

## 汽车压铸用 4Cr5Mo2V 大型模具钢 640 mm × 1 100 mm 锻坯的研制

周 许<sup>1,2</sup>, 王石军<sup>1</sup>, 鄢 磊<sup>1</sup>, 邓 力<sup>1,2</sup>, 张永强<sup>1,2</sup>

(1 大冶特殊钢有限公司; 2 高品质特殊钢湖北省重点实验室, 黄石 435001)

**摘 要** 大冶特钢采用 20 t 电弧炉 + LF 精炼 + VD 脱气、20 t 氩气保护电渣炉重熔、1 250 ~ 1 280 °C 高温均质化处理、60MN 油压快锻机多向锻造及 1 000 ~ 1 050 °C 高温固溶组合技术, 生产的 640 mm × 1 100 mm 4Cr5Mo2V 大型模具钢的非金属夹杂物(≤0.5 级)、显微组织、横向冲击功(KV2 25 ~ 31 J), 均高于北美压铸协会 NADCA#207-2018 标准高级钢质量水平, 等向性达到 0.95。

**关键词** 4Cr5Mo2V 压铸模具钢 纯净度 显微组织 冲击功

### Development and Production of 4Cr5Mo2V Large Die Steel 640 mm × 1 100 mm Forged Bloom for Automobile Die Casting

ZHOU Xu<sup>1,2</sup>, WANG Shijun<sup>1</sup>, YAN Lei<sup>1</sup>, DENG Li<sup>1,2</sup>, ZHANG Yongqiang<sup>1,2</sup>

(1 Daye special steel Co Ltd; 2 Hubei Province Key Laboratory of Hight Quality special steel, Huangshi 435001)

**Abstract** By using combination technology of 20 t EAF-LF-VD, 20 t argon protection ESR unit remelting, 1 250 ~ 1 280 °C high temperature homogenization treatment, 60MN oil pressure quick forging machine multiple forging and 1 000 ~ 1 050 °C high temperature solution treatment process, the inclusion(≤0.5 rating), structure and lateral impact energy (KV2 25 ~ 31 J) of produced 640 mm × 1 100 mm 4Cr5Mo2V heavy die steel are higher than the requirement in standard NADCA#207-2018 for advanced steel leave, and the isotropy of steel reaches 0.95.

**Material Index** 4Cr5Mo2V Die Casting Steel, Purity, Microscopic Structure, Impact Energy

2019 年美国纯电动汽车公司特斯拉提出“一体化铸造”技术, 开启压铸机大型化趋势。一体化铸造的产品, 具备制造工艺化繁为简、设计自由度高、复杂成型能力强、生产效率更高、能为企业降本增效等优势<sup>[1]</sup>。2020 年特斯拉的世界最大的 6 000 t 压铸机落户上海超级工厂, 2021 年中国(上海)国际压铸展览会期间, 压铸机巨头就纷纷发布在大型、超大型压铸机领域的研制成果。代表性有的如 IDRA 系列 6 000 t 两模板压铸机、DREAM PRESS 系列 9 000 t 巨型压铸机, 海天的 HDC 8 000 t、HDC 8 800 t 超级压铸机, 布勒的 9 200 t 超大型两模板压铸机。目前, 见得比较多的是 6 000 t ~ 9 000 t 级的, 这是由压铸件最大用户- 乘用车的车身尺寸决定的<sup>[2]</sup>。压铸机日益大型化, 配套的模具尺寸必将大型化, 所需的压铸模具钢材料尺寸厚度将达到 500 ~ 750 mm, 宽度 1 100 ~ 1 500 mm, 单重达到 11 ~ 18 t。同时对材料纯净度、组织均匀性、等向性均有严苛的要求。

目前市场上的绝大部分压铸模具钢生产企业由于技术、装备有限, 对于厚度 500 mm 以上、宽度 1 000 mm 以上的大截面模具钢不具备生产能力。大冶特钢依靠在热作模具钢领域的技术实力, 结合新建

的高品质模具钢生产线, 发挥进口 20 t 气保电渣炉、60MN 快锻机的装备优势, 进行了大截面高品质压铸模具钢工业化试制。产品按照北美压铸协会 NADCA#207-2018 标准进行分析检测, 达到高级钢质量的要求。

#### 1 试制材料和方法

##### 1.1 试制材料

试制材料为由大冶特殊钢有限公司在 4Cr5Mo2V 热作模具钢的基础上, 对化学成分进行优化调整, 加入适量的 Ni 元素以提高模具钢的淬透性, 从而实现大截面压铸模具钢的淬硬要求。同时严控钢中 S、P 等有害元素含量, 开发出具备高强度、高韧性以及优良的淬透性和热稳定性的高端压铸模具专用钢。

主要工艺流程为: 20 t 电弧炉冶炼-LF 精炼-VD 脱气-氩气保护浇注(Φ920 mm × 4 000 mm)-保护气氮电渣重熔(Φ1 200 mm × 2 200 mm)-高温均质化处理-多向锻拔锻造-超细化处理。其中锻粗比不低于 2.0, 总锻造比不低于 6.0, 锻造模块尺寸为 640 mm × 1 100 mm。试验钢化学成分见表 1。

##### 1.2 检测方法和设备

按照北美压铸协会 NADCA#207-2018《special

表1 试验4Cr5Mo2V钢化学成分/%

Table 1 Chemical composition of 4Cr5Mo2V steel tested /%

C	Mn	Si	S	P	Cr	Mo	V	Ni	O
0.38	0.40	0.25	0.001	0.008	5.10	2.40	0.60	0.4	≤0.0015

Quality Die Steel & Heat Treatment Acceptance Criteria for Die Casting Dies》对锻材两端进行检测。其中非金属夹杂物在抛光态,显微组织经4%的硝酸酒精溶液腐蚀后采用奥林巴斯BX41TF光学显微镜进行观察;采用ASPEX Explorer型金属质量分析仪对试样进行全截面非金属夹杂物扫描,检测钢中夹杂物的尺寸、形貌、面积、数量、位置及成分,对得到的夹杂物进行数据分析;采用660RLD/T数显双洛氏硬度计测试每个冲击试样的洛氏硬度;冲击功采用JBW-450HY高低温冲击试验机测试每个冲击试样的KV2和7 mm×10 mm无缺口冲击功。

## 2 试制结果及讨论

### 2.1 非金属夹杂物

钢中的非金属夹杂物破坏了钢中基体金属的连续性,起到了相当于钢中微裂纹的作用。不变形的硬而脆的夹杂物,尖锐的棱角可以引起应力集中,故在交变载荷的作用下,会诱发疲劳裂纹;低变形指数夹杂物易在金属热加工过程中,基体金属和夹杂物交接区引起显微裂纹,成为内在的疲劳源<sup>[3]</sup>。因此,提高钢液纯净度、减少夹杂物数量是生产高品质压铸模具钢的首要任务。

研制钢种从母材冶炼开始,即贯彻降低气体和非金属夹杂物、消除各类偏析的技术措施。采用低P高炉铁水、高纯铁合金、金属Cr、金属Mn等优质原辅料并通过LF精炼+VD真空脱气冶炼坯料。在冶炼过程中精细操作,电弧炉出钢终点碳控制在≤0.20%、[P]≤0.003%,出钢温度≥1 640℃,出钢过程中严禁下渣,确保充分去除气体和夹杂物;钢包到LF工位后喂入铝线,全程Al含量≥0.03%,加入高纯石灰、铝粉、碳粉等脱硫脱氧,白渣保持时间≥20 min,主要成分进线后扒渣,加石灰和萤石粉等造稀薄渣,加铝粉和碳粉继续脱氧。精炼过程保持还原气氛,精炼转VD前10 min不再加入铝粉等含铝材料;VD真空度≤67Pa条件下保持时间≥20 min,保持渣子碱度R≥3.5,软搅拌时间≥15 min后直接进行氩气保护浇注电极坯。

电渣重熔采用奥地利因泰克20 t氩气保护恒熔速电渣炉进行冶炼,正常熔炼阶段电流波动控制在

1 000 A内,使金属熔池形状达到扁、平、浅,驱使金属凝固沿轴向发展,保证气体和夹杂物充分上浮,以减少铸态组织缺陷<sup>[4]</sup>。采用二元预熔渣系,提高钢液提纯效果。在电渣锭上检测气体含量,N含量≤ $80 \times 10^{-6}$ ,O含量≤ $15 \times 10^{-6}$ ,为夹杂物的控制提供了有力保障。

按照ASTME45-2018、方法A评定锻件两端的非金属夹杂物。表2所示,结果均满足北美压铸协会NADCA#207-2018标准规定的高级钢质量要求。

表2 4Cr5Mo2V钢640 mm×1 100 mm锻坯的非金属夹杂物/级

Table 2 Non-metallic inclusions in 4Cr5Mo2V steel 640 mm×1 100 mm forged bloom /Rating

检测部位	A <sub>细</sub>	A <sub>粗</sub>	B <sub>细</sub>	B <sub>粗</sub>	C <sub>细</sub>	C <sub>粗</sub>	D <sub>细</sub>	D <sub>粗</sub>
头部	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0.5	0.5
尾部	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0.5	0.5
NADCA#207 2018标准	≤0.5	≤1.5	≤1.0	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤1.5	≤1.0

为进一步分析钢中非金属夹杂物,并与行业标杆瑞典钢厂生产的同类产品进行对比,对材料全截面非金属夹杂物进行扫描检测,图1所示,钢中的夹杂物数量和行业标杆基本相当,其中瑞典钢种夹杂物指数为2.2,研制钢种的夹杂物指数为2.8。二者夹杂物指数基本相当。

### 2.2 显微组织

按照北美压铸协会NADCA#207-2018标准图谱评定锻件两端的显微组织:球化组织均为AS5,带状偏析满足标准要求,如图2所示。为最终热处理提供了良好的预备组织。

研制钢种含C量不高,但是在Cr、Mo、V等合金元素的作用下,共析点左移,达到过共析钢成分,20 t的大型钢锭在冷却过程中,C和合金元素相互作用产生严重的成分偏析,特别是在最后凝固的中心区域,C和合金元素富集到共晶成分,由钢液中析出少量不平衡的亚稳定的伪共晶碳化物,分布于基体中,因自身开裂或从基体脱离而使材料脆性增大,导致塑性和韧性降低。同时具有不同合金成分的显微区域在后续锻造变形时易被拉长形成明显的条带状,促使钢材产生各向异性,并增加晶间断裂倾向。为降低不利影响,必须进行高温均质化处理,高温均质化所能达到的均质化程度与加热温度和保温时间有关,一般温度选择在0.8~0.9钢的熔点温度,所研制钢种高温均质化设定为1 250~1 280℃。图3为用放射性同位素P研究的高温均质化处理效果,

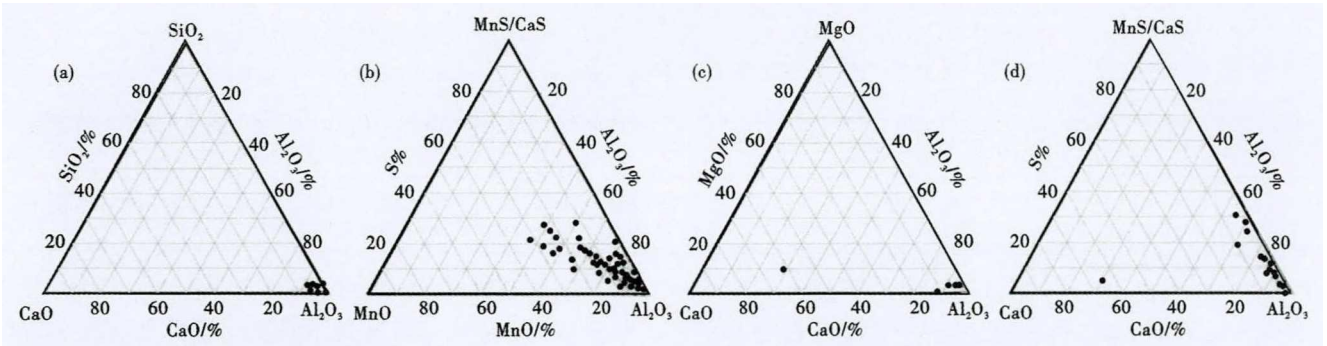


图 1 研制的 4Cr5Mo2V 钢锻坯非金属夹杂物:CaO · SiO<sub>2</sub> · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (a), MnO · S · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (b), MgO · CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (c), CaO · S · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (d) 的扫描结果

Fig. 1 Scanning results of non-metallic inclusions in developed 4Cr5Mo2V steel forged bloom: CaO · SiO<sub>2</sub> · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (a), MnO · S · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (b), MgO · CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (c), CaO · S · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (d)

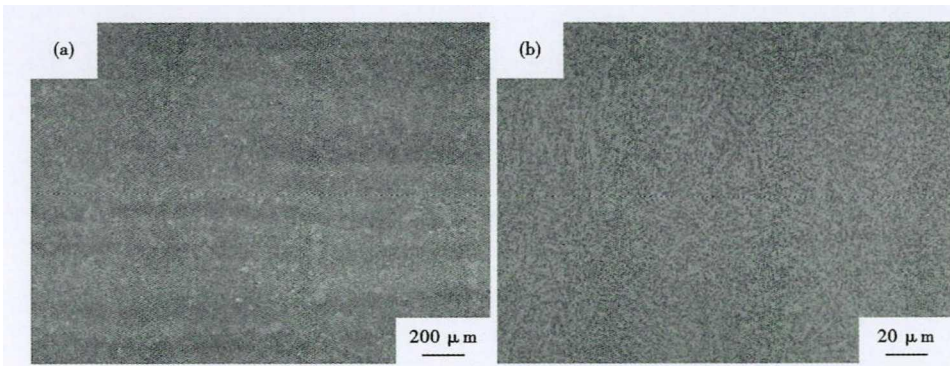


图 2 4Cr5Mo2V 钢锻坯的 (a) 带状偏析和 (b) 退火组织

Fig. 2 Band segregation (a) and anneal microstructure (b) of 4Cr5Mo2V steel forged bloom

由“4.0”至 1.0“表示铸锭组织逐步趋于均匀,其中“1.0”表示组织已经完全均质化。由图 3 可见,锻态的均质化程度远优于铸态。因此扩散前对钢锭进行锻拔处理,铸态组织均匀度得到明显提高。两种状态在 1 000 ℃、1 200 ℃、1 300 ℃ 三个不同的温度下进行高温均质化处理,随着保温时间的增加,铸

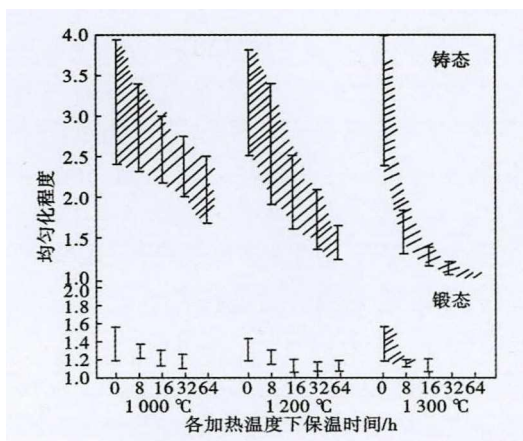


图 3 4Cr5Mo2V 钢加热温度和保温时间对均质化效果的影响

Fig. 3 Influence of heating temperature and holding time on homogenization effect for 4Cr5Mo2V steel

态组织均趋于均匀,但是在相同保温时间下,1 300 ℃ 均质化趋势更加明显,这说明加热温度比保温时间对均质化所起的作用更大<sup>[5]</sup>。因此,为使共晶碳化物充分溶解,在材料表面氧化、能源消耗成本可控的情况下,高温均质化温度选择在允许温度范围的上限区间。同时表明通过机械扩散和热扩散的叠加,对匀

质化具有最好的效果。因此,针对大截面的模具钢,采用锻造中间坯进行均质化处理。

图 4 所示,CCT 转变曲线图中有一条碳化物析出曲线,大型模块锻后采取空冷时,由于心部冷却速度较慢,在约 850 ℃ 就会有二次碳化物沿晶界析出,弱化晶界,造成裂纹优先在碳化物聚集的晶界处形成并沿晶界扩展,降低冲击功。由于二次碳化物网络具有遗传性,采用常规热处理不能消除,必须采用高温固溶处理,使析出的 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 类碳化物溶入基体,并通过快冷避免脱溶。由于 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 类碳化物溶入开始溶解温度为 900 ~ 1 000 ℃,因此,固溶温度必须高于此温度,以 1 000 ~ 1 050 ℃ 为宜。蒋波<sup>[6]</sup>等通过对大截面 DIEVAR 钢模块固溶冷却行为的数值研究指出:随着模块厚度的增加,模块心部的最大冷却速度逐渐降低,模块要能避免碳化物析出的理论最大厚度为 650 mm,从应力方面考虑,预测水冷 550 mm 和油冷 580 mm 为模块最大可生产理论厚度。规格 640 mm × 1 100 mm 的研制钢种固溶采用间隙水冷,边冷却边返温,控制心部和表面应力极

差,保证材料不会开裂,同时不间断的进行循环冷却,控制水温不超过40℃,保证模块整体冷却效果,确保获得尽可能多的马氏体组织,为球化退火提供良好的预备组织。图4为4Cr5Mo2V钢连续冷却转变曲线。

2.3 冲击功

为检测材料的冲击韧性,在成品模块两端心部制取冲击功试样毛坯,夏比KV2试样毛坯尺寸为13 mm×13 mm×55 mm,7 mm×10 mm无缺口试样毛坯尺寸为10 mm×13 mm×55 mm,按照北美压铸协会NADCA#207规定的热处理制度,试样毛坯在箱式电阻炉进行热处理:淬火温度(1 030±5)℃保温30min、油冷至室温;(615±5)℃保温2 h、空冷,回火两次。试样加工至尺寸后,先检测洛氏硬度(HRC),再按照GB/T229进行冲击功检测。

表3所示,模块两端的横向KV2冲击功远满足于北美压铸协会规定的要求。进一步对比两端的纵向和横向7 mm×10 mm无缺口冲击功,表4所示,横向均值达到350 J,纵向均值达到365 J,等向性达到0.95,满足国家十三五课题“高性能工模具钢及

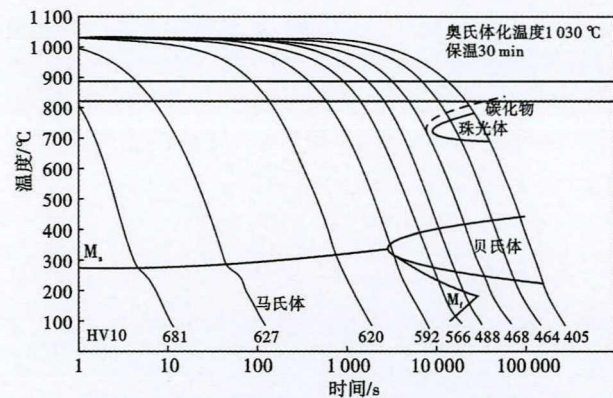


图4 4Cr5Mo2V钢连续冷却转变曲线

Fig.4 CCT curves of 4Cr5Mo2V steel

表3 4Cr5Mo2V钢锻坯KV2冲击功检测结果

Table 3 Tested result of KV2 impact energy of 4Cr5Mo2V steel forged bloom

取样位置	横向 KV2/J			HRC 值
头部	25	25	30	45±1
尾部	27	27	31	45±1
NADCA#207-2018	平均≥13.6,单个≥10.8			45±1

表4 4Cr5Mo2V钢锻坯无缺口冲击功检测结果

Table 4 Tested result of notchless impact energy of 4Cr5Mo2V steel forged bloom

取样位置	横向 KV2/J	纵向 KV2/J	等向性
头部	348/342/362	361/356/377	0.95
尾部	352/348/366	367/376/374	0.95

应用”提出的等向性不低于0.90的要求。

在压铸模具钢中,韧性一般被看作是抵抗失效的关键指标。通过所说的模具钢韧性包含两层含义,即韧性和延性<sup>[7]</sup>。在实际检测时,韧性一般用夏比V型缺口试样检测,能够直观的反映模具材料抵抗裂纹扩展的能力;延性用7 mm×10 mm无缺口试样检测,表现为先萌生裂纹、然后断裂,与拉伸试验的断面收缩率之间有很好的相关性。压铸模具钢实际应用中,经受激冷激热和复杂的交变应力载荷,对材料的力学性能的等向性要求较高。因此,在锻造过程中,必须保证各个方向锻透锻实,大冶特钢依靠德国西马克进口大吨位60MN油压快锻机,采用多向墩拔的锻造方式,首先钢锭墩粗后开特定比例的扁坯后返炉,控制三维方向上总的相对变形量。在这里采用锻造累积变形率。假设压机在锭或坯同一部位沿X轴方向第i次压下后的锻材高度为L<sub>x</sub><sup>i</sup>且从锭到材变形过程中该方向压下次数为n,则该处锻造累计变形率定义如下<sup>[8]</sup>:

$$\Psi_x = \sum_{i=1}^n \frac{L_x^{i-1} - L_x^i}{L_x^{i-1}} \times 100\% = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta L_x^i}{L_x^{i-1}} \times 100\% \quad (1)$$

同样Y和Z轴方向的累计锻造变形率计算公式如下:

$$\Psi_y = \sum_{i=1}^n \frac{L_y^{i-1} - L_y^i}{L_y^{i-1}} \times 100\% = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta L_y^i}{L_y^{i-1}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\Psi_z = \sum_{i=1}^n \frac{L_z^{i-1} - L_z^i}{L_z^{i-1}} \times 100\% = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta L_z^i}{L_z^{i-1}} \times 100\% \quad (3)$$

根据高端压铸模具钢锻造比一般控制在6.0~9.0,锻造累计变形率与锻造比之间的定量关系可换算成在三维方向上的锻造累计变形率如下:

$$\Psi_x \cong \Psi_y \cong \Psi_z = 100\% \sim 150\% \quad (4)$$

20 t大电渣锭在60MN锻压机上按照图5进行锻打,控制始锻温度1 200℃,终锻温度不低于850℃。通过在Z方向墩粗、X方向拔长,初步破碎较大的树枝晶和柱状晶组织,且钢锭横截面变小,为后续高温均质化处理提供有利条件;然后再沿X方向墩粗、Y方向拔长,使得径向交叉的两个方向均匀变形,达到压实心部和充分破碎树枝晶和柱状晶的目的,并且使碳化物分布更加均匀;最后沿Y方向墩粗、Z方向拔长,彻底解决材料各向偏析问题,提高材料的等向性能。

3 结论

(1) 通过优选合金配料和低P高炉铁水,采用

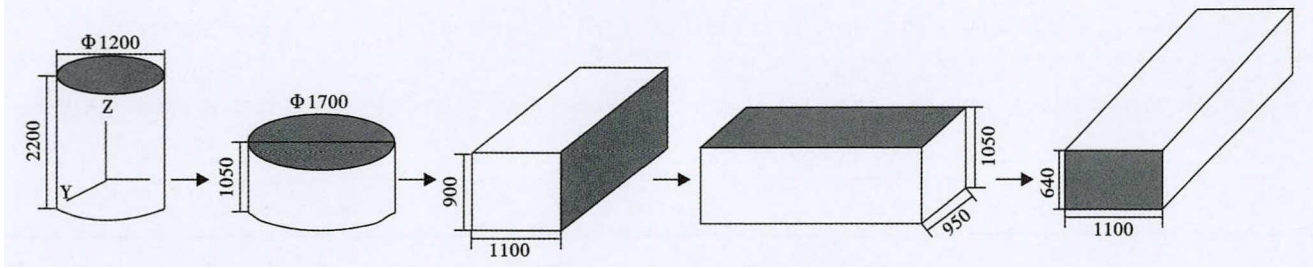


图 5 4Cr5Mo2V 钢电渣锭锻造变形示意图  
Fig. 5 Forging deformation diagram of 4Cr5Mo2V steel ESR ingot

电弧炉冶炼 + LF 精炼 + 真空脱气, 经氩气保护恒熔速电渣重熔, 生产的 20 t 大规格压铸模块电渣锭非金属夹杂物满足北美压铸协会 NADCA#207-2018 标准规定的高级质量要求。

(2) 采用高温均质化处理、多向锻造、高温固溶间隙水冷处理, 改善大钢锭偏析、破碎并熔解一次碳化物, 避免二次碳化物沿晶界析出, 达到细化组织和

碳化物的双重目的。研制钢种 4Cr5Mo2V 的带状偏析、退火组织、夏比 KV2 冲击功均达到北美压铸协会 NADCA#207-2018 要求, 材料等向性达到 0.95。

(3) 大截面压铸模具钢 4Cr5Mo2V 的质量水平满足高端压铸模具钢要求, 对我国的“一体化压铸成型”技术的开发和应用提供材料保障。

参考文献

[1] 中信证券. 一体化压铸行业研究报告: 压铸颠覆汽车百年制程, 行业降迎黄金时代[EB/OL]. (2021-03-31) [2021-04-06].  
 [2] 压铸周刊. 一体化压铸成型-布勒集团亚太区高层访谈 [EB/OL]. (2021-07-10) [2021-07-17].  
 [3] 康大韬, 叶国斌. 大型锻件材料及热处理[M]. 北京: 龙门书局, 1998: 38-41.  
 [4] 刘友荣. 降低工模具钢电渣重熔钢锭顶部缩孔缺陷的工艺实践[J]. 特殊钢, 2015, 36(4): 34-37.  
 [5] 李朝华, 刘英武, 谢奎龙. MCS 冷轧辊辊坯工艺改进研究[J]. 大型铸锻件, 2005(3): 14-15.  
 [6] 蒋波, 左鹏鹏, 李军硕, 等. 大截面 DIEVAR 钢模块固溶冷却行为的数值研究[J]. 上海金属, 2018, 40(2): 38-43.  
 [7] 闵永安, 吴晓春, 徐洛萍, 等. 高韧性-优质热作模具钢最关键指标 [R] 第四届模具实用制造技术交流会. 上海 2005: 293-301.  
 [8] 宛农, 马陶然, 刘建军, 等. 一种交叉开扁锻拔 H13 类热作模具钢均质化锻造工艺: 201610723384. 9 [P]. 2016-08-26.

周许(1984-), 男, 工程师, 硕士, 河南科技大学, 工模具钢产品工艺研究和产品开发。  
E-mail: zhouxu@citicsteel.com

收稿日期: 2022-02-10

**欢迎全国冶金、机械、耐材及相关  
行业在《特殊钢》杂志上刊登工艺设备  
和技术、产品研发宣传广告**