

## 高强度钢筋组织分析和强化工艺措施

龙 雨<sup>1</sup> 胡友红<sup>2</sup> 谢 祥<sup>2</sup> 王琳松<sup>1</sup> 郑家良<sup>3</sup> 高长益<sup>3</sup>

(1 水城钢铁集团公司,六盘水 553028;水城钢铁集团公司 2 炼钢厂,3 技术中心,六盘水 553028)

**摘 要**  $\Phi 22 \sim 25$  mm HRB400 ( $\% : 0.20 \sim 0.25C, 0.25 \sim 0.43Si, 0.90 \sim 1.15Mn$ ) 钢筋和  $\Phi 18 \sim 28$  mm HRB500 ( $\% : 0.20 \sim 0.25C, 0.50 \sim 0.65Si, 1.38 \sim 1.53Mn, 0.05 \sim 0.07V$ ) 高强度钢筋的生产工艺流程为 100 t 顶底复吹转炉-出钢脱氧合金化-钢包底吹氩气-160 mm  $\times$  160 mm 方坯连铸-连轧。通过对 HRB400 钢筋和 HRB500 高强度钢筋的组织观察,分析了 V 和 Nb 碳化物在钢中的析出行为及对性能的影响,提出了 HRB400 钢筋的表面淬火自回火组织层宜控制在 1 mm 以下和 HRB500 钢筋采用 V-Nb 复合微合金化强化改进措施。通过控制钢中 C 含量 0.18%  $\sim$  0.23%, 钢筋水冷后温度从 650  $^{\circ}C$  提高到 700  $^{\circ}C$ , HRB500 钢筋采用 V + Nb 含量 0.05%  $\sim$  0.07% 复合强化等工艺措施。 $\Phi 22 \sim 25$  mm HRB400 钢筋屈服和抗拉强度分别从 460  $\sim$  510 MPa 和 580  $\sim$  610 MPa 下降至 440  $\sim$  490 MPa 和 570  $\sim$  620 MPa,  $\Phi 18 \sim 28$  mm HRB500 钢筋屈服和抗拉强度分别从 560  $\sim$  610 MPa 和 670  $\sim$  700 MPa 提高至 570  $\sim$  620 MPa 和 680  $\sim$  710 MPa, 显著提高了钢筋的综合力学性能。

**关键词** HRB400 HRB500 高强度钢筋 组织 力学性能 强化措施

## An Analysis on Structure of High Strength Steel Reinforced Bar and Strengthening Process Measures

Long Yu<sup>1</sup>, Hu Youhong<sup>2</sup>, Xie Xiang<sup>2</sup>, Wang Linsong<sup>1</sup>, Zheng Jialiang<sup>3</sup> and Gao Changyi<sup>3</sup>

(1 Shuicheng Iron and Steel Group Corp, Liupanshui 553028; 2 Steelmaking Works, 3 Technology Center, Shuicheng Iron and Steel Group Corp, Liupanshui 553028)

**Abstract** The production process flowsheet of  $\Phi 22 \sim 25$  mm steel reinforced bar HRB400 ( $\% : 0.20 \sim 0.25C, 0.25 \sim 0.43Si, 0.90 \sim 1.15Mn$ ) and  $\Phi 18 \sim 28$  mm high strength steel reinforced bar HRB500 ( $\% : 0.20 \sim 0.25C, 0.50 \sim 0.65Si, 1.38 \sim 1.53Mn, 0.05 \sim 0.07V$ ) is 100 t top and bottom combined blowing converter-deoxidizing and alloying during tapping-ladle bottom argon blowing- 160 mm  $\times$  160 mm billet casting-continuous rolling. By observation on structure of reinforced bar HRB400 and high strength reinforced bar HRB500 the precipitation behavior and the effect of V and Nb carbide precipitation on properties of steel are analyzed, and the strengthening measures including to control the self-tempering structure layer at surface of HRB400 steel reinforced bar less than 1 mm and using V-Nb composite micro-alloying for HRB500 steel reinforced bar are put forward. With controlling carbon content in steel 0.18%  $\sim$  0.23%, increasing steel bar temperature after water cooling to 700  $^{\circ}C$  from original 650  $^{\circ}C$ , and using V + Nb = 0.05%  $\sim$  0.07% to composite-strengthen for HRB500 steel bar, the yield and tensile strength of  $\Phi 22 \sim 25$  mm bar of HRB400 steel decreases respectively from 460  $\sim$  510 MPa and 580  $\sim$  610 MPa to 440  $\sim$  490 MPa and 570  $\sim$  620 MPa, and the yield and tensile strength of  $\Phi 18 \sim 28$  mm bar of HRB500 steel increases respectively from 560  $\sim$  610 MPa and 670  $\sim$  700 MPa to 570  $\sim$  620 MPa and 680  $\sim$  710 MPa obviously to increase the comprehensive mechanical properties of steel.

**Material Index** HRB400, HRB500, High Strength Reinforced Steel Bar, Structure, Mechanical Properties, Strengthening Measures

HRB400、HRB500 钢筋是 GB1499.2-2007 国家标准中屈服强度级别为 400 MPa、500 MPa 的高强度钢筋。通常采用 V、Nb 微合金和轧后穿水冷却来提高钢筋的强度,达到低成本生产出高质量钢筋的目的<sup>[1-3]</sup>。对于建筑钢筋,主要是如何降低成本,生产出符合国家标准的产品。取  $\Phi 22$  mm HRB400 和  $\Phi 25$  mm HRB500 带肋螺纹钢筋试样,与重庆大学合作,分析了钢筋的微观组织,制订了微合金强化工艺改进措施。

### 1 实验材料

水钢生产钢筋的工艺是:高炉铁水 $\rightarrow$ 100 t顶底

复吹转炉冶炼(单渣法高拉碳出钢,终点钢水碳 $\geq$  0.15%,出钢温度1 650  $\sim$  1 690  $^{\circ}C$ ) $\rightarrow$ 挡渣出钢 $\rightarrow$ 脱氧合金化(加入顺序是硅锰铁 $\rightarrow$ 增碳剂 $\rightarrow$ 硅铁 $\rightarrow$ 硅铝钙钡复合脱氧剂) $\rightarrow$ 钢包底吹氩气 $\geq$ 5.5 min,出吹氩站钢水温度1 605  $\sim$  1 565  $^{\circ}C$  $\rightarrow$ 六机六流 160 mm  $\times$  160 mm 方坯连铸,拉坯速度 2.0  $\sim$  3.0 m/min,中间包钢水温度1 515  $\sim$  1 530  $^{\circ}C$ ,中间包液面高度 700 mm,长水口浇铸,铸坯矫直温度950  $\sim$  1 050  $^{\circ}C$  $\rightarrow$ 铸坯精整 $\rightarrow$ 铸坯加热(按炉组坯),加热炉温度控制(炉膛测温):加热段1 100  $\sim$  1 150  $^{\circ}C$ 、均热段1 080  $\sim$  1 130  $^{\circ}C$ ,出炉钢坯表面温度 990  $\sim$

1 030 ℃, 开轧钢坯表面温度 980 ~ 1 020 ℃; 钢坯头、中、尾温差 ≤ 50 ℃, 炉内为微还原性气氛; 若停轧时间在 30 min 以上立即降温到 900 ℃ 保温 → 棒材轧制 → 水冷 (轧后钢筋进水冷温度是 900 ℃, 出水冷温度是 650 ℃) → 钢筋上冷床温度 675 ~ 700 ℃ → 打捆 → 入库。

根据 GB1499.2-2007 国家标准的规定, 结合水钢的具体工艺实践, 确定这两种钢的内控化学成分 (熔炼分析) 见表 1。

从表 2 可知, HRB400 钢筋样品中不含微合金元素钒, 而 HRB500 钢筋样品中含有 0.056% 的钒, 且 C、Si、Mn 的含量也比 HRB400 钢筋高。由于 HRB500 钢筋中的微合金元素钒是以钒氮合金的形式加入, 导致其中的氮元素含量比 HRB400 高。

## 2 实验结果

### 2.1 组织观察

钢筋非金属夹杂物的评级结果见表 3。

从图 1 可以看出, 无论是 HRB400 或是 HRB500, 其中的带状组织都比较严重。

钢筋样品的横向金相组织见图 2。其心部组织均为等轴的铁素体 + 珠光体, HRB500 钢筋的晶粒尺寸略小于 HRB400。二者的边部组织相差较大。HRB400 钢筋样品的边部组织为回火索氏体 (图 2c), 其厚度约为 1.5 mm; 而 HRB500 钢筋样品的边部组织为铁素体 + 珠光体, 与其心部组织类似 (图 2d)。

在透射电镜下观察, HRB400 钢筋样品中的铁素体析出物很少, 只看出在局部位置存在由位错组成的亚晶粒 (图 3)。其中的珠光体中的铁素体与渗碳体片排列规则, 层片间距约为 100 nm 左右, 在珠光体的铁素体中也未见析出相 (图 3b)。

从图 4 可以看出, 加了钒氮合金的 HRB500 钢筋的铁素体中存在着大量的第二相质点。这些质点有些分布在铁素体基体中 (图 4a), 有些存在于晶界和位错缠结处 (图 4b)。能谱分析表明, 这些析出相为 V(C,N)<sup>[4]</sup>, 尺寸在 10 nm 至 100 nm 之间。

表 1 HRB400 和 HRB500 钢筋的内控成分 / %  
Table 1 Internal control composition of HRB400 and HRB500 steel bar / %

钢号	成品规格/mm	C	Si	Mn	P	S	V
HRB400	Φ22 ~ 25	0.20 ~ 0.25	0.25 ~ 0.43	0.90 ~ 1.15	≤ 0.045	≤ 0.045	-
HRB500	Φ18 ~ 28	0.20 ~ 0.25	0.50 ~ 0.65	1.38 ~ 1.53	≤ 0.045	≤ 0.045	0.05 ~ 0.07

表 2 钢筋试样的熔炼化学成分和力学性能

Table 2 Melting analysis and mechanical properties of steel bar

钢种	规格/mm	化学成分 / %										R <sub>el</sub> /MPa	R <sub>m</sub> /MPa
		C	Si	Mn	P	S	Cr	V	O	N			
HRB400	Φ22	0.23	0.34	0.99	0.025	0.022	0.061	-	0.0075	0.0047	500	585	
HRB500	Φ25	0.25	0.59	1.53	0.025	0.016	0.054	0.056	0.0143	0.0103	565	690	

表 3 钢筋非金属夹杂物评级

Table 3 Rating of nonmetallic inclusions in steel bar

钢种	规格/mm	A	B	C	D	D <sub>s</sub>
HRB400	Φ22	1.5	2	1.5	3	2
HRB500	Φ25	2.5	2	2	3.5	2.5

### 2.2 结果分析

(1) HRB400 钢筋表面的淬火自回火组织层较厚, 达到了 1.5 mm, 这是在热轧后穿水冷却过程中形成的。这种组织对提高钢筋的强度、降低生产成本是有利的, 但是会降低钢筋的塑性、韧性和冷弯性能。从钢筋的拉伸强度 (特别是屈服强度) 来看, 其富裕程度还较大, 可以采取降低轧后喷水压力或降低水冷段长度的措施适当降低其厚度, 将其控制在 1 mm 以下较为适宜。

(2) HRB500 钢筋中微量钒虽然主要以钒的碳氮化合物的形式在铁素体中析出, 但是从微合金元素的析出行为、对钢筋力学性能的影响及生产成本上考虑, 采用 V-Nb 复合微合金化的方法生产 500 MPa 级钢筋较好。V、Nb 微合金化与控轧控冷相结

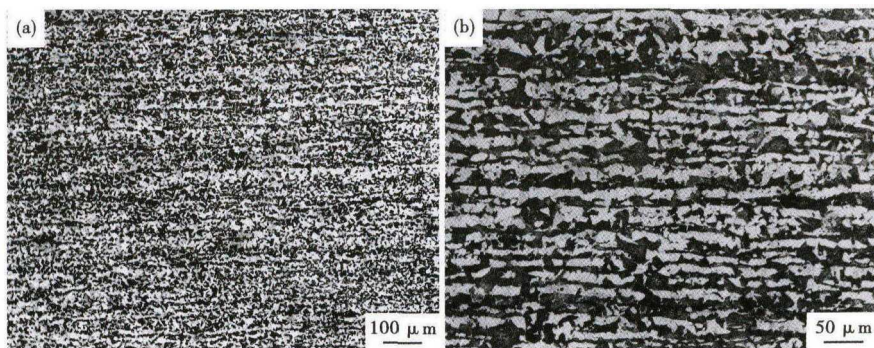


图 1 钢筋 HRB400(a) 和 HRB500(b) 的带状组织形貌

Fig. 1 Morphology of banded structure of HRB400 (a) and HRB500 (b) steel bar

合,使钢在单位生产成本下具有较好的材料使用性能。第二相  $M_pN_q$  在固溶体中的平衡溶度积可用下式表示<sup>[5-6]</sup>:

$$\log([M]^p \cdot [N]^q) = A - B/T$$

式中:[M]、[N]-M、N元素处于平衡固溶态的质量百分数;T-绝对温度;A、B-常数。

VN、NbN的固溶度积公式分别可表示为:

$$\log[V][N] = 3.40 - 8330/T$$

$$\log[Nb][N] = 4.04 - 10230/T$$

所研究的HRB500钢筋样品中含钒量为0.056%,含氮量为0.0103%,见表2。计算得出VN的开始析出温度为981℃;若用等量的铌来代替钢中的钒,则NbN的开始析出温度可提高到1132℃。同样,NbC的析出温度也远高于VC。从水钢公司的生产实际来看,热连轧的轧制温度都较高,而轧后通常采用快冷工艺。若用铌来部分代替钒,即采用V-Nb复合微合金化的方法,可以实现铌的第二相质点在变形奥氏体中的高温形变诱导析出。例

如,钢中的含钒和含铌量都控制在0.025%,而氮的水平保持不变(0.0103%N),则根据固溶度积计算公式,NbN与VN的开始析出温度分别为1067℃和918℃(由于析出需要过冷度,实际的析出温度比计算的温度低)。高温下在奥氏体中析出的NbN一方面,可以起到弥散强化的作用,另一方面,在奥氏体向铁素体和珠光体相变的过程中,弥散析出的NbN质点可以为铁素体、珠光体的形核提供大量的形核场所,促进晶内铁素体的形成,进一步细化铁素体组织,对提高钢筋的强度、塑性、韧性及冷弯性能等都是有利的<sup>[7-9]</sup>。通过这些机制,即便是终轧温度较高(950℃左右),也可以保证钢筋的组织细小,力学性能处在较高的水平。含钒的第二相质点析出温度较低,通常在终轧或终轧后的控冷过程中析出,可以进一步增加弥散强化,也可通过阻碍铁素体的再结晶

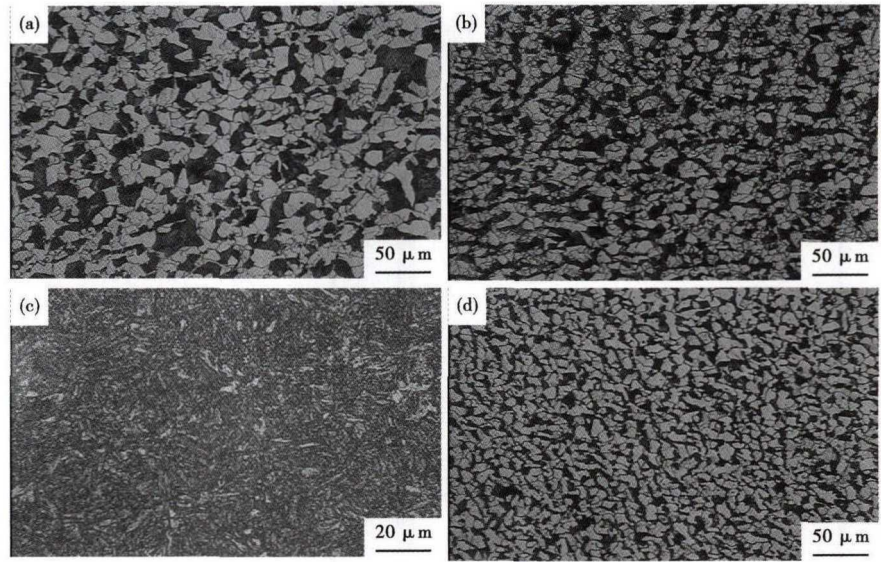


图2 钢筋HRB400(a)(c)和HRB500(b)(d)断面组织形貌:(a)(b)心部;(c)(d)边部  
Fig. 2 Morphology of structure at cross section of steel bar HRB400 (a) (c) and HRB500 (b) (d): (a) and (b) center of bar; (c) and (d) edge of bar

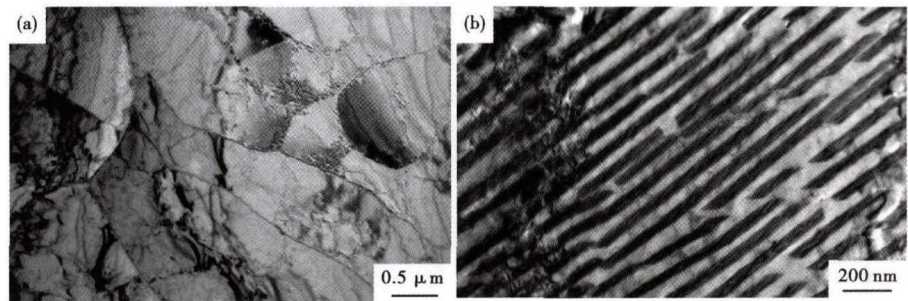


图3 HRB400钢筋亚晶粒(a)和铁素体-渗碳体片层(b)形貌,TEM  
Fig. 3 Morphology of sub-grain (a) and ferrite- cementite lamella (b) in HRB400 steel bar, TEM

晶粒长大的机制细化铁素体晶粒。

(3)试验钢筋中的带状组织比较明显,见图1。带状组织可以通过正火的方法加以改善,但它对钢筋的性能影响不大,GB1499.2-2007中也没有对带状组织作出明确的规定。

(4)HRB400与HRB500钢筋中的各类非金属夹杂物都小于等于3.5级,HRB500钢筋夹杂物的级别较高,但都在正常范围内。由于HRB500钢筋采用V-N合金微合金化,其中的气体元素氧、氮都较HRB400高,其夹杂级别较高也是正常的。

(5)HRB500钢筋中的含碳量为0.25%(见表2),达到了GB1499.2-2007标准中的含碳量上限(0.25%C),因此,应适当降低含碳量。

### 2.3 工艺改进及效果

从表4可见,通过降低碳含量和轧制后的穿水强度,两种钢筋表面的淬火自回火层厚度从1.0~

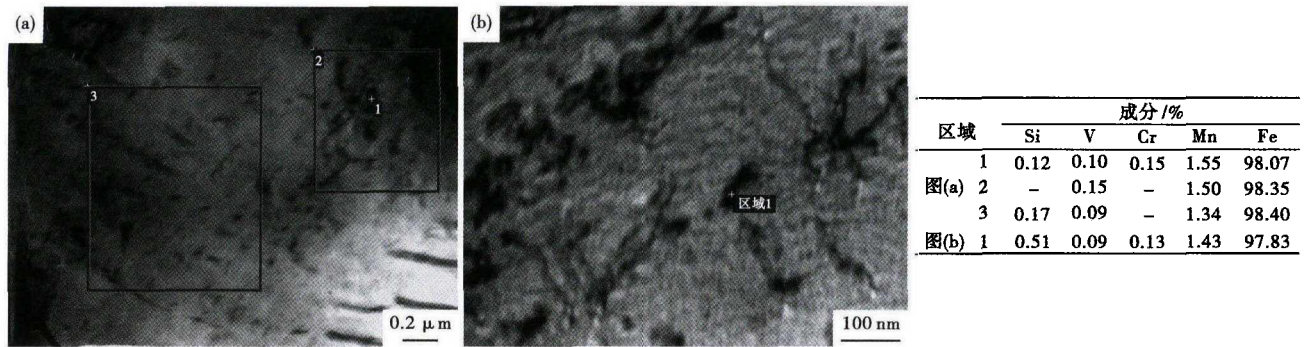


图 4 HRB500 钢筋在透射电镜下的析出物和能谱分析  
Fig. 4 Precipitates in HRB500 steel bar and energy spectrum analysis, TEM

表 4 钢筋改进前后的工艺参数、表面自回火层厚度及性能, 100 批

Table 4 Process parameters, surface self-tempering layer thickness and mechanical properties of steel bar before and after process improvement, 100 batches

钢种	成品规格/ mm	技术参数	改进前			改进后		
			表面淬火自回 火层厚度/mm	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	表面淬火自回 火层厚度/mm	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
HRB400	Φ22 ~ 25	碳含量 0.20% ~ 0.25% 轧后钢筋出水冷的温度 650 °C, 上冷床温度 675 ~ 700 °C, HRB500, V = 0.05% ~ 0.07%。	1.0 ~ 1.5	460 ~ 510	580 ~ 610	0.7 ~ 0.9	440 ~ 490	570 ~ 600
HRB500	Φ18 ~ 28	碳含量 0.18% ~ 0.23% 轧后钢筋出水冷温度 700 °C, 上冷床温度 725 ~ 750 °C, HRB500, V + Nb = 0.05% ~ 0.07%, V、Nb 各占一半的强化方式。	1.0 ~ 1.5	560 ~ 610	670 ~ 700	0.7 ~ 0.9	570 ~ 620	680 ~ 710

1.5 mm 下降到 0.7 ~ 0.9 mm。对于 HRB500, 采用了 V + Nb = 0.05% ~ 0.07%, V、Nb 各占一半的强化方式。结果, Φ22 ~ 25 mm HRB400 钢筋的屈服强度( $R_{el}$ )从 460 ~ 510 MPa 下降到 440 ~ 490 MPa, 抗拉强度( $R_m$ )从 580 ~ 610 MPa 下降到 570 ~ 600 MPa, 而 Φ18 ~ 28 mm HRB500 钢筋的屈服强度( $R_{el}$ )从 560 ~ 610 MPa 上升到 570 ~ 620 MPa, 抗拉强度( $R_m$ )从 670 ~ 700 MPa 上升到 680 ~ 710 MPa, 这是 V-Nb 复合强化的结果。这样, 在钢筋的强度满足国家标准要求的前提下, 有利于提高其综合性能。

### 3 结论

(1) HRB400 钢筋表面的淬火自回火组织层较厚, 达到了 1.5 mm, 这种组织对提高钢筋的强度、降低生产成本是有利的, 但是会降低钢筋的塑性、韧性和冷弯性能, 可以采取降低轧后喷水压力或降低水冷段长度的措施适当降低其厚度, 将其控制在 1 mm 以下较为适宜。

(2) HRB500 钢筋中微量的钒虽然主要以钒的碳氮化合物的形式在铁素体中析出, 但是从微合金元素的析出行为、对钢筋力学性能的影响及生产成本上考虑, 采用 V-Nb 复合微合金化的方法生产 500 MPa 及其以上级别钢筋更合适。通过采取相应的改

进措施, 提高了钢筋的综合性能。

### 参考文献

- [1] 陈 昕. 强化方式对 HRB400E 钢筋使用性能的影响[J]. 轧钢, 2014, 31(6): 20-23.
- [2] 唐海燕, 李京社, 杨明生, 等. 微合金化 HRB400 高强度热轧钢筋的试制[J]. 特殊钢, 2011, 32(6): 31-23.
- [3] 苏世怀, 完卫国, 孙 维, 等. 中国建筑用带肋钢筋、线材品种的优化[J]. 建材世界, 2010, 31(5): 36-39.
- [4] 杨才福, 张永权, 柳书平. 钒、氮微合金化钢筋的强化机制[J]. 钢铁, 2001, 36(5): 55-57.
- [5] 雍岐龙, 郑 鲁. 固溶度积公式、理想化学配比值与微合金钢化学成分的设计[J]. 钢铁, 1988, 23(7): 47-51.
- [6] 雍岐龙, 刘正东, 孙新军, 等. 钒微合金化钢中碳氮化钒固溶量及化学组成的计算分析[J]. 钢铁钒钛, 2005, 26(2): 20-24.
- [7] 曹建春, 刘清友, 雍岐龙, 等. 钒对高强度低合金钢的组织 and 强化机制的影响[J]. 钢铁, 2006, 41(8): 60-63.
- [8] 张朝晖, 鲁思渊, 巨建涛. 不同强化工艺下 HRB400 螺纹钢力学性能及组织分析[J]. 材料热处理技术, 2010, 39(24): 86-89.
- [9] 曹建春, 雍岐龙, 刘清友, 等. 含钒钼钢中微合金碳氮化合物沉淀析出及其强化机制[J]. 材料热处理学报, 2006, 27(5): 51-55.

龙 雨(1972-), 男, 硕士(2005 年贵州大学), 高级工程师, 1993 年武汉钢铁学院(本科)毕业, 钢铁冶金工艺研究。  
E-mail: 734026358@qq.com

收稿日期: 2017-04-21