



## 高强焊丝钢 N2M2T 连铸坯表面缺陷分析及工艺改进

苏永泽, 张行利, 代芳音, 崔贵博, 陈新艳  
(中信泰富特钢研究院青钢分院技术中心, 青岛 266000)

**摘要:** 针对某钢厂在冶炼 N2M2T 高强焊丝钢时, 连铸坯表面出现的凹陷、角部深振痕裂纹及渣坑等表面缺陷, 结合理论分析及现场实际生产情况, 从保护渣理化性能、结晶器振动参数、一冷配水及钢中 N 含量等对铸坯表面产生的缺陷进行分析。结果表明, 连铸坯产生的表面缺陷主要与保护渣理化指标、结晶器振动参数、钢中 N 含量有关, 而与一冷配水关系不大。生产实践表明, 通过将保护渣碱度从 0.6 提高到 1.19,  $w[C]$  从 13.51% 降低到 8.21%, 粘度从 0.666 Pa·s 降低到 0.156 Pa·s, 结晶器振动参数偏斜率由 0.15 提高至 0.20, 振频公式由 60+50 V 调整为 90+60 V, 钢中 N 含量控制在  $<50 \times 10^{-6}$ , 连铸工序  $\Delta N < 7 \times 10^{-6}$  等措施, N2M2T 高强焊丝钢连铸坯的表面缺陷得到明显改善, 铸坯合格率达 85% 提高到 95% 以上, 为后续轧钢的稳定轧制提供了保证。

**关键词:** 高强焊丝钢; 铸坯振痕; 保护渣; 角部裂纹; 连铸坯

**DOI:** 10.20057/j.1003-8620.2023-00081 **中图分类号:** TF03+3

## Analysis of Surface Defects of High Strength Welding Wire Steel N2M2T Continuous Casting Billet and Process Improvement

Su Yongze, Zhang Xingli, Dai Fangyin, Cui Guibo, Chen Xinyan  
(Technical Center, Qingdao Branch of CITIC Pacific Steel Research Institute, Qingdao 266000, China)

**Abstract:** In response to the surface defects such as concavities, deep vibration marks, cracks, and slag pits on the surface of continuous casting billets during the smelting of N2M2T high-strength welding wire steel in a certain steel plant, combined with theoretical analysis and actual production conditions on site, an analysis was proposed to analyze the surface defects of N2M2T high-strength welding wire steel continuous casting billets from four aspects: the physical and chemical properties of protective slag, mold vibration parameter mode, primary cooling water distribution, and N content in the steel. The analysis results indicate that the surface defects generated by continuous casting billets are mainly related to the physicochemical indicators of the protective slag, mold vibration parameters, and N content in the steel, but not to the primary cooling water distribution. Production practice shows that by increasing the alkalinity of the protective slag from 0.6 to 1.19, the C content is reduced from 13.51% to 8.21%, and the viscosity is reduced from 0.666 Pa·s to 0.156 Pa·s; The deviation rate of mold vibration parameters has been increased from 0.15 to 0.20, and the vibration frequency formula has been adjusted from 60+50 V to 90+60 V; Control the N content in steel to  $<50 \times 10^{-6}$ , continuous casting process  $\Delta N < 7 \times 10^{-6}$ ; The surface defects of N2M2T high-strength welding wire steel continuous casting billet have been significantly improved, and the qualification rate of the billet has increased from 85% to over 95%, providing assurance for stable rolling of subsequent steel rolling.

**Key Words:** High Strength Welding Wire Steel; Casting Vibration Marks; Protective Slag; Corner Cracks; Continuous Casting Billet

高强焊丝是一种用于焊接金属材料的辅助材料。它由金属丝制成,可以通过电弧、气体等不同的焊接方法将两个或更多金属材料连接在一起。高强焊丝广泛应用于制造、建筑、航空航天、汽车、农业机械等领域。本文所指 N2M2T 高强焊丝钢主要用于生产 70 kg 高强焊丝<sup>[1]</sup>,其主要用于 700 MPa 高强钢结构的焊接,如大型压力容器、远洋船舶、LNG 管道、轻量化车体及其他大型焊接结构件<sup>[2]</sup>,显著提高了高强钢构件的应用及服役寿命<sup>[3-7]</sup>。

随着大型化、自动化、智能化、产业化在焊接行业的应用,焊丝的使用量逐年提高。2020 年,某钢厂为进一步丰富特种焊接用钢的种类,不断满足客户特定需求,提高经济效益,开始研发 N2M2T 高强焊丝钢。由于前期生产经验不足,参考普通气保焊丝 ER70S-6 工艺进行生产,导致生产的连铸坯表面存在严重的凹陷、角部深振痕及渣坑等表面缺陷,经过抛丸检查发现铸坯存在横裂及纵裂缺陷,无法满足轧制要求。

目前,关于高强焊丝钢连铸坯表面质量控制方面的研究较少。因此,通过对N2M2T连铸坯表面缺陷产生原因进行分析,结合实际生产情况,提出优化改进措施,解决了N2M2T连铸坯表面缺陷,满足了轧制要求,从而实现批量供货。

1 N2M2T 钢连铸坯表面质量问题及原因分析

1.1 生产工艺流程

某钢厂生产的N2M2T 高强焊丝钢主要化学成分见表1。生产工艺为:高炉铁水→铁水 KR 预处理→120 t 转炉→LF→150 mm×150 mm 方坯连铸机→铸坯修磨→高速线材轧制。

1.2 连铸坯表面质量问题及原因分析

对高强焊丝钢铸坯进行抛丸检查,连铸坯表面存在横、纵向凹陷,角部裂纹及渣坑等缺陷。经统

计,铸坯合格率仅为 85%,铸坯表面的典型缺陷如图 1 所示。生产过程中的具体连铸工艺参数见表 2。

从图 1 可以看出,高强焊丝钢铸坯的表面缺陷严重。图 1(a、b)为铸坯表面的凹陷缺陷;图 1(c)为铸坯表面的角部裂纹缺陷;图 1(d)为铸坯表面的渣坑缺陷。

图 1(a、b)所示的表面凹陷会诱导铸坯表面产生裂纹等缺陷,凹陷部位因为冷却和凝固速度与其它部位相比偏慢,导致组织粗化,裂纹敏感性强<sup>[8]</sup>,在热应力和钢水静压力共同作用下,产生应力集中而导致在凹陷薄弱处出现裂纹。一方面,该缺陷存在于铸坯表面,在轧制过程中难以焊合而使母材产生表面裂纹;另一方面,在凹陷缺陷处由于气隙热阻增大、传热不良,使局部奥氏体晶粒

表 1 N2M2T 高强焊丝钢主要化学成分(质量分数)

| Table 1 Main chemical composition of N2M2T high strength welding wire steel |             |             |             |        |        |             |       |             |             | %        |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------|--------|-------------|-------|-------------|-------------|----------|
| 项目                                                                          | C           | Si          | Mn          | P      | S      | Ni          | Cu    | Mo          | Ti          | 其他残余元素总量 |
| 标准                                                                          | 0.05 ~ 0.15 | 0.30 ~ 0.90 | 1.00 ~ 1.80 | ≤0.025 | ≤0.025 | 0.70 ~ 1.20 | ≤0.20 | 0.20 ~ 0.60 | 0.02 ~ 0.30 | ≤0.50    |
| 实测                                                                          | 0.07        | 0.60        | 1.50        | 0.012  | 0.008  | 0.85        | 0.015 | 0.40        | 0.10        | -        |

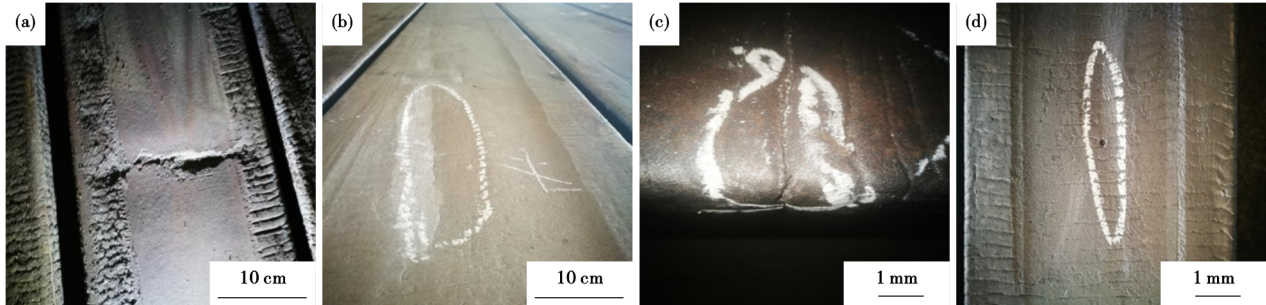


图 1 N2M2T 钢铸坯表面缺陷形貌:(a)横向凹陷,(b)纵向凹陷,(c)角部裂纹,(d)渣坑

Fig. 1 Surface defect morphology of N2M2T steel casting billet: (a) transverse depression, (b) vertical depression, (c) corner cracks, (d) slag pit

表 2 N2M2T 高强焊丝钢连铸工艺参数

| Table 2 Continuous casting process parameters of N2M2T high strength welding wire steel |                             |          |         |                             |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------|---------|-----------------------------|----------|
| 一冷水量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )                                                 | 二冷比水量/(L·kg <sup>-1</sup> ) | 结晶器震动偏斜率 | 结晶器震动模式 | 连铸拉速/(m·min <sup>-1</sup> ) | 钢水过热度/°C |
| 135                                                                                     | 0.4                         | 0.15     | 60+50 V | 1.05                        | 25 ~ 45  |

表 3 高强焊丝钢中 N 含量及角部裂纹情况

| Table 3 N Content and corner cracks in high strength welding wire steel |                           |                            |                           |         |
|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|---------|
| 试样号                                                                     | 钢包样 w(N)/10 <sup>-6</sup> | 中间包样 w(N)/10 <sup>-6</sup> | 连铸增 w(N)/10 <sup>-6</sup> | 角部裂纹率/% |
| 1                                                                       | 41                        | 58                         | 17                        | 6.3     |
| 2                                                                       | 43                        | 60                         | 17                        | 7.0     |
| 3                                                                       | 47                        | 66                         | 19                        | 8.2     |
| 平均值                                                                     | 46                        | 61.3                       | 17.67                     | 7.2     |

粗大及微观组织异常发展,从而产生成分不均匀现象,导致盘条组织不均产生拉拔断裂。产生横向凹陷、纵向凹陷、渣坑等表面缺陷的原因,主要是由于保护渣熔速慢、碱度低熔化不良,新结晶器锥度小,拉速低且不稳定,导致结晶器内铸坯表面的氧化铁皮与结晶器摩擦振动从而挤入振痕的缝隙中,形成凹陷。结晶器冷却强度大、侵入式水口插入深度较深不利于保护渣熔化,保护渣黏附在铸坯表面,形成渣坑<sup>[9]</sup>。

图1(c)所示的铸坯角部裂纹形成的主要原因是钢水中的Ti、B等微合金元素的氮化物、碳氮化物等从铸坯角部沿奥氏体晶界析出,产生了铸坯角部脆化现象并在铸坯被拉矫机矫直过程中撕裂。钢水中N含量和铸坯角部横裂严重程度之间有一定的相关性<sup>[10]</sup>。有研究发现,连铸钢水中N含量较高(特别是当连铸工序 $\Delta N > 10 \times 10^{-6}$ )时,铸坯角部横裂现象也会随之加重<sup>[11]</sup>。表3为高强焊丝钢中N含量及角部裂纹情况。

图1(d)所示的铸坯表面渣坑缺陷形成的主要原因是在浇注过程中保护渣吸收大量 $TiO_2$ 、TiN<sup>[12-13]</sup>,这是因为该钢中含有一定量的Ti,由于浇注过程中温度降低,钢中析出一定量的O,以及保护渣不良吸入部分O、N,与钢中Ti结合形成 $TiO_2$ 和TiN<sup>[14-16]</sup>。表4为各Ti类夹杂物形成热力学条件,保护渣吸收大量的钛类夹杂物导致保护渣理化性能发生改变,熔点升高,容易形成渣圈。同时液渣层变薄,液渣变少,导致流入坯壳与结晶器壁之间空隙的液渣膜不均匀,从而引起铸坯表面产生深振痕及渣坑。

表4 各Ti类夹杂物形成热力学条件

Table 4 Thermodynamic conditions for the formation of Ti type inclusions

| 序号 | 夹杂物       | 析出温度/℃ | 生成条件   |
|----|-----------|--------|--------|
| 1  | $Ti_2O_3$ | 1 674  | 冶炼过程   |
| 2  | $Ti_3O_5$ | 1 593  | 冶炼过程   |
| 3  | TiN       | 1 511  | 连铸凝固过程 |
| 4  | $TiO_2$   | 1 500  | 连铸凝固过程 |
| 5  | TiO       | 1 492  | 连铸凝固过程 |

## 2 N2M2T钢生产工艺优化试验

### 2.1 结晶器保护渣优化

N2M2T高强焊丝钢属于含钛的镍钼类高合金焊丝。该类钢因合金元素种类多、合金含量大、Ti含量高等因素,连铸坯表面凹陷及裂纹对生产过程中的温度变化敏感度高。

虽然N2M2T高强焊丝钢的碳含量不完全在包晶钢范围,但是由于合金元素种类多,含量高,已经具备了包晶钢的特点,在凝固过程钢坯收缩量大,容易产生凹陷;凹陷及深振痕处,由于气隙厚,热阻大,传热慢,坯壳薄,易产生应力裂纹。因此,确定从提高保护渣碱度,降低粘度作为优化方向。表5为优化前后结晶器保护渣理化指标。

碱度及熔点的上升,使保护渣的粘度降低,从而使保护渣溶解及吸收氧化物夹杂的速度提高。同时,液态保护渣的再结晶温度得到提高,固态渣膜厚度提高,传热更加稳定,坯壳厚度更加均匀,避免了冷却不均及集聚应力的发生。保护渣粘度的降低可提高保护渣的润滑性,降低结晶器内坯壳与结晶器壁之间的摩擦力,从而降低钢坯表面裂纹的产生,同时粘度降低,保护渣消耗量增加,可减少保护渣理化指标的改变。优化后保护渣可以更好地解决润滑及传热问题<sup>[17-18]</sup>。

### 2.2 一冷配水优化

降低一冷水流量,可提高结晶器内钢水温度,相应改善保护渣熔化效果,减轻铸坯振痕深度。通过试验将1流一冷水由135 L/h调为130 L/h,水温轻微上涨0.1℃。理论计算,带走热量与其它流几乎一致,未能有效提高结晶器内钢水温度。说明降低一冷水流量对结晶器内保护渣的熔化效果无明显影响,优化前后带走热量情况见表6。

计算1 h内带走的热量: $Q=cm\Delta t$ ,式中,c表示水的比热容为 $4.2 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$ ,m表示水的质量,kg; $\Delta t$ 表示水温差,℃。

对试验铸坯抛丸检查,对比正常水量铸坯,凹陷深度无明显变化,需继续降低一冷水流量,但漏钢风险增加。因此,只有提高浇注过热度,改善保

表5 优化前后结晶器保护渣的理化指标

Table 5 Physicochemical indicators of crystallizer protective slag before and after optimization

| 工艺  | 保护渣成分(质量分数)/% |         |      |           |      |         |        |       |      | 粘度/(Pa.s) | 熔点/℃  |
|-----|---------------|---------|------|-----------|------|---------|--------|-------|------|-----------|-------|
|     | CaO           | $SiO_2$ | R    | $Al_2O_3$ | MgO  | $Na_2O$ | $K_2O$ | C     | F    |           |       |
| 优化前 | 23.95         | 39.44   | 0.60 | 4.36      | 1.14 | 9.46    | 0.26   | 13.51 | 5.53 | 0.666     | 1 104 |
| 优化后 | 34.96         | 29.32   | 1.19 | 6         | 0.85 | 8.08    | 0.24   | 8.21  | 5.86 | 0.156     | 1 150 |

表 6 一冷水优化前后带走热量情况

Table 6 - Heat removal situation before and after primary cold water optimization

| 工艺项目                | 1 流<br>(优化后) | 2 流<br>(优化前) | 3 流<br>(优化前) | 4 流<br>(优化前) | 5 流<br>(优化前) | 6 流<br>(优化前) |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 水量(m)/kg            | 131.7×103    | 136.8×103    | 136.7×103    | 136×103      | 136.6×103    | 136.5×103    |
| 温差( $\Delta t$ )/°C | 3.8          | 3.6          | 3.7          | 3.7          | 3.7          | 3.6          |
| 热量(Q)/J             | 2.101×109    | 2.068×109    | 2.124×109    | 2.113×109    | 2.122×109    | 2.063×109    |

注:表中第一行m为1 h通过结晶器水的重量(kg);第三行Q为1 h时间内带走的热量(J)。

护渣熔化效果。通过提高浇注过热度,结晶器内钢水温度相应提高,从而改善了保护渣的溶化效果,提高了保护渣消耗量。

### 2.3 结晶器振动参数优化

结合当前铸坯表面质量情况,通过查阅资料,了解到结晶器振动偏斜率及振频公式对铸坯振痕有影响,于是对结晶器振动偏斜率及振频公式进行优化。一是将非正弦振动参数中的偏斜率由0.15调整至0.20;二是将振频公式由60+50V改为90+60V。振痕平均深度对比优化前有轻微下降,同时振痕深度的最大值及最小值有明显减小,铸坯表面质量得到了明显提升<sup>[19]</sup>。表7为优化前后振痕深度变化。

表 7 优化前后振痕深度变化

Table 7 Changes in depth of vibration marks before and after optimization

| 工艺  | 连铸拉速/(m/min) | 中间包钢水过热度/°C | 振痕最大值/mm | 振痕最小值/mm | 平均值/mm |
|-----|--------------|-------------|----------|----------|--------|
| 优化前 | 1.05         | 30          | 2.35     | 0.11     | 0.497  |
| 优化后 | 1.05         | 32          | 1.51     | 0.04     | 0.371  |

### 2.4 钢中N含量控制

对于高强焊丝钢,需要全冶炼过程控制N含量<sup>[20]</sup>。通过转炉全程底吹氩气,采用低氮合金化,增加中间包冲击区覆盖剂和开浇氩封吹扫,加强中间包保护浇注,钢中N含量整体降低。通过与表3优化前中间包样氮含量及连铸工序增氮情况对比,优化后中间包样 $w[\text{N}] < 50 \times 10^{-6}$ ,连铸工序 $\Delta \text{N} < 7 \times 10^{-6}$ 时,铸坯角部横裂纹明显降低。表8为优化后高强焊丝钢中N含量及角部裂纹情况。N含量的检测采用了ONH分析仪进行测定。

表 8 优化后高强焊丝钢中N含量及角部裂纹情况

Table 8 N Content and corner cracks in high strength welding wire steel after optimization

| 试样号 | 钢包样<br>$w(\text{N})/10^{-6}$ | 中间包样<br>$w(\text{N})/10^{-6}$ | 连铸增<br>$w(\text{N})/10^{-6}$ | 角部裂纹<br>率/% |
|-----|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------|
| 1   | 32                           | 37                            | 5                            | 0.5         |
| 2   | 31                           | 29                            | -2                           | 0           |
| 3   | 35                           | 35                            | 0                            | 0           |
| 4   | 32                           | 38                            | 6                            | 0.6         |
| 5   | 32                           | 34                            | 2                            | 0.2         |
| 6   | 33                           | 36                            | 3                            | 0.3         |
| 平均值 | 32.5                         | 34.8                          | 2.3                          | 0.27        |

### 2.5 工艺优化后效果

通过对保护渣、结晶器震动参数、钢中N含量进行优化,N2M2T高强焊丝钢铸坯的表面质量得到了提升。在N2M2T高强焊丝钢铸坯表面没有发现凹陷、角部裂纹及渣坑等缺陷。经统计,优化工艺后,高强焊丝钢的铸坯合格率从85%左右提升至95%以上。

## 3 结论

(1)将保护渣碱度从0.6提高到1.19, $w[\text{C}]$ 从13.51%降低到8.21%,粘度从0.666 Pa·s降低到0.156 Pa·s,保护渣可以更好地解决润滑及传热问题,铸坯凹陷得到明显改善。

(2)降低一冷水流量,对改善保护渣的熔化效果无明显影响,因而无法改善铸坯凹陷及振痕深度。

(3)结晶器振动参数偏斜率由0.15提高至0.20,振频公式由60+50 V调整为90+60 V,铸坯振痕深度得到明显改善。

(4)降低钢中 $w[\text{N}] < 50 \times 10^{-6}$ ,连铸工序 $\Delta \text{N} < 7 \times 10^{-6}$ ,铸坯合格率由85%左右提升至95%以上。

## 参考文献

- [1] 李亚彦. 高强焊丝铸坯表面质量提升控制研究[C]. 2019全国高效连铸应用技术及铸坯质量控制研讨会论文集. 扬州, 2019: 369-371.
- [2] 张敏敏, 李 达, 朱腾辉, 等. 800MPa及以上高强钢焊材的研

究现状及展望[J]. 热加工工艺, 2016, 45(21): 5-9+13.

- [3] Guo W, Crowther D, Francis J A, et al. Microstructure and mechanical properties of laser welded S960 high strength steel [J]. Materials & Design, 2015, 85: 534-548.

- [4] 杨俊,何航,张勇伟,等. 80kg级低温不预热焊接高强钢的开发[J]. 特殊钢, 2021, 42(5): 36-40.
- [5] 刘旭辉,张波,肖爱达,等. 工程机械用960QT钢焊接粗晶区组织及性能研究[J]. 特殊钢, 2019, 40(1): 63-67.
- [6] 罗应明,王九清,庞辉勇,等. 水电站用800 MPa级低焊接裂纹敏感性高强钢板SX780CF的开发[J]. 特殊钢, 2022, 43(3): 21-24.
- [7] 黄治军,胡家国,何嘉,等. 900 MPa级超高强气保焊丝的研制[J]. 电焊机, 2014, 44(5): 85-88.
- [8] 朱立光,张晓仕,刘增勋,等. ER70-Ti钢铸坯表面横向裂纹分析及控制[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(3): 166-171.
- [9] 翟俊,李欢,陈法涛,等. 保护渣对430不锈钢铸坯边部凹陷缺陷的影响[J]. 中国冶金, 2022, 32(5): 102-108.
- [10] 李明贤,朱国军. 氮质量分数对铸坯角部裂纹的影响及控制[J]. 中国冶金, 2017, 27(6): 54-57.
- [11] 李伟. 连铸钢水增氮原因分析与改进[J]. 天津冶金, 2013(3): 4-6.
- [12] 郝占全,陈伟庆,Carsten Lippold,等. 结晶器保护渣吸收TiO<sub>2</sub>夹杂物的动力学研究[J]. 特殊钢, 2009, 30(5): 13-15.
- [13] 王时松,张旭彬,王云波,等. 高钛焊丝钢保护渣吸收TiN的研究[J]. 特殊钢, 2023, 44(3): 46-52.
- [14] 李广帮,魏崇一,常桂华. 焊丝钢中氮化钛的形成及控制[J]. 鞍钢技术, 2021(3): 14-17.
- [15] 杨咏阶. 控制ER70S-G含钛焊丝钢TiN析出和防止水口结瘤的工艺实践[J]. 特殊钢, 2015, 36(6): 13-15.
- [16] 杨咏阶,刘玉爱,张向勇. 防止含钛焊丝钢GF50-G水口结瘤的生产实践[J]. 特殊钢, 2018, 39(3): 9-12.
- [17] 韩秀丽,闫晓鹏,刘磊,等. 连铸结晶器保护渣渣膜传热特性研究进展[J]. 特殊钢, 2021, 42(6): 6-13.
- [18] 张晓仕. 含钛高强焊丝钢连铸保护渣冶金特性研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2020.
- [19] 付达超,文光华,刘耀宗,等. 10B21冷镦钢连铸小方坯表面异常振痕成因分析及控制[J]. 连铸, 2020, 45(3): 33-37.
- [20] 周德光,罗伯钢,曾立,等. 钢中氮的控制及其对质量的影响[J]. 炼钢, 2005, 21(1): 43-46+57.

## 版权声明

根据《中华人民共和国著作权法》,作者向《特殊钢》编辑部投稿(或接受约稿),全体作者同意,上述提交本刊发表的作品一经本刊录用,作者即将作品整体以及附属于作品的图、表、摘要或其他可以从作品中提取部分的全部版权——包括但不限于复制权、发行权、信息网络传播权、翻译权、汇编权、改编权,在著作权保护期内转让给《特殊钢》编辑部。本刊所付一次性稿酬已包含上述各种稿酬,若编辑部再以任何形式在任何地点出版该论文,将不再支付作者稿酬。

作者应保证论文是作者独立创作的原创性作品,未曾发表;不涉及侵权和泄密问题;保证论文没有一稿多投;保证论文的署名权无争议,若发生问题,一切责任由作者承担,文责自负。如有异议,请在投稿前说明,本刊即时处理。