

· 材料和工艺进展 ·

我国压铸模具钢研究新进展

雷应华¹, 周 许^{1,2}, 肖攸毅¹, 张永强^{1,2}, 张 毅¹

(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: 介绍了我国压铸模具钢材料研究和应用新进展。通过研究合金元素对压铸模具材料性能影响, 开发出低 Si、V 及含 Ni、Co、W 等新型压铸模具钢; 通过降低钢中 S 含量、采用 RE 改变夹杂形态和优化锻造工艺, 模具钢等向性能达到 90% 以上; 比较常规电渣重熔、气保电渣重熔和真空自耗三种工艺生产的压铸材料, 钢中 N 含量分别为 150×10^{-6} 、 90×10^{-6} 和 $\leq 40 \times 10^{-6}$, O 含量分别为 24×10^{-6} 、 15×10^{-6} 和 6×10^{-6} ; 利用 ASPEX Explorer 型金属质量分析仪对三种工艺夹杂物指数统计分析, 采用真空自耗冶炼的非金属夹杂物数量呈指数减少, 并且没有 $> 5 \mu\text{m}$ 的非金属夹杂物, 模具冲击性能大幅提升, $7 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 无缺口冲击功可达到 450 J; 制定了高端压铸模具材料显微组织、无缺口冲击评价指标和规范; 随着一体化压铸技术发展, 未来模具材料向着大型化、超洁净、高精度和长寿命方向发展。

关键词: 压铸模具钢; 研究应用; 进展

New Development of Research on Die Steel for Die-Casting in China

Lei Yinghua¹, Zhou Xu^{1,2}, Xiao Youyi¹, Zhang Yongqiang^{1,2}, Zhang Yi¹

(1 Daye Special Steel Co., Ltd.; 2 Hubei Province Key Laboratory of High Quality Special Steel, Huangshi 435001)

Abstract: The research and application new achievements of die steel materials for die-casting in China are introduced. By studying the influence of alloying elements on properties of die material, a new die steel for die-casting with low Si, V and Ni, Co and W has been developed. By reducing the content of S in steel, using RE to change the shape of inclusion and optimizing forging process, the isotropic properties of the die-steel can reach to more than 90%; To make a comparison between conventional electric slag, gas shielded electric slag and vacuum consumable process remelted three die-casting material, nitrogen in steel is respectively 150×10^{-6} , 90×10^{-6} and $\leq 40 \times 10^{-6}$, oxygen content in steel is respectively 24×10^{-6} , 15×10^{-6} and 6×10^{-6} ; By ASPEX Explorer metal quality analyzer for inclusions index statistics and analysis of three kinds of technology, using vacuum consumable smelting, the number of non-metallic inclusions in steel decreases exponentially, with no larger than $5 \mu\text{m}$ inclusions, material impact performance largely increases, $7 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ non-notched impact energy can reach 450 J; to develop high-end die-casting mould material microstructure, the non-notched impact evaluation index standard and specification are established with the development of integrated die casting technology, the future mold material shall develop toward large-scale, super pure, high precision and long life direction.

Material Index: Die-Casting Mould Steel; Development and Application; Progress

压铸模具设计复杂, 加工成本高, 在镁铝锌等合金制品的成本中占有较高的比重, 因此, 要求模具有较长的使用寿命。而在压铸模具和整副压铸模的生产成本中, 模具材料和热处理的费用只占到 10% ~ 15%, 但对模具的整体寿命却起到了决定性的影响, 是压铸成型工艺核心关键部件^[1]。压铸模在工作时承受着复杂的交变载荷, 型腔和高温金属直接接触, 反复的经受激冷激热, 工况极为恶劣, 为了保证模具使用寿命, 压铸模具钢应具备较高的热稳定性、高温强度、耐磨性和淬透性以及优良的韧性、导热性

和耐热疲劳性, 同时兼备较好的切削加工性能^[2]。

进入 21 世纪, 我国汽车、电子、家电、通讯、建筑等行业快速发展, 为提高模具使用寿命和生产效率, 国内许多模具材料生产厂家和模具制造商之间密切合作, 根据模具使用环境和特性, 在压铸模具钢的新材料开发, 生产工艺优化, 材料检测与评价体系等方面做了大量工作, 并取得长足进步。整个行业对压铸模具钢的需求向尺寸大型化、长寿命、专业化方向发展, 要求模具材料具有低偏析、超洁净、细晶组织、高等向性能和抗热疲劳特性^[3]。

1 合金元素对压铸模具钢性能影响的研究

20 世纪 80 年代,模具钢材料国产化引进美国材料协会标准(ASTM)牌号 H13(UNS 代码 521),依据我国钢号命名规则,在 GB/T1299-1985 中命名牌号 4CrMoSiV1,一直沿用至今。

为提高模具使用寿命,大冶特钢最早开始对 H13 钢进行夹杂物变形处理工艺试验,在钢中不计烧损加入 0.05% R_E,模具材料等向性能由 78% 提高到 95%;将钢中 S 含量控制到 ≤0.003%,模具使用寿命提高 1.3 倍以上。同时将新材料命名 521,在华南市场一经推出就享有较高美誉度。

周菲^[4]等研究表明,加入 Ce 后,8418 钢(相当于 GB/T1299-2014 标准中 4Cr5Mo2V)洛氏硬度 HRC 和 KV2 冲击功分别提高 17% 和 26%,微量 Ce 不仅可以提高 8418 钢自腐蚀电位,还降低材料钝化电流密度,从而提高 8418 钢的耐腐蚀性。

邓俊杰^[5]通过研究 Mo 含量对 5% Cr 系热作模具钢冷热疲劳性能的影响,发现随着 Mo 含量的升高,表面裂纹萌生数量减少,3.1% Mo 试验钢表面裂纹最为稀疏,此阶段硬度和回火稳定性起主要作用。

周青春^[6]对 Si 元素在 H13 热作模具钢中的作用进行研究发现, Si 含量在 0.6% ~ 1.5%,随着含量增加,能有效抑制钢中合金渗碳体的析出,而主要以球状或椭球状 M₂₃C₆ 碳化物沿马氏体板条界或晶界析出和长大,钢的抗热疲劳性能显著提高。

朱姣等人^[7]研究发现 4Cr3SiWMoVNb 钢比 4Cr5SiWMoVNb 钢具有更高的热稳定性。经长时间回火保温,含 Cr 较高的 4Cr5SiWMoVNb 钢中的以含 Cr 为主的 M₂₃C₆ 型等碳化物粗化速度较快,使材料硬度降低,这也是造成该钢热稳定较差的原因之一。

郑铭达等人^[8]研究了 V 对 H13 压铸模具钢相变特性的影响。随着 V 元素含量的增加,淬火态硬度降低。这主要是因为随着 V 元素含量的升高,钢中形成了更多稳定的 V 系碳化物,从而降低了奥氏

体化过程中溶入基体的碳含量,进而降低了过冷奥氏体的稳定性。

左鹏鹏等人^[9]针对 N 含量对 4Cr5Mo2V 压铸模具钢的热稳定性和热疲劳性的影响进行了研究。同等淬回火硬度条件下,随着 N 含量的增加,硬度下降更快,碳化物粗化更明显,热稳定性更差。因此,减少 N 含量有利于提高 4Cr5Mo2V 压铸模具钢的热稳定性,延长压铸模具使用寿命。

曾艳等^[10]通过研究 Ni 元素对新型压铸模具钢热稳定性的影响。Ni 元素能够显著提高材料的淬透性,能够阻碍碳化物向基体中溶解,未溶的碳化物颗粒在晶界处能有效阻止原始奥氏体的长大,从而使材料允许的淬火加热温度提高,加 Ni 钢热稳定性后期优于不加 Ni 钢,总体硬度高于不加 Ni 钢,提高材料热强性。

邓俊杰等人^[11]研究了 Co 元素对 4Cr5Mo2V 钢组织和强韧性的影响。相同硬度条件下,4Cr5Mo2V-Co 钢具有更高的高温强度,这是因为 Co 元素的添加促进了 4Cr5Mo2V-Co 钢二次硬化碳化物的形核速率,并能降低碳化物的粗化速率,从而提高了 4Cr5Mo2V-Co 钢的强度。张宇^[12]等研究了 Co 和 Ni 对 4Cr5Mo2V 压铸模具钢抗热损伤性能的影响,含 Ni 钢试块轻微粘铝,含 Co 钢试块粘铝最少,说明含 1% Co 的 4Cr5Mo2V 钢抗压铸铝合金的热损伤性能最好。

项少松等人^[13]研究 W 元素对 DIEVAR 热作模具钢热稳定性的影响。发现 W 元素的添加使 DIEVAR 钢的高温硬度提高 1 ~ 3HRC;明显改善 600 °C 回火的稳定性;抑制了碳化物的析出和粗化。

近几年,压铸模具钢主要通过稀土化处理,提高材料的洁净度;降低 Mn、Si、Cr 等主要合金元素含量,降低钢的偏析,获得高韧性和高热导率;通过加入碳化物形成元素 Mo、V 使钢得到二次硬化效果,高温强度增加;加入 Ni 元素以提高淬透性,从而提

表 1 部分压铸模具钢主要成分/%

Table 1 Main components of partial die steel for die-casting/%

生产厂	钢号	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	V	Cu	RE
乌兹霍姆	DIEVAR	0.350	0.43	0.18	0.002	0.006	5.02	0.07	2.40	0.561	0.04	-
日本大同	DAC55	0.383	0.57	0.31	0.002	0.002	5.14	0.56	2.22	0.811	0.03	-
大冶特钢	YGDVA	0.350	0.52	0.26	0.002	0.005	5.04	0.23	2.35	0.583	0.08	-
大冶特钢	521	0.390	0.40	1.00	0.003	0.120	5.01	-	1.35	0.980	0.02	0.05
宝武特冶	DSAMAX	0.410	0.47	0.24	0.002	0.010	5.05	0.08	2.53	0.580	0.05	-
抚顺特钢	FS448	0.367	0.54	0.16	0.003	0.007	5.02	0.10	2.38	0.620	0.11	-
天工国际	8418	0.364	0.43	0.26	0.003	0.008	4.84	0.05	2.32	0.619	0.07	-
大冶特钢	1.2367	0.376	0.40	0.44	0.002	0.006	4.87	0.24	2.98	0.599	0.07	-
中原特钢	XF318R	0.370	0.42	0.22	0.003	0.011	5.01	0.12	2.38	0.580	0.12	-

升压铸模具钢截面承压面积。在上述研究方向的指引下,国内外钢厂和科研院所在此基础上进行了成分优化。取得了很大的进展。目前得到市场认可的部分钢厂生产的压铸模具钢品种和主要成分见表1。

2 冶金工艺对模具材料洁净度的影响

在特殊冶炼方面,惰性气体保护恒熔速电渣重熔已经成为提高热作模具钢冶金品质的必然手段。大冶特钢、抚顺特钢、宝武特冶等特殊钢厂近几年均增加了惰性气体保护电渣炉,有些企业增加十几台。常压电渣重熔一般是在大气气氛或通入部分惰性气体中进行的,金属中的气体(N、O、H)含量难于降低,甚至还有增长,气体保护电渣重熔由于熔炼过程是在惰性气氛下进行的,气体含量基本不会增加,同时可以防止重熔过程中的活泼金属的氧化,保持化学成分稳定性和一致性,具有高的洁净度和成分均匀性。

黄宇等人^[14]对保护气氛电渣重熔工艺和普通电渣重熔工艺 H13 钢的锻材成分、氧化物夹杂的组成进行了研究。保护气氛电渣重熔工艺中 O 含量较低,仅为 15×10^{-6} ; $1 \sim 3 \mu\text{m}$ 的小尺寸夹杂物占比达到了 62.5%;普通电渣重熔工艺中 O 含量较高,达到了 24×10^{-6} ,夹杂物含有 4% 的 $5 \sim 8 \mu\text{m}$ 大尺寸夹杂物, $1 \sim 3 \mu\text{m}$ 小尺寸占比仅为 37.8%,尺寸偏大。

为进一步降低钢中气体和杂质元素,真空自耗技术在高端模具钢冶炼中也备受重视^[15]。真空自耗冶炼过程没有保护渣,熔炼材料不受污染。并且在高真空中,能最大限度的除去 H、O、N 等气体,钢液洁净、组织均匀^[16]。大冶特钢利用技术工艺和装备优势,研究了经过常压电渣、气体保护电渣、真空自耗工艺的钢锭气体含量分析,经过精炼的 YGDVA 母材,常压电渣重熔后钢中 $N \leq 150 \times 10^{-6}$ 、 $O \leq 24 \times 10^{-6}$;惰性气体保护电渣后钢中 $N \leq 90 \times 10^{-6}$ 、 $O \leq 15 \times 10^{-6}$;经过真空自耗后的钢锭 $N \leq 40 \times 10^{-6}$ 、 $O \leq 6 \times 10^{-6}$ 。并且,采用真空自耗的 YGDVA,洁净度大幅度提升,采用 ASPEX Explorer 型金属质量分析仪对采用不同电渣方式的钢样进行全截面非金属夹杂物扫描,结果如图 1 所示。采用真空自耗冶炼的钢锭夹杂物数量呈指数减少,并且未发现 $> 5 \mu\text{m}$ 的非金属夹杂物。随着夹杂物数量的减少,钢的冲击功明显增加,采用真空自耗生产的 YGDVA 的横向 $7 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 无缺口冲击功可以达到 450 J,材料的等向性(短横向/纵向的冲击功比值)可达到 90%

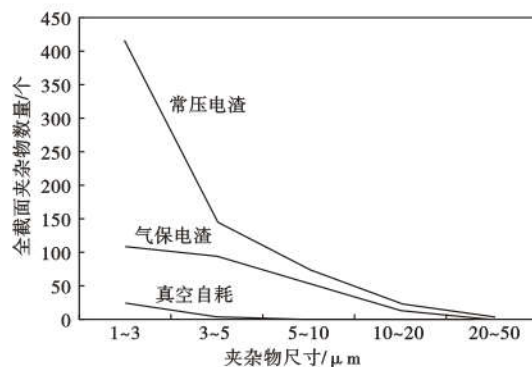


图1 不同电渣方式重熔钢锭的非金属夹杂物大小和数量
Fig. 1 Size and quantity of non-metallic inclusions in steel ingot with different electroslag remelting

以上。

3 锻造工艺对模具钢性能的影响

3.1 高温均质化

为了提高材料的成分和组织均匀性,消除一次碳化物对性能的危害,高温均质化处理是有效改善钢锭原始成分显微偏析的常用手段,H13 钢常规均匀化处理的温度为 $1200 \sim 1250 \text{ }^\circ\text{C}$,往往需要保持 $30 \sim 40 \text{ h}$,改善效果还不甚明显。燕山大学刘鑫刚等^[17]通过大量的理论分析与系统的实验工作,研究了高温扩散对合金元素分布影响,建立了枝晶偏析的均匀化数学模型,分析了高温扩散对组织、热加工性能、产品最终力学性能的影响规律,给出了基于理论分析与实验结果的高温扩散工艺制定方法。目前,H13 类热作模具钢高温均质化处理温度已经提高至 $1260 \sim 1300 \text{ }^\circ\text{C}$,保温时间仅需 20 h 左右,均质化效果获得成倍提升^[18]。

3.2 锻造变形方式对材料的均匀性的改善

针对热作模具钢目前应用较多的沿轴向的多次

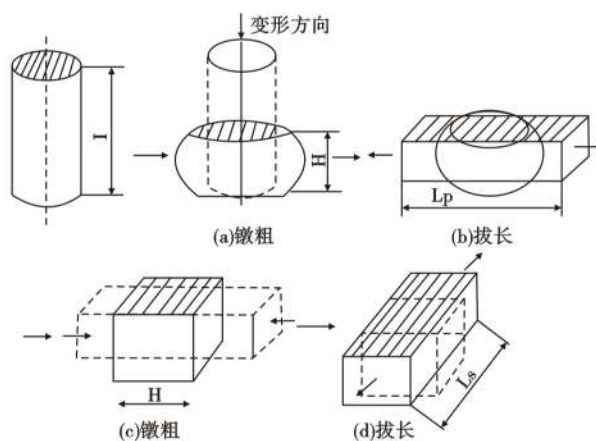


图2 多向锻造变形示意图

Fig. 2 Deformation schematic diagram of multi-directional forging

锻拔,横向性能得到大幅度提升,与纵向比值差距不大,但是切向性能存在短板。北京科技大学姜文鑫等人^[19]研究了多向锻造对 8418 钢组织和力学性能的影响。如图 2 所示,多向锻造可以明显改善带状偏析和显微组织,在一定范围内锻造比越大,偏析改善越明显,按照北美压铸协会标准评级可达到 SA2 以内。多向锻造对材料的等向性有明显改善,在一定范围内,锻造比越大,材料的横向、纵向冲击韧性值越高,大锻造比横向冲击与纵向冲击较小锻造比分别提高 31% 和 23% 左右。多向锻造综合了轴向及横向两种锻造方式的特点,轮番从三个方位进行反复换向锻造。锻造变形均匀,易锻透,组织改善全

面,疏松被密实,流线彻底被打乱,碳化物细碎,颗粒呈无定向分布^[20]。

3.3 预备热处理对模具终极组织的影响

为改善原始材料的显微偏析对模具热处理组织的影响,许多钢厂开始对材料出厂前进行超细化处理工艺以改善材料显微组织(图 3)。超细化处理的原理是将钢加热到高温获得均匀奥氏体组织后快冷至在马氏体开始转变线 M_s 之下后,再在合适的温度下等温时效使钢中各类碳化物均匀弥散析出并降低其硬度,以实现微观组织和碳化物的双细化。这种工艺的实质就是“高温固溶 + 碳化物时效析出”^[21]。

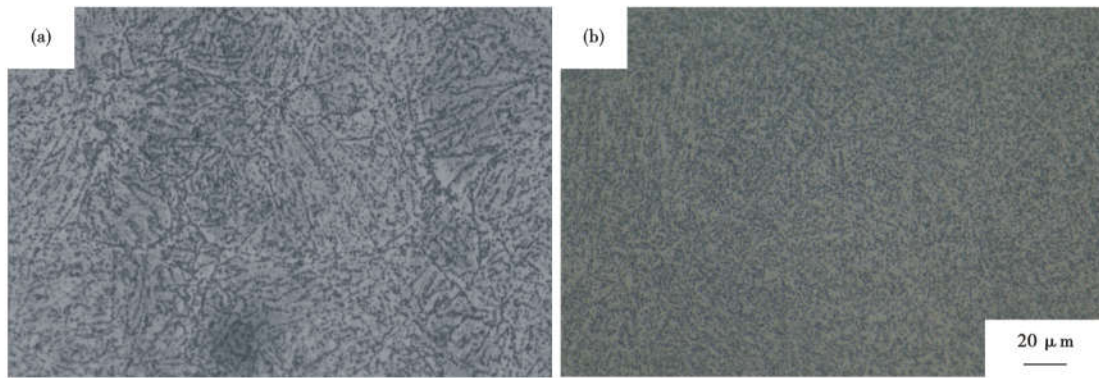


图 3 超细化处理前(a)后(b)组织对比

Fig. 3 Comparison of tissue before (a) and after (b) ultra-thinning treatment

孙立国等人^[22]研究了锻后固溶预处理对 H13 钢退火组织和冲击性能的影响。经过固溶预处理后,退火过程中碳化物多以原位形核方式析出,碳化物分布均匀性和圆整度均提高。经 1 000 °C 预固溶处理与未经预固溶处理的 H13 钢相比,横向冲击性

能提高 15%。

大冶特钢针对规格 650 mm × 1 100 mm 的大截面压铸模具钢 YGDVA 采用间隙水冷的固溶处理,退火组织和冲击功均满足北美压铸协会 NADCA# 207-2018 标准要求,表 2 所示。

表 2 YGDVA 压铸模具钢退火组织和冲击功

Table 2 Spheroidization and impact energy of YGDVA die steel for die-casting

检测项目	退火组织	KV2/J			硬度(HRC)		
		22	23	24	45.0	45.0	45.5
YGDVA 实物质量	AS5						
NADCA#207-2018 标准规定	AS1 ~ AS9	平均 ≥ 13.6, 单个 ≥ 10.8			44 ~ 46		

4 科学合理的评价指标

无缺口冲击功是用于考核热作模具钢的延展性的重要指标,在其它类模具钢中一般不予采用。延展性表征的是在纯塑性应变状态下材料抵抗裂纹形成和扩展的能力,它和韧性是材料的两个不同性能指标^[23]。材料的硬度对延展性影响最大,如表 3 所示,退火态的 4Cr5Mo2V 钢检测横向 7 mm × 10 mm

无缺口冲击功平均值为 220 J,随着硬度逐步升高至 48HRC,7 mm × 10 mm 横向无缺口冲击功达到 410 J。在同一材料相同硬度下,非金属夹杂物、碳化物(碳化物液析、二次网状碳化物)、晶粒度和显微组织依次对延展性产生较大的影响。这表明,延展性更能反映模具钢的原始材料质量水平^[24]。

等向性是衡量热作模具钢的各向异性的关键指标,在产品出厂检测时,主要以横向性能为主,热作

表3 不同硬度下4Cr5Mo2V模具钢横向7 mm × 10 mm冲击功

Table 3 Lateral 7 mm × 10 mm impact energy of 4Cr5Mo2V die steel with different hardness

工艺	硬度(HRC)	冲击功/J
退火	20	220
	40	320
调质	45	370
	48	410

模具在实际应用过程中,整个型腔经受激冷激热、复杂的交变应力。任何一个方向性能偏低,直接影响整副模具的使用寿命。

夏书文等人^[25]分析得出,“十三五”期间(2016~2020年),H13类热作模具钢的无缺口冲击功和等向性水平获得很大提升,与国际先进水平相当。“十三五”国家高性能模具钢材料研究课题,明确提

出高端压铸模具钢等向性考核指标要 $\geq 90\%$ 。

5 建立个性化的材料检测与评价体系

模具材料是模具的关键核心部件,模具材料的评价引起行业广泛重视^[26]。目前行业内比较认可的标准仍然是北美压铸协会 NACA #207《Special Quality Die & Heat Treatment Acceptance Criteria for Die Casting Dies》及德国钢铁工业协会的 SEP1416^[27]。近几年,我国压铸模具钢标准也进行了很大的更新和补充,比较常用的为 GB/T1299-2014《工模具钢》^[28],专注于压铸模具钢的为 GB/T34565.1《热作模具钢 第一部分:压铸模具钢》^[29]。由表4对比发现,最新发布的压铸模具钢国家标准比国际标准检测项目还要齐全。

表4 国内外标准检测项目

Table 4 Domestic and foreign standard test items

标准号	化学成分	非金属夹杂物	晶粒度	退火组织	带状组织	冲击功	调质组织	超声波探伤	低倍	脱碳	交货硬度
GB/T1299-2014	√	√						√	√	√	√
GB/T34565.1-2017	√	√	√	√	√	√		√	√	√	√
NADCA#207-2018	√	√	√	√	√	√	√	√			

以市场上运用比较广泛的4Cr5MoSiV1钢(相当于NADCA#207中的TypeH13-Superior)和4Cr5Mo2V钢(相当于NADCA#207中的1.2367&Modified)在非金属夹杂物、冲击功等关键指标进行对比分析,见表

5,非金属夹杂物两者控制一样,冲击功国标根据质量等级细分为两个级别,其中高级标准要求的冲击功和NADCA#207-2018标准相当,特级标准要求的冲击功远高于NADCA#207-2018标准。

表5 国内外标准关键指标对比

Table 5 Comparison of domestic and foreign standard key indicators

检测项目	等级	GB/T34565.1-2017								等级	NADCA#207-2018							
		A	Ae	B	Be	C	Ce	D	De		A	Ae	B	Be	C	Ce	D	De
非金属夹杂物/级	标准									标准								
	高级	1.0	0.5	1.5	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	高级	1.0	0.5	1.5	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0
	特级	0.5	0.5	1.5	1.0	0.5	0.5	1.5	1.0	特级	0.5	0.5	1.5	1.0	0.5	0.5	1.5	1.0
横向KV2冲击功/J	标准	4Cr5MoSiV1				4Cr5Mo2V				标准	TypeH13-Superior				1.2367 & Modified			
	高级	平均 ≥ 10.8 ,单个 ≥ 8.0				平均 ≥ 12 ,单个 ≥ 15				高级	平均 ≥ 10.8 ,单个 ≥ 8.1				平均 ≥ 14.9 ,单个 ≥ 12.2			
	特级	平均 ≥ 13.5 ,单个 ≥ 10.8				平均 ≥ 15 ,单个 ≥ 20				特级								

我国压铸模具钢的标准从无到有取得长足的进步,但是在关键指标如退火组织评定上还需科学规范;目前北美压铸协会和德国钢铁协会均建立了成熟的评定体系。相信随着国内企业对压铸模具钢研究的不断提高,符合压铸材料科学评定球化组织的标准体系的建立指日可待。

同时低S $\leq 0.002\%$ 、低P $\leq 0.010\%$ 、低O $\leq 12 \times 10^{-6}$ 、低N $\leq 80 \times 10^{-6}$,极低的非金属夹杂物级别和极少的非金属夹杂物数量将作为评定压铸模具钢材料冶金质量的重要指标也将被纳入材料个性化标

准。

6 压铸模具钢发展方向

目前我国中低端压铸模具材料已能满足国内压铸行业的需求并实现出口;随着我国“双碳”计划路线图实施及汽车轻量化的要求,特别是2020年特斯拉电池日公布了下一代车身底盘设计方案,标志新能源汽车结构件一体化压铸技术的新突破,原来车身的钢-铝焊接结构有可能被全铝结构和一体化压铸铸件替代。压铸模具材料在新能源电池包、电传系

统、电控系统、通讯基站、光伏储能、高铁与轨道交通等领域应用和需求量会越来越大^[30]。据不完全统计,目前国内 6 000 t 以上大型压铸机达 50 台套,而目前新能源汽车大型一体化模具使用寿命是 2 万模次左右,一副模具模芯材料用量约 20 t,一辆车至少有四副一体化大型模具,按照年产 100 万辆汽车就会用到约 4 000 t 模芯材料。2021 年新能源汽车的销量已经达到 352 万辆,各方权威部门预测 2022 年这一数据有望达到 500 万辆左右。汽车一体化大型模具在特斯拉已验证成功并在其引领下,国内多家新能源汽车厂如比亚迪、小鹏、吉利等都在开发试用。汽车一体化大型模具乐观估计,2025 年市场需求量可达 20 000 t。

未来压铸模具材料将向以下方向发展:

(1) 需要开发适应大型压铸机的高端压铸模具材料,要求材料低偏析、超纯净,高的等向性及均匀性;钢中 $P \leq 0.008\%$ 、 $S \leq 0.001\%$ 、 $N \leq 70 \times 10^{-6}$ 、 $O \leq 10 \times 10^{-6}$;等向性达到 0.95 以上;不存在单个大

于 5 μm 的液析碳化物,球化组织均匀细小,2~4 级。

(2) 压铸模具尺寸向大型化发展,目前新能源汽车车身结构件需要模具尺寸为厚度:200~600 mm、宽度 700~1 100 mm,后期需要厚度:600~800 mm、宽度:700~1 200 mm 模具^[31]。

(3) 压铸产业链合作更为紧密,模具制造商更加关注模具材料的显微组织对模具热处理组织和性能的影响,材料生产商为下游模具制造提供"一揽子"技术服务和解决方案。

(4) 建立个性化的材料验收标准,包括成分设计及控制、洁净度、显微组织指标、检测与评价。

(5) 单重 18 t、厚度 600 mm 以上的大型、超大型一体化压铸成型压铸模具使用寿命至少达到 3 万次以上,要求模具材料具有高的热疲劳性能;同时需要设计开发新的高端压铸模具材料,提高使用寿命达到 5 万次以上。

参考文献

- [1] 深圳市模具技术协会. 新型模具钢提升压铸性能[J]. 模具制造, 2019, 19(10): 11-12.
- [2] 霍晓阳. 提高 H13 热作模具钢等向性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015: 11-13.
- [3] 张龙强. 后疫情时代我国钢铁行业运行与模具钢行业发展[C]. 深圳: 第十届全国模具材料及配件应用交流大会, 2019: 25-25.
- [4] 周 菲, 吴日铭, 周光群, 等. 微量稀土 Ce 对压铸模用钢组织及性能影响[J]. 上海工程技术大学学报, 2020, 34(2): 163-164.
- [5] 邓俊杰. Mo 含量对 5% Cr 系热作模具钢组织和冷热疲劳性能的影响研究[D]. 昆明: 云南理工大学, 2021: 67-69.
- [6] 周青春. 硅在 H13 型热作模具钢中作用的研究[D]. 上海: 上海大学, 2012: 151-153.
- [7] 朱 姣, 马党参, 周 健. 铬含量对热作模具钢热处理工艺及热稳定性的影响[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(10): 121-126.
- [8] 郑铭达, 吴红庆, 左鹏鹏, 等. V 对 H13 型压铸模具钢箱变特性的影响[J]. 材料导报, 2020, 34(Z1): 440-444.
- [9] 张学友, 左鹏鹏, 何西娟, 等. 氮含量对热作模具钢 4Cr4Mo2V 热疲劳性能的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(1): 9-14.
- [10] 曾 艳, 吴晓春, 夏书文, 等. 镍元素对新型压铸模具钢热稳定性的影响[J]. 材料导报, 2017, 31(8): 72-76.
- [11] 邓俊杰, 周 健, 刘建雄, 等. Co 对 4Cr5Mo2V 钢组织和强韧性的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(11): 48-54.
- [12] 张 宇, 黄泽军, 张恒华, 等. 钴和镍对 4Cr5Mo2V 压铸模具钢抗热损伤性能的影响[J]. 上海金属, 2021, 43(7): 7-8.
- [13] 项少松, 吴日铭, 胡 涛, 等. 钨对 DIEVAR 热作模具钢热稳定性的影响[J]. 热处理, 2021, 36(1): 10-16.
- [14] 黄 宇, 谢 有, 成国光, 等. H13 钢中 Mg-Al-O 系夹杂物的形成机理及控制[J]. 钢铁, 2017, 52(6): 35-41.
- [15] 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.
- [16] 冶金工业部. 真空自耗炉冶炼[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991: 26-30.
- [17] 刘鑫刚, 金 淼, 郭宝峰, 等. 大型锻件高温扩散均匀化机制研究及应用[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015: 1-6.
- [18] 唐文军, 徐明华. 高温均匀化对 H13 钢强韧性的影响[J]. 上海金属, 2002, 24(2): 14-17.
- [19] 姜文鑫, 梁 航, 杨海波, 等. 多向锻造对 8418 钢组织和力学性能的影响[J]. 机电工程技术, 2021, 50(5): 6-10.
- [20] 宛 农, 马陶然, 刘建军, 等. 一种交叉开扁微拔 H13 类热作模具钢均质化锻造工艺: 201610723384.9 [P]. 2016-08-26.
- [21] 吕 龙. H13 系列模具钢微细化处理技术的研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2016: 7-8.
- [22] 孙立国, 周 健, 马党参, 等. 锻后固溶预处理对 H13 钢退火组织和冲击性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(2): 131-135.
- [23] 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.
- [24] 冯英育. 工模具钢的韧性和延展性[J]. 视界, 2011(12): 11-13.
- [25] 夏书文, 左鹏鹏, 吴晓春. 国内外压铸模具钢发展概述[J]. 模具制造, 2021, 7: 93-100.
- [26] 马党参, 陈再枝, 刘建华. 我国模具钢的发展机遇和挑战[J]. 金属加工(冷加工), 2008(8): 74-75.
- [27] 中国国家标准化委员会. 工模具钢: GB/T1299-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [28] NORTH AMERICAN DIE CASTING ASSOCIATION. Special Quality Die & Heat Treatment Acceptance Criteria for Die Casting Dies; NADCA#207-2018[S]. Illinois. 2018: 1. 45-56.
- [29] 中国国家标准化委员会. 热作模具钢 第一部分: 压铸模具钢: GB/24565. 1-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 1. 14-15.
- [30] 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].
- [31] 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]. <http://www.yzweekly.com/jxsb/zhuji/6484.htm>.