对转子30CrMoNiV511钢韧性的影响

黄军波 何毅 霍洁 殷福星

(中国一重能源装备材料科学研究所 天津 300457)

摘要 使用热处理风冷炉模拟研究了大型汽轮机转子内外径处的冷却速率对转子材料30CrMoNiV511钢的组织转变及强韧性的影响。结果表明, 淬火冷却速率对转子材料的强度影响不明显, 而对冲击韧性的影响显著。随着淬火冷却速率从50 °C/min逐渐降低至7 °C/min, 淬火组织由下贝氏体逐渐向上贝氏体、粒状贝氏体及其混合组织转变, 冲击韧性由66 J急剧降低到16 J; 当冷却速率降低到5 °C/min以下时, 组织中出现先共析铁素体, 且上贝氏体铁素体粗大, 碳化物分布极不均匀, 冲击韧性极差。不同冷却速率转子钢的微观组织及碳化物析出形态和分布是决定其冲击韧性的主要原因之一。

关键词 金属材料, 30CrMoNiV511钢, 淬火冷却速率, 汽轮机转子, 冲击韧性

分类号 TG142

文章编号 1005-3093(2013)03-0331-06

Effect of Quenching Cooling Rate on the Toughness of 30CrMoNiV511 Steel for Steam Turbine Rotor

HUANG Junbo* HE Yi HUO Jie YIN Fuxing

(Materials Research Institute for Energy Equipment, China First Heavy Industries, Tianjin 300457)

Manuscript received April 3, 2013; in revised form May 8, 2013.

*To whom correspondence should be addressed, Tel: (022)59835572, E-mail: alan198203@163.com

ABSTRACT Quenching cooling at different radius positions of large-scale steam turbine rotor were simulated by air-cooling heat treatment furnace. The effects of quenching cooling rate on microstructure, strength and toughness of 30CrMoNiV511 rotor steel were investigated. The results show that the cooling rate has a little influence on the strength, while the toughness evidently depends on it. As the cooling rate decrease gradually from 50 °C/min to 7 °C/min, and the transformed microstructure changes from low bainite to upper bainite, granular bainite and their mixture. Meanwhile, impact toughness decreases sharply from 66 J to 16 J. When the cooling rate is below 5 °C/min, proeutectoid ferrite is formed. The sub-unit of ferrite in upper bainite is coarse with uneven distribution of carbides, which results in extremely low toughness. The microstructure and carbides shape and distribution depending on the quenching cooling rate is one of the main reasons determining the impact toughness of rotor steel.

KEY WORDS metallic materials, 30CrMoNiV511 steel, quenching cooling rate, steam turbine rotor, impact toughness

30CrMoNiV511钢是一种可用于制造60万千瓦、超临界汽轮机机组高中压转子的Cr-Mo-V钢, 与国内的30Cr1Mo1V钢类似。这种高中压转子通常在3000—3600 r/min高转速、400—600 °C高温下运行, 因此要求转子截面上力学性能的均一性, 又要有极好的组织稳定性, 以保证其具有高热强韧性和良好的综合性能^[1-3]。但是, 随着现代汽轮机单机容量不断增大, 汽轮机转子的大型锻件用钢的尺寸越来越大(直径可达1 m左右), 厂家标准要求也越来越严格(国外厂家要求转子的冲击韧性CVN ≥ 24 J), 常常出现冲击韧性不合格问题^[4-6]。

目前采取的措施主要有: 一是严格控制P等杂质元素的含量^[4, 5], 二是适当降低淬火温度, 调整回火参数^[5, 6]。P含量可控在0.007%以下, 有效地降低了P在晶界的偏聚, 控制了回火脆性。适当降低淬火温度和调整回火参数是在牺牲强度的情况下提高冲击韧性, 且对大直径的大型锻件的冲击韧性提高很有限。本文模拟大型转子用30CrMoNiV511钢在不同半径部位冷却速率, 研究冷却速率对其组织转变和强韧性的影响。

1 实验方法

实验用30CrMoNiV511钢的化学成分, 如表1所示。

实验中先将试样加工成力学性能检测用毛坯样,在MR-20热处理风冷炉里进行不同冷却速率的热处理,热处理工艺如表2所示。先观察在不同条件下热处理样品的组织和形貌,然后分别按照GB/T228-2002、GB/T229-1994将其加工成 $\phi 10$ 拉伸试样和夏比氏V型缺口冲击试样,测试其拉伸和冲击性能,并用扫描电镜FEI quanta 400观察其断口形貌。

2 结果与讨论

2.1 不同冷速下的微观组织

图1给出了模拟实验中不同冷速下的淬火微观组织。高速率冷却($\geq 25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$)时,其组织以下贝氏体为主,且贝氏体铁素体板条细小,碳化物细小,分布均匀(图1a, b);当冷却速率降低到 $12\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时,其组织为上贝氏体+粒状贝氏体(图1c),且贝氏体铁素体板条宽度增加,碳化物逐渐粗化。当冷却速率进一步降低时($\leq 7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$),所形成的组织以板条粗大的上贝氏体板为主,碳化物开始严重粗化且分布不均匀(图1d, e中箭头所指)。当冷却速率降低到 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时,在上贝氏体组织上有先共析铁素体形成(1图f中F区域),而且贝氏体铁素体显著粗化,碳化物聚集和粗化,分布极不均匀(图1f中箭头所指)。可见,淬火冷却速率对30CrMoNiV511钢的组织结构有显著影响。随着冷却速率由 $50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 逐渐降低到 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,组织转变为下贝氏体 $\rightarrow$ 下贝氏体+上贝氏体 $\rightarrow$ 上贝氏体+粒状贝氏体 $\rightarrow$ 上贝氏体+粒状贝氏体+先共析铁素体,且贝氏体铁素体板条逐

渐宽化,碳化物粗化和不均匀化。

2.2 拉伸性能和冲击性能

图2给出了不同冷速下30CrMoNiV511钢的拉伸性能。抗拉强度和屈服强度随着冷速的降低而略微下降,伸长率和面缩率则无明显变化。虽然强度略有下降,但是即使在冷速最低($3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$)的情况下,拉伸性能仍符合标准要求,即屈服强度在 $550\text{--}700\text{ MPa}$ 之间,抗拉强度大于 710 MPa 。这表明,在实验范围内的冷速对转子材料拉伸性能的影响不大。

图3给出了30CrMoNiV511钢在不同淬火冷却速率下的冲击功变化曲线,可见淬火冷却速率对冲击性能有显著影响。随着冷却速率的降低,冲击功显著下降。当淬火冷却速率为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时平均冲击功达到 66 J ,而当冷却速率降低到 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时冲击功仅有 7 J ,相差近一个数量级。

30CrMoNiV511钢冲击实验的典型冲击断口,如图4所示。当冷却速率较高时,冲击断口呈现出一定的准解理特征,并且解理面较小,局部还呈现韧窝断裂的特征(图4a),表明对应的冲击功高。当淬火冷却速率很低时,冲击断口形貌则呈现出完全的解理断裂,解理面清晰宽大,且伴随着二次再生裂纹,对应冲击功也很低(图4b)。但是,不管冲击功高还是冲击功低的试样,其冲击断口形貌均为组织开裂,而非由夹杂物或沿晶断裂所致。

2.3 讨论

2.3.1 JMatpro模拟不同淬火冷速下的微观组织

表1 汽轮机转子用30CrMoNiV511钢的化学成分
Table 1 Chemical composition of 30CrMoNiV511Steel for steam turbine rotor (%)

Chemical	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Fe
30CrMoNiV511	0.27– 0.31	0.30– 0.80	<0.10	<0.007	<0.007	1.10– 1.40	1.00– 1.20	0.50– 0.75	0.25– 0.35	Bal.

表2 不同冷却速率下的热处理工艺
Table 2 Heat treatment process at different cooling rates

No.	Heat treatment process	
	Quenching	Tempering
1	950 $^{\circ}\text{C}\times 3\text{ h}$	
2		
3		
4		
5		
6		
	Cooling to 200 $^{\circ}\text{C}$ at 50 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$	
	Cooling to 200 $^{\circ}\text{C}$ at 25 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$	
	Cooling to 200 $^{\circ}\text{C}$ at 12 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$	695 $^{\circ}\text{C}\times 28\text{ h}$,
	Cooling to 200 $^{\circ}\text{C}$ at 7 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$	cooling to 200 $^{\circ}\text{C}$ at <20 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$
	Cooling to 200 $^{\circ}\text{C}$ at 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$	
	Cooling to 200 $^{\circ}\text{C}$ at 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$	

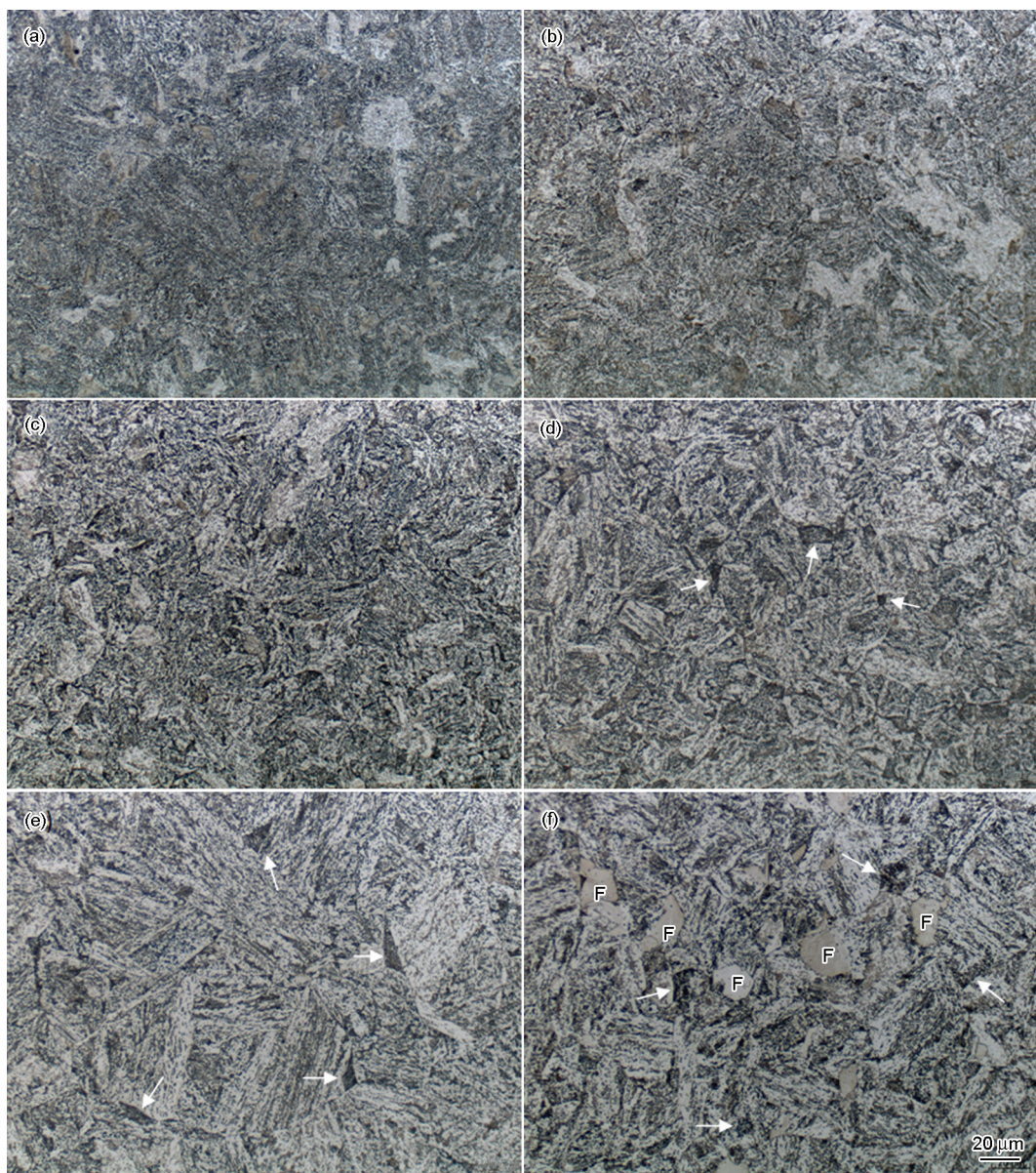


图1 30CrMoNiV511 钢在不同冷却速率淬火后的显微组织

Fig.1 Microstructures of 30CrMoNiV511 steel at different cooling rates (a) 50 °C/min, (b) 25 °C/min, (c) 12 °C/min, (d) 7 °C/min, (e) 5 °C/min, (f) 3 °C/min

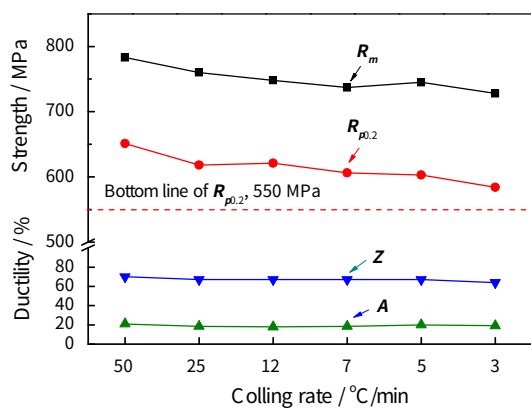


图2 不同淬火冷速下 30CrMoNiV511 钢的拉伸性能

Fig.2 Tensile property of 30CrMoNiV511 steel at different cooling rates

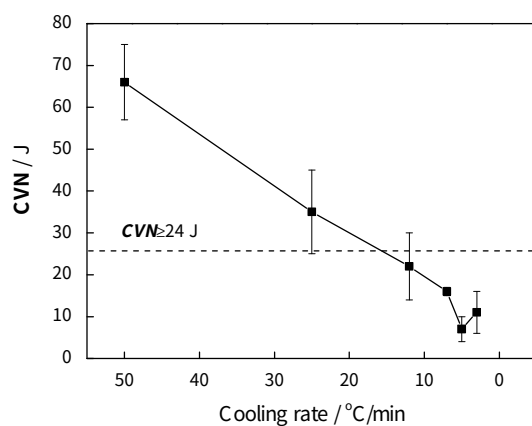


图3 不同淬火冷速下 30CrMoNiV511 钢的冲击功

Fig.3 Impact toughness of 30CrMoNiV511 steel at different cooling rates

和冲击性能 图5给出了根据转子30CrMoNiV511钢成分通过JMatPro软件计算绘制的CCT曲线图。从CCT曲线图可知,以较高冷速淬火($>12\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$)时,贝氏体转变温度较低,可在较低温度内转变成下贝氏体,如图5中曲线B区域左半部分。根据模拟实验结果,在此冷却速率下形成的贝氏体组织细小均匀,且碳化物弥散分布,如图1a, b所示。

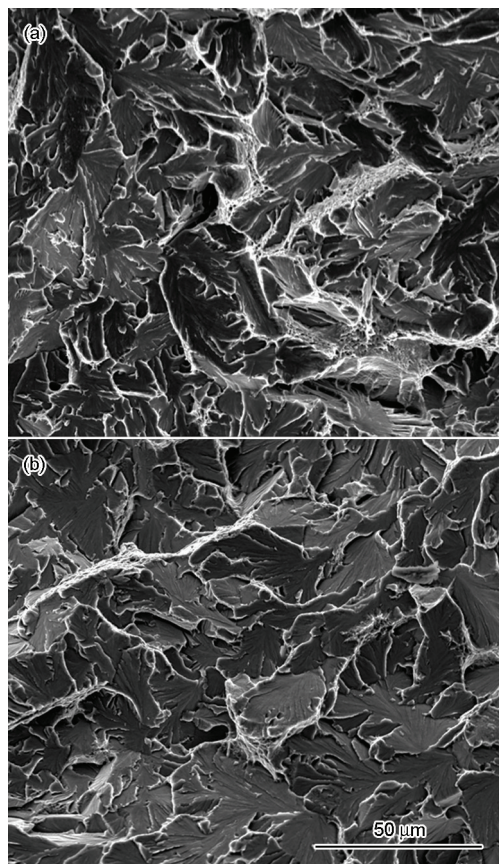


图4 不同淬火冷速下30CrMoNiV511钢的典型冲击断口形貌

Fig.4 Typical SEM impact fractography of 30CrMoNiV511 steel at different cooling rates (a) $50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (66 J), (b) $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (7 J)

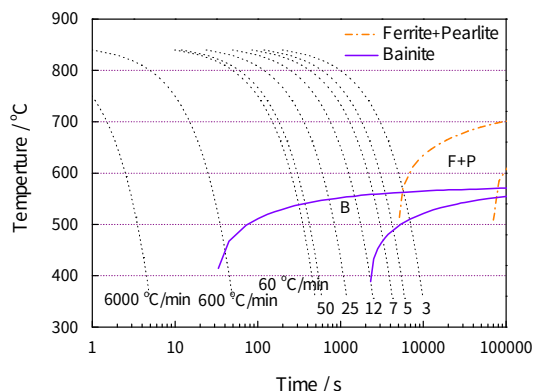


图5 JMatPro计算转子30CrMoNiV511钢的CCT曲线图
Fig.5 Calculated CCT curve of 30CrMoNiV511 steel by JMatPro

当冷速在 $5\text{—}12\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 之内时,贝氏体形成温度大约为 $560\text{—}400\text{ }^{\circ}\text{C}$,是上贝氏体的形成温度范围。根据实验结果,在这个冷速范围内形成的组织主要是羽毛状的上贝氏体+少量粒状贝氏体,与模拟的结果相符合。并且冷却速率越低组织越粗大,同时碳化物出现富集,分布不均匀,如图1d, e所示。当冷速很低($<3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$)时,CCT曲线图中出现先共析铁素体+珠光体转变。根据实验结果,在 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的显微组织图中确实出现了先共析铁素体组织(图1f)。

从模拟的CCT曲线图可知,冷速在 $12\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 附近会出现组织转变的临界点。此时显微组织出现下贝氏体+粒状贝氏体+上贝氏体的混合组织,并且上贝氏体有长大的趋势,碳化物开始聚集。

由此可见,JMatPro计算模拟CCT曲线与模拟实验结果符合良好。反之,计算CCT图也直接解释了不同淬火冷却速率下相变形成不同形貌贝氏体组织,这些组织对冲击性能存在决定性影响。

图6给出了不同微观组织的冲击功对比图。碳化物弥散分布的细小下贝氏体组织的冲击功明显较好($>24\text{ J}$)。当微观组织为粗大的上贝氏体(+少量粒状贝氏体)时,冲击功明显下降,降至 20 J 以下。当组织中出现了先共析铁素体时,冲击性能会更差。由此可见,转子材料的微观组织直接决定其冲击性能,碳化物的尺寸以及弥散程度也对冲击功的大小有一定的影响。

2.3.2 贝氏体组织冲击韧性的机理 由转子钢CCT曲线图和模拟实验结果可知,在不同的淬火冷却速率下贝氏体相变后所形成的贝氏体铁素体和碳化物的尺寸及分布是截然不同的,这是决定其冲击韧性差异的根本原因。

当淬火冷却速率较高($\geq 25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$)时贝氏体相

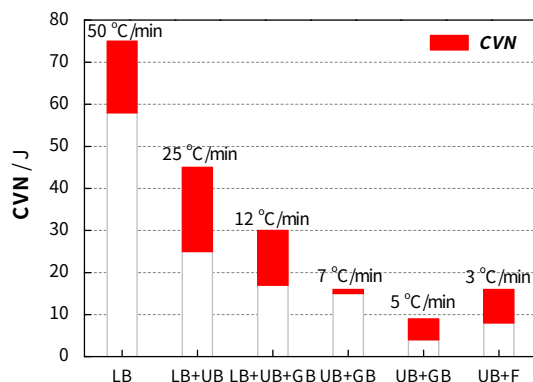


图6 显微组织对转子30CrMoNiV511钢冲击性能的影响

Fig.6 Effects of microstructure on impact toughness of 30CrMoNiV511 steel (LB: lower bainite, UB: upper bainite, GB: granular bainite, F: ferrite)

变温度低, 以形成下贝氏体为主, 贝氏体铁素体片(条或束)细小, 过冷奥氏体中碳元素不能长程扩散, 大部分碳以碳化物在铁素体片/束内形成并均匀分布, 在铁素体片/束之间的碳化物数量减少, 且由于长距离扩散困难而细小^[7, 8]。回火时, 这些碳化物, 或新析出的碳化物细小, 弥散分布于铁素体片/束内, 在铁素体片/束界上或晶界上碳化物数量减少, 颗粒细小且断续分布。这种细小弥散分布的碳化物不仅可提高材料强度, 相比上贝氏体中连续条状分布的粗大碳化物还能减少裂纹在碳化物处萌生或扩展的机率, 有利于提高材料韧性。

当淬火冷却速率较低(如 $<12\text{ }^{\circ}\text{C/min}$)时贝氏体形成温度较高, 以形成上贝氏体, 甚至粒状贝氏体为主。由于相变温度高, 过冷奥氏体中的碳元素可长程扩散, 因而形成的贝氏体铁素体条/束宽大, 且碳元素在铁素体内含量极低, 大部分碳元素偏聚在铁素体条/束之间^[7, 8]。回火时, 铁素体条/束之间碳化物形成且易于聚集长大, 使粗大的碳化物颗粒集中在铁素体板条/束之间, 或原奥氏体晶界处, 且呈连续分布状态。这种分布状态使材料的强度降低, 且铁素体板条之间或原奥氏体晶界处的脆性增加, 裂纹很容易沿铁素体条/束开裂或沿晶开裂, 形成宽大的解理面, 从而降低材料的韧性。当冷速下降至 $3\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 时, 相变中有先共析铁素体形成, 使过冷奥氏体中碳含量进一步提高, 在形成上贝氏体或粒贝后加剧了碳元素的偏聚, 甚至发生碳化物大量聚集成团簇状(图 1f), 使韧性降低。但是, 大量铁素体的存在使其冲击韧性与粗大贝氏体比略有回升。

根据上贝氏体、下贝氏体的形成机理, 淬火冷却速率决定了贝氏体相转变温度、组织形态以及碳元素的分布。贝氏体铁素体板条/束的大小以及碳元素在铁素体内或外的含量分布在相变过程中确定了, 而随后的回火处理是残余奥氏体的分解、新的碳化物的析出、长大、聚集或溶解等过程, 并不能从根本上改变如上贝氏体宽大的铁素体板条/束, 使其细小^[9], 亦不能使碳化物在铁素体板条/束内或外再大规模重新分配, 使其弥散均匀分布。因此上贝氏体或粒贝一旦形成, 则很难通过调整回火工艺使其韧性得到大幅度的改善。而适当提高淬火冷却速率(如采用喷雾、喷水淬火)可有效改善大锻件截面的组织均匀性, 提高转子材料的冲击韧性和降低脆韧转变温度^[10, 11]。

3 结 论

1. 淬火冷却速率决定 30CrMoNiV511 钢转子的

微观组织: 冷速越高($\geq 25\text{ }^{\circ}\text{C/min}$)形成的贝氏体组织越细小均匀, 且碳化物细小弥散分布; 冷速较低时($<12\text{ }^{\circ}\text{C/min}$)则容易形成上贝氏体+粒状贝氏体, 且贝氏体铁素体板条粗大, 碳化物聚集分布不均匀; 冷速很低时($<5\text{ }^{\circ}\text{C/min}$)甚至出现先共析铁素体或少量珠光体组织。

2. 30CrMoNiV511 钢转子材料的微观组织, 即贝氏体铁素体的大小及碳化物的形态和分布决定了该材料的冲击性能。组织细小、碳化物弥散均匀分布的下贝氏体组织对应的试样冲击功高, 而组织粗大、碳化物聚集长大的上贝氏体组织以及出现先共析铁素体后对应的试样冲击功却很低。

3. 提高 30CrMoNiV511 钢转子的淬火冷却速率, 使下贝氏体组织转变充分发生, 可提高该类转子的冲击韧性。

参 考 文 献

- 1 LIU Gaobo, Manufacturing process of 30CrMoNiV511 HP/IP rotor forgings, CFHI Technology, **3**, 49(2012)
(刘高波, 30CrMoNiV511 高中压转子锻件制造, 一重技术, **3**, 49(2012))
- 2 TAO Kai, YU Shenjun, HAN Lu, YU Wenping, ZHAO Yongrang, WANG Jisheng, Development of turbing rotor materials, Materials Review, **26**(1), 83(2012)
(陶凯, 于慎君, 韩璐, 于文平, 赵永让, 王继生, 汽轮机转子材料的研究进展, 材料导报, **26**(1), 83(2012))
- 3 AN Yunzheng, PAN Jingda, FU Changpu, *Microstructure Map of Turbogenerator Steel* (Beijing, China Machine Press, 1997) p.50-53
(安运铮, 潘景达, 符长璞, 汽轮发电机用钢金相图谱(北京, 机械工业出版社, 1997) p.50-53)
- 4 SONG Chuanbao, JIN Jiayu, ZHANG Hao, Research for improving the impact toughness of 30CrMoNiV steel forgings, Heavy Casting and Forging, **2**, 12(2001)
(宋传宝, 金嘉瑜, 张皓, 提高 30CrMoNiV 钢大锻件冲击韧性的研究, 大型铸锻件, **2**, 12(2001))
- 5 ZHANG Guoli, ZHANG Weidong, WANG Xiufeng, WANG Jin-qiao, Research for improving impact toughness of B12N-S steel used for steam tubing rotor forgings, Heavy Casting and Forging, **4**, 1(1999)
(张国利, 张卫东, 王秀峰, 王金桥, 提高汽轮机转子锻件 B12N-S 钢冲击韧性的研究, 大型铸锻件, **4**, 1(1999))
- 6 SONG Chuanbao, XU Linda, ZHAO Lei, Research for improving the impact toughness and grains size of heavy 30Cr2MoV steel forgings, Heavy Casting and Forging, **2**, 16(2002)
(宋传宝, 许林达, 赵磊, 改善 30Cr2MoV 钢大锻件冲击韧性及晶粒度的研究, 大型铸锻件, **2**, 16(2002))
- 7 M.Takahashi, H. Bhadeshia, A model for the microstructure of some advanced bainitic steels, Materials Transaction, JIM, **32**(8), 689(1991)
- 8 H. Bhadeshia, L.E. Svensson, Modelling the evolution of microstructure in steel weld metal, in: *Proceeding of Mathematical Modeling of Weld Phenomena*, edited by H. Cerjak and K. E. Easterling

- (Institute of Materials, London, 1993) p. 109
- 9 SONG Chuanbao, JIN Jiayu, LIU Zhiying, GUO Peiliang, Technology research on heat treatment of improving grain size and homogeneity on 300MW low-pressure steam turbing rotor, Heavy Casting and Forging, **4**, 34(1998)
(宋传宝, 金嘉瑜, 刘志颖, 郭培亮, 300MW 汽轮机低压转子晶粒细化与均匀化的热处理工艺方法研究, 大型铸锻件, **4**, 34(1998))
- 10 CHEN Qitang, Effect of microstructure on Impact toughness of steam turbine rotor steel, Heat Treatment of Metals, **10**, 44(1981)
(陈启堂, 汽轮机转子热处理后显微组织对冲击韧性的影响, 金属热处理, **10**, 44(1981))
- 11 GUO Peiliang, ZHAO Huijie, LI Jing, SU Xin, JIN Jiayu, Technology research on heat treatment of 30Cr1Mo1V steel rotor, Turbine Technology, **42**(2), 119(2000)
(郭培亮, 赵慧杰, 李 静, 苏 昕, 金嘉瑜, 30Cr1MoV 钢转子锻件差异热处理工艺研究, 汽轮机技术, **42**(2), 119(2000))