

## 低合金超高强度钢 32CrNiMoNb 的控轧控冷工艺的试验研究

苏春霞<sup>1,2</sup> 陈本文<sup>1,2</sup> 付超<sup>1,2</sup> 杨晰<sup>1,2</sup> 杨成<sup>1</sup> 易东升<sup>1</sup> 李雷<sup>1</sup>

(1 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室;2 鞍钢股份有限公司技术中心,鞍山 114009)

**摘要** 试验用 32CrNiMoNb 钢 (/%: 0.32C, 0.30Si, 0.30Mn, 0.012P, 0.004S, 1.25Cr, 1.20Ni, 0.36Mo, 0.05Nb) 经 200 kg 真空感应炉熔炼, 铸成 135 mm × 135 mm 铸坯。在实验室 550 mm 中厚板轧机, 采用两阶段控制轧制加直接淬火工艺生产 12 mm 钢板。试验了第二阶段开轧温度 (950 °C 和 1 000 °C)、终轧温度 (900 °C 和 950 °C)、直接淬火终冷温度 (150 ~ 350 °C) 对试验钢力学性能和组织等的影响。结果表明, 第二阶段开轧温度 (950 ± 10) °C、终轧温度 (900 ± 10) °C、直接淬火终冷温度 (250 ± 10) °C, 钢板的力学性能 ( $R_{p0.2}$  1 515 MPa,  $R_m$  1 805 MPa,  $A$  8%, -40 °C  $K_{v2}$  冲击功 24 J)、弯曲性能 (180°)、组织 (细小马氏体) 和析出相 (NbCN) 达到了最佳匹配。

**关键词** 低合金高强度钢 32CrNiMoNb 两阶段控制轧制 直接淬火 终冷温度 力学性能 组织

## Test and Study on Controlling Rolling and Cooling Process of Low-Alloy Ultra-High Steel 32CrNiMoNb

Su Chunxia<sup>1,2</sup>, Chen Benwen<sup>1,2</sup>, Fu Chao<sup>1,2</sup>, Yang Xi<sup>1,2</sup>, Yang Cheng<sup>1</sup>, Yi Dongsheng<sup>1</sup> and Li Lei<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Metal Materials for Marine Equipment and Application;  
2 Techology Center, Angang Corp Ltd, Anshan 114009)

**Abstract** The tested steel 32CrNiMoNb (/%: 0.32C, 0.30Si, 0.30Mn, 0.012P, 0.004S, 1.25Cr, 1.20Ni, 0.36Mo, 0.05Nb) is melted by a 200 kg vacuum induction furnace and cast to 130 mm × 135 mm billet. And in laboratory the billet is rolled to 12 mm plate by a 550mm medium-heavy mill using two stage controlling rolling and cooling and direct-quenching process. The effect of beginning rolling temperature (950 °C and 1 000 °C), finishing rolling temperature (900 °C and 950 °C) and direct-quenching end cooling temperature (150 ~ 350 °C) at second stage on structure and mechanical properties of tested steel has been tested. Results show that at second stage with beginning rolling at (950 ± 10) °C, finishing rolling at (900 ± 10) °C and direct-quenching end cooling temperature (250 ± 10) °C, the matching of mechanical properties ( $R_{p0.2}$  - 1 515 MPa,  $R_m$  - 1 805 MPa,  $A$  - 8% and at -40 °C impact energy  $K_{v2}$  - 24 J) and bending performance (180°) of plate, structure (fine martensite) and precipitated phase (NbCN) is best.

**Material Index** Low-Alloy Ultra-High Steel 32CrNiMoNb, Two Stage Controlling Rolling, Direct-Quenching, End Cooling Temperature, Mechanical Properties, Structure

超高强度钢分为低合金超高强度钢、二次硬化超高强度钢和马氏体时效钢<sup>[1]</sup>, 超高强度钢已大量应用于火箭发动机外壳、飞机着陆部件、机械结构材料、模具、防弹钢板等领域, 其使用范围还在不断的扩大, 具有广阔的发展前景<sup>[2]</sup>。本文通过试验研究了低合金超高强度钢 32CrNiMoNb 的控制轧制及控制冷却工艺, 为工业生产奠定基础。

### 1 试验材料及方法

不同合金化条件下, 超高强度钢的强韧性配合以 Cr-Ni-Mo 和 Cr-Mo 系最佳<sup>[3]</sup>, 在 Cr-Ni-Mo 系基础上, 添加具有细晶强化和析出强化效果的微合金化元素 Nb, 设计出 32CrNiMoNb 钢, 具体化学成分为 (%): 0.32C、0.30Si、0.30Mn、0.012P、0.004S、1.25Cr、1.20Ni、0.36Mo、0.05Nb。试验材料为试验室 200 kg 真空感应炉冶炼的模铸坯, 模铸坯断面尺寸 135 mm × 135 mm, 切成 (mm) 135 × 135 × 220 轧

坯 4 块, 并在 Formastor-D 全自动相变仪上测定相变点及连续冷却转变曲线 CCT, 确定其马氏体开始转变温度  $M_s$  为 380 °C, 临界淬火冷却速度 10 °C/s。

轧制是在实验室 550 mm 中厚板轧机上进行的, 轧坯加热温度为 (1 250 ± 10) °C, 保温 1.5 h; 第 1 阶段轧制在奥氏体再结晶区进行, 轧制成厚度 30 mm 中间坯, 第 1 阶段终轧温度 (1 020 ± 10) °C; 第 2 阶段钢板轧制规格 (mm) 12 × 200 × L, 轧后钢板直接淬火, 以高于临界淬火冷却速度水冷到  $M_s$  点以下温度, 轧后钢板放入 100 °C 的缓冷槽中, 第 2 阶段轧制工艺参数见表 1。

从表 1 中 1# ~ 4# 钢板第 2 阶段轧制工艺参数来看, 1# 钢板开轧温度 (1 000 ± 10) °C, 终轧温度 (950 ± 10) °C, 钢板在奥氏体再结晶区完成轧制; 2# ~ 4# 钢板开轧温度 (950 ± 10) °C, 终轧温度 (900 ± 10) °C, 钢板在奥氏体未再结晶区完成轧制; 固定冷

表 1 32CrNiMoNb 钢板第 2 阶段轧制工艺参数

Table 1 Rolling process parameters of plate of steel 32CrNiMoNb at second stage

钢板 编号	开轧温度/ ℃	终轧温度/ ℃	冷却水量/ ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )	终冷温度/ ℃	冷却速度/ ( $^{\circ}C \cdot s^{-1}$ )
1#	1 000 ± 10	950 ± 10	28	250 ± 10	35
2#	950 ± 10	900 ± 10	32	150 ± 10	38
3#	950 ± 10	900 ± 10	25	250 ± 10	33
4#	950 ± 10	900 ± 10	20	350 ± 10	28

注:(1)冷却辊道长度 10 m, 设定辊道速度为 0.5 m/s, 钢板从进入辊道到出辊道时间为 20 s; (2)通过增大或减少冷却水量控制冷却速度; 平均冷却速度 = (第二阶段终轧温度 - 终冷温度) ÷ 20 s。

却辊道速度为 0.5 m/s, 通过调整冷却水量来控制钢板冷却速度和终冷温度, 1# ~ 4# 钢板终冷温度分别为 (250 ± 10)℃、(150 ± 10)℃、(250 ± 10)℃、(350 ± 10)℃, 钢板轧后放入缓冷槽中利用自身余热进行回火, 使钢板得到较好的强韧性匹配。

从钢板上切取横向冲击, 拉伸、弯曲试样, 硬度试样及金相试样。冲击试样加工成 V 型缺口, 试样规格 (mm) 10 × 10 × 55, 检验方法按 GB/T229-2007 标准执行; 拉伸试样采用 Φ10 mm 圆拉力, 试样规格及检验方法按 GB/T228. 1-2010 标准执行; 弯曲试样规格 (mm) 12 × 30 × 350, 检验方法按 GB/T232-2010 标准执行; 布氏硬度检验按 GB/T231. 1-2002 标准执行; 用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀金相试样, 观察横截面上的微观组织; 用饱和苦味酸溶液腐蚀金相试样, 观察晶粒度; 在 Tecnai G<sup>2</sup> 20 型透射电子显微镜下观察薄膜试验微观组织和复型试样析出相。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 力学和弯曲性能

力学性能和弯曲性能每组取样数量为 2 个, 试验值见表 2, 从表 2 中可以看出:

(1) 在奥氏体再结晶区完成轧制的 1# 钢板抗拉强度比指标要求低 30 MPa, 屈服强度、断后伸长率、布氏硬度、冲击吸收能量和弯曲性能满足指标要求, 但基本没有余量。

(2) 在奥氏体未再结晶区完成轧制的 2# ~ 4# 钢板, 随终冷温度从 (150 ± 10) ~ (350 ± 10)℃ 逐渐升高, 各项性能的变化规律是屈服强度、抗拉强度、布氏硬度逐渐下降, 断后伸长率、冲击吸收能量和弯曲性能则是先提高, 在 (250 ± 10)℃ 达到最大值, (350 ± 10)℃ 又下降。其中终冷温度 (150 ± 10)℃ 的 2# 钢板屈服强度、抗拉强度、布氏硬度满足指标要求, 但断后伸长率、冲击吸收能量和弯曲性能略低于指标要求; 终冷温度 (250 ± 10)℃ 的 3# 钢板各项性能都满足指标要求且有一定余量, 强韧性匹配良

表 2 32CrNiMoNb 钢 12 mm 热轧板的力学和弯曲性能  
Table 2 Mechanical properties and bending performance of 12 mm hot-rolled plate of steel 32CrNiMoNb

编号	拉伸性能			布氏硬度值 HBW10/3000	冲击吸收能 量(-40℃ K <sub>V2</sub> )/J	弯曲 性能/°
	R <sub>e0.2</sub> / MPa	R <sub>m</sub> / MPa	A/ %			
1	1 455	1 720	6	520	16	90
	1 465	1 720	7	525	17	95
2	1 550	1 820	5	550	15	85
	1 555	1 810	5.5	550	14	80
3	1 515	1 805	8	540	24	180
	1 515	1 795	9	545	22	160
4	1 460	1 650	7	505	17	100
	1 450	1 675	7.5	500	18	95
技术指标	≥	≥	≥6	520 ~ 580	≥16	内弯半径 72 mm ≥90°

好; 终冷温度 (350 ± 10)℃ 的 4# 钢板屈服强度、断后伸长率、冲击吸收能量和弯曲性能满足指标要求但余量很小, 抗拉强度和布氏硬度则低于指标要求。

综上所述, 从力学和弯曲性能结果来看, 低合金超高强度钢 32CrNiMoNb 适宜的轧制工艺是第 1 阶段采用奥氏体再结晶区轧制; 第 2 阶段采用奥氏体未再结晶区轧制, 开轧温度 (950 ± 10)℃, 终轧温度 (900 ± 10)℃, 终冷温度 (250 ± 10)℃, 采用该工艺轧制的钢板各项性能均满足技术指标要求, 且均有一定余量。

### 2.2 析出相和晶粒度

图 1(a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>, d<sub>1</sub>) 分别对应 1# ~ 4# 钢板的透射电镜析出相形貌, 析出相成分均为 NbCN。

在奥氏体再结晶区完成轧制的 1# 钢板析出相数量较少, 基本为 20 ~ 30 nm 的球状析出物, 一般来说, 当尺寸超过 50 nm 的 NbCN 析出相数量较多时会降低钢的力学性能<sup>[4]</sup>, 1# 钢板这种尺寸和数量的 NbCN 析出相对钢板性能、组织和晶粒度无影响。

在奥氏体未再结晶区完成轧制的 2# ~ 4# 钢板析出相数量多, 为 10 nm 左右的球状细小析出物, 析出物均匀弥散的分布在晶界和晶内, 此种析出物是含 Nb 钢在奥氏体未再结晶区轧制变形过程中或轧制变形后发生的应变诱导析出, 在晶内析出的 NbCN 起到析出强化作用, 在晶界和亚晶界析出的 NbCN 可抑制晶界运动从而细化晶粒<sup>[4]</sup>, 在钢的所有强化机制中, 只有细晶强化能同时提高强度、塑性和韧性。

图 1(a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>, d<sub>2</sub>) 分别对应 1# ~ 4# 钢板的奥氏体晶粒情况, 1# 钢板的奥氏体晶粒尺寸在 35 μm 左右, 晶粒度为 7.5 级; 2# ~ 4# 钢板的奥氏体晶粒尺寸在 15 μm 左右, 晶粒度为 8.5 ~ 9.5 级。与析出相分

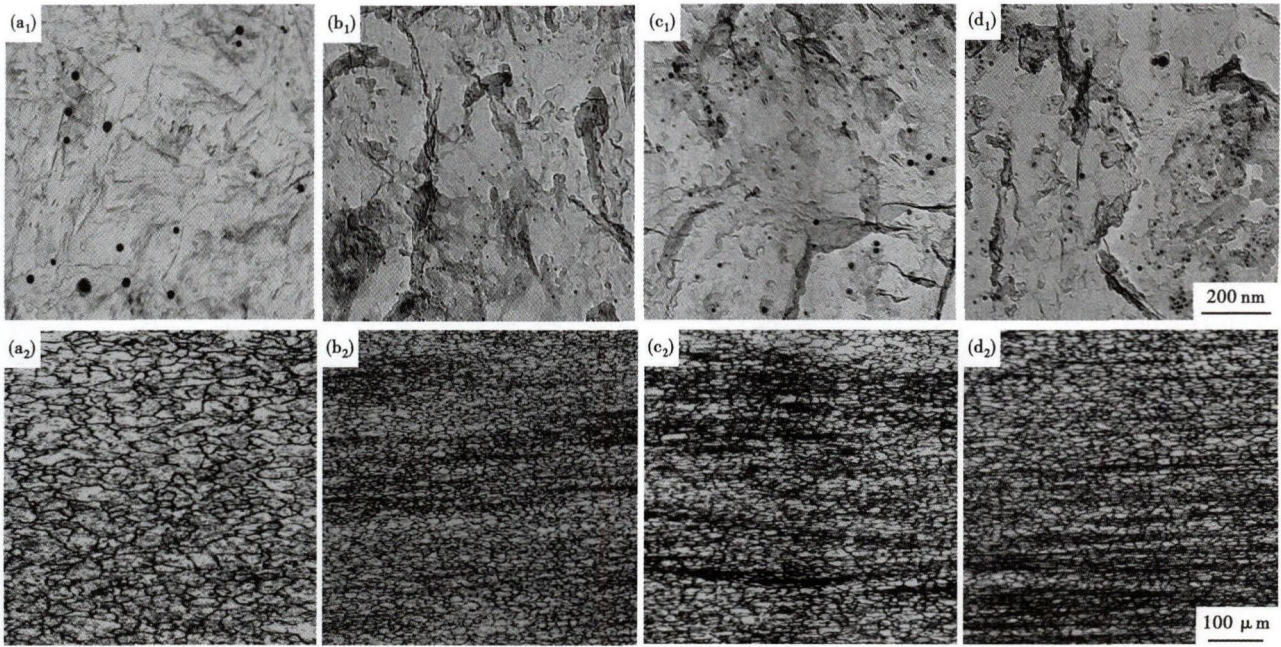


图1 试验 32CrNiMoNb 钢的析出相(透射电子电镜)形貌(a<sub>1</sub>)(b<sub>1</sub>)(c<sub>1</sub>)(d<sub>1</sub>)和奥氏体晶粒度(a<sub>2</sub>)7.5级,(b<sub>2</sub>)(c<sub>2</sub>)(d<sub>2</sub>)8.5~9.5级;终轧-终冷温度/℃:钢板1<sup>#</sup>,950-250(a<sub>1</sub>)(a<sub>2</sub>);2<sup>#</sup>,900-150(b<sub>1</sub>)(b<sub>2</sub>);3<sup>#</sup>,900-250(c<sub>1</sub>)(c<sub>2</sub>)和4<sup>#</sup>,900-350(d<sub>1</sub>)(d<sub>2</sub>)

Fig. 1 Morphology of precipitated phase (TEM) in tested steel 32CrNiMoNb (a<sub>1</sub>), (b<sub>1</sub>), (c<sub>1</sub>) and (d<sub>1</sub>); austenite grain size of tested steel (a<sub>2</sub>) rating 7.5; (b<sub>2</sub>), (c<sub>2</sub>) and (d<sub>2</sub>) rating 8.5~9.5; finishing rolling- end cooling temperature /℃: plate No1, 950-250 (a<sub>1</sub>) and (a<sub>2</sub>); No2, 900-150 (b<sub>1</sub>) and (b<sub>2</sub>); No3, 900-250 (c<sub>1</sub>) and (c<sub>2</sub>); and No4, 900-350 (d<sub>1</sub>) and (d<sub>2</sub>)

析结果一致。

综合钢的析出相和晶粒度检验结果,在奥氏体未再结晶区完成轧制的2<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>钢板析出物细小弥散的分别在晶界和晶内,起到析出强化和细化晶粒作用,对钢的综合性能极为有利。2<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>钢板轧制后直接淬火终冷温度不同,对钢的性能也有不同影响,通过后续的金相组织检验进一步分析。

### 2.3 金相组织

图2(a,b,c)分别对应2<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>钢板的金相组织,从图2(a,b)来看,终冷温度较低的2<sup>#</sup>~3<sup>#</sup>钢板得到

回火马氏体,且马氏体束或马氏体片尺寸细小,均在10 μm左右,对于低合金超高强度钢来说,只有获得细小均匀的回火马氏体组织,才能保证钢板具有较高硬度、强度的同时,还具有一定的塑性和韧性匹配,从而保证钢板使用性能;从图2(c)4<sup>#</sup>钢板的金相组织来看,由于终冷温度(350 ± 10)℃进入中温回火区间,形成了回火屈氏体组织,回火屈氏体组织强度及硬度相对回火马氏体要低,且(350 ± 10)℃处于第1类回火脆性区间,冲击韧性下降<sup>[5]</sup>,一般情况下不会保证钢板最终使用性能。

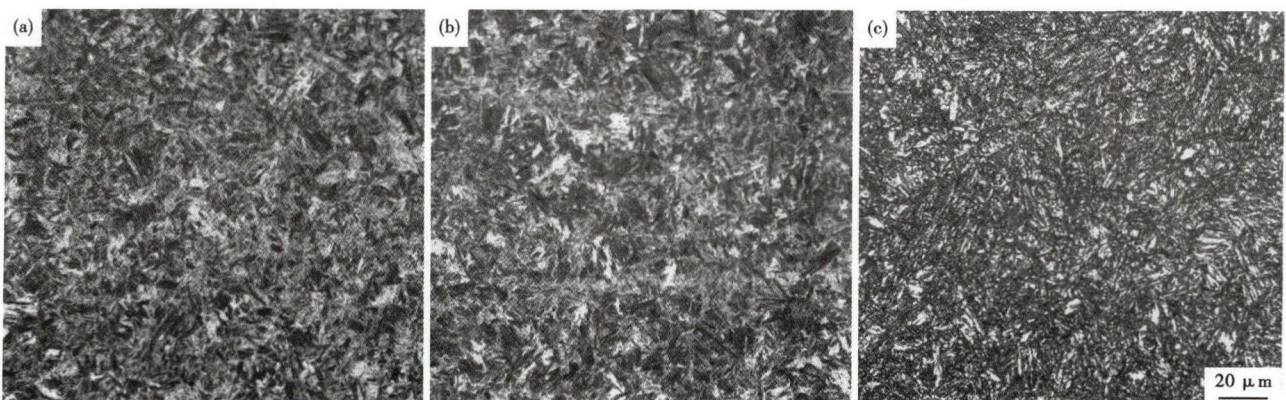


图2 试验钢 32CrNiMoNb 的组织形貌,终冷温度:钢板2<sup>#</sup>(a) 150 °C,回火马氏体;3<sup>#</sup>(b) 250 °C,回火马氏体;4<sup>#</sup>(c) 350 °C,回火屈氏体  
Fig. 2 Morphology of structure of tested steel 32CrNiMoNb, end cooling temperature: plate No2, 150 °C tempered martensite (a); No3, 250 °C tempered martensite (b) and No4, 350 °C tempered troostite (c)

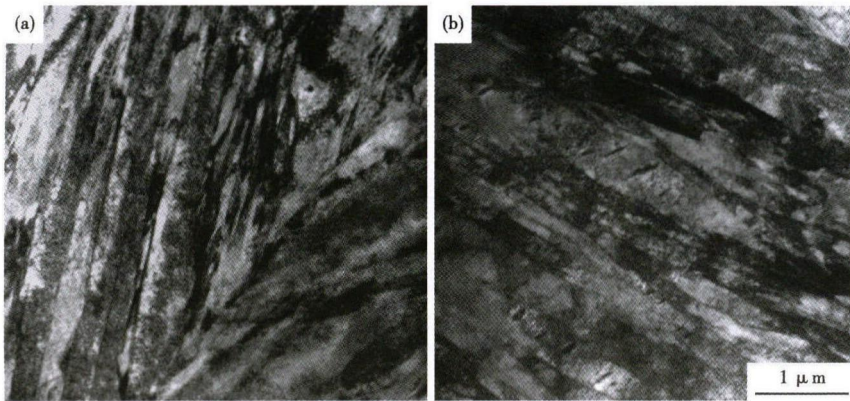


图 3 试验 32CrNiMoNb 钢的组织形貌(透射电子显微镜),终冷温度:2#钢板(a)150℃,高密度位错板条马氏体,无明显析出碳化物;3#钢板(b)250℃,马氏体板条内细小自回火碳化物析出

Fig. 3 Morphology of structure of tested steel 32CrNiMoNb( TEM), end cllowing temperature: plate No2 (a) 150 ℃, high density dislocation lath martensite, no obvions carbide precipitation and No3 (b) 250 ℃, self-tempering fine carbide precipitates in lath martensite

通过上述的普通光学显微镜观察,2#和3#钢板的金相组织完全相同,但2#钢板的塑性、冲击韧性及弯曲性能低于3#钢板,通过倍数更高的透射电子显微镜观察,发现其马氏体微观形态不同,终冷温度(150±10)℃的2#钢板马氏体板条边界清晰,板条上为高密度位错,碳化物无明显析出,见图3(a);终冷温度(250±10)℃的3#钢板自回火程度增强,细小的自回火碳化物在板条内以短杆状形式析出,见图3(b)。Ms点大于300℃的钢,在常用淬火介质冷速下都可以产生充分的自回火,对超高强度钢来说,这种具有一定回火程度的马氏体是一种最理想的组织,钢板的强韧性匹配极佳<sup>[6]</sup>。

综上所述,通过金相组织观察,采用未再结晶区控制轧制,终冷温度(250±10)℃的3#钢板得到一定自回火程度的马氏体,且回火马氏体束或马氏体片尺寸细小,保证钢板强度、硬度、塑性和韧性达到最佳匹配。

### 3 结论

低合金超高强度钢32CrNiMoNb适宜的轧制工艺是两阶段控制轧制:第1阶段在奥氏体再结晶区轧制;第2阶段在奥氏体未再结晶区轧制,开轧温度(950±10)℃,终轧温度(900±10)℃,轧制变形过程中或轧制变形后析出的NbCN细小弥散的分布在晶界和晶内,起到了析出强化和细化晶粒作用;轧制后直接淬火,通过控制辊道速度和冷却水量控制钢板终冷温度(250±10)℃,使钢板得到一定自回火程度且尺寸细小的马氏体,保证钢板强度、硬度、塑性和韧性达到最佳匹配。

### 参考文献

- [1] 董瀚.合金钢的现状与未来[C].中国金属学会特殊钢分会论文集,北京;2003:58-62.
- [2] 刘宪民,王春旭.超高强度结构钢的历史及发展[C].第三届北京冶金年会论文集,北京;2000:13-18.
- [3] 张启深.4340高强度合金钢的生产[J].工业加热,2003,26(6):49-51.
- [4] 傅俊岩,王伟哲.镍科学与技术[M].北京:冶金工业出版社,2003:272-286.
- [5] 崔忠圻.金属学与热处理[M].北京:机械工业出版社,2007:263-264,280-286.
- [6] 史学星,杨才福.两相区淬火对10Ni5CrMo钢组织与性能的影响[J].金属热处理,2008,33(4):31-34.

苏春霞(1978-),女,硕士(2010年东北大学),高级工程师,2000年沈阳工业大学(本科)毕业,超高强度钢研制开发。  
E-mail: agsuchunxia@sina.com

收稿日期:2017-02-12

**欢迎全国冶金、机械、耐材及相关  
行业在《特殊钢》杂志上刊登工艺设备  
和技术、产品研发宣传广告**