

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.08.030

有限元分析在塑料加工与制品性能分析中的应用

刘芳

(武汉铁路职业技术学院, 武汉 430000)

摘要: 主要介绍了在加工方面利用有限元分析法对模具的结构、浇注系统和冷却系统进行合理的设计以及对挤出成型过程中挤出胀大现象的预测;在制品性能分析方面对制品的结构进行模拟,并结合制品结构特点对其力学性能、电学性能、热学性能等进行预测和分析。

关键词: 有限元分析;塑料加工;模具设计;性能预测与分析

中图分类号: TQ32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)08-0143-05

Application of Finite Element Analysis in Plastic Processing and Product Performance Analysis

Liu Fang

(Wuhan Railway Vocational College of Technology, Wuhan 430000, China)

Abstract : The reasonable design and prediction of the phenomenon of die swell in the extrusion process by using finite element analysis method in the processing of die structure, gating system and cooling system were mainly introduced. In the part performance analysis, structure of the parts was simulated, the mechanical properties, electrical properties and thermal properties were analysed and predicted combining with the system structure characteristic.

Keywords : finite element analysis ; processing of plastic products ; molding design ; analysis and prediction of property

塑料具有一系列的优异性能,例如具有较好的化学稳定性、尺寸稳定性,易加工,可广泛应用于医用、军用、包装、航空航天、光电材料等^[1-5]。在这些领域中,尤其是在车用、军用及航空航天材料中,往往需要用于具有复杂结构的薄壁制品的制备,这就对注塑工艺及材料选择的要求极高。在加工时,需要对材料进行合理的选择,对模具结构进行科学的设计,对加工工艺进行系统的优化,进而保证制备出应用性能符合使用指标的塑料制品^[6-10]。

在以往传统的材料选择、模具设计和工艺优化中,大部分是依靠生产经验,然后通过大量的实验进行有条件的筛选,这一方法工作量巨大,对人力和物力的浪费较为严重,并且极大程度上延长了生产周期,降低了生产效率,提高了生产成本。将数学学科与高分子学科结合,利用数值模拟和有限分析对制品及模具进行三维建模,能够高效地通过模拟对其结构进行合理的设计,并且结合材料的物理和化学性质,还能对目标材料的力学性能、热学性能、电学性能等进行精确地预测及合理的分析。这一方法大大简化了实际生产过程的操作过程,缩短了生产周期,降低了生产成本,是一种高效、科学的方法^[11-15]。

1 有限元分析在模具设计中的应用

近年来,塑料制品模具在模具市场中所占的比例约为30%^[16],在航空航天、汽车零部件、仪表机电产品制造等领域

应用广泛。随着气体辅助成型技术日渐成熟,塑料模具在汽车内饰、洗衣机和电视机外壳等塑料制品的加工中也得到了广泛的应用^[17]。因此,模具设计与加工发展前景形势依然较好^[18-19]。合理的模具结构能够有效提高塑料件的质量,如设计合理的浇注系统,能够有效地减少塑料件中的气泡、熔接痕以及浇口处的翘曲变形和尺寸收缩;合理的冷却系统能够保证制品冷却速率均匀,降低由于冷却不均造成的制品翘曲变形等缺陷。结合目标塑料件结构,结合有限元分析,对模具进行三维建模和网格分析,能够高效地对模具结构进行合理的设计,进而保证塑料件的质量,减少加工缺陷。

卢钢^[20]对尺寸为450 mm×235 mm×47 mm,壁厚为2 mm的汽车B柱内饰件进行了三维建模,选择适用于大尺寸、结构简单制品的中层面网格类型对制品进行网格划分,平均纵横比为1.591,网格匹配率高达100%。由于制品较薄,且成型宽度大,在浇注系统设计中采用一模两腔设计,选用对称的两个扇形浇口,能够保证制品各部位温差较小;冷却系统选用10组平行的回型冷却管路,管路直径为10~12 mm,距离制品10 mm,放置于制品上方,将进出水温度控制在5℃以内,可以保证制品各部位冷却速率均匀。

林建兵^[21]对尺寸为1180 mm×880 mm×185 mm,

联系人:刘芳,本科,副教授,主要从事数学应用研究

收稿日期:2017-05-15

壁厚为3 mm的车门内饰板进行了三维建模并进行了网格划分,同样采用中层面网格,网格面积为6 741.7 cm²,最大纵横比为15.58,网格匹配率为84.5%。考虑到制件的尺寸和壁厚,作者最终设计出了热流道浇注系统,并在制件的4个角落和中间部位分别设置5个浇口,可以保证模具在3.372 s内被填充完毕,有效避免了冷流道系统中填充速率慢、冷却时间长以及取料复杂、出现冷料和废料的缺点,更加适用于这类尺寸跨度大的制件加工。在该浇注系统下,通过进一步优化加工工艺,制件最终的总翘曲变形量仅为3.695 mm。

赵佳峰等^[22]对尺寸为300 mm×85 mm×65 mm,壁厚为2.5 mm的塑料件进行了三维建模和网格划分,网格匹配率高达90.8%,通过有限元分析发现,选用冷流道浇注系统,在制件中部设置一个扇形浇口,冷却管路直径设置为8 mm,冷却水温度设置为25℃,入口雷诺数为10 000的条件下,结合进一步工艺优化可以制备出翘曲变形低至2.376 mm的塑料件。

孙蒙蒙等^[23]利用有限元分析将尺寸为855 mm×785 mm×80 mm,壁厚为3 mm的塑料件的浇注系统设置为分别处于制件4个角落的4个点浇口,在该浇注系统下,通过工艺优化可以将制件的翘曲变形控制在1.766 mm。

朱兴建等^[24]也利用有限元分析法对塑料件的浇注系统进行了设计,作者所选用的制件的尺寸为127 mm×33 mm×6.8 mm,壁厚为4.5 mm,他们所设计的浇注系统为一模两腔的热流道浇注系统,主流道为锥形,半径为4~8 mm,分流道为圆柱形,直径为6 mm,浇口设置在两个模腔的侧面靠近主流道的位置。与常见浇注系统相比,利用该浇注系统对塑料件进行注射成型,通过工艺优化后获得的制件的尺寸收缩和翘曲变形可以降低50%以上。

沈洪雷等^[25]利用有限元分析法设计了丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)的洗衣机控制面板模具的浇注系统。通过对制件的三维建模和网格划分,设计了将浇注系统由普通开放性热流道改为针阀式顺序控制热流道,并设计了3个浇口,在浇口1处设置了4个进浇点,浇口2和浇口3处各设置了一个进浇点。通过进一步工艺优化后,利用所设计的浇注系统制备的洗衣机控制面板中的气穴数量明显降低,并且浇口处也没有出现明显的贯穿性熔接痕。

沈晓伟^[26]利用有限元分析法对汽车后视镜盖模具的浇注系统进行设计。通过对比点浇口、侧浇口、潜伏浇口和直浇口,发现选用点浇口热流道浇注系统能有效提高熔体充模效率和制件表面温度场的均一性。且当主流道为锥形,直径为1.5~10 mm,长度为100 mm,分流道和型腔之间的细短流道长度为0.2~2.5 mm时,通过进一步的注塑工艺优化可以制造出质量符合要求且外观美观的后视镜盖。

有限元分析不仅可以用于模具浇注系统的设计,还能够用于其冷却系统设计和优化。谭鹏^[27]对长玻璃纤维增强聚丙烯(PP)汽车安装支架进行三维建模,然后对其进行边长为6 mm的网格划分,将纵横比控制在6左右,使得网格匹配率高达85%以上,并通过有限元分析对模具的浇注系统和冷却系统进行了确定。分析结果表明,将浇口置于制件侧面中部可以有效避免物料熔体的滞流并可以在最大程度上保证制件的美观;采用两套分别位于制件上下方、并行放置的冷却管路,管路与制件的距离为20 mm,并将流道设计为圆锥形,直径为6 mm,冷却介质选用25℃的水,可以保证制件冷却均匀,缺陷较少。

孙显俊^[28]分别对简单平板制件、复杂制件和汽车手套箱盖板的加工过程进行了有限元分析,作者将有限元模型简化为制件、冷流道、模具以及冷却管路4个部分,通过三维建模和网格划分对浇注系统和冷却系统进行了合理的设计,分析结果表明,在进行简单平板制件加工中,将浇口置于制件侧面中部,采用宽流道,能有效地降低垂直于熔体流动方向的流动差异,提高注塑件的质量;复杂制件的加工中,在模具中设计两个窄浇口,更适用于复杂制件中复杂的流动特性,避免制件温度分布不均匀;汽车手套箱盖板的结构更为复杂,且尺寸较差,在网格划分中网格数高达180万,将浇口设计为点浇口,数量为1个,位置处于支架中部,能够制备质量符合要求的塑料件。对于冷却系统的设计,在普通平板之间和复杂制件的加工中,选用位于制件上方和下方平行放置的冷却管路,能够保证制件冷却均匀,制件各部位之间的温差小于10℃;在汽车手套箱盖板中采用上下平行放置的冷却管路,两套管路之间用软管进行连接,更适用于复杂结构制件的冷却,可以有效避免由于冷却速率差异所造成的制件缺陷。

何政军^[29]对三元乙丙橡胶材料的耦合器进行了三维建模和网格划分,通过有限元分析发现,将浇口位置设置于耦合器的右半部分,并在模具上下设置两组平行的冷却管路。利用所设计的浇注系统和冷却系统对耦合器进行加工,通过工艺优化可以将制件的翘曲变形量控制在3.612 mm,完全满足产品质量要求。

张琦^[30]对ABS/聚碳酸酯合金材质的手机外壳模具的浇注系统和冷却系统进行了设计,作者通过对手机外壳模型的有限元分析,将浇注方式设置为点浇注,主流道设计为锥形,浇点数目设置为2,进浇点位置设置在模具中部;另外,分别在型腔和型芯处各设计均匀分布的4根回型冷却管路,利用所设计的浇注系统和冷却系统对制件进行加工,在优化后的注塑条件下,能够有效控制翘曲变形量低于0.47 mm。

潘秀石等^[31]对吸尘器电机罩盖板进行三维建模、网格

划分和有限元分析,设计了合理的浇注系统和冷却系统。作者对进浇点数目进行了优化,发现选用2点进浇浇注系统时,制件各部位温度分布较均匀;选用直孔隔板式冷却回路能够有效保证冷却过程中各部位的冷却速率一致,其中选用直径为8 mm的冷却管路,直径为16,20,30 mm的隔水片水道孔。在所设计的浇注系统和冷却系统下对制件进行注塑,最终所获得的制件的质量和外观均得到有效的保障。

尹小定^[32]利用有限元分析法对控制面板模具的浇注系统和冷却系统进行设计。最终将浇口设置在旋钮周围,能够有效减少制件中气穴的数量,并避免熔接痕的出现;另外,作者设计了环形水路和隔水片相结合的冷却系统,将冷却管路直径设置为10 mm,并采用4个厚度为3 mm,宽度为15 mm的隔水片,分析结果表明,该冷却系统能够保证制件各部位冷却速率具有较高的一致性,能够制造出低翘曲变形量的塑料件。

王蕾等^[33]对电话壳模具进行了有限元分析,将模具质量确定为99.72 g,设置为一模一腔。分别研究了在2个进浇点的点浇口、1个进浇点的点浇口和侧浇口浇注系统下制件的加工过程。研究发现,当浇注系统选定为2个进浇点的点浇口时,能够有效缩短流体流动时间间隔,提高熔体充模均匀性,利用该浇注系统进行支架加工能明显减少气穴数量。另外,作者通过对冷却系统的有限元分析,对比了冷却管路数量对制件质量的影响。有限元分析结果表明,当在型腔和型芯分别设计均匀分布的4根直径为10 mm的冷却回路时,制件表面的温度分布均匀,冷却时间明显缩短,成功降低了制件的翘曲变形量。

周慧兰等^[34]对电话机面板模具进行了有限元分析,将模具设置为一模一腔。有限元分析结果表明,当将浇注系统选定为2进浇点点浇口并在型腔和型芯分别设置6根均匀分布的冷却管道时,通过工艺优化可以有效降低制件的翘曲变形量,且能够保证制品的外观美观。

以上应用实例说明,有限元分析法在模具设计中的应用大大提高了模具设计的效率,且结合实际生产数据发现,利用有限元分析法所设计的模具结构的科学性及合理性也得到了保障,通过结合工艺优化能够制备外观和质量均满足使用要求的塑料件。

2 有限元分析在聚合物熔体性能预测中的应用

除了注塑加工外,挤出加工也是热塑性塑料常用的加工方法之一。在挤出加工过程,聚合物熔体存在挤出胀大现象,这种现象在很大程度上影响塑料制品的质量,而有限元分析则可以对不同模式下,不同材料的挤出胀大现象进行准确的预测,进而为加工过程提供科学的指导。

李勇等^[35]运用有限元分析方法,对黏弹流体的挤出胀

大进行三维建模和网格划分,利用迭代方程对熔体应力进行计算,然后对不同长度和宽度矩形流道中熔体的挤出胀大现象进行预测和模拟。有限元分析结果表明,熔体胀大率与流道宽厚比呈正比,而与流道长度呈反比。通过实验验证发现,该方法对黏弹流体的挤出胀大现象的预测具有很高的准确性。

有限元分析法除了对单组分聚合物熔体的挤出胀大行为进行准确的预测,还能够对多组分聚合物熔体的挤出胀大现象进行分析和预测。黄益宾等^[36]以PP和聚苯乙烯(PS)为原料,选用层比为1截面为矩形的双层共挤口模,利用有限元分析法对其挤出胀大现象进行了预测。通过对熔体在口模内外的剪切速率分布进行计算发现,当入口处PP与PS体积流量相同时,PP会向PS一侧偏转,型材容易发生畸变。该预测结果与实验结果吻合。

万齐访^[37]运用有限元分析方法对聚合物熔体的传统包覆共挤和气辅包覆共挤的挤出过程进行三维建模和预测,通过对口模出口处各个方向上的速度、压力、剪切速率及应力分布进行计算发现,气辅包覆共挤方法能够有效改善传统包覆共挤中的挤出胀大现象。作者还利用有限元分析对熔体黏度、熔体层厚度、材料参数、体积流率、进料方式、气辅段长度及松弛时间等因素进行了分析。

柳和生等^[38]运用有限元分析方法对低密度聚乙烯/高密度聚乙烯熔体的包覆共挤过程进行了三维建模和数值模拟,分析结果发现这两种聚合物熔体在气辅包覆共挤过程中,当聚合物熔体芯层与壳层的体积流率相同时,松弛时间对熔体挤出胀大率没有明显影响;而当两者体积流率不同时,体积流率大的熔体出现挤出胀大现象,而体积流率较小的熔体出现挤出收缩行为。

以上研究表明,在聚合物的挤出成型过程,有限元分析能够准确地对其挤出胀大行为进行预测,且可以通过对挤出方式和工艺参数的分析,有效地筛选出有利于降低或避免挤出胀大行为的加工方式。

3 有限元分析在材料性能预测中的应用

除了在聚合物加工过程中的应用,有限元分析法还可以运用到聚合物材料性能的预测当中。陈巧悦等^[39]对微孔聚氨酯弹性体进行了二维建模,采用有限元分析法对其力学特性进行了预测和分析,分别研究了微孔数目、微孔孔径及微孔密度对其应力的影响。分析结果表明,微孔密度对聚氨酯弹性体力学性能的影响最为显著,当微孔密度小于 0.4 g/cm^3 时,材料力学性能随微孔密度增大而线性增大;而当微孔密度大于 5 g/cm^3 之后,材料力学性能随微孔密度增大呈非线性增大。另外,减小微孔孔径的波动范围,有利于提高聚氨酯弹性体力学性能的稳定性。

白晓鹏等^[40]也同样利用有限元分析法预测微孔聚氨酯弹性材料的力学性能,研究发现这种材料存在超弹性和非线性特性。试验结果表明,在 Yeoh 模型、Ogden N=3 模型和 Van der Waals 模型下,有限元分析法预测的误差仅为 8.44%, 5.93% 和 7.83%。有限元分析不仅可以对材料的静态力学性能进行预测,还能够准确地对其动态力学性能进行预测。

陈吉平等^[41]利用有限元分析法研究了微孔聚氨酯黏弹性材料的损耗模量和储能模量与频率、温度以及应变之间的关系,分析结果表明,温度和频率对材料的损耗模量和储能模量影响一致,当温度区间为 $-20 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 时以及频率变化范围为 $0 \sim 5 \text{ Hz}$ 时,材料的损耗模量和储能模量均随温度升高而降低,随频率增大而增大;而应变幅值对两者的影响趋势相反,随应变幅值增大,损耗模量增大,储能模量降低。通过实验对有限元分析预测结果进行验证发现,损耗模量和储能模量的预测误差仅为 5.2% 和 9.1%,说明有限元分析法预测结果的准确性。

有限元分析法不仅对材料的力学性能进行预测,还可以对聚合物材料的抗震性^[42]、导热性^[43-44]、凝聚态^[45]、介电特性^[46]、流变性^[47]、疲劳特性^[48]等进行准确的预测。

4 结语

有限元分析通过预测不同模具结构制件质量的影响,能够对模具结构、浇注系统和冷却系统进行合理的设计,从而成功地减少塑料件的气孔、熔接痕及翘曲变形等缺陷;有限元分析还可以准确预测塑料挤出成型过程中的熔体胀大现象及分析各个因素对挤出胀大现象的影响,进而找出有利减小挤出胀大现象的挤出方法和加工参数;有限元分析法还能够对聚合物材料的力学性能、导热性、介电性能等准确预测。有限元分析法是一种高效的数值模拟法,在聚合物加工及性能预测和分析领域有着广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 李鑫改. 教育科学:引文版,2017(2):258.
Li Xingai. Educational Science:Citation Edition,2017(2):258.
- [2] 王雅琼. 太原科技,1990(3):21-23.
Wang Yaqiong. Taiyuan Science and Technology,1990(3):21-23.
- [3] 张超灿,等. 武汉理工大学学报,2002,24(10):13-16.
Zhang Chaocan, et al. Journal of Wuhan University of Technology, 2002,24(10):13-16.
- [4] 杨婷婷,等. 高分子学报,2017(3):411-428.
Yang Tingting, et al. Acta Polymerica Sinica,2017(3):411-428.
- [5] 郑司超. 工业,2016(11):22.
Zheng Sichao. Industry,2016 (11):22.
- [6] 姚思玥. 工业,2017(1):131.
Yao Siyue. Industry,2017(1):131.
- [7] 张学志,等. 工程技术:全文版,2017(3):308.
Zhang Xuezhi, et al. Engineering Technology:Full Text,2017(3):308.
- [8] 朱晓东,等. 深圳职业技术学院学报,2017,16(1):29-31.
Zhu Xiaodong, et al. Journal of Shenzhen Polytechnic,2017, 16(1):29-31.
- [9] 刘小东. 化学工程与装备,2017(1):181-183.
Liu Xiaodong. Chemical Engineering & Equipment,2017(1):181-183.
- [10] 王震. 工程技术:全文版,2017(3):283.
Wang Zhen. Engineering Technology:Full Text,2017(3):283.
- [11] 尹沾松,等. 塑料科技,2006,34(4):24-28.
Yin Zhansong, et al. Plastics Science and Technology,2006, 34(4):24-28.
- [12] 黄艳艳. 塑料注射制品的有限元分析[D]. 合肥:合肥工业大学,2010.
Huang Yanyan. Finite element analysis of plastic injection products[D]. Hefei:Hefei University of Technology,2010.
- [13] 赵鹏,等. 塑料,2012,41(6):94-97.
Zhao Peng, et al. Plastics,2012,41(6):94-97.
- [14] 刘明卓. 塑性工程学报,2011,18(4):116-119.
Liu Mingzhuo. Journal of Plasticity Engineering,2011,18(4):116-119.
- [15] 邓小雷,等. 轻工机械,2008,26(6):44-47.
Deng Xiaolei, et al. Light Industry Machinery,2008,26(6):44-47.
- [16] 冯刚,等. 塑料工业,2014,42(4):16-19.
Feng Gang, et al. China Plastics Industry,2014,42(4):16-19.
- [17] 侯磊. 科技资讯,2014,12(19):12.
Hou Lei. Science & Technology Information,2014,12(19):12.
- [18] 王宏亮. 中国科技纵横,2016(2):78-79.
Wang Hongliang. China Science and Technology,2016(2):78-79.
- [19] 姜文博,等. 南方农机,2016,47(1):59.
Jiang Wenbo. Nanfang Nongji,2016,47(1):59.
- [20] 卢钢. 基于苧麻/PP材料的汽车内饰件注塑成型工艺仿真研究[D]. 长沙:湖南大学,2013.
Lu Gang. Study on injection molding process simulation of automotive interior part based on ramie fiber reinforced polypropylene material[D]. Changsha:Hunan University,2013.
- [21] 林建兵. 制造业自动化,2015(13):106-108.
Lin Jianbing. Manufacturing Automation,2015(13):106-108.
- [22] 赵佳峰,等. 工程塑料应用,2011,39(10):55-57.
Zhao Jiafeng, et al. Engineering Plastics Application,2011, 39(10):55-57.
- [23] 孙蒙蒙,等. 工程塑料应用,2012,40(10):43-46.
Sun Mengmeng, et al. Engineering Plastics Application,2012, 40(10):43-46.
- [24] 朱兴建,等. 塑料,2014,43(5):102-105.
Zhu Xingjian, et al. Plastics,2014,43(5):102-105.
- [25] 沈洪雷,等. 高分子材料科学与工程,2013,29(10):175-178.
Shen Honglei, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2013,29(10):175-178.

- [26] 沈晓伟. 模具制造, 2015, 15(3):60-65.
Shen Xiaowei. Die & Mould Manufacture, 2015, 15(3):60-65.
- [27] 谭鹏. 长玻纤增强聚丙烯制品成型模拟工艺优化及应用研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
Tan Peng. Research on molding simulation optimization and application of long glass fiber reinforced polypropylene product[D]. Changsha:Hunan University, 2015.
- [28] 孙显俊. 聚丙烯及其复合材料注塑件翘曲变形数值模拟与实验研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
Sun Xianjun. Warpage of injection molded parts manufactured with polypropylene and its composites[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015.
- [29] 何政军. 基于实例的注塑模具 CAD/CAE/CAM 技术研究与应用 [D]. 保定: 华北电力大学, 2014.
He Zhengjun. Technology research and application on CAD / CAE / CAM based on an actual example of injection mold[D]. Baoding:North China Electric Power University, 2014.
- [30] 张琦. 基于实例的注塑模具 CAD/CAE/CAM 集成技术研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2012.
Zhang Qi. Integration technology research on CAD/CAE/CAM based on an actual example of injection mold[D]. Baoding:North China Electric Power University, 2012.
- [31] 潘秀石, 等. 工程塑料应用, 2015, 43(1):80-84.
Pan Xiushi, et al. Engineering Plastics Application, 2015, 43(1):80-84.
- [32] 尹小定. 塑料科技, 2016(6):61-65.
Yin Xiaoding. China Plastics Industry, 2016(6):61-65.
- [33] 王蕾, 等. 新技术新工艺, 2014(2):86-89.
Wang Lei, et al. New Technology & New Process, 2014(2):86-89.
- [34] 周慧兰, 等. 中国塑料, 2012(2):63-67.
Zhou Huilan, et al. China Plastics, 2012(2):63-67.
- [35] 李勇, 等. 中国塑料, 2010, 24(2):78-82.
Li Yong, et al. China Plastics, 2010, 24(2):78-82.
- [36] 黄益宾, 等. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(4):657-665.
Huang Yibin, et al. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(4):657-665.
- [37] 万齐访. 塑料异型材气辅包覆共挤数值模拟与实验研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2015.
Wan Qifang. Numerical simulation and experimental study on plastic profile gas-assisted coated coextrusion[D]. Nanchang:Nanchang University, 2015.
- [38] 柳和生, 等. 高分子材料科学与工程, 2014, 30(10):113-116.
Liu Hesheng, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2014, 30(10):113-116.
- [39] 陈巧悦, 等. 高分子学报, 2015(10):1 231-1 234.
Chen Qiaoyue, et al. Acta Polymerica Sinica, 2015(10):1 231 -1 234.
- [40] 白晓鹏, 等. 湖南工业大学学报, 2014(6):32-37.
Bai Xiaopeng, et al. Journal of Hunan University of Technology, 2014(6):32-37.
- [41] 陈吉平, 等. 机械工程材料, 2016, 40(7):64-67.
Chen Jiping, et al. Materials for Mechanical Engineering, 2016, 40(7):64-67.
- [42] 赵伟伟. 新型组合管节点抗震性能研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2015.
Zhao Weiwei. Study on Seismic performance of new combination tube node[D]. Zhenjiang:Jiangsu University of Science and Technology, 2015.
- [43] 杨方沁. 金属 / 聚合物复合结构对材料导热性能的影响研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
Yang Fangqin. The Study on thermal conductivity of polymer / metal composite materjals[D]. Hangzhou:Zhejiang University of Technology, 2013.
- [44] 高智芳, 等. 塑料工业, 2014, 42(11):63-67.
Gao Zhifang, et al. China Plastics Industry, 2014, 42(11):63-67.
- [45] 曹玉瑞, 等. 周口师范学院学报, 2010, 27(2):54-56.
Cao Yurui, et al. Journal of Zhoukou Normal University, 2010, 27(2):54-56.
- [46] 陈娟, 等. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2016, 39(7):875-879.
Chen Juan, et al. Journal of Hefei University of Technology : Natural Science, 2016, 39(7):875-879.
- [47] 李文文. 成型加工流场中黏弹性高分子熔体的流变响应分析 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2016.
Li Wenwen. Analysis of rheological response of viscoelastic polymer melts in molding processing fields[D]. Qingdao:Qingdao University of Science & Technology, 2016.
- [48] 韩铁. 工程技术: 文摘版, 2016(5):174.
Han Yi. Engineering Technology:Abstract Edition, 2016(5):174.

(上接第 138 页)

- [24] Tharajak J, et al. Wear, 2017, 372:68-75.
- [25] 王宏智, 等. 化工学报, 2013(4):1 359-1 363.
Wang Hongzhi, et al. CIESC Jorunal, 2013(4):1 359-1 363.
- [26] 陶永奇, 等. 中国腐蚀与防护学报, 2017, 36(6):587-594.
Tao Yongqi, et al. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2017, 36(6):587-594.
- [27] 曹攀, 等. 中国腐蚀与防护学报, 2015, 35(1):12-20.
Cao Pan, et al. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2015, 35(1):12-20.
- [28] 王颖, 等. 舰船科学技术, 2010(10):108-113.
Wang Ying, et al. Ship Science and Technology, 2010(10):108-113.
- [29] 彭涛, 等. 中国工程科学, 2016, 18(4):109-112.
Peng Tao, et al. Engineering Science, 2016, 18(4):109-112.
- [30] 杜利楠, 等. 海洋开发与管理, 2013, 30(3):1-6.
Du Linan, et al. Ocean Development and Management, 2013, 30(3):1-6.