

[综述·专论]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.01.028

非牛顿流体材料在工业领域的应用与展望

彭 岩, 吕冰海*, 纪宏波, 孙 磊, 董晨晨, 袁巨龙

(浙江工业大学 超精密加工研究中心, 浙江 杭州 310014)

摘 要:近年来,非牛顿流体材料凭借特殊的流变性能而使其应用领域逐渐扩展。为了进一步把握非牛顿流体的应用现状和发展趋势,文章对此进行了综述。文章在简单介绍非牛顿流体的分类以后,重点阐述了非牛顿流体材料在流体流变性能改善、阻尼制动装置制造、个体防护装备制造以及精密机械加工等领域的应用现状及成果。最后文章进行了总结并指出非牛顿流体材料的主要发展趋势是其材料本身更加智能和流变性能更加可控。

关 键 词:非牛顿流体;助剂;阻尼介质;防护材料;机械加工

中图分类号:TB39 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2014)01-0109-06

Application and Prospect of Non-Newtonian Fluid in the Industrial Field

PENG Yan, LÜ Binghai*, JI Hongbo, SUN Lei, DONG Chenchen, YUAN Julong

(Ultra-Precision Machining Research Center, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, 310014, China)

Abstract: In recent years, the application areas of non-Newtonian fluid extend gradually due to its special rheological properties. In order to make a further understanding of its application and development trend, a review was made here. After a brief introduction of classification of non-Newtonian fluid, its applications and achievements in fluid rheological properties improving, damping devices, individual protection equipments and mechanical processing were detailed introduced. Finally, a summary was made and it also showed the development trend of non-Newtonian fluid which is more intelligent materials and more controllable rheological properties.

Key words: non-Newtonian fluid; additive; damping medium; protective material; mechanical processing

非牛顿流体是指其所受剪应力与剪切应变速率不能始终成线性关系的流体,血液、牙膏、泥浆、牛奶、油漆等物质就是典型的非牛顿流体。非牛顿流体的流变性能和流变规律较为复杂,不同类型的非牛顿流体在剪切应变速率的变化下会表现出不同的流变特性,如Bingham塑性体存在屈服应力,假塑性流体具有剪切变稀特性,胀流型流体具有剪切增稠特性等。非牛顿流体也因此而被应用于工业领域。起初其主要是被当作一些工业助剂来减小流体的管输阻力或改善流体的流变性能。随着材料科学和相关研究技术的不断发展,非牛顿流体材料的应用领域不断深化,同时流变性能更加可控的智能型非牛顿流体材料也逐渐被开发出来并在阻尼装置制造和机械加工等领域取得了重要应

用。文章对非牛顿流体在各工业领域的应用现状进行了综述并在此基础上对非牛顿流体的应用发展作了进一步的展望。文中主要包含3个部分的内容:第1部分阐述了非牛顿流体的分类;第2部分详细叙述了非牛顿流体在不同工业领域的应用状况;第3部分是对整个文章的总结和展望。

1 非牛顿流体的分类

非牛顿流体是一大类实际流体的统称,由于其种类众多且牵涉面广,所以目前并没有哪一种分类方法可以将所有类型的非牛顿流体都涵盖在内。根据前人的工作^[1-2],非牛顿流体可根据在简单剪切流中其黏度函数是否和剪切持续时间有关分为非时变性非牛顿流体和时变性非牛顿流体。

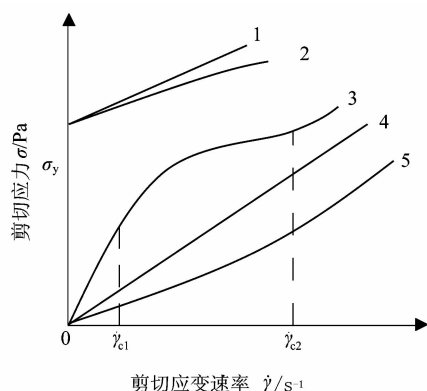
收稿日期:2013-05-25;修回日期:2013-07-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51175166);浙江省自然科学基金重点项目(LZ12E05001)

作者简介:彭岩(1989),男,安徽宣城人,硕士研究生,主要研究方向为超精密加工技术及装备。通讯作者:吕冰海,男,副教授,主要研究方向为超精密加工技术及装备。E-mail:procky@163.com

1.1 非时变性非牛顿流体

非时变性非牛顿流体也称广义牛顿流体。它的黏度只与剪切应变速率有关,而与时间无关。在一定条件下,这类非牛顿流体的剪切应力会随着剪切应变速率的变化而发生非线性变化(如图 1)。根据上述非线性变化规律可大致将此类非牛顿流体分为以下几种: Bingham 流体、非线性 Bingham 流体、假塑性流体和胀流性流体^{[1]41}。



1—Bingham 流体;2—非线性 Bingham 流体;3—假塑性流体;4—牛顿流体;5—胀流性流体

图 1 非时变性非牛顿流体的流动曲线

Figure 1 Flow curve of time independent non-Newtonian fluid

Bingham 流体和非线性 Bingham 流体同属 Bingham 塑性体,这种流体的主要流动特征是存在屈服应力 σ_y ,在实际应用中只有当外界施加的应力超过屈服应力 σ_y 时,流体才会流动。Bingham 流体是在外应力超过屈服应力后开始流动且流动规律遵循牛顿黏度定律的流体;非线性 Bingham 流体是在外应力超过屈服应力后开始流动且流动规律不遵循牛顿黏度定律的流体。假塑性流体的主要流动特征是:当其流动很慢时即剪切应变速率 $\dot{\gamma}$ 从 $0 \rightarrow \dot{\gamma}_{c1}$ 时,剪切黏度保持常数;然而当剪切应变速率 $\dot{\gamma}$ 从 $\dot{\gamma}_{c1} \rightarrow \dot{\gamma}_{c2}$ 时,剪切黏度反而减小;在此之后流体的剪切黏度将趋于一个定值。胀流性流体的主要流动特征是:剪切速率低时,剪切黏度保持常数;当剪切应变速率超过某一临界值后,剪切黏度随着剪切速率的增大而增大。这些特殊的流变特征使得此类非牛顿流体作为新型液体材料、机械加工介质在液体防弹衣制造、磁流变抛光和电流变抛光等方面获得了成功应用。

1.2 时变性非牛顿流体

时变性非牛顿流体的黏度不仅与剪切应变速率有关而且也与剪切持续时间有关。这类非牛顿流体主要

有触变性流体、震凝性流体和黏弹性流体 3 种。触变性流体的黏度在一定剪切应变速率下随时间增大而减小,震凝性流体的表观黏度则在一定的剪切应变速率下随时间增大而增大。黏弹性流体兼具黏性和弹性,它最主要的特征是徐变以及在外力消除后可以产生部分的应变回复。黏度随剪切持续时间的变化而变化是此类非牛顿流体应用的关键,如具有高触变性的印染色浆喷印到织物上后黏度会很快恢复并使得印花轮廓清晰,线条精细光洁。

2 非牛顿流体型材料的应用

2.1 非牛顿流体型工业助剂的应用

2.1.1 非牛顿流体型减阻剂在流体流动减阻方面的应用

流体减阻现象最早是在 20 世纪中叶由 Toms 发现,被称为 Toms 现象^[3]。流体减阻就是在流体输送过程中添加一些具有超高相对分子质量($>10^6$)的化合物作为减阻剂来降低管输阻力,提高产品的输送量的现象。新疆大学的黄维丽,李惠萍等人的研究表明减阻剂属于典型的剪切增稠型非牛顿流体^[4]。减阻剂不仅本身是一种非牛顿流体,而且某些加上减阻剂的牛顿流体也会转变成非牛顿流体。常用的减阻剂有聚氧化乙烯,聚丙烯酰胺,烯烃均聚物或共聚物,聚甲基丙烯酸酯等^[5]。

巴西的研究人员 Figueredo 和 Sabadini 将减阻剂聚氧化乙烯添加到泡沫型消防液(Aqueous film forming foams, AFFF)中,发现加入的极少量聚氧化乙烯使得泡沫型消防液的流动阻力有了明显减小^[6]。除此之外,也有文章指出在消防水中添加少量聚乙烯氧化物,可使消防车龙头喷出的水的扬程提高 1 倍以上^[7]。

近年来非牛顿流体型减阻剂在石油开采,原油和浆体型物料的长距离管道输送中起到了明显的减阻增输和节能作用。伊朗的研究者 Mowla 和 Naderi 采用聚异丁烯为减阻剂并研究了其对原油管输的减阻效果,试验结果表明加入的减阻剂减阻效果良好且在一定条件下阻力减小可达到 40%^[8]。这主要是因为添加的非牛顿流体型减阻剂使得涡流黏度减小,进而降低了流动阻力,同时流体与管壁之间的相互作用也因减阻剂长链高分子的作用而改变,横向流受到了抑制。

2.1.2 非牛顿流体型增稠剂在印花技术上的应用

印花色浆中的增稠剂与印花效果关系密切。增稠剂的高黏度和高触变性可以保证获得轮廓清晰、线条光洁的印花图案,同时具有剪切变稀特性的增稠剂还

可以改善印花色浆的流动性能。现在使用的印花增稠剂多是非牛顿流体且可分为天然增稠剂、化学合成增稠剂和复合类增稠剂3类。

非牛顿流体型天然增稠剂主要是天然及天然改性类高分子,如海藻酸钠、改性淀粉、纤维素衍生物等。对海藻酸钠型的增稠剂,Rebeka Fijan 和 Michele Basile 等人经过研究认为此种增稠剂的主要优势就是溶解度稳定且对活性染料的作用很突出^[9-10]。

近年来为了平衡印花色浆的高黏度与高流速,具有剪切变稀特性和更高触变性的合成增稠剂得到应用。它既可以制成高黏度印花色浆,又可以在流动过程中因剪切变稀特性而改善印花色浆的流动性。同时,在喷印到织物上后它还会因高的触变性而使色浆黏度快速恢复从而使印花图案更加清晰。目前数码印花所用增稠剂多属于此类。为了进一步提高合成增稠剂的使用性能,冯世宏用丙烯酸酯与丙烯酸进行聚合,得到的产品增稠能力强、稳定性好并被应用于化妆品和涂料印花等领域^[11]。叶高勇等通过在增稠剂中引入活性单体和丙烯酸酯得到了具有良好抗电解质性能和增稠性能的增稠剂^[12]。

随着增稠剂研制技术的不断发展,一种新型的非牛顿流体型复合增稠剂已经产生。但现在还处在研究阶段,技术还不成熟。

2.2 非牛顿流体型阻尼介质在阻尼与制动装置中的应用

现在非牛顿流体型介质在粘滞阻尼器、磁流变阻尼器以及磁流变制动器中的应用十分常见。前者使用的非牛顿流体型阻尼介质是改性的二甲基硅油,后者使用的阻尼介质是会在磁场中表现出非牛顿流体特性的磁流变液。

粘滞阻尼器是一种速度相关型阻尼器,其阻尼力与活塞杆的运动速度成幂指关系。非线性(速度指数小于1)粘滞阻尼器由于低速时输出阻尼力增加快而高速时输出阻尼力增加慢而成为一种性能优良的消能减振装置。东南大学的刘斌用实验证明通过对阻尼介质二甲基硅油的改性可以获得非线性度很高的粘滞阻尼器^[13]。他以南京市五台山体育馆为对象,计算分析得到设置非线性流体阻尼器后的结构在罕遇地震作用下柱底剪力和柱端弯矩减小明显,达到30%以上。

磁流变液作为磁流变阻尼器和磁流变制动器中的阻尼介质,当其置于磁场中其黏度会急剧增大进而转变为黏弹性固体。磁流变阻尼器在建筑抗震、舰载机拦截系统和电器减噪等方面均有应用。法国的

Spencer 等在1997年制得一款磁流变阻尼器并将其用于民居和工业建筑的抗震保护中^[14]。沈阳航空航天大学的程涛通过对采用磁流变阻尼器的舰载机拦阻系统的研究发现磁流变阻尼器在改善了缓冲系统缓冲性能的同时也大大提高了缓冲系统的智能性和使用范围^[15]。同时意大利的研究人员Cristiano Spelta等将如图2(a)所示半主动磁流变阻尼器用于洗衣机的减噪,经测试发现更换过阻尼器的洗衣机在正常工作时其噪音下降了1~5 dB^[16]。除此之外磁流变制动器也由于延迟时间短,便于自动控制等一系列优点而被广泛应用。罗马利亚的Ioan Bica将如图2(b)所示磁流变制动器用于控制电动机的转速,他证实通过控制制动器可以使电机的转速在200~1 600 r/min之间连续变化且功率只有85 W^[17]。



(a) 磁流变阻尼器

(b) 磁流变制动器

图2 磁流变阻尼器与制动器

Figure 2 Magnetorheological damper and brake

总之,与传统阻尼装置相比该类阻尼制动装置的使用性能更稳定可靠,更贴合实际工程的需要。

2.3 非牛顿流体型材料在制造个体防护装备上的应用

近年来在制造质地轻柔且防弹防刺性能良好的新型防护装甲时,有一种非牛顿流体型液体材料发挥了作用。这种非牛顿流体材料实质上是由分散相粒子(如 SiO_2)和分散相介质(如聚乙二醇)混合而成的具有剪切增稠特性的分散体系(Shear thickening fluid, STF)。用这种非牛顿流体浸透过的Kevlar纤维在受到剧烈冲击和刺戳时,其因内部非牛顿流体强烈的剪切增稠行为而对子弹冲击或尖刀刺戳的抵抗力急剧增大。

美国特拉华州立大学合成物质研究中心与美国陆军研究试验室下属的“武器原料研究理事会”合作,以上述非牛顿流体浸透过的Kevlar纤维为主要材料制成了一种液体防弹衣。这种新型的液体防弹衣比用未经处理的Kevlar纤维制成的防弹衣在抵抗子弹冲击、尖刀刺戳的性能上拥有很大优势。Lee等人^[18]参照美国的防弹标准对经过处理的Kevlar纤维的防弹性能进行了研究。试验结果表明经处理的Kevlar纤维的

防弹能力显著增强,见图 3(a)和图 3(b)。4 层处理过的 Kevlar 纤维所能吸收子弹的能量与 14 层未处理过的 Kevlar 所能吸收的能量相当。其原因主要是受到高速冲击的剪切增稠液的分散相粒子能够相互聚集并握住纱线,如图 3(c)和图 3(d)所示。有效防止了纱线在高速冲击下的相互移动,这样能量主要就被高耗能的纤维拉伸变形吸收了^[19]。

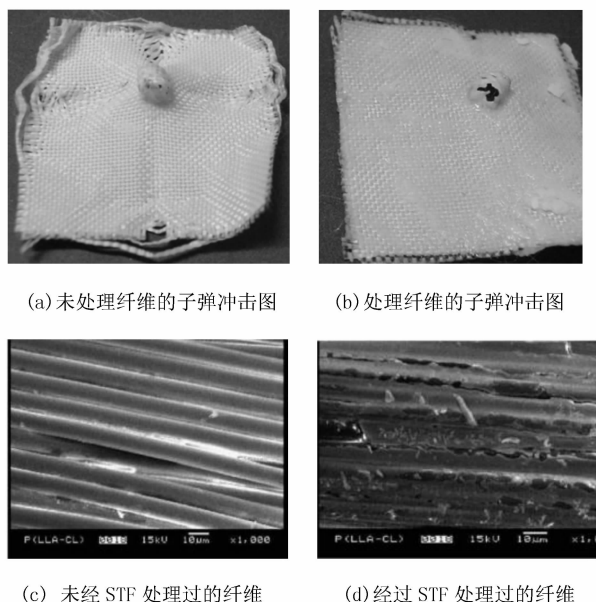


图 3 STF 处理前后 Kevlar 纤维冲击性能与微观结构对比图

Figure 3 Comparison photos of impact and microstructure of Kevlar fibers in STF-unimpregnated and STF-impregnated conditions

非牛顿流体材料不仅在军用装备上得以重要应用,而且在一些民用的运动装备上也得到了应用。英国的高科技公司 d3o 就对此项应用进行了研究。他们研究得到了一种黏性流体和聚合物所合成的具有应变速率敏感性的材料。这种材料的使用和加工十分方便。在民用的运动装备中,这种材料制成的部件可以用来制作鞋子、比赛自行车用手套、头盔和滑雪服等等。在 2006 年都灵冬季奥运会上,美国和加拿大等国的高山滑雪选手就穿着这种材质的滑雪服^[20]。

2.4 非牛顿流体型加工介质在机械加工中的应用

随着机械加工技术的不断革新,一些流体加工技术或手段如磁流变抛光、电流变抛光和磨粒流加工技术相继被研究开发出来。这些加工方法可以实现对某些特殊结构或难加工部位的加工。加工介质的非牛顿流体特性是这些方法区别于其它加工方法的显著特征。

1) 磁流变液。磁流变抛光中处于磁场作用下的磁流变液就是一种典型的磁性非牛顿流体,其流变模型大致与 Bingham 塑性体的流变模型相同。在实际加工中加入磨粒的磁流变液进入工作区域后,它就会转变成黏塑性的 Bingham 介质并在与工件接触区域产生很大的剪应力进而因磨粒的刻划与滚压作用实现工件材料的去除。哈尔滨工业大学的张飞虎等^[21]利用磁流变抛光加工了 R 41.3 mm、球径 20 mm 的 K9 光学玻璃球面,获得了峰谷值(pv)为 57.911 nm 且镜面形貌均方根值(Rms)为 8.441 nm 的球面。磁流变加工除了可以获得高的表面质量,还可以获得无表面残余应力的工件。Kordonsky 等人采用图 4(a)所示的磁流变加工装置对可变几何形状的透镜进行了加工,经测量发现获得的工件表面无残余应力^[22]。

2) 电流变液。电流变液可分为 2 种,①符合 Bingham 模型的粒子型电流变液;②牛顿流体型的液晶高分子型的电流变液。前者由于具有在电场中表观黏度急剧增大和当电场为零时存在屈服应力的双重特性而被用于电流变抛光加工中。日本的 Kuriyagawa 等人采用如图 4(b)所示的设备成功实现了对 BK7 玻璃的抛光,经过 10 min 的加工玻璃工件的表面粗糙度 Ra 值从原始的 18.6 nm 下降到 4.4 nm^[23]。不仅如此,韩国的 W. B. Kim 等人也在对硅片的光整加工中采用了电流变抛光方法,加工 15 min 后他们测得硅片表面粗糙度的 Ra 值由 49.7 nm 减小到 2.9 nm^[24]。

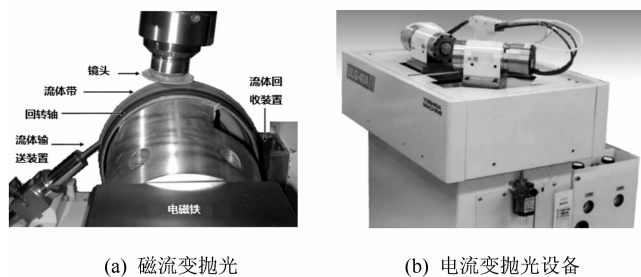


图 4 磁流变抛光与电流变抛光设备
Figure 4 Magnetorheological finishing and ER polishing devices

3) 磨粒流。磨粒流加工是依靠磨粒相对于被加工表面的强迫运动实行刮削而进行加工的技术。非牛顿流体型的高黏度有机高分子液体在加工中主要是作为磨粒悬浮流动的载体。载体的流变特性对磨粒流加工的性能有重要影响。华南理工大学的汤勇等人的研究结果就表明在一定范围内加工磨料的黏度越高,促使磨粒流加工实现的壁滑现象产生的临界速度就越

低^[25]。Kenda 等人将这种加工技术用于去除电火花加工工件的表面损伤层,采用 6.0 MPa 的压力加工 30 min 后工件表面粗糙度的 Ra 值下降了 $1.44\ \mu\text{m}$ ^[26]。除此之外,浙江工业大学的计时鸣等还提出了一种软性磨粒流加工方法,对模具表面经过 50 h 的加工,模具表面横向粗糙度由 $0.566\ \mu\text{m}$ 下降为 $0.271\ \mu\text{m}$ ^[27]。

对于磁流变抛光和电流变抛光,其加工介质的流变性能受控于外加作用场,可以方便地实现对其加工过程的控制,但磁流变液和电流变液的制作成本很高,而且所需的辅助加工设备也很复杂。在这两个方面磨粒流加工技术则有着明显的优势,但它的缺点就是无法根据加工需要来实时调整加工流道中磨粒流的流变特性。

2.5 非牛顿流体材料在其它方面的应用

非牛顿流体除上述应用以外,在其它方面也有应用。一种采用高黏度非牛顿润滑脂作为基液配制而成的磁性非牛顿液体就被用于机械密封并被称为磁脂密封。北京化工大学的查盛和许洋等^[28-29]的研究结果表明这种密封方式的单级密封压力更高,密封间隙更大且在对旋转轴密封时还允许存在少量的径向跳动。在火箭推进方面,非牛顿流体型的凝絮状的火箭推进剂也被采用^[30]。同时也有资料显示磁流变液也被尝试应用于对癌症的治疗,治疗中磁流变液被注射到血管中,在外置磁场作用下集聚成固体并封闭血管进而达到对癌症的饥饿治疗^[31]。

3 总结与展望

1) 目前非牛顿流体材料的应用领域正在不断地扩大和深化,它逐渐从减阻、印染等传统行业渗透到阻尼制动装置制造、防护装备制造以及超精密加工等领域中。在其应用中特殊的流变性能是关键。因为只有当它的某些流变特性如剪切增稠、剪切变稀、触变性、存在屈服应力等满足了实际工程的需求,其应用基础和必要性才会体现出来。

2) 虽然非牛顿流体材料在各方面的应用很多也很成功,但对非牛顿流体流变特性和流变规律的认识与把握的不足仍是制约其应用的关键因素。在应用中,我们总是希望对其流变性能做到可控,但往往很难实现。所以对非牛顿流体材料的微观结构和流变特性规律的研究仍应是我们后续研究工作的重点。

3) 纵观非牛顿流体材料的应用状况,其发展趋势应该是材料本身更加智能和流变性能更加可控。磁流变液和电流变液在生物医疗和精密加工等领域的成功应用就证明了这一点。

参考文献:

- [1] 吴其晔,巫静安. 高分子材料流变学[M]. 北京:高等教育出版社,2002:36-43.
- [2] SOCHI T. Flow of non-newtonian fluids in porous media [J]. Journal of Polymer Science: Part B Polymer Physics, 2010, 48 (23): 2437-2767.
- [3] 尹国栋,高淮民,陈少春,等. 聚合物减阻机理研究[J]. 油气储运, 2002, 21(7): 1-2.
- [4] 黄维丽,李惠萍,胡子昭,等. 溶剂对聚合物减阻剂流变行为和减阻性能的影响[J]. 当代化工, 2012, 41 (1): 41-43.
- [5] 邵禹铭. 管输油品减阻剂性能评价的研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2005: 11-13.
- [6] FIGUEREDO R C R, SABADINI E. Firefighting foam stability: the effect of the drag reducer poly(ethylene) oxide [J]. Colloids and Surfaces: A Physicochemical Engineering Aspects, 2003, 215(1-3): 77-86.
- [7] 王振东. 奇妙的非牛顿流体[J]. 力学与实践, 1998(20): 72-74.
- [8] MOWLA D, NADERI A. Experimental study of drag reduction by a polymeric additive in slug two-phase flow of crude oil and air in horizontal pipes [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(5): 1549-1554.
- [9] FIJAN R, BASILE M, ŠOSTAR-TURK S, et al. A study of rheological and molecular weight properties of recycled polysaccharides used as thickeners in textile printing [J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 76(1): 8-16.
- [10] FIJAN R, BASILE M, LAPASIN R. Rheological properties of printing pastes and their influence on quality-determining parameters in screen printing of cotton with reactive dyes using recycled polysaccharide thickeners [J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 78(1): 25-35.
- [11] 冯世宏. 乳液型丙烯酸酯增稠剂的研究[J]. 辽宁工学院学报, 2001, 21(1): 17-18.
- [12] 叶高勇, 张宝华. 水性丙烯酸增稠剂的合成及性能研究[J]. 印染助剂, 2004, 21(6): 9-11.
- [13] 刘斌. 改性粘滞流体及其阻尼器的研究[D]. 南京:东南大学, 2007: 11-13.
- [14] SPENCER JR B F, DYKE S J, SAIN M K, et al. Phenomenological model of a magnetorheological damper [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1997, 123(3): 230-238.
- [15] 程涛. 舰载机拦阻索磁流变阻尼器力学建模研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学, 2011: 41-44.
- [16] SPELTA C, PREVIDI F, SAVARESI S M, et al. Control of magnetorheological dampers for vibration reduction in a washing machine [J]. Mechatronics, 2009, 19(3): 410-421.
- [17] BICA I. Magnetorheological suspension electromagnetic brake [J]. Journal of Magnetism and Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 270(3): 321-326.
- [18] LEE Y S, WETZEL E D, WAGNER N J. The ballistic impact characteristics of Kevlar woven fabric impregnated with a colloidal shear thickening fluid [J]. Journal of Materials Science, 2003, 38(13): 2825-2833.

- [19] TAN V B C, TAY T E, TEO W K. Strengthening fabric armour with silica colloidal suspensions [J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(5-6): 1561-1576.
- [20] 徐晓锋. 新材料 d3o 造就的神奇滑雪服 [J]. 中国纤检, 2006(5): 1.
- [21] 孙希威, 张飞虎, 董申, 等. 磁流变抛光去除模型及驻留时间算法研究 [J]. 新技术新工艺, 2006(2): 73-75.
- [22] BICA L, LIU Y D, CHOI H J. Physical characteristics of magnetorheological suspensions and their applications [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2013, 19(2): 394-406.
- [23] KURIYAGAWA T, SAEKI M, SYOJI K. Electrorheological fluid-assisted ultra-precision polishing for small three-dimensional parts [J]. Precision Engineering, 2002, 26(4): 370-380.
- [24] KIM W B, MIN B K, LEE S J. Development of a padless ultraprecision polishing method using electrorheological fluid [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155-156: 1293-1299.
- [25] 汤勇, 周德明, 夏伟, 等. 磨料流加工壁面滑动特性的研究 [J]. 华南理工大学学报, 2001, 29(1): 34-37.
- [26] KENDA J, PUSAVEC F, KERMOUCHE G, et al. Surface integrity in abrasive flow machining of hardened tool steel AISI D2 [J]. Procedia Engineering, 2011, 19: 172-177.
- [27] 计时鸣, 李琛, 谭大鹏, 等. 基于 Preston 方程的软性磨粒流加工特性 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(17): 156-163.
- [28] 查盛, 张秋翔, 蔡纪宁, 等. 高黏度非牛顿磁性润滑脂密封的试验研究 [J]. 润滑与密封, 2010, 35(4): 90-93.
- [29] 许洋, 张秋翔, 蔡纪宁, 等. 高黏度非牛顿磁性流体密封耐压性能分析 [J]. 润滑与密封, 2009, 34(8): 42-44.
- [30] 闫大庆, 周宏民, 单建胜. 凝胶/膏状推进剂研究发展状况 [J]. 火箭推进, 2003, 29(1): 38-46.
- [31] SHENG R, FLORES G A, LIU J. In vitro investigation of a novel cancer therapeutic method using embolizing properties of magnetorheological fluids [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1999, 194(1-3): 167-175.

(上接第 108 页)

分布云图参见图 5。从图中可以看出, 最大轴向剪应力为 $\tau_{z\max} = 0.911\ 873\ \text{MPa}$, 远小于 PTFE 材料的许用剪应力 $[\tau] = 2.5\ \text{MPa}$, 同时与前面改进活塞环的轴向剪应力的理论计算结果 $\tau = 0.984\ \text{MPa}$ 吻合较好, 误差不超过 8%。

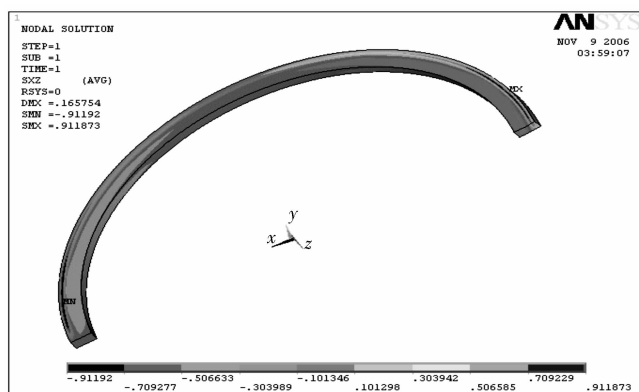


图 5 改进活塞环的轴向剪应力分布云图
Figure 5 Axial shear stress intensity distribution cloud of piston ring

5 结 语

上述有限元计算模型, 无论是对应力强度进行的校核, 还是对轴向剪应力的校核, 都选取了最危险的区域或者部位。而根据有限元计算结果表明, 上述危险工况下活塞环各危险区域的应力强度均在许用极限范围内, 依 JB4732-2005 分析设计标准知该结构安全。

参考文献:

- [1] 汪怀远, 冯新, 陆小华. [J]. 压缩机技术, 2006(2): 10-12.
- [2] 章扬烈. 钻柱运动学与动力学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- [3] 曾榆. 提高无油润滑往复活塞压缩机活塞环支撑环使用寿命的方法 [J]. 压缩机技术, 2010(4): 26-27.
- [4] 郑喜忠. 活塞式压缩机活塞环过快磨损的分析及解决办法 [J]. 低温与特气, 2011(4): 21-23.
- [5] 张胜民. 基于有限元软件 ANSYS 7.0 的结构分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [6] COOK R D, MALKUS D S, PLESHA M E, et al. 有限元分析的概念与应用 [M]. 关正西, 强洪夫, 译. 4 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [7] MOAVENI S. 有限元分析: ANSYS 理论与应用 [M]. 王崧, 刘丽娟, 董春敏, 等, 译. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2008.