

[综述·专论]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.02.028

注塑成型熔接痕的研究现状

谢作建, 姜少飞*, 李吉泉, 柴国钟

(特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室(浙江工业大学), 浙江 杭州 310014)

摘要:通过总结近年来注塑成型熔接痕的研究现状,阐述熔接痕的形成机理,综述较经典的熔接痕强度预测模型及熔接痕自动识别算法等熔接痕强度预测研究,并从微观角度归纳了对熔接痕的研究,指出成型工艺中熔体温度、模具温度及注射压力是影响熔接痕的主要因素。在传统注塑成型基础上,介绍了快速变模温注塑成型等注塑成型新技术和改进模具结构2种改善熔接痕的新方法。

关键词:注塑成型;熔接痕;形成机理;快速变模温注塑成型

中图分类号:TQ320.66

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2014)02-0111-05

Research Status of Weld Line in Injection Molding

XIE Zuojian, JIANG Shaofei*, LI Jiquan, CHAI Guozhong

(Key Laboratory of E&M (Zhejiang University of Technology), Ministry of Education & Zhejiang Province, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The research status of weld line in injection molding was introduced. The formation mechanism of weld line was expounded. The strength prediction studies of weld line such as prediction model and automatic recognition algorithm were summarized. The studies of the weld-line in microcosmic view were concluded, and the influences of the melt temperature, mold temperature and injection pressure on the weld-line were achieved. Based on the traditional technology of the injection molding, rapid heat cycle molding which was a new injection molding technology to improve weld line was presented, and two new kinds of optimizing mold structure were introduced as an improvement of weld line.

Key words: injection molding; weld line; formation mechanism; rapid heat cycle molding

注塑成型熔接痕是形成在制品表面的线状痕迹,由于注射过程中多股料流在型腔中分流汇合,熔体在熔接界面的熔合未完全,导致了熔接痕的形成^[1]。熔接痕主要有2个危害:①降低了制品的力学性能,有研究称,熔接痕处的拉伸强度仅仅为原材料基体拉伸强度的10%~90%,一定程度上限制了制品的正常使用^[2];②降低了制品的外观质量。文中总结了熔接痕的研究现状,包括理论研究、微观形态结构研究、工艺条件影响研究以及改善研究,对于熔接痕的进一步深入研究具有一定的参考价值 and 工程意义。

1 理论研究

熔接痕的理论研究成果众多,其中关于形成机理的研究最早开展,相关成果已获得业界普遍认同。关

于熔接痕预测的研究也有不少成果,较为典型的有Kim^[3], Mekhilef^[4], Guo Shaoyun^[5]等提出的熔接痕强度预测模型。此外,熔接痕界面的分子扩散研究、分子取向研究等都已有一些较为典型的成果^{[6]177}。本节将对熔接痕的形成机理以及典型的熔接痕强度预测研究成果进行阐述。

1.1 熔接痕的形成机理研究

熔接痕形成过程如图1所示^{[6]170}:①由于模壁与熔体之间存在摩擦,熔体前沿会呈弧形表面;②两股熔体汇合时,熔体前沿相互接触,流动渐渐停止;③熔体沿着垂直于流动的方向产生流动,熔接区域分子取向由于受到挤压而垂直于流动方向;④型腔内的气体或熔体挥发物未排出,熔接痕表面将会出现V型槽。

收稿日期:2013-09-06;修回日期:2013-09-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51205357);浙江省自然科学基金项目(LY12E05020);浙江省重点科技创新团队项目(2012R10002-03);浙江省重点科技创新团队项目(2012R10002-04)

作者简介:谢作建(1989),男,浙江温州人,硕士研究生,主要从事快速变模温注塑成型对熔接痕的改善研究。E-mail: 275049481@qq.com

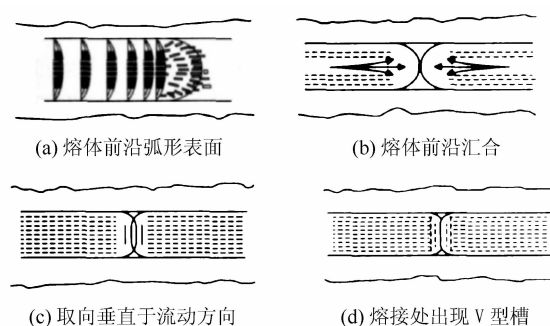


图 1 熔接痕形成过程

Figure 1 Formation process of weld line

1.2 熔接痕强度的预测研究

熔接痕强度预测研究成果众多,本节将介绍较为典型的国外学者 Kim, Mekhilef, Guo Shaoyun 等提出的适用于不同条件下的熔接痕强度预测模型,以及国内学者余晓容提出的熔接痕自动识别算法与钟皓东提出的用于预测熔接痕的遗传算法。

Kim 等认为熔接痕区域的分子链沿熔接痕方向的取向和熔接界面的弱连接是影响熔接痕强度的主要因素,并提出了熔接痕强度与熔体温度以及熔接时间的函数关系式。若已知材料参数和成型条件,根据该预测模型便可预测出熔接痕强度。Kim 通过该模型预测了聚苯乙烯熔制品的熔接痕强度,并进行了相应的实验,最终得到的实验结果与预测值基本吻合。

Mekhilef 等结合了与界面熔接有关的扩散系数,在 Kim 的预测模型基础上提出了不相容聚合物熔接痕强度与熔体温度以及熔接时间的函数关系式,建立了不相容聚合物的熔接痕强度理论预测模型。Mekhilef 通过该模型预测了 PC/PE(按 80/20 配比)的共混物在熔体温度为 220~300℃ 时的熔接痕强度,并进行了相应的实验验证,发现预测值与实验结果非常接近。

Mekhilef 的预测模型不足之处在于没有考虑材料常数随材料相态的变化,并且包含了较多的材料参数,有较多的使用限制。为此,Guo Shaoyun 等在 Kim 的和 Mekhilef 的模型基础上,引入了界面扩散层厚度系数,修正了预测模型,得到了界面扩散层厚度和熔接时间的函数关系式。Guo Shaoyun 用修正后的模型预测了 PS, PMMA 和 PS/PMMA(按 80/20、70/30 配比)3 种材料的熔接痕强度,然后进行了实验验证,发现实验结果与预测值基本吻合。

此外,余晓容等^[7]提出了一种熔接痕自动识别算法,该算法结合了流动模拟的数值实现过程,可以模拟

注塑成型过程中熔接痕的形成过程,预测出熔接痕的位置与长度。周华民等^[8]证明了该算法的正确性,他先根据余晓容提出的熔接痕算法预测了试样的熔接痕位置及长度,然后进行了实验验证,发现根据该熔接痕算法所预测出的熔接痕位置及长度几乎与实验结果完全符合,虽然存在着较为微小的误差,周华明认为这是由于流动分析的误差以及网格离散的原因。钟皓东等^[9]则提出了一种利用遗传算法来预测熔接痕的方法,根据这种方法,钟皓东实现了在不同模具温度、熔体温度、注射速率等成型工艺以及浇口位置条件下所对应的熔接痕长度预测。

2 熔接痕的微观形态结构研究

熔接痕区域的力学性能降低在很大程度上是因为熔接痕区域的微观形态结构与制品基体的微观形态结构存在差异。Younggon Son^[10]通过实验发现,制品非熔接痕区域的微观形貌为典型的皮芯结构,而熔接痕部位则多出了平行熔接痕的两层结构,熔接痕试样断裂往往发生在这两层的交界面。

熔接痕的形态结构示意图如图 2 所示。其形态结构具有 3 个特点^[11]:

1) 存在弱连接层。熔体在模具内快速冷却,分子链在熔接界面无法充分扩散,导致了该区域的弱连接。由于中心层熔体的冷却速度要慢于表层,因此中心层的熔体分子链在熔接痕处的扩散和缠结程度要好于表层。

2) 分子链沿熔接痕方向取向。充填阶段两股熔体在型腔相遇,熔体沿着垂直于流动的方向产生流动,熔接区域分子取向由于受到挤压而垂直于流动方向,这种取向降低了制品沿充模流动方向的力学性能。

3) 存在 V 型槽。型腔内的气体或熔体挥发物未排出,从而产生了 V 型槽。V 型槽会导致熔接痕区域的应力集中。

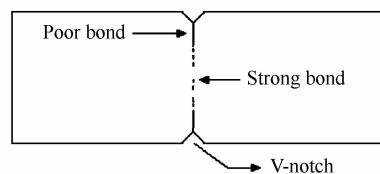


图 2 熔接痕形态结构

Figure 2 Weld line morphological structure

Tomari 等^[12]为了研究上述形态结构对 PS 熔接痕力学性能的影响,将有熔接痕的聚苯乙烯(PS)制品磨去不同深度后观察其力学性能的变化,结果表明,当磨去的深度达到 0.2 mm 时,熔接痕的拉伸强度基本达

到本体部分的强度,磨去的深度超过 0.2 mm 之后,其力学性能基本不变,因而可以断定 PS 弱连接层的厚度为 0.2 mm。Debondue 等^[13]用砂纸将聚碳酸酯(PC)和 PS 表面的 V 型槽磨去后发现,PS 的熔接痕系数提高了 25%,而 PC 的熔接痕系数几乎没有变化。研究发现,PC 的 V 型槽深度远小于 PS,因此熔接痕系数受 V 型槽影响不大。此外,PC 分子链在熔接痕处的缠结程度比 PS 的高也是原因之一。

工艺参数对熔接痕处微观结构的影响是人们关注的热点之一。Watkinson 等^[14]研究发现,在较低的熔体温度下,熔接痕的形态结构与本体部分不同,其特征为沿熔接痕方向有串晶生成;但在较高熔体温度下,熔接痕的形态结构与本体部分区别不大,仅可观察到熔接痕区域的球晶尺寸比本体部分小。同时发现试样失效的始发位置大部分都在剪切层,而不是表层。Peng Dong 等^[15]通过研究聚丙烯(PP)熔接痕形态结构与性能的关系,发现降低熔体的冷却速度有利于 PP 制品结晶度的增大,从而有利于熔接痕力学性能的提高。

3 成型工艺对熔接痕的影响研究

熔接痕作为注塑成型常见缺陷之一,其形成在很大程度上受到成型工艺的影响,合理的成型工艺可以较好地改善熔接痕缺陷。因此,国内外学者就成型工艺对熔接痕的影响也开展了相关研究。下文主要介绍熔体温度、模具温度以及注射压力对熔接痕的影响研究。

熔体温度的提高可以增强熔体分子的热运动能力,促进熔体分子链的充分松弛,两股熔体在型腔中汇合后充分松弛的分子链能够更好地进行扩散与缠结,从而提高了熔接痕强度。Zhou Yuanxin 等^[16]将在不同熔体温度条件下制得的尼龙 66(Zytel 70G33L)熔接痕试样进行实验研究发现,熔接痕试样的拉伸强度随着熔体温度的提高而提高,在熔体温度为 280 ℃时达到了最大,提高幅度达到了 20%。而熔体温度达到 280 ℃之后,进一步提高熔体温度对熔接痕拉伸强度几乎没有任何影响。

模具温度的提高可以降低熔体进入型腔之后的冷却速率,有利于分子处于较强活动能力状态的时间延长,熔接区域分子链有充分的时间扩散与缠结,改善了熔接痕界面的结合程度,提高了熔接痕强度。Wu 等^[17]对在不同模具温度条件下制得的高密度聚乙烯(HDPE)熔接痕试样进行了实验研究,发现熔接痕可见度随着模具温度的提高而降低,试样的力学性能则随之提高。但是 Piccarolo 等^[18]认为模具温度对熔接

痕强度的影响是与材料有关的,结晶型材料熔接痕强度对于模具温度的变化非常敏感,而对于无定型材料,模具温度的变化对其熔接痕强度的影响却是微乎其微。

较高的注射压力有助于熔体克服流道阻力,减小压力损失,使压力更好地传递到熔体前沿,两股熔体能够在较高的压力条件下相遇,熔接痕区域的分子链密度得以提高,改善了熔接痕界面缠结程度;同时较高的压力促使分子链沿着压力方向排列,这种取向提高了熔接痕区域的拉伸强度。Tomari 等^[19]对在不同注射压力成型条件下制得的熔接痕试样进行了拉伸试验,发现熔接痕拉伸强度随着注射压力的增大而增大。

4 改善熔接痕的方法

熔接痕的存在降低了制品的性能,研究者们围绕如何改善熔接痕已经做了大量的工作。总体而言,改善熔接痕的方法主要包括三个方面:注塑成型新技术、模具结构优化以及工艺参数优化。文中主要介绍前两者。

4.1 注塑成型新技术

比较常见的注塑成型新技术有快速变模温注塑成型^[20-21]、双推充模法注塑成型^[22]、超声振动注塑成型、动态保压注塑成型^[23]等,此处简要介绍快速变模温注塑成型和双推充模法注塑成型。

快速变模温注塑成型的关键在于模具温度的动态控制,使模具温度在充模过程中可以保持一个相对高的温度,如图 3 所示。快速变模温注塑成型主要有两个优势:采用较高的模温有效避免在型腔中形成冷凝层,有利于熔接痕的改善;充模阶段时较高的模具温度有利于熔体分子链的充分松弛,改善熔体前沿汇合时的分子扩散与缠结,提高熔接痕强度。陈川对快速变模温工艺参数对熔接痕可见性的影响进行了研究,发现熔接痕在模具温度为 110 ℃时基本不可见,说明快速变模温注塑成型可以改善制品的表面质量。Chen 则采用了电磁感应加热结合冷冻液冷却技术来控制动模的温度,使制品的熔接痕强度提高了 20%。

双推充模法注塑成型是另一种经典的改善熔接痕的注塑成型新技术,图 4 为其结构示意图,双浇口模具系统与左右注射系统是双推充模法注塑成型的核心结构。在填充阶段,两个浇口同步充模,等熔体充满型腔后在型腔中间会形成呈平面状的熔接面,接着双螺杆开始进行交替往复运动,使熔接面呈波浪式曲面。双推充模法注塑成型可以改善熔接痕熔接界面的取向程度,提高熔接痕强度。

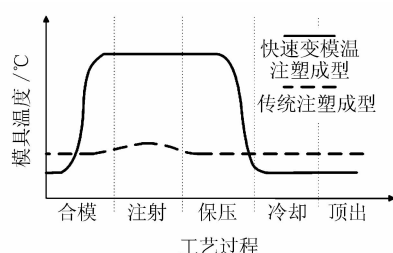
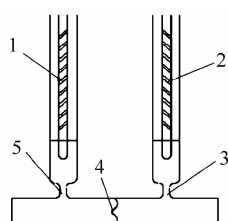


图3 快速变模温注塑成型与传统注塑成型模具温度比较示意图

Figure 3 Comparison diagram between rapid heat cycle molding and traditional injection molding



1,2—螺杆;3,5—浇口;4—熔接痕

图4 双推充模法注塑成型

Figure 4 Double push injection molding method

4.2 优化模具结构

熔接痕的形成与模具结构有着密切的联系,多浇口浇注、壁厚不均以及存在嵌件会影响熔接痕的形成。与熔接痕强度关系密切的模具结构因素包括浇口、壁厚和冷料井,这三个因素的合理设计可以有效改善熔接痕。

合理的浇口设计可以有效地减小熔接痕带来的负面影响。周桂云^[24]通过 Moldflow 模拟分析软件对插座上盖的注塑成型进行了模拟,将双浇口浇注用单浇口浇注取代,发现熔接痕数量减少。陶永亮^[25]分别使用单浇口、双浇口、三浇口和四浇口来注塑一个圆环制品,发现熔接痕数量随着浇口的增多而增多,因此他认为在条件允许范围内尽量少设浇口,是改善熔接痕的一种有效措施。

注塑制品的壁厚变化对熔接痕的长度和位置有着重要的影响。黄观庭等^[26]使用 Moldflow 软件来模拟研究壁厚对熔接痕的影响,发现随着壁厚的增加,熔接痕的数量和长度也随之增加。当壁厚达到 0.53 mm 时,熔接痕开始产生,并且熔接痕长度随着壁厚的增加而增大。当壁厚达到 1.02 mm 时,产生了第 2 条熔接痕。

开设冷料井有利于提高熔体在冷料井部位汇合时的温度,进而提高熔接痕强度。曾令琴^[27]研究了正方

形、圆形和棱形冷料井对熔接痕的改善情况,发现正方形冷料井几乎能够将熔接痕完全消除,而圆形和棱形冷料井对于熔接痕也有一定程度上的改善,其原因在于正方形冷料井制品表面的分子取向与熔体流动方向一致,而圆形和棱形冷料井制品表面的分子取向与熔体流动方向有一定的偏差。

5 总结

熔接痕的存在对注塑成型制品的外观以及力学性能有很大影响。在注塑成型过程中,熔接痕的产生往往是不可避免的。文中阐述了熔接痕的形成机理以及典型的熔接痕强度预测模型,总结了熔接痕的形态结构与力学性能及成型工艺之间的影响关系,综述了快速变模温等注塑成型新技术以及模具结构优化等熔接痕改善方法^[28]。

参考文献:

- [1] 徐佩弦. 注射制品与模具设计[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2002.
- [2] 徐佩弦. 融合缝的力学性能[J]. 工程塑料应用, 1994, 22(5): 21-26.
- [3] KIM J K, SONG J H, CHUNG S T, et al. Morphology and mechanical properties of injection molded articles with weld line[J]. Polymer Engineering and Science, 1997, 37(1): 228-241.
- [4] MEKHILEF N, AIT-KADI A, AJJI A. Weld lines in injection-moulded immiscible blends: model predictions and experimental results[J]. Polymer, 1995, 36(10): 2033-2042.
- [5] GUO Shaoyun, AIT-KADI A, BOUSMINA M. A modified model predictions and experimental results of weld-line strength in injection molded PS/PMMA blends[J]. Polymer, 2004, 45(9): 2911-2920.
- [6] FELLAHI S, MEDDAD A, FISA B, et al. Weldlines in injection-molded parts: A review[J]. Advances in Polymer Technology, 1995, 14(3): 169-195.
- [7] 余晓容, 刘春太, 董斌斌, 等. 注塑制品熔接痕的自动识别[J]. 工程塑料应用, 2003, 31(4): 17-19.
- [8] 周华民, 李德群. 基于成形模拟的注塑件熔接痕确定与评价[J]. 中国机械工程, 2004, 15(21): 1962-1965.
- [9] 钟皓东, 邓益民. 基于遗传算法的注塑成型熔接痕长度和位置的优化[J]. 塑料工业, 2006, 34(11): 27-29.
- [10] SON Y G, AHN K H, CHAR K. Weldline morphology of injection molded modified poly(phenylene-oxide)/polyamide-6 blends[J]. Polymer Engineering and Science, 2001, 41(3): 554-565.
- [11] G. 斯特罗伯. 高分子物理: “结构与性能”背后的概念[M]. 3rd ed. 北京:机械工业出版社, 2012.
- [12] TOMARI K, HARADA T, MAEKAWA Z, et al. Fracture toughness of weldlines in thermoplastic injection molding[J]. Polymer Engineering and Science, 1993, 30(15): 996-1001.
- [13] DEBONDUE E, FOURNIER J E, LACRAMPE M F, et al. Weld-line sensitivity of injected amorphous polymers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2004, 93(2): 664-665.

(下转第 118 页)