

一体化压铸对模具钢和热处理的挑战及发展趋势研究

孙建祥¹, 颜敏娟², 肖培钦¹

1. 上海凌力特殊钢发展有限公司, 上海 200003

2. 杭州萧山技师学院, 浙江 杭州 311203

摘要：一体化压铸近来越来越受到广泛关注, 更大尺寸的压铸产品对模具钢及热处理提出了严峻的挑战。本文对比和分析了传统压铸模具钢与一体化压铸模具钢在合金成分设计和优化, 选择与应用, 纯净度, 淬透性, 韧性方面的变化, 并对大尺寸模块的真空热处理工艺和新近推出的高导热钢进行了探讨。

关键词：一体化压铸; 模具钢; 高导热钢; 真空热处理; 淬透性

The Development Research for Tool Steel and its Heat Treatment Challenged from the Integrated High Pressure Die Casting

Sun Jianxiang¹, Yan Minjuan², Xiao Peiqin¹

1. Shanghai Lingli Special Tool development CO., Ltd. Shanghai 200003

2. Hangzhou Xiaoshan Technician College, Hangzhou, Zhejiang 311203

Abstract： More and more on integrated high pressure die casting is concerned, the bigger castings challenged the tool steel and heat treatment. The alloy element design and improvement, how to select and apply the tool steel grade, purity, hardenability and toughness are compared and analyzed between the traditional and the integrated high pressure die casting tool steel in this thesis, and big size tool steel heat treatment and newly developed high thermal conductivity tool steel are also discussed.

Keywords： integrated high pressure die casting; tool steel; high thermal conductivity tool steel; vacuum heat treatment; hardenability

引言

自从新能源汽车巨头特斯拉成功开发出一体化大型后地板压铸件以来, 因其较低的综合成本, 市场上众多的主机厂和压铸厂都纷纷投入到研发和生产的热潮中^[1]。一体化压铸件的生产包含多项核心技术, 其中包含有免热处理铝合金产业化应用, 轻量化结构设计, 高真空压铸工艺, 大型模具开发技术, 连接技术, 大型装备制造等关键技术; 对大型模具钢及其热处理也提出了严峻的挑战^[2]。

众所周知, 传统的压铸模具钢已经广泛地应用于汽车发动机壳体, 变速箱壳体, 支架类及轮罩类等模具, 这些产品的压铸机合模力通常小于4000吨, 模具钢厚度通常在400mm到500mm左右以下, 而一体化压铸机在6000吨以上, 模具钢厚度达到600mm-800mm, 一付一体化压铸模具总重量达到近200吨, 模芯材料重量最大可达50-70吨左右^[3]。模具钢的产品质量, 例如均匀性, 淬透性, 韧性等指标, 也应当符合新形势发展的需求。本文对一体化压铸模具中的模具钢性能及其真空热处理工艺进行分析和探讨。

一、模具钢成分设计

市场上常见的模具钢种类及其成分如表1所示。C含量的增加, 也增加钢材的强度, 淬硬性, 耐磨性, 淬透性和抗回火性能, 但同时降低钢材的塑性, 对于压铸模具钢来说, 0.4%左右的模具钢具有较好的综合性能。德国葛利兹公司的GPM58, 一胜百公司的UNIMAX和Bohler公司的W360, 其中C含量达到0.5%, 热处理后硬度可达到58HRC以上, 极大地提高了强度和耐磨性能^[4-6]。

Cr元素能够提高钢材的淬透性能, 以固溶态存在于基体中

时能够增强抗氧化能力和抗腐蚀能力并提高强度, 但其形成的碳化物, 如Cr₇C₃、Fe₄Cr₃C₃或Fe₂Cr₅C₃的稳定性较差, 它和Fe₃C类碳化物一样很易溶解和析出, 具有较大的聚集长大速度, 一般不能作为高温强化相^[7]。通常压铸模具钢的Cr含量控制在4.5%-5.5%之间, 以获得较好的平衡。

Si元素是铁素体强化元素, 能够提高模具钢的抗回火能力和强度, 但也引起塑性的下降, 且Si含量的提高更容易出现带状组织, 导致纵向和横向性能出现差别, 故而在一体化压铸模具中, 由于模具尺寸大, 常常选择韧性更好的低Si种类。目前市场上大部分的压铸模具钢都是低Si的, 远多于H13和H11类型的1%Si

的钢种（如德国 Kind&Co 公司的 TQ1，Bohler 公司的 W350 等）^[8,9]。

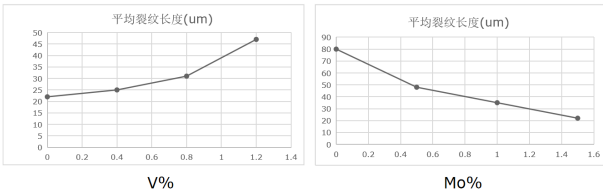
Mn 元素能够增加钢的淬透性能，强化奥氏体和铁素体相，但 Mn 元素易使钢热处理时产生过热而晶粒长大，故压铸模具钢中常常把 Mn 含量限制在 0.6% 左右以下。有较少的钢种 Mn 含量达到 0.8% 左右以下（如一胜百公司的 QRO90）^[10]。

表 1 常见模具钢种类、成分

Table1 common tool steels grades, analysis

钢种			C	Si	Mn	Cr	Mo	V
4Cr5MoSiV1	H13	2344	0.40	1.00	0.35	5.25	1.48	1.00
4Cr5MoSiV	H11	2343	0.38	1.00	0.40	5.25	1.35	0.45
4Cr5Mo1V		W350	0.37	0.32	0.40	5.20	1.55	0.55
4Cr5Mo2V		8418	0.36	0.30	0.35	5.00	2.30	0.55
4Cr5Mo3V		2367	0.36	0.30	0.35	5.00	3.00	0.55

在模具钢组成的常用合金元素中，Mo 和 V 是最重要的组成部分之一，其对模具最终寿命具有决定性的影响。如图 1 所示，在一定范围内，Mo 含量的增加和 V 含量的减少对裂纹长度起到积极的影响作用。



> 图 1 钼钒含量对平均裂纹长度的影响

> Fig.1 the influence of Mo、V content to average crack length

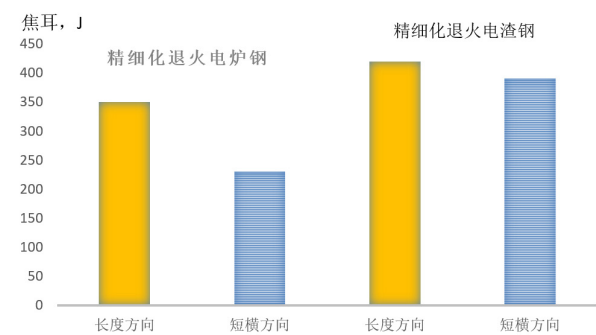
Mo 元素是强碳化物形成元素，能提高淬透性，并显著增加钢材的二次硬化效应和抗回火性能。2367 钢种具有 3% 含量的 Mo，一般认为这是 Mo 二次硬化效应的极限，过多的 Mo 加入反而引起淬火温度的上升，易引起晶粒长大，2367 的奥氏体化温度达到 1050–1080℃。最佳经济性的 Mo 含量是在 2.0%–2.5% 之间^[11, 12]。

V 元素也是强碳化物形成元素，能提高钢的耐磨性，细化晶粒，与 Mo 一起增加二次硬化效应，提高抗回火性能，但当 V 的含量过高时，形成的碳化物熔点很高，反而造成淬透性的降低，并且易形成初生碳化物而降低韧性。日本日立公司的 DAC55 和 DAC10 提高 V 含量至 0.8% 和 0.9%，提高了高温强度和抗回火性能^[13]。

二、冲击韧性

热龟裂、冲蚀和粘铝是一体化压铸模具常见的失效形式，其中模具钢的韧性是抵抗其失效的重要性能。分别对 2343 电炉钢和 2343 电渣钢做冲击韧性测试，采用 7*10*55mm 的试样，热处理硬度至 44–46HRC，用冲击试验机做无缺口冲击韧性测试，其冲击韧性结果见下图 2 所示。由图可知，电渣重熔后的钢比电炉钢具有更高的冲击韧性值，而且短横方向和长度方向冲击韧性更加接近，而电炉钢在短横方向和长度方向上相差较大。考虑到模具型

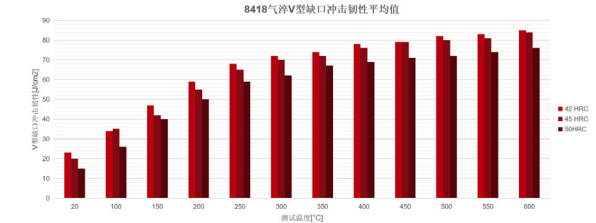
腔受到三向应力的作用，模具钢通常会使用电渣重熔工艺，使其不仅能够提高冲击韧性，还能够获得更好的等向性能。



> 图 2 电炉钢与电渣钢的冲击韧性比较

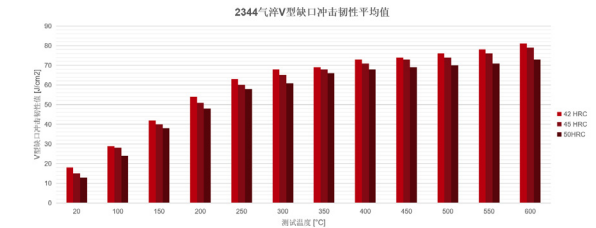
> Fig.2 EAF and ESR tool steel impact toughness comparison

模具钢材的冲击不仅与生产冶炼工艺相关，而且还与应用温度以及热处理选择的硬度密切相关。图 3 和图 4 所示为 8418 和 2344 电渣重熔的两种钢材在不同硬度和不同温度下的 V 型缺口冲击韧性比较。由图可知，随着硬度的升高，冲击韧性值降低，而随着温度的升高，在 600℃ 范围以内，冲击韧性值呈上升趋势。



> 图 3 8418ESR 冲击韧性测试

> Fig.3 8418ESR impact toughness test

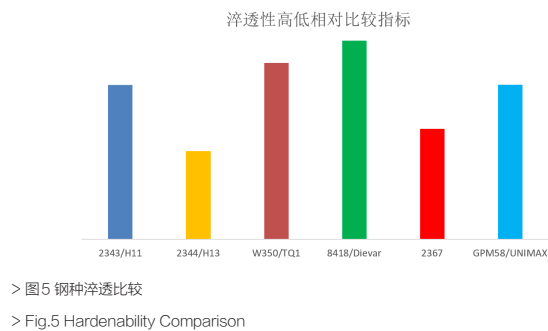


> 图 4 2344ESR 冲击韧性测试

> Fig.4 2344ESR impact toughness test

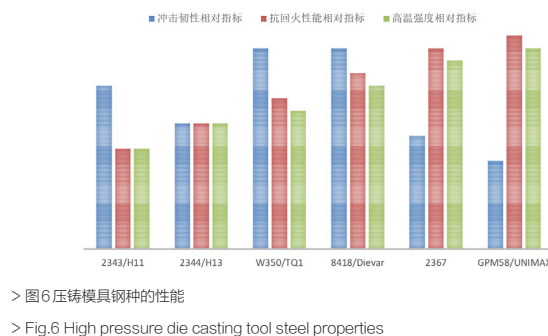
三、淬透性

一体化压铸模具厚度大，必须保障其模具钢材热处理后心部位置的组织性能，以免产生宏观开裂，尤其是有一些大型模具采用框架和镶块组装的结构，只有心部组织性能保证了才能为压铸生产提供整体上的有效支撑。表 1 中各钢种的淬透性能相对比较如下图所示。由图可知，8418/Dievar 具有最好的淬透性能，而 2344/H13 相对较逊，故而 2344/H13 适用于厚度小于 300–400mm 以下的模具，而 8418/Dievar 厚度可达 800mm 左右，这可以较好地满足一体化压铸对于不同部位镶块厚度不同的需求。淬透性是前面论述中各元素综合作用的结果，既要考虑各元素积极的促进作用和交互作用，也要考虑元素过多造成的副作用，这是一种平衡后的综合指标。



四、模具钢应用与选择

压铸模具常见的失效形式有热龟裂，整体开裂，冲蚀，R 角开裂等，正确理解模具钢的性能用以抵抗模具的失效非常重要。上表 1 中的常见压铸模具钢种的性能相对指标如下图 6 所示。



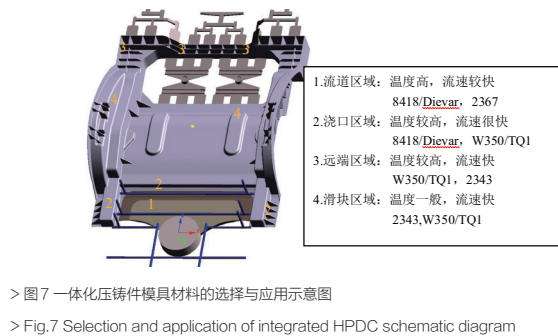
冲击韧性有益于抵抗模具的整体开裂和热龟裂、R 角开裂，抗回火性能有益于抵抗热龟裂，R 角开裂，而高温强度有益于抵抗热龟裂，整体开裂，冲蚀，R 角开裂。针对不同的失效形式，往往考虑的是模具钢材的综合性能指标。

一体化压铸模具因其尺寸巨大，常采用镶拼结构的方式来设计和组装成整体模具，一些滑块的尺寸会比较大约如 600mm-700 厚，欧洲市场和北美市场及国内市场对模具钢有不同的选择与应用，详细介绍如表 2 所示。

表2 常见模具钢应用	
Table2 Common Tool steel's application	
钢种	性能特点及应用
2343/H11	欧洲常用钢种，低偏析率，高韧性，高热传导系数，适用于大型模具。
2344/H13	北美及亚洲常用钢种，适用于耐高温负荷要求、高耐磨性要求、易产生热龟裂模具，适用于中小型模具。
W350/TQ1	2343 的改良钢种，具有比 2343 更好的韧性、抗龟裂性及耐磨性，纯净度极高，适用于中大型模具。
8418/Dievar	高性能热作模具钢，具有优异的抵抗热龟裂、整体开裂、热磨损和塑性变形的性能，适用于大型模具。
2367	适用于耐超高温负荷要求、极高耐磨性要求、易产生热龟裂的模具，适用于中小型模具。
GPM58/UNIMAX	适用于耐高温负荷要求、极高耐磨性要求的小型模具及镶件。

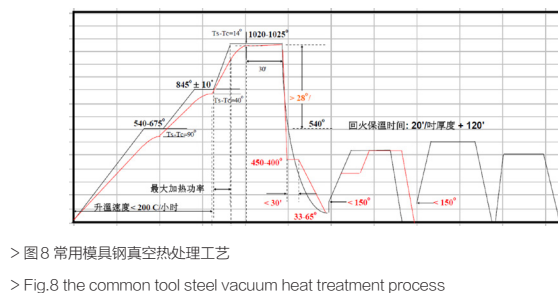
针对模具不同的部位，模具需承受不同的温度和铝液高速冲击，据此，应选择具有相应产品性能特点的模具钢种类，图 7 所示

为一体化后地板零件不同部位对应的模具钢选择示意图。



五、热处理工艺

一体化压铸模具钢材因其尺寸大和形状复杂的特征，通常选用真空热处理工艺。目前市场上已经出现可达 9 吨载重量的大型真空炉，其装载尺寸可达 1.5 米宽，1.5 米厚，2.5 米长，配备有远红外控温装置实现全程任意监控工件表面温度变化，改进了冷却系统的导流装置，实现对炉内任一工件的冷速控制。图 8 所示为常用模具钢真空热处理工艺。



一体化压铸模具通常采用分级淬火工艺，其关键在于：在高温冷却阶段，即在 1020℃ -1025℃至 540℃冷却阶段，控制其表面冷却速度在 28℃ /min 以上，心部冷却速度在一个合理的水平；然后在 400℃ -450℃之间采用等温工艺，控制表面和心部温差，有利于控制模具开裂的风险和降低变形，等温工艺的时间应控制在 30 分钟左右时间以内；再采用较快的冷却速度冷却到模具表面温度 33-65℃，在 400℃至 200℃之间的心部冷却速度应达到 5℃ /min 以上，以避免出现上贝氏体组织而降低韧性；随后应立即进行首次回火，通常回火次数不应低于 4 次，以确保彻底去除热应力。

六、新模具钢种

现今不少模具厂都受到来自于下游厂家要求降本增效的压力，日本日立公司新近推出的 DAC-i 未经过 ESR 电渣重熔工艺，降低了成本的同时，还具有比 DAC(2344/H13) 更好的韧性、抗热龟裂性能和抗开裂性能^[14]。对其进行化学成分检测，结果如下表所示。

表3 DAC-i 化学成分测试结果

Table3 DAC-i chemical composition testing results

日立钢种	对比钢种		C	Si	Mn	Cr	Mo	V
DAC-i	DAC	2344/H13	0.36	0.37	0.65	5.35	1.35	0.75

对样品油淬后调质至 44-46HRC 的硬度，随后进行冲击韧性

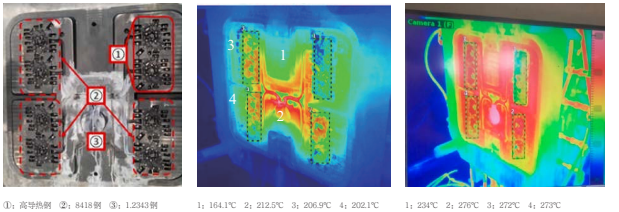
检测，其7*10*55mm 无缺口冲击韧性平均值达到350J 以上。

德国 Buderus 布德鲁斯也新近推出一款 CONQUEROR™ SUPER CLEAN ISO-B 材料，化学成分含有0.3% 的 Si 和0.3% 的 Mn，也是未经过 ESR 电渣重熔工艺，其产品资料介绍纯净度如下表4 所示。纯净度的提升，对于冲击韧性的提高有很好的功效，该款新材料可以保证310J 的无缺口冲击韧性值^[15]。

表4 CONQUEROR™ SUPER CLEAN ISO-B 纯净度测试结果
Table 4 CONQUEROR™ SUPER CLEAN ISO-B cleanness testing results

纯净度	A		B		C		D	
	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系
CONQUEROR™ SUPER CLEAN ISO-B	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.5	0.5

对于厚壁铸件以及一些销子类需要高导热的模具部位，SIJ 钢厂新近推出了一款 S140R 高导热钢^[16]，化学成分为极低的 Si 含量，添加了 Mo、Ni、Co 等稀有元素，其导热系数在100℃ - 600℃ 的范围内，均在50W/m.K 左右，在高压压铸应用中类比其他传统的模具钢更能够抵抗热龟裂和热粘蚀，生产效率更高，维护成本更低。其中一个应用的案例是在4 个模具镶块上测试该导热钢，下图9 中②所示为8418 钢制作其余3 个镶块，流道及嵌框③为2343 钢，①为高导热钢，用红外相机测量模具镶块在正常压铸生产时的温度分布情况。与传统的8418 及2343 模芯料相比，采用高导热钢的镶块部分要比其余部位低40℃ -50℃，如图10 所示。



> 图9 模具组成 > 图10-a 通冷却水温度分布 > 图10-b 未通冷却水温度分布
> Fig.9 Tool assembly > Fig.10-a Die surface temperature Fig. 10-b Die surface temperature

参考文献

[1]HYPERLINK "javascript:void(0)"但昭学，林韵，万里，闫锋. 一体化压铸成形技术的现状及发展 [J] 特种铸造及有色合金. 2024，44(8): 1023~1031.
[2] 查敏，顾璇，马品奎等. 轻合金大型一体化结构部件压铸成形技术研究进展 [J] 特种铸造及有色合金. 2024，44(8): 1009~1022.
[3] HYPERLINK "https://x.cnki.net/kns8/Detail?sdb=CPFD&sfield=%e4%bd%9c%e8%80%85&skey=%e4%b9%90%e8%99%8e&scode=000025185370&acode=000025185370" 乐虎，HYPERLINK "https://x.cnki.net/kns8/Detail?sdb=CPFD&sfield=%e4%bd%9c%e8%80%85&skey=%e5%90%91%e5%8b%87&scode=000029171593&acode=000029171593" 向勇，HYPERLINK "https://x.cnki.net/kns8/Detail?sdb=CPFD&sfield=%e4%bd%9c%e8%80%85&skey=%e6%9d%8e%e6%96%87%e4%bb%b2&scode=000005118805&acode=000005118805" 李文仲等. 一种用于一体化压铸大型模桥变形量检测的方法 [J] 2024 重庆市铸造年会论文集. 2024:542~544.
[4] 德国葛利兹公司 GPM58 产品介绍资料.
[5] 一胜百公司 UNIMAX 产品介绍资料.
[6]Bohler 公司 W360 产品介绍资料.
[7] 潘晓华，朱祖昌. H13 热作模具钢的化学成分及其改进和发展的研究 [J] 模具材料及热处理技术. 2006，4:78~85.
[8]Kind&Co 公司产品 TQ1 介绍资料.
[9]Bohler 公司 W350 产品介绍资料.
[10] 一胜百公司 QRO90 产品介绍资料.
[11] 俞德刚. 钢的强化理论与设计 [M]. 上海: 上海交通大学出版社，1990.
[12] 赵振业. 合金钢设计 [M]，北京，国防工业出版社，1999.
[13] 日立公司 DAC5、DAC10 产品介绍资料.
[14] 日立公司 DAC-i 产品介绍资料.
[15]Buderus 布德鲁斯产品介绍资料.
[16]SIJ 钢厂 S140R 产品介绍资料.
[17]ROLVAMA 公司 FAST Cool 50 产品介绍资料.

西班牙 ROLVAMA 公司也推出了一款可应用于压铸模具的高导热钢，名称为 FASTCOOL®-50，该钢材的导热性能在温度300K 下导热系数为50W/m.K，具有高硬化性能、高耐磨损性能^[17]。

七、结论和展望

一体化压铸模具尺寸大，熔液流程长，模具钢材需承受更高速度更高压力的载荷，因此控制模具不发生热龟裂、冲蚀和整体开裂等失效形式，对于生产出合格低成本的压铸件，具有重大的意义。传统模具钢材发展至今，正面临一体化压铸带来的新挑战，在原有2344/H13、2343/H11 的基础上，利用钢的强韧性理论和金属学原理，不少钢厂发展出了高 Mo 低 Si 的新钢种，并将 V 含量控制在合适的水平。淬透性对于大型模具是一个重要的考量因素；需采取合理而有效的热处理工艺保证模具的合理变形而不发生开裂，并用高冷却速度充分挖掘出模具钢材的潜能。

国外一些模具钢生产厂家已经开发出采用非 ESR 电渣重熔工艺生产的压铸模具钢，不仅降低了模具钢生产成本，还能保证高纯净度和良好的冲击韧性；同时，高导热钢也越来越广泛地应用于模具实际生产中，较好地降低了模具表面的温度，提高了生产效率，并且起到了积极地抵抗热龟裂和冲蚀、粘铝的作用。

未来进一步添加和平衡微量合金元素，使模具钢的综合性能得到进一步的提升，例如 Ni、Co、W 合金元素，稀土元素的添加和优化，尤其是在改善模具钢的高温红硬性、高温强度和淬透性将显得更加重要。研究高导热钢的导热机理，并且开发出更好淬透性和更高韧性的模具材料，对于大型模具也是一项颇为紧要的课题。大型真空热处理设备及其热处理工艺和表面处理工艺的成熟应用，对于保证和延长模具寿命具有很重要的意义。