

· 工艺研究 ·

DOI:10.20057/j.1003-8620.2022-00104

高碳高合金工模具钢连铸工艺发展现状

姚 健¹, 朱喜达², 刘 宇¹, 董 瀚¹

(1 上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444; 2 江阴华润制钢有限公司, 江阴 214404)

摘 要:概述了国外有关连铸高速钢、工模具钢的工业化生产应用以及国内一些企业和研究机构围绕高碳高合金钢连铸技术做过的研究和工业试验。分析认为有必要加大高碳高合金钢连铸技术的开发和应用。相比于传统模铸, 研究表明连铸可使粗大的碳化物厚度降低 40%, 晶粒尺寸降低 50%, 并且碳化物形貌也由平直片状转变为纤维状, 这将有利于后续锻轧工艺的碳化物细化。最后提出了可在连铸矫直机、水冷工艺、铸坯截面尺寸以及成材锻压比方面进行优化改进, 如果能够在现在技术成熟的弧形连铸机取得突破, 这将更有利于提升铸坯质量, 实现高碳高合金工模具钢连铸工业化应用。

关键词:高速钢; 冷作模具钢; 高碳高合金钢; 莱氏体钢; 连铸

Development Status of Continuous Casting Process for High-Carbon and High-Alloy Tool and Die Steel

Yao Jian¹, Zhu Xida², Liu Yu¹, Dong Han¹

(1 School of materials science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444;
2 Jiangyin China Resources Steelmaking Co., Ltd., Jiangyin 214404)

Abstract: This paper summarizes the reports of latest developments on industrial application of continuous casting technology in high speed steel production abroad. In addition, and summarizes some Chinese enterprises and research institutions have done some research and industrial trial production in this field. It is suggested to increase investment on the research and development of continuous casting technology of high carbon and high alloy steel grades. Compared with the traditional casting, the research shows that continuous casting can reduce the thickness of coarse carbide by 40% and the grain size by 50%, and the carbide pattern is also changed from flat and lamellar to fibrous, which will facilitate the carbide refinement in the subsequent forging and rolling process. Finally, it is proposed that the continuous caster straightening machine, water cooling process, billet cross-section size and finished forging ratio can be optimized. If a breakthrough can be made in current technology of mature arc continuous casting machine, it will be conducive to improve the quality of casting billet, and achieve industrial application of high carbon and high alloy die steel casting.

Key Words: High Speed Steel; Cold Working Die Steel; High-Carbon and High-Alloy Steel; Ledeburite Steel; Continuous Casting

连铸是继氧气炼钢后又一项革命性的技术,最早可追溯到 19 世纪 40 年代,美国的塞勒斯(G. E. Sellers)、莱恩(J. Laine)以及英国的贝塞斯(H. Bessemer)提出的各种连铸有色金属的方法。钢的连铸技术自 20 世纪 40 年代试验开发以来,经历革命性变革后,凭借简化工序、缩短流程、提高金属收得率、降低能量消耗、生产过程机械化、自动化程度高、提高质量等显著优点,得到迅速的发展。国内连铸技术应用虽然起步较晚,但自 1996 年中国钢产量超过日本,成为世界第一产钢大国以来,连铸比连年增加^[1],近二十几年来,我国在连铸技术及装备的研

究等方面取得了突破性进展。本文简述了国内外对高碳高合金类钢典型钢种连铸工艺的研究及发展现状,并对高碳高合金钢连铸工艺发展的机遇与方向进行简要分析,对我今后高碳高合金类钢的连铸工艺的发展有一定的参考意义。

1 国内外特殊钢连铸工艺发展现状

特殊钢生产全球化进程加快,在采用连铸的同时,国内外越来越多的企业也开始采用连铸连轧技术^[2],相比于普钢连铸工艺的发展应用,在特殊钢领域,我国连铸工艺的应用,始于 20 世纪 80 年代,太钢引进不锈钢板坯连铸机,陕钢、大冶特钢和长城

特钢引进合金钢小方坯连铸机。当时由于电弧炉容量小、精炼设备差、钢水洁净度低、铸坯断面小等原因,特殊钢连铸技术在国内并未取得迅速发展。到了20世纪90年代末,各主要特钢厂先后自建或从国外引进大电炉和合金连铸机,推动了特钢连铸的技术发展:1990年长城特钢生产出200 mm×200 mm弹簧钢连铸坯,1997年兴澄特钢生产出300 mm×300 mm轴承钢连铸坯,1998年抚顺特钢生产出280 mm×320 mm轴承钢齿轮钢连铸坯,2002年重庆特钢生产出180 mm×220 mm合金结构钢弹簧钢连铸坯等^[3]。近十年以来,我国特殊钢连铸技术逐渐成熟,国内主要特殊钢企业都已经采用连铸工艺生产中低合金钢类产品^[4]。连铸工艺成为特殊钢企业的主体流程,使得特殊钢企业的流程简化,效率提升,质量稳定性改善,单线产能大幅度提升。但是,在高速钢、冷作模具钢等高碳高合金钢产品的连铸工艺应用发展缓慢,被列入不适于应用连铸的钢种之一,主要是因为连铸冷速快,以及这一类钢种自身空冷自硬、组织偏析严重等使得连铸时出现拉漏、拉断、铸坯裂纹,导致产品不能量产化^[5]。2020年,中国的高速钢产量达到8万吨,江苏天工,河冶科技等高速钢专业化生产企业的产量、质量水平都具有很强的国际市场竞争力;同时,中国又是全球最大的冷作模具钢生产国,2020年冷作模具钢的产量达20余万吨,东北特钢,长城特钢等企业的冷作模具钢专业化生产线对国内制造业的快速发展提供了有力的支持。但是这两大类钢种几乎均采用的是传统的模铸工艺。因此,成材率低,生产效率低,单线产能低,工艺成本高等问题仍制约着行业的发展。

2 冷作模具钢与高速钢生产工艺现状

2.1 冷作模具钢

冷作模具钢按照成分主要分为以下几类:碳素工具钢型、低合金冷作模具钢、中合金冷作模具钢,高合金冷作模具钢,前三类冷作模具钢因为合金元素含量不高,高温变形抗力不大,均已采用连铸工艺生产;对于高合金冷作模具钢,因为其良好的力学性能等,多用于各种冷加工模具,因其高的碳含量(>1.5%)以及高的铬含量(12%左右),也被叫做高碳高铬冷作模具钢^[6]。高合金冷作模具钢中高含量的碳元素和铬元素使得相图E点往左移,为莱氏体钢,冷却时会产生大量一次网状碳化物,降低强度,降低冲击韧性,但高碳和高合金可以保证高的淬透性和高的耐磨性,而且淬火变形小,主要应用于要求

高硬度,受冲击小的冷冲模、凸模以及拉丝模等。此类钢导热性差、塑性差,锻造加热速率不宜过快,锻打温度比其他冷作模具钢要高,锻后需捂沙缓冷。高合金冷作模具钢生产中通常采用LF精炼、VD脱气、喂铝线等炼钢工艺措施提高钢水的洁净度。其铸态组织存在大量网状一次液析共晶碳化物^[7],铸造时多使用传统模铸工艺:EAF→LF/VD→IC→(ESR)→锻造或开坯→轧制^[8]。随着制造工艺的发展,现在也有粉末冶金^[9]以及增材制造^[10]生产冷作模具钢,但由于高的碳含量和高的铬含量,很少采用连铸方式生产冷作模具钢。

2.2 高速钢

高速钢是高速工具钢的简称,含碳量一般在0.70%~1.65%,主要含有W、Mo、Cr、V、Co等合金元素,合金元素总量可达10%~25%,热处理后硬度最高可达70HRC,主要用于制造各种切削刀具^[11]。按所含合金元素不同可分为:钨系高速钢(含W:9%~18%)、钨钼系高速钢(含W:5%~12%,含Mo:2%~6%)、高钼系高速钢(含W:0~2%,含Mo:5%~10%)、高钒高速钢、钴高速钢(含Co:5%~10%)以及节约合金元素含量的低合金高速钢。含钴高速钢的硬度及耐热性能高,韧性较好,应用比较广泛。代表钢号有W6Mo5Cr4V2Co5, W6Mo5Cr4V2Co8和W18Cr4VCo5。高速钢和冷作模具钢都属于莱氏体钢,铸态组织结构复杂,长期以来被认为是连铸难度最大的钢种之一。高速钢铸态组织由枝晶奥氏体转变产物(一般为马氏体,有少量残余奥氏体)和分布在枝晶间区不均匀的共晶碳化物网络组成,随后的热加工过程可以打破共晶碳化物的网络,细化碳化物的尺寸,改善碳化物的分布。但铸造过程中合金元素偏析严重,会导致铸态组织不均匀以及二次碳化物分布不均匀,影响锻轧后力学性能。

2.3 高碳高合金钢铸造发展现状

模铸工艺是较为成熟的工艺,企业为改进产品质量,仍在不断地优化工艺。国外一些典型模铸生产商,例如,德国蒂森钢铁、瑞典O-VAKO公司、日本山阳特钢、神户钢铁等为消除钢锭裂纹,对大型钢锭和开裂敏感性大的钢种采用多边形钢锭(六角、八角、甚至圆形);为改善夹杂物的分布,加大钢锭锥度或采用双锥度的特殊锭型等^[13]。

高碳高合金钢由于自身成分特点,制备工艺仍为模具铸造技术。传统模铸工艺(如图1所示)设备简单,成本低,但由于其凝固速度缓慢,在结晶前

形成大量碳偏析,从而形成网状碳化物,此类碳化物必须经过高温反复锻打或轧制使其破碎,锻造过程中容易造成开裂。而且传统模铸易产生应力集中,钢锭脆性大。由于高碳钢模铸钢锭上部缩孔较深,锭身部分元素偏析严重,造成废品率较高,成材率低^[14]。

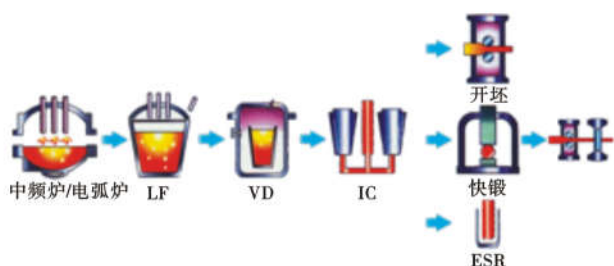


图 1 传统模铸生产工模具钢工艺流程

Fig. 1 Traditional mold casting process for producing tool and die steel

相对于铸造法,粉末冶金工艺可以细化晶粒、均匀组织结构。这也就从冶炼的源头减轻甚至消除了高碳高合金钢宏观元素偏析的问题,同时解决了晶粒粗大等问题。但是粉末冶金复杂的工序、高的成本等使得粉末冶金工艺工业化生产高碳高合金钢推进缓慢^[15]。而模具钢的增材制造近几年也逐渐受到学者们的关注,但增材体的力学性能,尤其是抗拉强度以及屈服强度相比于传统轧制等偏低,依旧难以实现工业化生产^[10]。

3 高碳高合金莱氏体钢连铸工艺探索

3.1 莱氏体钢

莱氏体钢碳含量为 4.3%,其室温组织一般为珠光体、渗碳体和共晶碳化物。结构上,莱氏体由树枝晶及其晶间分布的共晶碳化物构成。液态金属在高温时到达共晶转变温度,发生 $L \rightarrow Ld(\gamma + Fe_3C)$ 共晶转变,产物为莱氏体,随着冷却的进行,温度逐渐降低,当到达共析线时,莱氏体中的奥氏体发生 $\gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$ 共析反应^[16]。高温下共晶渗碳体呈鱼骨状或网状分布在晶界处,经热加工后,破碎成块状或者颗粒状^[17]。室温下一次碳化物和共晶碳化物很难分辨,一次碳化物生长原理如图 2 所示^[18]。虽然莱氏体中碳含量为 4.3%,但一些高合金钢碳含量在 1.5% 也会有莱氏体生成。纯莱氏体钢含有大量渗碳体,接近渗碳体组织,性能与渗碳体相近,力学性能表现为硬而脆。莱氏体钢中从液相析出的一次网状分布碳化物,不参与标准热处理过程的转变,经常规锻打轧制难以将网状碳化物破碎,只能通过

较大的变形才可以做到^[19]。但由于高合金的影响,此类钢韧性低,变形抗力大,导热性差,冷却过程中组织应力大,并且铸坯会产生宏观偏析以及微观偏析,成分不均匀,因此,莱氏体类钢的锻造加工始终是一个难点。如果莱氏体钢中碳化物呈细小颗粒状均匀分布,力学性能才能充分体现出来^[20]。

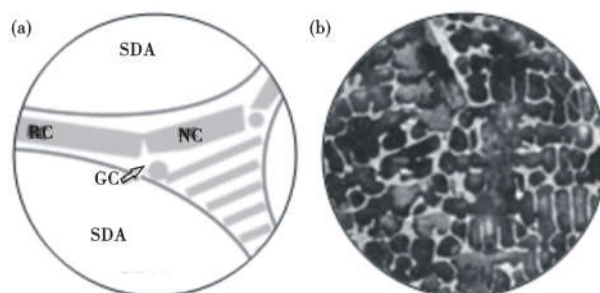


图 2 (a)一次碳化物生长原理图(SDA: 二次枝晶;NC: 块状;RC: 棒状;GC: 球状);(b)莱氏体网状碳化物(100X)

Fig. 2 (a) Principle of primary carbide growth (SDA: secondary dendrite; NC: massive; RC: rod; GC: spherical); (b) Ledeburite reticulated carbide(100X)

3.2 莱氏体类钢连铸的探索工作

虽然莱氏体钢类的钢种特性给连铸工艺的应用带来了很大难度,但对于莱氏体钢类连铸工艺探索研究从未间断过,无论是从连铸机的选择、铸坯的处理还是后续的锻轧工艺改进,国内外的冶金工作者都进行了大量研究工作。

在连铸机机型的选择方面,因为水平连铸不需要对铸坯进行矫直,技术难度相对较低。由表 1 可知,早在 20 世纪 60 年代初,第 1 台工业生产的水平连铸机投入使用的时候,德国冶金研究者就尝试将工具钢和高速钢列入连铸目标,但由于当时工程技术水平所限未能成功,20 世纪 80 年代时,乌克兰第聂伯钢厂也曾使用拉速为 0.2~0.25 m/min 的半连续双流连铸机生产断面尺寸为 390 mm×390 mm 的 P6M5 钢电极坯,后来奥地利 Bohler 公司在 20 世纪 90 年代在 Kapfenberg 工厂使用两台水平连铸机连铸生产特殊钢,这其中高速钢就占据 2.3%,包括 130 mm×130 mm 的高速钢 M2^[5]。结合现有资料来看,水平连铸机主要适合于生产电渣重熔的电极坯。

立式连铸机工艺条件较好,垂直布置使得最后拉出的铸坯质量相比于其他机型更好,消除了夹杂物内弧聚集现象,且不易发生断裂,但一次性投资较大,且维修困难。许多国内外企业也曾尝试过在立

表1 莱氏体钢水平连铸探索
Table 1 Exploration of ledeburite steel horizontal continuous casting

年份	生产厂	截面尺寸/mm	主要品种	工艺质量
20世纪				
60年代	德国冶金		工具钢、高速钢	未成功
80年代	乌克兰第聂伯钢厂	390×390	P6M5钢	电极坯
90年代	Kapfenberg工厂(奥地利Bohler公司)	130×130	M2高速钢	电极坯

式连铸机上生产高碳高合金钢。由表2可知,奥地利BREITENFELD钢厂,在1987年建成的4流立式连铸机生产高速钢,断面尺寸主要为140 mm×185 mm、145 mm×145 mm、125 mm×125 mm、100 mm×100 mm及Φ100 mm,结晶器下端装有回转脉冲电磁搅拌器,以促使铸流中心凝固,减小中心偏析,拉速为0.8~1.6 m/min,铸坯切断采用热切砂轮,切断后立即在850~650℃进行修磨,以避免修磨炸裂,修磨金属损耗4%~6%,铸坯经750~850℃退火,进行锻、轧成材^[5]。20世纪70年代,奥地利Bohler公司,尝试采用立弯式连铸机连铸生产截面80 mm×80 mm的高速钢M2钢坯,其铸坯质量相对于模铸没有改善,而且由于头部完全冷却区被顶弯90°,铸坯沿水平方向出坯,所以只适用于小截面铸坯,但总体来说还是提高了金属收得率^[5]。在国内也有包括重庆特钢、宝钢以及河钢在内的一些企业使用立式连铸机进行过连铸高速钢的试制。重庆特钢厂与重钢三厂在1983年合作在立式连铸机上浇铸了第1炉M2高速钢,结果表明铸坯表面质量良好,激冷层厚,等轴晶宽,树枝晶二次枝晶间

距较小,但内部组织和质量还有待改善,中心碳化物V偏析特别严重,有待后续从工业上解决,并提出了可以改变连铸二冷制度来改善宏观偏析状况,以及加入Ti、Zr、Nb及稀土等元素合金化作为异质形核剂,以改善碳化物分布等^[21]。宝钢特钢曾使用立式连铸机试制了冷作模具钢(Cr12MoV),主要工艺为EAF→LF→VD→CC→热切→热送→热轧,通过对成分控制、冷却控制以及保护渣的控制实现了高碳铬冷作模具钢的连铸,但该技术现仍处于技术开发阶段,未批量工业应用,相比于其它连铸机,立式连铸机由于其构造特别适用于生产裂纹敏感性高的钢种^[22]。河钢研究院研究过立式连铸生产截面135 mm×135 mm的M2高速钢,将拉速和过热度从1.5 m/min、50℃降低到1.0 m/min、30℃,使得单片碳化物网的厚度降低了29.4%,碳化物均匀性得到明显提高,结晶器电磁搅拌同样起到了改善碳化物厚度的作用,但对碳化物面积影响不大,仍维持在20%左右^[23]。

弧形连铸机设备高度比立式连铸机低,不仅使投资成本降低,而且使得在铸坯凝固时钢水的垂直

表2 莱氏体钢立式连铸探索
Table 2 Exploration of ledeburite steel vertical continuous casting

年份	生产厂	截面尺寸/mm	主要品种	工艺质量
70年代	奥地利Bohler公司	80×80	M2高速钢	偏析未改善
1983年	重庆特钢厂与重钢三厂		M2高速钢	表面质量良好,内部有待改善
		140×185		
		145×145		
1987年	奥地利BREITENFELD钢厂	125×125	高速钢	中心偏析减小
		100×100		
		Φ100		
2018年	河钢研究院	135×135	M2高速钢	碳化物尺寸降低
2019年	宝钢		冷作模具钢(Cr12MoV)	技术开发阶段,未批量生产

压力较小,减小了鼓肚变形而产生的内裂及偏析,有助于提高铸坯质量。由表3可知,日本大同特钢公司涉川厂在20世纪90年代时,为改善高速钢铸态元素偏析严重的情况,同时为了使碳化物均匀化,使用由日立造船-德马格于1972年制造投产的弧形连铸机生产高速钢的电极坯,代替传统模铸方法浇铸的电极坯。其连铸工艺改进主要为:(1)改进保护渣性能,将CaO/SiO₂由1.2降到0.8,增加了保护

渣消耗量改善了传热性能;(2)调整钢水从浸入式水口流出的方向,改为对着结晶器角部,并且改进结晶器材质,使其软化温度大于270℃;(3)增大了结晶器角部倒角;(4)增加三次冷却,将铸坯由于结晶器潜热引起的温升控制在30℃以下;(5)在矫直辊前加高频感应加热装置,便于矫直,并且对拉速调整范围进行了更改^[24]。俄罗斯巴丁黑色冶金研究所(Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallur-

gy) 在 2012 年详细报道了在弧形半径为 9 m 的弧形连铸机上生产试制 P6M5 高速钢 160 mm × 160 mm 方坯的结果。通过在凝固过程中施加脉冲式冷却以及特殊的在线凝固-热处理技术,避免了铸坯在出弧

形段矫直开裂的情况,生产出的铸坯铸态组织细化,碳化物分布均匀,可以不经过锻造工序直接轧制成棒材及线材,而且成品材的冲击韧性显著提升^[25-26]。

表 3 莱氏体钢弧形连铸探索

Table 3 Exploration of ledeburite steel arc continuous casting

年代	生产厂家	截面尺寸/mm	主要品种	工艺质量
90 年代	日本大同特钢公司涉川厂		高速钢	电极坯
2012 年	俄罗斯巴丁黑色冶金研究所	160 × 160	P6M5 高速钢	组织细化,成品材冲击性能提升显著

高速钢等高碳高合金钢一次网状碳化物发达,单片碳化物尺寸大,铸造时易形成宏观偏析。但相比于模铸,连铸由于高的冷速,使得网状碳化物的平均厚度降低 40%,厚度标准差增加了 31.1%,同时平均晶粒尺寸也能降低 50%^[27]。适当的冷速可使铸坯内部裂纹和缩孔现象减轻,同时二次枝晶间距可降低 43%,渗透率以及中心碳偏析也会有明显下

降^[28]。随着枝晶明显的细化,分布在枝晶间的 M₂C 共晶碳化物变得更加均匀,碳化物形貌也逐渐从平直片状转变为纤维状,研究表明这种纤维状 M₂C 共晶碳化物虽然晶体结构相同,但在高温扩散过程中更容易分解和球化,如图 3 所示^[29],这将有利于后续的碳化物细化过程。

一般认为,当芯部与边部存在冷速梯度时,由于

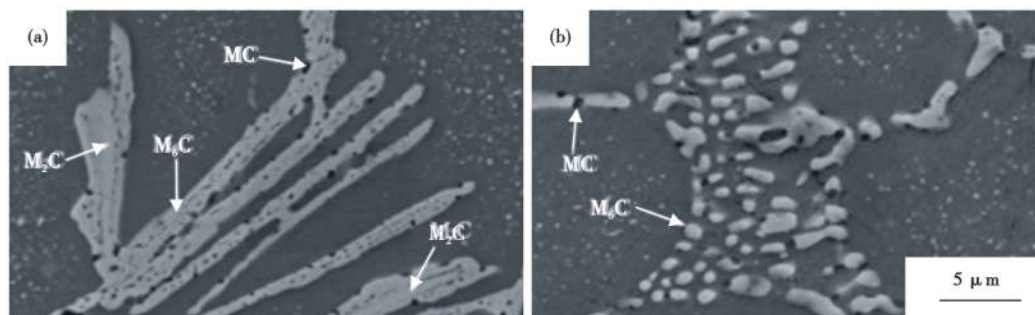


图 3 1 150 °C 加热 1 h 后,钢锭中板状碳化物 (a) 和连铸坯中纤维状碳化物 (b) 的形态

Fig. 3 Morphologies of plate-like carbides in mould casting ingot (a) and fiberlike carbides in continuous casting bloom (b) after heating at 1 150 °C for 1 h

柱状晶断裂,落入液相穴内,形成枝晶搭桥现象,以致于芯部液相区,不能及时补充凝固带来的收缩,铸坯中间出现疏松、缩孔以及元素偏析现象。针对这些问题国内外也研发了许多的技术,包括电磁搅拌、末端轻压下等,其中电磁搅拌线圈所加的位置不同,又分为结晶器电磁搅拌 (MEMS)、二冷区电磁搅拌 (SEMS) 和凝固末端电磁搅拌 (FEMS)^[30]。也有学者研究过 PMO 磁致振荡技术,可将 GCr15 轴承钢中心碳含量控制在 0.96% ~ 1.05%,但由于高碳钢中心碳偏析严重,即使经过多道次轧制后缩孔和疏松可以消除,但中心偏析依然存在^[31]。总体来讲,电磁搅拌在改善连铸坯的宏观偏析及增大等轴晶区的方面有好的效果,同时配合末端轻压下技术,可明显降低铸坯的中心偏析、疏松和缩孔现象。

宏观偏析问题由于其各种影响因素复杂,也有

越来越多的研究者通过数值模拟的手段模拟、验证、预测宏观偏析问题,包括热溶质对流^[32]、热收缩^[33]、枝晶搭桥^[34]、凝固收缩^[35]、膨胀变形^[36]等。这些均可为高碳高合金钢的连铸工艺开发提供理论支持。

4 我国高碳高合金钢连铸工艺发展机遇与方向

目前国内高碳高合金钢生产最常用的方法仍是采用模铸工艺。在高速钢生产中,虽然普遍应用了 LF 精炼以及 VD 真空脱气技术,但大多是采用感应炉或 20 t 以下电弧炉作为初炼炉。这其中最主要的限制环节是浇注工序,因为采用多锭盘下注法浇注,钢锭的脱膜、清理、准备等需要较长的时间,使得不可能进行连续生产。模铸工艺生产高速钢,由于钢锭冒口及小头缺陷部分的切除,多火次轧制时的头

尾切除以及加热烧损,大中型材成材率不到 80%,小型材及线材的成材率只有 60% 左右,高碳高合金冷作模具钢成材率也均在 80% 以下。模铸钢锭凝固时钢锭大头小头组织差别显著,在钢锭冒口下端区域往往存在着一个严重的偏析、疏松区域,导致成品钢材的质量不均匀性较大。相比于连续铸造,模铸在铸模内冷却缓慢,使得钢锭铸态的莱氏体共晶组织粗大,给后续加工工序带来较大负担,而大尺寸碳化物的问题一直是高碳高合金工模具钢产品的核心质量问题,一些不能够得到充分溶解破碎的大尺寸碳化物严重影响成品材的综合性能。对于传统高速钢生产流程来说,钢锭大多数需要锻造开坯,然后进行多火次轧制加工,虽然近些年在轧制开坯取代锻造开坯方面有所突破,但还是需要至少两次热加工才可以生产出成品钢材,这也就导致了加工成本的增加,能源消耗增大。

综合上述国内外对莱氏体类高碳高合金钢连铸的探索,连铸工艺生产高碳高合金工模具钢,存在着显著的优势,主要为:

(1) 流程顺畅,可以实现高效连续生产,最大限度的发挥专业化产线的生产能力;

(2) 可实现大部分产品的一火次成材,部分小型材、线材及特殊质量要求的产品二火成材,流程大幅度缩短,同时减少了工序之间的软化退火、表面清理等工序,大幅度降低加工成本、能源消耗;

(3) 成材率大幅度提高,均可达到 80% 以上,即使考虑到钢种的特殊性,小型材及线材的成材率相比模铸工艺可能提高 20% 以上;

(4) 连铸工艺采用强制水冷技术,加上结晶器电磁搅拌,末端电磁搅拌技术的应用,使得有可能得到更为细化的铸态莱氏体共晶组织。此外,铸坯沿着拉坯方向的成分组织相对均匀稳定。

近年来,国内已经有宝钢特钢、中原特钢、石家庄钢铁先后引进了适合高碳高合金钢及类似难变形材料连铸生产的立式连铸机。可能由于各家企业在产品定位方面的考虑,更专注于大尺寸中低合金钢铸坯的生产,在高碳高合金钢的连铸方面未见系统的技术报道。到目前为止,尚未见到国内特殊钢企业在弧形连铸机方面尝试生产高碳高合金工模具钢类产品。拥有弧形连铸机的企业众多,这些企业现在大多数还是专注于中低合金钢的生产,在当前激烈的市场竞争环境下,产品结构调整的压力大,如果能够在高碳高合金工模具钢这类产品的连铸技术方面有所突破,对企业的创新发展,对推动产业技术进

步无疑具有重要意义。在应用弧形连铸机生产高碳高合金工模具钢类的材料时,应该特别关注以下几个技术问题:

(1) 连铸机拉矫机矫直能力问题。现有的合金钢连铸机在结构及强度设计方面都是基于中低合金钢类产品。高碳、高合金工模具钢类产品由于其碳含量高,合金元素含量高,其高温强度相比于中低合金钢大幅度提高。依据 JMatPro 计算,当应变速率为 10 s^{-1} 时, M2 高速钢在 $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 时强度约为 250 MPa,而 20CrMnTi 钢的强度大约 80 MPa。因此,必须在连铸机结构加强以及连铸工艺方面有针对性的措施;

(2) 连铸工艺强制水冷可能导致连铸坯横断面组织不均匀。莱氏体共晶碳化物在铸坯表层和芯部可能会有较大的差异,是否会导致成品材料组织和性能的不均匀;

(3) 连铸机铸坯尺寸与成品材之间的压缩比问题。考虑到连铸机拉矫机能力的限制,铸坯以中小尺寸为宜。但是要使得铸态莱氏体共晶碳化物得到充分破碎,必须保证足够的压缩比。因此,生产小型材及线材产品更可行。但是中等尺寸以上的成品材,因为压缩比不足,可能难以保证质量。

通过上述对国内外高碳高合金钢连铸工艺研究现状及发展的分析,可发现目前国内特殊钢连铸技术发展已较成熟,以轴承钢为代表的高碳钢和不锈钢为代表的高合金钢均已能够采用连铸工艺实现高效生产。但高碳高合金工模具钢仍使用传统模铸工艺,不仅生产效率低、金属收得率低,而且不符合绿色发展、低成本的需求趋势。对于高碳高合金工模具钢连铸生产,国外少数先进企业已展开研究并实现工业化;且国内部分高校及研究机构也进行了相关实验研究,为国内高碳高合金钢的连铸技术开发提供了一定的技术支持。因此,如果在目前技术成熟的弧形连铸机上取得突破,则会有更大的现实意义。

连铸主要发展方向:(1) 在弧形连铸机上进一步优化电磁搅拌、水冷区以及轻压下等参数,并参考国外在线凝固-热处理技术原理生产高碳高合金工模具钢,可有效提高铸坯的质量;(2) 在轧制过程中,除了从轧制材料本身的温度以及变形控制方向考虑之外,还要充分考虑轧制产线设计能力限制,以 M2、D2 等为代表的高碳高合金工模具钢的轧制应定位在高合金钢产品结构的线材轧机,并且须适当调整轧机速度以及进精轧温度,以保证铸坯在轧制

过程中芯部质量。连铸技术在高碳高合金钢领域的应用将有可能为这一产品在成本、效率、效益、质量

等方面,甚至是企业的组织形式上带来革命性的变化。

参考文献

- [1] 干勇, 王忠英. 国内特殊钢连铸生产技术的现状与发展[J]. 特殊钢, 2005, 26(3):1-5.
- [2] 王一德, 唐荻, 党宁. 国外特殊钢产业的特点及发展趋势[J]. 钢铁, 2013, 48(6):1-6.
- [3] 王忠英, 兰德年, 刘树洲. 特殊钢连铸现状及发展[J]. 冶金管理, 2002(S1):30-35.
- [4] 董瀚. 对发展高品质特殊钢产业的认识[J]. 中国钢铁业, 2011(10):10-13.
- [5] 邓玉昆, 陈景榕, 王世章. 高速工具钢[M]. 北京:冶金工业出版社, 2002.
- [6] 叶慧丽, 王琼, 刘波, 等. 两种生产工艺对 D2 冷作模具钢组织的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(21):50-53.
- [7] 贺帅, 李长生, 韩亚辉, 等. Cr8Mo2SiV 冷作模具钢共晶碳化物的粒化行为[J]. 机械工程材料, 2020, 44(S2):7-10.
- [8] 姜周华, 康从鹏, 刘福斌, 等. 特种冶金生产流程的发展趋势[J]. 材料与冶金学报, 2021, 20(1):1-8+22.
- [9] Hanlin Peng, Ling Hu, Liejun Li, et al. Evolution of the microstructure and mechanical properties of powder metallurgical high speed steel S390 after heat treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 740.
- [10] 张亮亮, 周阳, 刘世锋, 等. 模具钢增材制造及其性能的研究进展[J]. 中国冶金, 2022, 32(3):1-8.
- [11] 罗迪, 邢国华, 刘宇, 等. M42 高速钢铸态热塑性研究[J]. 物理测试, 1991(3):7-10.
- [12] 梁伟, 李晶, 史成斌, 等. 高速钢的碳化物控制研究[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(4):130-138.
- [13] 丁宏, 董晟全, 李高宏, 等. 高合金钢薄壁件的消失模铸造工艺研究[J]. 铸造设备研究, 2009(3):21-23.
- [14] 杜亚伟, 文光华, 唐萍, 等. 基于 ANSYS 的模铸高碳钢凝固过程温度场数值模拟[J]. 材料科学与工程学报, 2010, 28(4):586-592.
- [15] 徐桂丽, 黄鹏, 孙溪, 等. 高速钢制备和热处理工艺的研究现状及发展趋势[J]. 中国材料进展, 2020, 39(1):70-77.
- [16] Thome R, Dahl W. On the crack susceptibility of high alloyed tool steels during continuous casting and in the temperature region of hot working[J]. Steel Research, 1995, 66(2):63-71.
- [17] 罗震. 莱氏体钢的锻造[J]. 金属加工:热加工, 2013(13):55-56.
- [18] 李晶. 特殊钢中碳化物控制[M]. 北京:冶金工业出版社, 2019.
- [19] 王树奇, 关庆丰, 姜启川, 等. 莱氏体型高铬模具钢锻前碳化物形态改善的研究[J]. 钢铁, 1999(7):46-49.
- [20] 刘之伟. 莱氏体钢共晶碳化物不均匀度金相检验新方法[J]. 四川冶金, 2000(1):60-62.
- [21] 陈德荣, 魏瑞航, 王光照. M2 高速钢连铸坯的凝固组织及质量-高速钢连铸坯内部质量研究之一[J]. 四川冶金, 1984(1):37-50.
- [22] 卢耀华, 陈家昶. 高碳高铬冷作模具钢连铸应用开发[J]. 宝钢技术, 2019(2):62-68.
- [23] 李博斌. 连铸工艺对 M2 高速钢碳化物析出的影响[J]. 河北冶金, 2018(12):23-27.
- [24] 江川修, 内藤善博, 松淵周司. 連続鑄造における高速度鋼 ESR 用電極の製造[J]. 電気製鋼, 1991, 62(1):66-72.
- [25] Aleksandrova N M, Galkin M P, Makushev S Y, et al. Improving the plasticity of cold working die steel in continuous casting[J]. Steel in Translation, 2012, 42(12):838-844.
- [26] Parenkov S L, Kakabadze R V, Pavlov V P, et al. Integrated technology for casting-crystallization heat treatment in the continuous casting of high speed steels[J]. Metallurgist, 1999, 43(11):485-489.
- [27] 赵志刚. 高速工具钢(M2)连铸工艺基础研究[5]. 北京:北京科技大学, 2018.
- [28] Zhang J, Zhao Z, Wang W, et al. Comparison of the Microstructure of M2 Steel Fabricated by Continuous Casting and with a Sand Mould[J]. Metals - Open Access Metallurgy Journal, 2019, 9(5):560.
- [29] Solidification microstructure of M2 high speed steel by different casting technologies[J]. China Foundry, 2011, 8(3):290-294.
- [30] Sun H, Li L, Wang J, et al. Coordinating optimisation of F-EMS and soft reduction during bloom continuous casting process for special steel[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2017:1-6.
- [31] 李莉娟, 王郢, 翟启杰. 脉冲磁致振荡(PMO)凝固均质化技术在特殊钢中的应用[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(10):1018-1030.
- [32] V. D. Fachinotti, S. L. Corre, N. Triolet, et al. Two-phase thermo-mechanical and macrosegregation modelling of binary alloys solidification with emphasis on the secondary cooling stage of steel slab continuous casting processes, Int. J. Numer. Meth. Eng. 2006, 67(10):1341-1384.
- [33] L. G. Zhu, R. V. Kumar, Shrinkage of carbon steel by thermal contraction and phase transformation during solidification, Ironmak. Steelmak. 2007, 34(1):71-75.
- [34] T. Murao, T. Kajitani, H. Yamamura, et al. Simulation of the center-line segregation generated by the formation of bridging, ISIJ Int. 2014, 54(2):359-365.
- [35] M. Vynnycky, S. Saleem, H. Fredriksson, An asymptotic approach to solidification shrinkage-induced macrosegregation in the continuous casting of binary alloys, Appl. Math. Model. 2018, 54:605-626.
- [36] S. Ogibayashi, M. Yamada, Y. Yoshida, T. Mukai, Influence of roll bending on center segregation in continuously cast slabs, ISIJ Int. 1991, 31(12):1408-1415.