

## 超级奥氏体不锈钢 254SMo 的均质化工艺研究

史咏鑫<sup>1,2</sup>, 李青<sup>1,2</sup>, 钟庆元<sup>1,2</sup>, 田伟<sup>1,2</sup>, 叶强<sup>1,2</sup>

(1 中航上大高温合金材料股份有限公司, 邢台 054800; 2 河北省特种合金再生工程技术研究中心, 邢台 054800)

**摘要:** 试验用超级奥氏体不锈钢 254SMo (w%: 0.011C, 0.30Si, 0.46Mn, 20.25Cr, 17.75Ni, 6.13Mo, 0.64Cu, 0.212N) 采用 20 t 电弧炉 + AOD + LF 精炼的工艺冶炼, 研究了 254SMo 钢的铸态组织, 发现枝晶间存在大量的析出相, 其临近冒口钢锭头部中心的析出相尺寸最大, 且呈网状分布。钢锭经 1 240 °C 8 ~ 40 h 均质化处理后, 锻造成 Φ204 mm 棒材, 检验其析出相数量和点腐蚀速率。试验结果表明: 随着均质化时间的延长, 其析出相尺寸减小, 数量减少, 钢的点腐蚀性能提高; 均质化 12 h + 镦粗拔长 + 均质化 12 h 为最优均质化工艺。

**关键词:** 超级奥氏体不锈钢 254SMo; 析出相; 点腐蚀速率; 均质化

## Study on Homogenization Process of Super Austenitic Stainless Steel 254SMo

ShiYongxin<sup>1,2</sup>, Li Qing<sup>1,2</sup>, Zhong Qingyuan<sup>1,2</sup>, Tian Wei<sup>1,2</sup>, Ye Qiang<sup>1,2</sup>

(1 Avic Shangda Superalloys Company Limited, Xingtai 054800;

2 Hebei Engineering Research Center for Special Alloy Regeneration, Xingtai 054800)

**Abstract:** The tested super austenitic stainless steel 254SMo (w%: 0.011C, 0.30Si, 0.46Mn, 20.25Cr, 17.75Ni, 6.13Mo, 0.64Cu, 0.212N) is melted by 20 t electric arc furnace + AOD + LF refining, the as-cast microstructure of 254SMO steel has been studied. It is found that there are a large number of precipitates between dendrites, and the precipitates in the center of ingot head near hot top are the largest and distributed in a network. After homogenization treatment at 1 240 °C for 8-40 h, the ingots are forged to Φ204 mm bar, the quantity of precipitated phase and pitting corrosion rate are inspected. The experimental results show that with the prolongation of homogenization time, the size and quantity of precipitates decrease, and the pitting corrosion performance of steel improves; Homogenization for 12 h + Upsetting and Stretching + homogenization for 12 h is the optimal homogenization process.

**Key Words:** Super Austenitic Stainless Steel 254SMo; Precipitated Phase; Pitting Corrosion Rate; Homogenization

超级奥氏体不锈钢具有高耐腐蚀性能、高力学性能, 是不锈钢的重点发展方向。而 254SMo 钢是目前发展较快、产量较多的超级奥氏体不锈钢材料之一, 主要应用在石油、化工、造纸、海水处理等多个领域。高的合金比使 254SMo 材料需采用电弧炉 + 电渣的工艺冶炼, 随着各个领域对材料的质量要求越来越严格, 价格却要求越来越低, 使生产厂家不得不思考采用更加节省成本的生产方式。超级奥氏体不锈钢 254SMo 采用电弧炉冶炼时, 在浇注过程中会出现严重的偏析, 偏析对材料的加工性能、耐腐蚀性能和力学性能都会产生不利影响<sup>[1-3]</sup>。为了改善材料的偏析程度, 钢锭需采用均质化处理。目前对超级奥氏体材料试样的均质化虽有研究<sup>[4-7]</sup>, 但对于工业生产中的钢锭偏析和均质化的研究还未见报道。试样的偏析程度远低于钢锭, 两者的均质化工艺也

有本质的区别, 本文主要对 254SMo 钢铸锭的偏析行为和均质化进行研究, 为钢厂规模生产提供参考。

### 1 试验材料与方法

#### 1.1 254SMo 钢冶炼过程主要参数

##### 1.1.1 主成分设计

##### 1.1.1.1 Cr、Mo、N

254SMo 钢多用于含 Cl<sup>-</sup> 海水等恶劣环境中, 对耐腐蚀性能要求严格。钢的耐点蚀当量数 PREN = Cr% + 3.3Mo% + 16N%, 材料的 PREN 值越高, 耐点蚀性能越好。N 元素可以起到增加强度和阻碍金属间相的沉淀析出的作用<sup>[8]</sup>, 故将 Cr、N 元素高控, 但 Mo 元素是易偏析元素, 其原子半径较大, 均质化难度大, 故将 Mo 元素低控。

1.1.1.2 Ni、Cu

Ni 元素可以提高钢的耐蚀性和抗高温氧化性。Cu 元素的加入可以降低加工硬化倾向, 提高产品塑性。但结合材料成本, 将 Ni、Cu 元素控制在中下限。

1.1.2 冶炼锭型

锭型越大, 其偏析程度越大。之后通过均质化获得均匀的组织, 就越困难。故锭型应尽量小, 选择冒口尺寸 500 mm、水口尺寸 430 mm、高度 1 100 mm 的 19 吋方锭, 每支单重 2 t。

1.1.3 浇注温度

浇注温度越高, 过热度越大, 钢锭的偏析程度越

大; 但浇注温度过低, 因钢锭补缩差, 夹杂物等不易上浮, 容易引发冶金缺陷。故结合生产设备能力, 选择浇注温度为 1 520 ~ 1 530 ℃。

1.2 试验材料

试验用 254SMo 钢, 采用 20 t 电弧炉 + AOD + LF 的工艺进行冶炼, 电弧炉主要起熔化钢水的作用, AOD 主要进行氩氧精炼, 并粗调成分, 采用吹氮气的方式进行 N 合金化, LF 进一步扩散脱氧, 精调成分, 成分合格后进行浇注。浇注前的钢水成分见表 1。

表 1 试验 254SMo 钢的化学成分/%  
Table 1 Chemical composition of tested steel 254SMo/%

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	O
标准	≤0.02	≤0.80	≤1.00	≤0.030	≤0.010	19.50 ~ 20.50	17.50 ~ 18.50	6.00 ~ 6.50	0.50 ~ 1.00	0.18 ~ 0.22	-
试验钢	0.011	0.30	0.46	0.024	0.001	20.25	17.75	6.13	0.64	0.212	0.001 8

1.3 试验与检测

在钢锭头部取样, 进行成分分析和金相分析。并将钢锭进行不同工艺的均质化处理, 锻打成 Φ204 mm 棒材, 在棒材头部的中心位置取样, 加工成金相试样和点腐蚀性能试样。利用显微镜和扫描电镜对试样进行分析。并且按照 ASTM G48-2011《使用三氯化铁溶液做不锈钢及其合金的耐麻点腐蚀和抗裂口腐蚀性试验的标准方法》中的 A 法进行腐蚀试验, 腐蚀时间设定为 48 h, 温度 50 ℃, 测试材料的点腐蚀性能。

2 试验结果与分析

2.1 钢锭凝固偏析现象

在 254SMo 钢锭头部的冒口线处切取试片, 并在试片的边部、1/2 半径和中心三个位置取样, 取样示意图如图 1 所示。通过光谱分析仪检测成分, 不同位置合金元素含量如表 2 所示。由表 2 可以看出, 三个位置的 Mo 元素差异较大, Cr 元素次之, Ni、Cu 元素差异较小。锭头边部 Mo 含量仅为 5.93%, 而锭头中心位置则高达 6.76%, 可见 Mo 元素发生了严重的正偏析。正偏析的程度与凝固速度、液体对流以及溶质扩散条件等相关。当凝固较慢时, 液体对流相对较强, 溶质原子能够向纵深扩散, 使剩余液体中的溶质浓度逐渐升高。钢锭浇注后, 边部最先凝固, 锭头中心处最后凝固, 所以锭头中心位置 Mo 元素远高于其他位置。

图 2 为 254SMo 钢锭锭头边部、1/2 半径和中心的金相组织照片。由图 2 可以看出, 钢锭锭头的三

个位置均存在枝晶, 枝晶间存在一种特殊的析出相。三个位置出现的析出相特点相同, 为白色条带中间夹杂黑色点状颗粒。其中锭头边部的析出相尺寸最小, 但数量最多, 形状为粒状、短棒状或骨头状; 1/2 半径位置析出相尺寸增大, 形状大都为“人”字形; 中心位置析出相已经连接成为网状。

通过扫描电镜对析出相进行相成分分析, 发现析出相富集了大量的 Mo、Cr 元素, 如图 3 和表 3 所示。其中白色条带的 Mo 含量可以达到基体的 3 倍, 黑色颗粒状的 Mo 含量达到基体的 2 倍。由此可见, 254SMo 钢的析出相主要为 Mo/Cr 的金属间相, 以锭头头部最为严重。

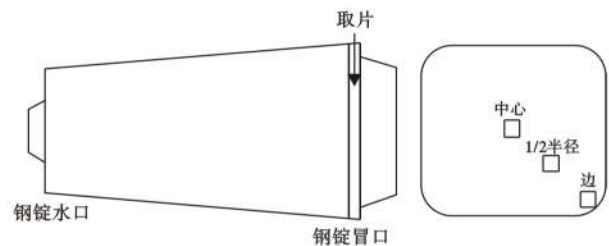


图 1 254SMo 钢锭取样示意图  
Fig. 1 Sampling diagram of 254SMo steel lingot

表 2 试验钢 254SMo 钢锭的化学成分/%  
Table 2 Chemical composition of tested steel 254SMo ingot/%

取样位置	Cr	Ni	Mo	Cu
钢锭边部	20.18	17.74	5.93	0.64
钢锭 1/2 半径	20.27	17.85	6.23	0.645
钢锭中心	20.49	17.87	6.76	0.655

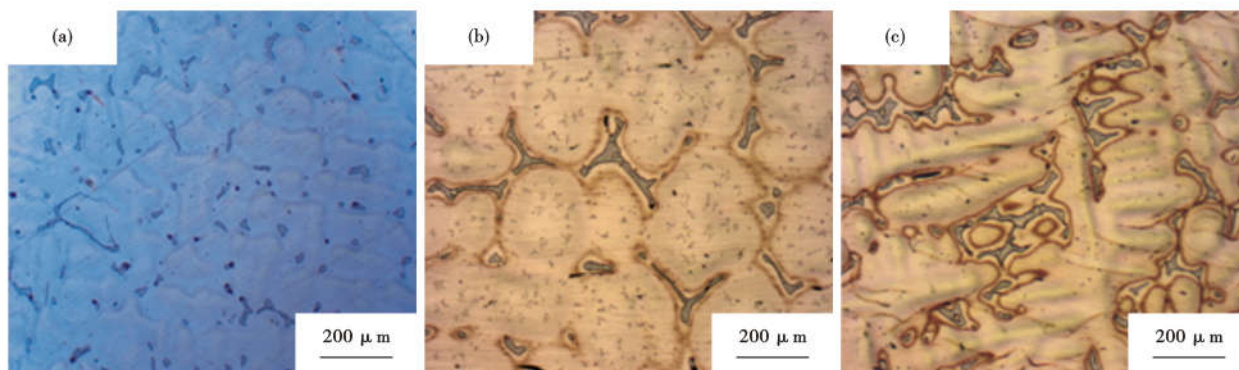


图 2 254SMo 钢锭头部临近冒口端的析出相组织形貌:(a) 边部;(b) 1/2 半径;(c) 中心

Fig. 2 Microstructure morphology of precipitates in 254SMo steel ingot head near hot top : (a) edges; (b) 1/2 radius; (c) centre

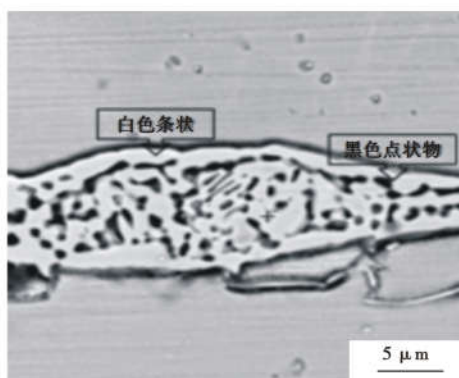


图 3 254SMo 钢析出相扫描电镜图片

Fig. 3 Scanning electron microscope pictures of 254SMo steel precipitates

表 3 254SMo 钢析出相化学成分/%

Table 3 Chemical composition of 254SMo precipitates/%

析出相	Cr	Mo
黑色点状物	27.79	13.37
白色条带	24.37	18.45

## 2.2 材料的耐腐蚀性能

254SMo 钢锭中析出相的存在,会影响材料的耐腐蚀性能和加工性能,进而降低使用寿命。为了延长材料的使用寿命,获得均匀一致的组织,应进行均质化处理。为了得到最优的均质化工艺,将同炉号的 6 支钢锭加热到 1 240 ℃,分别进行加热时间为 0、8、16、24、32、40 h 的均质化处理,之后锻打成 Φ204 mm 棒材,终锻温度为 850 ~ 900 ℃,锻后水冷至室温。在棒材头部切取试片,在试片中心位置取 7 mm × 27 mm × 52 mm 的试块。为消除锻造过程因终锻温度过低而析出的 σ 相,试块先在试验室进行 1 150 ℃ × 30 min 的热处理,水冷至室温。之后加工成 5 mm × 25 mm × 50 mm 的点腐蚀试样,按照标准 ASTM G48 中的 A 法进行腐蚀试验,腐蚀温度 50 ℃,腐蚀时间 48 h,其点腐蚀速率如表 4 所示。

表 4 254SMo 钢试样的点腐蚀速率

Table 4 Pitting corrosion rate of 254SMo steel samples

均质化工艺	点腐蚀速率/(g · m <sup>-2</sup> )
未均质化	67.3
8 h	10.5
16 h	0.2
1 240 ℃ 均质化 24 h	0
32 h	0
40 h	0

由表 4 可见,未均质化的 254SMo 钢点腐蚀速率为 67.3 g/m<sup>2</sup>,耐点蚀性能极差。随着均质化时间的延长,点腐蚀速率改善非常明显。当均质化时间提升至 24 h 后,其点腐蚀速率已经为 0。一般来说,材料的偏析越小,组织分布越均匀,第二相越少,材料的耐腐蚀性能就越好。根据点腐蚀速率结果来看,均质化处理对减轻材料的偏析起到了至关重要的作用。

## 2.3 钢的析出相

按照 2.2 节生产的棒材,在点腐蚀试样的相邻位置取 10 mm × 20 mm 的试样,在显微镜下进行观察,如图 4 所示。按照每 0.5 mm<sup>2</sup> 为一个视场,若视场中存在析出相,则记为 1,若视场中没有析出相,则记为 0,记录下每个试样存在析出相的视场数。结果如表 5 所示。

从检验结果来看,未进行均质化处理的 254SMo 钢析出相较严重,所有视场均有长条析出相,故仅靠常规的加热制度和锻造工艺无法消除材料的析出相。钢锭经均质化 8 h 后,析出相消除效果就非常明显,出现析出相的视场数减少 89.9%。但试样中的析出相仍较多,且聚集严重,沿变形方向可贯穿多个视场。钢锭经均质化 16 h 后,析出相出现的视场数进一步减少,其尺寸也相应减小,但仍然存在析出相贯穿视场的现象。经均质化 24 h 后,有 1 个试样未发现析出相,但仍有 2 个试样分别存在 10 个和

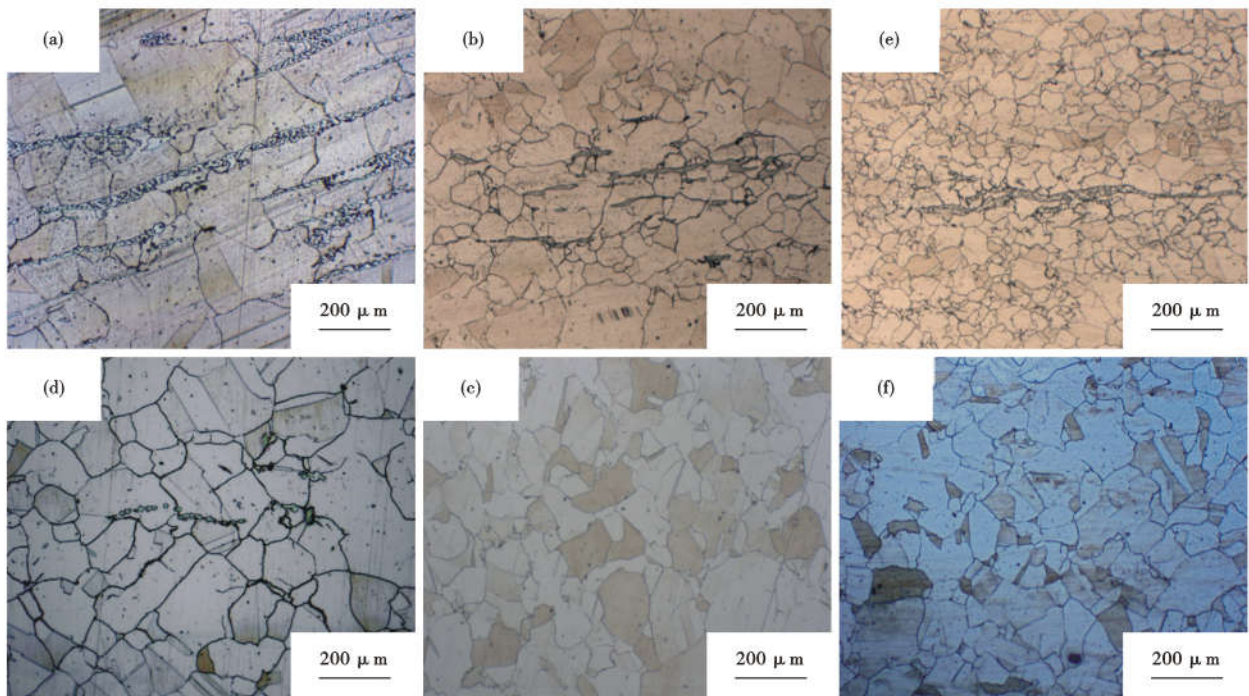


图 4 未均质化(a)和 1 240 ℃均质化 8 h (b),16 h (c),24 h (d),32 h (e),40 h (f)时 254SMo 钢的析出相形貌

Fig.4 Morphology precipitated phase in 254SMo steel without homogenization (a) and homogenized at 1 240 ℃ for 8 h (b), 16 h (c), 24 h (d), 32 h (e) and 40 h (f)

表 5 254SMo 钢试样存在析出相的视场数

Table 5 Field of view number of precipitated phase existing in 254SMo steel samples

均质化工艺	各试样析出相的现场数					
	1	2	3	4	5	平均值
未均质化	400	400	400	400	400	400
8 h	52	27	34	48	42	40.6
16 h	17	10	13	8	21	13.8
24 h	1	12	0	6	10	5.8
32 h	0	1	0	2	0	0.6
40 h	0	1	1	0	1	0.6

12 个视场的析出相。析出相呈现短棒状,个别出现长条状,说明均质化 24 h 并不能彻底稳定地消除析出相。经均质化 32 h 和 40 h 后,析出相基本消除,仅个别视场出现极小尺寸短棒状析出相。

由此可见,随均质化时间的延长,其析出相的数量减少,尺寸减小。均质化前期,析出相减少非常明显,后期随着时间的延长,析出相消除变得缓慢。析出相的减少与材料点腐蚀速率的提高有明显的对应关系。

影响均质化的因素多种多样,主要包括:均质化温度、均质化时间、晶体结构、晶体缺陷、化学成分、析出相尺寸等。254SMo 钢锭未经均质化时,所有视场均存在大量的析出相。均质化初期,一些尺寸相对较小、容易扩散的析出相很快被消除,剩余的析出相受内在或者外在的影响,大都集中在某几个位置

出现聚集。随着均质化时间的延长,Mo 元素不断迁移,析出相的尺寸减小,数量减少。当均质化时间长于 32 h 时,析出相已经基本被消除。

### 2.4 锻拔工艺对析出相的影响

为了提高生产效率,减少均质化时间,对钢锭进行了二次均质化试验,首先将钢锭进行 1 240 ℃ 12 h 的均质化处理,进行一次锻拔(锻粗至少 1/3,并拔长至原尺寸),之后再行 12 h 均质化处理,锻打为 Φ204 mm 棒材,终锻温度为 850 ~ 900 ℃,锻后水冷。按照标准检验其棒材头部中心位置试样的点腐蚀速率和析出相视场数,其点腐蚀速率为 0 g/m<sup>2</sup>,析出相出现的视场平均值为 0.5,其均质化效果已经优于 32 h 和 40 h 的均质化效果。主要原因有:均质化机制主要有空位扩散和间隙扩散两种。Mo 元素半径大,属于空位扩散。晶体表面及晶界原子排列的规律性较差,点阵畸变较大,能量较高,所以原子扩散的激活能较低,而且位错密度增大,也可以加速原子在晶体内的迁移,均质化中期增加一次锻拔,可起到细化晶粒,增加晶界的作用,同时也可破碎析出相,减小析出相的尺寸,故而提高了均质化速度。

### 3 结论

(1) 254SMo 钢锭存在严重的偏析,枝晶间出现富含 Mo、Cr 元素的金属间相,钢锭头部的中心位置

最严重。

(2) 254SMo 钢经过 24 h 的均质化处理后,其点腐蚀速率已经降到 0 g/m<sup>2</sup>。

(3) 当均质化时间大于 32 h 时,254SMo 钢的

析出相基本消除。增加镦拔工艺,可有效减少均质化时间。综合考虑 254SMo 钢的析出相及点腐蚀速率问题,均质化 12 h + 镦拔 + 均质化 12 h 为最优均质化工艺。

参考文献

[1]张彬彬. 超级奥氏体不锈钢 S32654 高温氧化机制及均匀化工艺研究[D]. 沈阳: 东北大学. 2015.

[2]王 坤; 陈爱英. 超级奥氏体不锈钢的高温析出行为[J]. 热加工工艺, 2020, 49(12): 1-5.

[3]潘 坤, 陈海涛, 郎宇平, 等. 中温时效对超级奥氏体不锈钢 S31254 析出相的影响[J]. 金属热处理, 2014, 39(11): 72-77.

[4]陈婉婉. 含 Mo 奥氏体不锈钢凝固偏析行为及偏析机理研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学. 2020.

[5]曾 莉, 张 威, 王 岩. 超级奥氏体不锈钢偏析行为及元素再分配规律[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(4): 232-238.

[6]高建兵, 范思鹏, 张树才, 等. 新型超级奥氏体 654SMO 偏析行为及均匀化工艺[J]. 钢铁, 2018, 53(8): 83-89.

[7]张树才, 姜周华, 李花兵, 等. 超级奥氏体不锈钢 654SMO 的研究进展[J]. 钢铁研究学报, 2019, 31(2): 132-144.

[8]孙长庆. 超级奥氏体不锈钢的发展, 性能和应用(上)[J]. 化工装备设计, 1999, 36(6): 38-44.

投稿须知

本刊面向国内外征稿, 主要刊登特殊钢领域的具有创新性、科学性、前沿性、有实践指导意义的论文, 涉及综述、试验研究、工艺新材料、工艺技术、组织和性能、应用、动态信息等栏目。来稿应观点明确、论据充分、数据详实、层次分明、文理通顺。

1 投稿要求

- 1.01 来稿内容文责自负, 不得涉及国家机密, 必须符合国家法律法规;
- 1.02 借鉴参考文献应不少于 8 篇, 综述类文章参考文献应不少于 30 篇, 见知网 - 万方网 - 《特殊钢》出版论文;
- 1.03 论文题目应简洁、准确, 不宜使用缩略词; 摘要(中文)字数一般在 200 ~ 300 字间, 内容应包括论文的研究目的、方法及研究结果等; 英文摘要字数在 300 ~ 400 个单词左右(对中文摘要内容进行扩展), 简要介绍研究背景、研究内容、研究成果。关键词的个数为 3 ~ 8 个;
- 1.04 论文电子版为彩色出版, 纸质期刊原则上为灰度印刷, 请确保图片在灰度模式下也能够清晰可辨, 不接受截屏图片;
- 1.05 投稿前需按照本刊下载中心“杂志投稿模板及要求”进行修改。不尽之处可参考近期出版的《特殊钢》论文;
- 1.06 若研究成果获得过奖励或属国家、省、部级有关基金资助项目, 在文末注明项目名称和编号;
- 1.07 网络投稿时, 必须准确、完整地填写所有署名作者的信息; 无高级职称在读硕士研究生的文章需注明: 导师姓名、通讯地址、职务(称)、邮编等作者单位(包括二级单位)应写全称;
- 1.08 修改稿请注明稿件编号, 同时说明进行了哪些修改。每次修改的说明和修改稿都应留备份, 以防丢失。修改稿需待编辑部讨论后, 方能确定是否刊用。编辑部对来稿可作文字和编辑技术上的修改;
- 1.09 原稿必须是未在中外文正式刊物上发表的论文。本刊严禁一稿多投、重复内容多次投稿、不同文种重复投稿。一旦发现上述情况, 稿件将按退稿处理, 并将通知作者单位及材料冶金领域有关期刊。作者本人的稿件今后将不被录用;
- 1.10 稿件审查结果在 2 个月内通知作者, 在此其间, 作者不得将稿件投往他处。个别稿件可能送审时间较长, 如果作者决定改投他刊或退稿, 请通知编辑部后, 再进行处理。编辑部决定录用稿件后, 会及时通知作者;
- 1.11 退修稿件的修改时限为 10 日, 编辑部将以作者返回修改稿日期作为投稿日期。如果需延期请事先联系编辑部, 否则, 超过 30 日, 编辑部有权对稿件做出退稿处理;
- 1.12 文责自负, 编辑部有权对稿件做技术性、文字性修改, 在征得作者同意后可以进行实质内容的修改;
- 1.13 作者需交纳版面费, 编辑部赠寄当期《特殊钢》杂志 1 ~ 3 册。  
(1) 版面费 1600 元/篇(含专家审稿费); (2) 不向作者收取审稿费用, 相应费用由编辑部代付; (3) 稿酬 300 元/篇。

2 著作权约定

论文被《特殊钢》编辑部录用后, 论文所有作者需签署“著作权转让协议”后才能正式出版发行。“著作权转让协议”可从本刊官网下载中心下载。

《特殊钢》编辑部