文章编号:1674-2869(2024)04-0375-07

改性异佛尔酮二胺固化剂的制备与固化性能研究

梁 恩[1],彭世琼[1],唐霞霞[1],胡红兵[*2,3,4],余响林[1],闫志国[1],侯森森[1],徐章燕[1]

1. 武汉工程大学化工与制药学院,湖北 武汉 430205;
2. 武汉工程大学化学与环境工程学院,湖北 武汉 430205;
3. 广州市金永固新材料有限公司,广东 广州 510700;
4. 广州麦科凌电力装备有限公司,广东 广州 510900

摘 要:环氧树脂是一种应用广泛的热固性树脂,固化剂在环氧树脂体系占很大的比重。以环氧树脂对固化剂异佛尔酮二胺(IPDA)进行改性,通过不同的配比得到不同性能的改性固化剂。再以不同性能的改性固化剂分别与环氧树脂反应,制得不同的固化样品。运用Gelprof 518树脂行为分析仪对固化过程进行评价分析,对固化样品评价分析,改性固化剂的性能相较于未改性固化剂都有所提高,但性能存在不同,改性IPDA比例为m(NPEL-128):m(IPDA):m(benzyl alcohol)=9:46:45时,反应活性最强。此研究揭示了不同比例固化剂对环氧树脂固化的影响,为工业过程中固化剂改性提供了思路。

关键词:环氧树脂;异佛尔酮二胺;固化剂改性;力学性能;热固化行为

中图分类号:TQ323.5 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202311020

Preparation and curing properties of modified isophorone diamine curing agents

LIANG En[1], *PENG Shiqiong*[1], *TANG Xiaxia*[1], *HU Hongbing*[*2,3,4], *YU Xianglin*[1], *YAN Zhiguo*[1], *HOU Sensen*[1], *XU Zhangyan*[1]

1. School of Chemical Engineering and Pharmacy, Wuhan Institute of Engineering, Wuhan 430205, China;
2. School of Chemistry and Environmental Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;
3. Canton Kingyork New Materials Company, Guangzhou 510700, China;
4. Guangzhou Mpc Power International Co., Ltd, Guangzhou 510900, China

Abstract: Epoxy resin is a widely used thermosetting resin, and curing agent accounts for a large proportion of the epoxy resin system. We modified the curing agent isophorone diamine (IPDA) with epoxy resin by adjusting their ratios, to obtain modified curing agents with different properties; then we reacted the modified curing agents with epoxy resin to prepare different cured samples. Finally, we used the Gelprof 518 resin behavior analyzer to analyze and evaluate the curing process and cured samples. The performance of the modified curing agents is improved compared to the unmodified curing agent, but there are differences in performance, and the reactivity is the highest when m(NPEL-128):m(IPDA):m(benzyl alcohol)=9:46:45. This study reveals the effect of ratios of curing agents on the curing of epoxy resin, and provides ideas for the modification of curing agents in industrial processes.

Keywords: epoxy resin; isophorone diamine; curing agent modification; mechanical properties; thermal curing behavior

收稿日期:2023-11-28

基金项目:武汉工程大学第十五届研究生创新基金(CX2023011)

作者简介:梁 恩,硕士研究生。Email:1950694091@qq.com

***通信作者**:胡红兵,博士研究生。Email:henry.hu@kingyork.com

引文格式:梁恩,彭世琼,唐霞霞,等.改性异佛尔酮二胺固化剂的制备与固化性能研究[J].武汉工程大学学报,2024,46(4):375-381.

环氧树脂(epoxy,EP)是一种分子内含有2个或多个具有反应性环氧基团的高分子聚合物,作为一种热固性树脂,其以含有活泼氢的多种化合物与其具有较好化学活性的环氧基发生反应,以固化交联的方式生成网状结构,从而展现出优异的性能,如对金属较好的黏着力、强的耐化学腐蚀性、很好的力学强度和优异的电绝缘性[1-3]。其作为涂料时,通常被用作防腐蚀漆、金属底漆和绝缘漆等,但因其漆膜在户外条件下易粉化失光,所以导致其耐候性差,为改善其性能,通常以固化剂对其进行改性[4-6]。胺类固化剂是应用最广、用量最大的一类固化剂。胺类固化剂有很多种,分为脂肪族多元胺类固化剂、脂环族多元胺类固化剂、芳香族多元胺类固化剂和聚酰胺类固化剂等。脂肪族多元胺类固化剂具有活性高,可室温固化的优点,但其固化物脆性较大,挥发性和毒性较大。芳香族多元胺类固化剂具有良好的耐热性、耐化学性和较好的机械强度,但其大多为固体且活性低,大多需要加热后固化,工艺性较差。聚酰胺类固化剂挥发毒性小,增韧效果好,但固化剂耐热性、耐化学性和耐溶剂性较差,黏度大,固化活性也不高,在使用时常需加入促进剂。脂环族多元胺类固化剂适用期长,具有较好的耐候性,固化物的机械强度高,改性后的产品可室温固化。综上所述,脂环族多元胺类固化物比其他种类的胺类固化剂性能更好,所以我们采用带环氧基的烷烃加成胺合成改性固化剂。单纯的胺类固化剂不仅韧性、耐冲击性、耐候性欠佳,应用范围窄,而且还存在毒性大、易吸潮等缺点[7-8]。为符合绿色化学的要求,对初级胺类固化剂进行改性是克服这些缺陷的重要途径之一。如2011年赵科明等研究了天然产物腰果壳油提取的腰果酚、甲醛及异佛尔酮二胺发生曼尼希缩合反应合成新一代酚醛胺固化剂的改性工艺,其漆膜具有良好的铅笔硬度、拉伸强度、抗冲击性和耐腐蚀性等综合性能[9]。

异佛尔酮二胺(即3-氨甲基-3,5,5-三甲基环己烷,isophorone diamine,IPDA)是最常见的一种脂环族多元胺类固化剂。由于其含饱和性环己烷结构,此种二元伯胺可作为环氧树脂的固化剂,其固化物具有色泽稳定,不易泛黄,耐候性(耐紫外线)、耐化学药品及物理机械性能优良等特点,且耐热性接近多数芳香族多元胺类固化剂[10]。IPDA作为一种脂环族二胺,适用于大部分的胺参加的反应,在某些特定条件下,它适合与酮类、酸类和环氧类等物质发生反应。在室温下,IPDA可以与脂肪烃、卤代烃和芳香烃以及水、酯、醇、醚等以任意比例混合。同时由于IPDA易于改性[11-13],其改性产物在磁带黏合剂、软包装复合薄膜用黏合剂、油墨行业以及涂料领域都发挥着不可或缺的作用。IPDA主要用作环氧树脂的固化剂,其一个氨基通过甲基连接到环上,另一个直接连接在环上,这降低了氨基的反应活性。在室温下,IPDA与环氧树脂反应缓慢[14],但通过简单的改性可与环氧树脂在常温和潮湿的条件下固化,例如加入苯酚、水杨酸等物质促进其固化。

目前,固化剂与环氧树脂涂料的发展更加趋向于无毒、环保的方向。NPEL-128由双酚A(bisphenol A, BPA)与环氧氯丙烷反应生成,是环氧树脂的一种。其固化后安全无毒具有良好的物理机械性能、耐化学品性、电气绝缘性。苯甲醇材料无毒,在环氧树脂固化过程中能与环氧树脂很好地相溶,且能够促进环氧树脂与胺类固化剂的反应,提高固化剂的韧性。本研究以NPEL-128和IPDA为原料,在苯甲醇(benzyl alcohol, BA)溶剂中进行反应,通过不同的数据配比,来探究NPEL-128对IPDA的最佳改性配方。IPDA改性后,以不同配比的改性IPDA与NPEL-128反应后的固化物,对比未改性IPDA与NPEL-128的固化物,极大地改善了其相关性能,使其具有低色泽、低气味、高抗弯强度和优异耐化学性,适用于地坪涂料、工艺品等领域[15]。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

实验原料:NPEL-128,工业级,南亚塑胶昆山有限公司(中国江苏);IPDA,工业级,万华化学集团股份有限公司;BA,工业级,湖北科林博伦新材料有限公司;二氯甲烷(dichloromethane, DCM),工业级,阿拉丁试剂;石油醚(petroleum ether, PE,沸程60~90 ℃):工业级,阿拉丁试剂。

实验仪器:集热式恒温加热磁力搅拌器(DF-101S型,巩义市予华仪器有限责任公司);三用紫外分析仪(ZF-1,上海驰唐实业有限公司);树脂反应行为分析仪(Gelprof 518,武汉九迪复合材料有限公司);邵氏硬度计(LX-D,乐清市爱德堡仪器有限公司);拉力试验机(TCS-2000,台湾高铁检测仪器公司)。

1.2 IPDA改性机理

IPDA以脂肪伯胺上的活泼氢进攻环氧基团,使得环氧基团开环,与碳原子相连生成仲胺,形成

改性IPDA。合成路线如图1所示。

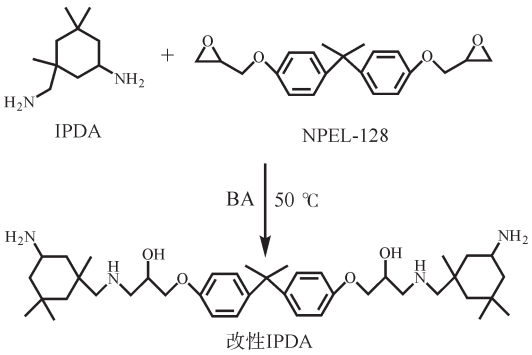


图1　双酚A型环氧树脂改性IPDA流程图

Fig. 1　IPDA modification flow chart with bisphenol A type epoxy resin

IPDA改性方案具体参数如表1所示。

表1　IPDA改性方案

Tab. 1　IPDA modification program

序号	原料			
	m(IPDA)/g	m(苯甲醇)/g	m(NPEL-128)/g	A/(g/mol)
I1	46	52	3	93.79
I2	46	45	3	88.16
I3	46	48	6	95.23
I4	46	45	6	92.37
I5	46	45	9	96.71
I6	46	45	12	101.20
I7	46	39	12	98.25

注：A为活性氢当量。

1.3　实验过程

固化剂、环氧树脂、苯甲醇的理论用量通过公式计算：

$$E=\frac{M_1}{n} \tag{1}$$

其中M_1为环氧树脂的分子量，n为每个环氧树脂分子的环氧基团的个数，E为环氧当量。

$$A=\frac{M_2}{n} \tag{2}$$

其中M_2为有机胺的分子量，n为每个有机胺分子的活性氢原子个数，A为活泼氢当量。

$$A=\frac{\sum_{k=1}^{n}W_k\%}{\frac{W_1\%}{A_1}+\frac{W_2\%}{A_2}+\cdots+\frac{W_n\%}{A_n}-\frac{W_E\%}{E}} \tag{3}$$

其中$W_1\%+W_2\%+\cdots+W_n\%+W_E\%=1$，$W_1\%$，$W_2\%\cdots W_n\%$，$W_E\%$分别为用量占比；$A$为活性氢当量，$E$为环氧当量。

通过公式(1)、(2)和(3)计算，参考文献内容，选取经验的质量比为m(NPEL-128)∶m(IPDA)∶m(BA)=9∶46∶45。保持IPDA比例不变，改变NPEL-128与BA比例，研究其性能差异。经计算得到改性固化剂中各用量质量比如表1所示。NPEL-128与IPDA反应式如图1所示。

1.3.1　单变量的IPDA改性　固定IPDA和BA的质量比(46∶45)，调整NPEL-128的质量，以不同的改性比例，对IPDA进行改性(具体配比见表1中的I2、I4、I5、I6)。称取IPDA到三口烧瓶中(250 mL)，室温条件下，使用磁力搅拌进行常温水浴，用恒压漏斗缓慢滴加BA并搅拌均匀，再称取NPEL-128于烧杯中，加入适量BA搅拌至完全溶解，将此混合液体缓慢滴加到三口烧瓶中，滴加完成后，打开升温装置进行反应，加热到50 ℃后，间隔时间进行取样，进行薄层层析验证，与原料样NPEL-128比对，点板结果在紫外分析中出现明显分层现象[展开液比例为V(PE)∶V(DCM)=1∶5]，代表反应完全，停止加热。

1.3.2　不同质量比NPEL-128和IPDA进行改性　确定IPDA的质量，由公式(3)计算出NPEL-128和BA的质量比进行改性(具体配比见表1之I1、I3、I5、I7)。称取IPDA到三口烧瓶中(250 mL)，室温条件下，使用磁力搅拌进行常温水浴，用恒压漏斗缓慢滴加BA并搅拌均匀，再称取NPEL-128于烧杯中，加入适量BA搅拌至完全溶解，将此混合液体缓慢滴加到三口烧瓶中，滴加完成后，打开升温装置进行反应，加热到50 ℃后，间隔一定时间进行取样，进行薄层层析验证，与参照样NPEL-128比对，点板结果在紫外分析中出现明显分层现象[展开液比例为V(PE)∶V(DCM)=1∶5]，代表反应完全，停止加热。

1.4　性能测试

(1)热固化行为测试

使用Gelprof 518树脂反应行为分析仪测试NPEL-128与改性IPDA的固化参数、稳定性和反应活性等[16]。调节分析仪的测试温度为80 ℃进行测试；将NPEL-128与未改性IPDA(I0)和改性IPDA(I1、I2……I7)分别按照2∶1比例混合搅拌均匀，静置消泡5 min，倒入试管，控制试管内溶液高度为5 cm左右，放入分析仪。

将未改性IPDA和不同比例的改性IPDA分别与NPEL-128混合，以1∶2的比例混合，混合物发生反应，制备不同性能的测试样品[17-19]。

(2)力学性能测试

硬度测试：将NPEL-128分别未改性IPDA

(I0)和改性IPDA(I1、I2……I7)按照2∶1比例进行混合并搅拌均匀,静置消泡后倒入容器中,使其在容器内高度均为4 mm左右,静置固化,分别在25 ℃下固化24 h、80 ℃下固化1 h,然后用LX-D邵氏硬度计分别进行测量硬度。

抗拉强度测试:将NPEL-128分别与未改性IPDA(I0)和改性IPDA(I1、I2……I7)按照2∶1比例进行混合并搅拌均匀,静置消泡后倒入模具中,使其分别在80 ℃下固化2 h和25 ℃下固化24 h;然后用TCS-2000拉力试验机测试固化以后的样品[20]。

2 结果与讨论

2.1 NPEL-128热固化行为分析

通过Gelprof 518树脂行为分析仪对不同配比化合物体系固化样品的热固化行为进行分析。不同配比的固化样品在分析仪测试过程中迅速固化,固化样品固化后,其中含有少量气泡。NPEL-128与未改性IPDA(I0)和不同的改性IPDA(I1、I2……I7)混合体系在分析过程中,温度从80 ℃逐步升高,NPEL-128与改性IPDA(I1、I2……I7)在加热后迅速升高,加快反应的进行,至峰值后,温度缓慢下降。Gelprof 518树脂行为分析仪测试结果如图2所示。

不同的改性IPDA对NPEL-128在固化过程中峰值温度有较明显变化。通过Gelprof 518树脂反应行为分析仪分析,在单组分改性IPDA(I2、I4、I5、I6)和双组分改性IPDA(I1、I3、I5、I7)对NPEL-128作用过程中,峰值温度随着改性IPDA中NPEL-128的量的增加而变低,而凝胶时间与固化时间都有缓慢的增大,这可能是因为固化峰值温度的变低所导致,固化所需要的热量在温度较低时需要更多的时间才能满足[21]。固化峰值温度的逐渐降低和固化时间的缓慢增大,表明从固化样品的热应力有明显降低、可操作时间就较小增加,这使得固化样品具有更好的结构与稳定性。

2.2 机械性能分析

机械性能测试结果如图3所示,NPEL-128在25 ℃与80 ℃下固化得到的样品拉伸强度差距不大,在80 ℃下固化拉伸强度略高。随着改性IPDA中NPEL-128的用量增加,其固化后的拉伸强度越大,当改性IPDA中NPEL-128用量占比为12时,

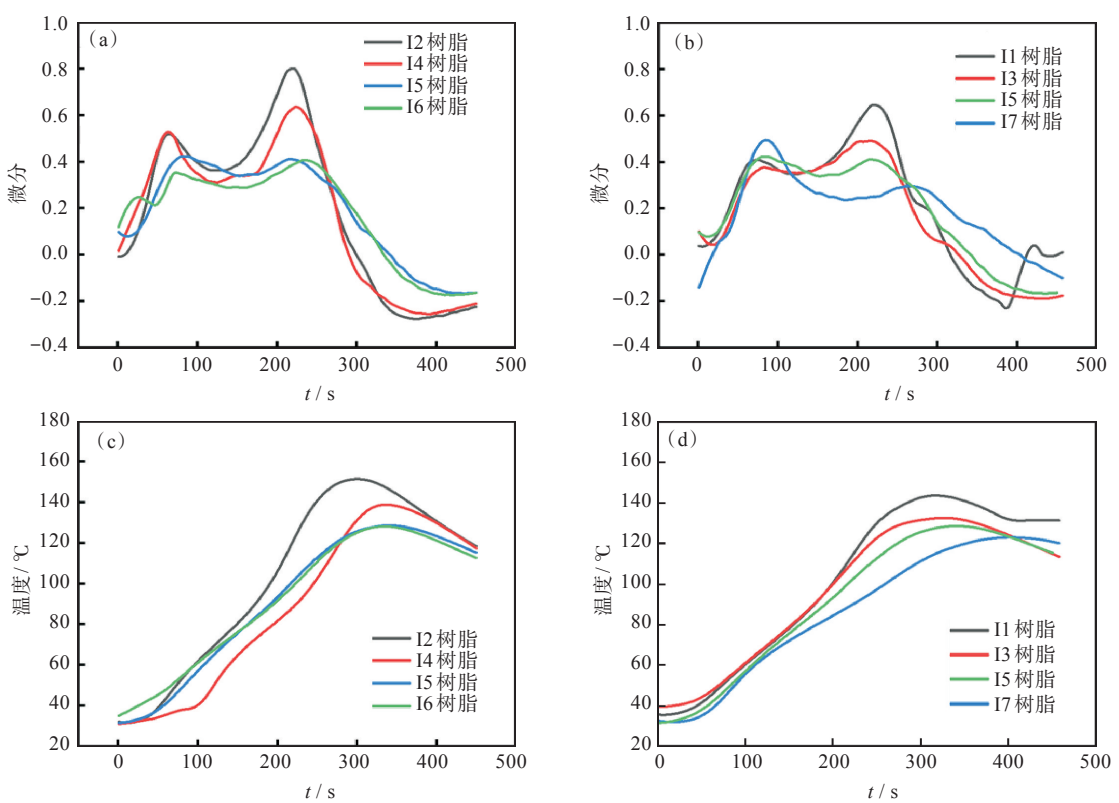
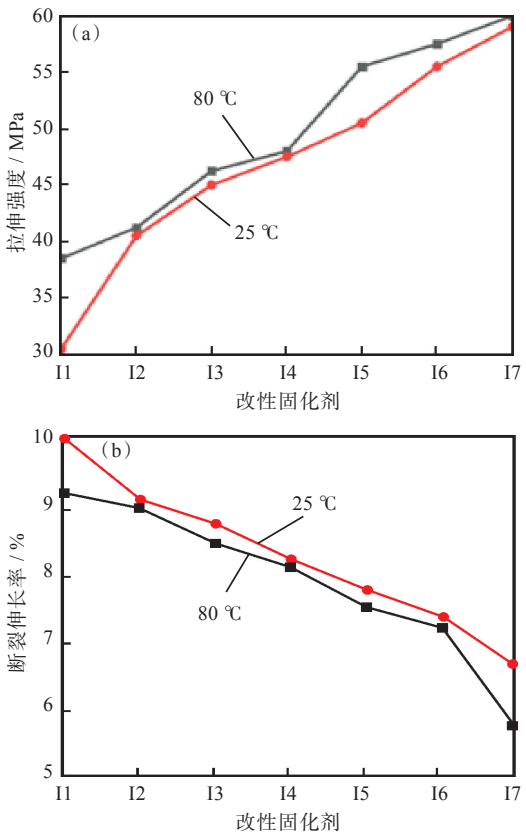


图2 (a,c)只改变NPEL-128量的改性IPDA固化剂与NPEL-128混合固化行为;(b,d)同时改变NPEL-128与BA量的改性IPDA与NPEL-128混合固化行为

Fig. 2 (a,c) Curing behavior of modified IPDA curing agent mixed with NPEL-128 by varying the amount of NPEL-128 only; (b)(d)Curing behavior of modified IPDA mixed with NPEL-128 by varying the amount of NPEL-128 and BA at the same time

NPEL-128在25 ℃下24 h固化得到的拉伸强度59.169 MPa，NPEL-128在80 ℃下1 h固化得到的拉伸强度分别59.844 MPa；相反，断裂伸长率随着改性IPDA中NPEL-128用量增加而减小，用相同的配方在25 ℃下24 h、80 ℃下1 h下的条件下进行固化检测得到的断裂伸长率相差较小，并且其数值小于10%，比较下相对较低，这说明材料进行拉伸后，变化的长度较小，表明其刚性较好，另一方面，可能在进行拉伸测试时，调节拉伸速度较大，也会导致断裂伸长率变小。但相比之下常温下固化得到的断裂伸长率略高，韧性较好。



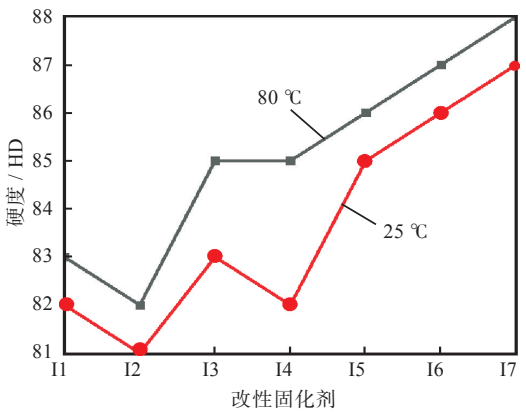
注：24 h测试。

图3　改性固化剂对环氧树脂拉伸强度(a)断裂伸展率(b)的影响

Fig. 3　Effect of modified curing agents on the tensile strength (a) and fracture elongation (b) of epoxy resin

2.3　硬度性能分析

改性IPDA对环氧树脂硬度的影响如图4所示，结果显示，随着改性IPDA质量比的改变，固化后样品的硬度也随之增大，这表明加入的固化剂对样品的硬度有促进作用，固化样品的硬度都在80 HD以上，说明样品的硬度不错。当其与NPEL-128质量比为1∶2时，其在25 ℃下固化24 h得到的硬度为87 HD，在80 ℃下固化1 h得到的硬度为88 HD。在进行I2和I4硬度测试时，其测试的数值相对偏低，其原因可能是在样品进行固化时，有少许的气泡存在于样品中，没有达到完全消泡的效果，导致液体分布不均匀，固化后有空隙的存在，所以硬度偏低。



注：24 h测试。

图4　改性固化剂对环氧树脂硬度的影响

Fig. 4　Effect of modified curing agents on the hardness of epoxy resin

2.4　混合固化比例误差分析

本文在混合固化的过程中，NPEL-128和不同的改性IPDA的质量比例恒定为2∶1，但由于合成不同的改性IPDA的物质比例不同，混合固化的实际比例与理论比例存在误差，具体误差分析如表2所示。

2.5　未改性IPDA与改性IPDA性能对比

通过Gelprof 518树脂行为分析仪对未改性

表2　混合固化误差分析

Tab. 2　Mix curing error analysis

改性IPDA	理论比例[*m*(NPEL-128)∶*m*(改性IPDA)]	实际比例[*m*(NPEL-128)∶*m*(改性IPDA)]	绝对误差	相对误差 / %
I6	1.84∶1	2∶1	0.16	8.7
I7	1.89∶1	2∶1	0.11	5.8
I5	1.92∶1	2∶1	0.08	4.2
I3	1.95∶1	2∶1	0.05	2.6
I1	1.98∶1	2∶1	0.02	1
I4	2.01∶1	2∶1	−0.01	−0.5
I2	2.11∶1	2∶1	−0.11	−5.2

IPDA和改性IPDA的热固化行为进行分析，如图5所示。改性后的IPDA与NPEL-128热固化的峰值温度明显低于未改性IPDA与NPEL-128热固化的峰值温度，固化时间有小幅度增加，这表明改性后的IPDA在与NPEL-128反应固化的过程中的可操纵时间长、产生的热应力更小、固化样品具有更好的结构和稳定性。

改性IPDA与NPEL-128的固化样品比未改性IPDA对NPEL-128的固化样品相比，其硬度、断裂伸长率和热固化温度都有明显改变。这表明改性IPDA与NPEL-128的固化样品具有更高的硬度、更好的韧性，更小的热应力和更长的可操作时间。

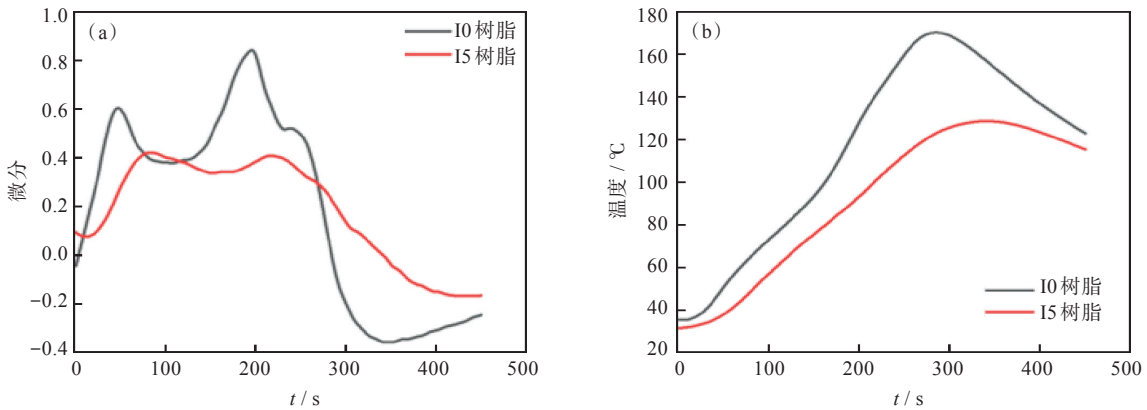


图5 未改性IPDA(a)与改性IPDA(b)的热固化行为对比

Fig. 5 Comparison of the heat-curing behavior of unmodified (a) and modified (b) IPDA

表3 未改性IPDA固化样品与改性IPDA固化样品性能对比

Tab.3 Comparison of performance of unmodified IPDA-cured samples and modified IPDA-cured samples

IPDA固化样品	硬度 / HD	断裂伸长率 / %	拉伸强度 / MPa	热固化温度 / ℃
未改性IPDA树脂固化样品	78	3.6	55	170.1
改性IPDA树脂固化样品	86	7.8	55	128.5

3 结论与展望

本文以NPEL-128对IPDA进行改性，溶剂为BA，改性过程分为两组，一组只改变NPEL-128的质量比例，另一组同时改变BA与NPEL-128的质量比例，得到不同的改性IPDA。随后，将不同的改性IPDA与NPEL-128以1∶2的质量比例混合固化。

用NPEL-128对IPDA进行改性时，NPEL-128与改性固化剂混合体系固化后的硬度增加，随着NPEL-128质量比的增大。改性IPDA比例为m(NPEL-128)∶m(IPDA)∶m(BA)=9∶46∶45时，反应活性最强。改性IPDA具有比未改性IPDA更好的性能。此外，用NPEL-128对IPDA改性后，其与NPEL-128混合固化峰值温度变低，热应力显著减小。可操作时间有一定提升。本文介绍了一系列新的改性IPDA，以不同的改性条件探究了其对NPEL-128固化的影响，为IPDA的进一步改性与NPEL-128更好地固化提供了思路。

致谢

这项工作得到了武汉东昌仓贮技术有限公司的资助，在此表示深深的谢意！

参考文献

[1] 王德中.环氧树脂生产与应用[M].北京：化学工业出版社，2004：6-7.

[2] TKACHUK A I, ZAGORA A G, TEREKHOV I V, et al. Isophorone diamine- a curing agent for epoxy resins: production, application, prospects. A review [J]. Polymer Science, Series D, 2022, 15(2): 171-176.

[3] ZHAO X, HUANG Z, SONG P, et al. Curing kinetics and mechanical properties of epoxy resin / 1-benzyl-2-methylimidazole / isophorone diamine system [J]. Thermochimica Acta, 2020, 690: 178657.

[4] 焦阳，骆怡欣，尹吉鑫，等.胺类环氧树脂固化剂改性研究进展[J].武汉工程大学学报，2023，45(3)：251-255.

[5] 刘宁.双马来酰亚胺改性环氧树脂体系的性能研究[D].长沙：湖南工业大学，2012.

[6] 马骏，孙冬，张明爽，等.氧化石墨烯改性环氧树脂涂料的制备及防腐性能[J].化工进展，2021，40(8)：4456-4462.

[7] 肖卫东，何培新.环氧树脂胺类固化剂的改性[J].胶体与聚合物，2001，19(2)：27-29.

[8] 洪臻，王长松，梁兵，等.环氧树脂胺类固化剂的研究进展[J].化工新型材料，2014，42(8)：12-15.
[9] 赵科明，王飞镝，邱清华，等.改性异佛尔酮二胺环氧固化剂的合成与性能研究[J].新型建筑材料，2011，38(6)：54-58.
[10] 田兴和.异佛尔酮二胺固化剂的特征与应用[C]// 全国环氧树脂应用技术学术交流会，2003.
[11] 杨娟，王贵友，胡春国.改性二胺合成新型脂肪族聚脲弹性体[J].华东理工大学学报(自然科学版)，2003，29(5)：480-483.
[12] 赵科明，王飞鏑，邱清华，等.改性异佛尔酮二胺环氧固化剂的合成与性能研究[J].新型建筑材料，2011，38(6)：54-58.
[13] 石学堂，吴雪梅，贺高红，等.曼尼希改性异佛尔酮二胺环氧固化剂性能研究[J].化学与黏合，2008，30(5)：8-11.
[14] 谭家项，程珏，郭品，等.几种胺类固化剂对环氧树脂固化行为及固化物性能的影响[J].化工学报，2011(6)：249-255.
[15] 吴晗瑄.环氧树脂的改性研究[D].武汉：华中师范大学，2011.
[16] 吴攀洛，张思思，李文翔，等.异佛尔酮二胺/环氧树脂非等温固化动力学研究[J].胶体与聚合物，2018，36(2)：69-71.
[17] 李娟，蔡益波.环氧树脂的力学性能研究进展[J].中国胶黏剂，2020，29(3)：52-56，65.
[18] 段国晨，赵景丽，赵伟超.E51环氧树脂基碳纤维复合材料力学性能研究[J].粘接，2018，39(8)：42-44.
[19] 汪澎，隋刚，杨小平.环氧树脂与胺类固化剂当量比对固化物性能的影响[J].玻璃钢/复合材料，2013(2)：22-27.
[20] 陈煜阳，陈炳耀，欧佳丽，等.不同种类环氧树脂对胶黏剂力学性能的影响[J].化学与黏合，2022，44(5)：397-399.
[21] WU Z，YAN G，LU J，et al. Thermal plastic and optical transparent polyimide derived from isophorone diamine and sulfhydryl compounds [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research，2019，58(17)：6992-7000.

本文编辑：张　瑞

☆

(上接第374页)

[22] 齐丛正，陈林根，戈延林.广义不可逆热布朗马达生态学最优性能[J].工程热物理学报，2022，43(10)：2559-2564.
[23] 丁泽民，陈林根，戈延林，等.不可逆双谐振通道电子热机生态学性能优化[J].工程热物理学报，2014，35(6)：1035-1039.
[24] 秦晓勇，陈林根，戈延林，等.基于㶲分析的不可逆变温热源四温位吸收式热变换器循环生态学性能[J].太阳能学报，2016，37(11)：2849-2855.
[25] CHEN L G，SHI S S，GE Y L，et al. Ecological function performance analysis and multi-objective optimization for an endoreversible four-reservoir chemical pump [J]. Energy，2023，282：128717.
[26] CHEN L G，GE Y L，QIN X Y，et al. Exergy-based ecological optimization for a four-temperatue-level absorption heat pump with heat resistance，heat leakage and internal irreversibility [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer，2019，129：855-861.
[27] 魏轩宇，殷勇，汪浩，等.量子卡诺热机有效功率优化[J].武汉工程大学学报，2023，45(3)：312-318.
[28] 丁佳，殷勇，陈林根，等.量子狄塞尔热泵循环性能分析[J].武汉工程大学学报，2022，44(1)：92-96.
[29] 刘存，殷勇，杨晗，等.不可逆量子斯特林热泵循环性能分析与优化[J].武汉工程大学学报，2021，43(2)：232-236.

本文编辑：张　瑞