

高速钢的碳化物控制研究

梁 伟 李 晶 史成斌 张 杰

(北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室 ,北京 100083)

摘 要: 通过对高速钢的类型、生产工艺和发展现状等进行概述 ,重点针对高速钢中的碳化物及其影响 ,结合国内外研究现状 ,阐述了以熔炼工艺为主的高速钢生产流程中的电渣重熔过程、热加工变形过程、热处理过程、深冷处理及变质处理等对高速钢碳化物的影响。并通过总结熔炼高速钢中碳化物控制的关键因素 ,提出适当降低电渣重熔熔速 ,严格控制锻造和轧制的加热温度和保温时间 ,优化热处理加热温度范围和冷却方式 ,并在传统工艺上增加深冷处理和添加变质剂 ,以有效控制钢中大尺寸碳化物 ,进而为生产高质量高性能的高速钢奠定基础。

关键词: 高速钢; 碳化物; 电渣重熔; 热加工; 热处理; 变质处理

中图分类号: TF76 ,TG115 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2020) 04-0130-09

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.04.024

开放科学(资源服务) 标识码(OSID) :



听语音
与作者互动
聊科研

Research on Carbide Control of High Speed Steel

Liang Wei ,Li Jing ,Shi Chengbin ,Zhang Jie

(State Key Laboratory of Advanced Metallurgy ,University of Science and Technology Beijing ,Beijing 100083 ,China)

Abstract: The types ,production process and development status of high speed steel are summarized. The effects of ESR process ,hot processing deformation process ,heat treatment process ,cryogenic treatment and modification treatment on the carbides in high speed steel production ,which are mainly based on smelting technology ,are reviewed based on the research status at home and abroad. By summing up the key factors of carbide control in melting high speed steel ,it is proposed to reduce the melting speed of ESR appropriately ,strictly control the heating temperature and holding time of forging and rolling ,optimize the heating temperature range and cooling mode of heat treatment ,and add the deep cooling process and modifier in the traditional process to effectively control the large-scale carbide in steel ,which will lay a foundation for the production of high-quality and high-performance high-speed steel.

Key words: high speed steel ,carbide control ,ESR ,thermal processing ,heat treatment ,modification

0 引言

高速钢具有高硬度、高耐磨性和高耐热性的特点 ,主要用于制造复杂薄刃和耐冲压的金属切削刀具 ,也可制造高温轴承、轧辊和冷挤压模具等。

我国高速钢技术的研究与应用起步较晚 ,近十多年来 ,高速钢材料在国家的大力支持下已经取得

了较大进展。中国现在是世界高速钢和高速钢刀具生产大国 ,并已经成为世界主要的高速钢工具供应商。但与欧美发达国家相比 ,我国高速钢的生产工艺和成品质量还存在一定的差距 ,目前高速钢刀具制造仍以普通高速钢为主 ,随着处于低端市场的低合金高速钢和普通高速钢逐渐被淘汰 ,以及对高效切削和高可靠性数控刀具等需求的增多 ,高端高速

收稿日期: 2019-09-04

作者简介: 李 晶(1967—) ,男 ,教授 ,通讯作者 ,主要从事转炉/电弧炉炼钢、炉外精炼及纯净钢冶炼技术、电渣重熔新技术及产品开发的研发工作 ,E-mail: lijing@ ustb.edu.cn。

钢产品的研发及应用亟需提升。工信部等部门编制的《新材料产业“十三五”发展规划》和《钢铁工业调整升级规划(2016~2020年)》中均指出应积极地发展高品质高速钢材料。高速钢质量和性能的提升在本质上受基体组织和碳化物析出的影响,因而从根本上研究上述行为,不断优化高速钢生产流程中的工艺参数,有效改善产品质量和性能,对于提高国际市场竞争力和产品附加值,推动现代制造业的发展具有重要意义。

笔者回顾了近年来高速钢研究的概况,重点对高速钢碳化物的控制进行了梳理和分析,提出了建议。

1 高速钢及其钢中碳化物

不同类型的高速钢,化学成分差异较大,使用性能和适用范围也不同,其碳含量一般为0.70%~1.65%,合金元素总量可达10%~25%,主要有W、Mo、V、Cr和Co。按合金元素可将高速钢分为钨系高速钢、钨钼系高速钢、高钼系高速钢、钒高速钢和钴高速钢5种类别^[1]。按使用用途不同可分为通用型高速钢和特殊用途高速钢两种。高速钢的生产工艺主要为熔炼工艺、粉末冶金工艺和喷射成形工艺^[2]如图1所示。

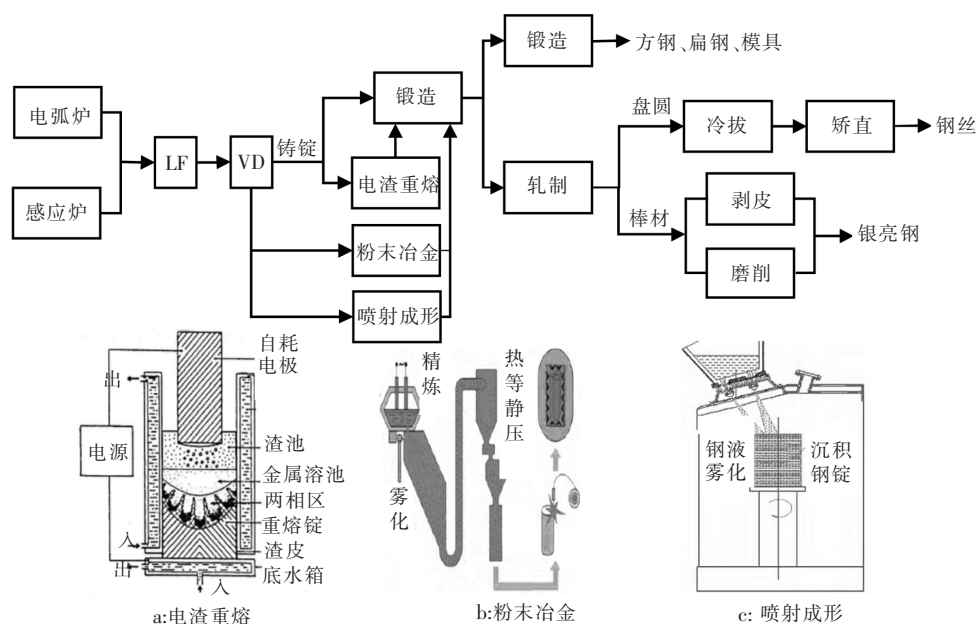


图1 高速钢的生产工艺流程
Fig. 1 The production process of high speed steels

随着复杂刀具对高端高速钢的需求量增多,高性能高速钢和粉末冶金高速钢应用比例呈递增趋势,但国内应用比例较少,以国外进口为主。国内在生产高速钢时存在以下几方面问题:低端产品居多,大截面复杂高速钢生产少,冶金质量不稳定,高速钢的质量和性能评价体系构建不统一等。因此针对高速钢的产品质量和性能提升研究具有较大空间。

碳化物是高速钢中的重要组成相之一,具有高熔点、高硬度和脆性等特点。钢中的一次碳化物主要有MC、 M_6C 和 M_2C 等。MC型碳化物多以不规则圆片或条块形状出现,在铸态组织中的颗粒度较大。大多MC型碳化物直接从液相中析出,也可由 M_2C 分解形成,该方式形成的颗粒细小且

分布均匀。 M_6C 是高速钢中数量最多的碳化物,呈现鱼骨状的三维骨架结构,具有较高的稳定性,高温加热时不发生分解。在W系高速钢中, M_6C 型碳化物直接从液相中析出。在W-Mo系高速钢中生成的 M_6C ,一种是粗大的具有角状或条片状外形的铸态一次碳化物,另一种是由 M_2C 型碳化物分解形成细小颗粒的碳化物。 M_2C 型碳化物一般为亚稳态的片层状结构,高温加热下分解生成颗粒细小和分布均匀的MC和 M_6C 型碳化物,化学式用 $M_2C + Fe(\gamma) \rightarrow M_6C + MC$ 表示。高速钢中二次碳化物主要有 M_6C 、MC、 M_7C_3 和 $M_{23}C_6$ 等类型。

一般用来表征钢中碳化物力学性能的指标有:硬度、弹性模量和断裂韧性。此外,一次碳化物和二

次碳化物的析出温度、元素含量、理化特征以及类型、尺寸和形状对高速钢性能也有影响。一次碳化物的尺寸较大,在热处理中不易溶解在钢基体中,会造成钢基体应力集中,易引发裂纹源并扩展,导致钢的塑性和韧性下降^[3]。大尺寸碳化物中合金元素含量较多,钢基体中的元素含量较少,减弱了回火二次硬化效应,会降低钢的强度等。同时大尺寸不规则且硬度大的碳化物容易发生断裂并从基体脱落,也会降低钢的耐磨性和断裂韧性^[4]。碳化物的不均匀性则容易引起碳化物堆积而脱落,淬火时发生局部过热、产生裂纹和混晶现象,影响钢的强度和塑

韧性等。二次碳化物作为钢中的强化相,其尺寸、形状和数量等可在热加工和热处理中得到控制。弥散分布的二次碳化物对于强化基体和提高性能有重要作用。

2 高速钢中的碳化物控制

目前,利用粉末冶金工艺和喷射成形工艺生产高速钢的方式在国内使用率较低,国内的主要生产方式以熔炼工艺为主。因此,笔者将以熔炼工艺的生产工序为基础,阐述电渣工序流程中各工艺对碳化物的影响。图2为熔炼过程中碳化物的控制工艺。

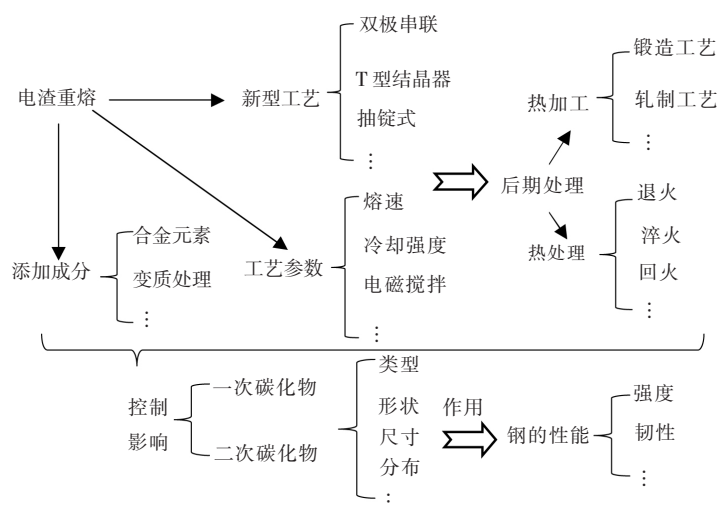


图2 冶炼过程中碳化物的控制工艺

Fig. 2 Carbide control technology during smelting process

2.1 电渣重熔过程

高速钢铸锭经电渣重熔发生熔化和重新凝固,从钢液中析出一次碳化物,凝固形成的固相中也会析出二次碳化物。快速电渣重熔、真空电渣重熔、氩气保护电渣重熔等新工艺新设备的研发,对比传统电渣重熔工艺,精炼效果和使用效率显著提升。谢志彬等^[5]采用T型结晶器快速抽锭的方式生产M2高速钢小方坯,经锻造、轧制成坯的钢成分稳定、低倍组织优良、碳化物的分布和尺寸控制均匀,同时提高了生产效率和成材率。通过数值模拟和试验表明双极串联电渣重熔工艺精炼的电渣锭中碳化物偏析程度和尺寸明显降低,在后期锻轧中更易破碎^[6-7]。在抽锭式双极串联电渣重熔工艺采用二次气雾冷却的方式,可以降低熔池深度,减小钢中碳化物的不均匀度和碳化物颗粒度^[8]。此外,旋转结晶器的使用对钢中元素的均匀分布有促进作用,偏析程度会降低^[9]。

图3为不同的电渣重熔工艺原理示意。电渣锭在冷却凝固过程中,电渣锭中心区域的凝固时间远超过边缘区域的凝固时间,靠近中心区域的组织为粗大的柱状晶,莱氏体直径分布不均,共晶碳化物呈现片状,而边缘区域的柱状晶、莱氏体以及共晶碳化物的尺寸均变小^[10]。通过优化电渣重熔的工艺参数,缩短电渣锭的局部凝固时间差距,可促进枝晶组织和碳化物的均匀化生长。电渣重熔中影响碳化物形成的工艺参数有熔速、填充比和冷却速度等。

电渣重熔熔速影响结晶器内渣金界面的供热,金属熔池形状受供热和散热的影响,若冷却条件不变,熔速将直接影响金属熔池的形状,二者关系密切^[11]。当熔速超过一定值时,熔池深度变深,固液两相区的宽度发生增加,局部凝固时间延长,二次枝晶间距变大,各元素沿枝晶生长方向不断富集,导致偏析程度增加,最终形成大量一次碳化物。

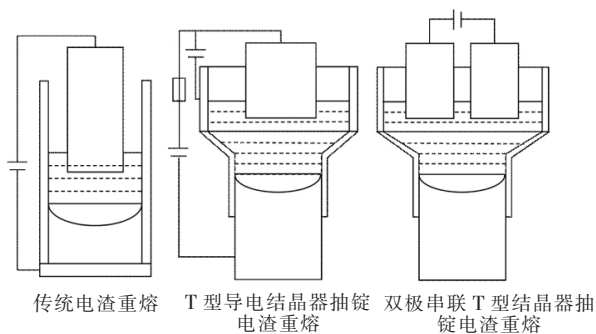


图3 不同电渣重熔工艺原理示意

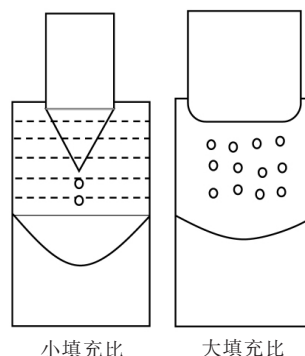
Fig.3 The schematic diagram of different ESR processes

利用 MATLAB 软件基于局部凝固时间与熔速和电渣锭直径的热平衡关系,模拟在电渣锭直径一定的条件下,可以计算出局部凝固时间随熔速的变化曲线,分析其变化规律确定出最佳的熔速条件,获得均匀的碳化物组织,便于后期的锻轧破碎^[12]。初伟等^[13]在抽锭式电渣重熔中精炼 M2 钢,通过控制熔速、电渣锭直径和熔池深度,有效促进了层片状共晶碳化物转变成离异棒状和粒状碳化物,厚度和间距明显减小,平均碳化物晶粒尺寸小于 50 μm ,碳化物表面光滑圆润。Zhu 等^[14]利用 MeltFlow 软件模拟表明自电渣锭边缘到中心、自底部到上部的碳元素富集程度增加,在补缩阶段的碳元素富集更加严重,同时随着熔速的增加,电渣锭内碳元素的富集面积也明显增加,偏析现象严重。因此优化电渣重熔熔速时,除了考虑生产效率,还应与理论计算结果密切结合,指导实际生产。

电渣重熔的填充比增加,渣池流动速度减慢,热对流效应减弱,表面辐射热损失减少,受热面积增加的电极棒涡流集肤作用变小,其端部沿半径方向的温度场分布更加均匀,受热熔化时端部形状趋于平面,金属液滴穿过渣层形成的熔池变得浅平。熔池浅平有利于枝晶的良好生长,元素的富集和偏析程度较小。Cao 等^[15]试验观察发现在同一电流下,较细的电极棒端部形状越尖,锥度越大,而较粗的电极棒端部较为直平。图 4 为不同填充比下的电极棒端部和熔池形状示意。在生产中采用大填充比会增大冶炼功率,缩短冶炼时间和降低电耗。

研究者认为冷却速率增大, M_2C 共晶碳化物的形核驱动力增加,易形成大量的层片厚度较小的亚稳态 M_2C 碳化物^[16]。甚至在一定冷速下 M_2C 碳化物会转变为纤维状,对比层片状结构,纤维状的碳化

物不易发生缠绕和堆积断裂,且同一位置方向趋于一致,利于后期锻轧和热处理中获得均匀细小的碳化物组织^[17]。

图4 不同填充比的电极棒端部和熔池形状示意^[14]Fig.4 The schematic diagram of electrode rod end and molten pool shape with different filling ratio^[14]

臧喜民等^[6]对比传统电渣重熔工艺,提出采用双极串联、T型结晶器抽锭式电渣重熔新工艺来冶炼高速钢,因钢锭截面尺寸减小,冷却速度增大,内部的晶粒组织和碳化物尺寸和分布均匀。初伟等^[13]研究表明,增加冷却速率可以促使 M2 高速钢碳化物由层片状转变为离异棒状、粒状,偏析程度明显改善,尺寸细小均匀,三种碳化物中 M_6C 含量增加, M_2C 和 MC 含量减少,碳化物的总质量分数降低,多数溶于基体中,利于提高产品的韧性、硬度和耐磨性等。因此,为确定最佳的冷却速率,可基于耦合理论模型利用 FLUENT 软件等对高速钢电渣重熔冷却过程的温度场、组织场等进行数值模拟,分析电渣锭凝固组织的变化,并对现有冷却系统进行改进和创新,用于指导生产实践^[18]。

2.2 热加工变形

热加工变形能够对高速钢的共晶莱氏体网络进行破碎和分解,减少疏松和增加钢致密度,具有常规相变热处理所不能替代的作用。同时,钢中部分共晶碳化物的尺寸粗大,呈现骨骼状或树枝状,不均匀度级别随钢材的直径和厚度增大而增加,生产中常采用锻造工艺来进行加工^[19]。通过对比锻造前后的碳化物形貌发现,锻造可促使连续的光滑片层状碳化物发生断裂,且断口平直,空间网状结构破坏,发生位错,同时还促进碳化物的分解^[20]。影响锻造工艺的因素主要有锻造比、加热和保温制度、变形量和变形方式等,其工艺流程及控制因素如图 5 所示。

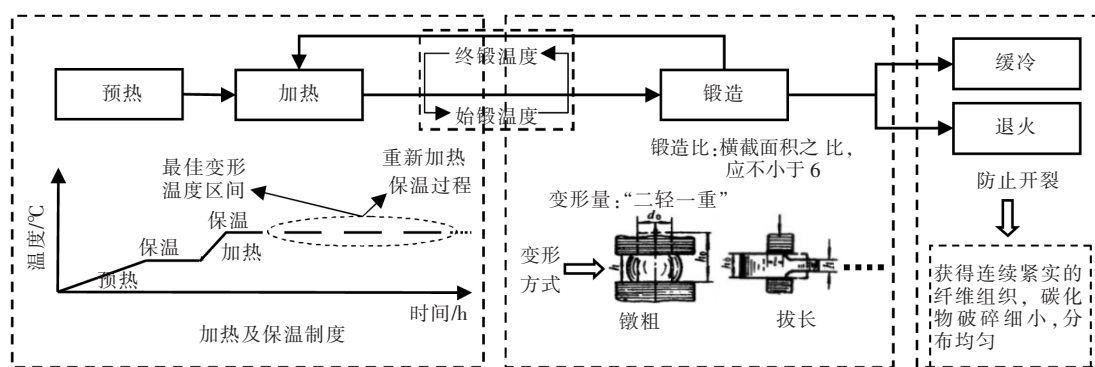


图5 锻造工艺流程及控制因素示意

Fig. 5 The schematic diagram of forging process and control factors

研究者通过对比不同锻造比条件对钢中碳化物的影响,指出随着锻造比增大,碳化物的不均匀度级别逐渐降低。在同一锻造比下,小钢锭相对于大钢锭的共晶碳化物不均匀度级别更低且颗粒小^[21]。而锻造比增大到一定级别时,碳化物破碎效果将减弱,因此,在设置锻造比时应重点考虑高速钢的钢种和锭型等,以最佳工序实现最大程度的碳化物破碎,并均匀分布。

锻造过程加热温度过高会引起钢中碳化物明显粗化和角状化,使淬火晶粒度粗大,影响后期钢的淬回火硬度、红硬性以及冲击韧性等,沿粗大晶界析出碳化物及硫化物等脆性相,在热处理中发生裂纹萌生并扩展,使得钢材的强度和质量显著降低^[22]。而保温时间延长可促使 M_6C 等碳化物聚集长大,增加氧化烧损及脱碳层深度,影响成材率。适当降低终

锻变形温度和加大变形率可发挥基体强度大的优势,对碳化物网络和堆积团进行有利的挤压,促进碳化物的破碎等。在确定最佳的热变形温度时,常使用Gleeble模拟机和试验相结合的方式研究不同温度下的热变形应力和微观组织,通过分析调整工艺以获得均匀细小的碳化物^[23]。

同样,轧制过程与高速钢成品材的形状密切相关,其加热和保温制度、变形量对碳化物的分解和破碎也很关键。通过控制合理的工艺参数,提高热加工变形的成材率,为后期不变形热处理提供优良钢体。

2.3 热处理过程

高速钢的热处理方式一般为退火、淬火和回火。常用的退火工艺为球化退火和等温退火两种,二者的工艺及组织如图6所示。

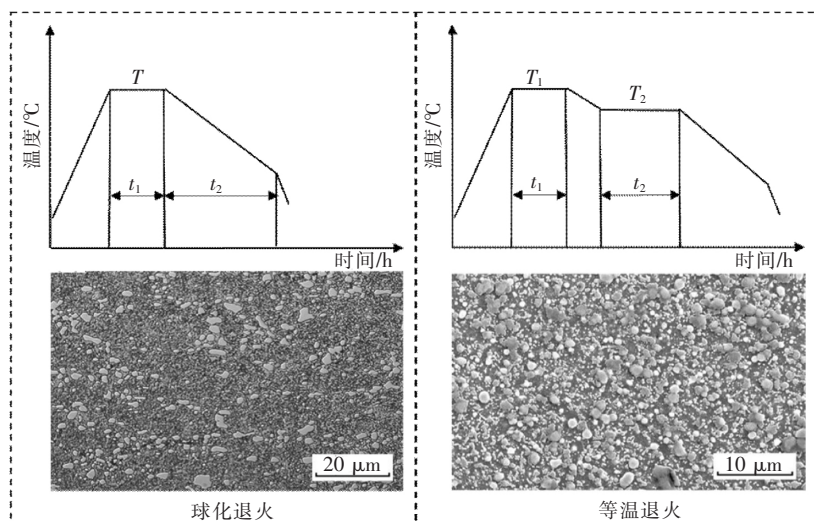


图6 不同的退火工艺及高速钢组织

Fig. 6 The different annealing processes and microstructure of high speed steel

退火加热温度过高、保温时间过长会引起一次碳化物集聚长大,使得后期钢材的淬火硬度、二次硬度和红硬性明显降低。在退火过程中,由于保温高速钢中的 M_2C 型碳化物也会发生分解,产物为 M_6C 和 MC ^[24-26]。

周雪峰和 Li 等^[27-28]通过试验得到 M2 高速钢的最佳等温退火制度,退火后的钢基体弥散分布着细小球状一次碳化物颗粒的组织,保证了后期的加工塑性。此外,退火工艺还与高速钢的钢种、锭型相关。退火工艺发展到现在,已经出现了低温快速急冷退火、快速循环退火、快速球化退火等新型的节能工艺,其节能效率在 30% 以上,为高速钢工具的退火工艺发展提供了新方向^[29]。

学者们针对高速钢淬回火工艺的研究较多,杨雯等^[30]研究表明,锻造退火后的高速钢组织中,亚稳态 M_2C 碳化物完全分解为 M_6C 和 MC 碳化物,淬火后组织为马氏体、残留奥氏体与未溶碳化物,高温回火后析出大量细小弥散的二次碳化物,二次硬化效应明显。王鑫等^[31]通过试验探讨了 M42 高速钢的最佳淬回火温度以及保温时间等,最终得到的基体组织中马氏体和碳化物含量明显增多,残余奥氏体含量基本为零,二次硬化效果显著,钢材硬度(HRC)在 67~69。此外,周永坤、Ma 等^[32-34]多位学者针对不同种类、不同形状和不同用途的高速钢的热处理工艺进行了研究,经过热处理后的成品材硬度、韧性、红硬性和耐磨性等大大提高,延长了高速钢的使用寿命。

2.4 深冷处理

深冷处理是传统热处理的扩展,在工业上常使用液氮(-196℃)作为冷却剂。一般认为深冷处理的降温速度缓慢,能够均衡钢的内外部温差和组织应力等,以免引起变形和裂纹^[35];深冷保温时间与高速钢成品材的导热性能、体积和冷透时间等相关^[36]。随着深冷处理次数的增多,基体组织析出大量微细碳化物,钢的力学性能显著提升;深冷处理在回火之前进行,钢的硬度提升明显,同时能够降低回火温度,而在回火处理之后进行深冷处理会有利于提升钢的韧性^[37]。

针对高速钢深冷处理的研究,国内外学者从深冷处理工艺角度、钢基体奥氏体转变和微细碳化物析出等组织角度以及成品材性能(硬度、韧性和耐磨性等)角度进行了大量研究^[38-40],普遍认为深冷处理对于提升高速钢成品材工件的性能和寿命等具

有重要的促进作用,该处理工艺经济且简便,满足现代加工技术要求,应用前景广泛。

2.5 变质处理

许多学者通过采取添加 N 或其它元素的手段来促进高速钢中 M_2C 型碳化物的分解。Luo 等^[41]向高速钢中添加适量 N 元素,促进了 M_2C 型碳化物由片层状转变为纤维状,且碳化物中合金元素含量减少,纤维状的 M_2C 在热加工和热处理中更易分解为颗粒细小的 M_6C 和 MC 。Liu 等^[42]向 M2 高速钢中添加 N 和稀土(Re)通过保温试验得到 M_2C 碳化物发生纤维颈缩直至断裂,而 M_6C 含量明显增多。因此 N 或 Re 的添加会促进钢中 M_2C 碳化物形状向易分解的方向转变,同时利用热力学原理和构建新模型合理的解释其转变过程,将有利于新改性手段的研发,以进一步提升高速钢的硬度和冲击韧性等。

同样,采用复合变质剂也可以改善高速钢共晶碳化物的形状和分布等,Duan 等^[43]研究发现 Re-Mg 复合变质剂能细化晶粒,热处理后出现大量粒状碳化物,网状碳化物随着温度升高到 1050℃ 时完全消失。Li 等^[44]在高硼高速钢中加入 Re-Mg-Ti 复合变质剂,通过观察和对比发现,网状碳化物被破坏,成品材的冲击韧性和耐磨性均提升。此外,研究者还向高速钢中添加 K-Na^[45]、钾盐(含 B 钾盐、含 Ti 钾盐、含 Zr 钾盐)、K/Na-V-Mo 等复合变质剂来改善碳化物,研究发现多数变质剂是在高速钢轧辊铸锭中添加,对于生产流程包括电渣重熔工艺的高速钢冶炼研究较少,其与高速钢钢种生产成本和生产效率有关。应加强高速钢变质处理工艺的研究,改进添加技术提高变质剂使用率,稳定和提升高速钢的性能。

3 总结及建议

熔炼工艺作为主要的生产方式,其工序影响碳化物的形成和转变。通过研发新设备和新技术,以及优化工艺参数来促进高速钢中形成颗粒细小、分布均匀的球状碳化物,进而提高高速钢的冶金质量和使用寿命,为高端产品的生产和销售提供动力。因此,针对当前高速钢碳化物控制工艺现状,总结和提出建议如下:

1) 在电渣重熔工艺中,新设备和新工艺的研发应综合考虑高速钢的生产成本和效益,简化生产工序,缩短熔炼时间。结合数值模拟和试验研究结果,适当降低电渣重熔熔速,提高填充比和冷却强度,减

少成分偏析,控制碳化物形成。

2) 在热加工过程中,应严格控制高速钢的加热温度和保温时间,避免组织和碳化物粗化,造成应力集中。对于不同的高速钢类型和锭型等,确定合理的变形方式,以及最佳的锻造比和变形量,提升碳化物网络破碎效果,降低碳化物的不均匀度,同时应避免锻造比过大导致碳化物破碎效果不明显而增加不必要的加工工序和成本。

3) 在热处理过程中,考虑高速钢的质量和性能

需求等,适当调整退火、淬回火的预热、加热温度和保温时间,以及处理次数,优化冷却方式和冷却速度,增加深冷处理,以促进高速钢中残余奥氏体的完全消除和弥散二次碳化物的析出,提升成品材硬度、韧性、红硬性和耐磨性。

4) 对于变质处理,通过添加变质剂改善不同钢种中碳化物的尺寸和分布,在使用过程中掌握变质元素的理化性质和使用量,优化变质剂加入方式,进一步提高变质剂的使用效率和应用效果。

参考文献

- [1] Deng Yukun. High speed tool steel [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press 2002.
(邓玉昆. 高速工具钢 [M]. 北京: 冶金工业出版社 2002.)
- [2] Wu Lizhi. Development of China's high speed steel [J]. Hebei Metallurgy 2015(11): 1-8.
(吴立志. 中国高速钢的发展 [J]. 河北冶金 2015(11): 1-8.)
- [3] Narahari P S, Rajasekhar K, Chatterjee M. Influence of composition and processing on properties of stainless steels [J]. Advanced Materials Research 2013, 794: 117-123.
- [4] Oh H, Lee S, Jung J *et al.* Correlation of microstructure with the wear resistance and fracture toughness of duo-cast materials composed of high-chromium white cast iron and low-chromium steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions A 2001, 32(3): 515-524.
- [5] Xie Zhibin, Shao Qingli, Zhang Guoping *et al.* Rapid ingot extraction ESR process and quality of 160 mm x 160 mm billet of M2 high speed steel [J]. Special Steel 2019, 40(1): 53-57.
(谢志彬, 邵青立, 张国平, 等. 快速抽锭电渣重熔 M2 高速钢 160 mm×160 mm 铸坯工艺及质量 [J]. 特殊钢 2019, 40(1): 53-57.)
- [6] Zang Ximing, Deng Xin, Jiang Zhouhua *et al.* New process of 90 mm square ingot of high-speed steel by electrosag remelting with T-mould ingot extraction [J]. Iron and Steel 2016(1): 39-45.
(臧喜民, 邓鑫, 姜周华, 等. T 型结晶器抽锭电渣重熔高速钢 90mm 方锭新工艺 [J]. 钢铁 2016(1): 39-45.)
- [7] Yin F X, Liang Y, Xiao Z X *et al.* Effects of electrode configuration on electrosag remelting process of M2 high-speed steel ingot [J]. China Foundry 2019(2): 126-134.
- [8] Li Wanming, Jiang Zhouhua, Zang Ximing *et al.* Carbide segregation control in ESR process of large cross-section high-speed steel [J]. Journal of Zhongnan University(Natural Science Edition) 2017, 48(7): 1697-1703.
(李万明, 姜周华, 臧喜民, 等. 抽锭电渣重熔大截面高速钢过程的碳化物偏析控制 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(7): 1697-1703.)
- [9] Chang Lizhong, Shi Xiaofang, Cong Junqiang *et al.* Effect of mould rotation on distribution of elements in steel ingot in electrosag remelting [J]. The Chinese Journal of Process Engineering 2014, 14(2): 266-272.
(常立忠, 施晓芳, 丛俊强, 等. 结晶器旋转对电渣重熔钢锭中元素分布的影响 [J]. 过程工程学报 2014, 14(2): 266-272.)
- [10] Xiao Zhixia, Li Haipeng, Feng Jianhang *et al.* Microstructural homogeneity of electrosag remelting M2 high speed steel ingot [J]. Journal of Iron and Steel Research 2018, 30(7): 529-535.
(肖志霞, 李海鹏, 冯建航, 等. 电渣重熔 M2 高速钢铸锭的组织均匀性 [J]. 钢铁研究学报 2018, 30(7): 529-535.)
- [11] Chen X, Jiang Z, Liu F *et al.* Effect of melt rate on surface quality and solidification structure of Mn18Cr18N hollow ingot during electrosag remelting process [J]. Steel Research International 2017, 88(2): 186-195.
- [12] Li Z B, Che X Q. Study on factors affecting the structure of high speed steel ingot produced by ESR [J]. Journal of Iron and Steel Research(International) 1996, 3(1): 1-4.
- [13] Chu Wei, Xie Chen, Wu Xiaochun. Study on eutectic carbide control of electrosag remelting M2 high speed steel [J]. Shanghai Metal 2013, 35(5): 23-26, 62.
(初伟, 谢尘, 吴晓春. 电渣重熔 M2 高速钢共晶碳化物控制研究 [J]. 上海金属 2013, 35(5): 23-26, 62.)
- [14] Zhu Q T, Li J, Zhang J *et al.* Precipitation mechanism and reduction of amount of primary carbides during electrosag remelting of 8Cr13MoV stainless steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions B 2019, 50(3): 1365-1377.
- [15] Cao Y L, Dong Y W, Jiang Z H *et al.* Research on droplet formation and dripping behavior during the electrosag remelting

- process[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials 2016 23(4):399-407.
- [16] Golczewski J ,Fischmeister H F. Calculation of phase equilibria for AISI M2 high-speed steel[J]. Steel Research ,1992 ,63(8):354-360.
- [17] Zhou XF ,Fang F ,Li F *et al.* Morphology and microstructure of M_2C carbide formed at different cooling rates in AISI M2 high speed steel[J]. Journal of Materials Science 2011 46(5):1196-1202.
- [18] Lü Rong ,Li Junwan ,Xie Chen *et al.* Multiphysical field coupling simulation of cooling process in a new ESR process for ingot extraction[J]. Shanghai Metal 2016 38(1):69-73.
(吕榕,黎军顽,谢尘等. 新型电渣重熔冷却过程的多物理场耦合模拟[J]. 上海金属 2016 38(1):69-73.)
- [19] Zhou B ,Shen Y ,Chen J *et al.* Breakdown behavior of eutectic carbide in high speed steel during hot compression[J]. Journal of Iron and Steel Research International 2011 18(1):40-48.
- [20] Jing G ,Liu L ,Sun Y *et al.* Parameter optimization during forging process of a novel high-speed-steel cold work roll[J]. Journal of Materials Engineering & Performance 2016 25(1):188-198.
- [21] Shao Qingli ,Xie Zhibin ,Zhang Guoping. Effect of diameter and compression ratio of ESR ingot on carbide inhomogeneity of M2 high speed steel[J]. Special Steel 2015 36(3):21-22.
(邵青立,谢志彬,张国平. 电渣重熔锭的直径和压缩比对 M2 高速钢碳化物不均度的影响[J]. 特殊钢 2015 36(3):21-22.)
- [22] Li Lin. Discussion on rapid heating in forging of high speed steel[J]. Metal Materials and Hot Processing Technology ,1983(1):67-68.
(李苓. 高速钢锻造快速加热的探讨[J]. 金属材料与热加工工艺 1983(1):67-68.)
- [23] Liu Yanhui ,Yao Zekun ,Ning Yongquan *et al.* Hot deformation behavior of powder metallurgy high speed steel[J]. Transactions of Materials & Heat Treatment 2014 35(4):62-66.
(刘延辉,姚泽坤,宁永权等. 粉末冶金高速钢的热变形行为[J]. 材料热处理学报 2014 35(4):62-66.)
- [24] Korotkova L P ,Mukhin G G. Change in structure and phase composition in sprayed powders of high-speed steels in annealing[J]. Metal Science & Heat Treatment ,1988 30(4):269-272.
- [25] Zhao Shunli. Study on microstructure and properties of spray formed high alloy high speed steel[D]. Shanghai: Shanghai University , 2017.
(赵顺利. 喷射成形高合金高速钢的组织与性能研究[D]. 上海: 上海大学 2017.)
- [26] Qin Cha ,Wu Lizhi ,Xu Changlin *et al.* Effects of isothermal annealing on carbide accumulation in W6Mo5Cr4V2 high speed steel[J]. Journal of Iron and Steel Research 2009 21(7):48-52.
(秦茶,吴立志,许昌玲等. 等温退火对 W6Mo5Cr4V2 高速钢碳化物堆积的影响[J]. 钢铁研究学报 2009 21(7):48-52.)
- [27] Zhou Xuefeng ,Fang Feng ,Jiang Jianqing. Optimization of annealing process for M2 high speed steel wire rod[J]. Mechanical Engineering Materials 2009(8):54-56.
(周雪峰,方峰,蒋建清. M2 高速钢盘条退火工艺的优化[J]. 机械工程材料 2009(8):54-56.)
- [28] Li Y ,Niu L Y ,Lin J X *et al.* Heat treatments of W6Mo5Cr4V2Si high speed steel[J]. Advanced Materials Research 2013 712-715:17-21.
- [29] Zhao Buqing. Energy-saving annealing process for high-speed steel[J]. Metal Processing(Hot Working) 2017(9):12-14.
(赵步青. 高速钢节能退火工艺[J]. 金属加工(热加工) 2017(9):12-14.)
- [30] Yang Wen ,Xie Chen ,Wu Xiaochun. Evolution of carbides in spray forming high speed steel during heat treatment[J]. Journal of Materials Heat Treatment 2015 36(11):60-64.
(杨雯,谢尘,吴晓春. 喷射成形高速钢热处理过程中碳化物的演变[J]. 材料热处理学报 2015 36(11):60-64.)
- [31] Wang Xin ,Li Zheng ,Kang Fengbo *et al.* Effect of heat treatment process on hardness and structure of W2Mo9Cr4VCo8 high speed steel[J]. Bearing 2015(5):23-25.
(王鑫,李铮,康风波等. 热处理工艺对 W2Mo9Cr4VCo8 高速钢硬度和组织的影响[J]. 轴承 2015(5):23-25.)
- [32] Zhou Yongkun ,Zhao Xianrui ,Wang Xiaojun. Heat treatment process and cutting performance of M2 high speed steel bit[J]. Metal Heat Treatment 2015 40(5):155-158.
(周永坤,赵先锐,王晓军. M2 高速钢钻头热处理工艺及切削性能[J]. 金属热处理 2015 40(5):155-158.)
- [33] Ma S Q ,Xing J D ,He Y L *et al.* Effect of heat treatment on microstructures and mechanical properties of Al-modified boron high speed steel[J]. Key Engineering Materials 2017 732:24-31.
- [34] Nikolaeva E P ,Vlasov D B. Effect of heat treatment conditions on structure and properties of high-speed steel[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2017 177:012113.
- [35] Liang Xiaoyang ,Yan Xianguo ,Guo Hong *et al.* Effect of cryogenic cooling rate on wear properties of W6Mo5Cr4V2 high speed steel[J]. Journal of Material Heat Treatment 2016 37(11):79-85.
(梁晓阳,闫献国,郭宏等. 深冷降温速率对 W6Mo5Cr4V2 高速钢磨损性能的影响[J]. 材料热处理学报 2016 37(11):79-85.)
- [36] Zare A ,Mansouri H ,Hosseini S R. Influence of the holding time of the deep cryogenic treatment on the strain hardening behav-

- ior of HY-TUF steel[J]. International Journal of Mechanical and Materials Engineering 2015 ,10(1) : 24.
- [37] Dong Liang ,Yan Xianguo ,Chen Shi *et al.* Effect of cryogenic treatment on hardness and impact properties of W6Mo5Cr4V2 high speed steel[J]. Metal Heat Treatment 2018 43(12) : 151–155.
(董良 闫献国 陈峙 等. 深冷处理对 W6Mo5Cr4V2 高速钢硬度和冲击性能的影响[J]. 金属热处理 2018 43(12) : 151–155.)
- [38] Gogte C ,Peshwe D ,Likhite A *et al.* On the mechanism of the effect of the cryogenic treatment on high speed steels [J]. Advanced Materials Research 2011 383–390: 7138–7142.
- [39] Gill S S ,Singh R ,Singh H. Effect of cryogenic treatment on AISI M2 high speed steel: Metallurgical and mechanical characterization [J]. Journal of Materials Engineering & Performance 2012 21(7) : 1320–1326.
- [40] Cajner F ,Landek D ,Rafael H *et al.* Effect of deep cryogenic treatment on dilatometric curve and tribological properties of high speed steel [J]. Heat Treatment 2013 6(2) : 67–71.
- [41] Luo Y W ,Guo H J ,Sun X L *et al.* Influence of the nitrogen content on the carbide transformation of AISI M42 high-speed steels during annealing [J]. Scientific Reports 2018 8(1) : 4328.
- [42] Liu B L ,Lü Z Q ,Feng W W *et al.* Precipitation and decomposition behaviors of carbides in AISI M2 high-speed steel with nitrogen and mischmetal [J]. Journal of Central South University 2017(4) : 44–50.
- [43] Duan J ,Jiang Z ,Fu H. Effect of RE-Mg complex modifier on structure and performance of high speed steel roll [J]. Journal of Rare Earths 2007 25(7) : 259–263.
- [44] Li X ,Hou J ,Qu Y *et al.* A study of casting high-boron high-speed steel roll materials [J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 2015 46(10) : 1029–1038.
- [45] Pan Y ,Yang H ,Liu X *et al.* Effect of K/Na on microstructure of high-speed steel used for rolls [J]. Materials Letters 2004 58(12) : 1912–1916.

编辑 邓淑惠

钒钛联盟组织召开 2020 年度协同项目评审会

8 月 8 日 ,钒钛联盟秘书处在成都材料院组织召开 2020 年协同项目评审(视频) 会 ,会议根据钒钛联盟平台发布的 11 个技术需求 ,对来自清华大学、中南大学、北京科技大学、东北大学等 17 家科研院所及企业的 34 份项目申请书组织专家评审。

根据项目申请属性 ,设置了钒+钒钛矿采选、钒钛钢(金属材料方向)、钒钛钢(焊接方向) 和环保(资源利用方向) 4 个专业评审组 ,邀请来自中科院过程所、钢铁研究总院、清华大学、长沙矿冶院、河钢承钢、攀钢集团等联盟成员单位以及中科院理化所、中钢集团、成都理工大学等单位的 23 位知名专家进行了公平、公开、公正的专业评审。

在同时进行的 4 个专业组评审会上 ,34 个项目申报人及其团队根据议程安排依次有序进入腾讯视频会议 ,并从项目设想、技术路线、研究内容、预期目标、创新性、计划进度、研究基础、费用预算及产业化前景等方面进行了介绍。评审专家认真审阅项目情况 ,对共性技术突破和成果转化等项目关键问题进行了质询交流 ,对每一个立项申请材料进行了独立评分 ,经充分研讨后形成了 11 个技术需求项目申请材料的综合评价意见。

会议的顺利召开 ,展示了钒钛联盟较强的凝聚力和影响力 ,以及较高的协同项目管理能力和水平 ,有利于加快建立产学研用长效合作机制 ,推进创新资源共建共享和项目协同协作 ,加快钒钛产业关键共性技术突破和成果转化。

(弓丽霞 供稿)