汽车发动机气门挺柱用16MnCr5冷镦钢盘条的研发与生产

李永超[1,2] 李瑞鹏[1,2] 李家杨[1,2] 韩广杰[1,2]
(1 邢台钢铁有限责任公司技术中心，邢台 054027；2 河北省线材工程技术创新中心，邢台 054027)

摘 要 汽车发动机气门挺柱用冷镦钢16MnCr5生产流程为80 t顶底复吹转炉→LF + RH精炼→325 mm × 280 mm大方坯连铸→高速线材轧制。通过采用碱度4.8的精炼渣(/%：54.5CaO，28.5Al_2O_3，11.2SiO_2，6.2MgO，0.6FeO + MnO)、取消钙处理工艺、铸坯表面淬火技术、精轧温度880～900 ℃、卷取温度850～870 ℃等工艺，成功开发出16MnCr5钢。检验结果表明，生产的Φ30 mm盘条金相组织为均匀的铁素体 + 珠光体，晶粒度8级，断面收缩率71.1%～72.5%，1/3冷镦合格；氧含量0.001 0%～0.001 2%，N含量0.004 5%～0.004 7%，夹杂物尺寸均在10 μm以内，无Ds类夹杂，夹杂物类型主要为单一的镁铝尖晶石夹杂。盘条具有良好的塑性变形能力和较高的纯净度，满足了客户的要求。

关键词 发动机气门挺柱 16MnCr5 冷镦钢 工艺控制

Development and Production of 16MnCr5 Cold Heading Steel Wire Rod for Automobile Engine Valve Tappet

Li Yongchao[1,2], Li Ruipeng[1,2], Li Jiayang[1,2] and Han Guangjie[1,2]
(1 Technical Center Xingtai Iron and Steel Co Ltd, Xingtai 054027;
2 Hebei Engineering Technology Innovation Center for Wire Rod, Xingtai 054027)

Abstract The production flow sheet of 16MnCr5 cold heading steel for automobile engine valve tappet is 80 t top and bottom combined blown converter→LF + RH refining→325 mm × 280 mm bloom continuous casting→high-speed wire rolling. 16MnCr5 steel is successfully developed by using basicity 4.8 refining slag (/%：54.5CaO, 28.5Al_2O_3, 11.2SiO_2, 6.2MgO, 0.6FeO + MnO), to cancel calcium treatment process, cast billet surface quenching technology, finishing rolling at 880～900 ℃ and coiling temperature at 850～870 ℃. The inspection results show that the metallographic structure of Φ30 mm wire rod is uniform ferrite + pearlite with grain size rating 8, the reduction of area is 71.1%～72.5%, 1/3 cold upsetting is qualified. The oxygen content is 0.001 0%～0.001 2%, and the N content is 0.004 5%～0.004 7%, the size of inclusions is all within 10 μm, and there is no Ds type inclusions. The inclusions are mainly single magnesium-aluminum spinel inclusions. The wire rod has good plastic deformation capacity and high purity, to meet the customer's requirements.

Material Index Engine Valve Tappet, 16MnCr5, Cold Heading Steel, Process Control

16MnCr5属于低碳冷镦钢，欧标牌号，常用于生产变形量较大的零部件，对钢的化学成分、非金属夹杂物、组织均匀性和表面质量均有严格要求。客户使用此材料生产汽车发动机气门挺柱，属于发动机中的关键零部件。邢钢开展了高品质汽车用冷镦钢16MnCr5的生产试验研究，并取得了良好效果。

1 试验研究重点内容分析

气门挺柱壁薄且内有盲孔，变形量非常大，要求材料具有较高的洁净度、良好的表面质量及晶粒细小均匀的组织。

该钢种生产的难点在于16MnCr5为低碳铝镇静钢，转炉终点C低，钢水容易过氧化，传统的挡渣锥和挡渣球难以稳定有效控制出钢下渣，终渣氧化性强势必影响LF对精炼氧含量及夹杂物的有效控制；目前LF使用的精炼渣CaO偏高，Al_2O_3偏低，渣的流动性差，影响吸附夹杂效果；传统的钙处理工艺形成的钙铝酸盐夹杂尺寸大，不易上浮去除，影响冷镦性能和疲劳寿命；热送铸坯表面易产生裂纹，影响产品表面质量。同时，常规的高温轧制尽管有利于金属变形，但会增加奥氏体晶粒度的长大速度，奥氏体晶粒粗大后不利于变形诱导铁素体的析出和最终铁素体比例的提高。

基于以上问题，转炉采用高拉碳和滑板挡渣，从源头上控制钢水氧含量；LF精炼采用低熔点、高碱度、流动性良好的精炼渣，保证脱氧脱硫和吸附夹杂效果；RH工序取消钙处理，优化钢包底吹氩流量和时间，降低大尺寸夹杂物数量；连铸工序开发在线铸坯表面淬火工艺，有效解决热送铸坯裂纹问题。轧制工序采用微低温轧制技术，达到细化晶粒的作用。

2　生产流程

本试验研究选择的生产流程如下:高炉铁水 + 废钢→80 t 转炉→80 t LF→80 t RH→四机四流大方坯连铸(325 mm × 280 mm)→开坯(160 mm × 160 mm 初轧坯)→修磨→步进梁式加热炉加热→高压水除鳞→控制轧制。

3　试制过程

3.1　转炉冶炼

转炉总装入量 80 ~ 85 t,铁水要求 S≤0.030%、P≤0.015%,废钢比控制在 10%,废钢全部采用自产废钢,从源头上减少 Cu、Ni 等残余元素的含量;转炉终点碳控制在 0.08% ~ 0.12%,避免钢水过氧化。同时提高一次拉碳比例,补吹次数控制在≤1。出钢过程中加入脱氧造渣剂,出至 1/3 时全部加入铝块预脱氧,再依次加入高碳锰铁、高碳铬铁、低氮增碳剂和石灰;出钢后加入石灰和精炼渣进行顶渣改制。

挡渣方式由原来的挡渣锥挡渣改为滑板挡渣,利用在线下渣检测系统,控渣效果更加稳定,回磷量≤0.003%,合格率由原来的 90% 提高至 97%。

3.2　LF 精炼

精炼渣高碱度、流动性好、吸附夹杂能力强渣,有利于钢渣界面反应,可有效脱除钢中的氧,促使钢中氧化物夹杂上浮去除。研究表明[1],随着炉渣碱度的提高,炉渣中 Al_2O_3 活度逐渐减小,CaO 活度逐渐增加,一方面直接促进了 Al-O 平衡反应的正向进行,另一方面 CaO 能与 Al_2O_3 形成钙铝酸盐,有利于渣系吸附 Al_2O_3 夹杂。但碱度太高会恶化渣的流动性,需要适当保持一定量的 Al_2O_3 含量,通常将 $(CaO)/(Al_2O_3)$ 控制在 1.5 ~ 2。

本试验造白渣时选用 $CaO\text{-}SiO_2\text{-}Al_2O_3$ 渣系,控制精炼渣碱度(R)在3 ~ 5,LF 精炼渣目标成分见表 1。转炉钢水到站后,分批加入精炼渣和还原剂,送电后在 10 min 内快速成渣,保证白渣精炼时间≥15 min。精炼后期适当加入活性石灰、铝矾土调整炉渣;控制精炼终渣(FeO + MnO)≤1.0%;生产过程保持炉内微正压,避免钢水吸气。从表 1 可以看出,实际渣的组分及性能指标均达到了目标要求。

表 1　LF 精炼渣组分和碱度

Table 1　Ingredient and basicity of LF refining slag

项目	渣组分/%					碱度(R)	$(CaO)/(Al_2O_3)$
	CaO	Al_2O_3	SiO_2	MgO	FeO + MnO		
要求	50 ~ 55	25 ~ 35	10 ~ 15	5 ~ 8	≤1.0	3 ~ 5	1.5 ~ 2
实测	54.5	28.3	11.2	6.2	0.6	4.8	1.9

3.3　钢中 Al 含量的控制

Al 在钢中既是良好的脱氧剂,又可与 N 元素结合成 AlN 起到细化晶粒的作用[2]。但 Al 含量太高,将恶化钢水洁净度,影响正常浇注,铸坯开裂率增加。在保证脱氧和细化晶粒效果的前提下,Al 含量应尽量的低,因此,将 LF 离站的[Als]控制在 0.025% ~ 0.045%。

3.4　RH 真空处理

RH 工序主要目的为脱气和去夹杂,严禁成分调整和吹氧升温。RH 真空度稳定控制在≤100 Pa,纯脱气时间不低于 20 min。除此之外,生产此钢种时对 RH 工序进行了优化改进:

RH 工序取消钙处理,不再进行喂钙操作。该工艺主要有两方面优势:一方面 D 类和 Ds 类夹杂物主要为 $CaO(CaS)\text{-}Al_2O_3$ 夹杂,形成原因主要为 Ca 含量较高,而取消钙处理可从根本上切断 Ca 的主要来源;另一方面,经钙处理形成的低熔点钙铝酸盐与钢液的接触角较小,不易上浮去除[3]。而取消钙处理后,夹杂物主要为 Al_2O_3 或 $MgO \cdot Al_2O_3$,与钢液的接触角大,容易上浮去除,改善夹杂物效果非常显著。

钢包底吹氩对大尺寸夹杂物的上浮去除效果明显,而氩气量和吹氩时间的合理制定是关键。研究表明[4-5],当氩气量太小时,钢包内搅拌能较弱,碰撞聚合和钢液循环流动去夹杂的效果相对较弱;当氩气量太大时,钢包内搅拌能较大,钢液循环流动强烈,由于氩气泡直径较大并且在钢中停留时间短,对夹杂物的裹挟上浮作用效果不好,致使钢中夹杂物在上浮到钢渣界面时容易被重新卷入钢水中,甚至可能发生卷渣。因此 RH 底吹氩采用弱搅拌,氩气量80 ~ 100 L/min。吹氩时间≥15 min。

3.5　连铸

连铸方面,钢包长水口采用保护套管 + 氩封,中间包加覆盖剂和吹氩保护,采用整体式浸入式水口,浇注过程钢水增氮量控制在≤0.000 5%,防止二次氧化;钢包采用机械下渣检测,钢包留钢≥1 t,中间包钢液深度稳定在 400 mm 以上,严禁低于350 mm 浇注,有效降低下渣风险;采用结晶器液面自动控制,稳定控制在 ± 3 mm 以内,浸入式水口插入液面深度 120 ~ 150 mm,并保持恒拉速浇钢,避免结晶器卷渣风险;钢水过热度严格控制在15 ~ 30 ℃,采用

结晶器电磁搅拌，电流330 A，频率2.4 Hz。二冷制度采用弱冷方式，保证进拉矫机前铸坯角部温度≥900 ℃，减少角部横裂纹产生。

表2 16MnCr5钢的化学成分/%

Table 2 Chemical composition of steel 16MnCr5/%

项目	C	Si	Mn	S	P	Cr	Cu	Als
要求	0.14~0.19	≤0.30	1.00~1.30	≤0.035	≤0.025	0.80~1.10	≤0.25	-
实测	0.16	0.03	1.11	0.006	0.013	0.99	0.01	0.033

在铸坯出拉矫机后采用铸坯表面淬火技术，对铸坯喷水强冷，使表面温度快速降低至200 ℃以下，通过心部余温使表面形成一层15~30 mm的致密回火组织，以提高其抵抗热应力和组织应力的能力。该工艺将铸坯开裂率由原来的2.49%降至0.56%。

3.6 控冷控轧

盘条由高速线材连轧机组进行轧制，轧制规格为Φ30 mm。在保证完全奥氏体化的前提下，采用适当偏低的加热温度，将开轧温度控制在950~1 050 ℃，保证了Cr、Mn能够充分固溶到奥氏体中。采用微低温轧制工艺，进精轧机温度控制在880~900 ℃，保证晶粒在奥氏体未再结晶区进行变形，达到细化原奥氏体晶粒的目的。

卷取温度控制在850~870 ℃，轧后大盘卷采用缓慢冷却，从而增加铁素体含量，增大珠光体片层间距，降低盘条强度，提高材料的冷变形能力。

4 试制结果及分析

4.1 化学成分检测

16MnCr5冷镦钢盘条成品的化学成分如表2，各化学元素含量均达到客户要求。

4.2 钢的冷镦性能

冷镦性能是冷镦钢的关键性能指标之一，在经受较大程度变形时不产生裂纹，常用评价方法为冷顶锻试验。除此之外，要求低碳冷镦钢的断面收缩率应≥60%，中碳及低合金钢的断面收缩率应为50%~60%[6]。

根据GB/T6478，对Φ30 mm盘条进行1/3冷顶锻检测，检测结果全部合格。盘条断面收缩率在71.1%~72.5%，均大于60%。

4.3 非金属夹杂物和O、N含量

非金属夹杂物的存在，尤其是D类和Ds类脆性夹杂物，破坏了钢基体的连续性，在冷镦时极易作为裂纹源导致材料开裂。同时，大尺寸脆性夹杂物严重影响钢的疲劳寿命，易造成零部件的失效[7]。对于冷镦钢，一般要求距表面2 mm的脆性夹杂物不应大于20 μm，且N≤0.006 0%，T[O]≤0.003 0%[8]。本试验采用FEI explorer4非金属夹杂物自动扫描电镜和金相显微镜对夹杂物的尺寸、数量和类型进行了评价。同时，对盘条的O、N含量也进行了检测。

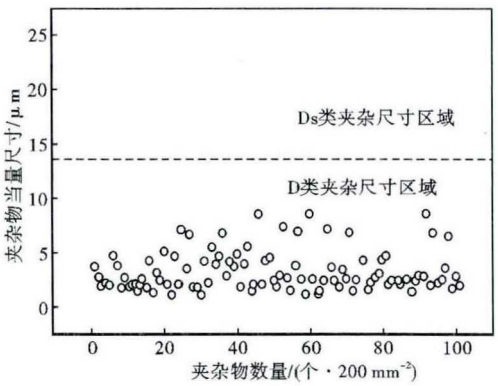

图1 16MnCr5钢盘条夹杂物尺寸分布

Fig. 1 Inclusion size distribution in 16MnCr5 steel coil

分析结果为盘条的全氧含量控制在0.001 2%以内，最低为0.001 0%，N含量控制在0.0047%以内，最低达到0.004 5%，满足冷镦钢对O、N含量的要求。图1为扫描电镜检测的非金属夹杂物尺寸分布图，扫描面积为200 mm²，检测出夹杂物数量为100个。可以看出非金属夹杂物尺寸均在10 μm以内，最大尺寸为9.2 μm，未发现Ds类夹杂物。图2为典型的夹杂物形貌和组分，主要为单一的镁铝尖晶石夹杂物，少量的镁铝尖晶石和钙铝酸盐的复合夹杂。按照GB/T10561-2015进行夹杂物评级，从表3中可以看出，B类细系夹杂物最高为0.5级，D类细系夹杂物为1.0级，个别D类粗系为0.5级，无Ds类夹杂，说明非金属夹杂物控制良好。

4.4 金相组织和晶粒度

冷镦钢盘条的铁素体加少量珠光体组织具有良好的综合力学性能，较高的晶粒度评级有利于提高钢材韧性，从而提高钢材的冷镦性能。根据GB/T13298、GB/T13299钢的显微组织评定方法和GB/6394金属平均晶粒度测定法，检测16MnCr5冷镦钢盘条的金相组织和晶粒度。

图3是16MnCr5钢盘条的边部和心部金相组织。从图3中可以看出，盘条的组织为典型的铁素体+珠光体组织，组织均匀性良好，铁素体比例达到90%以上。晶粒细小而均匀，晶粒度级别达到8级。

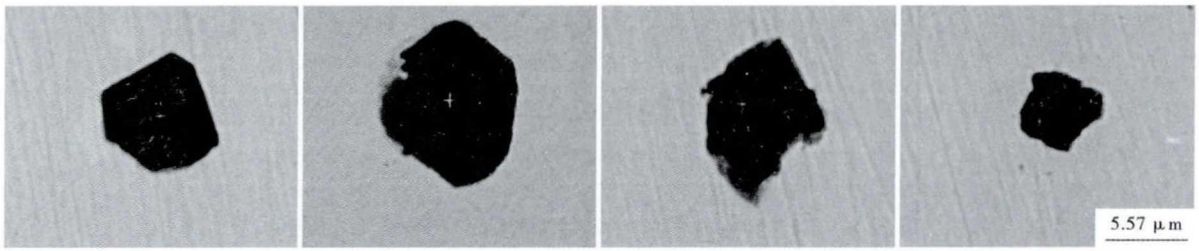

图 2　16MnCr5 钢盘条典型夹杂物形貌及组分

Fig. 2　Morphology and ingredient of typical inclusions in 16MnCr5 steel coil

表 3　非金属夹杂物评级

Table 3　Non-metallic inclusion rating

项目	A 细	A 粗	B 细	B 粗	C 细	C 粗	D 细	D 粗	Ds
	≤2.5	≤1.5	≤1.5	≤1.5	≤1.0	≤1.0	≤2.0	≤1.5	≤1.0
实测-1	1.0	0	0	0	0	0	1.0	0.5	0
实测-2	0.5	0	0.5	0	0	0	1.0	0	0
实测-3	1.0	0	0.5	0	0	0	1.0	0	0

5　结论

(1)采用“80 t 转炉-LF + RH 精炼-大方坯连铸机-高速线材轧机”工艺生产汽车发动机气门挺柱用冷镦钢 16MnCr5 是可行的,试制过程制定的工艺和操作要点是合理的,能满足客户要求。

(2)采用通过钢水的洁净化控制措施,盘条氧含量控制在 0.001 0% ~0.001 2%,N 含量控制在 0.004 5% ~0.004 7%,夹杂物尺寸均在 10 μm 以内,无 Ds 类夹杂,夹杂物类型主要为单一的镁铝尖晶石,因此盘条夹杂物数量少,尺寸细小,O、N 含量控制良好。

(3)采用微低温轧制 + 缓慢冷却技术,盘条金相组织为均匀的铁素体 + 珠光体,晶粒度评级为 8 级,1/3 冷镦检测全部合格,断面收缩率为 71.1% ~72.5%,盘条塑性变性能力和冷镦性能良好,满足了汽车发动机用气门挺柱大变形量的要求。

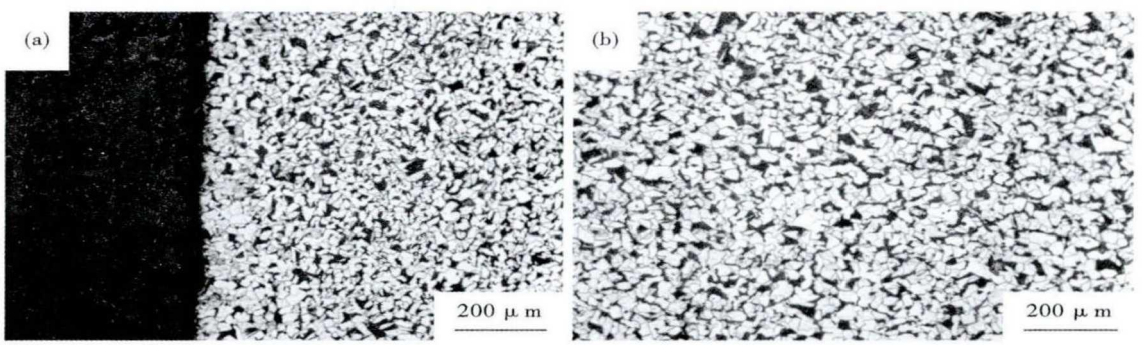

图 3　16MnCr5 钢盘条金相组织(a)边部;(b)心部

Fig. 3　Metallographic structure of 16MnCr5 steel coil:(a) edge;(b) contre

参考文献

[1]吴辉强,林　路,顾　超. 齿轮钢精炼渣优化及工业试验[J]. 中国冶金,2016,26(8):32-38.

[2]李永超,陈继林,郭明仪. 高强度螺栓用 QB30 冷镦钢盘条的研发与生产[J]. 特殊钢,2016,37(4):33-36.

[3]张立峰. 钢中非金属夹杂物[M]. 北京:冶金工业出版社,2019:79-80.

[4]曹立国,李士琦,陈　泽. 石钢 GCr15 轴承钢实践[J]. 钢铁,2008,43(6):38-41.

[5]黄大伟,黄远涛,薛思毅. 钢包底吹氩夹杂物去除行为的模拟研究[J]. 钢铁研究,2014,42(8):10-14.

[6]李　莎. 冷镦钢与钢的冷镦性能评价[D]. 唐山:河北理工大学,2006:10-12.

[7]李守新,翁宇庆,惠卫军,等. 高强度钢超高周疲劳性能[M]. 北京:冶金工业出版社,2010:14-17.

[8]Lifeng Zhang and brian G. THOMAS. State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness[J], ISIJ international,2003,43(3):271-291.

李永超(1985-),男,硕士(2012 年北京科技大学),工程师,2009 年河北理工大学(本科)毕业,冷镦钢开发和工艺研究。E-mail:liyongchao1220@163.com

收稿日期:2020-05-15