

热应力设计准则

V1.0

2021-06-21 发布

2021-06-21

目 次

1 范围	4
2 规范性引用文件	4
3 定义	4
4 热应力的生成原因、分类及影响	4
4.1 热应力的生成原因	4
4.1.1 内部原因	5
4.1.2 外部原因	5
4.2 热应力的分类	6
4.3 热应力的影响	7
4.3.1 热应力的危害	7
4.3.2 热应力的用途	8
4.3.3 残余热应力对钢的影响	8
4.3.4 残余热应力对淬火裂纹的影响	9
4.3.5 残余应力对塑料的影响	10
5 热应力的特点	11
6 热应力的影响因素	11
7 热应力的计算与仿真	13
7.1 简单工况热应力的公式计算	13
7.2 普通工况热应力的公式计算	14
8 热应力的测量	14
8.1 透明塑料热应力的测量	14
8.1.1 应力偏光检测的原理	14
8.1.2 应力偏光检测的优点	15
9 热应力的矫正与去除	16
9.1 自然时效	16
9.2 人工时效	17
9.2.1 热处理时效	17
9.2.2 敲击时效	17
9.2.3 振动时效	17
9.2.4 超声冲击时效	18
9.2.5 爆炸时效	18
10 热应力的运用	19
10.1 减法结构准则	19
10.2 加法结构准则	19

10.3 方向调节原则	19
10.4 消除温度差准则	19
10.5 自由膨胀准则	20
10.6 柔性准则	21
11 关于热应力的设计时需注意事项	22
11.1 产品结构方面	22
11.2 模具方面	23
11.3 成型方面	25
11.4 后处理方面	26
附 录 A 塑料的特征温度	27
附 录 B 热应力计算公式	28



前 言

温度改变时，物体由于外在约束以及内部各部分之间的相互约束，使其不能完全自由胀缩而产生的应力。又称变温应力。

当热应力大于钢材的弹性极限时会产生变形。燃煤锅炉省煤器磨损是锅炉运行中的一个突出问题，严重影响锅炉的安全性和经济性。据国内不完全统计，锅炉事故占火电厂事故的**50%**左右，其中因省煤器磨损漏泄而停炉的事故占锅炉事故的**45%**左右。

模具在进料注塑时温度高，在冷却成型时温度低，每隔**20s**到**50s**左右就进行一个循环，表面冷热交替而引起的模具表面压与拉交替变化的应力称为热应力，这种反复循环的热应力有可能引起模具疲劳产生热裂纹。

有一些胶需要高温固化，冷却的过程也是体积减小的过程，也会形成内应力一般称为热应力。热应力的大小取决于胶层与被粘材料的热胀系数之差和温度变化的幅度。因此高温固化会增加在冷却过程中形成的热应力。当固化温度高于胶层的玻璃化温度时，粘接强度随着固化程度的提高而提高；固化温度低于胶层的玻璃化温度时，粘接强度随着固化程度的提高而降低。

塑料材料由于具有高黏特性，所以一般在成型加工时都需要利用高温、高压、高剪切等加工条件，来有效降低塑料熔胶黏度至容易成型加工的范围，另外由于塑料具有低的热传导系数，是热的不良导体，所以在高温成型后需要长时间方能达到均匀温度冷却。然而现代塑料射出成型加工，一般为求高效益快速生产，所以对于射出成型周期都尽量缩短，而所对应射出成型条件就需要要求射速快、冷却时间短，而对于塑料成品而言过大速度差或不均匀冷却，往往会造成成品内部形成应力。塑料成型过程所产生的残留应力，除了会影响成品在使用上的强度外，尤其在某些二次后加工上都会造成问题。

总之，热应力会造成很多危害，酿造安全事故、造成巨额经济损失。为了提高青岛鼎信通讯股份有限公司、青岛鼎信通讯消防安全有限公司、青岛鼎信通讯科技有限公司及相关公司产品的防腐蚀水平和质量，特制订本标准规范，作为指导产品热应力设计的依据。

本标准由青岛鼎信通讯股份有限公司工程技术本部标准化小组起草。

热应力设计准则

1 范围

本规范用于指导青岛鼎信通讯股份有限公司、青岛鼎信通讯消防安全有限公司、青岛鼎信通讯科技有限公司及相关公司的热应力设计。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过在本规范中引用而构成本规范的条文。本规范在发布时，所示版本均为有效，其最新版本适用于本规范。

GB/T 16924-2008 钢件的淬火与回火

GB/T 7232-2012 金属热处理工艺

3 定义

温度改变时，物体由于外在约束以及内部各部分之间的相互约束，使其不能完全自由胀缩而产生的应力。又称变温应力。

4 热应力的生成原因、分类及影响

4.1 热应力的生成原因

塑料在塑化阶段即由玻璃态的料粒转化为粘流态，提供充模所需的熔体。在此过程中熔体在轴向、径向（相对螺杆而言）的温度差会使制品产生应力；另外，注塑机的注塑压力、注射速率等参数也会极大地影响充填时塑料分子的取向程度，进而引起应力不平衡而导致制品变形。

熔融态的塑料在注塑压力的作用下充入模具型腔并在型腔内冷却、凝固的过程是注射成型的关键环节。在这个过程中温度、压力、速度三者的相互耦合作用对注塑件的质量和生产效率均有极大的影响。较高的压力和流速会产生高剪切速率，从而引起平行于流动方向和垂直于流动方向的塑料分子取向有所差异，同时产生冻结效应。这种冻结效应将产生冻结应力而形成注塑件的内应力。

温度对注塑件变形的影响体现在3个方面：

- （1）注塑件上、下表面温度差会引起热应力和热变形；
- （2）注塑件不同区域之间的温度差将引起不同区域间的不均匀收缩；
- （3）不同的温度状态会影响注塑件的收缩率。

另一方面，注塑件在脱离型腔并冷却至室温的过程中多处于聚合物的玻璃态。脱模力不平衡，推出机构运动不平稳，或脱模顶出面积不当等均易使制品变形。同时在充模阶段和冷却阶段塑料分子产生的冻结会使注塑件脱模后的内应力因失去外界约束而以变形的形式释放出来，导致制品翘曲。

消除制品应力变形缺陷，首先在模具设计阶段就必须考虑到填充过程中收缩的影响，特别是收缩不均衡的影响。熔融的塑料在注射充模阶段由于其分子沿流动方向取向而使得熔料在流动方向的收缩率比垂直方向的收缩率大，使注塑件产生收缩应力而发生变形。结晶性塑料在流动方向与垂直方向的收缩率之差较非结晶性塑料大，而且其收缩率也较非结晶性塑料大。结晶性塑料的较大的收缩率与其收缩的异向性叠加后导致注塑件变形的倾向较非结晶性塑料大得多。所以在设计注塑件和计算模具的成型尺寸时，必须优先考虑到收缩引起应力不均衡的因素，收缩率的选取应根据注塑件原料的性质、制品形状不同而给出合适的数值。

4.1.1 内部原因

工件在加热和冷却过程中，由于表层和心部的冷却速度和时间的不一致，形成温差，就会导致体积膨胀和收缩不均而产生应力，即热应力。在热应力的作用下，由于表层开始温度低于心部，收缩也大于心部而使心部受拉。当冷却结束时，由于心部最后冷却体积收缩不能自由进行，而使表层受压、心部受拉。即在热应力的作用下最终使工件，表层受压、而心部受拉。

剪切流动造成的流动应力。

(1) 剪切流动：剪切流动是熔融流体在外力下的相对滑动，如下图所示。

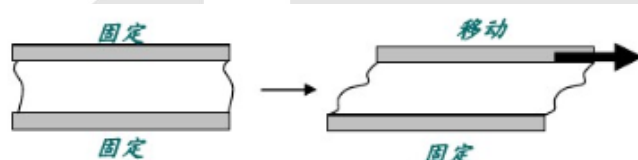


图1 剪切流动

(2) 剪切速率：剪切速率是熔融流体剪切流动的速率，如下图所示。

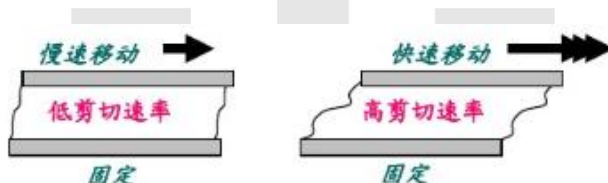


图2 剪切速率

(3) 剪切应力：剪切应力是熔融流体剪切流动的抵抗力，高粘度造成高剪切应力，如下图所示。



图3 剪切应力

4.1.2 外部原因

(1) 构建整体受热而受到外部约束：

最常见的是管子及其它圆筒形元件沿长度方向的膨胀受到约束，而在元件内产生压缩热应力。这类热应力可以通过解除外部约束而减小以至消除。

(2) 两个以上零件组成的系统, 因为各部分温度不同引起的热应力: 锅壳锅炉及列管式换热器都有这种情况。

(3) 两种不同线膨胀系数的钢材焊接或用其他方式刚性连接在一起, 因相互膨胀不同而引起的热应力: 大型锅炉受热面的支吊结构常有这种情况。

4.2 热应力的分类

(1) 热应力是指半成品干燥和烧成热加工中, 由于温差作用而产生的一种应力。热应力源包括升降温过程中砖坯内外及砖坯与环境温差。

(2) 凡由于在搪玻璃材料中存在温度差而产生的应力称为热应力。搪玻璃设备, 其瓷层表面不仅要具有玻化程度适当, 光滑平整致密, 色泽均匀一致以及无棕孔、泡影, 外来固体夹杂物, 尤其不能有裂纹等缺陷。但是, 事实上, 在搪玻璃设备的烧成过程中, 常常会出现各种缺陷, 其中瓷层裂纹是该厂搪玻璃产品中危害最大的一种缺陷。但在实际生产过程中, 内壁瓷层常出现裂纹, 并且裂纹一旦产生, 就不能消除, 最后只有打瓷返工, 造成了大量的人力、物力浪费, 并且, 严重挫伤了工人的生产积极性。

(3) 在铁胎制造过程中, 由于卷板、冲压、组焊等操作所造成的应力。

(4) 钢材加热膨胀迅速冷却到低温收缩所产生的内应力称为热应力。当热应力大于钢材的弹性极限时会产生变形。

火焰矫正就是利用热应力产生变形而得到矫正。

(5) 模具表面冷热交替而引起的模具表面压与拉交替变化的应力称为热应力。这种反复循环的热应力有可能引起模具疲劳产生热裂纹。

(6) 冷却的过程也是体积减小的过程也会形成内应力一般称为热应力。热应力的大小取决于胶层与被粘材料的热胀系数之差和温度变化的幅度。因此高温固化会增加在冷却过程中形成的热应力。

指出当固化温度高于胶层的玻璃化温度时, 粘接强度随着固化程度的提高而提高; 固化温度低于胶层的玻璃化温度时, 粘接强度随着固化程度的提高而降低。

(7) 圆筒体内外壁温差所引起的热应力

当传热由圆筒体内表面向外表面进行时, t_i (内表面温度, 下同) $> t_o$ (外表面温度, 下同), 壁面中热应力的分布如图a所示。锅壳锅炉中炉胆、烟管等壁面内热应力分布规律即是如此。

当传热由圆筒体外表面向内表面进行时, $t_o > t_i$, 壁面中热应力的分布如图b所示。水管锅炉各种受热面管中热应力分布规律即是如此。

不难看出, 无论是承受内压或外压的传热元件, 在内表面处, 其热应力和承压引起的应力都是同号叠加的; 而在外表面处, 热应力和承压引起的应力则是互相抵消的。

由于在圆筒体内外表面热应力较大, 且在内表面热应力与承压引起的应力相互叠加, 所以在分析热应力时, 总是对圆筒体内外表面特别是内表面的热应力最重要。

当传热由圆筒体内表面向外表面进行时, $t_i > t_o$, 壁面中热应力的分布如下图所示。

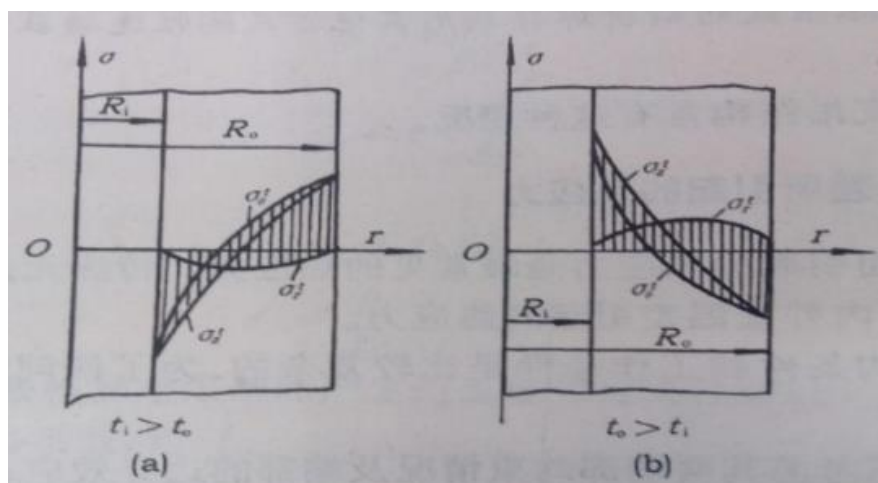


图4 壁面中热应力分布图

可以看出，圆筒体沿径向存在着稳定热传导时，壁面内热应力的大小取决于以下因素：

（1）钢材性能，包括线膨胀性能、弹性变形性能和导热性能等。钢材线膨胀系数小、弹性模量小且导热系数大时，其热应力就小；钢材线膨胀系数大、弹性模量大且导热系数小时，其热应力就大。因此也称复合量 $\alpha E/\lambda$ 为材料的热因子。

（2）传热负荷。传热负荷越强，壁面中热应力越大；传热负荷越弱，壁面中热应力越小。

（3）圆筒元件壁厚。壁厚的大小体现了元件内部相互约束的强弱，也在一定程度上体现了传热热阻及传热温差的大小。壁厚越厚，元件内部约束越强，传导同样的热量需要的温差越大，相应的热应力也越大。

4.3 热应力的影响

残余热应力是指工件经热处理后最终残存下来的应力，对工件的形状、尺寸和性能都有极为重要的影响。

4.3.1 热应力的危害

（1）产生应力痕：

热应力反应在塑料制品外观上所产生的痕迹称之为应力痕，如下图所示，一般发生在拐角处或流速大的地方。



图5 产品外观面应力痕

（2）开裂：

因为应力的存在，在受到外界作用后，如移印时接触到化学溶剂或者烤漆后端时高温烘烤，会诱使应力释放，超过材料的强度极限时就会使工件开裂。开裂主要集中在浇口处或过度填充处。

（3）翘曲及变形：

塑件成型过程中冷却的不均匀和过多的保压压力残余等，都会产生内应力，因为残留应力的存在，因此产品在室温时会有较长时间的内应力释放或者高温时出现短时间内残留应力释放的过程，同时产品局部存在位置强度差，当它超过材料的屈服强度时，产品就会在应力残留位置产生翘曲或者变形问题。

内应力塑性变形有很明显的特征：

①变形常带有明显的方向性。

②内应力塑性变形通常不会改变注塑件的体积大小，只改变零件的外形结构和形状。按应力产生的根源和表现特征的不同，分为热应力塑性变形（冷却的不均匀）和组织应力塑性（过多的保压压力残余）变形，如下图所示。

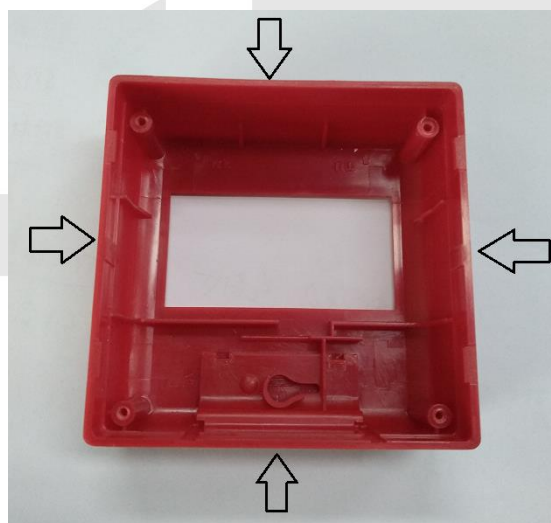


图6 注塑件四周侧壁向内凹陷变形

（4）产品尺寸变化：

因为应力的存在，在产品放置后或处理的过程中，如果环境达到一定的温度，产品就会因应力释放而发生变化。

4.3.2 热应力的用途

但在一定条件下控制应力使之合理分布，就可以提高零件的机械性能和使用寿命，变害为利。分析钢在热处理过程中应力的分布和变化规律，使之合理分布对提高产品质量有着深远的实际意义。例如关于表层残余压应力的合理分布对零件使用寿命的影响问题已经引起了人们的广泛重视。

4.3.3 残余热应力对钢的影响

当冷却速度愈快，含碳量和合金成分愈高，冷却过程中在热应力作用下产生的不均匀塑性变形愈大，最后形成的残余应力就愈大。另一方面钢在热处理过程中由于组织的变化即奥氏体向马氏体（马氏体和奥氏体的不同在于，马氏体是体心正方结构，如下图所示，奥氏体是面心立方结构，如下图所示。奥氏体向马氏体转变仅需很少的能量，因为这种转变是无扩散位移型的，仅仅是迅速和微小的原子重排。马氏体的

密度低于奥氏体，所以转变后体积会膨胀。相对于转变带来的体积改变，这种变化会引起切应力、拉应力。转变时，因比容的增大会伴随工件体积的膨胀，工件各部位先后相变，造成体积长大不一致而产生组织应力。组织应力变化的最终结果是表层受拉应力，心部受压应力，恰好与热应力相反。组织应力的大小与工件在马氏体相变区的冷却速度，形状，材料的化学成分等因素有关。



图7 低碳马氏体晶粒呈一定角度相交，放大1万倍

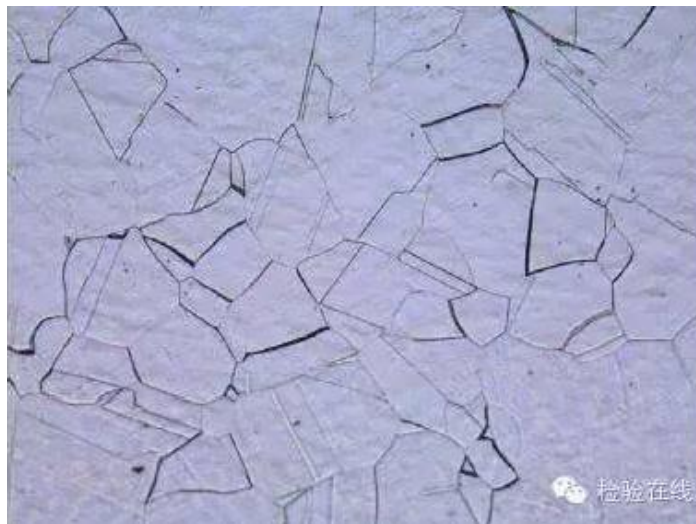


图8 奥氏体，放大200倍

实践证明，任何工件在热处理过程中，只要有相变，热应力和组织应力都会发生。只不过热应力在组织转变以前就已经产生了，而组织应力则是在组织转变过程中产生的，在整个冷却过程中，热应力与组织应力综合作用的结果，就是工件中实际存在的应力。

这两种应力综合作用的结果是十分复杂的，受着许多因素的影响，如成分、形状、热处理工艺等。就其发展过程来说只有两种类型，即热应力和组织应力，作用方向相反时二者抵消，作用方向相同时二者相互迭加。不管是相互抵消还是相互迭加，两个应力应有一个占主导因素，热应力占主导地位时的作用结果是工件心部受拉，表面受压。组织应力占主导地位时的作用结果是工件心部受压表面受拉。

4.3.4 残余热应力对淬火裂纹的影响

存在于淬火件不同部位上能引起应力集中的因素（包括冶金缺陷在内），对淬火裂纹的产生都有促进作用，但只有在拉应力场内（尤其是在最大拉应力下）才会表现出来，若在压应力场内并无促裂作用。

淬火冷却速度是一个能影响淬火质量并决定残余应力的重要因素，也是一个能对淬火裂纹赋予重要乃至决定性影响的因素。为了达到淬火的目的，通常必须加速零件在高温段内的冷却速度，并使之超过钢的临界淬火冷却速度才能得到马氏体组织。

就残余应力而论，这样做由于能增加抵消组织应力作用的热应力值，故能减少工件表面上的拉应力而达到抑制纵裂的目的。其效果将随高温冷却速度的加快而增大。而且，在能淬透的情况下，截面尺寸越大的工件，虽然实际冷却速度更缓，开裂的危险性却反而愈大。这一切都是由于这类钢的热应力随尺寸的增大实际冷却速度减慢，热应力减小，组织应力随尺寸的增大而增加，最后形成以组织应力为主的拉应力作用在工件表面的作用特点造成的。并与冷却愈慢应力愈小的传统观念大相径庭。对这类钢件而言，在正常条件下淬火的高淬透性钢件中只能形成纵裂。

避免淬裂的可行原则是设法尽量减小截面内外马氏体转变的不等时性。仅仅实行马氏体转变区内的缓冷却不足以预防纵裂的形成。一般情况下只能产生在非淬透性件中的弧裂，虽以整体快速冷却为必要的形成条件，可是它的真正形成原因，却不在快速冷却（包括马氏体转变区内）本身，而是淬火件局部位置（由

几何结构决定），在高温临界温度区内的冷却速度显著减缓，因而没有淬硬所致。产生在大型非淬透性件中的横断和纵劈，是由以热应力为主要成份的残余拉应力作用在淬火件中心，而在淬火件末淬硬的截面中心处，首先形成裂纹并由内往外扩展而造成的。

为了避免这类裂纹产生，往往使用水—油双液淬火工艺。

在此工艺中实施高温段内的快速冷却，目的仅仅在于确保外层金属得到马氏体组织；而从内应力的角度来看，这时快冷有害无益。这是因为：

马氏体体积大，产生拉方向上的组织应力，抵消了冷却产生的压热应力。产品表面无论受压应力，还是拉应力，对钢材质来说都可以承受较大的数值，并且钢在承受压应力时更不容易破坏。但是钢材质表面最怕表面承受交变载荷，所以当零件表面会承受载荷时，事先让其表面承受压应力，最好初始压应力大于外力产生的拉应力，这样产品虽然受交变载荷左右，但是表面只受压应力，对产品是巨大的保护。

其次，冷却后期缓冷的目的，主要不是为了降低马氏体相变的膨胀速度和组织应力值，而在于尽量减小截面温差和截面中心部位金属的收缩速度，从而达到减小应力值和最终抑制淬裂的目的。

4.3.5 残余应力对塑料的影响

塑料成型过程所产生的残留应力，

（1）影响成品在使用上的强度外，尤其在某些二次后加工上都会造成问题。

（2）成品的外观、尺寸、变形及翘曲问题，由于剪切流动造成分子链的排向或是由于成品几何造成流动的定向效果，在成品脱模时容易因应力松弛而造成尺寸发生变形，另外由于成品尺寸的不对称性或在成品厚度方向冷却收缩的不平衡性，所形成的热应力都将造成成品在脱模后发生翘曲变形现象，如下图所示。此现象对于尺寸精密度有要求或有组装搭接性需求之塑料射出成品，将会是一大问题。

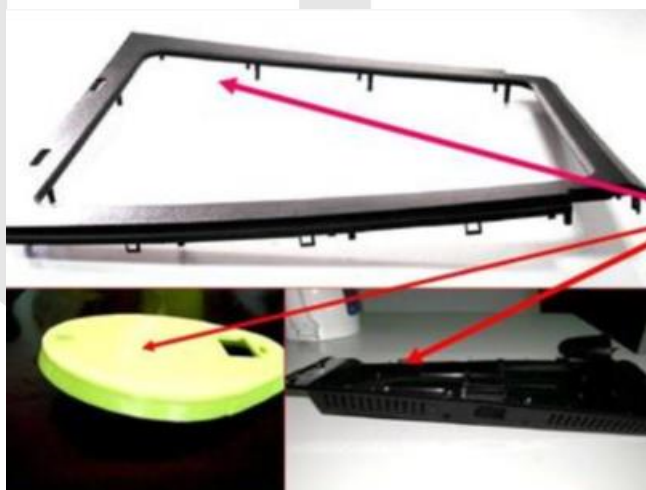


图9 产品翘曲变形

（3）加速环境应力破坏。塑料件在使用上比例最高的破坏型式，当属环境应力破坏—例如太阳UV光照射破坏、老化破坏、气候性干湿冷热循环破坏等等，对此塑料残留应力也会造成环境应力破坏的加速。

（4）加速蠕变性破坏、疲劳性破坏等。因为残留应力存在而加速加快其破坏产生。

（5）容易因为外界给予能量或驱动力来产生应力松弛效果。

在塑料成型业中最常见用来消除塑料内部残留应力之方法，即是退火程序，即是将塑料成品放入烘箱中或给于所需热量，使定向分子链获得能量而能再次去相互重排以达到最低能量之稳定结构，而应力松弛的驱动力除了热能外，机械能、光能、化学能（溶剂作用）都可以达到同样效果。

然而在应力松弛同时也要考虑成品尺寸变形之严重性。

一般残留内部应力常常会造成成品在使用上或二次加工上发生问题，例如表面接着、表面电镀或表面涂装等工法，都会因为成品表面高度分子定向之高应力情况，而产生接口的不兼容性。另外如接触到溶剂、化学品等也会造成在应力区域的加速劣化。

（6）影响透光材料的透光性。有应力集中的地方，折射率会不同，影响导光。

5 热应力的特点

（1）热应力随约束程度的增大而增大。由于材料的线膨胀系数、弹性模量与泊松比随温度变化而变化，热应力不仅与温度变化量有关，而且受初始温度的影响。杆件中的热应力与弹性模量 E ，热膨胀系数 α 以及温度变化 ΔT 成正比。在小温度的情况下， E 与 α 随温度的变化可以忽略，结构的热应力随温度变化而增加，这是一般热应力问题的特点。

（2）热应力与零外载相平衡，是由热变形受约束引起的自平衡应力，在温度高处发生压缩，温度低处发生拉伸形变。

（3）热应力具有自限性，屈服流动或高温蠕变可使热应力降低。对于塑性材料，热应力不会导致构件断裂，但交变热应力有可能导致构件发生疲劳失效或塑性变形累积。

6 热应力的影响因素

（1）铸件或注件厚薄不同产生热应力。厚（粗）处产生拉应力，厚薄相差越大，热应力越大。

（2）厚大断面的铸件或注件冷却后，外层存在压应力（冷却快），心部是拉应力（冷却慢），如下图所示。

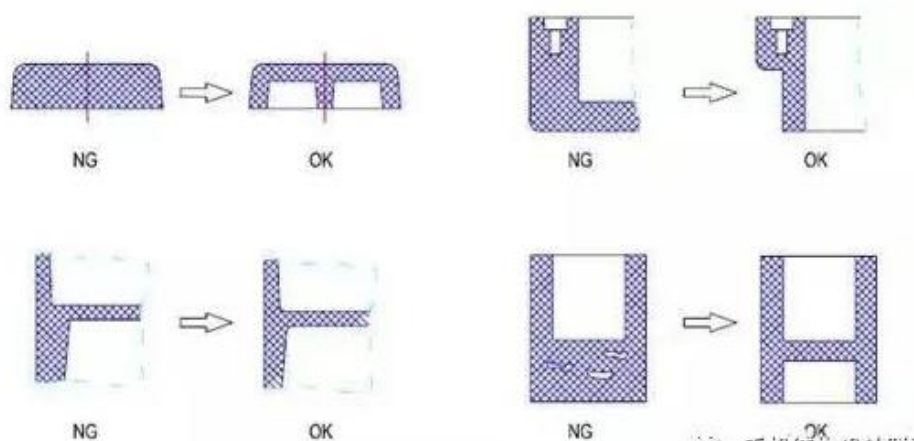


图10 不同断面的铸件或注件优化结构

（3）材料固态线收缩越大，热应力越大。三个阶段变化：

高温阶段：均匀塑变，粗细均为塑性变形；

中温阶段：细处或外侧先冷，发生弹性变形，粗处或里侧后冷，发生塑性变形，弹性变形可以被塑性变形抵消一部分；

低温阶段：均是弹性变形，但温度不同，变形量不一致，导致残余应力的产生；

结果：残余应力的分布情况：细处或外侧先冷的最后被压缩，粗处或里侧后冷被拉伸。

（4）生产、加工工艺问题：塑料材料由于具有高黏特性，所以一般在成型加工时都需要利用高温、高压、高剪切等加工条件，来有效降低塑料熔胶黏度至容易成型加工之范围，另外由于塑料具有低的热传导系数，是热的不良导体，所以在高温成型后需要长时间方能达到均匀温度之冷却。然而现代塑料射出成型加工，一般为求高效益快速生产，所以对于射出成型周期都尽量缩短，而所对应之射出成型条件就需要要求射速快、冷却时间短，而对于塑料成品而言过大之速度差或不均匀冷却，往往会造成成品内部形成应力。

所谓塑料残留应力就是指塑料成品在经过制造或成形过程后，在无外力作用下或无温度梯度存在时，物体内部仍维持承受应力之状况。通常塑料件常见之内部应力可分为两种，一种是剪切流动造成之流动应力，另一种是冷却收缩所造成之热应力。塑料材料在成型过程中会因为高剪切作用造成分子链接构的高度定向现象，此种是属于熔胶剪切流动所形成之应力，另外则是因不均匀之冷却造成成品内分子链的不均匀收缩，当成品温度快速冷却到塑料的Tg以下时，冷却收缩造成分子链间应力无法完全释放，此种是属于冷却所形成之应力。

（5）结晶性材料之不平衡结晶作用或是模穴压力对不同位置分子链之不同影响都会形成残留应力。所以，所谓残留应力就是指在塑料成型过程中，造成分子结构不是处在最低能量之最稳定状态，分子链受到流动定向影响或是受到周围分子链之拘束，而呈现不稳定之高能态，所以一旦有外界能量给于此受应力作用之分子链，则此分子将极易释放出应力而达到其最稳定之组态。在一般塑料射出成型加工过程中，由成品厚度方向来观察，可以发现成品可依分子链之微观结构差异，来区分不同之区域，如下图所示。

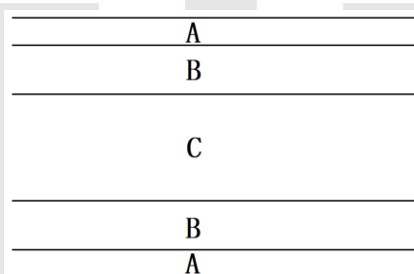


图11 塑料射出时，胶体的分层状态

其中，A层是固化层，B层是流动高剪切层，C层是熔胶流动层，A层为塑料充填时紧贴两侧模壁，瞬间冷却固化的高分子链定向层，此部分会因为射出成型之喷流效应，而使分子链排向方向与流动方向相反，而B层是塑料充填时紧靠A层固化层的高剪切区域所形成的分子链定向层，由于与A层具有最大之速度差，所以会形成最大之剪切流动应力效果，塑料充填结束时本区定向层尚未完全凝固，而外层之A层固化定向层有绝热效果，使B层热散失不至过快，另外由于高剪切作用会产生剪切加热作用，所以本区也是温度最高之区域。而C层因熔胶高温及冷却时间足够，分子链有足够时间松弛定向，故无高分子链定向行为，高分子链彼此之间较无剪切作用现象，若产品厚度有变化，则主要会影响C层厚度，若是薄件成品则C层的厚度将会变小。

除了在成品厚度方向上下表面有一薄层固化层外，大部分区域是属于熔胶流动层，而这区域主要之内部应力形成是由于不均匀冷却造成，塑料件厚度方向之冷却是由与模壁接触之成品表面开始向成品内部延伸，所以中心层是最慢冷却之位置。所以当塑料成品成型后，开始进行冷却阶段时，在某一特定位置上之

分子链会受到其外部已冷却收缩之分子链牵引，所以会感受到早先冷却收缩之分子链的拉伸应力。所以严格来看在成品厚度方向靠近表面之区域，分子链是处在压缩应力状况，而内部区域是处于拉伸应力状况。

7 热应力的计算与仿真

求解热应力，既要确定温度场，又要确定位移、应变和应力场。

与时间无关的温度场称定常温度场，它引起定常热应力；随时间变化的温度场叫非定常温度场，它引起非定常热应力。

热应力的求解步骤：

- ①由热传导方程和边界条件（求非定常温度场还须初始条件）求出温度分布；
- ②再由热弹性力学方程求出位移和应力。

三维热应力数学模型物体温度变化时，由于它受其他物体或者由于物体内部各部分之间的相互约束而产生的应力，称为热应力。引起热应力的根本原因是温度变化。根据线性热应力理论，当物体受外力作用，又受温度作用时，物体内部质点就要发生位移和相应的应变，并且它们可以进行代数迭加。

7.1 简单工况热应力的公式计算

两端固定的杆件受热时的热应力。

长度为 l 、横截面为 A 的杆件，两端被固定在两个刚性壁之间，杆件材料的热膨胀系数为 α ，弹性系数为 E ，杆件的温度由 T_1 增加至 T_2 ，求杆中的热应力，如下图所示。

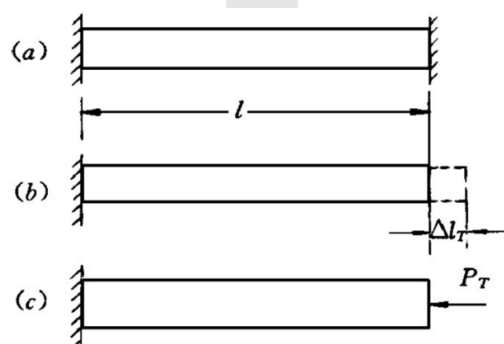


图12 两端固定杆件的热应力计算示意图

温度由 T_1 升至 T_2 因膨胀而产生的杆件伸长为

$$\Delta l_T = \alpha l (T_2 - T_1) = \alpha l \Delta T$$

温度升高，杆件受到压力 P_T 的作用，由 P_T 产生的杆件的缩短为

$$\Delta l_p = -P_T l / (EA)$$

由杆长不变（ $\Delta l_T + \Delta l_p = 0$ ），得 $P_T = EA \alpha \Delta T$ 。

因此，杆件的热应力为

$$\sigma^T = -E \alpha \Delta T$$

α — 因材质、温度的变化而变化，对于碳钢，在温度为 $20 \sim 200^\circ\text{C}$ 时，可取 $\alpha = 1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

7.2 普通工况热应力的公式计算

见附录。

8 热应力的测量

8.1 透明塑料热应力的测量

平面显示器、导光板、背光板、光纤连接器、光波导、塑料光学镜片、精密微小射出成型产品等，透明性塑料材料占了相当大的比重，例如PMMA、PC、mCOC等都是经常被使用到的透明性塑料，然而对于透明性塑料在成型过程中，因加工条件设定所衍生残留应力问题也越来越受加工业者注重，此主要是因会残留应力除了会影响塑料件尺寸精度要求，同时也会造成光学特性的改变，另外对于后续加工，例如涂布、电镀等制程都会造成严重影响。所以如何观测塑料光学产品之内部残留应力，是目前光电产业上相当重要之技术。

对于光电产业常使用之透明性塑料材料而言，目前最简易可用来观察材料内部残留应力之方法，就是使用穿透式应力偏光仪，有些物质（如玻璃、塑料、环氧树脂）通常是不发生双折射的，但当它们内部有应力时，就会出现双折射现象。当光线穿透具双折射率材料时，光在材料内进行的速度也会不同。双折射是指一条入射光线产生两条折射光线的现象。

下面左图显示：主截面：包含晶体光轴与界面法线的平面。主平面：包含光轴及所考察光线的平面。

说明：主截面的方位由晶体自身特性决定，且始终垂直于晶体的表面；一般情况下，o主平面与e主平面是不重合的。

下面右图表示双折射实例图。

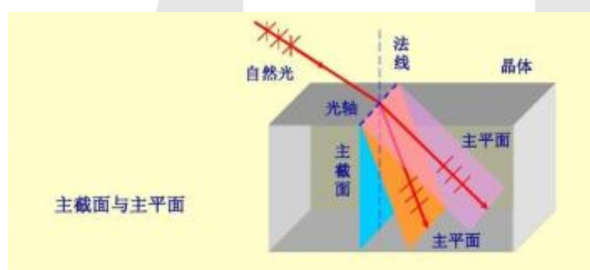


图13 双折射原理图

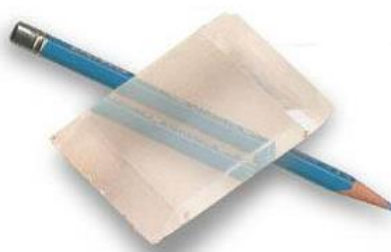


图14 双折射实例图

8.1.1 应力偏光检测的原理

光同时具有粒子及波动之特性，所以光波可在真空中传递是属于电磁波之一种，光的产生是由电荷振动所释放之辐射波。然而由于光可以向四面八方照射，所以若以自然光来做一些如干涉、绕射等分光光谱观测时，将会因为各方向光波的互相干扰而无法辨识。因此为便于光谱观测及便于以简单数学方程式来表示，所以一般常用单方向之光波来作为光源，而所谓单方向光源则是利用将白光光源，通过一单方向之光学偏光片，使其通过之光波都固定在一特定方向上。我们可以简单拿两片光学偏光片依前后放置在一白光光源前，当白光通过第一片偏光片时已成一单方向光波，若旋转第二片偏光片观察时，将会发现当两片偏光片成平行时，可见到白光通过；但若两片成垂直时，则呈黑暗无光线通过。

塑料是由长度很长之高分子链所组成，所以就微观角度而言，在分子链平行与垂直方向所表现之特性并不一致，此就是高分子链的异方向特性，然而就整体高分子材料而言，因分子链间相互纠缠成一团状结构，所以单一分子链之异方向特性将不易被察觉；然而若因塑料材料在加工时所形成之应力，将造成分子

链之高度定向作用，则塑料材料之异方向性将会显现，利用材料内部应力产生之双折射率，可用来观察入射光因前进速度之差异所产生之相位差干涉条纹，藉此来反推内部应力之分布情形。

利用应力偏光仪来观察透明塑料成品之分子结构定向问题和应力变化情况，主要是将塑料透明件产品或试片置于两片正交之偏光塑料片之中，藉由塑料双折射现象及光弹特性而使白色光源经偏光片后通过后形成彩色明暗条纹，由所显示之条纹形式及色彩，可以对应到观测塑料件内部的残留应力大小，通常条纹密度越高部分将对应于塑料件残留应力较高之区域。另外也可藉由彩色条纹之产生位置来做定量计算以求得成品之应力值。

在存有应力之塑料材料中，在特定平面上可将应力分成两个主轴应力，此不均匀之应力将使材料产生两个不同的折射率。因此光要通过此材料时，沿二个主应力方向振动的光波彼此有不同的速率，穿出材料时，则会有相对速度差产生。而此相位差将正比于平面上的两个主轴应力之差值。所谓应力光学定律是指一透明塑料材料当受应力时，其折射率会随着所受应力变化而改变，当物体的应力状态和光交互作用，则可由光弹条纹可推知物体的应力状态。

当偏极光进入有应力作用之双折射材料时，光线会分为较快速及较慢速两光束，其速度差相对距离则称为相位差或迟延。在单色的光弹条纹中，粗线的地方代表该点之主应力方向与 x 轴（或 y 轴）平行。因此两道光之相位差为整数波长，因而造成光场之明暗条纹。

光场条纹可以肉眼观察，条纹越密集的地方，表示应力愈大，亦即是应力集中的地方，也是材料发生破坏时最先开始之处。其折射率之差与所受之应力程度成正比。

若将透明试片置于两片正交之偏光板间，可观察到较无散射之彩色光环，有较多区域呈现黑暗颜色，即分子结构较无残留应力存在。

$$D_n = n_1 - n_2 = A (s_1 - s_2) \dots\dots\dots (1)$$

$$R = (s_1 - s_2) \cdot t' \quad A = Dn' \quad t = nl \dots\dots\dots (2)$$

式（1）及式（2）是应力偏光观测主要之理论计算公式，式中：

D_n ：表示透明材料之双折射率，

s_1 与 s_2 ：表示材料之两主轴应力值，

A：是材料之光学应力常数，

t：是光前进之材料厚度距离，

R：则是两不同速度光线之相位差。

由应力偏光观测所得之干涉光谱条纹，可利用式（1）及式（2）计算出材料之双折射率及应力值。

8.1.2 应力偏光检测的优点

光弹性量测应力的方法其主要优点在于：

（1）此方法是一种非破坏性定性观测方法，主要是利用塑料受应力作用下之光弹特性，来观测材料的双折射率变化情形。

（2）光场条纹可以肉眼观察，条纹越密集的地方，表示应力愈大，亦即是应力集中的地方，也是材料发生破坏时最先开始之处，如下图所示。



图15 光场条纹

可了解外力作用瞬间或成形定型后，测试品整体的应力场分布，可实际用于产品QC检测上。

9 热应力的矫正与去除

残余应力的处理方法：自然时效方法和人工时效方法（包括热处理时效、敲击时效、振动时效、超声冲击时效、爆炸时效）等。

9.1 自然时效

自然时效是最古老的时效方法。它是把构件露天放置于室外，依靠大自然的力量，经过几个月至几年的风吹、日晒、雨淋和季节的温度变化，给构件多次造成反复的温度应力。在温度应力形成的过载下，促使残余应力发生松弛而使尺寸精度获得稳定，如下图所示。



图16 铸铁件放置室外靠自然力量释放残余应力

自然时效降低的残余应力不大，但对工件尺寸稳定性很好，原因是工件经过长时间的放置，石墨尖端及其他线缺陷尖端附近产生应力集中，发生了塑性变形，松弛了应力，同时也强化了这部分基体，于是该处的松弛刚度也提高了，增加了这部分材质的抗变形能力，自然时效降低了少量残余应力，却提高了构件的松弛刚度，对构件的尺寸稳定性较好，方法简单易行，但生产周期长，占用场地大，不易管理，不能及时发现构件内的缺陷，已逐渐被淘汰。

自然时效适用于：热应力（铸造、锻造过程中产生的残余应力）、冷应力（机械加工过程中产生的残余应力）、焊接应力（焊接过程中产生的应力）。

9.2 人工时效

人工时效方法，包括热处理时效、敲击时效、振动时效、超声冲击时效、爆炸时效等。

9.2.1 热处理时效

热时效处理是传统的消除残余应力方法。

它是将构件由室温缓慢，均匀加热至550℃左右，保温4-8小时，再严格控制降温速度至150℃以下出炉。

热时效工艺要求是严格的：

（1）如要求炉内温差不大于±25℃，升温速度不大于50℃/小时，降温速度不大于20℃/小时。

如果升温速度过快，构件在升温中薄壁处升温速度比厚壁处快的多，构件各部分的温差急剧增大，会造成附加温度应力。如果附加应力与构件本身的残余应力叠加超过强度极限，就会造成构件开裂。

热时效如果降温不当，会使时效效果大为降低，甚至产生与原残余应力相同的温度应力（二次应力、应力叠加），并残留在构件中，从而破坏了已取得的热时效效果。

（2）炉内最高温度不许超过570℃，保温时间也不易过长。

如果温度高于570℃，保温时间过长，会引起石墨化，构件强度降低。

热处理时效适用于：热应力（铸造、锻造过程中产生的残余应力）、冷应力（机械加工过程中产生的残余应力）、焊接应力（焊接过程中产生的应力）。

9.2.2 敲击时效

锤击处理很早被引入焊接领域，初期主要应用于消除焊接变形。锤击的方法分为，手工锤击法和电锤锤击法。通过观察分析，认为适当锤击可以消除和减少焊接裂纹，进而推断锤击有消除焊接残余应力的作用，因此在工艺中采用锤击处理，防止焊接裂纹的产生。一般认为，锤击处理消除焊接残余应力是使被处理金属通过锤击，在体内局部产生一定的塑性伸长，释放焊接过程产生的残余拉伸弹性应变，从而达到释放焊接残余应力的目的。但由于锤击（特别是手工锤击）的不规范（锤击力的大小、频率、基体的力学性能及锤击区的温度等）及焊接残余应力准确测试的困难，故对于锤击处理与残余应力的关系，至今尚没有一个科学的和系统的研究。

在合适的焊接规范和工艺下，锤击不仅能有效地消除工件焊缝部位的应力，而且能促进热影响区拉伸残余应力的释放，甚至可以获得一定值的压应力。

敲击时效适用于：焊接应力（焊接过程中产生的应力）。

9.2.3 振动时效

振动时效（VSR）就是在激振设备周期性——激振力的作用下，在某一频率使金属工件共振，形成的动应力使工件在半小时内进行数万次较大振幅的亚共振振动。使其内部残余应力叠加，达到一定数值后，在应力最集中处，会超过屈服极限而产生微小的塑性变形，降低该处残余应力，并强化金属基体；而后振动在其余应力集中部分产生同样作用，直至不能引起任何部分塑性变形为止，从而使构件内残余应力降低和重新分布，处于平衡状态，提高材料的强度。构件在后序安装使用中，因不再处于共振状态，不承受比

共振力更大外力作用，振后构件不会出现应力变形。振动时效也可看作在周期动应力作用下循环应变，金属材料内部晶体位错运动使微观应力增加，达到调节应力稳定构件尺寸的过程。

振动时效，国外称之为 VSR (Vibratory Stress Relieve) 技术。它是在激振器的周期性外力（激振力）的作用下，使工件自身产生共振，进而使其内部歪曲的晶格，产生滑移而恢复平衡，提工件的松弛刚度，消除并均化残余应力，使其尺寸稳定。在以消除残余应力为目的的时效方法中，振动时效可以完全代替热时效。原机电部等六个部委将振动时效定为第七个五年计化间推广的节能项目，并将此类产品定位替代进口产品，这种振动消除应力技术在国外已有几十年的应用经验。

振动时效适用于：热应力（铸造、锻造过程中产生的残余应力）、冷应力（机械加工过程中产生的残余应力）、焊接应力（焊接过程中产生的应力）。

9.2.4 超生冲击时效

超声冲击是敲击时效的发展。超声冲击技术的特点是单位时间内输入能量高，实施装置的比能量（输出能量与装置质量之比）大。振动处理频率可高达18KHz-27KHz，振动速度可达2m/s-3m/s，加速度高达重力加速度的三万多倍，高速瞬时的冲击能量使被处理焊缝区的表面温度以极高的速度上升到 600 ℃，又以极快的速度冷却。这种高频能量输入到焊缝区表面后，使能量作用区的表层金属的相位组织发生一定的变化。

(1) 使焊缝区的金属表面层内的拉伸残余应力变为压应力，从而能大幅度地提高结构的使用疲劳寿命。

(2) 表面层内的金属晶粒变细，产生塑性变形层，从而使金属表面层的强度和硬度有相应的提高。

(3) 改善焊趾的几何形状，降低应力集中。

(4) 改变焊接应力场，明显减少焊接变形。

超生冲击时效适用于：焊接应力（焊接过程中产生的应力）。

9.2.5 爆炸时效

现在正在兴起的爆炸处理消除焊接残余应力新技术，是利用专用炸药爆轰时的掠过冲击波对焊接接头进行处理，可以有效地降低焊接残余应力，从而大大提高焊接接头抗应力腐蚀开裂能力，降低疲劳裂纹扩展速率，降低脆性转变温度，提高焊接结构的服役安全可靠性能。

其原理是原始焊接残余应力在冲击波的诱导作用下将初始弹性应变 (ϵ_e) 转化为相应的塑性应变 (ϵ_p) 来完成的，即 $\epsilon_p = \epsilon_e + C$ ，C 是取决于爆炸条件的常数，可通过控制爆炸处理工艺来调整。由于爆炸处理消除焊接残余应力是高度的局部处理，因此对实际使用条件来说，C是大于零的常数，即爆炸处理后爆区可形成压应力。

爆炸处理消除焊接残余应力与退火热处理相比，具有能耗少、处理费用低、不会引起材料内部组织脆化、不受构件尺寸限制等优点。

该技术施工相当方便，以爆速为基准可得到一系列能量级的专用炸药，适应不同情况下消除残余应力的要求，同时炸药可吸附或粘附在钢件上，满足全方位布药的要求。

该炸药的柔韧性、连续性、稳定性、安全性以及炸药爆轰后的高温高压产物对被处理构件的烧蚀防护问题均已考虑和解决。

爆炸时效适用于：焊接应力（焊接过程中产生的应力）。

10 热应力的运用

10.1 减法结构准则

单一构件的热膨胀必然存在，通过组合构件，让各构件的热膨胀互相抵消，如下图所示。

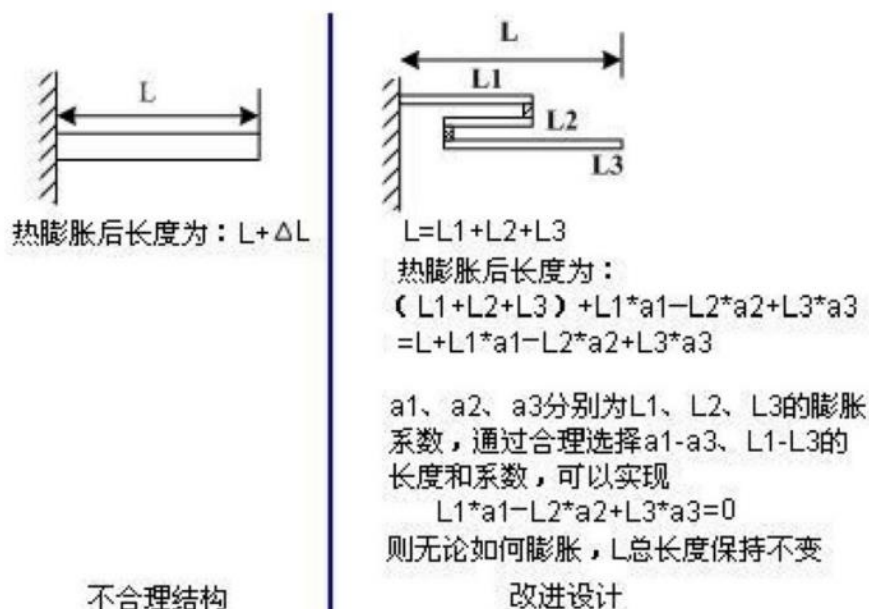


图17 减法结构准则

10.2 加法结构准则

对相对热变形不同导致的结构配合问题，通过增加中间过渡结构，将其中一个构件分解为两个不同膨胀系数材料的构件，使组合膨胀效果与另一配合构件的膨胀效果一致，如下图所示。



图18 加法结构准则

10.3 方向调节原则

通过结构设计，将膨胀方向转移到非配合面上去。

10.4 消除温度差准则

相同材料的两构件，因为温度不同，导致膨胀长度不一样，出现热变形。

解决措施：使有关构件的热传递边界条件尽量相近或相同，如下图所示。

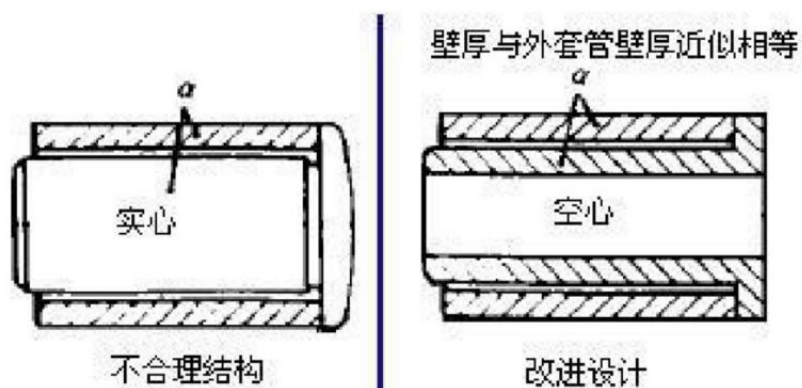


图19 消除温度差原则示例

10.5 自由膨胀准则

(1) 热膨胀如果被阻碍，热应力的破坏性很强，在设计上要让膨胀应力有充分的释放空间，如图20所示。

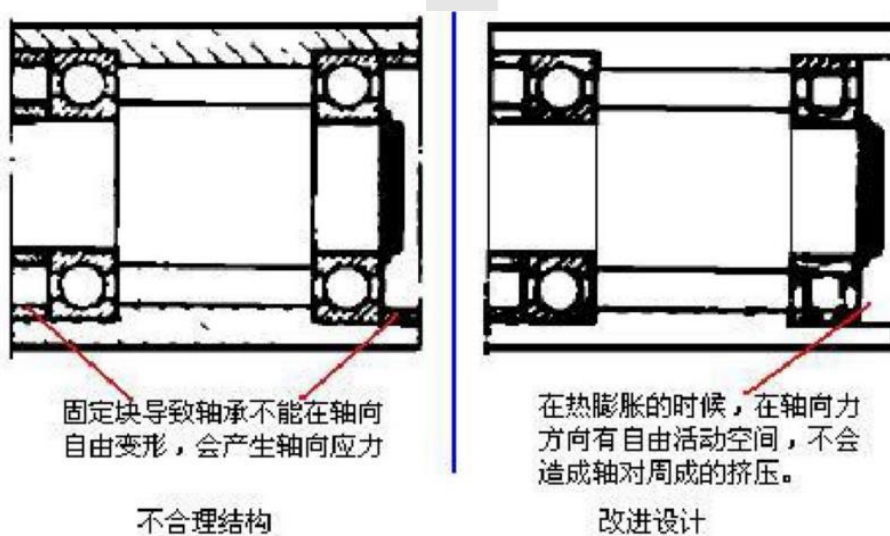


图20 自由膨胀准则示例

(2) 在变温管道中每隔一段距离插入膨胀节（伸缩节），让管道有自由伸缩的可能，以减少热应力，如下图所示。

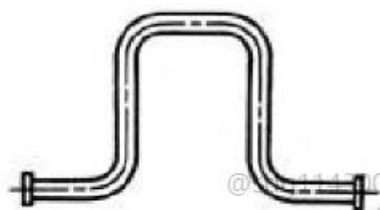


图21 膨胀节

(3) 在铁路钢轨各段间留有伸缩缝，以削弱钢轨膨胀的约束，降低热应力（如下图中用螺栓连接处）。



图22 铁路钢轨中的伸缩缝

(4) 铁路桥梁一端用固定铰支座，另一端用可动铰支座，可以避免桥梁水平方向的热应力，如下图所示。

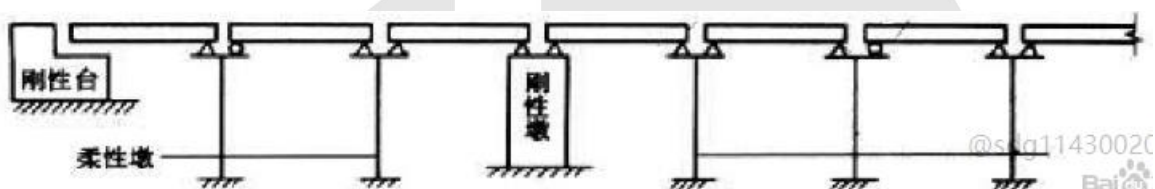


图23 铁路桥梁的固定铰支座和可动铰支座

10.6 柔性准则

两构件热变形不能消除时，加大构件的柔性减少热应力。比如用软管、橡胶材料、将热应力的直线方向转变成曲线方向等，如下图所示。

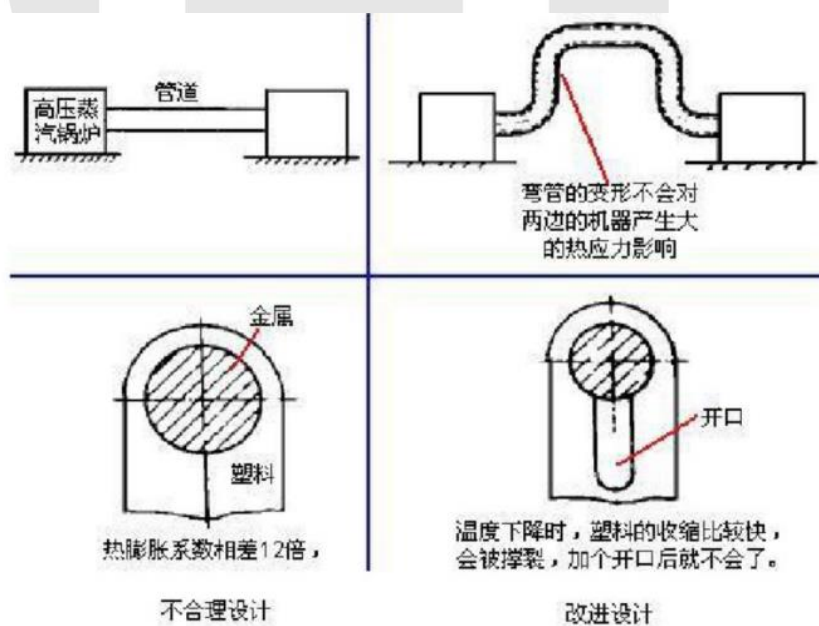


图24 增加软管等将热应力由直线方向转变成曲线方向

11 关于热应力的设计时需注意事项

11.1 产品结构方面

(1) 产品壁厚均匀，若遇到壁厚不均匀的地方，做圆角过渡、倒斜角过渡或做特征进行优化。

①增加圆角，进行过度，如下图所示。

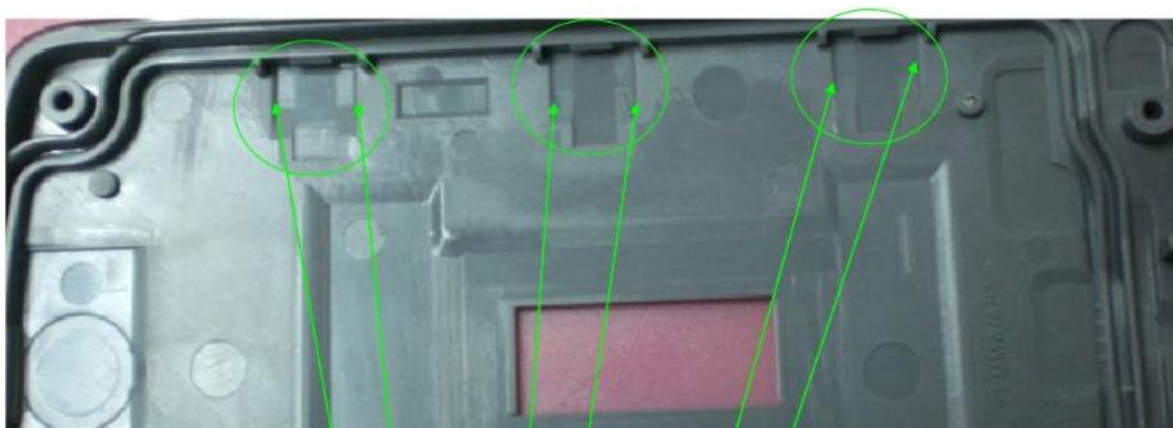


图25 优化前，外观面存在应力痕缺陷，原因是内部存在壁厚过渡不够平缓

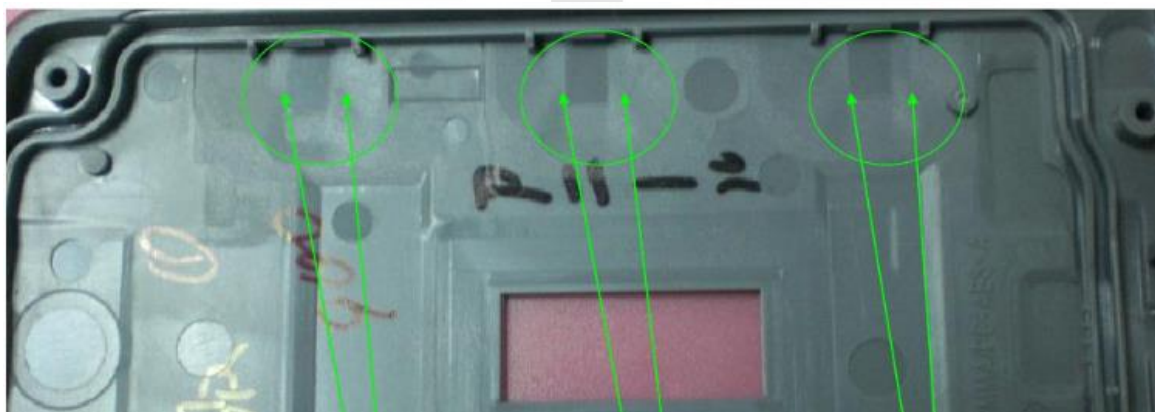


图26 优化后，内部台阶处增加倒圆角，壁厚过渡很平缓，外观面无应力痕缺陷

②做倒斜角进行优化，如下图所示。

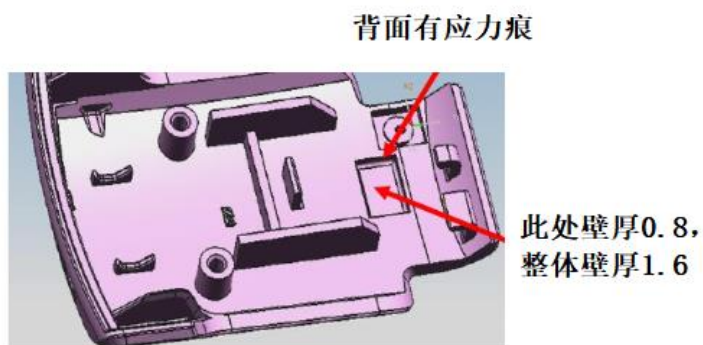


图27 优化前

倒斜角由C0.4改为C2，正面应力痕轻微

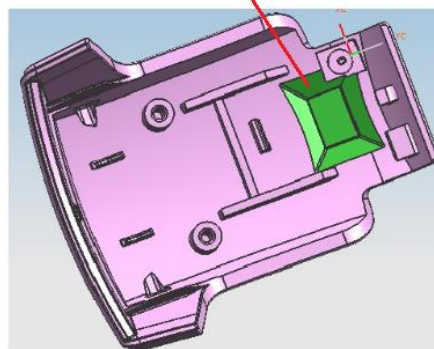


图28 优化后

③做特征进行优化，如下图所示。

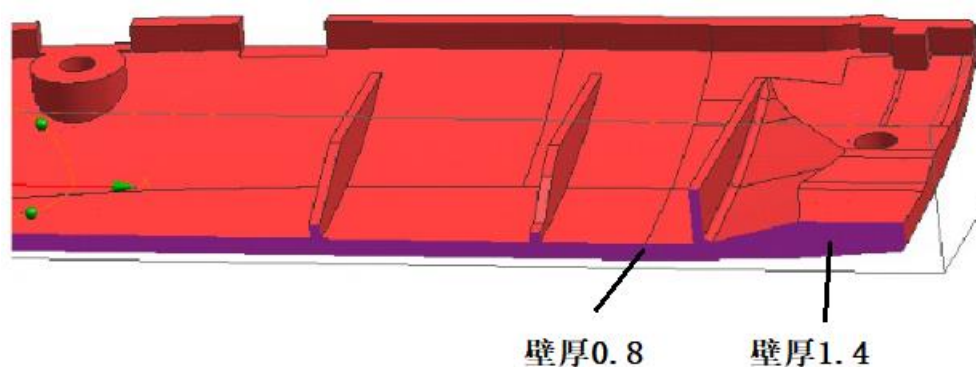


图29 优化前

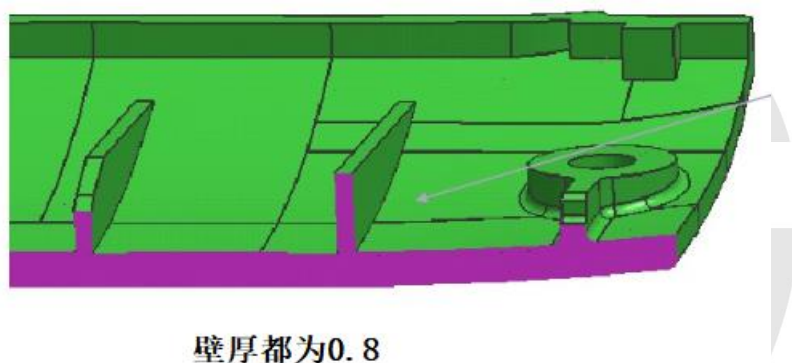


图30 优化后

(2) 避免壁厚过厚，若需加强强度，则可通过增加加强筋等加强强度。

11.2 模具方面

注塑模具浇口的位置、形式和浇口的数量将影响塑料熔体在模具型腔内的填充状态，从而导致注塑件由于内应力不平衡而产生变形。流动距离越长，由冻结层与中心流动层之间流动和补缩引起的内应力越大；反之，流动距离越短，从浇口到制件流动末端的流动时间越短，充模时冻结层厚度减薄，内应力越小，翘曲变形也会大为减少。

(1) 对应位置可采取咬花处理，尽量选择由光泽且粗的规格。

(2) 考虑对应位置水路是否足够，尽量做到充分且平衡。

在注射过程中注塑件冷却速度的不均匀也将造成收缩的不均匀，这种收缩差别导致弯曲力矩产生内应力而使注塑件产生翘曲。

在注射成型平板形注塑制品时，如果所用的模具型腔、型芯的温度相差过大，贴近冷型腔面的熔体很快得到冷却，而贴近热型腔面的熔体则会继续收缩，收缩的不均匀产生的内应力将使注塑件翘曲变形。因此注塑模的冷却系统应当控制型腔、型芯的温度趋于平衡，两者的温差不能太大。模具中冷却水孔的布置至关重要，在管壁至型腔表面的距离确定之后应尽可能使冷却水孔之间的距离短些，以保证型腔壁的温度均匀一致。同时由于冷却介质的温度随冷却水道长度的增加而上升，使模具的型腔、型芯沿水道产生温度

差，因此要求每个冷却回路的水道长度小于2m。在大型模具中应设置数条冷却回路，一条回路的进口位于另一条回路的出口附近。

下图为手机塑料外壳座定模板中设置的冷却水道。冷却水孔的直径为 6mm，距定模板的顶面17mm，A、B处是需要用铜料堵住的，冷却水孔的接口处为 PT 1/8的英制内螺纹，用来接水咀（一种标准件，用来连接外界冷却水的像螺母一样的东西），冷却水流的路径如下图中的箭头所示。这样可以有效地均衡温度，减小内应力，防止注塑件产生翘曲变形。

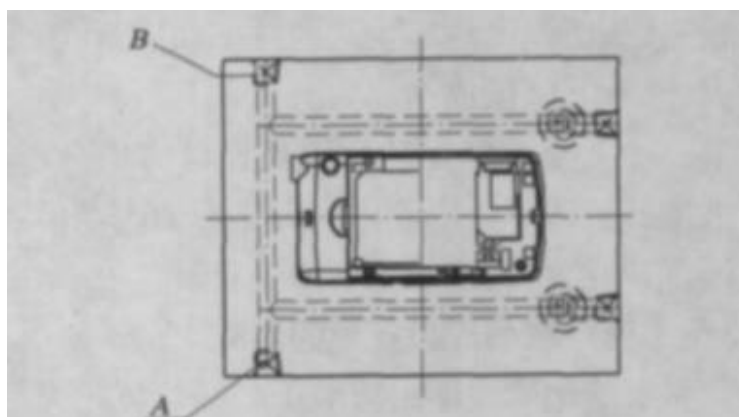


图31 手机塑料外壳座定模板中设置的冷却水道

（3）考虑排气是否足够，在相对应的地方做排气入子或透气金属等。

下图为平板形手机塑料外壳座，如果只设置一个中心浇口或侧浇口，因直径方向上的收缩率大于圆周方向上的收缩率，成型后的注塑件会产生扭曲变形；若改用多个点浇口，浇道采用平衡式布置，则可有效防止制品翘曲变形。

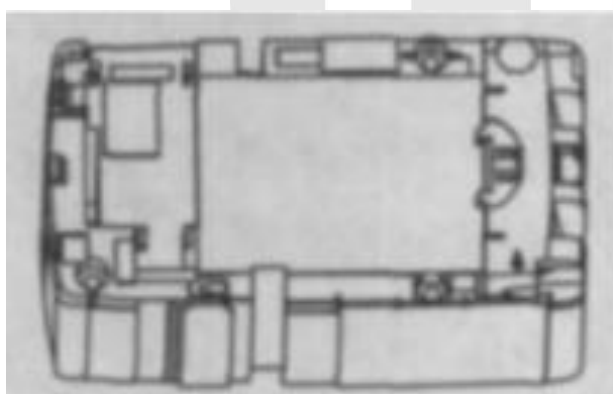


图32 更改前 只有一个点浇口或侧浇口

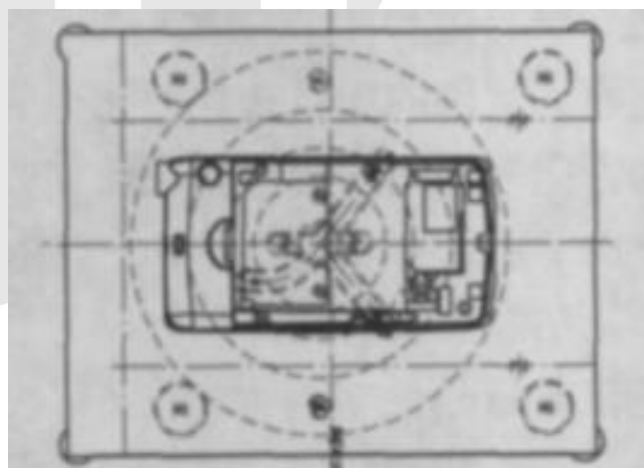


图33 更改后 多个点浇口

采用点浇口进行成型时，由于塑料收缩的异向性，浇口的位置、数量都对注塑件的变形程度有很大的影响。但是由于采用多点进浇的点浇口，且点浇口开设在分型面上，容易调整尺寸，方便排气，从而可减小因原料成型时挥发出来的气体而造成的内应力。

另外，采用多点进浇的点浇口还能缩短塑料的流动比（ L/t ），从而使型腔内物料的密度更趋于均一，收缩更均匀。同时熔料能在较小的注塑压力下充满型腔，而较小的注塑压力可减少塑料分子的取向倾向，降低其内应力，因而可减少注塑件的变形。

(4) 调整进浇口的位置，如下图所示。

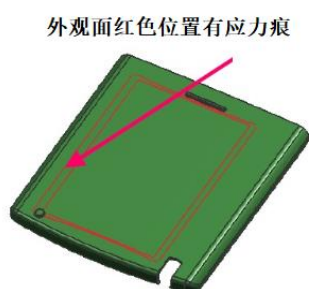


图34 优化前

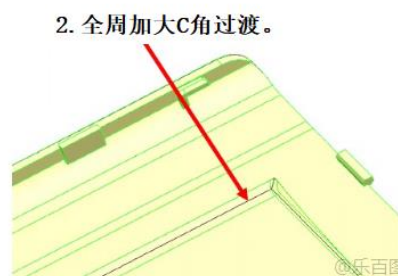
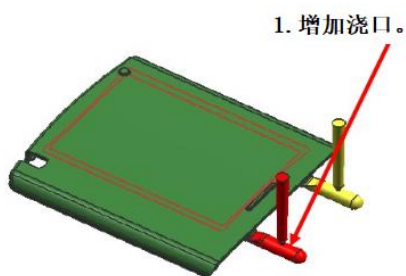


图35 优化后，证明应力很轻微

(5) 顶出系统分部均匀，受力均匀。

模具顶出系统的设计也直接影响注塑件的变形。如果顶出系统布置不平衡，将造成顶出力的不平衡而产生内应力，使注塑件变形。因此在设计模具顶出系统时应力求与脱模阻力相平衡。另外，顶出杆的截面积不能太小，以防注塑件单位面积受力过大（尤其在脱模温度太高时）而产生变形。顶杆的布置应尽量靠近脱模阻力大的部位，在不影响注塑件质量（包括使用要求、尺寸精度与外观等）的前提下，应尽可能多设置顶杆以减少注塑件的总体变形。

考虑到以上因素，为了防止型芯包紧力过大，一次推出时注塑件变形太大，该手机塑料外壳座模具的推出机构宜采用二次机动推出，即采用一次推出使型芯与注塑件分离，二次推出使注塑件与凹模分离的方式，这样就可以分散顶出力，以防止顶出力过大，使注塑件产生应力变形。顶出制品时的布置形式见下图，顶出的距离为10~15 mm即可。

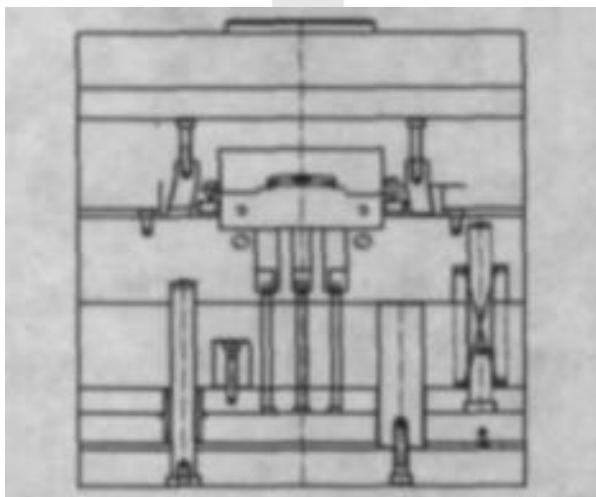


图36 推出机构设计

(6) 模具设计时对于产品可能发生变形的区域，进行预变形设计，抵消产品的变形。

11.3 成型方面

(1) 适当延长冷却时间。

(2) 减小应力的措施在铸造注塑等工艺上采取“同时凝固原则”，尽量减小铸件或注件各部位间的温度差，使铸件各部位同时冷却凝固。

(3) 适当降低保压压力和保压时间。

(4) 注塑工艺改善。当射出模温接近或超过塑料之 T_g 温度时，可有效消除双折射现象，此既是由于流动所诱发之分子定向现象，可由使用较高模温来使得分子有足够动能及足够时间来松弛分子应力。

11.4 后处理方面

对于有翘曲变形倾向的注塑件，或者为了尽快稳定注塑件的尺寸，可在成型工艺上设置注塑件的后处理。注塑制品的后处理主要有退火处理、回火处理、调湿处理、施加外力等方式。

(1) 可考虑涂装，素材擦拭等方式。

(2) 退火处理方法是使制品在定温的加热液体介质（热水、油）中或热空气循环烘箱中静置一段时间。处理时间可根据塑料品种、加热介质温度、制品形状与注塑工艺而定，以达到消除内应力为宜。退火温度一般应控制在注塑件使用温度以上 $10-20^{\circ}\text{C}$ 或者低于注塑件的热变形温度 $10-20^{\circ}\text{C}$ 为宜。

退火的实质是：

①迫使冻结的塑料分子链松弛，消除内应力；

②提高结晶度，稳定结晶结构，增强注塑件强度与刚度以抵抗变形。

(3) 回火处理。以铸件为例，将铸件加热到 $550\sim 650^{\circ}\text{C}$ 之间保温，进行去应力退火可消除残余内应力。

(4) 调湿处理。也是一种后处理方法。比如，聚酰胺（PA）类注塑件在高温下与空气接触时经常会氧化变色，同时又易吸收水分而膨胀变形。调湿处理就是将PA类刚脱模的注塑件放置在热水中浸泡一段时间，达到吸湿平衡，稳定尺寸，以防止翘曲变形。在调湿处理中吸收适量的水分起着增塑剂的作用，可以改善注塑制品的韧性，提高冲击强度和拉伸强度。可以说调湿处理也是消除注塑件内应力的有效方法之一。

(5) 注塑后，马上对会变形的地方施加相反的力，产品彻底冷却定型后，撤销外力。

附录 A 塑料的特征温度

塑料的几个特征温度 T_g 、 T_m 、 T_f 、 T_d ：

(1) 玻璃化温度 T_g ：指无定型聚合物（包括结晶型聚合物中的非结晶部分）由玻璃态向高弹态或者由后者向前者的转变温度。是无定型聚合物大分子链段自由运动的最低温度，也是制品工作温度的上限。

(2) 熔化温度 T_m ：对于结晶型聚合物，指大分子链结构的三维远程有序态转变为无序粘流态的温度，也称熔点。是结晶型聚合物成型加工温度的下限。

(3) 流动温度 T_f ：指无定型聚合物由高弹态转变为粘流态的温度。是无定型塑料加工温度的下限。

(4) 不流动温度：在一定的压力下不发生流动的最高温度。是将一定量的塑料加入毛细管流变仪口模上端的料筒中，加热至某一温度，恒温10min后，施加50MPa恒压，若该料不从口模中流出，卸压后将料温升高10度，保温10min后再施加同样大小的恒压，如此继续直至熔体从口模中流出为止，将此温度减出10度即是该料的不流动温度。

(5) 分解温度 T_d ：指处于粘流态的聚合物当温度进一步升高时，便会使分子链的降解加剧，升至使聚合物分子链明显降解时的温度为分解温度。

附录 B 热应力计算公式

本附录内容摘自《科学通报》中由华中理工大学机械学院的卢义强等著作的“注塑冷却过程中塑料制品的热应力计算公式”文章。

一、粘弹性理论在冷却过程的应用

根据粘弹性力学原理，可以推出塑料在冷却过程中的热应力计算式

$$\sigma_{ij}(x, t) = \int_{-\infty}^t G_{ijkl}(\xi - \xi') \left[\frac{\partial \varepsilon_{kl}(t')}{\partial t'} - \alpha_{ij} \Theta(x, t') \right] dt', \quad (1)$$

式中 σ 中的 x 表示 X, Y, Z 三个方向， ξ 为与温度有关的时间， α 为热膨胀系数， Θ 为热膨胀系数变换函数，其定义为

$$\Theta(x, t') = \frac{1}{\alpha_0} \int_{T_0}^T \alpha(t') dT', \quad \alpha_0 = \alpha(T_0). \quad (2)$$

根据塑料制品的面方向尺寸比厚度方向尺寸高一个数量级以上的几何特点及成型过程中的变形约束情况，可以做出如下假设：

(1) 在冷却过程中，由于模具的限制，塑料制品在面内很难发生变形，特别是形状复杂的塑料制品更是如此，这样可以将面内的应变假设为0，即： $\varepsilon_X = \varepsilon_Y = 0$ 。

(2) 塑料制品在横截面上没有约束，其可以发生形变，应变场为： $\varepsilon_Z = \partial U_Z / \partial Z$ 。

(3) 由于塑料制品很薄，同时由于热应力产生的 $X-Z$ ， $Y-Z$ 面内的畸变很小，因而假设 $X-Z$ ， $Y-Z$ 面内的畸变为0，即： $\varepsilon_{XZ} = \varepsilon_{YZ} = 0$ 。根据上述假设，可以计算出其应变球张量和偏张量为：

$$\begin{cases} \varepsilon_m = \varepsilon_Z / 3; & e_X = e_Y = -\varepsilon_m = -\varepsilon_Z / 3; \\ e_Z = \varepsilon_Z - \varepsilon_m = 2\varepsilon_Z / 3; & e_{XZ} = e_{YZ} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

(4) 假设塑料制品两侧面在型腔内承受的压力为保压压力，压力值采用保压模拟中的结果：

$$\sigma_X(\pm a, t) = P(t)$$

式中：

a ：为塑料制品厚度的一半，

P ：为保压压力，它与注塑工艺条件及塑料粘度等材料参数有关。

(5) 松弛模量的确定是粘弹性分析中的重大难题。为了解决这个问题，采用如下假设：在冷却过程中，塑料的各向异性主要表现在收缩率的差别，粘弹性松弛函数与各向同性材料的松弛函数相同。基于这种假设，松弛函数可以写成如下形式：

$$G_{ijkl}(t) = 3[G_2(t) - G_1(t)] \delta_{ij} \delta_{kl} / 3 + [G_1(t)(\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk})] / 2, \quad (4)$$

式中：

δ ：为Kronecker符号， G_1, G_2 为两个独立的松弛函数。将（4）式带入（1）式，整理后得出其三个主方向的热应力为：

$$\begin{cases} \sigma_x(x, t) = \int_{-\infty}^t G_1(\xi - \xi') \frac{\partial e_x}{\partial t'} dt' + \int_{-\infty}^t G_2(\xi - \xi') \left[\frac{\partial \varepsilon_m(t')}{\partial t'} - \alpha_p \Theta(x, t') \right] dt', \\ \sigma_y(x, t) = \int_{-\infty}^t G_1(\xi - \xi') \frac{\partial e_y}{\partial t'} dt' + \int_{-\infty}^t G_2(\xi - \xi') \left[\frac{\partial \varepsilon_m(t')}{\partial t'} - \alpha_T \Theta(x, t') \right] dt', \\ \sigma_z(x, t) = \int_{-\infty}^t G_1(\xi - \xi') \frac{\partial e_z}{\partial t'} dt' + \int_{-\infty}^t G_2(\xi - \xi') \left[\frac{\partial \varepsilon_m(t')}{\partial t'} - \alpha_T \Theta(x, t') \right] dt', \end{cases} \quad (5)$$

式中：

α_p, α_T 分别为塑料在定向方向及与定向垂直方向上的热膨胀系数。由于以上假设可以看出，应变分量 ε_z 只与Z轴坐标及时间t有关，由本构关系可知，热应力也只与Z, t有关。

二、制品的热应力模型

热应力计算式（5）中，包含松弛函数、热膨胀系数、应变等变量，在松弛函数中包括材料时间 ξ ，其它项中包括物理时间t，为了计算此积分，需要将物理时间t变换为 ξ 的形式。将t写成 ξ 的函数： $t=g(x, \xi)$ 及 $t'=g(x, \xi')$ ，假设F为位置和时间的函数，引入以下变换形式：

$$\tilde{F}(x, \xi) = F(X, t)$$

应用于（5）式中的 σ, ε 及 Θ ，将（5）式进行Laplace变换，可以得到变换后的热应力计算式：

$$\begin{cases} \tilde{\sigma}_x^*(Z, S) = -SG_1^*(S)\tilde{\varepsilon}^*(Z, S)/3 + SG_2^*(S)[\tilde{\varepsilon}^*(Z, S)/3 - 3\alpha_p\tilde{\Theta}^*(Z, S)], \\ \tilde{\sigma}_y^*(Z, S) = -SG_1^*(S)\tilde{\varepsilon}^*(Z, S)/3 + SG_2^*(S)[\tilde{\varepsilon}^*(Z, S)/3 - 3\alpha_T\tilde{\Theta}^*(Z, S)], \\ \tilde{\sigma}_z^*(Z, S) = 2SG_1^*(S)\tilde{\varepsilon}^*(Z, S)/3 + SG_2^*(S)[\tilde{\varepsilon}^*(Z, S) - 3\alpha_T\tilde{\Theta}^*(Z, S)]/3, \end{cases} \quad (6)$$

式中：

S为 ξ 的变换参量，*号表示经过Laplace变换后的函数形式。

由上节中的应变球张量及应变偏张量的计算式（3）及应力-应变关系可以推出 $S_{yz}=S_{xz}=0$ ，式中S为应力偏张量。将应力平衡方程式中关于Z的方程：

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial X} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial Y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial Z} = 0$$

代入（6）式，可以得出

$$\frac{\partial \sigma_z(Z, t)}{\partial Z} = 0. \quad (7)$$

利用应力边界条件假设（4），对上式求积分，可以得到 σ_z 为

$$\sigma_z(Z, t) = \tilde{\sigma}_z(Z, \xi) = P(t) = \tilde{P}(\xi), \quad (8)$$

将上式代入 (6) 式, 消去 $\tilde{\varepsilon}^*$, 可以得到 σ_x, σ_y 的计算公式:

$$\begin{cases} \tilde{\sigma}_x^*(Z, S) = \frac{G_2^*(S) - G_1^*(S)}{2G_1^*(S) + G_2^*(S)} \tilde{P}^*(S) + \\ \frac{[G_2^*(S) - G_1^*(S)]\alpha_T - [2G_1^*(S) + G_2^*(S)]\alpha_P}{2G_1^*(S) + G_2^*(S)} G_2^*(S) \tilde{\Theta}^*(Z, S), \\ \tilde{\sigma}_y^*(Z, S) = \frac{G_2^*(S) - G_1^*(S)}{2G_1^*(S) + G_2^*(S)} \tilde{P}^*(S) - \frac{3G_1^*(S)G_2^*(S)}{2G_1^*(S) + G_2^*(S)} \alpha_T \tilde{\Theta}^*(Z, S). \end{cases} \quad (9)$$

对于高聚物, 可以将于球应力有关的松弛模量 G_2^* 假设为弹性模量。根据弹性力学中的定义, 松弛模量可以定义为:

$$G_2^*(S) = 3K/S, \quad (10)$$

式中:

K 为体积模量, 由弹性力学可知, K 与弹性模量 E 及泊松比 ν 的关系式为:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

将 G_1^* 写为 G^* , 由简单拉伸时的应力应变关系可以推导出简单拉伸松弛模量 G^* 与拉伸模量 E^* 的关系式为:

$$G^*(S) = \frac{6KE^*(S)}{9K - SE^*(S)}. \quad (11)$$

将 (10), (11) 式带入 (9) 式, 可以得到

$$\begin{cases} \tilde{\sigma}_x^*(Z, S) = A_1 \tilde{P}^*(S) + \frac{3K}{S} A_1 \alpha_T \tilde{\Theta}^*(Z, S) - \frac{3K}{S} \alpha_P \tilde{\Theta}^*(Z, S), \\ \tilde{\sigma}_y^*(Z, S) = A_1 \tilde{P}^*(S) - A_2 \alpha_T \tilde{\Theta}^*(Z, S), \end{cases} \quad (12a)$$

式中:

A_1, A_2 : 为计算参数

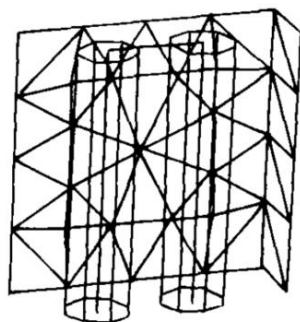
$$A_1 = \frac{3K - SE^*(S)}{3K + SE^*(S)}, \quad (12b)$$

$$A_2 = \frac{6KE^*(S)}{3K + SE^*(S)}. \quad (12c)$$

(12) 式即为塑料制品冷却过程中的热应力模型。由于方程式为 Laplace 变换后的结果, 求解过程中一般要进行逆变换, 然后采用分析方法或数值计算的方法求解。

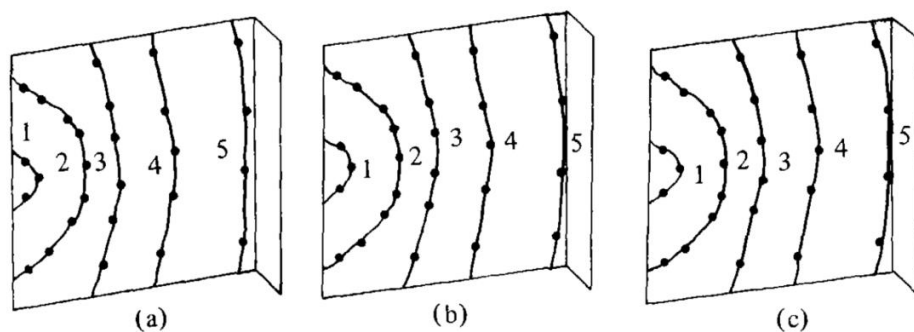
三、计算实例

基于上述计算公式，如下图所示为一塑料制品及冷却系统的几何模型，为了进行比较，只在凸模中布置了冷却水管。



附图1 塑料制品及冷却系统的几何模型

下图所示为冷却时间为4.2s时制品不同纵截面的等效应力分布，由于此时保压压力存在，制品的应力均为压应力，不同的截面相比较，中间面的压应力最大，冷却较快的接触凸模表面的温度较低，收缩较大，其压应力比接触凹模比较小。



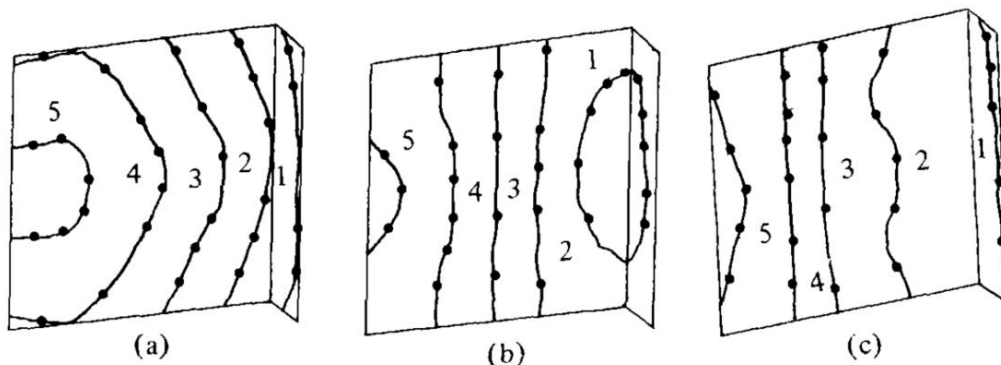
附图2 冷却时间为4.2s时制品不同纵截面的等效应力分布（MPa）

(a) 接触凸模表面，1---87.99；2---85.29；3---82.59；4---79.89；5---77.19。

(b) 中间面，1---94.74；2---92.00；3---89.26；4---86.53；5---83.79。

(c) 接触凹模表面，1---87.82；2---85.12；3---82.41；4---79.70；5---76.99

下图所示为顶出时不同纵截面的应力分布。此时保压过程早已结束，各截面的应力都为拉应力，其分布规律与附图2类似，在这种应力作用下，顶出后产生朝凸模方向的翘曲变形，分析结果与实际情况吻合。



附图 3 顶出时制品不同纵截面的等效应力分布（MPa）

- (a) 接触凸模表面, 1---6.65; 2---6.69; 3---6.74; 4---6.78; 5---6.82。
- (b) 中间面, 1---0.57; 2---0.59; 3---0.62; 4---0.64; 5---0.66。
- (c) 接触凹模表面, 1---6.71; 2---6.74; 3---6.77; 4---6.79; 5---6.82。



版本记录

版本编号/ 修改状态	拟制人/修改人	审核人	批准人	备注
V1.0	孟祥达			