DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.06.028

注塑机和压铸机用球墨铸铁模板切削加工性能影响因素研究

陈永成[1,2],柯志敏[1,2],何良荣[1,2]

(1.广东中天创展球铁有限公司,广东 英德 513000; 2.广东省高性能大型铸件制造及模拟工程技术研究中心,广东 英德 513000)

摘 要:研究了球墨铸铁模板的化学成分、基体组织、硬度、铸造工艺、热处理等对其切削加工性能的影响。模板化学成分不合理、形成碳化物元素含量过高、模板中含有高熔点的夹杂物、局部的白口和反白口、未熔尽残留物、硬度不均匀等材料原因,以及铸造工艺方面的冷却速度、开箱温度、铸件尺寸精度超差和不稳定、刀具和切削用量不合适等非材料因素均可能引起切削问题。提出了从熔炼入手,控制炉料质量、控制形成硬质点的合金元素加入量、消除夹杂物、提高基体组织的均匀性、严格控制铸造工艺过程等解决措施,以获得良好的切削加工性能。

关键词:切削加工性能;化学成分;组织结构;硬度;铸造工艺;热处理

中图分类号:TG506 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2019)06-0625-05

Factors Influencing the Machinability of Ductile Iron Templates for Injection Molding Machine and Die Casting Machine

CHEN Yongcheng[1,2], KE Zhimin[1,2], HE Liangrong[1,2]

(1.Guangdong Zhongtian Chuangzhan Ductile Iron Co., Ltd., Yingde 513000, China; 2.Guangdong Research Center for High Performance Large Castings Manufacturing and Simulated Engineering Technology, Yingde 513000, China)

Abstract: The effects of chemical composition, matrix structure, hardness, casting process and heat treatment on the machinability of ductile iron templates were studied. Template chemical composition is not reasonable, high content of carbide formed elements, template contains high melting point inclusion and partial chill and reverse chill, not melting residues, uneven hardness of the materials, and casting speed, cooling box temperature, casting dimension accuracy out-of-tolerance and unstable, cutting tool and cutting parameter improper cutting factors other than materials are likely to cause problems. In order to avoid these problems, some measures are put forward, such as controlling the quality of original materials, controlling the amount of alloying elements, removing inclusions, improving the uniformity of matrix structure and strictly controlling the casting process.

Key words: cutting performance; chemical composition; microstructure; hardness; casting process; heat treatment

模板作为注塑机和压铸机最重要的零件之一,它的性能好坏直接关系到整台设备的质量。模板在注塑机、压铸机中的合模系统需要保证模具闭合、开启及顶出制品,并供给模具足够的锁模力,以抵抗熔融塑料或合金进入模腔产生的模腔压力,防止模具开缝,所以模板须具有较高的刚度、强度和良好的塑性。因为球墨铸铁具有良好的综合力学性能和优越的工艺性,制造周期短,成本低,从性能、价格等综合考虑,采用球墨铸铁材质制造模板。

切削加工作为毛坯模板制造中最重要的工序,加工成本占总生产成本的比例很大。尤其是大型模板的加工,其加工量大,生产周期长,影响整机交货周期,已经成为生产瓶颈。铸造厂家作为模板毛坯的提供者,既要满足产品材料的使用要求,又需面对后续工种对切削加工性能的挑剔,有时切削加工性能竟成为机加工与铸造之间争议和矛盾的焦点。所谓的切削加工性能是指在一定切削条件下,对材料进行切削加工的难易程度。现模板的切削加工普遍采用数控机床、高速切削工艺和优质刀具,刀具的磨损和使用寿命对模板切削性能的好坏十分敏感,模板的切削加工性能优劣可从以下3个方面进行评价:

(1)加工效率。

(2)刀具的磨损、破损(如崩刀、卷刃、刀片碎裂等)程度。

收稿日期:2019-03-06

作者简介:陈永成(1962-),广东广州人,高级工程师.主要从事公司全面管理和产品开发研究工作.电话:13570048086,E-mail:sdzhongtian@163.com/24613705@qq.com

(3)工件的加工粗糙度和表面状况(如掉边、粘瘤、波纹、棱刺、亮带、黑点等)。

本文以球墨铸铁模板在切削加工中存在的问题为切入点,从铸造中的化学成分、基体组织结构、硬度、铸造工艺、非材料因素和热处理等方面对实际生产中影响模板切削加工性能的问题进行分析,从而优化工艺方案,探讨获得良好切削加工性能的方法。

1 铸件化学成分与切削性能之间的关系

铸铁化学成分对模板切削加工性能的影响,主要取决于化学元素对碳的石墨化作用或结合化合物的类型。

1.1 化学成分中5大元素对切削性能的影响

(1)C是球墨铸铁中的主要元素,C含量对球墨铸铁的工艺性、表面及内在质量都有着重要影响。铸铁中C元素以两种形式存在:与铁结合成渗碳体(Fe_3C),或成为游离石墨。渗碳体的硬度高,含量越高,切削时刀具磨损越快,如含量≥10%时,模板的切削加工就十分困难。C以游离石墨形式存在时,由于石墨硬度低、润滑性能好,其切削加工性能就愈高。同时含C量高,则析出的石墨球数量多,球径尺寸小,圆整度增加。但C含量太高,出现石墨漂浮或石墨球粗大时会显著影响加工表面的粗糙度。

(2)Si是促进石墨化元素,主要是对基体组织产生影响,在球墨铸铁模板中随着含Si量增加则珠光体减少铁素体增加。铁素体因本身硬度低,切削时不易断屑,易粘刀形成积屑瘤,从而影响表面粗糙度。

(3)Mn在铁液中的主要作用是稳定基体中珠光体的含量,促进珠光体的形成。在一定范围内,随着Mn含量的提高,抗拉强度、硬度和耐磨性会随之提高,塑性、韧性和加工性能随之降低。如Mn含量≥0.8%时,会在共晶团边界生成局部的晶界碳化物或晶界马氏体等弥散度很高的微小硬化组织,从而降低模板的切削性能。

(4)P<0.07%时,对力学性能的影响较小;当P>0.07时,会出现磷共晶急剧恶化强度和塑性,提高硬度从而妨碍切削加工,同时磷共晶造成的晶间缩松,在一定程度上降低了模板的加工质量。

(5)S元素过多会阻碍石墨化,增大白口倾向,产生球化不良或衰退,严重影响模板的各项性能。

1.2 合金元素对切削性能的影响

合金元素加入到铁液中的作用是由于合金化,合金元素原子进入金属晶格,使晶格畸变,并使基体晶粒细化,晶界增多,两者都造成位错困难,使切削变形减少,更使切削抗力增大,切削性能变差。同时合金元素通过对石墨化、球化和孕育作用的影响而改变石墨含量、形状和尺寸等石墨特性,进而影响切削性能的作用比其通过改变金属基体产生的影响更重要。

(1)Cr元素在铁液中是强碳化物形成元素,只要含量Cr≥0.1%就会出现碳化物。如Cr≥0.2%时,碳化物含量会有5%~10%。Cr≥0.1%的碳化物见图1,Cr≥0.2%时网状碳化物见图2。

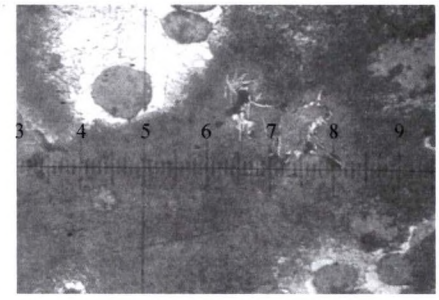


图1 Cr≥0.1%的碳化物
Fig.1 Cr≥0.1% carbide

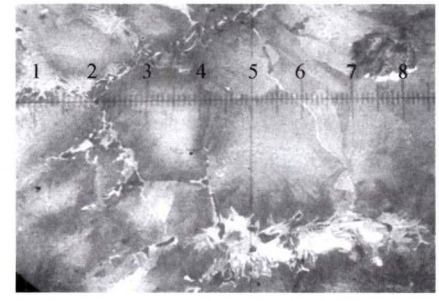


图2 Cr≥0.2%的网状碳化物
Fig.2 Cr ≥0.2% network carbide

由于这种碳化物偏析在共晶团边界,会形成网状分布的碳化物,切削时位错困难,使切削变形减少,切削抗力增大恶化切削加工性能。而且网状碳化物即使通过热处理也难以消除,同时还增加铁液的过冷倾向,形成白口组织,使切削加工困难。Cr元素也是模板中影响加工性能最显著的元素。

(2)Mo是形成碳化物能力较弱的元素,对石墨形态没有影响。加钼可使共晶团细化。当含量在0.1%~0.3%时,Mo有促进形成铁素体的作用,它使铁素体圈(牛眼组织)增厚,并使铁素体基体中的珠光体减少。当Mo含量增高时,则Mo的铁素体作用便与钼延缓奥氏体转变的作用抵消。当Mo含量在0.8%~1.0%时,则将抑制珠光体的形成,得到贝氏体或马氏体组织。由于贝氏体或马氏体组织硬度较高,加快刀具的磨损。

(3)Cu在共析转变时,促进并细化珠光体,可减少或完全抑制铁素体的形成,提高淬透性,改善模板

断面组织与性能的均匀性，同时对基体固溶强化，又不形成游离碳化物。随着含 Cu 量增加，其强度和硬度均相应增加，断后伸长率明显下降，给切削加工带来一定的困难，增加了刀具磨损。

1.3　微量元素对切削性能的影响

(1)部分微量元素对模板加工性能有着极大影响。低熔点微量元素偏析至枝晶间或共晶团间，凝固时易促成特殊组织形成。Sn 会在共晶团边界形成 $FeSn_2$，单独存在的 Sb、Bi、Pb 等，干扰球化的也会影响切削加工性能。

(2)Ti 在微量元素中被认为是对加工性能影响最大的有害元素。当 Ti>0.1%时，在模板中形成 TiC、TiN 等硬质点，其硬度很高，从而导致刀具磨损加快。Ti 元素含量过高一般是由于生铁或废钢的 Ti 量过高导致，而且一旦带入很难去除，因此必须选用 Ti 量低的炉料，使用铸件的 Ti 不高于 0.035%。

(3)V 是强烈形成碳化物元素，能形成 VC、V_2C、V_4C_3，在模板中形成硬质点，使模板的加工变得异常困难，同时加快了刀具磨损。

(4)Pb 在铁液中由于消耗了镁(与镁形成化合物)而形成开花状石墨、蠕虫状石墨、过冷石墨到片状石墨，加工后表面形成许多黑斑，从而影响铸件的表面外观质量和表面粗糙度。

2　组织结构与切削性能之间的关系

在模板的加工中，切削加工性与其物理和力学性能密切相关，其基本倾向为：①模板的强度、硬度高，则切削力大、切削温度高，切削加工性能变差；②模板的导热性低，则切削热难以散失，切削温度高，切削加工性恶化；③模板塑性过高，断屑困难，则不易获得良好的加工表面质量，切削加工性不良；④模板的脆性大，崩碎切屑会造成工作表面麻点，导致刀具磨损加快，对切削加工性能不利。

2.1　基体

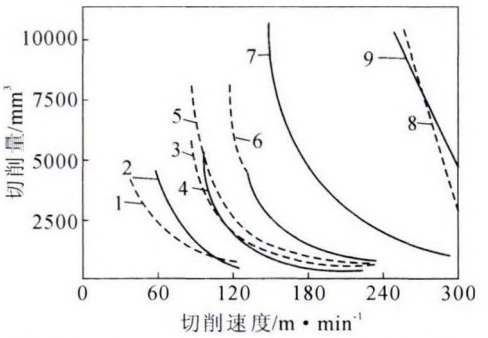
基体主要决定了模板的物理和力学性能，在宏观上决定模板的切削加工性能。铁素体的硬度低，切削时不易断屑，易粘刀形成积屑瘤。珠光体是铁素体与渗碳体相间的片状组织，强度较高，有好的切屑脆性，加工后的表面粗糙度较细。基体组织的硬度随合金化程度的增加而提高，珠光体除了分散度影响硬度外，它的结构形态亦有影响，粒状珠光体比片状珠光体硬度稍低。各种铸铁基体组织的显微硬度见表 1[1]。

一般而言，基体组织硬度增加时，切削加工的难度增加。至于加工表面的粗糙度，可以认为在铁素体和珠光体基体的范围内，随硬度的提高而变好。切削加工过程中模板的加工硬化倾向对切削加工性能影响很大，如果基体的抗滑移能力强，切削力又大，则材料在加工过程中将变得越发难以切削。球墨铸铁基体组织对切削性能的影响下图 3[2]。

表1 铸铁基体的显微硬度

Tab.1 Microhardness of cast iron matrix

基体名称	显微硬度值(HV)	基体名称	显微硬度值(HV)
铁素体	150～280	索氏体	350～380
高硅铁素体	350～450	屈氏体	400～450
粗片状珠光体	250～300	上贝氏体	350～450
细片状珠光体	300～350	下贝氏体	400～450



球墨铸铁基体组织对切削性能的影响及其与灰铸铁的比较

1- 针状组织灰铸铁(263 HBS)；2- 珠光体(体积分数为 80%)球墨铸铁(265 HBS)；3- 珠光体灰铸铁(225 HBS)；4- 珠光体(体积分数为 50%)-铁素体球墨铸铁(215 HBS)；5- 粗片珠光体灰铸铁(195 HBS)；6- 铁素体-珠光体(体积分数为 40%)球墨铸铁(207 HBS)；7- 铁素体球墨铸铁(183 HBS)；8- 铁素体灰铸铁(100 HBS)；9- 铁素体球墨铸铁(170 HBS)

图 3　球墨铸铁基体组织对切削性能的影响

Fig.3　Effect of matrix structure on Machinability of ductile iron

2.2　石墨

石墨的硬度很低(3 HBS)，是金属基体上的软塑相，易产生大的塑料变形，因此石墨含量增加时，铸铁材料的整体塑料提高，使其切削变形更容易，切削变形抗力减小。

石墨既是模板中的软相，又对加工刀具有润滑作用，并且石墨量多时有利于裂纹的扩展和切屑的断裂。石墨的自润滑性可提高切削效率和减少刀具磨损，但是石墨粗大时会显著影响加工表面的粗糙度。

2.3　硬质点

硬质点主要是一些高熔点的碳化物、氧化物和氮化物。表 2 列出了常见高熔点化合物的显微硬度[3]。这些存在于晶内的类圆形或角形的化合物，硬度明显高于模板本身。

模板中含有硬质点(SiO_2、Al_2O_3 等)时，对刀具的擦伤性大，可使切削性降低。材料的加工硬化性能越

表2 常见高熔点化合物的显微硬度
Tab.2 Microhardness of common high melting point compounds

化合物	显微硬度(HV)	化合物	显微硬度(HV)
SiO_2	800	MoC	2 250
$CaO·SiO_2$	400～600	W_2C	3 000
Al_2O_3	2000	WC	2 400
$FeO·Al_2O_3$	1 150～1 250	VC	2 800
$CaO·Al_2O_3$	930～1 100	TiC	3 200
Mo_2C	1 500	ZrC	2 600

高,切削加工性能越差,因为模板的加工硬度化性提高,切削力和切削温度增加,刀具被硬化的切屑划伤和产生边界磨损的可能性加大,刀具磨损加剧。

硬质点中 TiC 的硬度很高，当有 N 存在时,铸件中会同时生成 TiC、TiN 或 Ti(N、C)。TiC 和 TiN 是硬质合金刀具的刀头材料和表面喷涂材料,铸件中的 Ti 化合物无疑会伤害刀具。因此,在原材料废钢和生铁,Ti 被认为是影响切削加工性的不利元素而加以限制。

2.4 局部的白口和反白口

模板的边缘处或薄壁处由于冷却速度快,铁液结晶析出渗碳体。当铁液含硫量高、氧化较严重、碳当量低和孕育不足时,白口比较容易发生。与表层白口相反,反白口产生于铸件内部。稀土镁球铁凝固时,由于稀土的正偏析,在模板心部会产生白口;在大型厚壁模板内当锰含量过高时比较容易产生反白口。铁液含氢量高,凝固时氢富集于铸件心部,妨碍石墨化,也是反白口的个别原因。

2.5 未熔尽残留物

铁合金(如 FeMo、FeW、FeCr)加入粒度过大或孕育剂的粒度过大，未熔物残留于铸件表层或内部,造成局部过硬。

3 硬度与切削加工性能的关系

(1)硬度是判断模板加工性能和选择加工工艺参数最重要手段。模板的硬度愈高,切削与刀具前刀面的接触长度愈小,切削力与切削热集中于刀尖附近,使切削温度增高,磨损加剧。模板硬度对切削速度的影响见表 3[3]。

从表 3 可见,随模板的硬度升高,其切削加工性能则逐渐下降。如 QT500-7 的模板,当硬度值高于 215 HB 时,切削性能下降明显,这在实际加工中较为常见。

(2)硬度也只是一个反应模板加工性能的粗略指标,当模板组织均匀或存在少量弥散分布的碳化物时,其切削加工性能与硬度呈线性关系。在硬度基本相同的前提下,若模板组织中存在疏松,则其切削加工性能较组织均匀时明显下降，疏松越严重加工性能越差;若模板组织中存在块状碳化物,则其切削加工性能较存在弥散状碳化物时明显下降,若组织中出现网状碳化物,则其加工性能更加恶化。

表3 模板硬度对切削速度的影响
Tab.3 Effect of template hardness on cutting speed

硬度(HB)	刀具使用寿命为 30 min 时的切削速度(m/min)
170	247
183	174
207	131
215	110
265	73.2

4 铸造工艺对切削加工性能的影响

(1)开箱温度对模板的加工性能也会产生影响。模板的冷却速度在一定的条件下是由拆箱的早晚决定的。在拆箱过早时,温度过高,因而所生产的模板硬度较高,加工性能较差。研究发现,开箱温度越高,模板的加工性能越差。一般而言,开箱温度越高,基体组织中的珠光体含量越高,相当于基体组织中有了大量碳化物，这些碳化物增加基体组织的不均匀性,导致铸件加工性能变差。

(2)模板的模具面放置冷铁,用冷铁的方法加快模面的局部冷却，从而提高模面硬度和避免缩松缺陷出现，此时会在冷铁位置因冷却速度过快造成碳化物量上升,从而恶化加工性能。

(3)出铁温度越高,材质的均匀性越好,且硬度增加不明显。因此,提高出炉温度,可提高模板的加工性能。此外,不同的熔炼方式对模板的加工性能也有影响。电炉熔炼铸件要比冲天炉熔炼模板的硬度低,且电炉可以较好的控制铁液的化学成分,使模板有理想的力学性能和加工性能。

(4)孕育技术是提高模板强度的常用方法,常用孕育剂为硅基孕育剂，硅基孕育剂孕育形核机理一般认为依靠硅与氧形成二氧化硅晶核成为形核中心。由于二氧化硅的晶体结构与石墨的晶体结构相似,从而使碳以石墨的形式析出。随着凝固过程的进行,铁液中的硅的含量将大大减少,而硅影响共析转变温度，致使模板中的珠光体在不同的温度下形成,从而造成珠光体硬度不均,使模板的加工性能恶化。

近年来针对这一问题，在原来 75SiFe 基础上,开发了许多含钡、锶、锆、稀土以硅铁为基的孕育剂和硫氧孕育剂。钡、锶、锆、稀土这些元素可在凝固瞬间形成大量晶核，而不是依靠硅和碳的浓度起伏形

核，因此模板具有良好的均匀性，加工性能较用传统孕育剂所生产铸件的加工性能要好得多。

5　模板尺寸精度超差引起的切削问题

模板尺寸精度超差会造成加工余量波动和不均匀，加工余量偏大时，高速切削使刀具震动，加工余量偏小使刀具在铸件表面摩擦，都使刀具可使用时间下降。

尤其是大型模板，因砂型刚性不足等原因造成的模面中间凸起而造成加工余量的不稳定。这在越大的模板中越明显。大大增加加工工时，为此必须采取措施加强砂箱的刚性，尤其是底箱的刚性。

加工余量不均匀还常常由于加工定位基准不对引起，因此必须重视铸件定位基准面的质量，以及加工面与定位基准之间的位置尺寸。

6　热处理对模板切削加工性能的影响

(1)用热处理降低硬度过高的模板是提高模板切削加工性能的重要措施。如珠光体较高，通过退火可使珠光体分解成铁素体和石墨，硬度则下降，从而改善其切削性能。如将85%珠光体和15%的铁素体的模板加热至900 ℃后炉冷至690 ℃，保温5 h后再按模板的断面有效厚度尺寸继续保温600 min/25 mm，最后从炉内取出空冷。处理后的模板硬度可由原来的245 HB降至183 HB，经处理后切削速度可提高130%以上。

(2)对于某些硬度偏低的模板，如压铸机模板硬度低于170 HB时，则需要进行正火处理，增加其基体的珠光体量并提高其弥散度，从而提高模板的强度、硬度。但模板经正火处理后，因其基体以珠光体为主，则因硬度高会引起刀具磨损加快。由于组织不均匀所造成的硬度不均，也会给切削加工带来困难。

7　从熔炼入手，改善模板的切削加工性能

在废钢增碳生产中，微量元素的主要来源是废钢。优质的废钢是确保熔炼的开始。是保证基体组织和石墨形态的稳定性和均一性的基础。以下措施可供改善切削加工性能参考。

(1)合理选定模板的化学成分范围。尽可能提高碳当量，Mn、P、S等元素要控制在一个合理的上限，合金元素含量尽可能取下限。

(2)选用优质的高纯的生铁，慎用合金废钢，以严控有害元素含量。

(3) 炉前认真清渣以及未熔尽的残留物等，达到净化铁液的目的。

(4)选择粒度合理的高效孕育剂，认真作好孕育，增加共晶团数量，分散和弱化晶界偏析相的形成，并防止自由渗碳体的出现。孕育处理后要快速浇注，尽可能缩短从孕育处理到浇注之间的停留时间，增加随流孕育处理，以减少碳化物的形成。

(5)在厚壁铸件处需要加冷铁时，要合理确定冷铁的大小和厚度，避免渗碳体的产生。

(6)模板宜采用中低稀土含量和镁量适当的球化剂，切忌加入量过度，以免残余镁量和残余稀土量过多，且粒度不宜过大。选择粒度合理的长效孕育剂，认真做好孕育，增加共晶团数量，分散和弱化晶界偏析相的影响，防止渗碳体的出现。

8　结语

对模板的加工性能的影响最主要的因素是铸件组织结构均匀性、成分、碳化物数量及其分布等。模板的切削加工性能主要从切削力、刀具磨损、表面光洁度等方面进行衡量，但对模板切削加工性能至今没有有效的测试方法，也没有统一的评价标准，且对提高模板切削加工性能尚无有效方法。铸造工艺切削和加工工艺也对模板的切削加工性能有很大影响，但这些因素对模板的切削加工性能的影响缺乏系统地研究。模板的加工质量显著影响着注塑机或压铸机的性能，因而，国内机器的性能与国外发达国家相比仍有明显的差距。

参考文献：

[1] 钱立，张宏标. 石墨铸铁切削加工性能与组织的关系[J]. 现代铸铁，2005(6)，17-20.

[2] 中国机械工程学会铸造分会.铸造手册(第一卷). 铸铁(第2版)[M]. 北京：机械工业出版社，2006.

[3] 李旦. 机械加工工艺手册（第一卷). 工艺基础卷（第2版)[M]. 北京：机械工业出版社，2006.

精铸用

石英砂、石英粉、铝矾土、高铝砂

灵寿县德泰矿产品有限公司是一家专业从事非金属矿物的生产厂家，设备先进，技术力量雄厚。

让客户满意是我们的宗旨

化学成分			
石英砂	石英粉	铝矾土	高铝砂
SiO_2≥98.7%	SiO_2≥98.7%	Al_2O_3≥55%	Al_2O_3≥52%

地　址：河北省灵寿县洞里工业区
电　话：0311-82617801(传真)，15175156717
联系人：刘喜亮