

## 管状铸造碳化钨堆焊工艺的试验研究

贺凯林, 王 臣, 史小华

(江苏丰尚智能科技有限公司, 江苏 扬州 225127)

**摘要:** 为研究管状铸造碳化钨的堆焊工艺, 首先采用2种不同材料工件进行堆焊, 堆焊后进行不同形式热处理; 然后通过维氏硬度计、金相显微镜和扫描电镜分析工件堆焊层硬度、显微组织及化学成分, 并测试工件磨损性能。结果表明: 堆焊层过薄或熔液过厚, 均不利于铸造碳化钨颗粒分布; 堆焊后铸造碳化钨被稀释, 并析出复杂碳化物, 稀释程度不同, 基体的硬度也存在差异; 堆焊层与基体形成冶金结合, 可对其进行热处理; 采用中频淬火尤其是渗碳淬火, 可提高堆焊层基体硬度, 进一步增强其耐磨性。

**关键词:** 碳化钨; 渗碳淬火; 堆焊; 冶金结合

中图分类号: TG444

文献标志码: A

文章编号: 1008-1690(2025)05-0023-06

## Experimental Investigation on Tubular Casting Tungsten Carbide Overlay Welding Process

HE Kailin, WANG Chen, SHI Xiaohua

(Jiangsu Famsun Co., Ltd., Yangzhou 225127, Jiangsu, China)

**Abstract:** To study the surfacing process of tubular cast tungsten carbide, two different materials were used for surfacing, and the workpieces after surfacing were subjected to different heat treatments. The hardness, microstructure and chemical composition of the surfacing layer were analyzed by Vickers hardness tester, metallographic microscope and scanning electron microscope, and the wear performance of the workpieces was tested. The results show that both too thin surfacing layer and too thick molten liquid are not conducive to the distribution of cast tungsten carbide particles. After surfacing, the cast tungsten carbide is diluted and complex carbides are precipitated. The degree of dilution is different, and the hardness of the matrix also varies. The surfacing layer and the base form a metallurgical bond and can be heat treated. Medium-frequency quenching or carburizing quenching (especially carburizing quenching) can increase the hardness of the matrix of the surfacing layer and further enhance its wear resistance.

**Key words:** tungsten carbide; carburizing quenching; overlay welding; metallurgical bond

### 0 引言

铸造碳化钨是一种耐磨材料, 主要由  $W_2C$  与  $WC$  组成, 在耐磨产品中发挥着重要作用。铸造碳化钨可通过氧-乙炔、等离子和激光等方式堆焊于工件表面, 也可与其他粉末混合烧结成单一工件或复合工件, 还可通过热喷涂或冷喷涂的方式<sup>[1]</sup>直接喷涂在工件表面。

不同处理工艺各有优劣势, 本文主要研究氧-乙炔堆焊工艺对堆焊层的影响, 并探讨堆焊后经后处理进一步提高材料耐磨性的方法。

### 1 试验材料与方法

#### 1.1 试验材料

试验所用堆焊焊条为管状铸造碳化钨, 外部铁皮为 08 钢, 内部为铸造碳化钨颗粒, 粒度为 80~100

收稿日期: 2025-02-18

作者简介: 贺凯林 (1980—), 男, 高级工程师, 本科, 主要研究方向为热处理及失效分析。E-mail: angel\_legend@aliyun.com

目,其组成如图1所示。其中,图1(a)所示为08钢的显微组织,由铁素体和极少量珠光体组成,表明其碳含量较低;图1(b)所示为铸造碳化钨颗粒,大部分为多边形,少量为球形。

这种焊条的铸造碳化钨质量分数一般为60%~70%,本试验所用焊条为65%。铸造碳化钨的主要指标包括化学成分、显微组织及颗粒大小,化学成

分中碳与钨的含量为主要指标,碳的质量分数一般控制在3.8%~4.0%;显微组织主要观察针状组织的比例,这是因为其对耐磨性影响较大<sup>[2-3]</sup>。试验所用颗粒中存在2种组织,如图2所示。其中:一种是针状组织,该组织有粗细之分,为主要组织;另一种是少量块状组织,属于先共晶组织,由颗粒成分偏离预定范围导致先共晶产物析出。

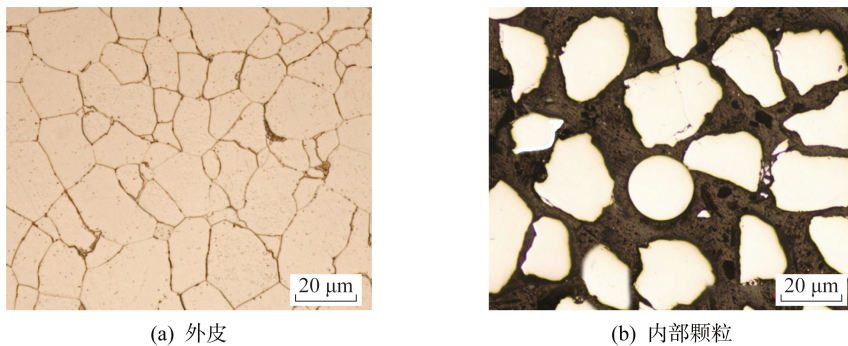


图1 管状铸造碳化钨的微观形貌

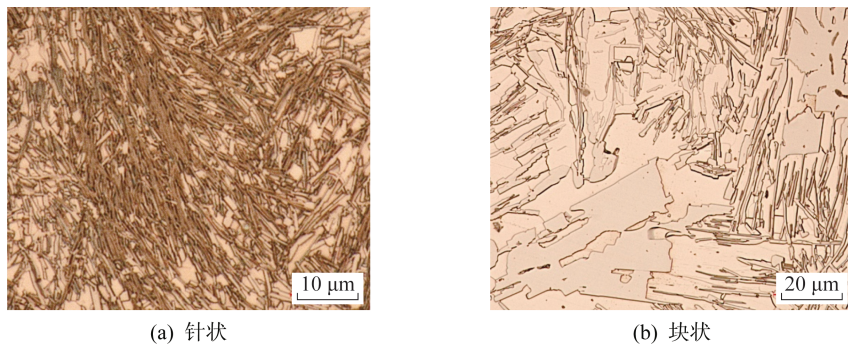


图2 铸造碳化钨的微观组织

针状中,球形颗粒的针状组织最细且最密;这种球形颗粒均为细针状的共析组织,放大1 000倍仍难以清晰分辨。此类铸造碳化钨颗粒的硬度最高<sup>[4]</sup>且耐磨性好<sup>[5]</sup>。试验采用的基体材料为45钢和20Mn钢,两者在后续处理中作用不同,其化学成分见表1。

表1 基体材料的化学成分(质量分数)

元素	C	Si	Mn	P	S
20Mn	0.21	0.23	0.87	0.028	0.018
45钢	0.45	0.26	0.61	0.021	0.011

## 1.2 试验方法

先取氧乙炔预热基材,再用中性焰将管状铸造碳化钨熔化在基材上。2种基体的后处理方式如下:对于20Mn钢基体,在表面堆焊管状铸造碳化钨后空冷,再经920℃渗碳、降温后水冷淬火;对于45钢基体,以相同方式在45钢上堆焊铸造碳化钨,

冷却后采用中频加热并水冷淬火。

## 2 微观组织与分析

### 2.1 铸造碳化钨颗粒的分布和硬度

堆焊层过薄会因碳化钨稀释导致颗粒数量过少;过厚则易因铸造碳化钨密度较大(约为铁的2倍),在铁液中进行沉降现象,如图3所示。

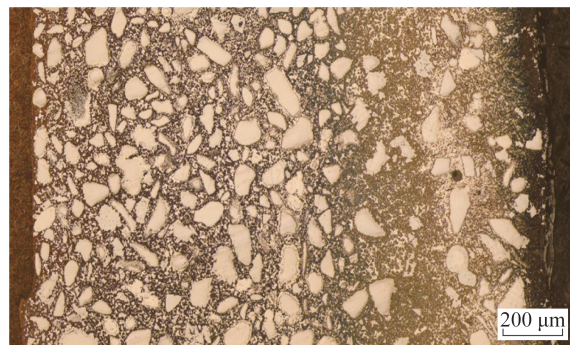


图3 铸造碳化钨颗粒分布

图 3 右侧为基体,清晰可见多数碳化钨颗粒沉降至基体处。因此,堆焊时应控制熔液熔化时间且不宜过长,也可通过混合粒度方式减少大颗粒沉降<sup>[6]</sup>。采用维氏硬度计检测铸造碳化钨颗粒的硬度,发现其硬度存在差异,在 1 541~1 869 HV<sub>0.3</sub> 之间,这与其组织结构相关,其结构如图 2 所示。

### 2.2 铸造碳化钨颗粒的稀释

无论是 20Mn 钢还是 45 钢,采用氧-乙炔堆焊管状铸造碳化钨后,堆焊层并非简单 2 种组织混合(见图 1),而是两者间发生反应(见图 3),堆焊层中已无铁素体,主要为大颗粒铸造碳化钨、块状碳化物和马氏体组织。铁素体的消失表明,堆焊过程中铸造碳化钨被熔化稀释,稀释方式主要有以下 4 种,如图 4 所示。

(1) 铸造碳化钨周围出现毛化现象(表面长出细小杆状物或针状结构),如图 4(a)所示,这是因为铸造碳化钨中的 W<sub>2</sub>C 先与铁发生反应<sup>[7-8]</sup>,且 W<sub>2</sub>C 作为一种亚稳定相,更易与铁相作用。(2) 铸造碳化钨周围出现小的块状物,如图 4(b)所示,这是因为颗粒周围初步溶解后,合金来不及扩散,发生过共晶反应析出先共晶碳化物。(3) 铸造碳化钨周围出现絮状物,如图 4(c)所示,此类相主要为铁钨碳相<sup>[9]</sup>,是碳化钨周围溶解后合金浓度升高且来不及扩散,后续经共晶反应析出的复杂碳化物。(4) 出现莱氏体,包含 2 种共晶莱氏体,一种是鱼骨状莱氏体<sup>[10]</sup>,如图 4(d)所示,另一种是亚共晶类网状莱氏体,其主要为铸造碳化钨完全溶解后经共晶反应直接析出的共晶碳化物。

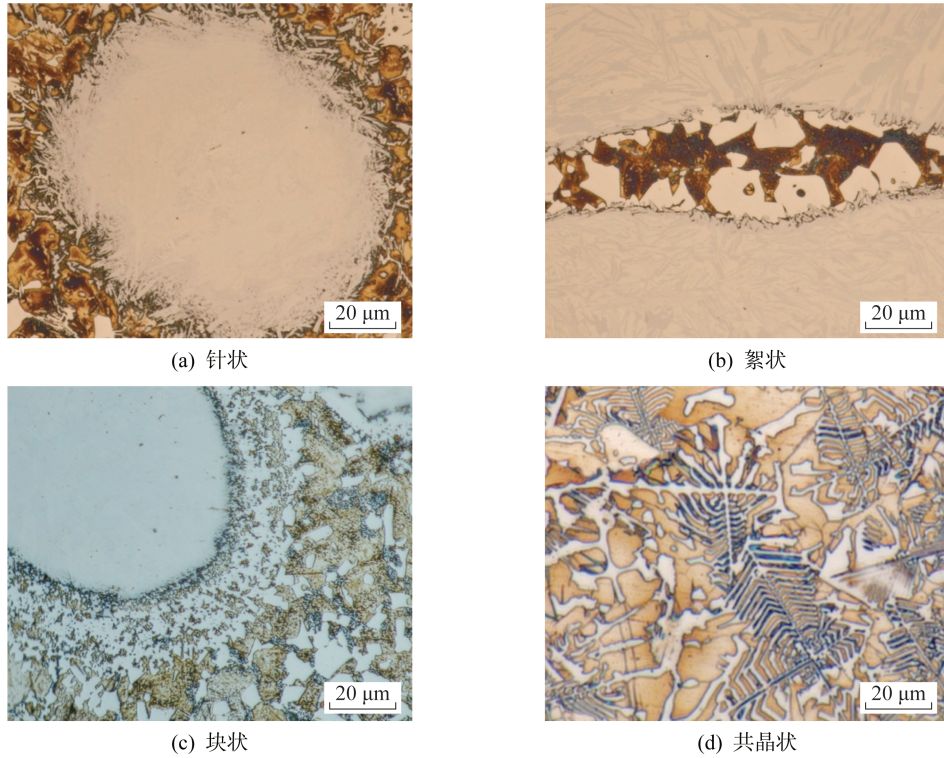


图 4 铸造碳化钨稀释后的微观组织

通过能谱分析可进一步观察铸造碳化钨的稀释情况,其扫描谱图如图 5 所示。由图 5 可见,铸造碳化钨周围存在钨浓度的梯度变化;铸造碳化钨中心区域仅含 W 与 C(谱图 A),在其边缘区域点扫描可见 Fe 元素;小碳化物颗粒为 Fe、W、C 的复杂碳化物(谱图 B);基体中 W 含量明显(谱图 C),说明铸造碳化钨溶解后扩散至基体,可提高材料的淬透性,使堆焊后基体易形成马氏体及贝氏体组织。

对图 5 中不同位置进行点扫描定性分析,其化

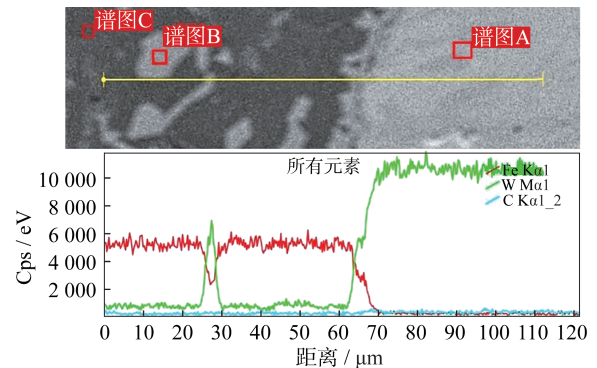


图 5 铸造碳化钨线扫描谱图

学成分见表 2。

表 2 点扫描的化学成分(质量分数)

元素	单位:%				
	C	W	Fe	Si	Mn
谱图 A	6.45	93.55	—	—	—
谱图 B	4.45	53.13	41.37	—	1.05
谱图 C	4.68	7.17	85.53	0.65	1.94

此外,基体组织的硬度测试能反映合金元素的扩散效果,不同稀释程度导致基体硬度存在差异,未渗碳时堆焊层的基体硬度主要为 418~561 HV<sub>0.2</sub>,共晶碳化物区域硬度偏高,可达 706 HV<sub>0.2</sub>。

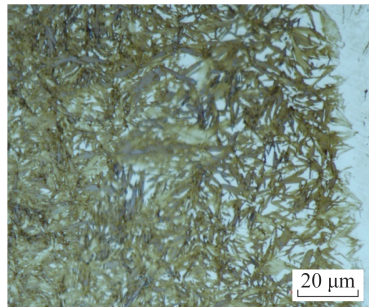
### 2.3 热影响区的组织

热影响区组织出现晶粒粗大现象。以 45 钢为例,其堆焊后空冷时,堆焊层临近区域的组织为珠

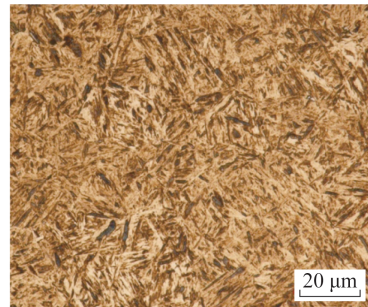
光体+网状铁素体,平均晶粒度为 3.1 级,个别粗大晶粒为 1.1 级。以粗晶为界,热影响区深度达到 1.84 mm。

在 20Mn 钢堆焊层附近的基体中可见珠光体增多,但这一现象无法证明是由堆焊层中合金元素扩散所致,还是高温后冷却速度过快引起。采用 45 钢基体堆焊后中频淬火,扩散区中出现明显的残留奥氏体,如图 6 所示。

图 6(a)右侧所示为堆焊层,清晰可见残留奥氏体,说明堆焊时堆焊层中的合金扩散至基体,导致基体合金元素含量升高,进而产生残留奥氏体,此区域硬度为 750 HV<sub>0.2</sub>。图 6(b)所示为远离堆焊区的基体,其保留板条马氏体组织,硬度为 673 HV<sub>0.2</sub>。两者硬度差表明,扩散区域的碳含量高于基体区域。



(a) 扩散区



(b) 基体

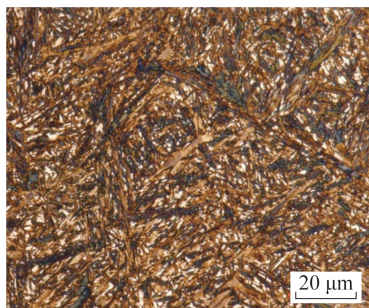
图 6 感应淬火扩散区与基体的淬火组织

### 2.4 渗碳后的组织与硬度

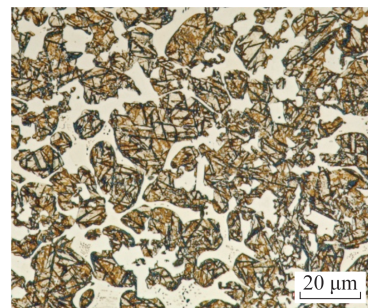
渗碳后,铸造碳化钨保留原有形态,仍呈现图 4 中的 4 种特征,且单颗粒铸造碳化钨的组织未改变,依然保留针状结构或先共晶块状结构,这主要由处理温度不足以改变组织状态所致<sup>[11]</sup>;同理,感应淬火也不会改变铸造碳化钨的原有形态。20Mn 钢属于低碳钢,渗碳后碳含量增高,淬火后得到马氏体和残留奥氏体,如图 7(a)所示。堆焊层基体的渗碳存在差异,主要是因为铸造碳化钨的稀释程度不同。稀

释少的区域会发生渗碳,稀释多的区域同样会发生渗碳,此时易出现过渗碳,导致原有碳化物长大,且淬火后组织中下贝氏体增多,如图 7(b)所示。这主要是因为下贝氏体为半扩散型,渗碳增加奥氏体中的碳含量,缩短扩散距离,从而缩短下贝氏体的形成时间,因此渗碳淬火可增加下贝氏体的含量。

20Mn 钢渗碳深度随温度和时间变化,淬火时基体硬度可达 435 HV<sub>0.2</sub>,渗碳层硬度可达 687 HV<sub>1</sub>,而堆焊层基体在渗碳后硬度可达 757 HV<sub>0.3</sub>。



(a) 马氏体和残留奥氏体



(b) 贝氏体

图 7 20Mn 钢渗碳淬火后的显微组织

## 2.5 堆焊层的磨损

前文已提及铸造碳化钨颗粒的硬度及渗碳后堆焊层基体硬度,虽然渗碳可提高基体硬度,但远低于碳化钨颗粒硬度。堆焊层的磨损一般以基体先磨损为主,颗粒作为硬质相突出于基体表面,最终会以疲劳破碎的形式磨损,或在受到较大冲击时直接破碎,如图8所示。

## 2.6 综合分析

管状铸造碳化钨堆焊时不易过薄,过薄易因加热时间过长导致铸造碳化钨过度稀释,产生大量莱氏体而降低耐磨性,且此类区域在渗碳淬火时还易开裂;堆焊时熔液也不能过厚,否则会导致碳化钨颗粒沉降。虽然铁对碳化钨的润湿性不如钴、镍,但采用该堆焊方式可使铸造碳化钨发生稀释,即与基体形成冶金结合,故此方式下润湿性的作用并不重要,

铁基材料已完全包裹碳化钨。不同稀释程度会产生不同组织特征,由于稀释程度不同,基体合金化程度也不同,因此堆焊后基体硬度存在差异,硬度变化范围主要为418~561 HV<sub>0.2</sub>,可保证焊接性。

氧-乙炔堆焊也可较好解决堆焊层与基体的结合问题,由45钢堆焊情况可知,堆焊层附近基体出现扩散区,以残留奥氏体为界限,其扩散深度可达0.13 mm。但该堆焊方式会导致堆焊层附近区域基体发生过热,这种现象普遍出现在熔焊工艺中,且此问题无法避免。综上,虽然该工艺可解决堆焊层与基体结合问题,但仍存在过渡区过热现象,而后期通过渗碳淬火或中频淬火均可较好解决晶粒粗大问题,这主要得益于珠光体基体不存在组织遗传问题,材料在渗碳者中频加热时,粗大组织会重新奥氏体化,从而达到细化组织目的。

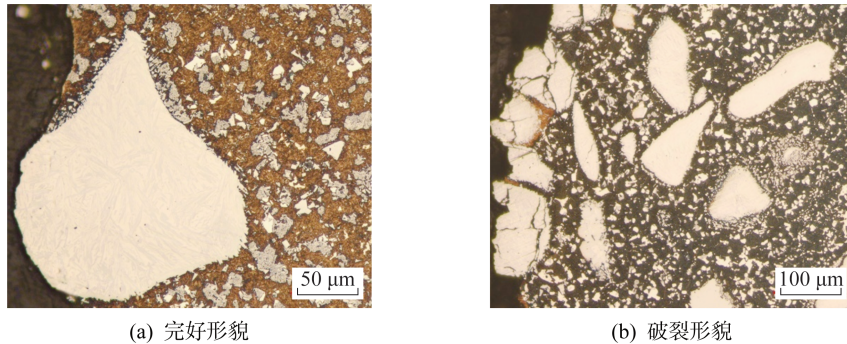


图8 工件使用过程中的磨损情况

由于堆焊层与基体材料为冶金结合,因此这种复合方式可进行淬火,无须担心堆焊层脱落问题。针对不同基体可采用不同热处理方式,本文提出以下2种:一种是45钢堆焊后进行中频淬火,另一种是20Mn钢渗碳后直接淬火。其中,45钢堆焊后中频淬火仅能提升自身硬度,无法提高堆焊层基体硬度;而20Mn钢渗碳淬火可提高堆焊层中基体硬度,在实际使用中其耐磨性更优。

## 3 结论

(1) 氧-乙炔堆焊工艺可使母材与铸造碳化钨颗粒形成冶金结合,母材的扩散层深度可达0.13 mm,从而获得良好结合力。

(2) 堆焊时会产生莱氏体型碳化物,易降低基体韧性;同时过度稀释铸造碳化钨,会削弱耐磨颗粒的作用。铸造碳化钨理想的组织是均匀分布的铸造碳化钨颗粒、少量块状碳化物颗粒及马氏体和少量贝氏体组织。

(3) 渗碳不会改变铸造碳化钨的组织形态,而是不仅将基体硬度提高到757 HV<sub>0.2</sub>,进一步增强堆焊层耐磨性,还能改善热影响区的粗大组织,同时增加堆焊层中下贝氏体含量。

(4) 堆焊层内颗粒磨损形式虽以剥离形式失效,但在冲击力不大的条件下,其耐磨性仍远优于渗碳方式。

## 参考文献

- [1] 葛洁洁,徐雅欣,李文亚. 冷喷涂Ti/WC复合涂层的组织与耐磨性研究[J]. 中国材料进展, 2024, 43(2): 96-101.
- [2] 余伟,李玉玺,易长宾,等. 铸造碳化钨的羽状共晶组织含量对等离子堆焊层磨损性能的影响[C]//中国钨业协会成立三十周年钨业发展报告会论文集. 北京:中国钨业协会, 2015.
- [3] 李伟,谢杰,余伟,等. 不同共晶组织含量铸造碳化钨焊层的微观结构和耐磨性能研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2019, 47(1): 60-64.
- [4] 范丽,陈海葵,都海良,等. 感应等离子体技术制备球形铸造碳化钨粉体及其性能表征[J]. 材料科学与工艺, 2020, 28

- (6):56-66.
- [ 5 ] 胡可,谢焕文,刘辛,等. 铸造碳化钨颗粒增强PDC钻头胎体的三体磨损行为[J]. 中国有色金属学报,2020,30(2):364-371.
- [ 6 ] 董刚,王敏捷,古青,等. WC粒度对比对316L激光熔覆层耐磨/抗冲击性能的影响[J]. 表面技术,2025,54(1):205-217.
- [ 7 ] 黄汝清,李祖来,山泉,等. 钢、铁基复合材料中铸造碳化钨颗粒的分解过程[J]. 特种铸造及有色合金,2012,32(2):164-167.
- [ 8 ] 黄浩科,李祖来,山泉,等. 碳化钨/钢基复合材料的界面重熔[J]. 材料研究学报,2014,28(3):191-196.
- [ 9 ] 吴迎飞,陈华辉,李海存,等. 铁基复合材料中碳化钨颗粒的溶解析出行为[J]. 材料工程,2018,,46(8):98-105.
- [10] 张焱,尤显卿,刘宝,等. 离心铸造WC/钢组织结构的研究[J]. 兵器材料科学与工程,2010,33(2):41-44.
- [11] 李玉玺,贺跃辉,陈楚轩,等. 铸造碳化钨球形化处理技术的研究[J]. 中国钨业,2006,21(4):41-44.

(上接第 14 页)

(2) 均热温度由 1 160 °C 升至 1 220 °C 时, 盘条内部硫化物数量由 1 430 个降至 915 个, 纺锤状硫化物比例由 29% 增至 42%, 且大尺寸硫化物占比明显降低。

(3) 加热轧制过程中, 小尺寸硫化物溶解、长条状硫化物碎断、椭球化及再次融合等共同作用机制, 决定成品盘条内部硫化物尺寸的分布。

#### 参考文献

- [ 1 ] 李彬周,王冬,王一甲,等. 铋含量对易切削钢组织与性能的影响研究[J]. 钢铁钒钛,2024,45(2):190-197.
- [ 2 ] 杨泽宇,王敏,李怡宏. 钢中 MnS 夹杂物对钢质量影响及控制研究进展[J]. 钢铁研究学报,2024,36(6):681-691.
- [ 3 ] 李彬周,姜圆博,王一甲,等. 变形量对环保型 1214Bi 易切削钢组织及夹杂物演变的影响[J]. 轧钢,2024,41(1):20-25.
- [ 4 ] 王英虎,郑淮北,刘庭耀,等. Y12Cr18Ni9Cu 易切削钢的平衡凝固相变与 MnS 析出行为[J]. 金属热处理,2023,48(2):62-66.
- [ 5 ] 邵肖静,吕利鸽,杜倩,等. 非调质钢中 MnS 夹杂物的热变形行为[J]. 金属热处理,2018,43(5):144-147.
- [ 6 ] 陈俊东,关晓光,汪云辉. 热变形工艺对低硫易切削钢中硫化锰形态演变的影响[J]. 金属热处理,2019,44(2):125-130.
- [ 7 ] 王英虎,王婀娜,蔡晓文. 铜含量对 303 易切削钢中硫化物形貌及力学性能的影响[J]. 金属热处理,2024,49(5):29-35.
- [ 8 ] 张盼盼,王冬,沈平,等. 碲对易切削钢硫化物及切削性能的影响[J]. 炼钢,2021,37(3):66-73.
- [ 9 ] 战东平,杨永坤,姜周华,等. 加热过程钢中夹杂物演变的研究进展[J]. 钢铁,2021,56(10):16-27.
- [10] 邵肖静,王新华,姜敏,等. 加热过程中硫系易切削钢中 MnS 夹杂物行为的动态原位观察[J]. 金属学报,2011,47(9):1210-1215.
- [11] 谢啸宇,顾超,王敏,等. 中高硫钢中硫化锰夹杂物控制技术[J]. 钢铁,2021,56(12):52-61.