

塑料模具材料及其热处理

赵步青

安徽嘉龙锋钢刀具有限公司 安徽马鞍山 243131

摘要: 塑料是重要的工程材料, 经过一定的温度、压力塑制成形, 因此对加工各种塑料制品的模具材料要求很严格, 经过精湛的热处理能提高模具的使用寿命。阐述了模具失效的主要形式, 提出了提高模具寿命的具体措施。

关键词: 塑料模具; 热处理; 硬度; 强度; 失效

Plastic mold material and its heat treatments

ZHAO Buqing

Anhui Jialong Steel Cutting Tool Co., Ltd., Ma' anshan, 243131, Anhui, China

Abstract: Plastic is an important engineering material, after a certain temperature, pressure plastic forming, so the processing of all kinds of plastic products mold materials are very strict, after exquisite heat treatment can improve the life of the mold. This paper expounds the main forms of die failure, and advances some concrete measures for increasing die life.

Keywords: plastic mold; heat treatment; hardness; strength; failure

1 序言

塑料是以合成树脂为主要原料, 加入各种添加剂, 经过一定的温度、压力塑制成形的合成材料^[1]。随着塑料工业的突飞猛进, 塑料模具的需求量急剧增加。为了适应模具制品尺寸日趋大型化、形状复杂化和表面装饰美观化的需求, 塑料模具正朝着大型化、复杂化和精密化的方向发展。塑料模具的制造水平及其使用寿命是衡量模具工业是否发达的风向标, 因此各国都很重视塑料模具的发展。

2 塑料模具对材料的要求

塑料制品的成形有注塑、压塑、挤压、压注和吹塑等多种方法, 所用的模具零件分为两大类: 一类是结构件, 包括浇注系统、导向件、定模板、

顶出机构件及支承件等; 另一类为成形件, 包括型腔、型芯、嵌镶件等, 这是直接成形塑料制品的关键部件。成形件结构复杂, 且要求尺寸精确、接缝密合和表面光洁, 因此使用的塑料模具材料必须具备如下性能。

- 1) 良好的耐磨性。
- 2) 镜面加工性能。
- 3) 耐蚀性好。
- 4) 足够高的硬度和强度。
- 5) 切削加工性能好。
- 6) 冷压性能好。
- 7) 耐热性能佳。
- 8) 尺寸精度高。要求模具材料淬火变形小, 视

作者简介: 赵步青, 高级工程师, 已发表论文和实用性文章共300余篇, 出版热处理专著6部, 协编图书3部, 研究方向为工模具热处理工艺开发研究, E-mail: zsg4272@163.com。

具体情况，作出成形模具是否进行深冷处理的决定。

9) 花纹图案光蚀刻性能好。

随着高速成形机械的呈现，塑料制品的生产速度加快。一般用于塑料成形的温度在200~350℃之间，但如果塑料流动性差，同时成形速度又快，则会使模具部分成形表面温度瞬时超过400℃^[2]。因此，为了保证模具在服役阶段精度及微小变形，要求模具不仅要有高的耐热性，还应有良好的导热性和较低的热膨胀系数，以减少温升。

GB/T 1299—2014《工模具钢》列出21个塑料模具钢牌号，可供选用，还有不少未列入标准的钢号，可根据工况和钢的特性，进行有针对性的选择。

3 塑料模具的热处理

3.1 碳素钢模具的热处理

碳素钢模具包括中碳钢和高碳钢制塑料模具。此类模具机械加工性能好，价格便宜，货源充足，广泛应用于制造形状简单的小型模具，热处理工艺包括以下3个方面。

1) 预备热处理。锻后等温退火：(760~780)℃×(2~3)h→(680~700)℃×(1~2)h，退火后硬度<200HBW。

2) 淬火有效厚度>20mm的模具淬火加热至790~810℃，水淬油冷，或选用有机溶剂冷却；中小模具淬火加热至780~800℃，在碱浴或硝酸盐溶液中冷却。

3) 在硝酸盐或空气炉中回火，(150~180)℃×(1~2)h，硬度58~62HRC。

3.2 渗碳钢塑料模具的热处理

国标列出了2CrNi13MoAl等4个牌号的低碳低合金钢，制作塑料模具常用的热处理工艺如下。

(1) 预备热处理 (850~870)℃×(2~3)h加热，炉冷至500℃出炉空冷，退火后硬度<217HBW；也可以低温退火，(660~680)℃×(2~3)h，炉冷至200℃空冷，退火后硬度<229HBW。

(2) 渗碳、淬火及回火 渗碳温度900~920℃，降温至850~860℃油冷，150~180℃回火后表面硬度58~62HRC，心部硬度>30HRC。

(3) 碳氮共渗及淬火回火 碳氮共渗温度840~860℃，油冷，150~180℃回火后，表面硬度>

58HRC。

3.3 冷挤压成形专用塑料模具钢的热处理

该钢的化学成分为 $w_C \leq 0.08\%$ 、 $w_{Si} \leq 0.20\%$ 、 $w_{Mn} \leq 0.30\%$ 、 $w_{Cr} = 3.50\%$ 、 $w_{Ni} = 0.50\%$ 、 $w_{Mo} = 0.40\%$ 、 $w_V = 0.12\%$ ，可以标号为0Cr4NiMoV，热处理工艺如下。

(1) 预备热处理 (870~890)℃×(2~3)h，炉冷至500℃出炉空冷，退火后硬度100~105HBW，可顺利地进行冷挤压加工。

(2) 渗碳淬火 (900~920)℃×(6~8)h，渗碳后降温至840~860℃油冷，(180~200)℃×2h回火后，表面硬度58~60HRC，心部硬度>28HRC，畸变很小。

3.4 预硬型塑料模具钢热处理

该类钢主要有3Cr2Mo(P20)等十多个牌号，大多用于高精密模具，供货原材料硬度28~42HRC，如改锻成塑料模具时，则需再处理，其工艺如下。

(1) 预备热处理 进行等温退火，退火后硬度<229HBW。

(2) 淬火 860~880℃加热油冷，淬火后硬度≥50HRC。

(3) 回火 580~600℃回火后，硬度35~40HRC。某厂用P20钢制造塑料模具，坯料在机械加工前先经调质处理，淬火加热温度为850~860℃，油淬后硬度50~54HRC，600~650℃回火后硬度28~36HRC。油淬后的金相组织如图1所示。组织与一般合金结构钢淬火后的金相组织雷同，为板条马氏体、片状马氏体的混合组织，残留奥氏体很少。经620℃回火后的组织如图2所示，组织为回火索氏体，硬度34HRC。



图1 P20钢经850℃加热淬火后的金相组织(500×)



图2 P20钢经850℃加热淬火、620℃回火后的金相组织 (500×)

(4) 化学热处理 成品模具可进行氮碳共渗等处理。

3.5 易切削预硬化型塑料模具钢热处理

这类钢与常见的预硬化钢相比，其C含量相应提高，并加入一定量的易切削元素S或S-Ca，预硬化后硬度虽高达40~45HRC，但仍可直接加工制模，且有较高的耐磨性。有较好的硫化物形态与分布，并不影响钢的镜面抛光性能，这类钢一般用于制造大中型模具，以下简称8Cr2MnWMoVS（简称8Cr2S）钢、5CrNiMnMoVSCa（5NiSCa）钢的热处理工艺。

(1) 8Cr2S钢的热处理 锻后采取等温球化退火，退火后硬度200~229HBW；870~890℃盐浴加热后，淬入240~260℃硝酸盐中，淬火后硬度61~64HRC，550~650℃回火后硬度40~48HRC；也可以低温160~180℃回火，得到62~64HRC的高硬度。金相组织为隐针马氏体+细针马氏体+残留奥氏体+未溶碳化物+硫化物相，如图3所示。600℃回火后的金相组织如图4所示。回火组织为回火索氏体，并有未溶碳化物和易切削相（灰色条状）。

(2) 5NiSCa钢的热处理 改锻后等温退火，(770~780)℃×3h，炉冷至(680~690)℃×(4~6)h，炉冷至500℃出炉空冷，退火后硬度210~220HBW，切削加工顺利。880~900℃盐浴加热，油淬后硬度62~64HRC，600~650℃回火后硬度35~45HRC。5NiSCa钢淬火后的组织为马氏体+少量未溶碳化物+残留奥氏体+易切削相。未溶碳化物为MC、M₂₃C₆、M₃C型，如图5所示。经600~650℃回火后为回火索氏体，如图6所示，硬度35~45HRC。



图3 8Cr2S钢经900℃加热淬火后的金相组织 (500×)



图4 8Cr2S钢经900℃加热淬火、600℃回火后的金相组织 (500×)



图5 5NiSCa钢经880℃加热淬火后的金相组织 (500×)



图6 5NiSCa钢经880℃加热、油淬、600℃回火后的金相组织 (500×)

3.6 时效硬化型塑料模具钢的热处理

这类钢C含量较低并含有Ni、Al、Ti、Cr、Mo等合金元素，一般先经固溶处理，在低硬度下加工成形后再进行时效处理，硬度升高至45~50HRC，

用于制造形状复杂、精度高及透明塑料的模具。国家标准列出5个牌号，现简介OONi18Co8Mo5TiAl钢的热处理工艺。

固溶处理温度 $810\sim 830^{\circ}\text{C}$ ，保温时间按 $1\text{h}/25\text{mm}$ 计，截面小于此尺寸也按 1h 计，固溶处理后硬度 $30\sim 35\text{HRC}$ ； $480^{\circ}\text{C}\times (3\sim 4)\text{h}$ 时效后硬度 $50\sim 52\text{HRC}$ 。

3.7 耐蚀性塑料模具钢的热处理

此模具用于成形过程中释放出来的有腐蚀气体的塑料模具，常用的有3Cr13钢、4Cr13钢、9Cr18钢、9Cr18MoV钢等，下面以4Cr13钢、9Cr18钢为例进行阐述。

(1) 4Cr13型马氏体耐蚀钢热处理工艺 $1050\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 加热油冷， $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ 回火后硬度 $50\sim 53\text{HRC}$ 。

(2) 9Cr18钢热处理工艺 $1040\sim 1080^{\circ}\text{C}$ 加热，油冷，淬火后硬度 $>55\text{HRC}$ ， $160\sim 200^{\circ}\text{C}$ 回火后硬度仍达 55HRC 以上。

3.8 无磁塑料模具钢的热处理

这类钢包括奥氏体不锈钢和高锰系奥氏体钢，代表性牌号有1Cr18Ni9Ti钢、7Mn15Cr2Al3V2WMo钢（简称7Mn15）。现简介这两种钢制塑料模具的热处理工艺。

1) 1Cr18Ni9Ti钢具有较高的抗晶间腐蚀能力，在各种状态下都能保持奥氏体组织，置于强磁场中不会产生磁感应。该钢的冷拉坯料退火温度为 970°C ，水冷；固溶处理温度为 $1030\sim 1060^{\circ}\text{C}$ ，水冷，组织仍为奥氏体； $800^{\circ}\text{C}\times 10\text{h}$ 时效，组织为奥氏体+碳化物，时效后强度和其他力学性能稍有提升，但硬度只有 $170\sim 200\text{HBW}$ 。为提高其耐磨性，可进行渗氮处理。

2) 7Mn15钢Mn含量很高，提高了奥氏体的稳定性，在时效过程中，C与V结合成高硬度的VC合金碳化物，提高了钢的硬度和耐磨性。7Mn15钢有强烈的加工硬化效应，为解决这个问题，可采取高温退火工艺： $(870\sim 890)^{\circ}\text{C}\times (3\sim 6)\text{h}$ ，炉冷至 500°C 出炉空冷，退火后硬度 $27\sim 30\text{HRC}$ ，退火后的显微组织为细晶粒奥氏体+均匀分布的颗状碳化物，从而改善了无磁钢的切削加工性。

7Mn15钢固溶处理： $1150\sim 1180^{\circ}\text{C}$ ，水冷，金相组织为奥氏体+未溶碳化物，硬度 $20\sim 22\text{HRC}$ 。

时效温度 $650\sim 700^{\circ}\text{C}$ ，硬度 $47\sim 49\text{HRC}$ 。若时效温度过低，则碳化物不能析出；若时效温度过高，则析出的碳化物会聚集长大，硬度急剧下降，产生过时效现象。

7Mn15钢塑料模具可实施 $560^{\circ}\text{C}\times (3\sim 4)\text{h}$ 的氮碳共渗处理，硬度可达 900HV 以上。

4 塑料模具失效的主要形式

用于塑料制品的成形模具大致有两种：热固性塑料压模和热塑性塑料注射模。前者工作温度一般在 250°C 左右，压力约 200MPa ；后者工作温度 $\leq 150^{\circ}\text{C}$ ，承受的压力和磨损比前者要大，并会产生有害的腐蚀性气体，对型腔有较大的压力和腐蚀作用。如果塑料制品的表面质量及尺寸精度达不到技术要求，就表明模具已经失效，具体表现如下。

1) 模具表面磨损失效。

2) 模具断裂失效。

3) 模具变形失效。

4) 模表表面或型腔受蚀失效。

5) 模具疲劳失效。模具在服役过程中因受到循环的机械载荷作用，型腔表面受脉冲拉应力作用，从而引起模具的破坏称为疲劳失效。

还有一些失效形式，比如崩块、擦伤等，虽少见，但也不能掉以轻心。

5 提高塑料模具使用寿命的措施

(1) 选好材用好材 世界上没有万能的材料适合制作所有的模具，一定要根据具体情况，有针对性地选择并施以相应的机械加工，最后进行正确的热处理。材料是基础，基础不牢地动山摇，建议从正规渠道采购，不要贪便宜买“地摊货”。

(2) 合适的表面硬度和硬化层 如碳素钢的表面硬度必须 $>54\text{HRC}$ ；渗碳钢的表面硬度 $>58\text{HRC}$ 、心部硬度 $>30\text{HRC}$ 、渗层深度 $>0.8\text{mm}$ ，以获得足够的变形抗力。需镜面抛光的模具表面硬度要求更高，因为塑料模具的抛光性是硬度的函数^[3]，硬度越高，抛光性能就越好。

(3) 模具设计与热处理相结合 为防止模具发生早期断裂，除在设计中注意凸台、圆角外，热处理加热温度不宜过高，回火要充分，以全方位地提高模具的韧性。

(4) 高的表面粗糙度 要求模具型腔的表面粗

(下转第92页)

(1) 去应力处理 对于强度较高、内应力较大的螺栓，镀前应按工艺要求进行充分回火处理，以减少螺栓的残余内应力，为后续镀锌做好准备。

(2) 改进工艺 双头螺栓酸洗和电镀工艺尤为重要，应加强对螺栓酸洗、电镀的控制，防止螺栓吸入过多的氢，减少渗氢量。在除锈和氧化皮时，尽量采用喷砂；若采用酸洗，需在酸洗液中添加缓蚀剂；在除油时，采用化学除油、清洗剂或溶剂除油，渗氢量较少；若采用电化学除油，则应先阴极后阳极；在电镀时，碱性镀液或高电流效率的镀液渗氢量较小^[3, 6]。

采用低氢扩散性和低氢溶解度的镀涂层替代酸洗镀锌工艺，以减少螺栓中渗氢量。在满足产品技术条件要求的情况下，可采用不会造成渗氢的涂层，如机械镀锌或采用达克罗涂覆层代替镀锌^[3, 6]。通过双头螺栓工艺改进，采用无渗氢涂层工艺，可从根本上避免氢脆的发生。

(3) 去氢处理 对于强度较高的螺栓，酸洗电镀后必须尽快进行去氢处理。

美国相关标准中对于石油和天然气工业用螺栓的要求：应在电镀后2h内在191~218℃（375~425°F）下至少烘烤8h。对于高强度螺栓，去氢保温时间还应加长。因此，在实际生产中，应该严格执行去氢处理工艺，必须在电镀后2h内执行去氢处理，时间至少8h。

（上接第88页）

糙度值 $Ra < 0.4\mu m$ ，以保证压制件美观大方、接缝密合、尺寸精度高，并易于脱模。

(5) 化学热处理 为了提高模具的耐磨性、耐腐蚀性等特殊性能，可施以必要的化学热处理，如渗氮、氮碳共渗、氧氮共渗及QPQ处理等。

6 结束语

1) 塑料模具对材料要求比较严苛，除对硬度、强度、切削性能有要求外，还对镜面抛光性能、耐腐蚀性、光刻性能也有较高要求。

2) 塑料模具的热处理应根据用材种类及模具服役情况，制定个性化的热处理工艺，将材料的潜能发挥到极致。

5 结束语

综合分析，得出如下结论，并提出相关建议。

1) 压裂双头螺栓为氢脆导致的沿晶脆断失效。

2) 压裂双头螺栓发生氢脆的主要原因是电镀工艺执行不到位。

3) 压裂双头螺栓涂层可采用低氢扩散性和低氢溶解度的镀涂层，以减少螺栓中渗氢量。

4) 压裂双头螺栓也可采用不会渗氢的涂层，如机械镀锌或达克罗涂覆层，避免螺栓发生氢脆。

5) 对于强度高、内应力大的压裂双头螺栓，镀前应进行充分回火处理，电镀后2h内必须进行去氢处理，时间至少8h。

参考文献：

- [1] 张栋. 机械失效分析实用分析[M]. 北京：国防工业出版社，1997.
- [2] 武扬. 氢损伤和滞后断裂[M]. 北京：冶金工业出版社，1998.
- [3] 黄平，周本金，陈端杰. 电镀过程中氢脆的控制[J]. 电镀与环保，2003，23（1）：10-11.
- [4] 钟群鹏，赵子华. 断口学[M]. 北京：高等教育出版社，2005.
- [5] 高宝奎，高德利. 钻柱使用寿命的不确定性分析[J]. 石油钻探技术，2003，31（5）：64-67.
- [6] 张忠诚. 电镀实用技术500问[M]. 北京：化学工业出版社，2007.

MW 20240321

3) 模具失效有多种形式，但都是首先从表面开始的，因此要做好“表面文章”，如渗碳、渗氮和QPQ热处理等。

4) 材料是基础，要提高模具寿命，选材用材是关键。

参考文献：

- [1] 王之泰. 非金属产品学[M]. 北京：中国物资出版社，1988.
- [2] 王德文. 提高模具寿命应用技术实例[M]. 北京：机械工业出版社，2004.
- [3] 任冬云. 模具制造手册[M]. 3版. 北京：化学工业出版社，2016.

MW 20240508